

SERWAY | VUILLE



Fundamentos de Física

NOVENA EDICIÓN

VOLUMEN 2



SERWAY/VUILLE

Fundamentos de Física

NOVENA EDICIÓN

Volumen 2

Raymond A. Serway | *Emeritus, James Madison University*

Chris Vuille | *Embry-Riddle Aeronautical University*

Traducción

Dra. Ana Elizabeth García Hernández
Universidad La Salle, Morelia.

Revisión técnica

Dr. Ernesto Filio López
*Unidad Profesional en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas
Instituto Politécnico Nacional.*



Fundamentos de Física

Novena edición, volumen 2.
Raymond A. Serway y Chris Vuille

**Presidente de Cengage Learning
Latinoamérica:**

Fernando Valenzuela Migoya

**Director Editorial, de Producción
y de Plataformas Digitales para
Latinoamérica:**

Ricardo H. Rodríguez

**Gerente de Procesos para
Latinoamérica:**

Claudia Islas Licona

**Gerente de Manufactura para
Latinoamérica:**

Raúl D. Zendejas Espejel

**Gerente Editorial de Contenidos
en Español:**

Pilar Hernández Santamarina

Coordinador de Manufactura:

Rafael Pérez González

Editores:

Sergio R. Cervantes González
Abril Vega Orozco

Diseño de portada:

Anneli Daniela Torres Arroyo

Imagen de portada:

Andrey Tranchuck
Shutterstock

Composición tipográfica:

Foto Gráfico & Diseño
Humberto Núñez Ramos

© D.R. 2012 por Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.,
una Compañía de Cengage Learning, Inc.
Corporativo Santa Fe
Av. Santa Fe, núm. 505, piso 12
Col. Cruz Manca, Santa Fe
C.P. 05349, México, D.F.
Cengage Learning® es una marca registrada
usada bajo permiso.

DERECHOS RESERVADOS. Ninguna parte de
este trabajo, amparado por la Ley Federal del
Derecho de Autor, podrá ser reproducida,
transmitida, almacenado o utilizada en
cualquier forma o por cualquier medio, ya sea
gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo,
pero sin limitarse a lo siguiente: fotocopiado,
reproducción, escaneo, digitalización,
grabación en audio, distribución en internet,
distribución en redes de información o
almacenamiento y recopilación en sistemas
de información, a excepción de lo permitido
en el Capítulo III, Artículo 27 de la Ley Federal
del Derecho de Autor, sin el consentimiento
por escrito de la Editorial.

Traducido del libro:

College Physics, Ninth Edition, Volume 2.

Raymond A. Serway and Chris Vuille

Publicado en inglés por Brooks & Cole, una compañía
de Cengage Learning ©2012

ISBN: 978-0-8400-6850-7

Datos para catalogación bibliográfica:

Serway, Raymond A. y Chris Vuille.

Fundamentos de Física, novena edición, volumen 2.

ISBN: 978-607-481-878-9

Visite nuestro sitio web en:

<http://latinoamerica.cengage.com>

Dedicamos este libro a nuestras esposas, hijos, nietos, parientes y amigos que nos han brindado tanto amor, apoyo y comprensión a través de los años, así como a los estudiantes para los cuales fue escrito.

■ Contenido general

VOLUMEN 2

PARTE 4 | Electricidad y magnetismo

Capítulo 15 Fuerzas eléctricas y campos eléctricos	513	Capítulo 19 Magnetismo	648
Capítulo 16 Energía eléctrica y capacitancia	548	Capítulo 20 Voltajes inducidos e inductancia	688
Capítulo 17 Corriente y resistencia	590	Capítulo 21 Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas	723
Capítulo 18 Circuitos de corriente directa	616		

PARTE 5 | Luz y óptica

Capítulo 22 Reflexión y refracción de la luz	761	Capítulo 24 Óptica ondulatoria	824
Capítulo 23 Espejos y lentes	790	Capítulo 25 Instrumentos ópticos	859

PARTE 6 | Física moderna

Capítulo 26 Relatividad	885	Capítulo 29 Física nuclear	957
Capítulo 27 Física cuántica	911	Capítulo 30 Energía nuclear y partículas elementales	982
Capítulo 28 Física atómica	934		
APÉNDICE A: Repaso de Matemáticas	A.1	APÉNDICE E Guía de estudio para adquirir habilidades MCAT	A.22
APÉNDICE B: Tabla de isótopos abreviada	A.14	Respuestas a los exámenes rápidos, preguntas de ejemplo, preguntas impares, preguntas de opción múltiple, preguntas conceptuales y problemas	A.52
APÉNDICE C: Algunas tablas útiles	A.19	Índice	I.1
APÉNDICE D: Unidades SI	A.21		

ACERCA DE LOS AUTORES vii
PREFACIO ix
ATRATIVAS APLICACIONES xxiv
AL ESTUDIANTE xxvi
GUÍA DE PREPARACIÓN PARA EL EXAMEN MCAT xxx

PARTE 4 | Electricidad y magnetismo

CAPÍTULO 15 Fuerzas eléctricas y campos eléctricos 513

- 15.1 Propiedades de las cargas eléctricas 514
- 15.2 Aislantes y conductores 515
- 15.3 Ley de Coulomb 517
- 15.4 El campo eléctrico 522
- 15.5 Líneas de campo eléctrico 526
- 15.6 Conductores en equilibrio electrostático 529
- 15.7 El experimento de la gota de aceite de Millikan 531
- 15.8 El generador Van de Graaff 532
- 15.9 Flujo eléctrico y ley de Gauss 533
- Resumen 539

CAPÍTULO 16 Energía eléctrica y capacitancia 548

- 16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico 548
- 16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales 555
- 16.3 Potenciales y conductores cargados 558
- 16.4 Superficies equipotenciales 559
- 16.5 Aplicaciones 560
- 16.6 Capacitancia 562
- 16.7 El capacitor de placas paralelas 563
- 16.8 Combinaciones de capacitores 565
- 16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado 571
- 16.10 Capacitores con dieléctricos 573
- Resumen 579

CAPÍTULO 17 Corriente y resistencia 590

- 17.1 Corriente eléctrica 590
- 17.2 Visión microscópica: corriente y velocidad de deriva 593
- 17.3 Medición de corriente y voltaje en circuitos 595
- 17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm 596
- 17.5 Variación de la resistencia con la temperatura 599
- 17.6 Energía eléctrica y potencia 601
- 17.7 Superconductores 604
- 17.8 Actividad eléctrica en el corazón 605
- Resumen 608

CAPÍTULO 18 Circuitos de corriente directa 616

- 18.1 Fuentes de fem 616
- 18.2 Resistores en serie 617
- 18.3 Resistores en paralelo 620
- 18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos 625
- 18.5 Circuitos RC 629
- 18.6 Circuitos domésticos 633
- 18.7 Seguridad eléctrica 634
- 18.8 Conducción de señales eléctricas por las neuronas 635
- Resumen 638

CAPÍTULO 19 Magnetismo 648

- 19.1 Imanes 648
- 19.2 Campo magnético de la Tierra 650
- 19.3 Campos magnéticos 652

- 19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente 655
- 19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos 658
- 19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético 661
- 19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère 664
- 19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos 667
- 19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides 669
- 19.10 Dominios magnéticos 673
- Resumen 675

CAPÍTULO 20 Voltajes inducidos e inductancia 688

- 20.1 Fem inducida y flujo magnético 688
- 20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz 691
- 20.3 Fem de movimiento 697
- 20.4 Generadores 701
- 20.5 Autoinductancia 705
- 20.6 Circuitos RL 707
- 20.7 Energía almacenada en un campo magnético 711
- Resumen 712

CAPÍTULO 21 Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas 723

- 21.1 Resistores en un circuito CA 723
- 21.2 Capacitores en un circuito CA 727
- 21.3 Inductores en un circuito CA 728
- 21.4 El circuito RLC en serie 730
- 21.5 Potencia en un circuito CA 734
- 21.6 Resonancia en un circuito RLC en serie 735
- 21.7 El transformador 737
- 21.8 Predicciones de Maxwell 739
- 21.9 Confirmación de Hertz de las predicciones de Maxwell 740
- 21.10 Producción de ondas electromagnéticas mediante una antena 741
- 21.11 Propiedades de las ondas electromagnéticas 742
- 21.12 El espectro de ondas electromagnéticas 746
- 21.13 El efecto Doppler para ondas electromagnéticas 750
- Resumen 750

PARTE 5 | Luz y óptica

CAPÍTULO 22 Reflexión y refracción de la luz 761

- 22.1 La naturaleza de la luz 761
- 22.2 Reflexión y refracción 762
- 22.3 La ley de refracción 767
- 22.4 Dispersión y prismas 771
- 22.5 El arco iris 774
- 22.6 Principio de Huygens 775
- 22.7 Reflexión interna total 777
- Resumen 780

CAPÍTULO 23 Espejos y lentes 790

- 23.1 Espejos planos 790
- 23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos 793
- 23.3 Espejos convexos y convenciones de signo 795
- 23.4 Imágenes formadas por refracción 801
- 23.5 Refracción atmosférica 803
- 23.6 Lentes delgadas 804
- 23.7 Aberraciones de lentes y espejos 814
- Resumen 815

CAPÍTULO 24 Óptica ondulatoria 824

- 24.1 Condiciones para interferencia 824
- 24.2 Experimento de doble rendija de Young 825
- 24.3 Cambio de fase debido a reflexión 829
- 24.4 Interferencia en películas delgadas 830
- 24.5 Uso de interferencia para leer CD y DVD 835
- 24.6 Difracción 836
- 24.7 Difracción de una sola rendija 837
- 24.8 La rejilla de difracción 839
- 24.9 Polarización de ondas de luz 842
- Resumen 849

CAPÍTULO 25 Instrumentos ópticos 859

- 25.1 La cámara 859
- 25.2 El ojo 860
- 25.3 El amplificador simple 865
- 25.4 El microscopio compuesto 866
- 25.5 El telescopio 868
- 25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares 871
- 25.7 El interferómetro Michelson 876
- Resumen 877

PARTE 6 | Física moderna**CAPÍTULO 26 Relatividad 885**

- 26.1 Relatividad galileana 885
- 26.2 La velocidad de la luz 886
- 26.3 Principio de relatividad de Einstein 888
- 26.4 Consecuencias de la relatividad especial 889
- 26.5 Cantidad de movimiento relativista 897
- 26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial 898
- 26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía 899
- 26.8 Relatividad general 903
- Resumen 905

CAPÍTULO 27 Física cuántica 911

- 27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck 911
- 27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz 913
- 27.3 Rayos X 916
- 27.4 Difracción de rayos X mediante cristales 918
- 27.5 El efecto Compton 920
- 27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia 922
- 27.7 La función de onda 925
- 27.8 El principio de incertidumbre 926
- Resumen 928

CAPÍTULO 28 Física atómica 934

- 28.1 Primeros modelos del átomo 934
- 28.2 Espectros atómicos 935

- 28.3 El modelo de Bohr 937
- 28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno 942
- 28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica 945
- 28.6 Rayos X característicos 947
- 28.7 Transiciones atómicas y láseres 949
- Resumen 951

CAPÍTULO 29 Física nuclear 957

- 29.1 Algunas propiedades del núcleo 957
- 29.2 Energía de enlace 960
- 29.3 Radiactividad 962
- 29.4 Los procesos de decaimiento 965
- 29.5 Radiactividad natural 971
- 29.6 Reacciones nucleares 971
- 29.7 Aplicaciones médicas de la radiación 973
- Resumen 976

CAPÍTULO 30 Energía nuclear y partículas elementales 982

- 30.1 Fisión nuclear 982
- 30.2 Fusión nuclear 986
- 30.3 Partículas elementales y las fuerzas fundamentales 989
- 30.4 Positrones y otras antipartículas 990
- 30.5 Clasificación de partículas 990
- 30.6 Leyes de conservación 992
- 30.7 El método óctuple 995
- 30.8 Quarks y color 995
- 30.9 Teoría electrodébil y el modelo estándar 997
- 30.10 La conexión cósmica 999
- 30.11 Preguntas sin responder en cosmología 1000
- 30.12 Problemas y perspectivas 1003
- Resumen 1004

APÉNDICE A: Repaso matemático A.1**APÉNDICE B: Tabla abreviada de isótopos A.14****APÉNDICE C: Algunas tablas útiles A.19****APÉNDICE D: Unidades SI A.21****APÉNDICE E: Guía de estudio de habilidades MCAT A.22**

Respuestas a los exámenes rápidos, preguntas de ejemplo, preguntas impares, preguntas de opción múltiple, preguntas conceptuales y problemas A.52

Índice I.1

Raymond A. Serway obtuvo su licenciatura en física en Utica College en 1959, su maestría en física en la Universidad de Colorado en 1961 y su doctorado en el Illinois Institute of Technology en 1967. Es profesor emérito en la Universidad James Madison. En 1990 recibió la Madison Scholar Award en dicha universidad, donde impartió clases durante 17 años. El Dr. Serway comenzó su carrera docente en la Universidad Clarkson, donde realizó investigación e impartió clases de 1967 a 1980. Recibió el Distinguished Teaching Award en la Universidad Clarkson en 1977 y el Alumni Achievement Award de la Utica College en 1985. Como científico invitado en el IBM Research Laboratory en Zúrich, Suiza, trabajó con K. Alex Müller, ganador del Premio Nobel en 1987. El Dr. Serway también fue científico visitante en el Argonne National Laboratory, donde colaboró con su mentor y amigo, Sam Marshall. Al inicio de su carrera, trabajó como investigador científico en el Rome Air Development Center de 1961 a 1963 y en el IIT Research Institute de 1963 a 1967. El Dr. Serway es coautor de *Física para ciencias e ingeniería*, octava edición; *Principios de Física: texto basado en cálculo*, cuarta edición; *Fundamentos de Física para bachillerato* y *Física Moderna*, tercera edición. También es coautor del libro de bachillerato *Física*, publicado por Holt, Reinhart y Winston. Además, el Dr. Serway ha publicado más de 40 artículos en el campo de la física de materia condensada e impartido más de 70 conferencias en reuniones profesionales. El Dr. Serway y su esposa, Elizabeth, disfrutan viajar, jugar golf, la pesca, la jardinería, cantar en el coro de una iglesia y pasar tiempo con sus cuatro hijos, nueve nietos y su bisnieto.



Chris Vuille es profesor asociado de física en la Embry-Riddle Aeronautical University (ERAU), en Daytona Beach, Florida, la institución líder en el mundo para educación superior en aviación. Recibió su doctorado en física de la Universidad de Florida en 1989 y se mudó a Daytona después de un año en el campus de la ERAU en Prescott, Arizona. Aunque ha impartido cursos en todos los niveles, incluido posgrado, su principal interés es la física introductoria. Ha recibido varios premios por excelencia académica, incluido el Senior Class Appreciation Award (tres veces). Realiza investigación acerca de relatividad general y teoría cuántica, y participó en el programa JOVE, un proyecto de beca especial de tres años de la NASA durante el cual estudió estrellas de neutrones. Su obra aparece en varias revistas científicas y ha sido escritor científico en la revista *Analog Science Fiction/Science Fact*. Además de este libro, es coautor de *Fundamentos de Física para bachillerato*. Al Dr. Vuille le gusta jugar tenis, nadar y tocar piezas clásicas en el piano, y fue campeón de ajedrez en St. Petersburg y Atlanta. En su tiempo libre escribe ficción y va a la playa. Su esposa, Dianne Kowing, es optometrista en una clínica local de Administración de Veteranos. Su hija, Kira Vuille-Kowing, tiene doble especialidad en meteorología/comunicaciones en la ERAU y es graduada del curso de física de primer año de su padre. Tiene dos hijos, Christopher, chelista y piloto, y James, ávido lector de cuentos de Disney.



Fundamentos de Física se escribió para un curso de un año de introducción a la física, que por lo general cursan los estudiantes que se especializan en biología, las profesiones de la salud y otras disciplinas que incluyen ciencias ambientales, de la tierra y sociales, y campos técnicos como la arquitectura. Las técnicas matemáticas que se utilizan en este libro incluyen álgebra, geometría y trigonometría, mas no cálculo.

Este libro, que cubre los temas estándar de la física clásica y la física del siglo xx, se divide en seis partes. La parte 1 (capítulos 1-9) trata de la mecánica newtoniana y la física de fluidos; la parte 2 (capítulos 10-12) se ocupa del calor y la termodinámica; la parte 3 (capítulos 13 y 14) cubre el movimiento ondulatorio y el sonido; la parte 4 (capítulos 15-21) desarrolla los conceptos de electricidad y magnetismo; la parte 5 (capítulos 22-25) trata las propiedades de la luz y el campo de las ópticas geométrica y ondulatoria, y la parte 6 (capítulos 26-30) proporciona una introducción a la relatividad especial, física cuántica, física atómica y física nuclear.

Objetivos

Los principales objetivos de este libro introductorio son dos: proporcionar al estudiante una presentación clara y lógica de los conceptos y principios básicos de la física y fortalecer su comprensión mediante un amplio rango de interesantes aplicaciones con el mundo real. Para alcanzar estos objetivos, enfatizamos firmes argumentos físicos y una metodología para resolver problemas. Al mismo tiempo intentamos motivar al estudiante a través de ejemplos prácticos que demuestren el papel de la física en otras disciplinas.

Cambios en la novena edición

En esta edición se hicieron un gran número de cambios y mejoras. Algunas de las nuevas características están basadas en nuestras experiencias y las tendencias actuales en la educación. Otros cambios fueron incorporados respondiendo a las sugerencias de los usuarios de la octava edición y de los revisores. Las siguientes características representan los principales cambios en la novena edición.

Análisis desde Enhanced WebAssign que se usa para revisar las preguntas y problemas

Como parte de la revisión de las preguntas y los conjuntos de problemas, los autores utilizaron análisis extensos de los usuarios recogidos por Enhanced WebAssign, tanto de los instructores que asignan y como de los estudiantes que trabajaron en los problemas de ediciones anteriores de *Fundamentos de Física*. Estos análisis ayudan enormemente, indicando que la redacción de los problemas podría ser más clara y proporcionando orientación sobre la manera de revisar los problemas para que fueran más fáciles de entender para los estudiantes y más fácil de asignar en Enhanced WebAssign. Por último, los análisis fueron utilizados para asegurar que los problemas asignados con mayor frecuencia fueran seleccionados para esta nueva edición. En conjunto, los problemas de cada capítulo, el cuartil superior de los problemas que fueron asignados en Enhanced WebAssign tienen **sombreado azul** los números de problema, para facilitar su identificación, permitiendo a los profesores encontrar rápida y fácilmente los problemas más populares asignados en Enhanced WebAssign.

Integración con Enhanced WebAssign

La estrecha integración del contenido de los libros de texto con Enhanced WebAssign facilita un entorno de aprendizaje en línea que ayuda a los estudiantes a mejorar sus habilidades de solución de problemas y les da una variedad de herramientas para satisfacer sus estilos individuales de aprendizaje. Nuevos en esta edición, los tutoriales Master It ayudan a los estudiantes a resolver problemas al tener que trabajar a través de una solución escalonada. Problemas con el tutorial Master It se indican con un icono **M** en cada conjunto de problemas del capítulo. Además, la solución en video Watch It explica los fundamentos de las estrategias de solución de problemas para ayudar a los estudiantes por medio de los problemas seleccionados. Los problemas asignados más frecuentemente en la Enhanced WebAssign (sombreadas en azul) tienen comentarios para hacer frente a concepciones erróneas de los estudiantes, ayudándolos a evitar errores comunes.

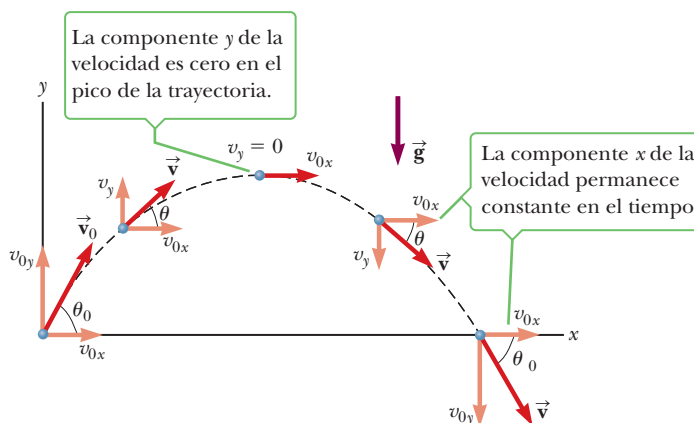
Revisión a fondo de las ilustraciones

Cada ilustración en la novena edición ha sido revisada en un estilo nuevo y moderno que ayuda a expresar los principios de la física en el trabajo de una manera más clara y precisa. También se ha revisado cada gráfica para asegurarse de que las situaciones físicas que se presentaban correspondiera exactamente a la discusión del texto en cuestión.

También se ha añadido para esta edición una nueva característica de muchas figuras: “Las etiquetas de orientación” que señalan las características importantes de la figura y guían a los estudiantes a través de las figuras sin tener que volver atrás y hacia adelante de la leyenda de la figura a la figura misma. Este formato también ayuda a aquellos estudiantes que son aprendices visuales. Un ejemplo de este tipo de figura aparece a continuación.

Figura activa 3.14

Trayectoria parabólica de una partícula que deja el origen con una velocidad de \vec{v}_0 . Observe que \vec{v} cambia con el tiempo. De cualquier modo, la componente x de la velocidad, v_x , permanece constante en el tiempo igual que su velocidad inicial v_{0x} . Además, $v_y = 0$ en el pico de la trayectoria, pero la aceleración siempre es igual a la aceleración en caída libre y actúa verticalmente hacia abajo.



Cambios en el contenido

El texto se editó cuidadosamente para mejorar la claridad de la presentación y la precisión del lenguaje. Esperamos que el resultado sea un libro tanto preciso como agradable de leer. Aunque el contenido y la organización globales del libro son similares a la octava edición, se realizaron algunos cambios que se enlistan a continuación y aparecerán en los dos volúmenes:

- **Capítulo 1, “Introducción”.** Se ha mejorado el análisis de la exactitud de las mediciones y el ejemplo 1.3, que ilustra el uso de cifras significativas, se ha ampliado de manera importante.
- **Capítulo 2, “Movimiento en una dimensión”.** Para esta edición, es importante la introducción del concepto de “longitud de trayectoria” a menudo llamado (erróneamente) “distancia total”, al igual que las razones conceptuales para tal definición (utilizada en matemáticas). El debate general sobre el concepto fue revisado para una mayor claridad. Finalmente, una parte nueva del ejemplo 2.4 ilustra mejor el concepto de velocidad promedio.
- **Capítulo 3, “Vectores y movimiento en dos dimensiones”.** Las nuevas figuras 3.16 y 3.17 explican e ilustran la independencia de los movimientos horizontal y vertical. Una parte

nueva del ejemplo 3.5 muestra cómo encontrar la dirección del movimiento dados los dos componentes del vector de velocidad, mientras que una parte nueva añadida al ejemplo 3.10 muestra mejor cómo controlar el movimiento relativo en una dimensión.

- **Capítulo 4, “Leyes de movimiento”.** Las nuevas figuras 4.3 y 4.5 ilustran la primera y segunda ley de movimiento, respectivamente. El ejemplo 4.3 en la ley de Newton de la gravitación ahora introduce el concepto de las fuerzas de marea en el ejemplo y el ejercicio, todo a través de cálculos sencillos. El nuevo ejemplo 4.5 ilustra la tercera ley en un contexto simple. Por último, una nueva parte del ejemplo 4.15 nos da un ejemplo adicional del enfoque de sistema.
- **Capítulo 5, “Energía”.** Las definiciones de trabajo fueron refinadas para incluir la definición intuitiva más sencilla primero, seguida por dos generalizaciones. Se ha mejorado el debate general de la obra y se ha agregado una parte adicional al primer ejemplo en el trabajo, ejemplo 5.1.
- **Capítulo 6, “Cantidad de movimiento y colisiones”.** Se ha revisado y mejorado a fondo el ejemplo 6.3, velocidad de retroceso, al igual que el ejemplo 6.5 para el péndulo balístico.
- **Capítulo 7, “Movimiento rotatorio y la ley de gravedad”.** Se amplió el ejemplo 7.2, cinemática de rotación, permitiendo la eliminación del ejemplo 7.3. La figura 7.10 se redefinió y rediseñó, y ahora ilustra mejor el concepto de velocidad angular. La nueva figura 7.20 ayuda a los estudiantes a entender la energía potencial gravitatoria.
- **Capítulo 8, “Equilibrio y dinámica rotatorios”.** Las nuevas figuras 8.2 y 8.5 ayudan a explicar visualmente las ideas detrás del torque. Se amplió el ejemplo 8.4, centro de gravedad, para ilustrar mejor el concepto y la técnica de aplicación.
- **Capítulo 9, “Sólidos y fluidos”.** Las secciones del capítulo 9 se reordenaron ligeramente de modo que el concepto de presión pudiera ser introducido antes de tensión y esfuerzo. El nuevo ejemplo 9.1 ayuda al estudiante a entender el concepto de presión, así como sentar las bases para comprender la ecuación de equilibrio hidrostático. Se mejoró significativamente el ejemplo 9.4, problema sobre volumen de esfuerzo-deformación, y ahora incluye el cálculo del cambio de presión que causa el cambio de volumen.
- **Capítulo 10, “Física térmica”.** El nuevo ejemplo 10.9 enfocado en un haz de electrones de alta energía, muestra cómo un gran número de impactos de partículas crea una fuerza macroscópica observada y una presión asociada.
- **Capítulo 11, “Energía en procesos térmicos”.** El nuevo ejemplo 11.8 se basa en las pérdidas conductoras del cuerpo humano. Este mismo ejemplo también analiza las ballenas minke en el ejercicio de acompañamiento. Fue creado un nuevo y más completo ejemplo, acerca del aislamiento (ejemplo 11.9), que sustituye a dos problemas de ejemplo que son redundantes.
- **Capítulo 12, “Leyes de la termodinámica”.** Se aclaró la diferencia entre el trabajo realizado por un gas y el trabajo realizado sobre el gas. La nueva figura 12.2 compara el concepto de trabajo en un gas con el trabajo mecánico realizado sobre un objeto. La figura 12.5 ilustra el nuevo concepto de la primera ley de la termodinámica, y se acompaña de mayor análisis en un contexto más general. Finalmente, el ejemplo 12.7 se ha mejorado en forma significativa con más incisos y un análisis de gases monoatómicos y diatómicos.
- **Capítulo 13, “Vibraciones y ondas”.** El ejemplo 13.1 de la octava edición se cambió por el ejemplo 13.2 y fue mejorado enormemente con más incisos que muestran cómo manejar los resortes individuales y múltiples y sus constantes de resorte.
- **Capítulo 14, “Sonido”.** Una nueva e interesante aplicación de la física se refiere a un dispositivo que utiliza tecnología de ultrasonido en la cirugía de cerebro. Este dispositivo permite a los cirujanos operar sin cortar la piel o hacer una abertura en el cráneo, reduciendo muchas de estas cirugías a un procedimiento ambulatorio.
- **Capítulo 16, “Energía eléctrica y capacitancia”.** Un nuevo ejemplo muestra cómo controlar un capacitor con dos capas de materiales dieléctricos entre las placas. Además, el resumen dispone de nuevas figuras que ilustran las normas para las combinaciones de los capacitores en series y paralelo.
- **Capítulo 17, “Corriente y resistencia”.** Se introduce una explicación más detallada de la relación entre cargas en movimiento y la energía, conectando mejor la primera parte del capítulo 17 con los conceptos de energía eléctrica descritos en el capítulo 16.

Los nuevos incisos del ejemplo 17.1 y su ejercicio refuerzan el desarrollo conceptual. Además, se añadió un inciso nuevo al ejemplo 17.6 y su ejercicio.

- **Capítulo 18, “Circuitos de corriente directa”.** El ejemplo 18.1 de resistencias en serie tiene dos incisos nuevos y un ejercicio nuevo. Se ha revisado el ejemplo 18.3 para mejorar la claridad de la solución. Nuevas figuras en el resumen ilustran las dos reglas para combinaciones de resistencias en serie y paralelo.
- **Capítulo 19, “Magnetismo”.** El nuevo ejemplo 19.7 muestra cómo utilizar la ley de Ampère para calcular el campo magnético debido a un cable coaxial. Un nuevo análisis explica la diferencia entre los materiales magnéticos blandos y duros y sus aplicaciones generales. Se han introducido otras aplicaciones de los campos magnéticos para dirigir haces de partículas cargadas.
- **Capítulo 20, “Voltajes inducidos e inductancia”.** Este capítulo presenta un análisis más claro del flujo magnético, explicando el concepto de la orientación de una superficie y cómo se relaciona con el signo del flujo. El análisis de la ley de Lenz en la sección 20.2 se revisó a fondo, con varios ejemplos de la ley incluidos en el texto con diagramas. Con el análisis mejorado en la sección 20.2 era posible eliminar la sección 20.4 de la edición anterior, lo que resulta en una presentación más llana y más completa del concepto.
- **Capítulo 21, “Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas”.** Una nueva aplicación de la física, “Luz y tratamiento de heridas”, describe cómo la irradiación de las heridas con láser puede acelerar la curación. Los ejemplos 21.8 y 21.9 fueron revisados.
- **Capítulo 22, “Reflexión y refracción de la luz”.** La revisión del ejemplo 22.2 en la ley de Snell, lo hace más completo y permite la eliminación del ejemplo 22.4 de la última edición.
- **Capítulo 23, “Espejos y lentes”.** Un nuevo ejemplo combina una lente delgada y un espejo esférico.
- **Capítulo 24, “Óptica ondulatoria”.** Una nueva aplicación de la física, “Espejos perfectos”, explica cómo los materiales dieléctricos pueden mejorar la reflectividad. Fibras construidas con esta tecnología pueden guiar la luz sin ninguna pérdida significativa de intensidad.
- **Capítulo 26, “Relatividad”.** La velocidad relativa en la relatividad especial, reintroducida en esta edición, se relaciona con el enfoque relativista para el tratamiento elemental de la velocidad relativa que se presenta en el capítulo 3. La conexión con la física elemental facilita la comprensión del estudiante de este difícil tema. Un nuevo ejemplo ilustra el concepto y su uso.
- **Capítulo 30, “Energía nuclear y partículas elementales”.** Un nuevo debate sobre la energía nuclear y los reactores se centra en los esfuerzos para extraer el suministro casi ilimitado de uranio disuelto en los océanos del mundo. Una nueva sección sobre cosmología incluye el análisis de la materia oscura, energía oscura y la inflación cósmica, junto con nuevas figuras.

Características del libro

La mayoría de los instructores coinciden en que el libro de texto asignado en un curso debe ser guía principal del estudiante para la comprensión y el aprendizaje de la materia. Además, el libro de texto debe ser fácilmente comprensible y estar escrito en un estilo que facilite la enseñanza y el aprendizaje. Con esto en mente, hemos incluido muchas características pedagógicas que están destinadas a mejorar la utilidad del libro de texto para los estudiantes y los instructores. Las siguientes funciones están incluidas.

Ejemplos Para esta novena edición se han revisado todos los ejemplos prácticos, realizando mejoras, y se añadieron o revisaron muchas preguntas y ejercicios de fin de ejemplo. Cada esfuerzo se ha hecho para asegurar que la recopilación de ejemplos, como un todo, sea integral en la cobertura de todos los conceptos físicos, tipos de problemas de física y técnicas matemáticas necesarias. Las preguntas por lo general requieren una respuesta conceptual o determinación, pero también incluyen estimaciones que requieren conocimientos de las relaciones entre conceptos. Las respuestas de las preguntas se

pueden encontrar en la parte final del libro. Los ejemplos se muestran en un formato de dos columnas con una finalidad pedagógica: los estudiantes pueden estudiar el ejemplo, y luego cubrir la columna de la derecha y tratar de resolver el problema con las claves en la columna de la izquierda. Una vez que ha tenido éxito en ese ejercicio, el estudiante puede cubrir las dos columnas de la solución y tratar de solucionar el problema con sólo la declaración de estrategia, y, finalmente, sólo el enunciado del problema. Aquí está una muestra de un ejemplo en el texto trabajado, con una explicación de cada una de las partes principales del ejemplo:

El **Objetivo** describe los conceptos físicos que están siendo explorados en el ejemplo práctico.

El planteamiento del **Problema** presenta el problema en sí.

La sección de **Estrategia** ayuda a los estudiantes a analizar el problema y crear un marco para la elaboración de la solución.

La sección de **Solución** utiliza un formato de dos columnas que ofrece la explicación de cada paso de la solución en la columna de la izquierda, mientras que da cada paso matemático respectivo en la columna de la derecha. Esta disposición facilita el acompañamiento de la idea con su ejecución y ayuda a los estudiantes a aprender cómo organizar su trabajo. Otro de los beneficios: los estudiantes pueden usar este formato como una herramienta de formación, cubriendo la solución a la derecha y resolviendo el problema utilizando las observaciones de la izquierda como una guía.

Comentarios después de cada solución que resaltan algunos de los conceptos básicos y la metodología utilizada para llegar a una solución correcta. Además, las observaciones se utilizan a menudo para poner el problema en un contexto real más grande.

Cada **Pregunta** cuenta con un ejemplo práctico caracterizado por una cuestión conceptual que promueve la comprensión de los alumnos de los conceptos contenidos en el ejemplo.

Ejercicio/Respuesta todas las preguntas están seguidas inmediatamente por un ejercicio con una respuesta. Estos ejercicios permiten a los estudiantes reforzar su comprensión al trabajar un problema similar o relacionado, con las respuestas ofreciendo una respuesta instantánea. Los estudiantes que trabajan de manera regular a través de estos ejercicios encuentran los problemas de final de capítulo menos intimidantes.

EJEMPLO 13.7 Medida del valor de g

OBJETIVO Determinar g a partir del movimiento de un péndulo.

PROBLEMA Utilizando un pequeño péndulo de longitud 0.171 m, un geofísico cuenta 72.0 oscilaciones completas en un tiempo de 60.0 s. ¿Cuál es el valor de g en esta localidad?

ESTRATEGIA Primero calcule el periodo del péndulo dividiendo el tiempo total entre el número de oscilaciones completas. Resuelva la ecuación 13.15 para g y sustituya valores.

SOLUCIÓN

Calcule el periodo dividiendo el tiempo total transcurrido por el número de oscilaciones completas:

$$T = \frac{\text{tiempo}}{\# \text{ de oscilaciones}} = \frac{60.0 \text{ s}}{72.0} = 0.833 \text{ s}$$

Resuelva la ecuación 13.15 para g y sustituya valores:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \rightarrow T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g}$$

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{(39.5)(0.171 \text{ m})}{(0.833 \text{ s})^2} = 9.73 \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS La medición de tales oscilaciones es una buena manera para determinar los valores locales de la aceleración de la gravedad.

PREGUNTA 13.7 Verdadero o Falso: Un péndulo simple de longitud 0.50 m tiene una frecuencia mayor de oscilación que un péndulo simple de longitud de 1.0 m.

EJERCICIO 13.7 ¿Cuál sería el periodo de un péndulo de 0.171 m sobre la Luna, donde la aceleración de la gravedad g es 1.62 m/s^2 ?

RESPUESTA 2.04 s



Muchos ejemplos resueltos también están disponibles para ser asignados como ejemplos activos en el sistema de gestión de tareas Enhanced WebAssign (visite www.cengage.com/physics/serway para más detalles).

Preguntas de opción múltiple Estas sirven para varios propósitos: algunas requieren cálculos diseñados para facilitar la familiarización de los estudiantes con las ecuaciones, las variables utilizadas, los conceptos que las variables representan y las relaciones entre los conceptos. Las restantes son conceptuales y están diseñadas para estimular el pensamiento físico. Por último, muchos estudiantes están obligados a presentar exámenes de opción múltiple, por lo que un poco de práctica en esa forma de pregunta es deseable. El instructor puede seleccionar preguntas de opción múltiple para asignar como tarea o utilizarlas en el aula, posiblemente con métodos “instrucción por pares” o en combinación con sistemas de “clickers”. (Las preguntas de opción múltiple se escriben con la respuesta de los usuarios del sistema personal en mente, y la mayoría de las preguntas podrían ser fácilmente utilizadas en estos sistemas.) Casi 400 preguntas de opción múltiple se incluyen en este texto. Las respuestas a preguntas de opción múltiple de número impar se incluyen en la sección de respuestas al final del libro. Las respuestas a todas las preguntas de opción múltiple están en el *Instructor’s Solution Manual* y en el *Instructor’s Power Lecture DVD-ROM*.

Preguntas conceptuales Al final de cada capítulo hay aproximadamente una docena de preguntas conceptuales. Los ejemplos de física aplicada que se presentan en el texto sirven como modelos para los estudiantes cuando se asignan preguntas conceptuales y muestran cómo se puede aplicar el concepto para comprender el mundo físico. Estas preguntas proporcionan a los estudiantes los medios para autoevaluar los conceptos presentados en el capítulo. Algunas preguntas conceptuales son adecuadas para iniciar discusiones en el salón de clase. En la sección de respuestas al final del libro se incluyen las respuestas a las preguntas conceptuales de número impar, y las respuestas a todas las preguntas se encuentran en el *Instructor’s Solutions Manual*.

Problemas Todas las preguntas y los problemas de esta edición fueron revisados cuidadosamente para mejorar su variedad, interés y valor pedagógico, manteniendo su claridad y calidad. Un amplio conjunto de problemas se incluye al final de cada capítulo (en total, más de 2000 problemas se presentan en la novena edición), y aproximadamente 25% de las preguntas y problemas en esta edición son nuevos. Las respuestas a los problemas de número impar se incorporan al final del libro. Para conveniencia tanto del estudiante como del instructor, alrededor de dos tercios de los problemas se relacionan con secciones específicas del capítulo. Los problemas restantes, etiquetados como “Problemas adicionales”, no se refieren a secciones específicas. Los tres niveles de problemas están graduados de acuerdo con su dificultad. Los problemas sencillos están numerados en **negro**, los problemas de nivel intermedio tienen números en **azul** y los problemas de alto reto tienen números en **rojo**. El icono **BIO** identifica los problemas que tratan con aplicaciones a las ciencias de la vida y medicina. Las soluciones a aproximadamente 12 problemas en cada capítulo se encuentran en el *Student Solutions Manual/Study Guide*.

Hay tres tipos de problemas, que creemos que a los instructores y los estudiantes les serán de interés, a medida que utilicen el texto:

- **S** Los **problemas simbólicos** requieren que el estudiante obtenga una respuesta en términos de símbolos. En general, dentro del enunciado del problema se incluye alguna guía. La meta es capacitar mejor al estudiante para lidiar con las matemáticas a un nivel adecuado a este curso. La mayoría de los estudiantes a este nivel se sienten incómodos con las ecuaciones simbólicas, lo que es desafortunado porque estas ecuaciones son el vehículo más eficiente para presentar las relaciones entre los conceptos físicos. Una vez que los estudiantes comprenden los conceptos físicos, su habilidad para resolver problemas mejora enormemente. Sin embargo, tan pronto como los números se sustituyen en una ecuación, todos los conceptos y sus relaciones mutuas se pierden, al conjuntarse en la calculadora del estudiante. Los problemas simbólicos con contenido comentado capacitan a los estudiantes para posponer la sustitución de valores, lo que facilita su habilidad para pensar de manera conceptual usando las ecuaciones. Un ejemplo de problema simbólico con contenido comentado se muestra en la página siguiente:

14. **S** Un objeto de masa m se deja caer desde el techo de un edificio de altura h . Mientras el objeto está cayendo, un viento que sopla paralelo a la fachada del edificio ejerce una fuerza F horizontal constante sobre el objeto. a) ¿Cuánto tiempo le toma al objeto golpear la superficie de la tierra? Expresé el tiempo t en función de g y h . b) Halle una expresión en términos de m y F para la aceleración a_x del objeto en la dirección horizontal (tome como dirección x positiva). c) ¿A qué distancia horizontal se desplaza el objeto antes de golpear la superficie de la tierra? Responda en términos de m , g , F y h . d) Halle la magnitud de la aceleración del objeto mientras está cayendo, utilizando las variables F , m y g .

- **CIC** Un **problema cuantitativo/conceptual** alienta al estudiante a pensar verbal y conceptualmente acerca de un problema físico dado, en lugar de apoyarse de manera exclusiva en las habilidades de cómputo. La investigación en educación en física sugiere que los problemas de física estándares que requieren cálculos pueden no ser completamente adecuados para capacitar a los estudiantes a pensar de manera conceptual. Los estudiantes aprenden a sustituir números por símbolos en las ecuaciones sin comprender por completo lo que hacen o lo que significan los símbolos. El problema cuantitativo/conceptual combate esta tendencia al pedir respuestas que requieren algo más que un número o un cálculo. Un ejemplo de problema cuantitativo/conceptual es el siguiente:

5. **CIC** Partiendo del reposo, un bloque de 5.00 kg se desliza 2.50 m hacia abajo sobre un plano rugoso inclinado 30.0° . El coeficiente de fricción cinética entre el bloque y el plano es $\mu_k = 0.436$. Determine a) el trabajo realizado por la fuerza de gravedad, b) el trabajo realizado por fricción entre el bloque y el plano inclinado y c) el trabajo realizado por la fuerza normal. d) Cualitativamente, ¿cómo cambiarían las respuestas si se utiliza una rampa corta en un ángulo muy pronunciado para atravesar las mismas alturas verticales?

- **PG** Los **problemas guiados** ayudan a los estudiantes a dividir los ejercicios en pasos. Un problema físico por lo general requiere alguna cantidad física en un contexto dado. Sin embargo, con frecuencia, se deben usar diversos conceptos y algunos cálculos para llegar a la respuesta final. Muchos estudiantes no están acostumbrados a este nivel de complejidad y con frecuencia no saben dónde comenzar. Un *problema guiado* descompone un problema estándar en pasos más pequeños, lo que permite a los estudiantes capturar todos los conceptos y estrategias requeridos para llegar a una solución correcta. A diferencia de los problemas físicos estándar, con frecuencia la guía se incluye en el enunciado del problema. Por ejemplo, el problema puede indicar “encuentre la velocidad usando conservación de energía” en lugar de sólo pedir la velocidad. En cualquier capítulo por lo general habrá dos o tres tipos de problemas que sean particularmente adecuados a esta forma de cuestionamiento. El problema debe tener cierto nivel de complejidad, con una misma estrategia para la solución de problemas involucrada cada vez que aparece. Los problemas guiados son un recordatorio de cómo un estudiante puede interactuar con un profesor en una visita para asesoría. Estos problemas ayudan a capacitar a los estudiantes para descomponer ejercicios complejos en una serie de problemas más simples, una habilidad esencial para resolverlos. A continuación se proporciona un ejemplo de problema guiado:

32. **PG** Dos bloques de masas m_1 y m_2 ($m_1 > m_2$), se colocan sobre una mesa sin fricción en contacto mutuo. Se aplica una fuerza horizontal de magnitud F al bloque de masa m_1 en la figura P4.32.

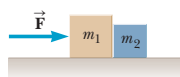


Figura P4.32

- a) Si P es la magnitud de la fuerza de contacto entre los bloques, trace un diagrama de cuerpo libre para cada bloque. b) ¿Cuál es la fuerza neta en el sistema consistente en los dos bloques? c) ¿Cuál es la fuerza neta que actúa

en m_1 ? d) ¿Cuál es la fuerza neta que actúa en m_2 ? e) Escriba la componente x de la segunda ley de Newton para cada bloque. f) Resuelva el sistema que resulta de dos ecuaciones y dos incógnitas, exprese la aceleración a y la fuerza de contacto P en términos de las masas y fuerza. g) ¿Cómo cambiaría la respuesta si la fuerza ha sido aplicada a m_2 ? (*Sugerencia:* Utilice la simetría; ¡no calcule!) ¿La fuerza de contacto es más grande, más pequeña o en este caso la misma? ¿Por qué?

Exámenes rápidos Todos los exámenes rápidos (véase el ejemplo siguiente) se presentan en un formato objetivo, incluidos opción múltiple, verdadero o falso, relacionar y preguntas de clasificación. Los exámenes rápidos proporcionan a los estudiantes la oportunidad de poner a prueba su comprensión de los conceptos físicos presentados. Los exámenes requieren que los estudiantes tomen decisiones acerca de la base del razonamiento lógico y algunos se escribieron para ayudar a los estudiantes a superar las equivocaciones comunes. Las respuestas a todos los exámenes rápidos se encuentran al final del texto y las respuestas con explicaciones detalladas se proporcionan en el *Instructor's Solutions Manual*. Muchos instructores eligen usar los exámenes rápidos en un estilo de enseñanza de “instrucción por pares”.

■ Examen rápido

4.4 Un pequeño automóvil deportivo colisiona de frente contra un camión. La enorme fuerza de impacto (en magnitud) actúa sobre a) el automóvil, b) el camión, c) ninguno, la fuerza es la misma en ambos. ¿Cuál es el vehículo que se somete a la mayor aceleración en magnitud? d) el automóvil, e) el camión, f) las aceleraciones son las mismas.

Estrategias para la solución de problemas Al final del capítulo 1 se presenta una estrategia general para resolver problemas. Esta estrategia proporciona a los estudiantes un proceso estructurado para solucionarlos. En la mayoría de los capítulos se incluyen estrategias y sugerencias más específicas (véase el ejemplo siguiente) para resolver los tipos de problemas que se presentan tanto en los ejemplos resueltos como en los problemas de fin de capítulo. Esta característica ayuda a los estudiantes a identificar los pasos esenciales para resolver problemas y aumentar sus habilidades como solucionadores de problemas.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Segunda ley de newton

Los problemas que involucran la segunda ley de Newton pueden ser muy complejos. El siguiente protocolo rompe el proceso de solución en objetivos intermedios, más pequeños:

1. **Lea** el problema esmeradamente por lo menos una vez.
2. **Trace** una imagen del sistema, identifique el objeto de interés básico e indique las fuerzas con flechas.
3. **Etiquete** cada fuerza en la imagen de cierta manera que inducirá a pensar lo que las cantidades físicas representan (digamos, T para la tensión).
4. **Trace** un diagrama de cuerpo libre del objeto de interés, en función de la imagen etiquetada. Si se incluyen objetos adicionales, dibuje diagramas de cuerpo libre por separado para ellos. Elija coordenadas convenientes para cada objeto.
5. **Aplique la segunda ley de Newton.** Los componentes x y y de la segunda ley de Newton se toman de la ecuación vectorial y se rescriben individualmente. Esto por lo general da como resultado dos ecuaciones y dos incógnitas.
6. **Resuelva** para la cantidad desconocida deseada y sustituya los números.

Aplicaciones biomédicas Para los estudiantes de biología y medicina, los iconos **BIO** señalan la ruta hacia varias aplicaciones prácticas e interesantes de los principios físicos a la biología y la medicina. Siempre que sea posible, se incluyen más problemas que son relevantes para estas disciplinas.

Guía de estudio constructora de habilidades MCAT La novena edición de *Fundamentos de Física* contiene un apéndice especial para desarrollar habilidades (apéndice E) como ayuda a los estudiantes de medicina a fin de prepararse para el examen MCAT. El apéndice contiene ejemplos escritos por los autores del texto para ayudar a los estudiantes a desarrollar habilidades conceptuales y cuantitativas. Estos ejemplos desarrolladores de habilidades contienen preguntas al estilo MCAT escrito por expertos que preparan el examen para garantizar que los estudiantes estén listos para dominarlo.

Guía de preparación para el examen MCAT Ubicada después de la sección “Al estudiante”, en las primeras páginas del libro, esta guía resalta 12 cursos de estudio basados en conceptos para la parte física del examen MCAT. Los estudiantes pueden usar la guía para preparar el examen MCAT, exámenes en clase o asignación de tareas.

Física aplicada Las características de física aplicada proporcionan a los estudiantes un medio adicional para revisar los conceptos que se presentan en dicha sección.

Algunos ejemplos de física aplicada demuestran la conexión entre los conceptos que se presentan en el capítulo y otras disciplinas científicas. Dichos ejemplos también sirven como modelos para los estudiantes cuando se les asigna la tarea de responder las preguntas conceptuales que aparecen al final de cada capítulo. Para ejemplos de los recuadros física aplicada, véase física aplicada 21.1 (“Campos eléctricos y tratamiento de cáncer”) en la página 726 y física aplicada 28.2 (“Auroras”) en la página 937.

Tips Colocados en los márgenes del texto, los tips abordan equívocos y situaciones estudiantiles comunes en las que los estudiantes con frecuencia siguen rutas improductivas (véase el ejemplo a la derecha). Más de 95 tips se presentan en esta edición para ayudar a los estudiantes a evitar errores y malas interpretaciones comunes.

Notas al margen Los comentarios y notas que aparecen en el margen (véase el ejemplo a la derecha) se pueden usar para ubicar enunciados, ecuaciones y conceptos importantes en el texto.

Aplicaciones Aunque la física es relevante para gran parte de la vida moderna, puede no ser obvia para los estudiantes en un curso introductorio. Las notas marginales de aplicaciones (véase el ejemplo a la derecha) hacen que la relevancia de la física en la vida diaria sea más obvia al puntualizar aplicaciones específicas en el texto. Algunas de estas aplicaciones pertenecen a las ciencias de la vida y se marcan con un icono **BIO**. Una lista de aplicaciones aparece después de este prefacio.

Estilo Para facilitar la rápida comprensión, intentamos escribir el libro en un estilo que fuese claro, lógico, relajado y atractivo. El estilo de escritura un tanto informal y relajado está diseñado para conectarse mejor con los estudiantes e incrementar su disfrute al leer. Los términos nuevos se definen con cuidado, e intentamos evitar el uso de jerga.

Introducciones Todos los capítulos comienzan con un breve preámbulo que incluye un análisis de los objetivos y el contenido del capítulo.

Unidades En todo el libro se usa el Sistema Internacional de unidades (SI). El sistema de unidades estadounidense se usa en poca medida sólo en los capítulos acerca de mecánica y termodinámica.

Uso pedagógico del color Los lectores deben consultar la carta pedagógica de color (al final del libro aparece una descripción completa del uso pedagógico del color) para un listado de los símbolos con código de color que se utilizan en los diagramas de texto. Este sistema se sigue de manera consistente a lo largo del texto.

Enunciados y ecuaciones importantes La mayoría de los enunciados y definiciones importantes se imprimen en **negrillas** o se resaltan con una pantalla de fondo para agregar énfasis y facilitar su revisión. De igual modo, las ecuaciones importantes se **resaltan con una pantalla beige** para facilitar su ubicación.

Ilustraciones y tablas La legibilidad y efectividad del material del texto, ejemplos resueltos y preguntas conceptuales y problemas de fin de capítulo se mejoraron con el gran número de figuras, diagramas, fotografías y tablas. El color agrega claridad a las ilustraciones y hace que éstas sean lo más realistas posibles. Los efectos tridimensionales se consiguen con el uso de áreas sombreadas y brillantes donde es apropiado. Los vectores tienen código de color y las curvas en las gráficas se dibujan en color. Las fotografías a color se seleccionaron cuidadosamente y sus leyendas se escribieron para funcionar como una herramienta instructiva adicional. Al final del libro aparece una descripción completa del uso pedagógico del color.

Resumen Los resúmenes de fin de capítulo se organizan con encabezados de sección individual para facilitar la referencia. Para la novena edición, un gran número de resúmenes de capítulo se caracterizan por tener figuras clave del capítulo.

Cifras significativas Las cifras significativas tanto en los ejemplos resueltos como en los problemas al final de capítulo se manejan con cuidado. La mayoría de los ejemplos numéricos y problemas se resuelven a dos o a tres cifras significativas, dependiendo de la precisión de los datos proporcionados. Los resultados intermedios que se presentan en los ejemplos se redondean al número adecuado de cifras significativas y sólo dichos dígitos se acarrean.

Tip 4.3 La segunda ley de Newton es una ecuación vectorial

Al aplicar la segunda ley de Newton, sume todas las fuerzas sobre el objeto como vectores y entonces determine el vector de aceleración resultante al dividir entre m . No encuentre las magnitudes individuales de las fuerzas y las sume como escalares.

◀ Tercera ley de Newton

BIO APLICACIÓN

Dieta frente al ejercicio en los programas de pérdida de peso

Apéndices Al final del libro se proporcionan varios apéndices. La mayor parte del material de los apéndices (apéndice A) representa un repaso de conceptos y técnicas matemáticas utilizados en el texto, incluidos notación científica, álgebra, geometría, trigonometría, cálculo diferencial y cálculo integral. La referencia a dichos apéndices se realiza según se requiera en el texto. La mayoría de las secciones del repaso matemático incluyen ejemplos resueltos y ejercicios con respuestas. Además del repaso matemático, algunos apéndices contienen tablas útiles que complementan la información textual. Para facilitar la referencia, en las últimas páginas de la publicación encontrarán una tabla que explica el uso del color a lo largo del libro y una lista de factores de conversión de uso frecuente.

Figuras activas Muchos diagramas del texto se animaron para convertirse en figuras activas (que se identifican en la leyenda de la figura), parte del sistema de tareas en línea Enhanced WebAssign. Al observar animaciones de los fenómenos y procesos que no se pueden representar por completo en una página estática, los estudiantes aumentan enormemente su comprensión conceptual. Además de ver animaciones de las figuras, los estudiantes pueden ver el resultado de cambiar variables para mirar los efectos, llevar a cabo las exploraciones sugeridas de los principios involucrados en la figura, y tomar y recibir retroalimentación de las preguntas relacionadas con la figura. Todas las figuras activas se incluyen en el *Instructor's Power Lecture DVD-ROM* del instructor para presentación de la clase.

Opciones de enseñanza

Este libro contiene material más que suficiente para un curso de un año de introducción a la física, que tiene dos propósitos. Primero, proporciona al instructor más flexibilidad para elegir los temas de un curso específico. Segundo, el libro se vuelve más útil como un recurso para los estudiantes. En promedio, sería posible cubrir alrededor de un capítulo por semana para una clase que dura tres horas por semana. Aquellas secciones, ejemplos y problemas de fin de capítulo que tratan con aplicaciones de física para las ciencias de la vida se identifican con el icono **BIO**. Las siguientes sugerencias se ofrecen para cursos más breves o para aquellos instructores que elijan avanzar a un ritmo más lento a lo largo del año.

Opción A: si elige poner más énfasis en temas contemporáneos de física, podría omitir todo o partes de los capítulos 8 (Equilibrio y dinámica rotatorios), 21 (Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas) y 25 (Instrumentos ópticos).

Opción B: si elige poner más énfasis en la física clásica, podría omitir todo o partes de la parte 6 del libro, que trata la relatividad especial y otros temas de la física del siglo xx.

El *Instructor's Solutions Manual* ofrece sugerencias adicionales para secciones y temas específicos que podrían omitirse sin pérdida de continuidad si el tiempo apremia.

Opciones personalizadas TextChoice para *Fundamentos de Física*

La biblioteca digital en inglés de Cengage Learning, *TextChoice*, le permite crear su versión personalizada de Serway/Vuille *Fundamentos de Física* a partir de cero. Usted puede escoger y elegir el contenido que desea incluir en su texto e incluso añadir sus propios materiales originales de la creación de una solución única, aprendizaje todo en uno. Todo esto ocurre desde la comodidad de su escritorio. Visite www.textchoice.com para empezar a conformar su libro hoy.

Cengage Learning ofrece la forma más rápida y fácil para crear los materiales de aprendizaje personalizados entregados de la manera deseada. Para obtener más información acerca de las opciones de publicación personalizadas, visite www.cengage.com/custom o póngase en contacto con su representante local de Cengage Learning®.

Soluciones del curso (en inglés) que se ajustan a sus metas de enseñanza y las necesidades de aprendizaje de sus estudiantes

Avances recientes en tecnología educativa hicieron que los sistemas de gestión de tareas y los sistemas de respuesta de audiencia sean herramientas poderosas y accesibles para mejorar la forma en que imparte el curso. Ya sea que ofrezca un curso más tradicional basado



en un texto, esté interesado en usar o en la actualidad use un sistema de gestión de tareas en línea como Enhanced WebAssign o esté listo para convertir su clase en un ambiente de aprendizaje interactivo con un sistema de respuesta de audiencia JoinIn de TurningPoint, puede estar seguro de que el contenido probado del texto proporciona los cimientos para todos y cada uno de los componentes de la tecnología y el paquete auxiliar.

Sistemas de gestión de tareas

Enhanced WebAssign ¡Las tareas en línea nunca han sido tan fáciles! Tanto si eres un veterano o un principiante, Enhanced WebAssign es el líder del mercado en soluciones de tareas en línea y la solución perfecta para satisfacer sus necesidades de gestión de tareas. Diseñado por físicos para físicos, este sistema es un compañero de enseñanza confiable y amigable con el usuario. Enhanced WebAssign está disponible (en inglés) para *Fundamentos de Física*, lo que le brinda libertad para asignar



- Cada problema y pregunta de final de capítulo
- Problemas seleccionados, mejorados con sugerencias y retroalimentación. Un ejemplo de retroalimentación objetivo aparece a continuación:

A ball is thrown directly downward with an initial speed of 7.65 m/s from a height of 29.0 m. After what time interval does it strike the ground?

s

You know the initial velocity, the distance and the acceleration. Which equation in Table 2.2 will allow you to find the time? You may need to use the quadratic equation.

Need Help? [Read It](#) [Watch It](#)

Los problemas seleccionados (en inglés) incluyen información para hacer frente a los errores comunes que cometen los estudiantes. Esta información ha sido desarrollada por profesores con años de experiencia en el aula.

- Tutoriales Master It, para ayudar a los estudiantes a trabajar paso a paso el problema. Un ejemplo de un tutorial Master It aparece a continuación:

Master It

One gallon of paint (volume = $3.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) covers an area of 35.0 m^2 . What is the thickness of the fresh paint on the wall?

Part 1 of 3 - Conceptualize

We assume the paint keeps the same volume in the can and on the wall.

Part 2 of 3 - Categorize

We model the film on the wall as a rectangular solid, with its volume given by its "footprint" area, which is the area of the wall, multiplied by its thickness t perpendicular to this area and assumed to be uniform.

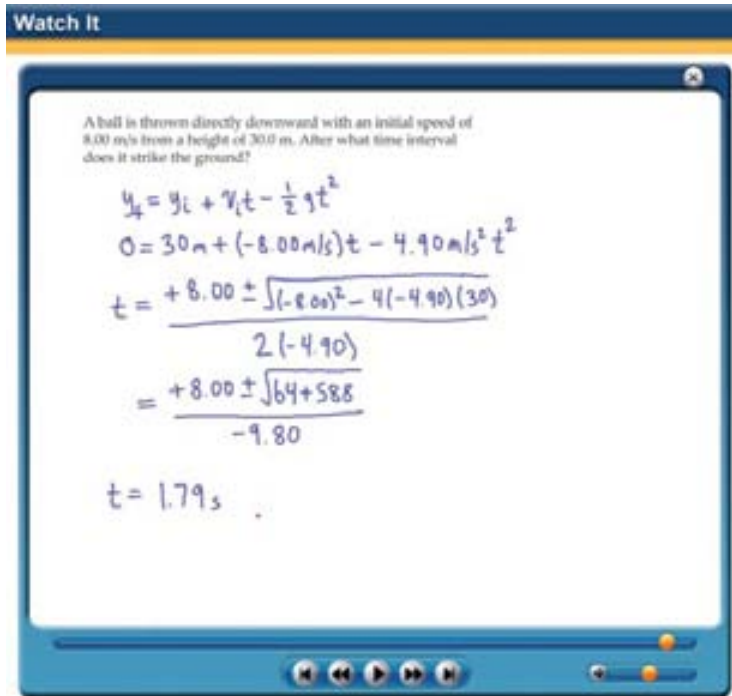
Part 3 of 3 - Analyze

Solving for t in $V = At$ gives the following:

$$t = \frac{V}{A} = \frac{3.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{35.0 \text{ m}^2} = 1.08 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Los tutoriales **Master It** (en inglés) ayudan a los estudiantes a trabajar paso a paso el problema.

- Videos de soluciones Watch It que explican las estrategias de solución de problemas, para ayudar paso a paso a los estudiantes a través del problema. Además, los profesores pueden optar por incluir videos con sugerencias de las estrategias de solución de problemas. Una pantalla de captura a partir de una solución de video Watch It aparece a continuación:



Los videos **Watch It** (en inglés) ayudan a los estudiantes a visualizar los pasos necesarios para resolver un problema.

- La mayoría de los ejemplos resueltos, mejorada con sugerencias y retroalimentación, para ayudar a fortalecer las habilidades para resolver problemas
- Cada examen rápido, lo que proporciona a sus estudiantes amplia oportunidad para poner a prueba su comprensión conceptual

También están disponibles en Enhanced WebAssign

- figuras activas animadas, mejoradas con sugerencias y retroalimentación, para ayudar a los estudiantes a desarrollar sus habilidades de visualización
- un repaso matemático para ayudar a sus estudiantes a pulir conceptos cuantitativos clave
- un libro electrónico interactivo

Visite por favor www.webassign.net/brookscole para ver una demostración interactiva de Enhanced WebAssign.

El texto también se apoya en los siguientes sistemas de gestión de tareas. Contacte a su representante de ventas local para más información.

CAPA: un enfoque personalizado asistido por computadora y LON-CAPA,
<http://www.loncapa.org/>

CENGAGE
brain
 .com

CengageBrain.com

En **CengageBrain.com** los estudiantes serán capaces de ahorrar hasta 60% en los materiales (en inglés) del curso a través de nuestra gama completa de opciones. Tendrán la opción de alquilar sus libros de texto, comprar libros de texto impresos, electrónicos o capítulos individuales electrónicos y audio libros, todos con ahorros sustanciales en los precios promedio de venta. **CengageBrain.com** también incluye acceso a la amplia gama de tareas y herramientas de estudio Cengage Learning y cuenta con una elección de contenido libre.

Sistemas personales de respuesta

JoinIn de TurningPoint Posee un libro de preguntas específicas y muestra sin error las respuestas de los estudiantes, dentro de las diapositivas de Microsoft PowerPoint® de su propia conferencia en relación con el hardware “clicker” de su elección. JoinIn de TurningPoint trabaja con la mayor parte de los teclados de sistemas de infrarrojos o de radiofrecuencia, incluyendo ResponseCard, EduCue, H-ITT y computadoras portátiles, inclusive. Póngase en contacto con su representante de ventas local para aprender más acerca de nuestro software y hardware de respuesta personal.

Sistemas de respuesta de audiencia (en inglés)

Sin importar el sistema de respuesta que utilice, proporcionamos el contenido probado para apoyarlo. El contenido listo para llevar incluye:

- todas las preguntas de los exámenes rápidos;
- todas las preguntas de opción múltiple al final de capítulo, preguntas de prueba y una selección de preguntas al final de capítulo para proporcionarle útiles puntos de control conceptual para utilizar en su clase; y
- las animaciones de las figuras activas también se mejoraron con preguntas de opción múltiple para ayudar a probar las habilidades de observación de los estudiantes;
- también se presenta el contenido de valoración para aprender en el aula de la Universidad de Massachusetts en Amherst. Esta colección de 250 preguntas conceptuales avanzadas se puso a prueba en sus aulas durante más de 10 años y lleva el aprendizaje por pares a un nuevo nivel.

Nuestro contenido exclusivo del sistema de respuesta de audiencia es perfecto para usuarios aficionados, intermedios o avanzados de esta tecnología para el nuevo aprendizaje. El contenido de nuestra plataforma neutral es perfecto para su uso con el programa “clicker” de su elección. ¿Le interesa adoptar la tecnología de sistema de respuesta de audiencia? Considere nuestro software JoinIn en TurningPoint®, compatible con Microsoft PowerPoint® y el hardware de soluciones de infrarrojos o de radiofrecuencia.

Visite www.cengage.com/physics/serway para descargar muestras del contenido del sistema de respuesta de audiencia.

Recursos para presentación de clases (en inglés)

Los siguientes recursos proporcionan apoyo para sus presentaciones en clase.

DVD-ROM PowerLecture™ Una herramienta para clases multimedia fácil de usar, el DVD-ROM PowerLecture le permite ensamblar rápidamente ilustraciones, animaciones, video digital y archivos de base de datos con notas para crear clases fluidas. El conjunto de dos volúmenes (Volumen 1: capítulos 1-14; Volumen 2: capítulos 15-30) incluye clases preconstruidas en PowerPoint®, una base de datos de animaciones, videoclips e ilustraciones digitales del texto, así como archivos electrónicos editables a través del Solution Builder. El DVD-ROM también incluye el generador computarizado de exámenes ExamView®, que le da la capacidad de elaborar pruebas que ofrecen un número ilimitado de preguntas nuevas o de cualquiera de las preguntas existentes en el Test Bank preinstalado. Por último, el DVD-ROM incluye el sistema de respuesta de audiencia con el contenido específico para el libro de texto. Contacte a su representante de ventas local para aprender más acerca del software y el hardware de respuesta de audiencia.

Recursos de calificación y de preparación del curso

Algunos de los recursos que se mencionan a continuación le ayudarán con los procesos de calificación y preparación.

Instructor's Solutions Manual por Charles Teague. Disponible en dos volúmenes, el *Instructor's Solutions Manual* contiene las soluciones completas para todos los problemas, preguntas de opción múltiple y preguntas conceptuales en el texto y respuestas completas con explicaciones a los exámenes rápidos. El Volumen 1 contiene los capítulos 1 al 14, y el Volumen 2 los capítulos 15 al 30. En el DVD-ROM PowerLecture también están disponibles los archivos electrónicos del Instructor's Solutions Manual.



Banco de exámenes impresos por Ed Oberhofer (University of North Carolina en Charlotte y Lake-Sumter Community College). Disponible en dos volúmenes de DVD-ROM a través del software de exámenes ExamView®. Este banco de exámenes en dos volúmenes contiene aproximadamente 1750 problemas y preguntas de opción múltiple. Los instructores pueden imprimir y duplicar las páginas para distribuir las entre los estudiantes. El Volumen 1 contiene los capítulos 1 al 14, y el Volumen 2 los capítulos 15 al 30. Versiones WebCt y Blackboard del banco de exámenes están disponibles en el sitio web para el instructor en la dirección www.cengage.com/physics/serway.

Sitio web para el instructor Consulte el sitio web del instructor en www.cengage.com/physics/serway para una guía de correlación de problemas, clases muestra en PowerPoint® y contenido de respuesta de audiencia JoinIn. Los instructores que adopten la novena edición de *Fundamentos de Física* podrán descargar estos materiales después de asegurar la contraseña adecuada por parte de su representante de ventas local Cengage Learning.

Materiales de apoyo para el instructor (en inglés)

Los materiales de apoyo para el instructor están disponibles para adoptantes calificados. Por favor, contacte a su representante de ventas local para más detalles. Visite www.cengage.com/physics/serway para

- solicitar una copia impresa
- contactar a su representante local
- descargar archivos electrónicos de materiales seleccionados

Recursos para el estudiante (en inglés)

Visite el sitio www.cengage.com/physics/serway para ver ejemplos de suplementos seleccionados para los estudiantes. Vaya también a CengageBrain.com para adquirir y tener acceso a este producto en la tienda en línea preferida de Cengage Learning.

Students Solutions Manual and Study Guide por John R. Gordon, Charles Teague y Raymond A. Serway. Ahora en dos volúmenes, el *Student Solutions Manual/Study Guide* presenta soluciones detalladas a aproximadamente 12 problemas por capítulo. Los números en recuadro identifican aquellos problemas en el texto para los cuales sus soluciones completas se encuentran en el manual. En éste también se presenta una sección de habilidades, notas relevantes de secciones clave del texto y una lista de ecuaciones y conceptos importantes. El Volumen 1 contiene los capítulos 1 al 14 y el Volumen 2 los capítulos 15 al 30.

Premium eBook Este libro electrónico interactivo incluye enlaces a las figuras activas animadas y permite a los estudiantes resaltar el texto, añadir sus propias notas y marcar las páginas. Los estudiantes pueden acceder al libro electrónico a través de Enhanced WebAssign.

Physics CourseMate incluye

- un libro electrónico interactivo
- herramientas de enseñanza interactiva y de aprendizaje, incluyendo:
 - pruebas
 - las tarjetas de vocabulario
 - los videos de la solución
 - las animaciones con ejercicios interactivos
 - y más
- Engagement Tracker, una herramienta de primera en su tipo, que supervisa la participación del estudiante en el curso.

Physics CourseMate de Cengage Learning trae a la vida los conceptos del curso con el aprendizaje interactivo, el estudio y herramientas de preparación de exámenes que apoyan el libro de texto impreso. Observe cómo la comprensión de los estudiantes se dispara, cómo la clase trabaja con el libro de texto impreso y la página web del libro de texto específico. ¡Physics CourseMate va más allá del libro para ofrecerle lo que necesita! Obtenga más información en www.cengage.com/coursemate.

CENGAGEbrain.com
buy. rent. access.

 **CourseMate**

Physics Laboratory Manual, 3a. edición, por David Loyd (Angelo State University). El *Physics Laboratory Manual* complementa el aprendizaje de los principios básicos de la física mientras se introducen los procedimientos y equipo de laboratorio. Cada capítulo del manual incluye una asignación de prelaboratorio, objetivos, lista de equipo, la teoría detrás del experimento, procedimientos experimentales, gráficas y preguntas. Para cada experimento se proporciona un reporte de laboratorio, de modo que el estudiante pueda registrar datos, cálculos y resultados experimentales. Para desarrollar su habilidad para juzgar la validez de sus resultados, se alienta a los estudiantes a aplicar análisis estadístico a sus datos. También está disponible un completo *Manual del instructor* para facilitar el uso de este manual.

Agradecimientos

Al preparar la novena edición de este libro, fuimos guiados por la experiencia de muchas personas quienes revisaron manuscritos o proporcionaron sugerencias previas a las revisiones. Queremos agradecer a los siguientes revisores y expresar nuestro sincero reconocimiento por sus útiles sugerencias, críticas y aliento.

Revisores de la novena edición:

Thomas K. Bolland, <i>The Ohio State University</i>	Sylvio May, <i>North Dakota State University</i>
Kevin R. Carter, <i>School of Science and Engineering Magnet</i>	Alexey A. Petrov, <i>Wayne State University</i>
David Cinabro, <i>Wayne State University</i>	Scott Pratt, <i>Michigan State University</i>
Mark Giroux, <i>East Tennessee State University</i>	Scott Saltman, <i>Phillips Exeter Academy</i>
Torgny Gustafsson, <i>Rutgers University</i>	Bartlett M. Sheinberg, <i>Houston Community College</i>
Martha Lietz, <i>Niles West High School</i>	Gay Stewart, <i>University of Arkansas</i>
Rafael Lopez-Mobilia, <i>University of Texas at San Antonio</i>	Michael Willis, <i>Glen Burnie High School</i>

Las siguientes personas realizaron una cuidadosa comprobación de la veracidad de *Fundamentos de Física*, novena edición: Phil Adams, *Louisiana State University*; Grant W. Hart, *Brigham Young University*; John Hughes, *Embry-Riddle Aeronautical University*; Ed Oberhofer, *Lake Sumter Community College*; M. Anthony Reynolds, *Embry-Riddle Aeronautical University*, y Eugene Surdutovich, *Oakland University*. Aunque la responsabilidad de cualquier error restante descansa sobre nosotros, les agradecemos su dedicación y vigilancia.

Gerd Kortemeyer y Randall Jones contribuyeron con varios problemas al final de capítulo, especialmente con aquellos de interés para las ciencias de la vida. Edward F. Redish, de la Universidad de Maryland, con gentileza nos permitió citar algunos de sus problemas del Activity Based Physics Project.

Nuestro especial reconocimiento y el agradecimiento va para el personal de Brooks/Cole Cengage Learning, en particular, Mary Finch, Charlie Hartford, Ed Dodd, Brandi Kirksey (quien dirigió el programa de auxiliares y mucho más), Cathy Brooks, Joshua Duncan, Laura Bowen, Brendan Killion, Rebecca Berardy Schwartz, Sam Subity, Nicole Molica y Michelle Julet, por su excelente trabajo durante el desarrollo, producción y promoción de este libro de texto. Reconocemos el servicio de producción especializada y excelentes ilustraciones proporcionado por el personal de Lachina Publishing Services y los esfuerzos dedicados a la investigación de fotos de Jaime Jankowski y Sara Golden en PreMediaGlobal.

Finalmente, tenemos una profunda deuda con nuestras esposas e hijos por su amor, apoyo y sacrificios de largo plazo.

Raymond A. Serway
St. Petersburg, Florida

Chris Vuille
Daytona Beach, Florida

Atractivas aplicaciones

Aunque la física es relevante para gran parte de la vida moderna, puede no ser obvia para los estudiantes en un curso introductorio. En esta novena edición de *Fundamentos de Física*, continuamos una característica de diseño que comenzó en la séptima edición. Esta característica hace más obvia la relevancia de la física para la vida diaria, al puntualizar aplicaciones específicas en forma de una nota marginal. Algunas de estas aplicaciones pertenecen a las ciencias de la vida y están marcadas con el icono **BIO**. El siguiente índice no tiene la intención de ser un listado completo de todas las aplicaciones de los principios de la física que se encuentran en este texto. Dentro del texto se encuentran muchas otras aplicaciones, en especial en los ejemplos resueltos, preguntas conceptuales y problemas de fin de capítulo.

Capítulo 3

Salto de longitud, p. 68

Capítulo 4

Cinturón de seguridad, p. 89
Vuelo de un helicóptero, p. 96
Colisión de vehículos, p. 97
Paracaidismo, p. 111

Capítulo 5

BIO Movimiento flagelar; bioluminiscencia, p. 146
Impacto de asteroide, p. 147
BIO Shamu sprint (energía generada por la orca), p. 149
BIO Energía y potencia en un salto vertical, pp. 150-152
BIO Dieta frente a ejercicio en programas de pérdida de peso, p. 151
BIO Rendimiento de potencia máxima de los seres humanos en diferentes periodos (tabla), p. 152

Capítulo 6

BIO Boxeo y lesión cerebral, p. 169
BIO Lesión a los pasajeros en colisiones de automóvil, p. 171
BIO Conservación de la cantidad de movimiento y propulsión de un calamar, p. 173
BIO Prueba de glaucoma, p. 176
El profesor Goddard tenía razón: los cohetes funcionan en el espacio, p. 185
Cohetes de varias etapas, p. 186

Capítulo 7

Sitio de lanzamiento ESA, p. 204
Discos fonográficos y compactos, p. 205
Gravedad artificial, p. 210
Caminos peraltados, p. 213
¿Por qué el Sol es caliente?, p. 219
Órbitas geosincrónicas y satélites de comunicación, p. 223

Capítulo 8

BIO Localización del centro de gravedad de su compañero, p. 243
BIO Un peso sobre el antebrazo, p. 244
Engranajes de una bicicleta, p. 248
BIO Calentando el brazo, p. 252
Patinadora artística, p. 257
Salto mortal en el aire, p. 257
Rotación de una estrella de neutrones, p. 258

Capítulo 9

Raquetas para nieve, p. 280
El truco de la cama de clavos, p. 281
BIO Lesiones en fútbol, p. 285
Estructuras de arcos en edificios, p. 287
BIO Dolor en el oído, p. 290

Elevadores hidráulicos, p. 290
Construcción de las pirámides, p. 292
BIO Descompresión y lesiones a los pulmones, p. 292
BIO Medición de la presión sanguínea, p. 293
Bolígrafos, p. 293
BIO Vejigas natatorias en los peces, p. 295
BIO Control de la flotación en los peces, p. 295
BIO Líquido cefalorraquídeo, p. 295
Verificación del nivel de anticongelante, p. 295
Verificación de la carga de una batería, p. 296
Vuelo de una pelota de golf, p. 305
“Atomizadores” en botellas de perfume y dispersadores de pintura, p. 305
BIO Palpitación vascular y aneurismas, p. 305
Sustentación en las alas de aviones, p. 306
Navegar contra el viento, p. 307
Plomería doméstica, p. 307
Motores de cohetes, p. 307
BIO Tensión superficial de un saco de aire, p. 309
BIO Caminando sobre el agua, p. 309
Detergentes y agentes, p. 311
BIO Muestras de sangre con tubos capilares, p. 312
BIO Acción capilar en plantas, p. 312
BIO Ley de Poiseuille y flujo sanguíneo, p. 314
BIO Una transfusión de sangre, p. 314
BIO Flujo sanguíneo turbulento, p. 315
BIO Efecto de ósmosis en células vivas, p. 316
BIO Función renal y diálisis, p. 317
BIO La separación de las moléculas biológicas con centrifugación, p. 319

Capítulo 10

BIO Temperatura de la piel, p. 336
Juntas de expansión térmica, p. 338
Vidrio Pyrex, p. 338
Bandas bimetalicas y termostatos, p. 339
Elevación del nivel del mar, p. 341
BIO Calentamiento global e inundación de las costas, p. 342
BIO La expansión del agua congelada y la vida en la Tierra, p. 343
Tuberías que colapsan en invierno, p. 343
Expansión y temperatura, p. 353

Capítulo 11

BIO Quemando las calorías del desayuno, p. 364
BIO Fisiología del ejercicio, p. 364
Brisas marinas y térmicas, p. 365
BIO Las pérdidas conductivas del cuerpo humano, p. 376
BIO Temperatura de la ballena minke, p. 377
Aislamiento de casas, p. 377
Construcción y aislamiento térmico, p. 378
Enfriando motores de automóviles, p. 380

BIO Proliferación de algas en estanques y lagos, p. 380
BIO Temperatura corporal, p. 381
Ropa de verano de color claro p. 382
BIO Termografía, p. 383
Termómetros de radiación para medir la temperatura corporal, p. 383
Radiación térmica y visión nocturna, p. 383
El club del oso polar, p. 384
Termos, p. 385
BIO Calentamiento global y gases de efecto invernadero, pp. 385-386

Capítulo 12

Refrigeradores y bombas de calor, pp. 413-414
Máquinas de movimiento perpetuo, p. 419
La dirección del tiempo, p. 422
BIO Metabolismo humano, p. 424
BIO Lucha contra la obesidad, p. 425

Capítulo 13

Arquería, p. 442
Pistones y ruedas motrices, p. 446
Saltando de un bungee, p. 447
Relojes de péndulo, p. 452
Uso del péndulo en prospección, p. 453
Amortiguadores, p. 455
Cuerdas de guitarra, p. 460

Capítulo 14

BIO Usos médicos del ultrasonido, p. 474
BIO Aspirador quirúrgico ultrasónico cavitron, p. 475
BIO Ultrasonido focalizado de alta intensidad (HIFU), p. 475
Unidad de frecuencia ultrasónica para cámaras, p. 475
Los sonidos escuchados durante una tormenta, p. 477
BIO Regulaciones de la OSHA sobre el nivel de ruido, p. 480
Ondas de choque, p. 487
Conexión de los altavoces de un estéreo, p. 488
Afinación de un instrumento musical, p. 491
Fundamentos de la guitarra, p. 492
Rompiendo copas con la voz, p. 494
Integridad estructural y resonancia, p. 494
Oscilaciones en un puerto, p. 496
¿Por qué deben calentarse los instrumentos?, p. 497
¿Cómo funcionan los bugles?, p. 497
Uso de las pulsaciones para afinar un instrumento musical, p. 499
¿Por qué el profesor habla como el Pato Donald?, p. 501
BIO El oído, p. 502
BIO Implantes de caracol, p. 503

Capítulo 15

Medición de los campos eléctricos atmosféricos, p. 528
 Pararrayos, p. 531
 Seguridad al conducir durante tormentas eléctricas, p. 531

Capítulo 16

Baterías de automóvil, p. 553
 El precipitador electrostático, p. 560
 Limpiador electrostático de aire, p. 561
 Fotocopiadoras xerográficas, p. 561
 Impresoras láser, p. 562
 Receptáculos de flash de cámara, p. 564
 Teclados de computadora, p. 564
 Confinamiento electrostático, p. 564
BIO Desfibriladores, p. 572
 Busca travesaños, p. 576

Capítulo 17

Poca iluminación de los focos viejos, p. 598
 Falla de focos, p. 602
BIO Actividad eléctrica en el corazón, pp. 605-608
BIO Electrocardiogramas, p. 605
BIO Marcapasos cardíacos, p. 606
BIO Desfibriladores cardioversores implantables, p. 607

Capítulo 18

Luces de navidad en serie, pp. 618-619
 Interruptores, p. 623
 Focos de tres vías, pp. 623-624
 Limpiaparabrisas intermitentes, p. 630
BIO Crecimiento bacterial, p. 630
 Destalladores en la autopista, p. 631
 Fusibles e interruptores, p. 634
 Tercer alambre en aparatos al consumidor, p. 634
BIO Conducción de señales eléctricas por las neuronas, pp. 635-637

Capítulo 19

Polvos para huellas digitales, p. 650
BIO Bacterias magnéticas, p. 651
 Marcaje de las pistas de aterrizaje en los aeropuertos, p. 652
 Brújulas en Australia, p. 652
 Operación de bocina, p. 657
BIO Bombas electromagnéticas para corazones y riñones artificiales, p. 657
 Relámpagos, p. 657
 Motores eléctricos, p. 661
 Espectrómetros de masas, p. 663

Capítulo 20

Interruptores de fallo a tierra, p. 696
 Bobinas de captación de guitarra eléctrica, p. 696
BIO Monitores de apnea, p. 697
 Catapulta espacial, pp. 698-699

Generadores de corriente alterna, p. 701
 Generadores de corriente directa, p. 702
 Motores, p. 704

Capítulo 21

BIO Campos eléctricos y tratamiento de cáncer, pp. 723, 726-727
 Corrimiento de fase para entregar más potencia, p. 735
 Sintonía de su radio, p. 736
 Detectores de metales en el juzgado, p. 736
 Transmisión de energía eléctrica a larga distancia, p. 738
 Transmisión de ondas de radio, p. 741
 Polvo del Sistema Solar, p. 744
 Un techo caliente de estaño (hogares con energía solar), p. 745
BIO Luz y tratamiento de heridas, p. 749
BIO El Sol y la evolución del ojo, p. 749

Capítulo 22

Cómo ver el camino en una noche lluviosa, p. 764
BIO Ojos rojos en fotografías con flash, p. 764
 Los colores de las ondas de agua en el atardecer, p. 764
 Imágenes dobles, p. 765
 Refracción de luz láser en un disco de video digital (DVD), pp. 770-771
 Cómo identificar gases con un espectrómetro, p. 772
 Periscopios de submarinos, p. 778
BIO Fibras ópticas en diagnóstico médico y cirugía, p. 779
 Fibras ópticas en telecomunicaciones, p. 779
 Diseño de una fibra óptica, p. 780

Capítulo 23

Configuraciones de día y noche para espejos retrovisores, pp. 792-793
 Truco de ilusionista, p. 793
 Cóncavo frente a convexo, p. 798
 Ondas reversibles, p. 798
BIO Visión submarina, p. 802
BIO Máscaras de visión y buceo, p. 808

Capítulo 24

Un humeante experimento de Young, p. 828
 Interferencia de señal de televisión, p. 828
 Comprobación de imperfecciones en lentes ópticas, p. 832
 Espejos perfectos p. 834
 La física de CD y DVD, p. 835
 Difracción de ondas sonoras, p. 838
 Prisma frente a rejilla, p. 841
 Arcos iris desde un disco compacto, p. 841
 Rastreo de información en un CD, p. 841
 Microondas de polarización, p. 844
 Lentes polarizados, p. 846
 Cómo encontrar las concentraciones de soluciones mediante su actividad óptica, p. 847

Pantallas de cristal líquido (LCD), pp. 847-849

Capítulo 25

La cámara, pp. 859-860
BIO El ojo, pp. 860-862
BIO Uso de lentes ópticas para corregir defectos, p. 862
BIO Prescripción de una lente correctiva para un paciente hipermetrope, pp. 863-864
BIO Una lente correctiva para miopía, pp. 863-865
 Visión del hombre invisible, p. 864
BIO Ojos de gato, p. 873

Capítulo 26

Relojes rápidos en una "ciudad de una milla de alto", p. 905

Capítulo 27

Colores de las estrellas, p. 912
 Fotoceldas, p. 916
 Uso de rayos X para estudiar la obra de pintores maestros, p. 918
BIO Microscopios electrónicos, p. 924
 ¿Microscopios de rayos X?, p. 925

Capítulo 28

Descubrimiento del helio, p. 936
 Térmico o espectral, p. 937
 Auroras, p. 937
 Tecnología láser, p. 950

Capítulo 29

Enlace de nucleones y electrones, pp. 961-962
 Energía y vida media, p. 966
 Datación con carbono, p. 969
 Detectores de humo, p. 969
BIO Contaminación con radón, pp. 969-970
 ¿Debes reportar este esqueleto a homicidios? p. 970
BIO Aplicaciones médicas de la radiación, pp. 973-976
BIO Límites de la exposición ocupacional a la radiación, p. 974
BIO Irradiación de alimentos y equipo médico, p. 975
BIO Trazadores radioactivos en medicina, p. 975
BIO Formación de imágenes por resonancia magnética (IRM), pp. 975-976

Capítulo 30

Productos inestables, p. 983
 Diseño de un reactor nuclear, p. 985
 Reactores de fusión, p. 987
BIO Tomografía por emisión de positrones (TEP), p. 990
 Rompimiento de las leyes de conservación, pp. 994-995
 Conservación de número mesónico, p. 996

Como estudiante, es importante que entienda cómo usar este libro de manera más eficaz y cómo aprender mejor física. Explorar el prefacio le dará detalles de las diversas características disponibles, tanto en el libro como en línea. Estar al tanto de sus recursos educativos y cómo usarlos es esencial. Aunque la física es desafiante, puede dominarse con el abordaje correcto.

Cómo estudiar

Con frecuencia los estudiantes preguntan cuál es la mejor forma de estudiar física y prepararse para los exámenes. No hay una respuesta simple a esta pregunta, pero queremos ofrecerle algunas sugerencias con base en nuestra propia experiencia al aprenderla y enseñarla a través de los años.

Primero y más importante, mantenga una actitud positiva hacia la materia. Al igual que aprender un idioma, la física toma tiempo. Quienes se aplican en una *base diaria* pueden esperar alcanzar comprensión y triunfar en el curso. Tenga en mente que la física es la más fundamental de todas las ciencias naturales. Otros cursos de ciencia que continúan usarán los mismos principios físicos, así que es importante que entienda y pueda aplicar los diversos conceptos y teorías que se discuten en el texto. ¡Son relevantes!

Conceptos y principios

Usualmente los estudiantes intentan hacer su tarea sin estudiar primero los conceptos básicos. Es esencial que entienda los conceptos y principios básicos *antes* de intentar resolver los problemas asignados. Esta meta la puede lograr mejor al leer cuidadosamente el texto *antes* de asistir a su clase acerca del material tratado. Cuando lea el texto, debe anotar aquellos puntos que no son claros para usted. También, asegúrese de hacer un esfuerzo diligente por resolver los exámenes rápidos conforme los encuentre en su lectura. Hemos trabajado duro para preparar preguntas que lo ayuden a juzgar por sí mismo cuán bien entiende el material. Ponga mucha atención a los diversos Tips a lo largo del texto. Lo ayudarán a evitar malas interpretaciones, errores y equívocos, así como a maximizar la eficiencia de su tiempo al minimizar las aventuras a lo largo de rutas infructuosas. Durante la clase, tome notas y plantee preguntas acerca de aquellas ideas que no le sean claras. Tenga en mente que pocas personas son capaces de absorber todo el significado del material científico después de una sola lectura. Sus clases y trabajo en laboratorio complementan su libro de texto y deben clarificar algo del material más difícil. Debe minimizar la simple memorización del material. La memorización exitosa de pasajes del texto, ecuaciones y derivaciones no necesariamente indica que entendió los principios fundamentales.

Su comprensión mejorará a través de una combinación de eficientes hábitos de estudio, discusiones con otros estudiantes y con instructores y su habilidad para resolver los problemas que se presentan en el texto. Plantee preguntas siempre que considere necesario clarificar un concepto.

Horario de estudio

Es importante que establezca un horario de estudio, de preferencia diario. Asegúrese de leer el programa de estudio del curso y apéguese al horario establecido por su instructor. Como regla general, debe dedicar alrededor de dos horas de tiempo de estudio por cada hora que esté en clase. Si tiene problemas con el curso, busque el consejo del instructor u otros estudiantes que tomen el curso. Acaso descubrirá que necesita mayor instrucción de estudiantes experimentados. Con mucha frecuencia, los instructores ofrecen sesiones de repaso además de periodos de clase regulares. Es importante que evite la práctica de demorar el estudio hasta un día o dos antes de un examen. Una hora de estudio al día durante 14

días es mucho más eficaz que 14 horas el día anterior al examen. Por lo general, “atiborrarse” produce resultados desastrosos, especialmente en ciencia. En lugar de emprender una sesión de estudio de toda la noche inmediatamente antes de un examen, revise brevemente los conceptos y ecuaciones básicas y tenga una noche de buen descanso. Si cree que necesita ayuda adicional para comprender los conceptos, para preparar los exámenes o en la solución de problemas, le sugerimos adquirir una copia (en inglés) del *Student Solutions Manual/Study Guide* que acompaña a este libro; este manual está disponible a través de su representante local.

Visite el sitio web de *Fundamentos de Física* www.cengage.com/physics/serway para ver muestras de los suplementos seleccionados para los estudiantes. Vaya a CengageBrain.com para comprar y tener acceso a este producto en la tienda en línea preferida de Cengage Learning.

Use las características

Debe usar todas las características del texto presentadas en el prefacio. Por ejemplo, las notas marginales son útiles para localizar y describir ecuaciones y conceptos importantes, y las **negritas** indican enunciados y definiciones importantes. En los apéndices aparecen muchas tablas útiles, pero la mayoría de éstas se incorporan en el texto donde se consultan con más frecuencia. El apéndice A es un repaso conveniente de técnicas matemáticas.

Las respuestas a todos los exámenes rápidos y preguntas ejemplo, así como a preguntas de opción múltiple, preguntas conceptuales y problemas de número impar se proporcionan al final del libro. Las respuestas a problemas de fin de capítulo seleccionados se proporcionan en el *Student Solutions Manual/Study Guide*. Las estrategias para solución de problemas que se incluyen en capítulos seleccionados a lo largo del texto le proporcionan información adicional acerca de cómo debe resolver problemas. Los contenidos ofrecen un panorama de todo el texto y el índice le permiten localizar rápidamente material específico. En ocasiones se usan notas al pie de página para complementar el texto o citar otras referencias acerca del tema que se estudia.

Después de leer un capítulo, debe poder definir cualquier cantidad nueva que se introduzca en dicho capítulo y discutir los principios y supuestos que se usaron para llegar a ciertas relaciones clave. Los resúmenes de capítulo y las secciones de repaso del *Student Solutions Manual/Study Guide* deben ayudarlo en este aspecto. En algunos casos, quizá sea necesario que se remita al índice del texto para localizar ciertos temas. Debe asociar correctamente cada cantidad física con el símbolo utilizado para representar dicha cantidad y la unidad en la que se especifica la cantidad. Más aún, debe poder expresar cada relación importante en un enunciado en prosa conciso y preciso.

Solución de problemas

R. P. Feynman, Premio Nobel de Física, dijo alguna vez: “No sabes algo hasta que lo practicas”. Al tomar en cuenta este enunciado, le aconsejamos encarecidamente que desarrolle las habilidades necesarias para resolver un amplio rango de problemas. Su habilidad para resolver problemas será una de las pruebas principales de su conocimiento de física, así que intente resolver tantos problemas como sea posible. Es esencial que entienda los conceptos y principios básicos antes de intentar resolver problemas. Es buena práctica intentar encontrar soluciones alternativas al problema muestra. Por ejemplo, puede resolver problemas de mecánica con las leyes de Newton, pero con frecuencia un método alternativo que se apoya en consideraciones energéticas es más directo. No debe engañarse al pensar que entiende un problema simplemente porque observó cómo se resolvió en clase. Debe resolver el problema y problemas similares por cuenta propia. Los ejemplos de este libro los presentamos en un formato especial de dos columnas para ayudarlo en este aspecto. Después de estudiar un ejemplo, vea si puede cubrir el lado derecho y hacerlo usted mismo, usando sólo como sugerencias las descripciones escritas a la izquierda. Una vez que triunfe en ello, intente resolver completamente el ejercicio por cuenta propia. Finalmente, responda la pregunta y resuelva el ejercicio. Una vez que complete todos estos pasos, tendrá un buen dominio del problema, sus conceptos y la técnica matemática. Después de estudiar en esta forma todos los problemas ejemplo, está listo para abordar los problemas

al final del capítulo. De éstos, los problemas guiados proporcionan otra ayuda para aprender cómo resolver algunos de los problemas más complejos.

El planteamiento para solucionar problemas se debe planear cuidadosamente. Un plan sistemático es especialmente importante cuando un problema involucre muchos conceptos. Primero, lea el problema varias veces hasta que esté seguro de que entiende lo que se pregunta. Busque cualquier palabra clave que lo ayude a interpretar el problema y acaso le permita plantear ciertos supuestos. Su habilidad para interpretar una pregunta de manera adecuada es parte integral para la solución de problemas. Segundo, debe adquirir el hábito de escribir la información dada en un problema y aquellas cantidades que necesite encontrar; por ejemplo, puede elaborar una tabla que mencione tanto las cantidades dadas como las cantidades a encontrar. Este procedimiento a veces se utiliza en los ejemplos resueltos del libro. Después de decidir acerca del método que cree adecuado para un problema dado, proceda con su solución. Finalmente, compruebe sus resultados para ver si son razonables y consistentes con su comprensión inicial del problema. En el texto se incluyen estrategias generales de este tipo para la solución de problemas y se resaltan con un recuadro. Si sigue los pasos de este procedimiento, encontrará que es más fácil llegar a una solución y también ganará más de sus esfuerzos.

Con frecuencia, los estudiantes fallan para reconocer las limitaciones de ciertas ecuaciones o leyes físicas en una situación particular. Es muy importante que entienda y recuerde los supuestos subyacentes a una teoría o formalismo particular. Por ejemplo, ciertas ecuaciones de cinemática se aplican sólo a una partícula que se mueve con aceleración constante. Dichas ecuaciones no son válidas para describir el movimiento cuya aceleración no es constante, como lo es el movimiento de un objeto conectado a un resorte o el movimiento de un objeto a través de un fluido.

Experimentos

Puesto que la física es una ciencia que se basa en observaciones experimentales, le recomendamos que complemente el texto con la realización de varios tipos de experimentos “manuales”, ya sea en casa o en el laboratorio. Por ejemplo, el SlinkyTM común es excelente para estudiar ondas viajeras; una bola que se balancea en el extremo de una cuerda larga se puede usar para investigar el movimiento de péndulo; varias masas unidas al extremo de un resorte vertical o liga de caucho se pueden usar para determinar su naturaleza elástica; un viejo par de gafas polarizadas y algunas lentes de desecho y una lupa son los componentes de varios experimentos en óptica, y la medida aproximada de la aceleración de caída libre se puede determinar al medir simplemente con un cronómetro el tiempo que tarda una bola en caer desde una altura conocida. La lista de tales experimentos es interminable. Cuando no estén disponibles modelos físicos, sea imaginativo e intente desarrollar modelos por cuenta propia.

Nuevos medios

Si es posible, le recomendamos que utilice el producto (en inglés) **Enhanced WebAssign** que está disponible con este libro de texto. Es mucho más fácil entender la física, si usted la ve en acción y los materiales disponibles en Enhanced WebAssign le permitirán convertirse en una parte de esa acción. Enhanced WebAssign se describe en el prólogo y es nuestra sincera esperanza de que encuentre en la física una experiencia emocionante y placentera y de la que usted se beneficiará con esta experiencia, independientemente de su profesión elegida.

Una invitación a la física

Esperamos que usted también encuentre la física como una experiencia excitante y agradable, y que se beneficie de esta experiencia, sin importar la profesión de su elección. ¡Bienvenido al excitante mundo de la física!

*Para ver el mundo en un grano de arena
y un cielo en una flor silvestre,
sostén el infinito en la palma de tu mano
y la eternidad en una hora.*

—William Blake, “Augurios de inocencia”

Bienvenido a su guía de preparación para el examen MCAT

La guía de preparación para el examen MCAT hace que su ejemplar de *Fundamentos de Física*, novena edición, sea la herramienta de estudio MCAT y el recurso en el aula que más abarca en la introducción a la física. La rejilla, que comienza abajo y continúa en las dos páginas siguientes, resalta 12 cursos de estudio basados en conceptos para la parte de física de su examen MCAT. Úsela para preparar el MCAT, exámenes en clase y sus tareas de casa.

Vectores

Objetivos de habilidad: Calcular distancia, ángulos entre vectores y magnitudes.

Plan de repaso:

Distancia y ángulos:

- Capítulo 1, secciones 1.7, 1.8
- Figura activa 1.6
- Problemas de capítulo 35, 41, 44

Uso de vectores:

- Capítulo 3, secciones 3.1, 3.2
- Exámenes rápidos 3.1-3.3
- Ejemplos 3.1-3.3
- Figura activa 3.3
- Problemas de capítulo 13

Fuerza

Objetivos de habilidad: Conocer y comprender las leyes de Newton y calcular fuerzas y pesos resultantes.

Plan de repaso:

Leyes de Newton:

- Capítulo 4, secciones 4.1-4.4
- Exámenes rápidos 4.1, 4.4
- Ejemplos 4.1-4.4
- Figura activa 4.8
- Problemas de capítulo 5, 11

Fuerzas resultantes:

- Capítulo 4, sección 4.5
- Exámenes rápidos 4.5, 4.6
- Ejemplos 4.8, 4.10, 4.11
- Problemas de capítulo 19, 37

Movimiento

Objetivos de habilidad: Comprender el movimiento en dos dimensiones y calcular rapidez y velocidad, aceleración centrípeta y aceleración en problemas de caída libre.

Plan de repaso:

Movimiento en una dimensión:

- Capítulo 2, secciones 2.1-2.6
- Exámenes rápidos 2.1-2.8
- Ejemplos 2.1-2.10
- Figura activa 2.15
- Problemas de capítulo 3, 10, 31, 50, 59

Movimiento en dos dimensiones:

- Capítulo 3, secciones 3.3, 3.4
- Exámenes rápidos 3.5-3.8
- Ejemplos 3.5-3.8
- Figuras activas 3.14, 3.15
- Problemas de capítulo 33

Aceleración centrípeta:

- Capítulo 7, sección 7.4
- Exámenes rápidos 7.6, 7.7
- Ejemplo 7.5

Equilibrio

Objetivos de habilidad: Calcular cantidad de movimiento e impulso, centro de gravedad y torque.

Plan de repaso:

Cantidad de movimiento:

- Capítulo 6, secciones 6.1-6.3
- Exámenes rápidos 6.2-6.6
- Ejemplos 6.1-6.4, 6.6
- Figuras activas 6.7, 6.10, 6.13
- Problemas de capítulo 23

Torque:

- Capítulo 8, secciones 8.1-8.4
- Ejemplos 8.1-8.6, 8.8
- Problemas de capítulo 5, 9

Trabajo

Objetivos de habilidad: Calcular fricción, trabajo, energía cinética, energía potencial y potencia.

Plan de repaso:

Fricción:

- Capítulo 4, sección 4.6
- Exámenes rápidos 4.7-4.9
- Figura activa 4.21

Trabajo:

- Capítulo 5, sección 5.1
- Examen rápido 5.1
- Ejemplo 5.1
- Figura activa 5.5

Energía:

- Capítulo 5, secciones 5.2, 5.3
- Ejemplos 5.4, 5.5
- Exámenes rápidos 5.2, 5.3

Potencia:

- Capítulo 5, sección 5.6
- Ejemplos 5.12, 5.13

Ondas

Objetivos de habilidad: Comprender la interferencia de las ondas y calcular las propiedades básicas de las ondas, de resortes y de péndulos.

Plan de repaso:

Propiedades de las ondas:

- Capítulos 13, secciones 13.1-13.4, 13.7-13.11
- Exámenes rápidos 13.1-13.6
- Ejemplos 13.6, 13.8-13.10
- Figuras activas 13.1, 13.8, 13.12, 13.13, 13.24, 13.26, 13.32, 13.33, 13.34, 13.35
- Problemas de capítulo 11, 17, 33, 45, 55, 61

Péndulo:

- Capítulo 13, sección 13.5
- Exámenes rápidos 13.7-13.9
- Ejemplo 13.7
- Figuras activas 13.15, 13.16
- Problema de capítulo 39

Materia

Objetivos de habilidad: Calcular presión, densidad, gravedad específica y relaciones de flujo.

Plan de repaso:

Propiedades:

- Capítulo 9, secciones 9.1-9.3
- Examen rápido 9.1
- Ejemplos 9.1, 9.2, 9.4
- Figura activa 9.7

Presión:

- Capítulo 9, secciones 9.2, 9.4-9.6
- Exámenes rápidos 9.2-9.6
- Ejemplos 9.1, 9.5-9.9
- Figuras activas 9.20, 9.21
- Problemas de capítulo 25, 43

Relaciones de flujo:

- Capítulo 9, secciones 9.7, 9.8
- Examen rápido 9.7
- Ejemplos 9.11-9.14
- Problema de capítulo 46

Sonido

Objetivos de habilidad: Comprender la interferencia de las ondas y calcular las propiedades de las ondas, la rapidez del sonido, los corrimientos Doppler y la intensidad.

Plan de repaso:

Propiedades del sonido:

- Capítulo 14, secciones 14.1-14.4, 14.6
- Exámenes rápidos 14.1, 14.2
- Ejemplos 14.1, 14.2, 14.4, 14.5
- Figuras activas 14.10
- Problemas de capítulo 27

Interferencia/batimientos:

- Capítulo 14, secciones 14.7, 14.8, 14.11
- Examen rápido 14.7
- Ejemplos 14.6, 14.11
- Figuras activas 14.18, 14.25
- Problemas de capítulo 37, 57

Luz

Objetivos de habilidad: Comprender los espejos y las lentes, calcular los ángulos de reflexión, usar el índice de refracción y encontrar longitudes focales.

Plan de repaso:

Reflexión y refracción:

- Capítulo 22, secciones 22.1-22.4
- Exámenes rápidos 22.2-22.4
- Ejemplos 22.1-22.3
- Figuras activas 22.4, 22.6, 22.7
- Problemas de capítulo 11, 17, 19, 25

Espejos y lentes:

- Capítulo 23, secciones 23.1-23.6
- Exámenes rápidos 23.1, 23.2, 23.4-23.6
- Ejemplos 23.7, 23.8, 23.9
- Figuras activas 23.2, 23.16, 23.25
- Problemas de capítulo 25, 31, 35, 39

Electrostática

Objetivos de habilidad: Comprender y calcular el campo eléctrico, la fuerza electrostática y el potencial eléctrico.

Plan de repaso:

Ley de Coulomb:

- Capítulo 15, secciones 15.1-15.3
- Examen rápido 15.2
- Ejemplos 15.1-15.3
- Figura activa 15.6
- Problemas de capítulo 11

Campo eléctrico:

- Capítulo 15, secciones 15.4, 15.5
- Exámenes rápidos 15.3-15.6
- Ejemplos 15.4, 15.5
- Figuras activas 15.11, 15.16
- Problemas de capítulo 23, 27

Potencial:

- Capítulo 16, secciones 16.1-16.3
- Exámenes rápidos 16.1, 16.3-16.7
- Ejemplos 16.1, 16.4
- Figura activa 16.7
- Problemas de capítulo 7, 15

Circuitos

Objetivos de habilidad: Entender y calcular corriente, resistencia, potencia y energía, y usar análisis de circuitos.

Plan de repaso:

Ley de Ohm:

- Capítulo 17, secciones 17.1-17.4
- Exámenes rápidos 17.1, 17.3, 17.5
- Ejemplo 17.1
- Problema de capítulo 15

Potencia y energía:

- Capítulo 17, sección 17.6
- Exámenes rápidos 17.7-17.9
- Ejemplo 17.5
- Figura activa 17.9
- Problema de capítulo 38

Circuitos:

- Capítulo 18, secciones 18.2, 18.3
- Exámenes rápidos 18.3, 18.5, 18.6
- Ejemplos 18.1-18.3
- Figuras activas 18.2, 18.6

Átomos

Objetivos de habilidad: Calcular la vida media y comprender los procesos de decaimiento y las reacciones nucleares.

Plan de repaso:

Átomos:

- Capítulo 29, secciones 29.1, 29.2

Decaimiento radiactivo:

- Capítulo 29, secciones 29.3-29.5
- Ejemplos 29.2, 29.5
- Figuras activas 29.6, 29.7
- Problemas de capítulo 25, 31

Reacciones nucleares:

- Capítulo 29, sección 29.6
- Examen rápido 29.4
- Ejemplo 29.6
- Problemas de capítulo 35



Ésta es una vista nocturna de los múltiples destellos de relámpagos cayendo en el observatorio de Kitt Peak en Tucson, Arizona. Durante una tormenta eléctrica, una alta concentración de carga eléctrica en una nube crea un campo eléctrico mayor al normal entre la nube y la superficie terrestre con carga negativa. Este fuerte campo eléctrico crea una descarga eléctrica, una enorme chispa, entre la nube cargada y la tierra. Otras descargas que se observan en el cielo incluyen descargas nube a nube y las más frecuentes descargas intranube.

Fuerzas eléctricas y campos eléctricos

15

La electricidad es el alma de la civilización tecnológica y la sociedad moderna. Sin ella, se regresaría a mediados del siglo XIX: no teléfonos, no televisión, ninguno de los aparatos electrodomésticos que se dan por sentado. La medicina moderna sería una fantasía y, debido a la falta de equipo experimental sofisticado y computadoras rápidas, y especialmente la lenta diseminación de la información, la ciencia y la tecnología crecerían a un ritmo glacial.

En lugar de ello, con el descubrimiento y dominio de las fuerzas y campos eléctricos, se pueden ver arreglos de átomos, sondear el funcionamiento interior de una célula y enviar naves espaciales más allá de los límites del sistema solar. Todo esto fue posible sólo en las últimas generaciones de la vida humana; un parpadeo en comparación con los millones de años que la especie pasó forrajeando en las sabanas de África.

Alrededor de 700 a.C., los antiguos griegos realizaron el primer estudio conocido de la electricidad. Todo comenzó cuando alguien notó que un material fósil llamado ámbar atraía pequeños objetos después de frotarse con lana. Desde entonces se sabe que este fenómeno no se restringe al ámbar y la lana, sino que ocurre (en cierto grado) cuando casi cualesquiera dos sustancias no conductoras se frotan una con otra.

En este capítulo utilizamos el efecto de cargar mediante fricción para comenzar una investigación de las fuerzas eléctricas. Luego estudiamos la ley de Coulomb, que es la ley fundamental de fuerza entre cualesquiera dos partículas cargadas estacionarias. Se introduce el concepto de campo eléctrico asociado con cargas y se describen sus efectos sobre otras partículas cargadas. Se finaliza con discusiones del generador Van de Graaff y de la ley de Gauss.

- 15.1** Propiedades de las cargas eléctricas
- 15.2** Aislantes y conductores
- 15.3** Ley de Coulomb
- 15.4** El campo eléctrico
- 15.5** Líneas de campo eléctrico
- 15.6** Conductores en equilibrio electrostático
- 15.7** El experimento de la gota de aceite de Millikan
- 15.8** El generador Van de Graaff
- 15.9** Flujo eléctrico y ley de Gauss



Benjamín Franklin (1706-1790)

Franklin fue impresor, escritor, científico físico, inventor, diplomático y uno de los padres fundadores de Estados Unidos. Su obra acerca de la electricidad a finales de 1740 transformó una madeja de observaciones no relacionadas en una ciencia coherente.

Cargas iguales se repelen; ▶
cargas diferentes se atraen

15.1 Propiedades de las cargas eléctricas

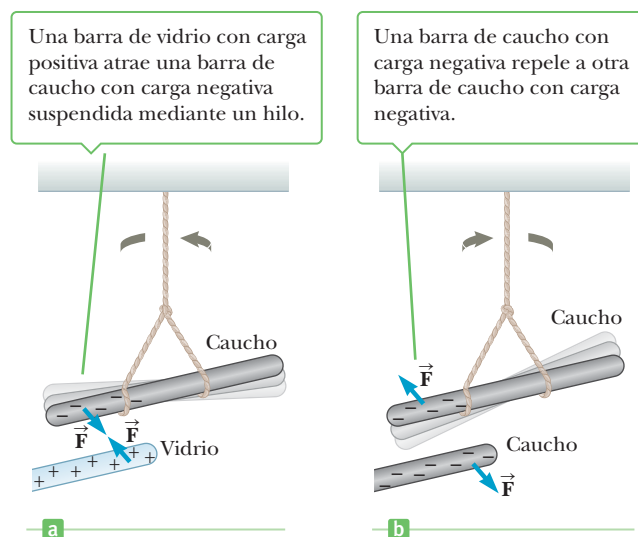
Después de pasar un peine de plástico por el cabello, descubrirá que el peine atrae trozos de papel. A menudo, la fuerza de atracción es lo suficientemente fuerte como para suspender el papel del peine, lo que desafía el jalón gravitacional de toda la Tierra. El mismo efecto ocurre con otros materiales que se frotran, como vidrio y caucho duro.

Otro experimento simple es frotar un globo inflado contra lana (o en el cabello). En un día seco, el globo frotado se pegará a la pared de una habitación, con frecuencia durante horas. Estos materiales quedaron cargados eléctricamente. Usted puede dar a su cuerpo una carga eléctrica si frota sus zapatos vigorosamente sobre un tapete de lana o al deslizarse a través del asiento de un automóvil. Luego puede sorprender y molestar a un amigo o compañero de trabajo con un toque de luz en el brazo, lo que entrega un ligero choque tanto a usted como a su víctima. (Si el compañero de trabajo es su jefe, ¡no espere un ascenso!) Estos experimentos funcionan mejor en un día seco porque la humedad excesiva puede facilitar la fuga de la carga.

Los experimentos también demuestran que existen dos tipos de carga eléctrica, que Benjamín Franklin (1706–1790) nombró **positiva** y **negativa**. La figura 15.1 ilustra la interacción de las dos cargas. Una barra dura de caucho (o plástico) que se frotó con piel se suspende mediante un trozo de cuerda. Cuando se le acerca una barra de vidrio que se frotó con seda, la barra de caucho es atraída hacia la barra de vidrio (figura 15.1a). Si dos barras de caucho cargadas (o dos barras de vidrio cargadas) se acercan una a la otra, como en la figura 15.1b, la fuerza entre ellas es repulsiva. Estas observaciones se pueden explicar al suponer que las barras de caucho y vidrio adquirieron diferentes tipos de exceso de carga. Se usa la convención sugerida por Franklin, donde el exceso de carga eléctrica en la barra de vidrio se denomina positiva y la de la barra de caucho se llama negativa. Sobre la base de tales observaciones, concluimos que **cargas iguales se repelen** y **cargas distintas se atraen**. Por lo general, los objetos contienen igual cantidad de carga positiva y negativa; las fuerzas eléctricas entre los objetos surgen cuando dichos objetos tienen cargas netas negativa o positiva.

Los portadores básicos de carga positiva de la naturaleza son los protones, que junto con los neutrones, se ubican en los núcleos de los átomos. Los núcleos, aproximadamente de 10^{-15} m de radio, están rodeados por una nube de electrones con carga negativa aproximadamente 10 mil veces más grande. Un electrón tiene la misma magnitud de carga que un protón, pero con signo opuesto. En un gramo de materia existen alrededor de 10^{23} protones con carga positiva e igual número de electrones con carga negativa, de modo que la carga neta es cero.

Figura 15.1 Un sistema experimental para la observación de la fuerza eléctrica entre dos objetos cargados.



Puesto que el núcleo de un átomo se mantiene firmemente en su lugar dentro de un sólido, los protones nunca se mueven de un material a otro. Los electrones son mucho más ligeros que los protones y por lo tanto se aceleran más fácilmente mediante fuerzas. Más aún, ocupan las regiones exteriores del átomo. En consecuencia, los objetos se cargan al ganar o perder electrones.

La carga se transfiere fácilmente de un tipo de material a otro. Frotar los dos materiales uno con otro sirve para aumentar el área de contacto, lo que facilita el proceso de transferencia.

Una característica importante de la carga es que **la carga eléctrica siempre se conserva**. La carga no se *crea* cuando dos objetos neutros se frotan uno con otro; en vez de ello, los objetos se cargan porque **la carga negativa se transfiere de un objeto al otro**. Un objeto gana una carga negativa mientras el otro pierde una cantidad igual de carga negativa y por lo tanto se queda con una carga positiva neta. Cuando una barra de vidrio se frota con seda, como en la figura 15.2, los electrones se transfieren de la barra a la seda. Como resultado, la barra de vidrio porta una carga positiva neta, la seda una carga negativa neta. Del mismo modo, cuando el caucho se frota con piel, los electrones se transfieren de la piel al caucho.

En 1909, Robert Millikan (1886–1953) descubrió que si un objeto está cargado, su carga siempre es un múltiplo de una unidad fundamental de carga, que se designa mediante el símbolo e . En términos modernos, decimos que la carga está **cuantizada**, lo cual significa que la carga ocurre en paquetes discretos que no se pueden subdividir más. Un objeto puede tener una carga de $\pm e$, $\pm 2e$, $\pm 3e$, etc., pero nunca¹ una carga fraccional de $\pm 0.5e$ o $\pm 0.22e$. Otros experimentos en la época de Millikan demostraron que el electrón tiene una carga de $-e$ y el protón tiene una carga igual pero opuesta de $+e$. Algunas partículas, como un neutrón, no tienen carga neta. Un átomo neutro (un átomo sin carga neta) contiene tantos protones como electrones. Ahora sabemos que el valor de e es $1.602\ 19 \times 10^{-19}$ C. (La unidad SI de carga eléctrica es el **coulomb** o C.)

15.2 Aislantes y conductores

Las sustancias se pueden clasificar en términos de su habilidad para conducir carga eléctrica.

En los **conductores**, las cargas eléctricas se mueven libremente en respuesta a una fuerza eléctrica. Todos los otros materiales se llaman **aislantes**.

El vidrio y el caucho son aislantes. Cuando tales materiales se cargan mediante frotación, sólo el área frotada queda cargada y no hay tendencia de que la carga se mueva hacia otras regiones del material. En contraste, los materiales como cobre, aluminio y plata son buenos conductores. Cuando tales materiales se cargan en alguna pequeña región, la carga se distribuye por sí misma con facilidad sobre toda la superficie del material. Si sostiene una barra de cobre en su mano y frota la barra con lana o piel, no atraerá un trozo de papel. Esto puede sugerir que un metal no se puede cargar. Sin embargo, si sostiene la barra de cobre con un aislante y luego la frota con lana o piel, la barra permanece cargada y atrae al papel. En el primer caso, las cargas eléctricas producidas por la frotación se movieron fácilmente desde el cobre a través de su cuerpo y finalmente a tierra. En el segundo caso, el mango aislante evita el flujo de carga a tierra.

Los **semiconductores** son una tercera clase de materiales y sus propiedades eléctricas están en algún lugar entre las de los aislantes y los conductores. Silicio y germanio son semiconductores bien conocidos que se usan ampliamente en la fabricación de una variedad de dispositivos electrónicos.

◀ La carga se conserva

Cada electrón (carga negativa) transferido desde la barra a la seda deja una carga equivalente positiva en la barra.

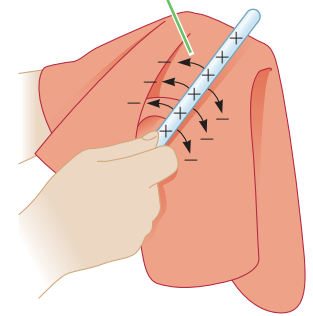


Figura 15.2 Cuando una barra de vidrio se frota con seda, los electrones se transfieren del vidrio a la seda. Debido a la conservación de carga, cada electrón agrega carga negativa a la seda y una carga positiva igual queda en la barra. Además, puesto que las cargas se transfieren en paquetes discretos, las cargas en los dos objetos son $\pm e$, $\pm 2e$, $\pm 3e$, etcétera.

¹ Existe fuerte evidencia de la existencia de partículas fundamentales llamadas **quarks** que tienen cargas de $\pm e/3$ o $\pm 2e/3$. La carga *todavía* está cuantizada, pero en unidades de $\pm e/3$ en lugar de $\pm e$. En el capítulo 30 se presenta un análisis más completo de los quarks y sus propiedades.

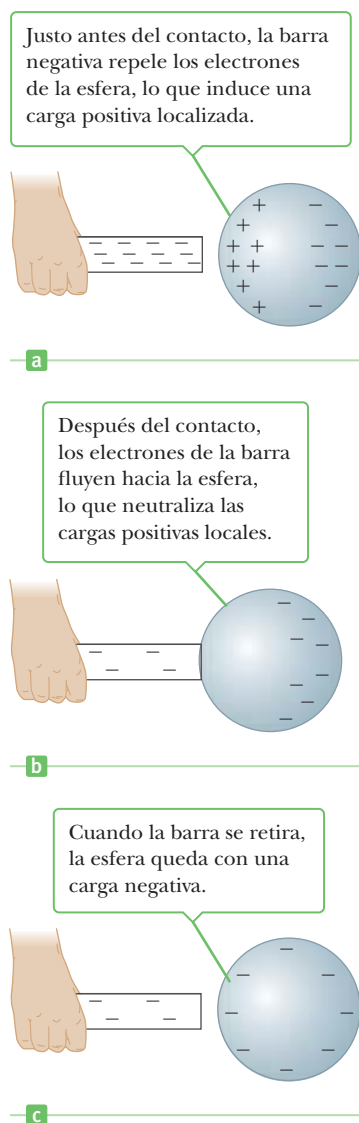


Figura 15.3 Carga de un objeto metálico mediante conducción.

Carga mediante conducción

Considere una barra de caucho con carga negativa que se pone en contacto con una esfera conductora neutra aislada. El exceso de electrones en la barra repele a los electrones en la esfera, lo que crea cargas positivas locales en la esfera neutra. En contacto, algunos electrones en la barra ahora son capaces de moverse hacia la esfera, como en la figura 15.3, lo que neutraliza las cargas positivas. Cuando la barra se retira, la esfera queda con una carga negativa neta. A este proceso se le conoce como carga mediante **conducción**. El objeto que se carga por tal proceso (la esfera) siempre queda con una carga que tiene el mismo signo que el objeto que efectúa la carga (la barra de caucho).

Carga mediante inducción

Decimos que un objeto está **aterrizado** cuando se conecta a un alambre conductor o tubería de cobre introducida en la tierra. La tierra se puede considerar como un depósito infinito de electrones; en efecto, puede aceptar o suministrar un número ilimitado de electrones. Con esta idea en mente, es posible comprender la carga de un conductor mediante un proceso conocido como **inducción**.

Considere una barra de caucho con carga negativa que se acerca a una esfera conductora neutra (no cargada) aislada, de modo que no hay ruta de conducción a tierra (figura 15.4). Inicialmente, la esfera es eléctricamente neutra (figura 15.4a). Cuando la barra con carga negativa se acerca más a la esfera, la fuerza repulsiva entre los electrones en la barra y los de la esfera provoca que algunos electrones se muevan hacia el lado de la esfera más alejado de la barra (figura 15.4b). La región de la esfera más cercana a la barra con carga negativa tiene un exceso de carga positiva debido a la migración de electrones lejos de dicha ubicación. Si un alambre conductor aterrizado se conecta a la esfera, como en la figura 15.4c, entonces algunos de los electrones dejan la esfera y viajan a tierra. Si el alambre a tierra se retira (figura 15.4d), entonces la esfera conductora queda con un exceso de carga positiva inducida. Finalmente, cuando la barra de caucho se remueve de la vecindad de la esfera (figura 15.4e), la carga positiva inducida permanece en la esfera no aterrizada. Aun cuando los núcleos atómicos con carga positiva permanecen fijos, este exceso de carga positiva se distribuye uniformemente sobre la superficie de la esfera no aterrizada debido a las fuerzas repulsivas entre las cargas iguales y la enorme movilidad de los electrones en un metal.

En el proceso de inducir una carga sobre la esfera, la barra de caucho cargada no pierde parte de su carga negativa porque nunca entra en contacto con la esfera. Más aún, la esfera queda con una carga opuesta a la de la barra de caucho. **Cargar un objeto mediante inducción no requiere contacto con el objeto que induce la carga.**

Un proceso similar para cargar mediante inducción en conductores también tiene lugar en los aislantes. En la mayoría de los átomos o moléculas neutras, el centro de carga positiva coincide con el centro de carga negativa. Sin embargo, en presencia de un objeto cargado, estos centros pueden separarse ligeramente, lo que resulta en más carga positiva sobre un lado de la molécula que en el otro. Este efecto se conoce como **polarización**. El realineamiento de carga dentro de moléculas individuales produce una carga inducida en la superficie del aislante, como se muestra en la figura 15.5a. Esta propiedad explica por qué un globo cargado mediante frotación se pegará a una pared eléctricamente neutra o por qué el peine que acabas de usar en el cabello atrae pequeños trozos de papel neutro.

Examen rápido

- 15.1** Una pared neutra atrae un objeto suspendido *A*. Éste también es atraído por un objeto con carga positiva *B*. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero acerca del objeto *A*? a) No está cargado. b) Tiene carga negativa. c) Tiene carga positiva. d) Puede estar cargado o no cargado.

15.3 Ley de Coulomb

En 1785, Charles Coulomb (1736–1806) estableció experimentalmente la ley fundamental de la fuerza eléctrica entre dos partículas cargadas estacionarias.

Una **fuerza eléctrica** tiene las siguientes propiedades:

1. Está dirigida a lo largo de una recta que une las dos partículas y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación r entre ellas.
2. Es proporcional al producto de las magnitudes de las cargas, $|q_1|$ y $|q_2|$, de las dos partículas.
3. Es atractiva si las cargas son de signo opuesto y repulsiva si las cargas tienen el mismo signo.

A partir de estas observaciones, Coulomb propuso la siguiente forma matemática para la fuerza eléctrica entre dos cargas:

La magnitud de la fuerza eléctrica F entre las cargas q_1 y q_2 separada por una distancia r está dada por

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad [15.1]$$

donde k_e es una constante llamada *constante de Coulomb*.

La ecuación 15.1, conocida como **ley de Coulomb**, se aplica exactamente sólo a cargas puntuales y a distribuciones esféricas de cargas, en cuyo caso r es la distancia entre los dos centros de carga. Las fuerzas eléctricas entre cargas inmóviles se llaman fuerzas *electrostáticas*. Las cargas en movimiento, además, crean fuerzas magnéticas, que se estudian en el capítulo 19.

El valor de la constante de Coulomb en la ecuación 15.1 depende de la elección de unidades. La unidad SI de carga es el **coulomb** (C). A partir del experimento, sabemos que la **constante de Coulomb** en unidades SI tiene el valor

$$k_e = 8.987\,5 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \quad [15.2]$$

Este número se puede redondear, dependiendo de la exactitud de otras cantidades en un problema dado. En el texto emplearemos dos o tres dígitos significativos, como siempre.

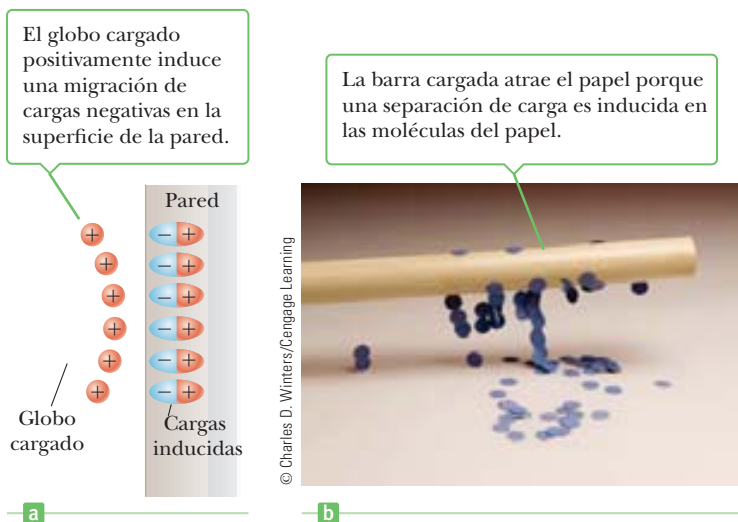
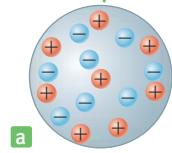
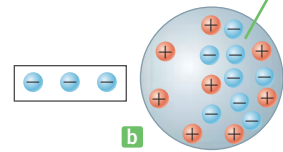


Figura 15.5 a) Un globo cargado es acercado a una pared aislante. b) Una barra de carga es acercada a trozos de papel.

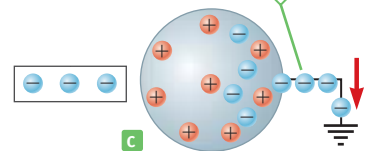
Una esfera metálica neutra, con igual número de cargas positivas y negativas.



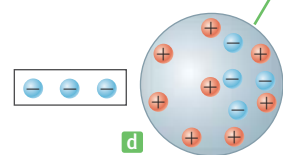
Los electrones en una esfera neutra se redistribuyen cuando una barra de caucho cargada se coloca cerca de la esfera.



Cuando la esfera está aterrizada, algunos de sus electrones salen a través del alambre de tierra.



Cuando la conexión a tierra se retira, la esfera tiene exceso de carga positiva que no se distribuye uniformemente.



Cuando la barra se retira, los electrones restantes se redistribuyen uniformemente y hay una distribución uniforme neta de carga positiva sobre la esfera.

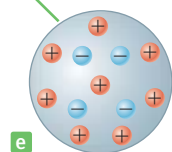


Figura 15.4 Carga de un objeto metálico mediante *inducción*. a) Una esfera metálica neutra b) una barra de caucho cargada se coloca cerca de la esfera c) la esfera está aterrizada d) la conexión a tierra se retira e) la barra se retira.



Charles Coulomb (1736-1806)

La principal contribución de Coulomb a la ciencia fue en el campo de la electrostática y el magnetismo. Durante su vida, también investigó las resistencias de los materiales e identificó las fuerzas que afectan a los objetos en vigas y, por lo tanto, contribuyó al campo de la mecánica estructural.

Tabla 15.1 Carga y masa de electrón, protón y neutrón

Partícula	Carga (C)	Masa (kg)
Electrón	-1.60×10^{-19}	9.11×10^{-31}
Protón	$+1.60 \times 10^{-19}$	1.67×10^{-27}
Neutrón	0	1.67×10^{-27}

La carga sobre el protón tiene una magnitud de $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. Por lo tanto, se necesitarían $1/e = 6.3 \times 10^{18}$ protones para crear una carga total de +1.0 C. Del mismo modo, 6.3×10^{18} electrones tendrían una carga de -1.0 C. Compare esta carga con el número de electrones libres en 1 cm³ de cobre, que está en el orden de 10^{23} . Aún así, 1.0 C es una cantidad muy grande. En experimentos electrostáticos típicos en los que una barra de caucho o vidrio se carga mediante fricción, hay una carga neta en el orden de 10^{-6} C (= 1 μC). Sólo una fracción muy pequeña de la carga total disponible se transfiere entre la barra y el material que frota. La tabla 15.1 menciona las cargas y masas de electrón, protón y neutrón.

Cuando use la ley de fuerza de Coulomb, recuerde que la fuerza es una cantidad vectorial y se debe tratar en concordancia. La figura activa 15.6a muestra la fuerza de repulsión eléctrica entre dos partículas con carga positiva. Como otras fuerzas, las fuerzas eléctricas obedecen la tercera ley de Newton; por lo tanto, las fuerzas \vec{F}_{12} y \vec{F}_{21} son iguales en magnitud pero opuestas en dirección. (La notación \vec{F}_{12} denota la fuerza que ejerce la partícula 1 sobre la partícula 2; del mismo modo, \vec{F}_{21} es la fuerza que ejerce la partícula 2 sobre la partícula 1.) A partir de la tercera ley de Newton, F_{12} y F_{21} siempre son iguales sin importar si q_1 y q_2 tienen la misma magnitud.

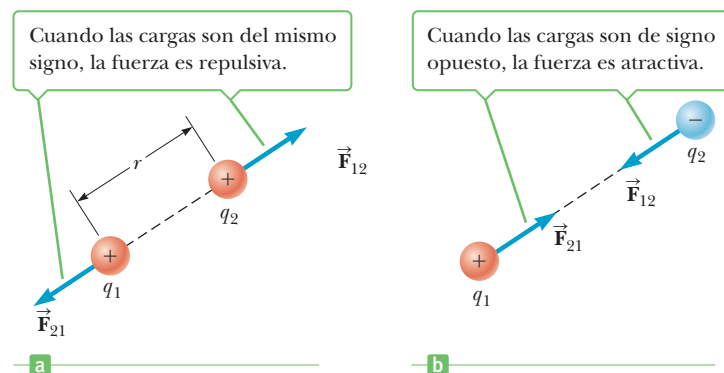
Examen rápido

15.2 El objeto A tiene una carga de +2 μC y el objeto B una carga de +6 μC. ¿Cuál enunciado es verdadero?

- a) $\vec{F}_{AB} = -3\vec{F}_{BA}$
- b) $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$
- c) $3\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

La fuerza de Coulomb es similar a la fuerza gravitacional. Ambas actúan a una distancia sin contacto directo. Ambas son inversamente proporcionales a la distancia al cuadrado, con la fuerza dirigida a lo largo de una recta que conecta los dos cuerpos. La forma matemática es la misma, con las masas m_1 y m_2 en la ley de Newton sustituidas por q_1 y q_2 en la ley de Coulomb y con la constante k_e de Coulomb en sustitución de la constante G de Newton. Existen dos diferencias importantes: 1) las fuerzas eléctricas pueden ser atractivas o repulsivas, pero las fuerzas gravitacionales siempre son atractivas y 2) la fuerza eléctrica entre partículas elementales cargadas es mucho más intensa que la fuerza gravitacional entre las mismas partículas, como lo demuestra el siguiente ejemplo.

Figura activa 15.6 Dos cargas puntuales separadas una distancia r ejercen una fuerza mutua dada por la ley de Coulomb. La fuerza sobre q_1 es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza sobre q_2 .



EJEMPLO 15.1 Fuerzas en un átomo de hidrógeno

OBJETIVO Contrastar las magnitudes de una fuerza eléctrica y una fuerza gravitacional.

PROBLEMA El electrón y el protón de un átomo de hidrógeno están separados (en promedio) por una distancia de aproximadamente 5.3×10^{-11} m. **a)** Determine las magnitudes de la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional que cada partícula ejerce sobre la otra y la razón de la fuerza eléctrica F_e a la fuerza gravitacional F_g . **b)** Calcule la aceleración causada por la fuerza eléctrica del protón sobre el electrón. Repita para la aceleración gravitacional.

ESTRATEGIA Resolver este problema sólo es cuestión de sustituir cantidades conocidas en las dos leyes de fuerza y luego encontrar la razón.

SOLUCIÓN

a) Calcule las magnitudes de las fuerzas eléctrica y gravitacional, y encuentre la razón F_e/F_g .

Sustituya $|q_1| = |q_2| = e$ y la distancia en la ley de Coulomb para encontrar la fuerza eléctrica:

$$F_e = k_e \frac{|e|^2}{r^2} = \left(8.99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Sustituya las masas y la distancia en la ley de gravedad de Newton para encontrar la fuerza gravitacional:

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = \left(6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right) \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

Encuentre la razón entre las dos fuerzas:

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.3 \times 10^{39}$$

b) Calcule la aceleración del electrón causada por la fuerza eléctrica. Repita para la aceleración gravitacional.

Use la segunda ley de Newton y la fuerza eléctrica que encontró en el inciso a):

$$m_e a_e = F_e \rightarrow a_e = \frac{F_e}{m_e} = \frac{8.2 \times 10^{-8} \text{ N}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} = 9.0 \times 10^{22} \text{ m/s}^2$$

Use la segunda ley de Newton y la fuerza gravitacional que encontró en el inciso a):

$$m_e a_g = F_g \rightarrow a_g = \frac{F_g}{m_e} = \frac{3.6 \times 10^{-47} \text{ N}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} = 4.0 \times 10^{-17} \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS La fuerza gravitacional entre los constituyentes cargados del átomo es despreciable en comparación con la fuerza eléctrica entre ellos. Sin embargo, la fuerza eléctrica es tan intensa que cualquier carga neta sobre un objeto atrae rápidamente cargas opuestas cercanas, lo que neutraliza el objeto. Como resultado, la gravedad juega un mayor papel en la mecánica de los objetos en movimiento de la vida diaria.

PREGUNTA 15.1 Si la distancia entre dos cargas se duplica, ¿en qué factor cambia la magnitud de la fuerza eléctrica?

EJERCICIO 15.1 a) Encuentre la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos protones separados por 1 femtómetro (10^{-15} m), aproximadamente la distancia entre dos protones en el núcleo de un átomo de helio. b) Si los protones no se mantienen unidos por la fuerza nuclear fuerte, ¿cuál sería su aceleración inicial debido a la fuerza eléctrica entre ellos?

RESPUESTAS a) 2×10^2 N b) 1×10^{29} m/s²

El principio de superposición

Cuando un número de cargas separadas actúa sobre la carga de interés, cada una ejerce una fuerza eléctrica. Estas fuerzas eléctricas se pueden calcular por separado, una a la vez,

y luego sumarse como vectores. Éste es otro ejemplo del **principio de superposición**. A continuación se ilustra este procedimiento en una dimensión.

EJEMPLO 15.2 Encontrar equilibrio electrostático

OBJETIVO Aplicar la ley de Coulomb en una dimensión.

PROBLEMA Tres cargas yacen a lo largo del eje x , como en la figura 15.7. La carga positiva $q_1 = 15 \mu\text{C}$ está en $x = 2.0 \text{ m}$, y la carga positiva $q_2 = 6.0 \mu\text{C}$ está en el origen. ¿Dónde debe colocarse una carga *negativa* q_3 sobre el eje x , de modo que la fuerza eléctrica resultante sobre ella sea cero?

ESTRATEGIA Si q_3 está a la derecha o a la izquierda de las otras dos cargas, la fuerza neta sobre q_3 no puede ser cero porque entonces \vec{F}_{13} y \vec{F}_{23} actúan en la misma dirección. En consecuencia, q_3 se debe encontrar entre las otras dos cargas. Escriba \vec{F}_{13} y \vec{F}_{23} en términos de la posición coordenada desconocida x , luego súmelas e iguale a cero y resuelva para la incógnita. La solución se puede obtener con la fórmula cuadrática.

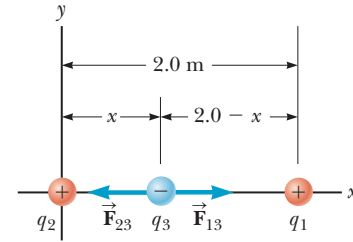


Figura 15.7 (Ejemplo 15.2) Tres cargas puntuales se colocan a lo largo del eje x . La carga q_3 es negativa, mientras que q_1 y q_2 son positivas. Si la fuerza resultante sobre q_3 es cero, la fuerza \vec{F}_{13} ejercida por q_1 sobre q_3 debe ser igual en magnitud y opuesta a la fuerza \vec{F}_{23} ejercida por q_2 sobre q_3 .

SOLUCIÓN

Escriba la componente x de \vec{F}_{13} :

$$F_{13x} = +k_e \frac{(15 \times 10^{-6} \text{ C})|q_3|}{(2.0 \text{ m} - x)^2}$$

Escriba la componente x de \vec{F}_{23} :

$$F_{23x} = -k_e \frac{(6.0 \times 10^{-6} \text{ C})|q_3|}{x^2}$$

Igualé la suma a cero:

$$k_e \frac{(15 \times 10^{-6} \text{ C})|q_3|}{(2.0 \text{ m} - x)^2} - k_e \frac{(6.0 \times 10^{-6} \text{ C})|q_3|}{x^2} = 0$$

Cancele k_e , 10^{-6} y q_3 de la ecuación y reordene términos (las cifras significativas explícitas y las unidades se suspenden temporalmente por claridad):

$$(1) \quad 6(2 - x)^2 = 15x^2$$

Escriba esta ecuación en forma cuadrática estándar, $ax^2 + bx + c = 0$:

$$6(4 - 4x + x^2) = 15x^2 \rightarrow 2(4 - 4x + x^2) = 5x^2$$

$$3x^2 + 8x - 8 = 0$$

Aplique la fórmula cuadrática:

$$x = \frac{-8 \pm \sqrt{64 - (4)(3)(-8)}}{2 \cdot 3} = \frac{-4 \pm 2\sqrt{10}}{3}$$

Sólo la raíz positiva tiene sentido:

$$x = 0.77 \text{ m}$$

COMENTARIOS Advierta que se requirió razonamiento físico para elegir entre dos posibles respuestas para x , que casi siempre es el caso cuando se involucran ecuaciones cuadráticas. Podría evitarse el uso de la fórmula cuadrática al tomar la raíz cuadrada de ambos lados de la ecuación (1); sin embargo, con frecuencia este atajo no está disponible.

PREGUNTA 15.2 Si q_1 tiene la misma magnitud que antes, pero es negativa, ¿en qué región a lo largo del eje x sería posible que la fuerza eléctrica neta sobre q_3 sea cero? a) $x < 0$ b) $0 < x < 2 \text{ m}$ c) $2 \text{ m} < x$

EJERCICIO 15.2 Tres cargas se encuentran a lo largo del eje x . Una carga positiva $q_1 = 10.0 \mu\text{C}$ está en $x = 1.00 \text{ m}$, y una carga negativa $q_2 = -2.00 \mu\text{C}$ está en el origen. ¿Dónde se debe colocar una carga positiva q_3 sobre el eje x de modo que la fuerza resultante sea cero?

RESPUESTA $x = -0.809 \text{ m}$

■ EJEMPLO 15.3 Un triángulo de carga

OBJETIVO Aplicar la ley de Coulomb en dos dimensiones.

PROBLEMA Considere tres cargas puntuales en las esquinas de un triángulo, como se muestra en la figura 15.8, donde $q_1 = 6.00 \times 10^{-9} \text{ C}$, $q_2 = -2.00 \times 10^{-9} \text{ C}$ y $q_3 = 5.00 \times 10^{-9} \text{ C}$. **a)** Encuentre los componentes de la fuerza \vec{F}_{23} ejercida por q_2 sobre q_3 . **b)** Encuentre las componentes de la fuerza \vec{F}_{13} ejercida por q_1 sobre q_3 . **c)** Encuentre la fuerza resultante sobre q_3 , en términos de las componentes y también en términos de magnitud y dirección.

ESTRATEGIA La ley de Coulomb da la magnitud de cada fuerza, que se puede separar con trigonometría de triángulo recto en componentes x y y . Sume los vectores en forma de componentes y luego encuentre la magnitud y dirección del vector resultante.

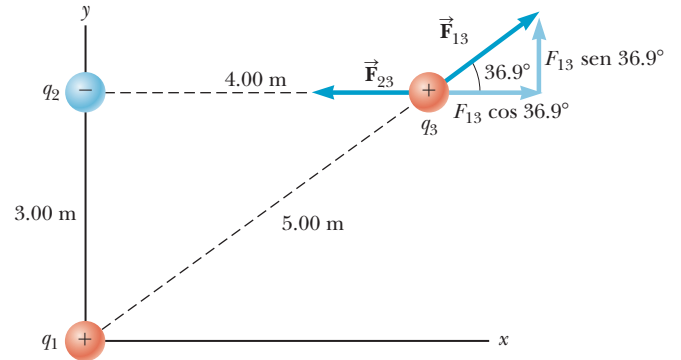


Figura 15.8 (Ejemplo 15.3) La fuerza ejercida por q_1 sobre q_3 es \vec{F}_{13} . La fuerza ejercida por q_2 sobre q_3 es \vec{F}_{23} . La fuerza resultante \vec{F}_3 ejercida sobre q_3 es la suma vectorial $\vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$.

SOLUCIÓN

a) Determine las componentes de la fuerza ejercida por q_2 sobre q_3 .

Encuentre la magnitud de \vec{F}_{23} con la ley de Coulomb:

$$F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{r^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2.00 \times 10^{-9} \text{ C})(5.00 \times 10^{-9} \text{ C})}{(4.00 \text{ m})^2}$$

$$F_{23} = 5.62 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Puesto que \vec{F}_{23} es horizontal y apunta en la dirección negativa, el negativo de la magnitud proporciona la componente x , y la componente y es cero:

$$F_{23x} = -5.62 \times 10^{-9} \text{ N}$$

$$F_{23y} = 0$$

b) Determine las componentes de la fuerza ejercida por q_1 sobre q_3 .

Encuentre la magnitud de \vec{F}_{13} :

$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{r^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(6.00 \times 10^{-9} \text{ C})(5.00 \times 10^{-9} \text{ C})}{(5.00 \text{ m})^2}$$

$$F_{13} = 1.08 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Use el triángulo dado para encontrar las componentes de \vec{F}_{13} :

$$F_{13x} = F_{13} \cos \theta = (1.08 \times 10^{-8} \text{ N}) \cos (36.9^\circ) = 8.64 \times 10^{-9} \text{ N}$$

$$F_{13y} = F_{13} \sin \theta = (1.08 \times 10^{-8} \text{ N}) \sin (36.9^\circ) = 6.48 \times 10^{-9} \text{ N}$$

c) Determine las componentes del vector resultante.

Sume las componentes x para encontrar la resultante F_x :

$$F_x = -5.62 \times 10^{-9} \text{ N} + 8.64 \times 10^{-9} \text{ N} = 3.02 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Sume las componentes y para encontrar la resultante F_y :

$$F_y = 0 + 6.48 \times 10^{-9} \text{ N} = 6.48 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Encuentre la magnitud de la fuerza resultante sobre la carga q_3 , con el uso del teorema de Pitágoras:

$$|\vec{F}| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(3.01 \times 10^{-9} \text{ N})^2 + (6.50 \times 10^{-9} \text{ N})^2} = 7.15 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Determine el ángulo que la fuerza resultante forma con respecto al eje x positivo:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{6.48 \times 10^{-9} \text{ N}}{3.02 \times 10^{-9} \text{ N}}\right) = 65.0^\circ$$

(continúa)

COMENTARIOS Los métodos utilizados aquí son como los empleados con la ley de gravedad de Newton en dos dimensiones.

PREGUNTA 15.3 Sin calcular realmente la fuerza eléctrica sobre q_2 , determine el cuadrante hacia donde apunta el vector de fuerza eléctrica.

EJERCICIO 15.3 Con el mismo triángulo, encuentre las componentes vectoriales de la fuerza eléctrica sobre q_1 , así como la magnitud y dirección del vector.

RESPUESTAS $F_x = -8.64 \times 10^{-9} \text{ N}$, $F_y = 5.52 \times 10^{-9} \text{ N}$, $F = 1.03 \times 10^{-8} \text{ N}$, $\theta = 147^\circ$

15.4 El campo eléctrico

La fuerza gravitacional y la fuerza electrostática son capaces de actuar a lo largo del espacio, lo que produce un efecto incluso cuando no hay algún contacto físico entre los objetos involucrados. Las fuerzas de campo se pueden estudiar en varias formas, pero un enfoque desarrollado por Michael Faraday (1791–1867) es el más práctico. En este enfoque, se dice que existe un **campo eléctrico** en la región de espacio alrededor de un objeto cargado. El campo eléctrico ejerce una fuerza eléctrica sobre cualquier otro objeto cargado dentro del campo. Esto difiere del concepto de la ley de Coulomb de una fuerza ejercida a una distancia en que la fuerza ahora se ejerce por algo, el campo, que está en la misma posición que el objeto cargado.

La figura 15.9 muestra un objeto con una pequeña carga positiva q_0 colocada cerca de un segundo objeto con una carga positiva mucho más grande Q .

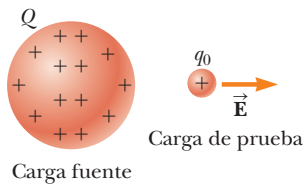


Figura 15.9 Un pequeño objeto con una carga positiva q_0 , colocado cerca de un objeto con una carga positiva mayor Q , experimenta un campo eléctrico \vec{E} dirigido como se muestra. La magnitud del campo eléctrico en la posición de q_0 se define como la fuerza eléctrica sobre q_0 dividida entre la carga q_0 .

El campo eléctrico \vec{E} producido por una carga Q en la posición de una pequeña carga “de prueba” q_0 se define como la fuerza eléctrica \vec{F} ejercida por Q sobre q_0 , dividida entre la carga de prueba q_0 :

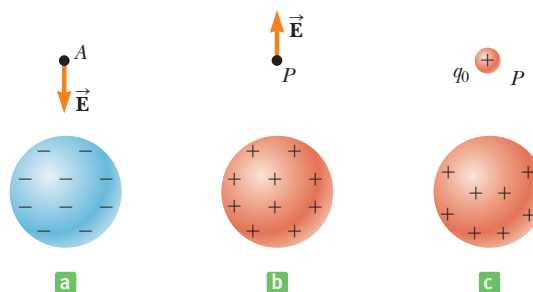
$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_0} \quad [15.3]$$

Unidad SI: newton por coulomb (N/C)

Conceptual y experimentalmente, se requiere que la carga de prueba q_0 sea muy pequeña (arbitrariamente pequeña, de hecho), de modo que no cause reordenamiento significativo de la carga que crea el campo eléctrico \vec{E} . Sin embargo, matemáticamente, el tamaño de la carga de prueba no hace diferencia: el cálculo resulta el mismo, sin importar lo anterior. En vista de esto, el uso de $q_0 = 1 \text{ C}$ en la ecuación 15.3 puede ser conveniente, si no riguroso.

Cuando se usa una carga de prueba positiva, el campo eléctrico siempre tiene la misma dirección que la fuerza eléctrica sobre la carga de prueba, lo que se sigue a partir de la ecuación 15.3. Por lo tanto, en la figura 15.9, la dirección del campo eléctrico es horizontal y hacia la derecha. El campo eléctrico en el punto A de la figura 15.10a es vertical y hacia abajo, porque en dicho punto una carga de prueba positiva se atraería hacia la esfera con carga negativa.

Figura 15.10 a) El campo eléctrico en A debido a la esfera con carga negativa es hacia abajo, hacia la carga negativa. b) El campo eléctrico en P debido a la esfera conductora con carga positiva es hacia arriba, alejándose de la carga positiva. c) Una carga de prueba q_0 colocada en P causará un reordenamiento de carga sobre la esfera, a menos que q_0 sea muy pequeña en comparación con la carga sobre la esfera.



Una vez que se conoce el campo eléctrico debido a un ordenamiento dado de cargas en algún punto, la fuerza sobre *cualquier* partícula con carga q colocada en dicho punto se puede calcular a partir de un reordenamiento de la ecuación 15.3:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad [15.4]$$

Aquí, q_0 se sustituyó con q , que no necesita ser una simple carga de prueba.

Como se muestra en la figura activa 15.11, la dirección de \vec{E} es la dirección de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba positiva q_0 colocada en el campo. Se dice que **en un punto existe un campo eléctrico si en dicho lugar una carga de prueba experimenta una fuerza eléctrica.**

Considere una carga puntual q ubicada a una distancia r de una carga de prueba q_0 . De acuerdo con la ley de Coulomb, la *magnitud* de la fuerza eléctrica de la carga q sobre la carga de prueba es

$$F = k_e \frac{|q||q_0|}{r^2} \quad [15.5]$$

Puesto que la magnitud del campo eléctrico en la posición de la carga de prueba se define como $E = F/q_0$, vemos que la *magnitud* del campo eléctrico debido a la carga q en la posición de q_0 es

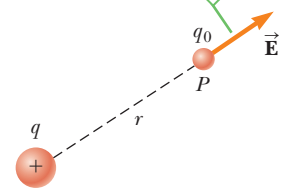
$$E = k_e \frac{|q|}{r^2} \quad [15.6]$$

La ecuación 15.6 puntualiza una importante propiedad de los campos eléctricos que los convierte en cantidades útiles para describir los fenómenos eléctricos. Como la ecuación indica, un campo eléctrico en un punto dado depende sólo de la carga q sobre el objeto que establece el campo y la distancia r desde dicho objeto hacia un punto específico en el espacio. Como resultado, se puede decir que en el punto P de la figura activa 15.11 existe un campo eléctrico haya o no una carga de prueba en P .

El principio de superposición se sostiene cuando se calcula el campo eléctrico debido a un grupo de cargas puntuales. Primero use la ecuación 15.6 para calcular el campo eléctrico producido por cada carga individualmente en un punto y luego sume los campos eléctricos como vectores.

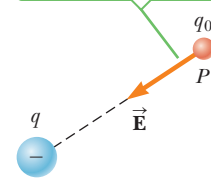
También es importante explotar cualquier simetría de la distribución de carga. Por ejemplo, si en $x = a$ y $x = -a$ se colocan cargas iguales, el campo eléctrico es cero en el origen, por simetría. De igual modo, si el eje x tiene una distribución uniforme de carga positiva, se puede suponer por simetría que el campo eléctrico apunta alejándose del eje x y es cero paralelo a dicho eje.

Si q es positiva, el campo eléctrico en P apunta radialmente hacia afuera desde q .



a

Si q es negativa, el campo eléctrico en P apunta radialmente hacia adentro, hacia q .



b

Figura activa 15.11
Una carga de prueba q_0 en P está a una distancia r de una carga puntual q .

■ Examen rápido

15.3 Una carga de prueba de $+3 \mu\text{C}$ está en un punto P donde el campo eléctrico debido a otras cargas se dirige hacia la derecha y tiene una magnitud de $4 \times 10^6 \text{ N/C}$. Si la carga de prueba se sustituye con una carga de $-3 \mu\text{C}$, el campo eléctrico en P
a) tiene la misma magnitud que antes, pero cambia de dirección, b) aumenta en magnitud y cambia de dirección, c) permanece igual, d) disminuye en magnitud y cambia de dirección.

15.4 Un anillo circular de carga, con radio b , tiene una carga total q distribuida uniformemente a su alrededor. Determine la magnitud del campo eléctrico en el centro del anillo. a) 0 b) $k_e q/b^2$ c) $k_e q^2/b^2$ d) $k_e q^2/b$ e) ninguna de las anteriores respuestas es correcta.

15.5 Un electrón “libre” y un protón “libre” se colocan en un campo eléctrico idéntico. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero? a) Sobre cada partícula actúa la misma fuerza eléctrica y tiene la misma aceleración. b) La fuerza eléctrica sobre el protón es mayor en magnitud que la fuerza eléctrica sobre el electrón, pero en la dirección opuesta. c) La fuerza eléctrica sobre el protón es igual en magnitud a la fuerza eléctrica sobre el electrón, pero en la dirección opuesta. d) La magnitud de la aceleración del electrón es mayor que la del protón. e) Ambas partículas tienen la misma aceleración.

EJEMPLO 15.4 Aceite electrificado

OBJETIVO Usar las fuerzas y campos eléctricos, junto con la segunda ley de Newton, en un problema unidimensional.

PROBLEMA En un experimento, diminutas gotas de aceite adquieren una pequeña carga negativa mientras caen a través de un vacío (presión = 0). Un campo eléctrico de magnitud 5.92×10^4 N/C apunta en línea recta hacia abajo. **a)** Se observa que una gotita en particular permanece suspendida contra la gravedad. Si la masa de la gotita es 2.93×10^{-15} kg, determine la carga que porta la gotita. **b)** Otra gotita de la misma masa cae 10.3 cm desde el reposo en 0.250 s, de nuevo moviéndose a través de un vacío. Determine la carga que porta la gotita.

ESTRATEGIA Use la segunda ley de Newton con las fuerzas gravitacional y eléctrica. En ambas partes el campo eléctrico \vec{E} apunta hacia abajo, que se toma como la dirección negativa, como es usual. En la parte a), la aceleración es igual a cero. En el inciso b), la aceleración es uniforme, de modo que las ecuaciones cinemáticas dan la aceleración. Entonces la ley de Newton se puede resolver para q .

SOLUCIÓN

a) Determine la carga sobre la gotita suspendida.

Aplique la segunda ley de Newton a la gotita en la dirección vertical:

E apunta hacia abajo, por lo tanto es negativo. Sea $a = 0$ en la ecuación (1) y resuelva para q :

$$(1) \quad ma = \sum F = -mg + Eq$$

$$q = \frac{mg}{E} = \frac{(2.93 \times 10^{-15} \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{-5.92 \times 10^4 \text{ N/C}} \\ = -4.85 \times 10^{-19} \text{ C}$$

b) Determine la carga sobre la gotita que cae.

Use la ecuación de desplazamiento cinemático para encontrar la aceleración:

Sustituya $\Delta y = -0.103$ m, $t = 0.250$ s y $v_0 = 0$:

$$\Delta y = \frac{1}{2}at^2 + v_0t$$

$$-0.103 \text{ m} = \frac{1}{2}a(0.250 \text{ s})^2 \rightarrow a = -3.30 \text{ m/s}^2$$

Resuelva la ecuación (1) para q y sustituya:

$$q = \frac{m(a + g)}{E} \\ = \frac{(2.93 \times 10^{-15} \text{ kg})(-3.30 \text{ m/s}^2 + 9.80 \text{ m/s}^2)}{-5.92 \times 10^4 \text{ N/C}} \\ = -3.22 \times 10^{-19} \text{ C}$$

COMENTARIOS Este ejemplo muestra características similares al experimento de la gota de aceite de Millikan que se estudió en la sección 15.7 y que determinó el valor de la carga eléctrica fundamental e . Observe que, en ambas partes del ejemplo, la carga casi es un múltiplo de e .

PREGUNTA 15.4 ¿Cuál sería la aceleración de la gota de aceite en el inciso a), si el campo eléctrico súbitamente invierte su dirección sin cambiar su magnitud?

EJERCICIO 15.4 Suponga que una gota de masa desconocida permanece suspendida contra la gravedad cuando $E = -2.70 \times 10^5$ N/C. ¿Cuál es la masa mínima de la gota?

RESPUESTA 4.41×10^{-15} kg

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS**Cálculo de fuerzas y campos eléctricos**

El siguiente procedimiento se utiliza para calcular fuerzas eléctricas. El mismo se puede usar para calcular un campo eléctrico, simplemente sustituyendo la carga de interés, q , con una carga de prueba conveniente y al final dividir entre la carga de prueba:

1. **Dibuje** un diagrama de las cargas en el problema.
2. **Identifique** la carga de interés, q , y enciérrela en un círculo.
3. **Convierta todas las unidades** a SI, con cargas en coulombs y distancias en metros, para ser consistente con el valor SI de la constante de Coulomb k_e .
4. **Aplique la ley de Coulomb.** Para cada carga Q , determine la fuerza eléctrica sobre la carga de interés, q . La magnitud de la fuerza se puede encontrar a partir de la ley de Coulomb.

La dirección vectorial de la fuerza eléctrica es a lo largo de la recta de las dos cargas, con dirección alejándose de Q si las cargas tienen el mismo signo y hacia Q si las cargas tienen el signo opuesto. Determine el ángulo θ que este vector forma con el eje x positivo. La componente x de la fuerza eléctrica ejercida por Q sobre q será $F \cos \theta$, y la componente y será $F \sin \theta$.

5. **Sume todas las componentes x** , y obtenga la componente x de la fuerza eléctrica resultante.
6. **Sume todas las componentes y** , y obtenga la componente y de la fuerza eléctrica resultante.
7. **Use el teorema de Pitágoras y trigonometría** para encontrar la magnitud y dirección de la fuerza resultante si se desea.

■ EJEMPLO 15.5 Campo eléctrico debido a dos cargas puntuales

OBJETIVO Usar el principio de superposición para calcular el campo eléctrico debido a dos cargas puntuales.

PROBLEMA La carga $q_1 = 7.00 \mu\text{C}$ está en el origen y la carga $q_2 = -5.00 \mu\text{C}$ está en el eje x , 0.300 m del origen (figura 15.12). **a)** Encuentre la magnitud y dirección del campo eléctrico en el punto P , que tiene coordenadas $(0, 0.400)$ m. **b)** Encuentre la fuerza sobre una carga de 2.00×10^{-8} C colocada en P .

ESTRATEGIA Siga la estrategia para solución de problemas, encuentre el campo eléctrico en el punto P debido a cada carga individual en términos de las componentes x y y , luego sume las componentes de cada tipo para obtener las componentes x y y del campo eléctrico resultante en P . La magnitud de la fuerza en el inciso b) se puede encontrar al simplemente multiplicar la magnitud del campo eléctrico por la carga.

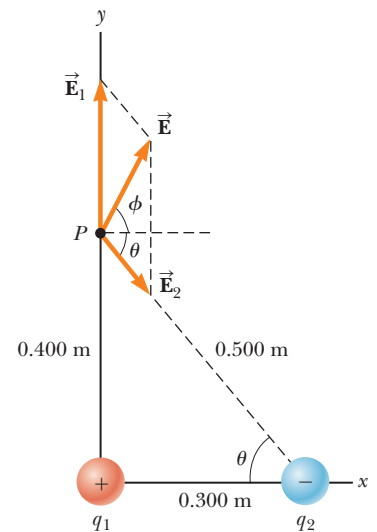


Figura 15.12 (Ejemplo 15.5) El campo eléctrico resultante \vec{E} en P es igual a la suma vectorial $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$, donde \vec{E}_1 es el campo debido a la carga positiva q_1 y \vec{E}_2 es el campo debido a la carga negativa q_2 .

SOLUCIÓN

a) Calcule el campo eléctrico en P .

Encuentre la magnitud de \vec{E}_1 con la ecuación 15.6:

El vector \vec{E}_1 es vertical y forma un ángulo de 90° con respecto al eje positivo x . Use este hecho para encontrar sus componentes:

A continuación, encuentre la magnitud de \vec{E}_2 , de nuevo con la ecuación 15.6:

Obtenga la componente x de \vec{E}_2 , a partir del triángulo en la figura 15.12 para encontrar $\cos \theta$:

Obtenga la componente y de la misma forma, pero se tiene que proporcionar un signo menos para $\sin \theta$ porque esta componente se dirige hacia abajo:

$$E_1 = k_e \frac{|q_1|}{r_1^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(7.00 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.400 \text{ m})^2}$$

$$= 3.93 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$E_{1x} = E_1 \cos(90^\circ) = 0$$

$$E_{1y} = E_1 \sin(90^\circ) = 3.93 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k_e \frac{|q_2|}{r_2^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(5.00 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.500 \text{ m})^2}$$

$$= 1.80 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$\cos \theta = \frac{\text{ady}}{\text{hip}} = \frac{0.300}{0.500} = 0.600$$

$$E_{2x} = E_2 \cos \theta = (1.80 \times 10^5 \text{ N/C})(0.600)$$

$$= 1.08 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$\sin \theta = \frac{\text{op}}{\text{hip}} = \frac{0.400}{0.500} = 0.800$$

$$E_{2y} = E_2 \sin \theta = (1.80 \times 10^5 \text{ N/C})(-0.800)$$

$$= -1.44 \times 10^5 \text{ N/C}$$

(continúa)

Sume las componentes x para obtener la componente x del vector resultante:

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} = 0 + 1.08 \times 10^5 \text{ N/C} = 1.08 \times 10^5 \text{ N/C}$$

Sume las componentes y para obtener la componente y del vector resultante:

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} = 3.93 \times 10^5 \text{ N/C} - 1.44 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$E_y = 2.49 \times 10^5 \text{ N/C}$$

Use el teorema de Pitágoras para encontrar la magnitud del vector resultante:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 2.71 \times 10^5 \text{ N/C}$$

La función tangente inversa produce la dirección del vector resultante:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2.49 \times 10^5 \text{ N/C}}{1.08 \times 10^5 \text{ N/C}}\right) = 66.6^\circ$$

b) Determine la fuerza sobre una carga de $2.00 \times 10^{-8} \text{ C}$ colocada en P .

Calcule la magnitud de la fuerza (la dirección es la misma que la de \vec{E} porque la carga es positiva):

$$F = Eq = (2.71 \times 10^5 \text{ N/C})(2.00 \times 10^{-8} \text{ C})$$

$$= 5.42 \times 10^{-3} \text{ N}$$

COMENTARIOS En este problema hubo muchos pasos, pero cada uno fue muy corto. Cuando se atacan tales problemas, es importante enfocarse en un pequeño paso a la vez. La solución no proviene de un salto de genialidad, sino del ensamble de algunas partes relativamente sencillas.

PREGUNTA 15.5 Suponga que q_2 se mueve lentamente hacia la derecha. ¿Qué ocurriría con el ángulo ϕ ?

EJERCICIO 15.5 a) Coloque una carga de $-7.00 \mu\text{C}$ en el punto P y encuentre la magnitud y dirección del campo eléctrico en la ubicación de q_2 debido a q_1 y la carga en P . b) Determine la magnitud y dirección de la fuerza sobre q_2 .

RESPUESTAS a) $5.84 \times 10^5 \text{ N/C}$, $\phi = 20.2^\circ$ b) $F = 2.92 \text{ N}$, $\phi = 200^\circ$.

15.5 Líneas de campo eléctrico

Un conveniente auxiliar para visualizar los patrones de campo eléctrico es dibujar líneas que apuntan en la dirección del vector de campo eléctrico en cualquier punto. Estas líneas, que introdujo Michael Faraday y llamó **líneas de campo eléctrico**, se relacionan con el campo eléctrico en cualquier región del espacio en la siguiente forma:

1. El vector de campo eléctrico \vec{E} es tangente a las líneas del campo eléctrico en cada punto.
2. El número de líneas por unidad de área a través de una superficie perpendicular a las líneas es proporcional a la intensidad del campo eléctrico en una región dada.

Tip 15.1 Las líneas de campo eléctrico no son trayectorias de partículas

Las líneas de campo eléctrico *no* son objetos materiales. Se usan solamente como una representación visual del campo eléctrico en varias posiciones. Excepto en casos especiales, *no* representan la trayectoria de una partícula cargada liberada en un campo eléctrico.

Observe que \vec{E} es grande cuando las líneas de campo están juntas y pequeño cuando las líneas están separadas.

La figura 15.13a muestra algunas líneas de campo eléctrico representativas para una sola carga puntual positiva. Este dibujo bidimensional contiene sólo las líneas de campo que yacen en el plano que contiene la carga puntual. En realidad, las líneas se dirigen radialmente hacia afuera desde la carga en *todas* direcciones, un poco como las púas de un puerco espín enojado. Puesto que una carga q repelería una carga de prueba positiva colocada en este campo, las líneas se dirigen radialmente alejándose de la carga positiva. Las líneas de campo eléctrico para una sola carga puntual negativa se dirigen hacia la carga (figura 15.13b) porque una carga de prueba positiva es atraída por una carga negativa. En cualquier caso, las líneas son radiales y se extienden hacia el infinito. Observe que las

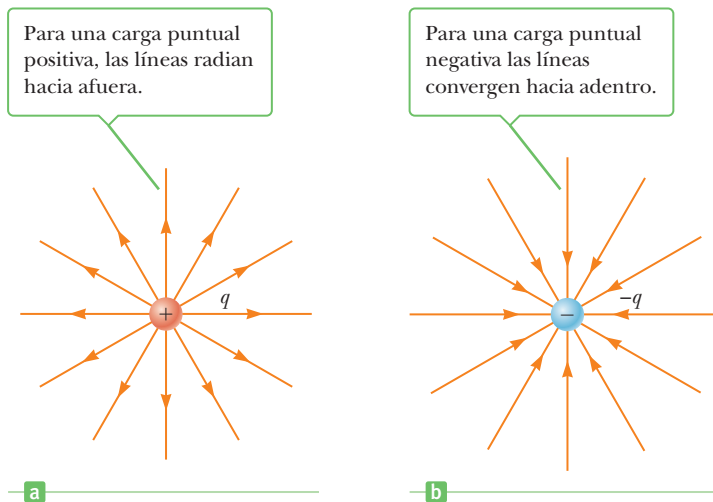


Figura 15.13 a), b) Líneas de campo eléctrico para una carga puntual. Observe que las figuras sólo muestran aquellas líneas de campo que yacen en el plano de la página.

líneas están más juntas conforme se acercan a la carga, lo que indica que la intensidad del campo aumenta. La ecuación 15.6 verifica que, de hecho, éste es el caso.

Las reglas para dibujar líneas de campo eléctrico para cualquier distribución de carga se siguen directamente de la relación entre líneas de campo eléctrico y vectores de campo eléctrico:

1. Las líneas para un grupo de cargas puntuales deben comenzar en las cargas positivas y terminar en las cargas negativas. En el caso de un exceso de carga, algunas líneas comenzarán o terminarán infinitamente lejos.
2. El número de líneas dibujadas que salen de una carga positiva o terminan en una carga negativa es proporcional a la magnitud de la carga.
3. Dos líneas de carga no pueden cruzarse una a otra.

La figura 15.14 muestra la hermosa simetría de las líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales de igual magnitud pero signo opuesto. Esta configuración de carga se llama **dipolo eléctrico**. Observe que el número de líneas que comienzan en la carga positiva debe ser igual al número de las que terminan en la carga negativa. En puntos muy cercanos a cualquier carga, las líneas son casi radiales. La alta densidad de las líneas entre las cargas indica un intenso campo eléctrico en esta región.

La figura 15.15 muestra las líneas de campo eléctrico en la vecindad de dos cargas puntuales positivas iguales. De nuevo, cerca de cualquier carga las líneas son casi radiales. El mismo número de líneas surge de cada carga porque las cargas son iguales en magnitud. A

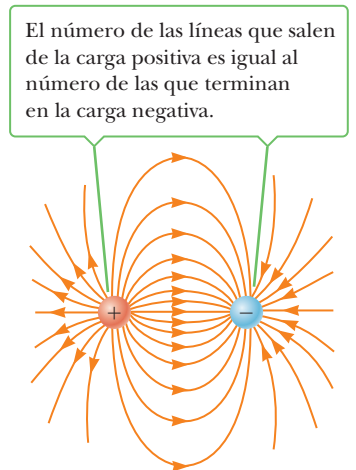


Figura 15.14 Líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales iguales y opuestas (un dipolo eléctrico).

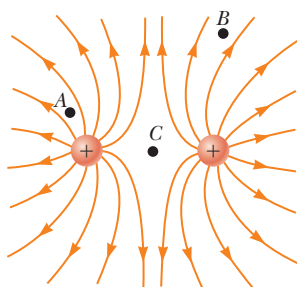


Figura 15.15 Líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales positivas. Los puntos A, B y C se analizan en la pregunta rápida 15.6.

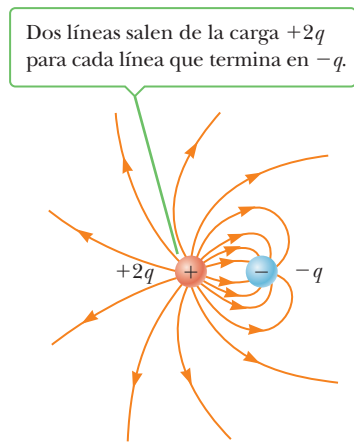


Figura activa 15.16 Líneas de campo eléctrico para una carga puntual de $+2q$ y una segunda carga puntual de $-q$.

grandes distancias de las cargas, el campo es aproximadamente igual al de una sola carga puntual de magnitud $2q$. La protuberancia de las líneas de campo eléctrico entre las cargas refleja la naturaleza repulsiva de la fuerza eléctrica entre cargas iguales. Además, la baja densidad de las líneas de campo entre las cargas indica un campo débil en esta región, a diferencia del dipolo.

Finalmente, la figura activa 15.16 es un bosquejo de las líneas de campo eléctrico asociado con la carga positiva $+2q$ y la carga negativa $-q$. En este caso, el número de líneas que salen de la carga $+2q$ es el doble del número de las que terminan en la carga $-q$. Por lo tanto, sólo la mitad de las líneas que salen de la carga positiva terminan en la carga negativa. La mitad restante termina en las cargas negativas que se supuso se ubican en el infinito. A grandes distancias de las cargas (grande en comparación con la separación de las cargas), las líneas de campo eléctrico son equivalentes a las de una sola carga $+q$.

Examen rápido

15.6 Clasifique las magnitudes del campo eléctrico en los puntos A , B y C en la figura 15.15, de mayor a menor.

- a) A, B, C b) A, C, B c) C, A, B d) La respuesta no se puede determinar mediante inspección visual.

FÍSICA APLICADA 15.1 Medición de los campos eléctricos atmosféricos

El campo eléctrico cerca de la superficie de la Tierra con buen clima es de aproximadamente 100 N/C hacia abajo. Bajo una nube de tormenta, el campo eléctrico puede ser muy grande, del orden de 20000 N/C . ¿Cómo se midieron estos campos eléctricos?

EXPLICACIÓN Un dispositivo para medir estos campos se llama *molino de campo*. La figura 15.17 muestra las componentes fundamentales de un molino de campo: dos placas metálicas paralelas al suelo. Cada placa se conecta a tierra con un alambre, con un amperímetro (un dispositivo de baja resistencia para medir el flujo de carga, que será analizado en la sección 17.3) en la ruta. Considere primero sólo la placa inferior. Puesto que se conecta a tierra y la tierra porta una carga negativa, la placa tiene carga negativa. Por lo tanto, las líneas de campo eléctrico se dirigen hacia abajo y terminan en la placa como en la figura 15.17a.

Ahora imagine que la placa superior se mueve súbitamente sobre la placa inferior, como en la figura 15.17b. Esta placa se conecta a tierra y también tiene carga negativa, de modo que las líneas de campo ahora terminan en la placa superior. Las cargas negativas en la placa inferior se repelen por las de la placa superior y deben pasar a través del amperímetro, que registra un flujo de carga. La cantidad de carga que estaba en la placa inferior se relaciona con la intensidad del campo eléctrico. De esta forma, el flujo de carga a través del amperímetro se puede calibrar para medir el campo eléctrico. Por lo general, las placas se diseñan como las aspas de un ventilador y la placa superior gira de modo que la placa inferior alternativamente se cubre y descubre. Como resultado, las cargas fluyen de ida y vuelta de manera continua a través del amperímetro y la lectura se puede relacionar con la intensidad del campo eléctrico. ■

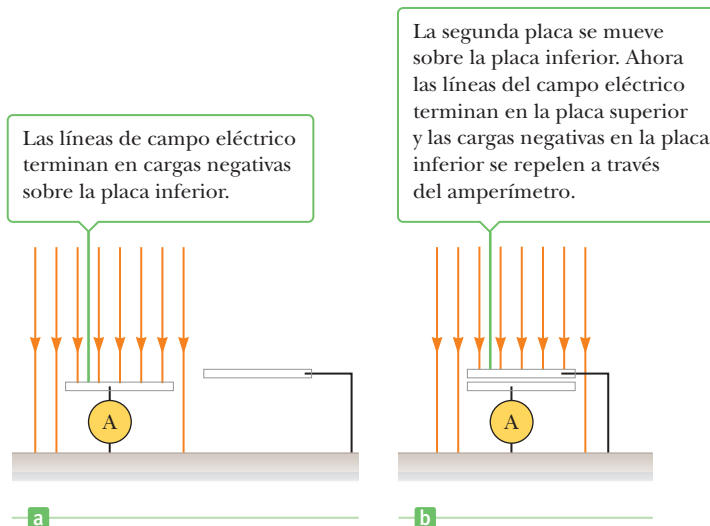


Figura 15.17 Configuración experimental para física aplicada 15.1.

15.6 Conductores en equilibrio electrostático

Un buen conductor eléctrico como el cobre, aunque eléctricamente neutro, contiene cargas (electrones) que no están ligadas a átomo alguno y tienen libertad de moverse dentro del material. Cuando no ocurre movimiento neto de carga dentro de un conductor, se dice que el conductor está en **equilibrio electrostático**. Un conductor aislado (aquel que está aislado de tierra) tiene las siguientes propiedades:

1. El campo eléctrico es cero en todas partes dentro del material conductor.
2. Cualquier exceso de carga en un conductor aislado reside por completo en su superficie.
3. El campo eléctrico justo afuera de un conductor cargado es perpendicular a la superficie del conductor.
4. En un conductor con forma irregular, la carga se acumula en los puntos agudos, donde el radio de curvatura de la superficie es más pequeño.

◀ Propiedades de un conductor aislado

La primera propiedad se puede entender al examinar lo que ocurriría si *no* fuese cierta. Si hubiese un campo eléctrico dentro de un conductor, la carga libre se movería y crearía un flujo de carga, o corriente. Sin embargo, si hubiese un movimiento neto de carga, el conductor ya no estaría en equilibrio electrostático.

La propiedad 2 es un resultado directo de la repulsión $1/r^2$ entre cargas iguales descrita por la ley de Coulomb. Si por algún medio un exceso de carga se coloca dentro de un conductor, las fuerzas repulsivas entre las cargas iguales las empuja tan lejos como sea posible, lo que hace que rápidamente migren hacia la superficie. (Aquí no se demostrará, pero el exceso de carga reside en la superficie porque la ley de Coulomb es una ley de cuadrado inverso. Con cualquier otra ley de potencia, en la superficie existiría un exceso de carga, pero habría una distribución de carga, o del mismo o de signo opuesto, dentro del conductor.)

La propiedad 3 se puede entender al considerar nuevamente lo que ocurriría si no fuese cierta. Si el campo eléctrico en la figura 15.18 no fuese perpendicular a la superficie, tendría una componente a lo largo de la superficie, que haría que las cargas libres del conductor se muevan (hacia la izquierda en la figura). Sin embargo, si las cargas se mueven, se crearía una corriente y el conductor ya no estaría en equilibrio electrostático. Por lo tanto, \vec{E} debe ser perpendicular a la superficie.

Para ver por qué la propiedad 4 debe ser cierta, considere la figura 15.19a (página 530), que muestra un conductor que es bastante plano en un extremo y relativamente afilado en el otro. Cualquier exceso de carga colocada en el objeto se mueve hacia su superficie. La figura 15.19b muestra las fuerzas entre dos de tales cargas en el extremo más plano del objeto. Estas fuerzas se dirigen predominantemente paralelas a la superficie, de modo que

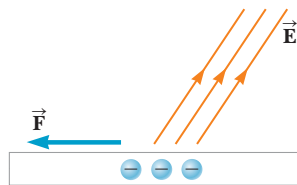
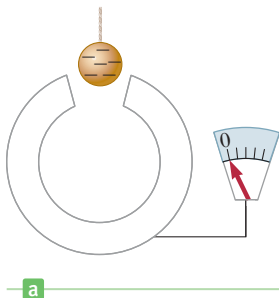
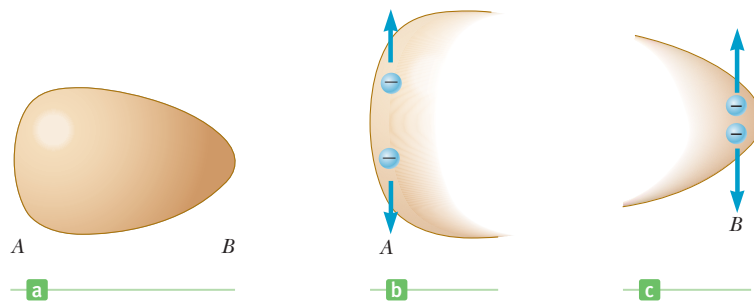
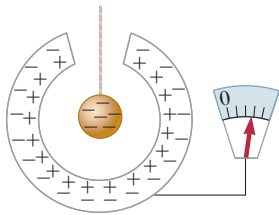


Figura 15.18 Esta situación es imposible si el conductor está en equilibrio electrostático. Si el campo eléctrico \vec{E} tenía una componente paralela a la superficie, una fuerza eléctrica que se ejerce sobre las cargas a lo largo de la superficie y que se trasladaría a la izquierda.

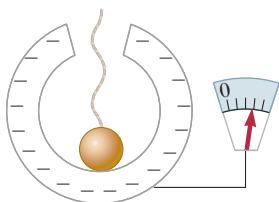
Figura 15.19 a) Un conductor con un extremo más plano *A* y un extremo *B* relativamente afilado. El exceso de carga colocado en este conductor reside por completo en su superficie y se distribuye de modo que b) hay menos carga por unidad de área sobre el extremo más plano y c) hay una gran carga por unidad de área sobre el extremo afilado.



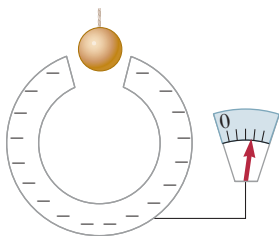
a



b



c



d

Figura 15.20 Un experimento que demuestra que cualquier carga transferida a un conductor reside en su superficie en equilibrio electrostático. El conductor hueco está aislado de tierra y la pequeña bola metálica está sostenida por un hilo aislante.

las cargas se separan hasta que las fuerzas repulsivas de otras cargas cercanas establecen un equilibrio. No obstante, en el extremo afilado, las fuerzas de repulsión entre dos cargas se dirigen predominantemente alejándose de la superficie, como en la figura 15.19c. Como resultado, aquí hay menos tendencia para que las cargas se separen a lo largo de la superficie y la cantidad de carga por unidad de área es mayor que en el extremo plano. El efecto acumulativo de tales fuerzas hacia fuera, provenientes de cargas cercanas en el extremo afilado produce una gran fuerza resultante dirigida alejándose de la superficie, que puede ser lo suficientemente grande como para hacer que las cargas salten de la superficie hacia el aire circundante.

Muchos experimentos han mostrado que la carga neta sobre un conductor reside sobre su superficie. Uno de tales experimentos lo realizó primero Michael Faraday y se le conoce como *experimento del balde de hielo*. Faraday bajó una bola metálica, que tenía una carga negativa, colocada en el extremo de un hilo de seda (un aislante), en un conductor hueco sin carga aislado de tierra, un balde de hielo metálico, como en la figura 15.20a. Conforme la bola entró al balde, observó la desviación de la aguja en un electrómetro unido a la superficie exterior del balde. (Un electrómetro es un dispositivo que se utiliza para medir carga.) La aguja se desvió porque la bola cargada indujo una carga positiva en la pared interior del balde, lo que dejó una carga negativa igual en la pared exterior (figura 15.20b).

A continuación, Faraday tocó la superficie interior del balde con la bola y notó que la desviación de la aguja no cambió, o cuando la bola tocaba la superficie del balde (figura 15.20c) o cuando se removía (figura 15.20d). Más aún, descubrió que la bola ahora no estaba cargada porque, cuando tocó el interior del balde, la carga negativa en exceso sobre la bola se extrajo, lo que neutralizó la carga positiva inducida en la superficie interior del balde. De esta forma Faraday descubrió el resultado útil de que *todo* el exceso de carga en un objeto se puede transferir a un cascarón metálico ya cargado si el objeto toca el *interior* del cascarón. Como verá, este resultado es el principio operativo del generador Van de Graaff.

Faraday concluyó que, dado que la desviación de la aguja en el electrómetro no cambia cuando la bola cargada toca el interior del balde, la carga positiva inducida en la superficie interior del balde era apenas suficiente para neutralizar la carga negativa sobre la bola. Como resultado de sus investigaciones, concluyó que un objeto cargado, suspendido dentro de un contenedor metálico, reordena la carga en el contenedor, de modo que el signo de la carga en su superficie interior era *opuesto* al signo de la carga en el objeto suspendido. Esto produjo una carga en la superficie exterior del contenedor del mismo signo que el objeto suspendido.

Faraday también encontró que, si el electrómetro se conectaba a la superficie interior del balde después de terminar el experimento, la aguja no mostraba desviación. Por ende, el *exceso* de carga adquirido por el balde cuando éste y la bola hicieron contacto, apareció en la superficie exterior del balde.

Si una barra metálica que tiene puntas afiladas se une a una casa, la mayor parte de cualquier carga en la casa pasa a través de estas puntas, lo que elimina la carga inducida en la casa producto de las nubes de tormenta. Además, la descarga de un relámpago que golpee la casa pasa a través de la barra metálica y se transporta con seguridad hacia el suelo a través de alambres que conducen de la barra a la Tierra. Benjamín Franklin desarrolló

por primera vez los pararrayos que usan este principio. Algunos países europeos no podían aceptar el hecho de que una idea tan brillante se hubiera originado en el nuevo mundo, ¡así que “mejoraron” el diseño al eliminar las puntas afiladas!

APLICACIÓN

Pararrayos

FÍSICA APLICADA 15.2 Conductores y líneas de campo

Suponga que una carga puntual $+Q$ está en el espacio vacío. Con guantes de goma, proceda a rodear la carga con un cascarón conductor esférico concéntrico. ¿Qué efecto tendrá sobre las líneas de campo de la carga?

rior del conductor, de modo que el campo eléctrico dentro del conductor se vuelve cero. Esto significa que las líneas de campo que se originan en la carga $+Q$ ahora terminan en las cargas negativas. El movimiento de las cargas negativas hacia la superficie interior de la esfera deja una carga neta de $+Q$ en la superficie exterior de la esfera. Entonces las líneas de campo afuera de la esfera parecen como antes: el único cambio, global, es la ausencia de líneas de campo dentro del conductor. ■

EXPLICACIÓN Cuando el cascarón esférico se coloca alrededor de la carga, las cargas en el cascarón se reordenan para satisfacer las reglas para un conductor en equilibrio. Una carga neta de $-Q$ se mueve hacia la superficie inte-

FÍSICA APLICADA 15.3 Seguridad al conducir durante tormentas eléctricas

¿Por qué es seguro permanecer dentro de un automóvil durante una tormenta eléctrica?

kilómetros de aire, de modo que ciertamente pueden penetrar un centímetro de caucho. La seguridad de permanecer en el automóvil se debe al hecho de que las cargas en la cubierta metálica del auto residirán en la superficie exterior del auto, como se observó en la propiedad analizada anteriormente. Como resultado, un ocupante en el automóvil que toque las superficies interiores no está en peligro. ■

EXPLICACIÓN Muchas personas creen que permanecer adentro del automóvil es seguro debido a las características aislantes de las llantas de caucho, pero de hecho esto no es cierto. Los relámpagos pueden viajar a través de muchos

15.7 El experimento de la gota de aceite de Millikan

De 1909 a 1913, Robert Andrews Millikan (1868–1953) realizó un brillante conjunto de experimentos en la Universidad de Chicago, en los que midió la carga elemental e del electrón y demostró la naturaleza cuantizada de la carga electrónica. El aparato que usó, que se bosqueja en la figura activa 15.21, contiene dos placas metálicas paralelas. A través de un pequeño orificio en la placa superior pasan gotitas de aceite que se cargan por fricción en un atomizador. Se usa un haz de luz para iluminar las gotas, que se observan con un telescopio con eje en ángulo recto con el haz. Entonces las gotas aparecen como estrellas brillantes contra un fondo oscuro y se puede determinar la tasa de caída de gotas individuales.

Suponga que se ve una sola gota, que tiene una masa m y porta una carga q negativa. Si entre las placas no hay campo eléctrico, las dos fuerzas que actúan sobre la carga son la

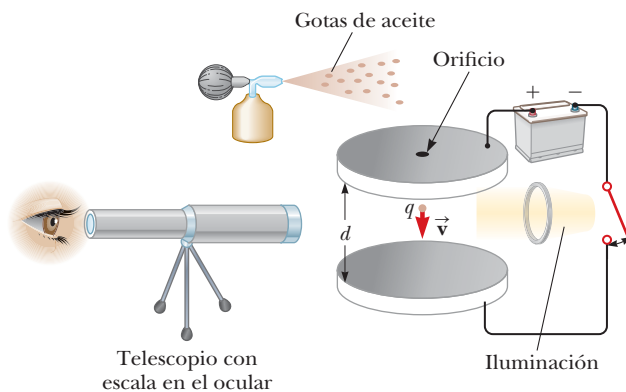
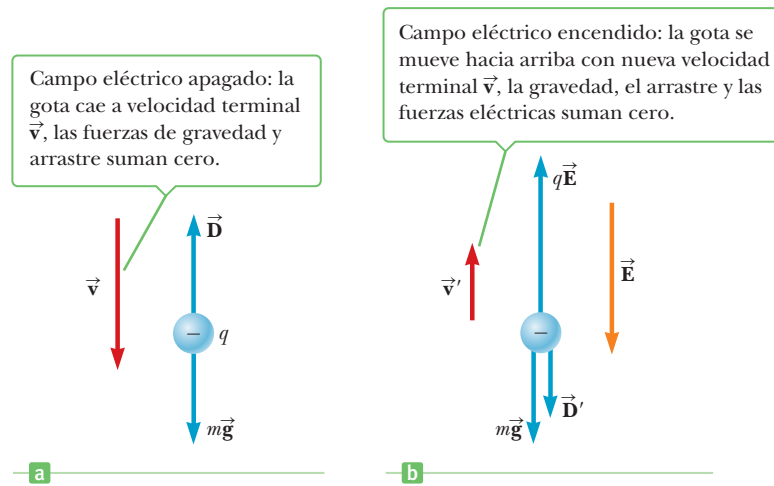


Figura activa 15.21
Vista esquemática del aparato de gota de aceite de Millikan.

Figura 15.22 Fuerzas sobre una gota de aceite con carga negativa en el experimento de Millikan.



fuerza de gravedad, $m\vec{g}$, que actúa hacia abajo y una fuerza de arrastre viscoso hacia arriba \vec{D} (figura 15.22a). La fuerza de arrastre es proporcional a la rapidez de la gota. Cuando la gota alcanza su rapidez terminal, v , las dos fuerzas se equilibran mutuamente ($mg = D$).

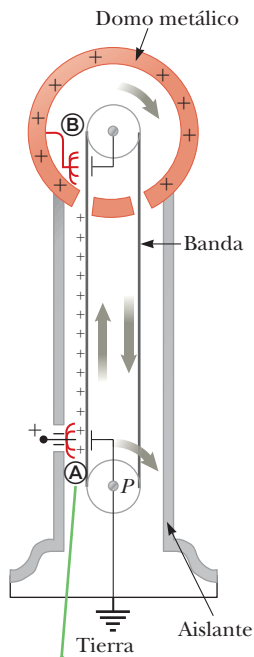
Ahora suponga que un campo eléctrico se establece entre las placas mediante una batería conectada de modo que la placa superior tiene carga positiva. En este caso una tercera fuerza, $q\vec{E}$ actúa sobre la gota cargada. Puesto que q es negativa y \vec{E} es hacia abajo, la fuerza eléctrica es *hacia arriba*, como en la figura 15.22b. Si esta fuerza es suficientemente grande, la gota se mueve hacia arriba y la fuerza de arrastre \vec{D} actúa hacia abajo. Cuando la fuerza eléctrica hacia arriba, $q\vec{E}$, equilibra la suma de las fuerzas de gravedad y de arrastre, que actúan hacia abajo, la gota alcanza una nueva rapidez terminal v' .

Con el campo encendido, una gota se mueve lentamente hacia arriba, por lo general a razón de *centésimas* de centímetro por segundo. La tasa de caída en ausencia de un campo es comparable. Por lo tanto, una sola gota con masa y radio constante puede seguirse durante horas conforme cae y asciende alternadamente, simplemente al encender y apagar el campo eléctrico.

Después de realizar mediciones en miles de gotas, Millikan y sus colaboradores encontraron que, hasta dentro de aproximadamente 1% de precisión, cada gota tenía una carga igual a algún múltiplo entero positivo o negativo de la carga elemental e ,

$$q = ne \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad [15.7]$$

donde $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C. Más tarde estableció que los múltiplos enteros positivos de e surgirían cuando una gota de aceite perdiera uno o más electrones. Del mismo modo, múltiplos enteros negativos de e surgirían cuando una gota ganara uno o más electrones. Las ganancias o pérdidas en números enteros proporcionarían evidencia concluyente de que la carga está cuantizada. En 1923, Millikan ganó el Premio Nobel en Física por su trabajo.



La carga se deposita en la banda en el punto A y se transfiere al domo en el punto B.

Figura 15.23 Diagrama de un generador Van de Graaff. La carga se transfiere al domo mediante una banda giratoria.

15.8 El generador Van de Graaff

En 1929, Robert J. Van de Graaff (1901–1967) diseñó y construyó un generador electrostático que se utiliza ampliamente en investigación de física nuclear. Los principios de su operación se pueden entender con el conocimiento de las propiedades de los campos y cargas eléctricos ya presentados en este capítulo. La figura 15.23 muestra la construcción básica de este dispositivo. Una polea P activada por motor mueve una banda a través de agujas metálicas en forma de peine, que tienen carga positiva, colocadas en A . Las cargas negativas se atraen hacia estas agujas desde la banda, lo que deja el lado izquierdo de la banda con una carga positiva neta. Las cargas positivas atraen electrones hacia la banda conforme se puede por un segundo peine de agujas en B , lo que aumenta el exceso de carga positiva en el domo. Puesto que el campo eléctrico dentro del domo metálico es despreciable, la carga positiva sobre él puede aumentar fácilmente sin importar cuánta carga ya esté presente. El resultado es que el domo queda con una gran cantidad de carga positiva.

Esta acumulación de carga en el domo no puede continuar indefinidamente. Conforme más y más carga aparece en la superficie del domo, la magnitud del campo eléctrico en dicha superficie también aumenta. Finalmente, la intensidad del campo se vuelve lo suficiente grande para ionizar parcialmente el aire cerca de la superficie, lo que aumenta la conductividad del aire. Ahora las cargas en el domo tienen una ruta para fugarse hacia el aire, lo que produce algunos espectaculares “relámpagos” conforme ocurre la descarga. Como se observó anteriormente, las cargas encuentran más fácil saltar desde una superficie en puntos donde la curvatura es grande. Como resultado, una forma de inhibir la descarga eléctrica y aumentar la cantidad de carga que se puede almacenar en el domo, es aumentar su radio. Otro método para inhibir la descarga es colocar todo el sistema en un contenedor lleno con un gas a alta presión, que es significativamente más difícil de ionizar que el aire a presión atmosférica.

Si en un tubo unido al domo se introducen protones (u otras partículas cargadas), el gran campo eléctrico del domo ejerce una fuerza repulsiva sobre los protones y hace que se aceleren a energías suficientemente altas como para iniciar reacciones nucleares entre los protones y varios núcleos objetivo.

15.9 Flujo eléctrico y ley de Gauss

La ley de Gauss es en esencia una técnica para calcular el campo eléctrico promedio sobre una superficie cerrada, desarrollada por Karl Friedrich Gauss (1777–1855). Cuando el campo eléctrico, debido a su simetría, es constante en todas partes sobre dicha superficie y perpendicular a ella, se puede encontrar el campo eléctrico exacto. En estos casos especiales, la ley de Gauss es mucho más fácil de aplicar que la ley de Coulomb.

La ley de Gauss relaciona el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada y la carga total dentro de dicha superficie. Una *superficie cerrada* tiene un interior y un exterior: un ejemplo es una esfera. El *flujo eléctrico* es una medida de cuántos vectores de campo eléctrico penetran a través de una superficie dada. Si los vectores de campo eléctrico son tangentes a la superficie en todos los puntos, por ejemplo, no penetran la superficie y el flujo eléctrico a través de la superficie es cero. Estos conceptos se estudiarán más ampliamente en las siguientes dos subsecciones. Como verá, la ley de Gauss afirma que el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga contenida *dentro* de la superficie.

Flujo eléctrico

Considere un campo eléctrico que es uniforme tanto en magnitud como en dirección, como en la figura 15.24. Las líneas de campo eléctrico penetran una superficie de área A , que es perpendicular al campo. La técnica empleada para dibujar una figura como la figura 15.24 es que el número de líneas por unidad de área, N/A , es proporcional a la magnitud del campo eléctrico, o $E \propto N/A$. Esta proporción se puede reescribir como $N \propto EA$, la cual indica que el número de líneas de campo es proporcional al *producto* de E y A , llamado **flujo eléctrico** y se representa mediante el símbolo Φ_E :

$$\Phi_E = EA \quad [15.8]$$

Observe que Φ_E tiene unidades SI de $N \cdot m^2/C$ y es proporcional al número de líneas de campo que pasan a través de alguna área A orientada perpendicular al campo. (Se llama flujo por analogía con el término *flujo* en el flujo de fluidos, que es el volumen de líquido que fluye a través de un área perpendicular por segundo.) Si la superficie bajo consideración no es perpendicular al campo, como en la figura 15.25, la expresión para el flujo eléctrico es

$$\Phi_E = EA \cos \theta \quad [15.9]$$

donde un vector perpendicular al área A está a un ángulo θ con respecto al campo. Este vector con frecuencia se dice que es *normal* a la superficie y se le referirá como “el vector normal a la superficie”. El número de líneas que cruzan esta área es igual al número de las que cruza el área proyectada A' , que es perpendicular al campo. Observamos que las

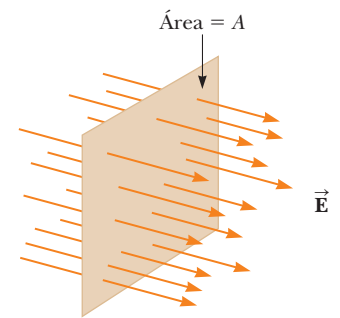


Figura 15.24 Líneas de campo de un campo eléctrico uniforme que penetran un plano de área A perpendicular al campo. El flujo eléctrico Φ_E a través de esta área es igual a EA .

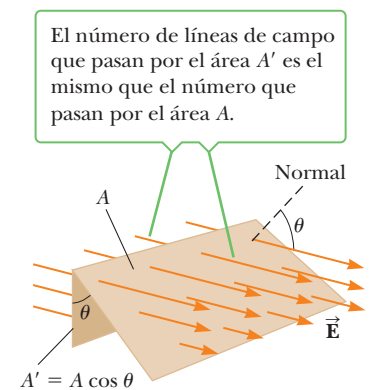


Figura 15.25 Líneas de campo de un campo eléctrico uniforme que penetran un plano de área A que está a un ángulo de $(90^\circ - \theta)$ con el campo.

dos áreas se relacionan mediante $A' = A \cos \theta$. A partir de la ecuación 15.9, vemos que el flujo a través de una superficie de área fija tiene el valor máximo EA cuando la superficie es perpendicular al campo (cuando $\theta = 0^\circ$) y que el flujo es cero cuando la superficie es paralela al campo (cuando $\theta = 90^\circ$). **Por convención, para una superficie cerrada, las líneas de flujo que pasan al interior del volumen son negativas y las que salen del interior del volumen son positivas.** Esta convención es equivalente a pedir que el vector normal de la superficie apunte hacia afuera cuando se calcula el flujo a través de una superficie cerrada.

Examen rápido

15.7 Calcule la magnitud del flujo de un campo eléctrico constante de 5.00 N/C en la dirección z a través de un rectángulo con área 4.00 m^2 en el plano xy . a) 0 b) $10.0 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ c) $20.0 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ d) Se necesita más información

15.8 Suponga que el campo eléctrico de la pregunta rápida 15.7 se inclina 60° alejándose de la posición z positiva. Calcule la magnitud del flujo a través de la misma área. a) 0 b) $10.0 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ c) $20.0 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ d) Se necesita más información

EJEMPLO 15.6 Flujo a través de un cubo

OBJETIVO Calcular el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada.

PROBLEMA Considere un campo eléctrico uniforme orientado en la dirección x . Determine el flujo eléctrico a través de cada superficie de un cubo con bordes L orientados como se muestra en la figura 15.26 y el flujo neto.

ESTRATEGIA Este problema implica sustituir en la definición de flujo eléctrico dado por la ecuación 15.9. En cada caso, E y $A = L^2$ son los mismos; la única diferencia es el ángulo θ que el campo eléctrico forma con respecto a un vector perpendicular a una superficie dada y que apunta hacia afuera (el vector normal a la superficie). Los ángulos se pueden determinar mediante inspección. El flujo a través de una superficie paralela al plano xy se marcará Φ_{xy} y se designarán por la posición (frente, posterior); otros se marcarán de igual modo: Φ_{xz} arriba o inferior, y Φ_{yz} izquierda o derecha.

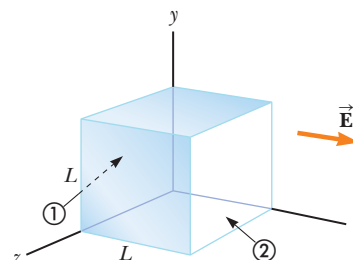


Figura 15.26 (Ejemplo 15.6) Una superficie hipotética con forma de cubo en un campo eléctrico uniforme paralelo al eje x . El flujo neto a través de la superficie es cero cuando la carga entra dentro del cubo es cero.

SOLUCIÓN

El vector normal al plano xy apunta en la dirección z negativa. Ésta, a su vez, es perpendicular a \vec{E} , de modo que $\theta = 90^\circ$. (El lado opuesto funciona de manera similar.)

$$\Phi_{xy} = EA \cos(90^\circ) = 0 \quad (\text{atrás y enfrente})$$

El vector normal al plano xz apunta en la dirección y negativa. Ésta, a su vez, es perpendicular a \vec{E} , de modo que de nuevo $\theta = 90^\circ$. (El lado opuesto funciona de manera similar.)

$$\Phi_{xz} = EA \cos(90^\circ) = 0 \quad (\text{arriba y abajo})$$

El vector normal a la superficie ① (el plano yz) apunta en la dirección x negativa. Ésta es antiparalela a \vec{E} , de modo que $\theta = 180^\circ$.

$$\Phi_{yz} = EA \cos(180^\circ) = -EL^2 \quad (\text{superficie ①})$$

La superficie ② tiene vector normal que apunta en la dirección x positiva, de modo que $\theta = 0^\circ$.

$$\Phi_{yz} = EA \cos(0^\circ) = EL^2 \quad (\text{superficie ②})$$

Calcule el flujo neto al sumar:

$$\Phi_{\text{neto}} = 0 + 0 + 0 + 0 - EL^2 + EL^2 = 0$$

COMENTARIOS Al realizar este cálculo, es necesario recordar que el ángulo en la definición de flujo se mide a partir del vector normal a la superficie y que este vector debe apuntar hacia afuera para una superficie cerrada. Como resultado, el vector normal para el plano yz a la izquierda apunta en la dirección x negativa y el vector normal al plano paralelo al plano yz a la derecha apunta en la dirección x positiva. Observe que no hay carga alguna en la caja. El flujo eléctrico neto siempre es cero para superficies cerradas que no contienen carga neta.

PREGUNTA 15.6 Si la superficie en la figura 15.26 fuese esférica, ¿la respuesta sería a) mayor que, b) menor que o c) igual al flujo eléctrico neto que se encontró para la superficie cúbica?

EJERCICIO 15.6 Suponga que el campo eléctrico constante en el ejemplo 15.6 apunta en la dirección y positiva. Calcule el flujo a través del plano xz y la superficie paralela a ella. ¿Cuál es el flujo eléctrico neto a través de la superficie del cubo?

RESPUESTAS $\Phi_{xz} = -EL^2$ (abajo), $\Phi_{xz} = +EL^2$ (arriba). El flujo neto todavía es cero.

Ley de Gauss

Considere una carga puntual q rodeada por una superficie esférica de radio r con centro sobre la carga, como en la figura 15.27a. La magnitud del campo eléctrico en todas partes sobre la superficie de la esfera es

$$E = k_e \frac{q}{r^2}$$

Observe que el campo eléctrico es perpendicular a la superficie esférica en todos los puntos sobre la superficie. Por lo tanto, el flujo eléctrico a través de la superficie es EA , donde $A = 4\pi r^2$ es el área de la esfera:

$$\Phi_E = EA = k_e \frac{q}{r^2} (4\pi r^2) = 4\pi k_e q$$

A veces es conveniente expresar k_e en términos de otra constante, ϵ_0 , como $k_e = 1/(4\pi\epsilon_0)$. La constante ϵ_0 se llama **permitividad del espacio libre** y tiene el valor

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_e} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2 \quad [15.10]$$

El uso de k_e o ϵ_0 es estrictamente cuestión de gusto. El flujo eléctrico a través de la superficie esférica cerrada que rodea a la carga q ahora se puede expresar como

$$\Phi_E = 4\pi k_e q = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Este resultado dice que el flujo eléctrico a través de una esfera que rodea una carga q es igual a la carga dividida por la constante ϵ_0 . Al usar cálculo, este resultado se puede demostrar para *cualquier* superficie cerrada que rodea la carga q . Por ejemplo, si la superficie que rodea q es irregular, como en la figura 15.27b, el flujo a través de dicha superficie también es q/ϵ_0 . Esto conduce al siguiente resultado general, conocido como ley de Gauss:

El flujo eléctrico Φ_E a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta dentro de la superficie, Q_{interior} , dividida entre ϵ_0 :

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} \quad [15.11]$$

Aunque no es obvio, la ley de Gauss describe cómo las cargas crean campos eléctricos. En principio siempre se puede usar para calcular el campo eléctrico de un sistema de cargas o una distribución continua de carga. En la práctica, la técnica es útil sólo en un número limitado de casos en los que hay un alto grado de simetría, como en esferas, cilindros o planos. Con la simetría de estas formas especiales, las cargas se pueden rodear por una superficie imaginaria, llamada superficie gaussiana. Esta superficie imaginaria se usa estrictamente para cálculos matemáticos y no necesita ser una superficie física real. Si la superficie imaginaria se elige de modo que el campo eléctrico sea constante en todas partes sobre ella, el campo eléctrico se puede calcular

$$EA = \Phi_E = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} \quad [15.12]$$

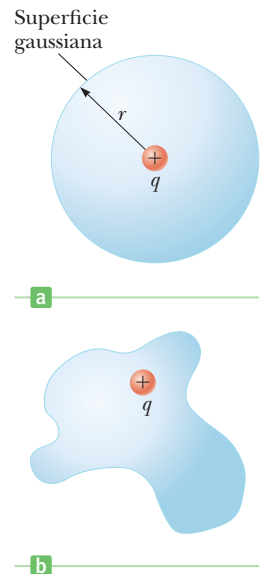


Figura 15.27 a) El flujo a través de una superficie esférica de radio r que rodea una carga puntual q es $\Phi_E = q/\epsilon_0$. b) El flujo a través de cualquier superficie arbitraria que rodea la carga también es igual a q/ϵ_0 .

◀ Ley de Gauss

Tip 15.2 Las superficies gaussianas no son reales

Una superficie gaussiana es una superficie imaginaria, creada exclusivamente para facilitar un cálculo matemático. No necesariamente coincide con la superficie de un objeto físico.

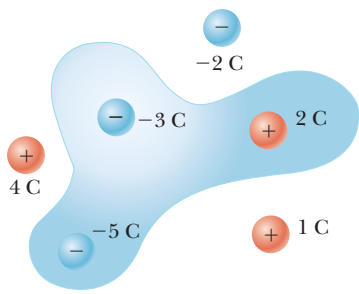


Figura activa 15.28
(Examen rápido 15.9)

como se verá en los ejemplos. Aunque la ley de Gauss en esta forma se puede usar para obtener el campo eléctrico sólo para problemas con mucha simetría, *siempre* se puede usar para obtener el campo eléctrico *promedio* en *cualquier* superficie.

Examen rápido

15.9 Determine el flujo eléctrico a través de la superficie en la figura activa 15.28.

- a) $-(3 \text{ C})/\epsilon_0$ b) $(3 \text{ C})/\epsilon_0$ c) 0 d) $-(6 \text{ C})/\epsilon_0$

15.10 Para una superficie cerrada a través de la cual el flujo neto es cero, cada uno de los siguientes cuatro enunciados *podría* ser verdadero. ¿Cuál de los enunciados *debe* ser verdadero? (Puede haber más de uno.) a) No hay cargas adentro de la superficie. b) La carga neta adentro de la superficie es cero. c) El campo eléctrico es cero en todas partes sobre la superficie. d) El número de líneas de campo eléctrico que entran a la superficie es igual al número de las que salen de la superficie.

EJEMPLO 15.7 El campo eléctrico de un cascarón esférico cargado

OBJETIVO Usar la ley de Gauss para determinar los campos eléctricos cuando la simetría es esférica.

PROBLEMA Un cascarón conductor esférico, con radio interior a y radio exterior b , porta una carga total $+Q$ distribuida sobre la superficie de un cascarón conductor (figura 15.29a). La cantidad Q se toma como positiva. a) Determine el campo eléctrico en el interior del cascarón conductor, para $r < a$, y b) el campo eléctrico afuera del cascarón, para $r > b$. c) Si una carga adicional $-2Q$ se coloca en el centro, determine el campo eléctrico para $r > b$. d) ¿Cuál es la distribución de carga sobre la esfera en el inciso c)?

ESTRATEGIA Para cada inciso, dibuje una superficie gaussiana esférica en la región de interés. Sume la carga adentro de la superficie gaussiana, sustituya el área en la ley de Gauss, y resuelva para el campo eléctrico. Para encontrar la distribución de carga en el inciso c), use la ley de Gauss a la inversa: la distribución de carga debe ser tal que el campo electrostático sea cero adentro de un conductor.

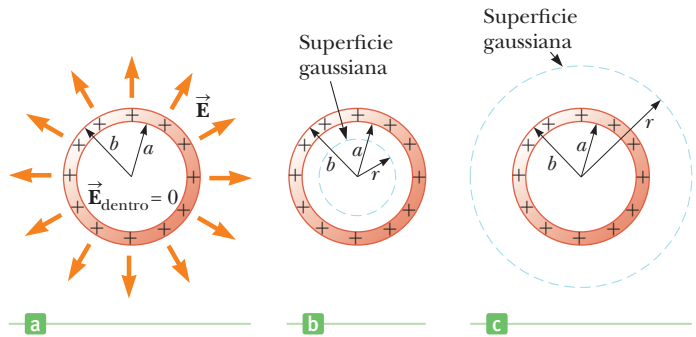


Figura 15.29 (Ejemplo 15.7) a) El campo eléctrico dentro de un cascarón esférico uniformemente cargado es *cero*. También es cero para el material conductor en la región $a < r < b$. El campo exterior es el mismo que el de una carga puntual que tenga una carga total Q ubicada en el centro del cascarón. b) Construcción de una superficie gaussiana para calcular el campo eléctrico *interior* de un cascarón esférico. c) Construcción de una superficie gaussiana para calcular el campo eléctrico *exterior* de un cascarón esférico.

SOLUCIÓN

a) Determine el campo eléctrico para $r < a$.

Aplique la ley de Gauss, ecuación 15.12, a la superficie ilustrada en la figura 15.29b (observe que no hay carga alguna adentro de esta superficie):

b) Determine el campo eléctrico para $r > b$.

Aplique la ley de Gauss, ecuación 15.12, a la superficie gaussiana ilustrada en la figura 15.29c:

Divida entre el área:

$$EA = E(4\pi r^2) = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} = 0 \rightarrow E = 0$$

$$EA = E(4\pi r^2) = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

c) Ahora se coloca una carga adicional de $-2Q$ en el centro de la esfera. Calcule el nuevo campo eléctrico afuera de la esfera, para $r > b$.

Aplique la ley de Gauss como en el inciso b), e incluya la nueva carga en Q_{interior} :

$$EA = E(4\pi r^2) = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} = \frac{+Q - 2Q}{\epsilon_0}$$

Resuelva para el campo eléctrico:

$$E = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

d) Determine la distribución de carga sobre la esfera para el inciso c).

Escriba la ley de Gauss para el interior del cascarón:

$$EA = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} = \frac{Q_{\text{centro}} + Q_{\text{superficie int}}}{\epsilon_0}$$

Determine la carga sobre la superficie interior del cascarón y observe que el campo eléctrico en el conductor es cero:

$$\begin{aligned} Q_{\text{centro}} + Q_{\text{superficie int}} &= 0 \\ Q_{\text{superficie int}} &= -Q_{\text{centro}} = +2Q \end{aligned}$$

Determine la carga sobre la superficie exterior y observe que las cargas en las superficies interior y exterior deben sumar $+Q$:

$$\begin{aligned} Q_{\text{superficie ext}} + Q_{\text{superficie int}} &= Q \\ Q_{\text{superficie ext}} &= -Q_{\text{superficie int}} + Q = -Q \end{aligned}$$

COMENTARIOS Lo importante a notar es que, en cada caso, la carga se dispersa sobre una región con simetría esférica o se ubica en el centro exacto. Esto es lo que permite el cálculo de un valor para el campo eléctrico.

PREGUNTA 15.7 Si la carga en el centro de la esfera se hace positiva, ¿cómo se afecta la carga en la superficie interior de la esfera?

EJERCICIO 15.7 Suponga que la carga en el centro ahora se aumenta a $+2Q$, mientras que la superficie del conductor todavía retiene una cara de $+Q$. a) Determine el campo eléctrico exterior a la esfera, para $r > b$. b) ¿Cuál es el campo eléctrico adentro del conductor, para $a < r < b$? c) Determine la distribución de carga sobre el conductor.

RESPUESTAS a) $E = 3Q/4\pi\epsilon_0 r^2$ b) $E = 0$, que siempre es el caso cuando las cargas no se mueven en un conductor. c) Superficie interior: $-2Q$; superficie exterior: $+3Q$.

En el ejemplo 15.7, no se dijo mucho acerca de la distribución de carga sobre el conductor. Siempre que hay una carga neta distinta a cero, las cargas individuales intentarán alejarse unas de otras tanto como sea posible. Por lo tanto, la carga residirá en la superficie interior o en la superficie exterior. Puesto que el campo eléctrico en el conductor es cero, siempre habrá suficiente carga sobre la superficie interior para cancelar cualquier carga que esté en el centro. En el inciso b) no hay carga en la superficie interior y una carga de $+Q$ en la superficie exterior. En el inciso c), con una carga $-Q$ en el centro, $+Q$ está en la superficie interior y 0 C está en la superficie exterior. Finalmente, en el ejercicio, con $-2Q$ en el centro, debe haber $+2Q$ en la superficie interior y $-Q$ en la superficie exterior. En cada caso, la carga total sobre el conductor permanece igual, $+Q$; sólo se ordena de manera diferente.

Con frecuencia se dice que los problemas como el ejemplo 15.7 tienen “cascarones delgados no conductores” que portan una carga distribuida de manera uniforme. En estos casos no se necesita hacer distinción entre la superficie exterior y la superficie interior del cascarón. El ejemplo siguiente hace dicha suposición implícita.

■ EJEMPLO 15.8 Una hoja de carga plana no conductora

OBJETIVO Aplicar la ley de Gauss a un problema con simetría plana.

PROBLEMA Determine el campo eléctrico arriba y abajo de una hoja de carga plana infinita no conductora con carga positiva uniforme por unidad de área σ (figura 15.30a, página 538).

ESTRATEGIA Por simetría, el campo eléctrico debe ser perpendicular al plano y dirigirse alejándose de él en cualquier lado, como se muestra en la figura 15.30b. Para la superficie gaussiana, elija un pequeño cilindro con eje perpendicular al plano, cada extremo tiene área A_0 . Ninguna línea de campo eléctrico pasa a través de la superficie curva del cilindro, sólo a través de los dos extremos, que tienen área total $2A_0$. Aplique la ley de Gauss y use la figura 15.30b.

(continúa)

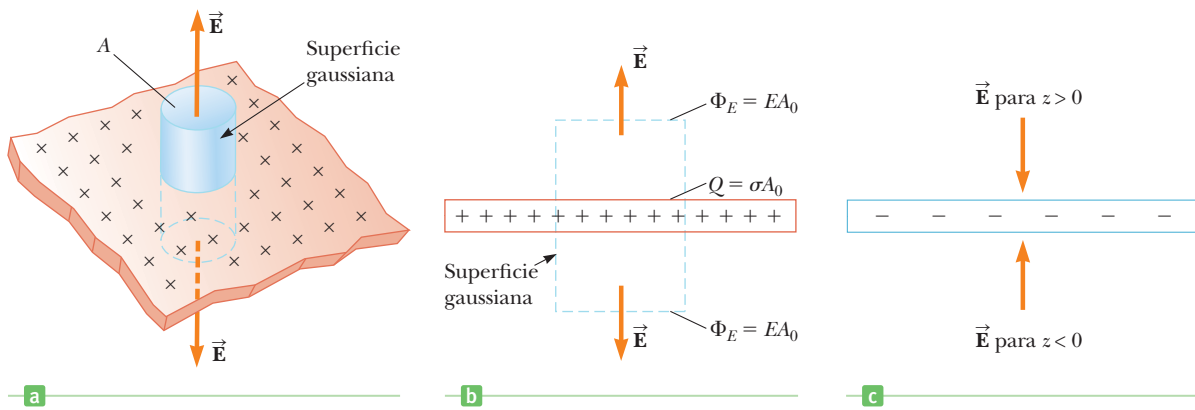


Figura 15.30 (Ejemplo 15.8) a) Una superficie gaussiana cilíndrica que penetra una hoja de carga infinita. b) Una sección transversal del mismo cilindro gaussiano. El flujo a través de cada extremo de la superficie gaussiana es EA_0 . No hay flujo a través de la superficie cilíndrica. c) (Ejercicio 15.8).

SOLUCIÓN

a) Determine el campo eléctrico arriba y abajo de un plano de carga uniforme.

Aplique la ley de Gauss, ecuación 15.12:

La carga total adentro del cilindro gaussiano es la densidad de carga por el área transversal:

$$EA = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0}$$

$$Q_{\text{interior}} = \sigma A_0$$

El flujo eléctrico proviene por completo de los dos extremos, y cada uno tiene área A_0 . Sustituya $A = 2A_0$ y Q_{interior} y resuelva para E .

$$E = \frac{\sigma A_0}{(2A_0)\epsilon_0} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Ésta es la *magnitud* del campo eléctrico. Determine la componente z del campo arriba y abajo del plano. El campo eléctrico apunta alejándose del plano, de modo que es positivo arriba del plano y negativo abajo del plano.

$$E_z = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad z > 0$$

$$E_z = -\frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad z < 0$$

COMENTARIOS Advierta aquí que el plano se tomó como un delgado cascarón no conductor. Desde luego, si está hecho de metal, el campo eléctrico interior es cero, con la mitad de la carga en la superficie superior y la mitad en la superficie inferior.

PREGUNTA 15.8 En realidad, la hoja que porta carga probablemente sería metálica y tendría un grosor pequeño pero no cero. Si porta la misma carga por unidad de área, ¿cuál es el campo eléctrico adentro de la hoja entre las dos superficies?

EJERCICIO 15.8 Suponga que un plano de carga infinito no conductor, como en el ejemplo 15.8, tiene una densidad de carga negativa uniforme de $-\sigma$. Determine el campo eléctrico arriba y abajo de la placa. Bosquee el campo.

RESPUESTAS $E_z = \frac{-\sigma}{2\epsilon_0}, z > 0; E_z = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}, z < 0$. Vea la figura 15.30c para el bosquejo.

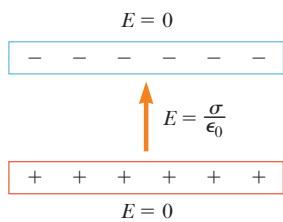


Figura 15.31 Sección transversal de un capacitor de placas paralelas idealizado. Las contribuciones vectoriales del campo eléctrico se suman entre las placas, pero se cancelan afuera.

Un importante elemento de circuito que se estudiará ampliamente en el siguiente capítulo es el capacitor de placas paralelas. El dispositivo consiste de una placa de carga positiva, como en el ejemplo 15.8, con la placa negativa del ejercicio 15.8 colocada sobre ella. En la figura 15.31 se ilustra la suma de estos dos campos. El resultado es un campo eléctrico con el doble de magnitud entre las dos placas:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

[15.13]

Afuera de las placas, el campo eléctrico se cancela.

RESUMEN

15.1 Propiedades de las cargas eléctricas

Las **cargas eléctricas** tienen las siguientes propiedades:

1. Cargas distintas se atraen y cargas iguales se repelen.
2. La carga eléctrica siempre se conserva.
3. La carga eléctrica viene en paquetes discretos que son múltiplos enteros de la carga eléctrica básica $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C.
4. La fuerza entre dos partículas cargadas es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia entre ellas.

15.2 Aislantes y conductores

Los **conductores** son materiales en los que las cargas se mueven libremente en respuesta a un campo eléctrico. Todos los demás materiales se llaman **aislantes**.

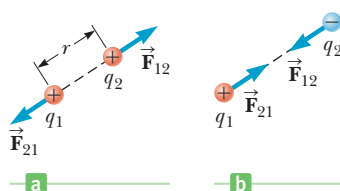
15.3 Ley de Coulomb

La **ley de Coulomb** afirma que la fuerza eléctrica entre dos partículas cargadas estacionarias separadas por una distancia r tiene la magnitud

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad [15.1]$$

donde $|q_1|$ y $|q_2|$ son las magnitudes de las cargas sobre las partículas en coulombs y es la **constante de Coulomb**.

$$k_e \approx 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \quad [15.2]$$



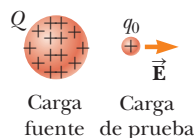
a) La fuerza eléctrica entre dos cargas del mismo signo es repulsiva, y b) es atractiva cuando las cargas tienen signos opuestos.

15.4 El campo eléctrico

En algún punto del espacio existe un campo eléctrico \vec{E} si sobre una pequeña carga de prueba q_0 colocada en dicho punto actúa una fuerza eléctrica \vec{F} . El campo eléctrico se define como

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_0} \quad [15.3]$$

La **dirección** del campo eléctrico en un punto del espacio se define como la dirección de la fuerza eléctrica que se ejercería sobre una pequeña carga positiva colocada en dicho punto.



La fuerza eléctrica de carga Q sobre una carga de prueba q_0 dividida por q_0 da el campo eléctrico de \vec{E} de Q en ese punto.

La magnitud del campo eléctrico debida a una *carga puntual* q a una distancia r desde la carga puntual es

$$E = k_e \frac{|q|}{r^2} \quad [15.6]$$

15.5 Líneas de campo eléctrico

Las **líneas de campo eléctrico** son útiles para visualizar el campo eléctrico en cualquier región del espacio. El vector de campo eléctrico \vec{E} es tangente a las líneas de campo eléctrico en cada punto. Más aún, el número de líneas de campo eléctrico por unidad de área a través de una superficie perpendicular a las líneas es proporcional a la intensidad del campo eléctrico en dicha superficie.

15.6 Conductores en equilibrio electrostático

Un **conductor en equilibrio electrostático** tiene las siguientes propiedades:

1. El campo eléctrico es cero en todas partes dentro del material conductor.
2. Cualquier exceso de carga sobre un conductor aislado debe residir por completo en su superficie.
3. El campo eléctrico justo afuera de un conductor cargado es perpendicular a la superficie del conductor.
4. Sobre un conductor con forma irregular, la carga se acumula donde el radio de curvatura de la superficie es más pequeño, en las puntas afiladas.

15.9 Flujo eléctrico y ley de Gauss

La **ley de Gauss** afirma que el flujo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta Q dentro de la superficie, dividida por la permitividad del espacio libre, ϵ_0 :

$$EA = \Phi_E = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} \quad [15.12]$$

Para distribuciones de carga enormemente simétricas, la ley de Gauss se puede usar para calcular campos eléctricos.



El flujo eléctrico Φ a través de cualquier superficie arbitraria alrededor de una carga q es q/ϵ_0 .

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Una bola muy pequeña tiene una masa de 5.0×10^{-3} kg y una carga de $4.0 \mu\text{C}$. ¿Qué magnitud de campo eléctrico dirigido hacia arriba equilibrará el peso de la bola?
 - a) 8.2×10^2 N/C
 - b) 1.2×10^4 N/C
 - c) 2.0×10^{-2} N/C
 - d) 5.1×10^6 N/C
 - e) 3.7×10^3 N/C

- Estime la magnitud de la intensidad del campo eléctrico debido al protón en un átomo de hidrógeno a una distancia de 5.29×10^{-11} m, la posición esperada del electrón en el átomo. a) 10^{-11} N/C b) 10^8 N/C c) 10^{14} N/C d) 10^6 N/C e) 10^{12} N/C
- La magnitud de la fuerza eléctrica entre dos protones es 2.3×10^{-26} N. ¿Cuán separados están? a) 0.10 m b) 0.022 m c) 3.1 m d) 0.005 7 m e) 0.48 m
- Un campo eléctrico uniforme de 1.0 N/C se establece mediante una distribución de carga uniforme en el plano xy . ¿Cuál es el campo eléctrico en el interior de una bola colocada 0.50 m arriba del plano xy ? a) 1.0 N/C b) -1.0 N/C c) 0 d) 0.25 N/C e) Varía dependiendo de la posición adentro de la bola.
- Dentro de una caja rectangular con 1.0 m de longitud, 2.0 m de ancho y 2.5 m de alto, hay cargas de 3.0 nC, -2.0 nC, -7.0 nC y 1.0 nC. Afuera de la caja hay cargas de 1.0 nC y 4.0 nC. ¿Cuál es el flujo eléctrico a través de la superficie de la caja? a) 0 b) -560 N \cdot m²/C c) -340 N \cdot m²/C d) 260 N \cdot m²/C e) 170 N \cdot m²/C
- Un electrón, con una rapidez de 3.00×10^6 m/s se mueve dentro de un campo eléctrico uniforme de 1.00×10^3 N/C de magnitud. Las líneas de campo son paralelas al movimiento del electrón y apuntan en la misma dirección de la velocidad. ¿Cuánto viaja el electrón antes de llegar al reposo? a) 2.56 cm b) 5.12 cm c) 11.2 cm d) 3.34 m e) 4.24 m
- Una carga de -4.00 nC se ubica en (0, 1.00) m. ¿Cuál es la componente x del campo eléctrico en (4.00, -2.00) m? a) 1.15 N/C b) -2.24 N/C c) 3.91 N/C d) -1.15 N/C e) 0.863 N/C
- Dos cargas puntuales se atraen mutuamente con una fuerza eléctrica de magnitud F . Si una carga se reduce a un tercio de su valor original y la distancia entre las cargas se duplica, ¿cuál es la magnitud resultante de la fuerza eléctrica entre ellas? a) $F/12$ b) $F/3$ c) $F/6$ d) $3F/4$ e) $3F/2$
- ¿En cuál de los siguientes contextos la ley de Gauss *no* puede aplicarse fácilmente para encontrar el campo eléctrico? a) cerca de un largo alambre con carga uniforme, b) arriba de un gran plano cargado de manera uniforme, c) adentro de una bola con carga uniforme, d) afuera de una esfera con carga uniforme, e) la ley de Gauss se puede aplicar fácilmente para encontrar el campo eléctrico en todos estos contextos.
- ¿Qué ocurre cuando un aislante cargado se coloca cerca de un objeto metálico no cargado? a) Se repelen mutuamente. b) Se atraen mutuamente. c) Se atraen o repelen mutuamente, dependiendo de si la carga en el aislante es positiva o negativa. d) No ejercen fuerza electrostática mutua. e) El aislante cargado siempre se descarga de manera espontánea.
- ¿Qué evita que la gravedad te jale a través del suelo hacia el centro de la Tierra? Elige la mejor respuesta. a) La densidad de la materia es muy grande. b) Los núcleos positivos de los átomos de tu cuerpo repelen los núcleos positivos de los átomos del suelo. c) La densidad del suelo es mayor que la densidad de tu cuerpo. d) Los átomos se enlazan juntos mediante enlaces químicos. e) Los electrones en la superficie del suelo y la superficie de tus pies se repelen mutuamente.
- Tres partículas cargadas se colocan en las esquinas de un cuadrado, como se muestra en la figura POM15.12, con carga $-Q$ en las partículas de la esquina superior izquierda y la esquina inferior derecha, y carga $+2Q$ en la partícula en la esquina inferior izquierda. ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico en la esquina superior derecha, que es un punto en el espacio vacío? a) hacia arriba y a la derecha, b) a la derecha, c) hacia abajo, d) hacia abajo y a la izquierda, e) el campo es exactamente cero en dicho punto.
- Suponga que se quita la carga $+2Q$ en la esquina inferior izquierda de la figura POM15.12. ¿Cuál enunciado es verdadero acerca de la magnitud del campo eléctrico en la esquina superior derecha? a) Se vuelve mayor. b) Se vuelve menor. c) Permanece igual. d) Cambia de manera impredecible. e) Es cero.
- A una moneda metálica se le da una carga eléctrica positiva. ¿Su masa a) aumenta mensurablemente, b) aumenta por una cantidad muy pequeña para medirse directamente, c) permanece invariable, d) disminuye por una cantidad muy pequeña para medirse directamente, e) disminuye mensurablemente?

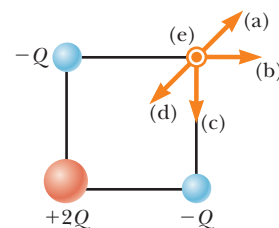


Figura POM15.12 Preguntas de opción múltiple 12 y 13.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un objeto de vidrio se carga a $+3$ nC al frotarlo con un trozo de seda. En el proceso de frotado, ¿se agregaron protones al objeto o se removieron electrones de él?
- Explique, desde un punto de vista atómico, por qué la carga por lo general se transfiere mediante electrones.
- Una persona se coloca en una gran esfera metálica hueca que está aislada de tierra. Si una gran carga se coloca en la esfera, ¿la persona se lastimará al tocar el interior de la esfera?
- ¿Por qué el personal de los hospitales calza zapatos conductores especiales mientras trabaja alrededor del oxígeno?

no en una sala de operaciones? ¿Qué puede ocurrir si el personal usa zapatos con suelas de goma?

5. a) ¿La vida sería diferente si el electrón se carga positivamente y el protón se carga negativamente? b) ¿La elección de los signos tiene alguna relación con las interacciones físicas y químicas? Explique sus respuestas.
6. Si un objeto suspendido A es atraído hacia un objeto cargado B , ¿se puede concluir que A está cargado? Explique.
7. Explique cómo un objeto con carga positiva puede usarse para dejar a otro objeto metálico con una carga negativa neta. Analice el movimiento de las cargas durante el proceso.
8. Considere el punto A en la figura PC15.8 situado a una distancia arbitraria a partir de dos cargas puntuales en un espacio vacío. a) ¿Esto es posible para un campo eléctrico que existe en el punto A en el espacio vacío? b) ¿Existe carga en este punto? c) ¿Existe una fuerza en este punto?
9. Un estudiante está de pie sobre un grueso trozo de material aislante, coloca su mano sobre un generador Van de Graaff y luego enciende el generador. ¿Recibe un choque?

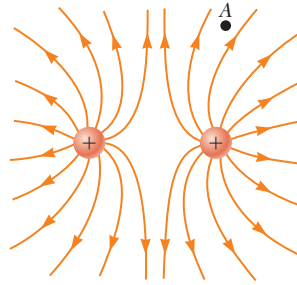


FIGURA PC15.8

10. En buen clima hay un campo eléctrico en la superficie de la Tierra, que apunta hacia abajo en el suelo. ¿Cuál es la carga eléctrica sobre la Tierra en esta situación?
11. Un peine cargado con frecuencia atrae pequeños trozos de papel seco que luego salen disparados cuando tocan el peine. Explique qué es lo que ocurre.
12. ¿Por qué un alambre de tierra se debe conectar a la barra metálica de soporte para una antena de televisión?
13. Entre los campos eléctrico y gravitacional existen grandes similitudes. Una habitación se puede blindar eléctricamente de modo que no haya campos eléctricos en la habitación al rodearla con un conductor. ¿Una habitación se puede blindar gravitacionalmente? Explique.
14. Una superficie esférica rodea una carga puntual q . Describa lo que ocurre al flujo total a través de la superficie si a) la carga se triplica, b) el volumen de la esfera se duplica, c) la superficie cambia a un cubo, d) la carga se mueve hacia otra ubicación dentro de la superficie y e) la carga se mueve hacia afuera de la superficie.
15. Si de una superficie salen más líneas de campo eléctrico de las que entran, ¿qué puede concluir usted acerca de la carga neta encerrada por dicha superficie?
16. Un estudiante que se crió en un país tropical y se encuentra estudiando en Estados Unidos puede no tener experiencia con las chispas de electricidad estática y los choques hasta su primer invierno estadounidense. Explique por qué.

PROBLEMAS

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

I. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

I. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C|C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

15.3 Ley de Coulomb

1. **C|C** Una carga de 7.50 nC se ubica a 1.8 m de una carga de 4.2 nC . a) la magnitud de la fuerza electrostática que una carga ejerce sobre la otra. b) ¿La fuerza es atractiva o repulsiva?
2. Una partícula cargada A ejerce una fuerza de 2.62 N hacia la derecha sobre una partícula cargada B cuando las partículas están separadas 13.7 mm . La partícula B se mueve recto alejándose de A para hacer la distancia entre ellas 17.7 mm . ¿Qué fuerza vectorial ejerce entonces la partícula B sobre A ?
3. **C|C** Dos bolas metálicas A y B de radio despreciable flotan en reposo en la Estación Espacial Libertad entre dos mamparas metálicas, conectadas mediante un hilo no conductor tenso de 2.00 m de longitud. La bola A porta carga q y la bola B porta carga $2q$. Cada bola está a 1.00

m de la mampara. a) Si la tensión en la cuerda es 2.50 N , ¿cuál es la magnitud de q ? b) ¿Qué ocurre con el sistema conforme pasa el tiempo? Explique.

4. Una pequeña esfera de masa $m = 7.50 \text{ g}$ y de carga $q_1 = 32.0 \text{ nC}$ se adjunta al final de una cuerda y cuelga verticalmente como en la figura P15.4. Una segunda carga de la misma masa y carga $q_2 = -58.0 \text{ nC}$ se encuentra por debajo de la primera a una distancia $d = 2.00 \text{ cm}$ por debajo de la primera carga como en la figura P15.4. a) Determine la tensión en la cuerda. b) Si la cuerda puede soportar una tensión máxima de 0.180 N , ¿cuál es el valor más pequeño que d puede tener antes de que la cuerda se rompa?

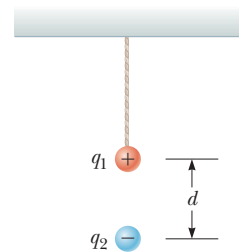


Figura P15.4

5. El núcleo de ${}^8\text{Be}$, que consiste de 4 protones y 4 neutrones, es muy inestable y espontáneamente se rompe en dos partículas alfa (núcleos de helio, cada uno consiste de 2 protones y 2 neutrones). a) ¿Cuál es la fuerza entre las dos partículas alfa cuando están separadas $5.00 \times 10^{-15} \text{ m}$ y b) cuál es la magnitud inicial de la aceleración de las partículas alfa debido a esta fuerza? Observe que la masa de una partícula alfa es 4.0026 u .
6. **BIO** Una molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico) tiene $2.17 \mu\text{m}$ de largo. Los extremos de la molécula se ionizan cada uno por separado: negativo en un extremo, positivo en el otro. La molécula helicoidal actúa como un resorte y se comprime 1.00% al cargarse. Determine la constante de resorte efectiva de la molécula.
7. Una pequeña esfera de carga $0.800 \mu\text{C}$ cuelga del extremo de un resorte como en la figura P15.7a. Cuando otra pequeña esfera de carga $-0.600 \mu\text{C}$ se cuelga por debajo de la primera esfera como en la figura P15.7b, el resorte se estira por $d = 3.50 \text{ cm}$ de su longitud original y llega a una nueva posición de equilibrio con una separación entre las cargas de $r = 5.00 \text{ cm}$. ¿Cuál es la constante de fuerza del resorte?

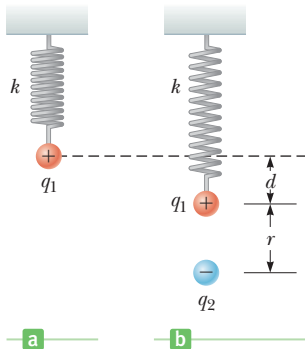


Figura P15.7

8. **S** Cuatro cargas puntuales están en las esquinas de un cuadrado de lado a , como se muestra en la figura P15.8. Determine la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica resultante sobre q , con k_e , q y a en forma simbólica.
9. Dos pequeñas esferas conductoras idénticas se colocan con sus centros separados 0.30 m . A una se le proporciona una carga de $12 \times 10^{-9} \text{ C}$, a la otra una carga de $-18 \times 10^{-9} \text{ C}$. a) Encuentre la fuerza electrostática ejercida sobre una esfera por la otra. b) Las esferas se conectan mediante un alambre conductor. Determine la fuerza electrostática entre las dos después de alcanzar el equilibrio cuando ambas esferas tienen la misma carga.
10. Calcule la magnitud y dirección de la fuerza de Coulomb sobre cada una de las tres cargas que se muestran en la figura P15.10.

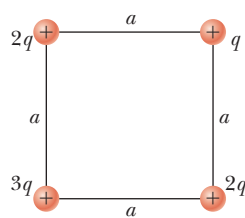


Figura P15.8

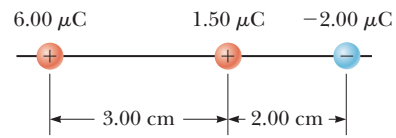


Figura P15.10 Problemas 10 y 18.

11. **M** Tres cargas se ordenan como se muestra en la figura P15.11. Determine la magnitud y dirección de la fuerza electrostática sobre la carga en el origen.

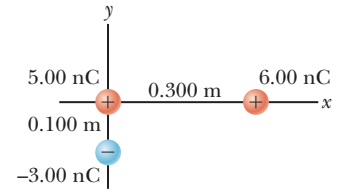


Figura P15.11

12. Una carga positiva $q_1 = 2.70 \mu\text{C}$ sobre una superficie horizontal sin fricción está unida a un resorte de constante de fuerza k como en la figura P15.12. Cuando una carga $q_2 = -8.60 \mu\text{C}$ se coloca a 9.50 cm de distancia de la carga positiva, el resorte se estira 5.00 mm , lo que reduce la distancia entre las cargas a $d = 9.00 \text{ cm}$. Encuentre el valor de k .

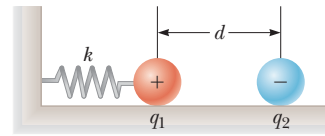


Figura P15.12

13. Tres cargas puntuales se colocan en las esquinas de un triángulo equilátero como en la figura P15.13. Determine la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica neta sobre la carga de $2.00 \mu\text{C}$.

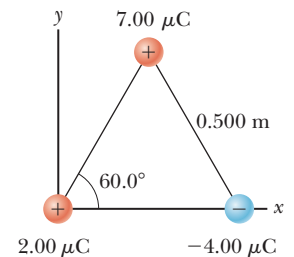


Figura P15.13 (Problemas 13 y 24)

14. Dos bloques de metal idénticos sobre una superficie horizontal sin fricción son conectados por un resorte de metal ligero con constante $k = 100 \text{ N/m}$ y de longitud sin estirar $L_i = 0.400 \text{ m}$, como en la figura P15.14a. Una carga Q se coloca lentamente en cada bloque lo que causa que el resorte se estire a una longitud de equilibrio $L = 0.500 \text{ m}$, como en la figura P15.14b. Determine el valor de Q modele los bloques como partículas cargadas.

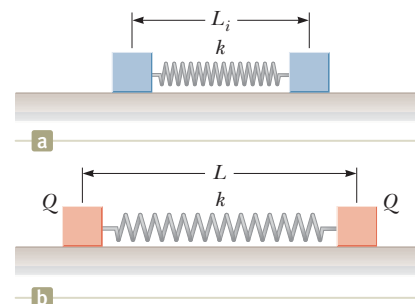


Figura P15.14

15. Dos pequeñas esferas metálicas, cada una de masa $m = 0.20 \text{ g}$, se suspenden como péndulos mediante cuerdas ligeras a partir de un punto común, como se muestra en la figura P15.15. A las esferas se les proporciona la misma carga eléctrica y se encuentra que llegan al equilibrio cuando cada cuerda está a un ángulo $\theta = 5.0^\circ$ con la vertical. Si cada cuerda tiene de largo $L = 30.0 \text{ cm}$, ¿cuál es la magnitud de la carga sobre cada esfera?

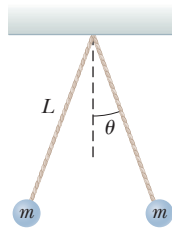


Figura P15.15

16. **PG** La partícula A, con carga $3.00 \times 10^{-4} \text{ C}$, está en el origen; la partícula B, con carga $-6.00 \times 10^{-4} \text{ C}$, está en $(4.00 \text{ m}, 0)$; y la partícula C, con carga $1.00 \times 10^{-4} \text{ C}$, está en $(0, 3.00 \text{ m})$. a) ¿Cuál es la componente x de la fuerza eléctrica ejercida por A sobre C? b) ¿Cuál es la componente y de la fuerza ejercida por A sobre C? c) Determine la magnitud de la fuerza ejercida por B sobre C? d) Calcule la componente x de la fuerza ejercida por B sobre C. e) Calcule la componente y de la fuerza ejercida por B sobre C. f) Sume los dos componentes x para obtener la componente x resultante de la fuerza eléctrica que actúa sobre C. g) Repita el inciso f) para la componente y. h) Encuentre la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica resultante que actúa sobre C.

15.4 El campo eléctrico

17. Un pequeño objeto, de 3.80 g de masa y $-18 \mu\text{C}$ de carga, está suspendido sobre el suelo sin moverse cuando es sumergido en un campo eléctrico uniforme perpendicular al suelo. ¿Cuál es la magnitud y dirección del campo eléctrico?
18. a) Determine la intensidad del campo eléctrico en un punto 1.00 cm a la izquierda de la carga media que se muestra en la figura P15.10. b) Si una carga de $-2.00 \mu\text{C}$ se coloca en este punto, ¿cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza sobre ella?
19. Un campo eléctrico de magnitud $5.25 \times 10^5 \text{ N/C}$ apunta al sur en un lugar determinado. Encontrar la magnitud y dirección de la fuerza sobre una carga de $-6.00 \mu\text{C}$ en este lugar.
20. Un electrón se acelera mediante un campo eléctrico constante de 300 N/C de magnitud. a) Determine la aceleración del electrón. b) Use las ecuaciones de movimiento con aceleración constante para encontrar la rapidez del electrón después de $1.00 \times 10^{-8} \text{ s}$, suponiendo que parte desde el reposo.

21. Un pequeño bloque de masa m y carga Q se coloca en un plano aislado, sin fricción, con una inclinación a un ángulo θ como en la figura P15.21. Un campo eléctrico se aplica en paralelo a la pendiente. a) Encontrar una expresión para la magnitud del campo eléctrico que permite al bloque permanecer en reposo. b) Si $m = 5.40 \text{ g}$, $Q = -7.00 \mu\text{C}$ y $\theta = 25.0^\circ$,

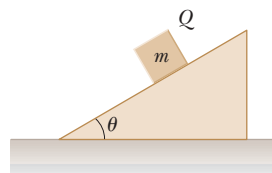


Figura P15.21

determine la magnitud y la dirección del campo eléctrico que permite al bloque permanecer en reposo sobre la pendiente.

22. Una pequeña esfera de carga $q = +68 \mu\text{C}$ y masa $m = 5.8 \text{ g}$ está unida a una cuerda ligera y es colocada en un campo eléctrico uniforme \vec{E} que forma un ángulo $\theta = 37^\circ$ con la horizontal. El extremo opuesto de la cuerda se fija a la pared y la esfera está en equilibrio estático cuando la cuerda está en posición horizontal como en la figura P15.22. a) Construya un diagrama de cuerpo libre para la esfera. Buscar b) la magnitud del campo eléctrico y c) la tensión en la cuerda.

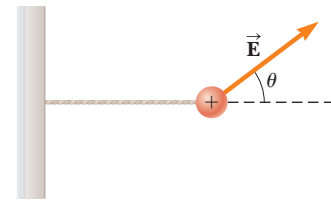


Figura P15.22

23. **M** Un protón acelera desde el reposo en un campo eléctrico uniforme de 640 N/C . Algún tiempo después, su rapidez es $1.20 \times 10^6 \text{ m/s}$. a) Determine la magnitud de la aceleración del protón. b) ¿Cuánto tarda el protón en alcanzar esta rapidez? c) ¿Cuánto recorre en este intervalo? d) ¿Cuál es su energía cinética en ese tiempo posterior?
24. **CIC** a) Determine la magnitud y dirección del campo eléctrico en la posición de la carga de $2.00 \mu\text{C}$ en la figura P15.13. b) ¿Cómo afectaría el campo eléctrico en dicho punto, si la carga ahí se duplica? ¿Se afectaría la magnitud de la fuerza eléctrica?
25. **S** Dos cargas positivas iguales están en las esquinas opuestas de un trapecio como en la figura P15.25. Encuentre expresiones simbólicas de las componentes del campo eléctrico en el punto P.
26. Tres cargas puntuales están situadas en un arco circular, como se muestra en la figura P15.26. a) ¿Cuál es el campo eléctrico total en P, el centro del arco? b) Halle la fuerza eléctrica que se ejerce sobre una carga de -5.00 nC colocada en P.

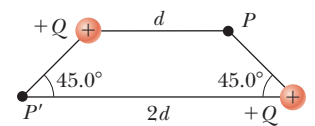


Figura P15.25

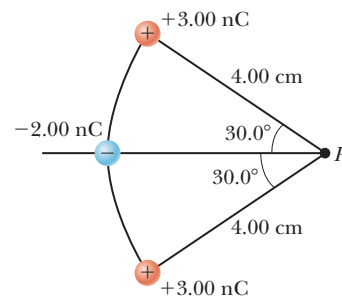


Figura P15.26

- 27.** En la figura P15.27, determine el punto (distinto a infinito) donde el campo eléctrico total es cero.

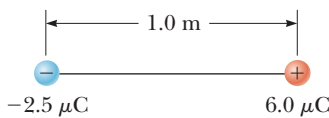


Figura P15.27

- 28.** Tres cargas están en las esquinas de un triángulo equilátero, como se muestra en la figura P15.28. Calcule el campo eléctrico en un punto a la mitad entre las dos cargas sobre el eje x .

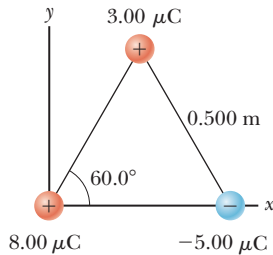


Figura P15.28

- 29.** Tres cargas idénticas ($q = -5.0 \mu\text{C}$) yacen sobre un círculo de 2.0 m de radio en ángulos de 30° , 150° y 270° , como se muestra en la figura P15.29. ¿Cuál es el campo eléctrico resultante en el centro del círculo?

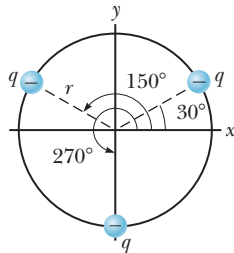


Figura P15.29

15.5 Líneas de campo eléctrico

15.6 Conductores en equilibrio electrostático

- 30.** La figura P15.30 muestra las líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales separadas por una pequeña distancia. a) Determine la razón q_1/q_2 . b) ¿Cuáles son los signos de q_1 y q_2 ?
- 31.** a) Bosqueje las líneas de campo eléctrico alrededor de una carga puntual aislada $q > 0$. b) Bosqueje el patrón de campo eléctrico alrededor de una carga puntual negativa aislada de magnitud $-2q$.
- 32.** a) Bosqueje el patrón de campo eléctrico alrededor de dos cargas puntuales positivas de magnitud $1 \mu\text{C}$ colocadas muy juntas. b) Bosqueje el patrón de campo eléctrico alrededor de dos cargas puntuales positivas de $-2 \mu\text{C}$, colocadas muy juntas. c) Bosqueje el patrón alrededor de dos cargas puntuales de $+1 \mu\text{C}$ y $-2 \mu\text{C}$, colocadas muy juntas.
- 33.** Dos cargas puntuales están separadas una pequeña distancia. a) Bosqueje las líneas de campo eléctrico para las dos, si una tiene una carga cuatro veces mayor que la otra y ambas cargas son positivas. b) Repita para el caso cuando ambas cargas son negativas.

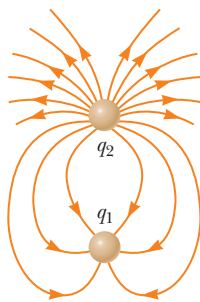


Figura P15.30

- 34. S** Tres cargas positivas iguales están en las esquinas de un triángulo equilátero de lado a como en la figura P15.34. Supongamos que las tres cargas juntas crean un campo eléctrico. a) Dibuje las líneas de campo eléctrico en el plano de las cargas. b) Encuentre la ubicación de un punto (que no sea ∞) donde el campo eléctrico es cero. ¿Cuáles son c) la magnitud y d) la dirección del campo eléctrico en P debido a las dos cargas en la base?

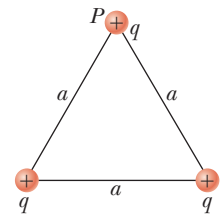


Figura P15.34

- 35.** Consulte la figura 15.20. La carga que baja al centro del conductor hueco tiene una magnitud de $5 \mu\text{C}$. Determine la magnitud y signo de la carga en el interior y el exterior del conductor hueco cuando la carga es como se muestra en a) figura 15.20a, b) figura 15.20b, c) figura 15.20c y d) figura 15.20d.

15.8 El generador Van de Graaff

- 36.** El domo de un generador Van de Graaff recibe una carga de $2.0 \times 10^{-4} \text{ C}$. Determine la intensidad del campo eléctrico a) dentro del domo, b) en la superficie del domo, si supone que tiene un radio de 1.0 m y c) 4.0 m del centro del domo. *Sugerencia:* Véase la sección 15.6 para revisar las propiedades de los conductores en equilibrio electrostático. Además, use el hecho de que los puntos en la superficie están fuera de una distribución de carga con simetría esférica; la carga total puede considerarse como ubicada en el centro de la esfera.
- 37.** Si la intensidad del campo eléctrico en el aire supera $3.0 \times 10^6 \text{ N/C}$, el aire se convierte en conductor. Con este hecho, determine la cantidad máxima de carga que puede portar una esfera metálica de 2.0 m de radio. (Vea la sugerencia del problema 36.)
- 38.** En el experimento de la gota de aceite de Millikan, un atomizador (un rociador con una boquilla fina) se usa para introducir muchas pequeñas gotitas de aceite entre dos placas metálicas paralelas cargadas. Algunas de las gotas recogen uno o más electrones en exceso. La carga sobre las placas se ajusta de modo que la fuerza eléctrica sobre los electrones en exceso equilibra exactamente el peso de la gota. La idea es una gota que tenga la fuerza eléctrica más pequeña y suponer que tiene sólo un electrón en exceso. Esta estrategia permite al observador medir la carga sobre el electrón. Suponga que se usa un campo eléctrico de $3 \times 10^4 \text{ N/C}$. La carga en un electrón es aproximadamente $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Estime el radio de una gota de aceite de 858 kg/m^3 de densidad para la cual su peso se podría equilibrar mediante la fuerza eléctrica de este campo en un electrón. (El problema 38 es cortesía de E. F. Redish. Para más problemas de este tipo, visite www.physics.umd.edu/perg/.)

- 39.** Un generador Van de Graaff se carga de modo que un protón en su superficie acelera radialmente hacia afuera a $1.52 \times 10^{12} \text{ m/s}^2$. Determine a) la magnitud de la fuerza eléctrica sobre el protón en dicho instante y b) la magnitud y dirección del campo eléctrico en la superficie del generador.

15.9 Flujo eléctrico y ley de Gauss

40. Un campo eléctrico de magnitud $E = 435 \text{ N/C}$ forma un ángulo de $\theta = 65.0^\circ$ con una superficie plana de área $A = 3.50 \text{ m}^2$, como en la figura P15.40. Encuentre el flujo eléctrico a lo largo de esta superficie.

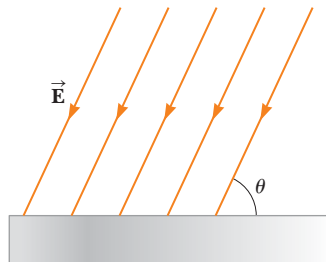


Figura P15.40

41. **M** Un campo eléctrico de 3.50 kN/C de intensidad se aplica a lo largo del eje x . Calcule el flujo eléctrico a través de un plano rectangular de 0.350 m de ancho y 0.700 m de largo si a) el plano es paralelo al plano yz , b) el plano es paralelo al plano xy y c) el plano contiene el eje y y su normal forma un ángulo de 40.0° con el eje x .
42. **CIC** El campo eléctrico en todas partes sobre la superficie de una esfera cargada de 0.230 m de radio tiene una magnitud de 575 N/C y apunta radialmente hacia afuera desde el centro de la esfera. a) ¿Cuál es la carga neta sobre la esfera? b) ¿Qué puede concluir acerca de la naturaleza y distribución de carga dentro de la esfera?

43. **S** En la figura P15.43 se bosquejan cuatro superficies cerradas, de S_1 a S_4 , en conjunto con las cargas $-2Q$, Q y $-Q$. (Las líneas de color son las intersecciones de las superficies con la página.) Determine el flujo eléctrico en cada superficie.

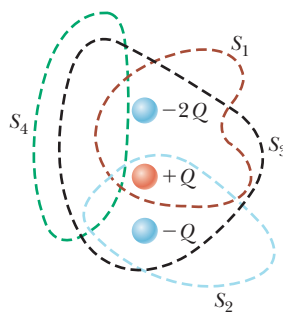


Figura P15.43

44. Una carga $q = +5.80 \mu\text{C}$ está situado en el centro de un tetraedro regular (una superficie de cuatro lados) como en la figura P15.44. Encuentre a) el flujo eléctrico total a través del tetraedro y b) el flujo eléctrico a través de una de las caras del tetraedro.

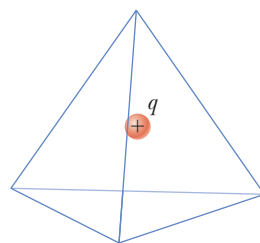


Figura P15.44

45. Una carga puntual q se ubica en el centro de un cascarón esférico de radio a que tiene una carga $-q$ distribuida de manera uniforme sobre su superficie. Determine el campo eléctrico a) para todos los puntos fuera del cascarón esférico y b) para un punto dentro del cascarón a una distancia r del centro.

46. **CIC** Una carga de $1.70 \times 10^2 \mu\text{C}$ está en el centro de un cubo con bordes de 80.0 cm . No hay otras cargas en la vecindad. a) Determine el flujo a través de toda la superficie del cubo. b) Determine el flujo a través de cada cara del cubo. c) ¿Sus respuestas a los incisos a) o b) cambian si la carga no estuviese en el centro? Explique.

47. Suponga que el cascarón esférico conductor de la figura 15.29 porta una carga de 3.00 nC y que una carga de -2.00 nC está en el centro de la esfera. Si $a = 2.00 \text{ m}$ y $b = 2.40 \text{ m}$, determine el campo eléctrico en a) $r = 1.50 \text{ m}$, b) $r = 2.20 \text{ m}$ y c) $r = 2.50 \text{ m}$. d) ¿Cuál es la distribución de carga sobre la esfera?

48. **S** Una placa no conductora muy grande, que yace en el plano xy , porta una carga por unidad de área σ . Una segunda placa similar, ubicada en $z = 2.00 \text{ cm}$ y orientada paralela al plano xy , porta una carga por unidad de área -2σ . Determine el campo eléctrico a) para $z < 0$, b) $0 < z < 2.00 \text{ cm}$ y c) $z > 2.00 \text{ cm}$.

Problemas adicionales

49. En el espacio profundo, dos esferas, cada una con 5.00 m de radio, se conectan mediante un cordón no conductor de $3.00 \times 10^2 \text{ m}$. Si una carga de 35.0 mC se distribuye uniformemente sobre la superficie de cada esfera, calcule la tensión en la cuerda.

50. **CIC** Una delgada hoja de carga plana no conductora porta una carga uniforme por unidad de área de $5.20 \mu\text{C}/\text{m}^2$, como en la figura 15.30. a) Encuentre el campo eléctrico a una distancia de 8.70 cm de la placa. b) Explique si su resultado cambia conforme varía la distancia desde la hoja.

51. Tres cargas puntuales se alinean a lo largo del eje x , como se muestra en la figura P15.51. Encuentre el campo eléctrico en la posición $x = +2.0 \text{ m}$, $y = 0$.

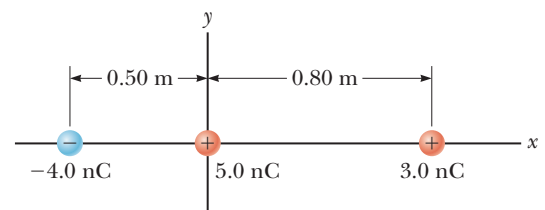


Figura P15.51

52. **M** Una pequeña bola plástica de masa $m = 2.00 \text{ g}$ está suspendida mediante una cuerda de largo $L = 20.0 \text{ cm}$ en un campo eléctrico uniforme, como se muestra en la figura P15.52. Si la bola está en equilibrio cuando la cuerda forma un ángulo $\theta = 15.0^\circ$ con la vertical, como se indica, ¿cuál es la carga neta sobre la bola?

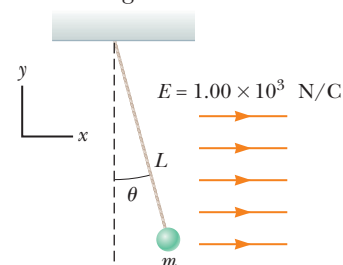


Figura P15.52

53. a) Dos cargas puntuales idénticas $+q$ se ubican sobre el eje y en $y = +a$ y $y = -a$. ¿Cuál es el campo eléctrico a lo largo del eje x en $x = b$? b) Un anillo circular de carga, de radio a , tiene una carga positiva total Q distribuida de manera uniforme alrededor suyo. El anillo está en el plano $x = 0$ con su centro en el origen. ¿Cuál es el campo eléctrico a lo largo del eje x en $x = b$ debido al anillo de carga? *Sugerencia:* Considere que la carga Q consiste de muchos pares de cargas puntuales idénticas colocadas en los extremos de diámetros del anillo.

54. **S** Los electrones en un haz particular tienen cada uno energía cinética K . Determine la magnitud del campo eléctrico que detendrá a estos electrones en una distancia d , y exprese la respuesta simbólicamente en términos de K , e y d . ¿El campo eléctrico debe apuntar en la dirección del movimiento del electrón, o debe apuntar en la dirección opuesta?

55. **S** Una carga puntual $+2Q$ está en el origen y otra carga puntual $-Q$ se encuentra a lo largo del eje x en $x = d$ como en la figura P15.55. Encuentre expresiones simbólicas de las componentes de la fuerza neta sobre una tercera carga puntual $+Q$ situada a lo largo del eje y en $y = d$.

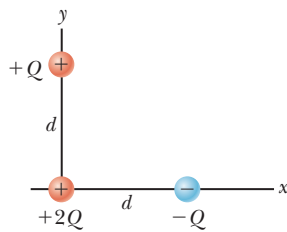


Figura P15.55

56. **CIC** Una bola de corcho de 1.00 g, con una carga de 2.00 mC, está suspendida verticalmente sobre una cuerda ligera de 0.500 m de largo en presencia de un campo eléctrico uniforme dirigido hacia abajo, con magnitud $E = 1.00 \times 10^5$ N/C. Si la bola se desplaza ligeramente de la vertical, oscila como un péndulo simple. a) Determine el periodo de oscilación de la bola. b) ¿En el cálculo para el inciso a) se debe incluir gravedad? Explique.

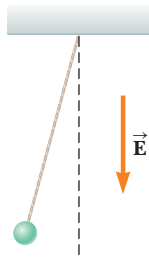


Figura P15.56

57. Dos esferas de 2.0 g están suspendidas mediante cuerdas ligeras de 10.0 cm de largo (figura P15.57). En la dirección x se aplica un campo eléctrico uniforme. Si las esferas tienen cargas de -5.0×10^{-8} C y -5.0×10^{-8} C, determine la intensidad del campo eléctrico que permite a las esferas estar en equilibrio en $\theta = 10^\circ$.

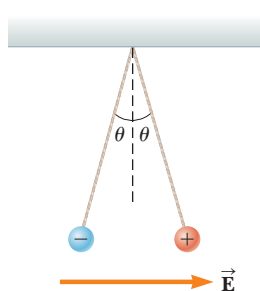


Figura P15.57

58. **CIC** Una carga puntual de $5.00 \mu\text{C}$ de magnitud está en el origen de una sistema coordenado, y una carga de $-4.00 \mu\text{C}$ está en el punto $x = 1.00$ m. Hay un punto sobre el eje x , en x menor que infinito, donde el campo

eléctrico tiende a cero. a) Demuestre mediante argumentos conceptuales que este punto no se puede ubicar entre las cargas. b) Demuestre mediante argumentos conceptuales que el punto no puede estar en alguna ubicación entre $x = 0$ e infinito negativo. c) Demuestre mediante argumentos conceptuales que el punto debe estar entre $x = 100$ m y $x =$ infinito positivo. d) Use los valores dados para encontrar el punto y demuestre que es consistente con su argumento conceptual.

59. Dos esferas de caucho duro, de masa $m = 15.0$ g, se frotan vigorosamente con piel en un día seco y luego se suspenden de una barra con dos cuerdas aislantes de longitud $L = 5.00$ cm, cuyos puentes de soporte están a una distancia $d = 3.00$ cm uno del otro, como se muestra en la figura 15.59. Durante el frotamiento, una esfera recibe el doble de carga que la otra. Se observa que cuelgan en equilibrio, cada una a un ángulo $\theta = 10.0^\circ$ con la vertical. Estime la cantidad de carga que se encuentra sobre cada esfera.

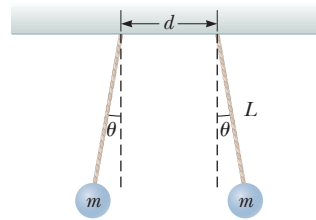


Figura P15.59

60. Dos pequeñas perlas con cargas positivas $q_1 = 3q$ y $q_2 = q$ se fijan en los extremos opuestos de una barra horizontal de aislamiento de longitud $d = 1.50$ m. La perla con carga q_1 está en el origen. Como se muestra en la figura P15.60, una tercera perla cargada está libre para deslizarse sobre la barra. ¿En qué posición x está la tercera perla en equilibrio?

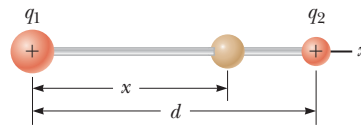


Figura P15.60

61. **M** Una esfera conductora sólida de 2.00 cm de radio tiene una carga de $8.00 \mu\text{C}$. Un cascarón esférico conductor de 4.00 cm de radio interior y radio exterior de 5.00 cm es concéntrico con la esfera sólida y tiene una carga de $-4.00 \mu\text{C}$. Encuentre el campo eléctrico en a) $r = 1.00$ cm, b) $r = 3.00$ cm, c) $r = 4.50$ cm y d) $r = 7.00$ cm desde el centro de esta configuración de carga.

62. Tres cargas puntuales idénticas, cada una con masa $m = 0.100$ kg, cuelgan de tres cuerdas, como se muestra

en la figura P15.62. Si las longitudes de las cuerdas izquierda y derecha son cada una $L = 30.0$ cm y si el ángulo θ es 45.0° , determine el valor de q .

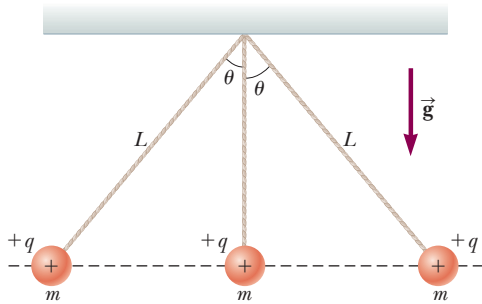


Figura P15.62

63. Cada uno de los electrones en un haz particular tiene una energía cinética de 1.60×10^{-17} J. a) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico uniforme (que apunta en la dirección de movimiento del electrón) que detendrá a estos electrones en una distancia de 10.0 cm? b) ¿Cuánto tiempo tardarán en detenerse los electrones? c) Después de que los electrones se detienen, ¿qué harán? Explique.

64. Protones se proyectan con una rapidez inicial $v_0 = 9550$ m/s hacia una región donde está presente un campo eléctrico uniforme $E = 720$ N/C (figura P15.64). Los protones van a golpear un blanco que se encuentra a una distancia horizontal de 1.27 mm desde el punto donde se lanzaron los protones. Determine a) los dos ángulos de proyección θ que resultarán en un blanco y b) la duración total de vuelo para cada una de las dos trayectorias.

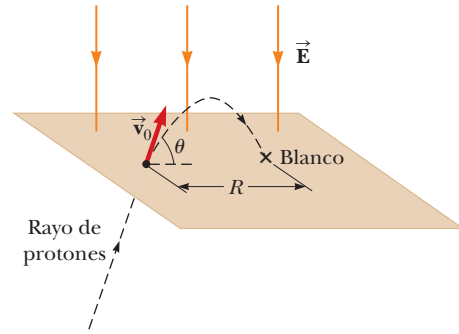


Figura P15.64

El generador Van de Graaff más grande del mundo aislado del aire produce relámpagos en el interior del Museo de Ciencias de Boston. Las descargas ocurren cuando la diferencia de voltaje se vuelve lo suficientemente grande como para ionizar el aire, una instancia de rompimiento dieléctrico.

Yoshiki Hase, Cortesía del Museum of Science, Boston



16

Energía eléctrica y capacitancia

- 16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico
- 16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales
- 16.3 Potenciales y conductores cargados
- 16.4 Superficies equipotenciales
- 16.5 Aplicaciones
- 16.6 Capacitancia
- 16.7 El capacitor de placas paralelas
- 16.8 Combinaciones de capacitores
- 16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado
- 16.10 Capacitores con dieléctricos

El concepto de energía potencial se introdujo en el capítulo 5, en conexión con las fuerzas conservativas de gravedad y resortes. Con el principio de conservación de la energía, a menudo es posible evitar trabajar de manera directa con fuerzas cuando se resuelven problemas. Aquí aprenderá que el concepto de energía potencial también es útil en el estudio de la electricidad. Dado que la fuerza de Coulomb es conservativa, se puede definir una energía potencial eléctrica que corresponda a dicha fuerza. Además, se define un potencial eléctrico —la energía potencial por unidad de carga— que corresponde al campo eléctrico.

Con el concepto de potencial eléctrico a mano, podemos comenzar a entender los circuitos eléctricos, iniciando con una investigación de los elementos de circuito comunes llamados capacitores. Estos dispositivos simples almacenan energía eléctrica y se encuentran virtualmente en todas partes, desde circuitos grabados en un microchip, hasta la creación de enormes estallidos de potencia en experimentos de fusión.

16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico

La energía potencial eléctrica y el potencial eléctrico son conceptos estrechamente relacionados. El potencial eléctrico evidencia ser sólo la energía potencial eléctrica por unidad de carga. Esta relación es similar a la que existe entre fuerza eléctrica y campo eléctrico, que es la fuerza eléctrica por unidad de carga.

Trabajo y energía potencial eléctrica

Recuerde del capítulo 5 que el trabajo realizado por una fuerza conservativa \vec{F} sobre un objeto depende sólo de las posiciones inicial y final del objeto y no de la trayectoria que

se sigue entre estos dos puntos. Esto, a su vez, significa que existe una función de energía potencial EP . Como se vio, la energía potencial es una cantidad escalar con el cambio en energía potencial igual, por definición, al negativo del trabajo realizado por la fuerza conservativa: $\Delta EP = EP_f - EP_i = -W_f$.

Tanto la ley de fuerza de Coulomb como la ley universal de gravedad son proporcionales a $1/r^2$. Puesto que tienen la misma forma matemática y dado que la fuerza de gravedad es conservativa, asumimos que **la fuerza de Coulomb también es conservativa**. Como con la gravedad, con esta fuerza se puede asociar una función de energía potencial eléctrica.

Para hacer estas ideas más cuantitativas, imagine una pequeña carga positiva colocada en el punto A en un campo eléctrico *uniforme* \vec{E} , como en la figura 16.1. Por simplicidad, considere primero sólo campos eléctricos constantes y cargas que se mueven paralelas a dicho campo en una dimensión (el eje x). El campo eléctrico entre placas paralelas con cargas iguales y opuestas, es un ejemplo de un campo que es aproximadamente constante. (Véase el capítulo 15.) Conforme la carga se mueve del punto A al punto B bajo la influencia del campo eléctrico \vec{E} , el trabajo realizado sobre la carga por el campo eléctrico es igual a la parte de la fuerza eléctrica $q\vec{E}$ que actúa paralela al desplazamiento, por el desplazamiento $\Delta x = x_f - x_i$:

$$W_{AB} = F_x \Delta x = qE_x(x_f - x_i)$$

En esta expresión, q es la carga y E_x es el componente vectorial de \vec{E} en la dirección x (no la magnitud de \vec{E}). A diferencia de la magnitud de \vec{E} , el componente E_x puede ser positivo o negativo, de acuerdo con la dirección de \vec{E} , aunque en la figura 16.1 E_x es positivo. Finalmente, observe que el desplazamiento, como q y E_x , también puede ser positivo o negativo, de acuerdo con la dirección del desplazamiento.

La expresión anterior para el trabajo realizado por un campo eléctrico sobre una carga que se mueve en una dimensión es válida para cargas positivas y negativas y para campos eléctricos constantes que apuntan en *cualquier* dirección. Cuando se sustituyen números con signos correctos, resulta automáticamente el signo correcto global. En algunos libros se usa la expresión $W = qEd$, donde E es la magnitud del campo eléctrico y d es la distancia que recorre la partícula. ¡La debilidad de esta formulación es que no permite, matemáticamente, trabajo eléctrico negativo sobre cargas positivas, ni trabajo eléctrico positivo sobre cargas negativas! No obstante, la expresión es fácil de recordar y útil para encontrar magnitudes: la magnitud del trabajo realizado por un campo eléctrico constante sobre una carga que se mueve paralela al campo siempre está dada por $|W| = |q|Ed$.

Es posible sustituir la definición de trabajo eléctrico en el teorema trabajo-energía (suponga ausencia de otras fuerzas):

$$W = qE_x \Delta x = \Delta EP$$

La fuerza eléctrica es conservativa, así que el trabajo eléctrico sólo depende de los puntos finales de la trayectoria, A y B , no de la trayectoria tomada. Por lo tanto, conforme la carga acelera hacia la derecha en la figura 16.1, gana energía cinética y pierde una cantidad igual de energía potencial. Recuerde del capítulo 5 que **el trabajo realizado por una fuerza conservativa puede reinterpretarse como el negativo del cambio en una energía potencial asociada con dicha fuerza**. Esta interpretación origina la definición del cambio en energía potencial eléctrica:

El cambio en energía potencial eléctrica, ΔEP , de un sistema que consiste en un objeto con carga q que se mueve a lo largo de un desplazamiento Δx en un campo eléctrico constante \vec{E} está dado por

$$\Delta EP = -W_{AB} = -qE_x \Delta x \tag{16.1}$$

donde E_x es el componente x del campo eléctrico y $\Delta x = x_f - x_i$ es el desplazamiento de la carga a lo largo del eje x .

Unidad SI: joule (J)

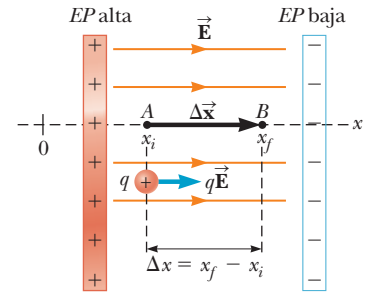
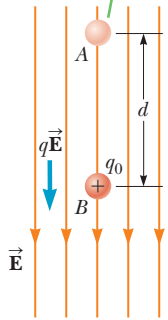


Figura 16.1 Cuando una carga q se mueve en un campo eléctrico uniforme \vec{E} desde el punto A hasta el punto B , el trabajo realizado sobre la carga por la fuerza eléctrica es $qE_x \Delta x$.

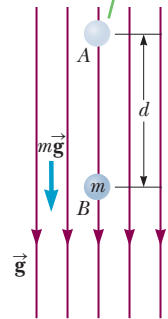
◀ Cambio en energía potencial eléctrica

Conforme una carga de prueba positiva se mueve de A a B, la energía potencial eléctrica disminuye.



a

Conforme un objeto de masa se mueve de A a B, la energía potencial gravitacional disminuye.



b

Figura 16.2 a) Cuando el campo eléctrico \vec{E} se dirige hacia abajo, el punto B está a un menor potencial eléctrico que el punto A. b) Un objeto de masa m se mueve en la dirección del campo gravitacional \vec{g} .

Aunque la energía potencial se puede definir para cualquier campo eléctrico, **la ecuación 16.1 sólo es válida para el caso de un campo eléctrico uniforme (es decir, constante), para una partícula que experimenta un desplazamiento a lo largo de un eje dado (aquí llamado eje x)**. Puesto que el campo eléctrico es conservativo, el cambio en energía potencial no depende de la trayectoria. En consecuencia, no es importante si la carga permanece o no sobre el eje en todo momento durante el desplazamiento: el cambio en energía potencial será el mismo. En secciones posteriores se examinarán situaciones en las que el campo eléctrico no es uniforme.

En la figura 16.2 se pueden comparar las energías potenciales eléctrica y gravitacional. En esta figura, los campos eléctrico y gravitacional se dirigen ambos hacia abajo. Vemos que la carga positiva en un campo eléctrico actúa de forma muy parecida a una masa en un campo de gravedad: una carga positiva en el punto A cae en la dirección del campo eléctrico, tal como una masa positiva cae en la dirección del campo de gravedad. Sea el punto B el punto cero para la energía potencial en las figuras 16.2a y 16.2b. A partir de la conservación de la energía, al caer del punto A al punto B, la carga positiva gana energía cinética igual en magnitud a la pérdida de energía potencial eléctrica:

$$\Delta EC + \Delta EP_{el} = \Delta EC + (0 - |q|Ed) = 0 \rightarrow \Delta EC = |q|Ed$$

Los signos de valor absoluto sobre q están ahí sólo para hacer explícito que la carga es positiva en este caso. De igual modo, el objeto en la figura 16.2b gana energía cinética igual en magnitud a la pérdida de energía potencial gravitacional:

$$\Delta EC + \Delta EP_g = \Delta EC + (0 - mgd) = 0 \rightarrow \Delta EC = mgd$$

Así que, para cargas positivas, la energía potencial eléctrica funciona en forma muy parecida a la energía potencial gravitacional. En ambos casos mover un objeto en dirección opuesta al campo resulta en una ganancia de energía potencial y, al liberarse, la energía potencial se convierte en energía cinética del objeto.

Sin embargo, la energía potencial eléctrica difiere significativamente de la energía potencial gravitacional, en cuanto a que hay dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa, mientras que la gravedad sólo tiene “carga gravitacional” (es decir, masa). Una partícula con carga negativa en reposo en el punto A de la figura 16.2a tendría que *empujarse* al punto B. Para ver por qué, aplique el teorema trabajo-energía a una carga negativa en reposo en el punto A y suponga que tiene cierta rapidez v al llegar al punto B:

$$W = \Delta EC + \Delta EP_{el} = \left(\frac{1}{2}mv^2 - 0\right) + [0 - (-|q|Ed)]$$

$$W = \frac{1}{2}mv^2 + |q|Ed$$

Observe que la carga negativa, $-|q|$, a diferencia de la carga positiva, tiene un cambio positivo en la energía potencial eléctrica al moverse del punto A al punto B. Si la carga negativa tiene alguna rapidez en el punto B, la energía cinética que corresponde a dicha rapidez también es positiva. Puesto que ambos términos en el lado derecho de la ecuación trabajo-energía son positivos, no hay forma de llevar la carga negativa del punto A al punto B sin realizar trabajo positivo sobre ella. De hecho, si la carga negativa simplemente se libera en el punto A, ¡“caerá” hacia arriba contra la dirección del campo!

■ **Examen rápido**

16.1 Si un electrón se libera desde el reposo en un campo eléctrico uniforme, ¿la energía potencial eléctrica del sistema carga-campo a) aumenta, b) disminuye o c) permanece igual?

■ **EJEMPLO 16.1** Diferencias de energía potencial en un campo eléctrico

OBJETIVO Ilustrar el concepto de energía potencial eléctrica.

PROBLEMA Un protón se libera desde el reposo en $x = -2.00$ cm en un campo eléctrico constante con 1.50×10^3 N/C de magnitud, que apunta en la dirección x positiva. **a)** Calcule el cambio en energía potencial eléctrica asociado con el protón cuando llega a $x = 5.00$ cm. **b)** Ahora un electrón se dispara en la misma dirección desde la misma posición. ¿Cuál es su cambio en energía potencial eléctrica asociada con el electrón, si llega a $x = 12.0$ cm? **c)** Si la dirección del campo eléctrico se

invierte y un electrón se libera desde el reposo en $x = 3.00$ cm, ¿en cuánto cambió la energía potencial eléctrica cuando el electrón llega a $x = 7.00$ cm?

ESTRATEGIA Este problema requiere una sustitución directa de valores dados en la definición de energía potencial eléctrica, ecuación 16.1.

SOLUCIÓN

a) Calcule el cambio en energía potencial eléctrica asociado con el protón.

Aplique la ecuación 16.1:

$$\begin{aligned}\Delta EP &= -qE_x \Delta x = -qE_x(x_f - x_i) \\ &= -(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.50 \times 10^3 \text{ N/C}) \\ &\quad \times [0.0500 \text{ m} - (-0.0200 \text{ m})] \\ &= -1.68 \times 10^{-17} \text{ J}\end{aligned}$$

b) Determine el cambio en la energía potencial eléctrica asociado con un electrón disparado desde $x = -0.0200$ m y que llega a $x = 0.120$ m.

Aplique la ecuación 16.1, pero en este caso observe que la carga eléctrica q es negativa:

$$\begin{aligned}\Delta EP &= -qE_x \Delta x = -qE_x(x_f - x_i) \\ &= -(-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.50 \times 10^3 \text{ N/C}) \\ &\quad \times [(0.120 \text{ m} - (-0.0200 \text{ m}))] \\ &= +3.36 \times 10^{-17} \text{ J}\end{aligned}$$

c) Determine el cambio en energía potencial asociado con un electrón que viaja desde $x = 3.00$ cm hasta $x = 7.00$ cm, si la dirección del campo eléctrico se invierte.

Sustituya, pero ahora el campo eléctrico apunta en la dirección x negativa, por lo tanto lleva un signo menos:

$$\begin{aligned}\Delta EP &= -qE_x \Delta x = -qE_x(x_f - x_i) \\ &= -(-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(-1.50 \times 10^3 \text{ N/C}) \\ &\quad \times (0.070 \text{ m} - 0.030 \text{ m}) \\ &= -9.60 \times 10^{-18} \text{ J}\end{aligned}$$

COMENTARIOS Observe que el protón (en realidad el sistema protón-campo) pierde energía potencial cuando se mueve en la dirección x positiva, mientras que el electrón gana energía potencial cuando se mueve en la misma dirección. Encontrar los cambios en la energía potencial con el campo invertido fue sólo cuestión de proporcionar un signo menos, ¡lo que en este caso llevó el número total a tres! Es importante no eliminar alguno de los signos.

PREGUNTA 16.1 Verdadero o Falso: Cuando un electrón se libera desde el reposo en un campo eléctrico constante, el cambio en energía potencial eléctrica asociado con el electrón se vuelve más negativo con el tiempo.

EJERCICIO 16.1 Determine el cambio en energía potencial eléctrica asociado con el electrón del inciso b) cuando va desde $x = 0.120$ m hasta $x = -0.180$ m. (Observe que el electrón debe dar la vuelta y regresar en algún punto. La ubicación del punto de retorno no es importante, porque los cambios en energía potencial sólo dependen de los puntos finales de la trayectoria.)

RESPUESTA $-7.20 \times 10^{-17} \text{ J}$

■ EJEMPLO 16.2 Dinámica de partículas cargadas

OBJETIVO Usar la energía potencial eléctrica en problemas de conservación de energía.

PROBLEMA a) Determine la rapidez del protón en $x = 0.0500$ m en el inciso a) del ejemplo 16.1. b) Determine la rapidez inicial del electrón (en $x = -2.00$ cm) en el inciso b) del ejemplo 16.1, dado que su rapidez disminuye a la mitad cuando llega a $x = 0.120$ m.

ESTRATEGIA Aplique la conservación de la energía y resuelva para las rapidez desconocidas. El inciso b) involucra dos ecuaciones: la ecuación de conservación de la energía y la condición $v_f = \frac{1}{2}v_i$ para las rapidez inicial y final desconocidas. Los cambios en la energía potencial eléctrica ya se calcularon en el ejemplo 16.1.

(continúa)

SOLUCIÓN

a) Calcule la rapidez del protón en $x = 0.050$ m.

Aplique la conservación de la energía, con una rapidez inicial de cero.

Resuelva para v y sustituya el cambio en energía potencial que se encontró en el ejemplo 16.1a:

$$\begin{aligned}\Delta EC + \Delta EP &= 0 \rightarrow \left(\frac{1}{2}m_p v^2 - 0\right) + \Delta EP = 0 \\ v^2 &= -\frac{2}{m_p} \Delta EP \\ v &= \sqrt{-\frac{2}{m_p} \Delta EP} \\ &= \sqrt{-\frac{2}{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})} (-1.68 \times 10^{-17} \text{ J})} \\ &= 1.42 \times 10^5 \text{ m/s}\end{aligned}$$

b) Determine la rapidez inicial del electrón (en $x = -2.00$ cm) dado que su rapidez disminuye a la mitad en $x = 0.120$ m.

Aplique la conservación de la energía una vez más y sustituya las expresiones para las energías cinéticas inicial y final:

Sustituya la condición $v_f = \frac{1}{2}v_i$ y reste el cambio en energía potencial de ambos lados:

Combine términos y resuelva para v_i , la rapidez inicial y sustituya el cambio en energía potencial que encontró en el ejemplo 16.1b:

$$\begin{aligned}\Delta EC + \Delta EP &= 0 \\ \left(\frac{1}{2}m_e v_f^2 - \frac{1}{2}m_e v_i^2\right) + \Delta EP &= 0 \\ \frac{1}{2}m_e \left(\frac{1}{2}v_i\right)^2 - \frac{1}{2}m_e v_i^2 &= -\Delta EP \\ -\frac{3}{8}m_e v_i^2 &= -\Delta EP \\ v_i &= \sqrt{\frac{8\Delta EP}{3m_e}} = \sqrt{\frac{8(3.36 \times 10^{-17} \text{ J})}{3(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})}} \\ &= 9.92 \times 10^6 \text{ m/s}\end{aligned}$$

COMENTARIOS Aunque los cambios en energía potencial asociados con el protón y el electrón fueron similares en magnitud, el efecto sobre sus rapidezces difiere dramáticamente. El cambio en la energía potencial tuvo un efecto proporcionalmente mucho mayor sobre el electrón, que es mucho más ligero, que sobre el protón.

PREGUNTA 16.2 Verdadero o Falso: Si un protón y un electrón se mueven a través del mismo desplazamiento en un campo eléctrico, el cambio en energía potencial asociado con el protón debe ser igual en magnitud y opuesto en signo al cambio en energía potencial asociado con el electrón.

EJERCICIO 16.2 Consulte el ejercicio 16.1. Determine la rapidez del electrón en $x = -0.180$ m. *Nota:* Utilice la velocidad inicial del inciso b) del ejemplo 16.2.

RESPUESTA 1.35×10^7 m/s La respuesta es 4.5% la rapidez de la luz.

Potencial eléctrico

En el capítulo 15 fue conveniente definir un campo eléctrico \vec{E} relacionado con la fuerza eléctrica $\vec{F} = q\vec{E}$. De esta forma, las propiedades de colecciones fijas de cargas se podían estudiar con facilidad y la fuerza sobre cualquier partícula en el campo eléctrico se podía obtener simplemente al multiplicar por la carga q de la partícula. Por las mismas razones, es útil definir una *diferencia de potencial eléctrico* ΔV relacionada con la energía potencial mediante $\Delta EP = q\Delta V$:

La diferencia de potencial eléctrico ΔV entre los puntos A y B es el cambio en la energía potencial eléctrica conforme la carga q se mueve de A a B , dividida entre la carga q :

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta EP}{q} \quad [16.2]$$

Unidad SI: joule por coulomb, o volt (J/C o V)

Diferencia de potencial entre dos puntos ►

Esta definición es completamente general, aunque en muchos casos se requeriría cálculo para estimar el cambio en energía potencial del sistema. Puesto que la energía potencial eléctrica es una cantidad escalar, **el potencial eléctrico también es una cantidad escalar**. A partir de la ecuación 16.2, vemos que la diferencia de potencial eléctrico es una medida del cambio en la energía potencial eléctrica por unidad de carga. De manera alternativa, la diferencia de potencial eléctrico es el trabajo por unidad de carga que tendría que realizar alguna fuerza para mover una carga del punto *A* al punto *B* en el campo eléctrico. La unidad SI de potencial eléctrico es el joule por coulomb, llamada volt (V). A partir de la definición de dicha unidad, debe realizar 1 J de trabajo para mover una carga de 1 C entre dos puntos que están a una diferencia de potencial de 1 V. En el proceso de mover a través de una diferencia de potencial de 1 V, la carga de 1 C gana 1 J de energía.

Para el caso especial de un campo eléctrico uniforme como el que existe entre placas paralelas cargadas, dividir la ecuación 16.1 por *q* produce

$$\frac{\Delta EP}{q} = -E_x \Delta x$$

Al comparar esta ecuación con la ecuación 16.2 encontramos que

$$\Delta V = -E_x \Delta x \quad [16.3]$$

La ecuación 16.3 muestra que la diferencia de potencial también tiene unidades de campo eléctrico por distancia. Entonces tenemos que la unidad SI del campo eléctrico, el newton por coulomb, también se puede expresar como volts por metro:

$$1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$$

Puesto que la ecuación 16.3 se relaciona directamente con la ecuación 16.1, recuerde que es válida sólo para el sistema que consiste de un campo eléctrico uniforme y una carga que se mueve en una dimensión.

Al liberarse desde el reposo, las cargas positivas aceleran espontáneamente desde regiones de alto potencial a otras de bajo potencial. Si a una carga positiva se le proporciona cierta velocidad inicial en la dirección de alto potencial, se puede mover en dicha dirección, pero frenará y finalmente dará vuelta, tal como una bola lanzada hacia arriba en un campo gravitacional. Las cargas negativas hacen exactamente lo opuesto: liberada desde el reposo, aceleran desde regiones de bajo potencial hacia regiones de alto potencial. Sobre las cargas negativas se realiza trabajo para hacer que vayan en la dirección de menor potencial eléctrico.

Examen rápido

16.2 Si una partícula con carga negativa se coloca en reposo en un campo de potencial eléctrico que aumenta en la dirección *x* positiva, ¿la partícula a) acelerará en la dirección *x* positiva, b) acelerará en la dirección *x* negativa o c) permanecerá en reposo?

16.3 La figura 16.3 es una gráfica de un potencial eléctrico como función de la posición. Si una partícula con carga positiva se coloca en el punto *A*, ¿cuál será su movimiento posterior? ¿a) Irá a la derecha, b) irá a la izquierda, c) permanecerá en el punto *A* o d) oscilará en torno al punto *B*?

16.4 Si una partícula con carga negativa se coloca en el punto *B* en la figura 16.3 y se le da un ligero empujón hacia la derecha, ¿cuál será su movimiento posterior? ¿a) Irá a la derecha y no regresará, b) irá a la izquierda, c) permanecerá en el punto *B* o d) oscilará en torno al punto *B*?

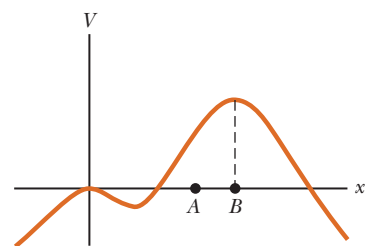


Figura 16.3 (Exámenes rápidos 16.3 y 16.4)

APLICACIÓN

Baterías de automóvil

Una aplicación de la diferencia de potencial es la batería de 12 V que se encuentra en un automóvil. Tal batería mantiene una diferencia de potencial entre sus terminales, con la terminal positiva de 12 V más alta en potencial que la terminal negativa. En la práctica, la terminal negativa por lo general se conecta al cuerpo metálico del automóvil, que se puede considerar está a un potencial de cero volts. La batería proporciona la corriente eléctrica necesaria para operar los faros, un radio, impulsar ventanas, motores, etc. Ahora considere

Tip 16.1 Potencial y energía potencial

El potencial eléctrico sólo es característico del campo, independiente de una carga de prueba que se puede colocar en dicho campo. Por otra parte, la energía potencial es una característica del sistema carga-campo debida a una interacción entre el campo y una carga colocada en el mismo.

una carga de +1 C, que se mueve alrededor de un circuito que contiene la batería conectada a alguno de estos dispositivos externos. Conforme la carga se mueve dentro de la batería, de la terminal negativa (a 0 V) a la terminal positiva (a 12 V), el trabajo realizado sobre la carga por la batería es 12 J. Cada coulomb de carga positiva que sale de la terminal positiva de la batería porta una energía de 12 J. Conforme la carga se mueve a través del circuito externo hacia la terminal negativa, entrega sus 12 J de energía eléctrica a los dispositivos externos. Cuando la carga llega a la terminal negativa, su energía eléctrica de nuevo es cero. En este punto, la batería se hace cargo y restaura 12 J de energía a la carga conforme se mueve de la terminal negativa a la positiva, lo que permite hacer otro tránsito del circuito. La cantidad real de carga que sale de la batería cada segundo y atraviesa el circuito depende de las propiedades de los dispositivos externos, como se ve en el siguiente capítulo.

EJEMPLO 16.3 Cinescopios y colisionadores atómicos

OBJETIVO Relacionar el potencial eléctrico con un campo eléctrico y la conservación de la energía.

PROBLEMA En los colisionadores atómicos (también conocidos como ciclotrones y aceleradores lineales), partículas cargadas se aceleran en una forma muy parecida a la de los cinescopios: mediante diferencias de potencial. Suponga que un protón se inyecta con una rapidez de 1.00×10^6 m/s entre dos placas separadas 5.00 cm, como se muestra en la figura 16.4. Posteriormente, el protón se acelera a través de la brecha y sale hacia la abertura. **a)** ¿Cuál debe ser la diferencia de potencial eléctrico si la rapidez de salida es 3.00×10^6 m/s? **b)** ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico entre las placas, si suponemos que es constante?

ESTRATEGIA Utilice la conservación de la energía, escriba el cambio en energía potencial en términos del cambio en potencial eléctrico, ΔV y resuelva para ΔV . Para el inciso a), resuelva la ecuación 16.3 para el campo eléctrico.

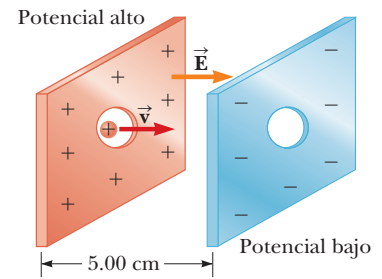


Figura 16.4 (Ejemplo 16.3) Un protón entra a una cavidad y acelera desde una placa cargada hacia la otra en un campo eléctrico \vec{E} .

SOLUCIÓN

a) Determine el potencial eléctrico que produce la rapidez de salida deseada del protón.

Aplique la conservación de la energía, escriba la energía potencial en términos del potencial eléctrico:

Resuelva la ecuación de energía para el cambio en potencial:

Sustituya los valores dados y obtenga la diferencia de potencial necesaria:

b) ¿Qué campo eléctrico debe existir entre las placas?

Resuelva la ecuación 16.3 para el campo eléctrico y sustituya:

$$\Delta EC + \Delta EP = \Delta EC + q\Delta V = 0$$

$$\Delta V = -\frac{\Delta EC}{q} = -\frac{\frac{1}{2}m_p v_f^2 - \frac{1}{2}m_p v_i^2}{q} = -\frac{m_p}{2q}(v_f^2 - v_i^2)$$

$$\Delta V = -\frac{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})}{2(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})} [(3.00 \times 10^6 \text{ m/s})^2 - (1.00 \times 10^6 \text{ m/s})^2]$$

$$\Delta V = -4.18 \times 10^4 \text{ V}$$

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{4.18 \times 10^4 \text{ V}}{0.0500 \text{ m}} = 8.36 \times 10^5 \text{ N/C}$$

COMENTARIOS Los sistemas de tales cavidades, que consisten de placas positivas y negativas alternas, se usan para acelerar a una alta rapidez partículas cargadas antes de chocarlas con los blancos. Para evitar el frenado de, por decir, una partícula con carga positiva, después de pasar a través de la placa negativa de una cavidad y entrar a la siguiente, las cargas sobre las placas se invierten. De otro modo, la partícula viajaría de la placa negativa a una placa positiva en la segunda cavidad, y la energía cinética ganada en la cavidad previa se perdería en la segunda.

PREGUNTA 16.3 Verdadero o Falso: Una partícula con más masa gana menos energía al atravesar una diferencia de potencial dada, que una partícula más ligera.

EJERCICIO 16.3 Suponga que los electrones en un cinescopio se aceleran a través de una diferencia de potencial de 2.00×10^4 V desde el cátodo calentado (electrodo negativo), donde se producen, hacia la pantalla, que también sirve como el

ánodo (electrodo positivo), a 25.0 cm de distancia. a) ¿A qué rapidez impactarían los electrones el fósforo sobre la pantalla? Suponga que aceleran desde el reposo e ignore efectos relativistas (capítulo 26). b) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico, si se supone constante?

RESPUESTAS a) 8.38×10^7 m/s b) 8.00×10^4 V/m

16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales

En los circuitos eléctricos, un punto de potencial eléctrico cero a menudo se define al aterrizar (conectar a la tierra) algún punto en el circuito. Por ejemplo, si la terminal negativa de una batería de 12 V se conectara a tierra, se consideraría que tiene un potencial de cero, mientras que la terminal positiva tendría un potencial de ± 12 V. Sin embargo, la diferencia de potencial creada por la batería sólo se define localmente. En esta sección describimos el potencial eléctrico de una carga puntual, que se define en todo el espacio.

El campo eléctrico de una carga puntual se extiende a través del espacio, de modo que su potencial eléctrico también lo hace. El punto cero de potencial eléctrico se podría tomar en cualquier parte, pero generalmente se toma a una distancia infinita de la carga, lejos de su influencia y la influencia de cualquiera otra carga. Con esta elección, se pueden usar los métodos del cálculo para demostrar que el potencial eléctrico creado por una carga puntual q a cualquier distancia r de la carga está dado por

$$V = k_e \frac{q}{r} \tag{16.4}$$

La ecuación 16.4 muestra que el potencial eléctrico, o trabajo por unidad de carga, que se requiere para mover una carga puntual desde el infinito hasta una distancia r de una carga puntual positiva q , aumenta conforme la carga de prueba positiva se acerca más a q . La gráfica de ecuación 16.4 en la figura 16.5, muestra que el potencial asociado con una carga puntual disminuye como $1/r$ con r creciente, en contraste con la magnitud del campo eléctrico de la carga, que disminuye como $1/r^2$.

El potencial eléctrico de dos o más cargas se obtiene al aplicar el **principio de superposición: el potencial eléctrico total en algún punto P debido a varias cargas puntuales es la suma algebraica de los potenciales eléctricos debidos a las cargas individuales**. Este método es similar al que se usó en el capítulo 15 para encontrar el campo eléctrico resultante en un punto del espacio. A diferencia de la superposición del campo eléctrico, que involucra una suma de vectores, la superposición de los potenciales eléctricos requiere evaluar una suma de escalares. Como resultado, es mucho más fácil evaluar el potencial eléctrico en algún punto debido a varias cargas, que evaluar el campo eléctrico, que es una cantidad vectorial.

La figura 16.6 es una gráfica generada por computadora del potencial eléctrico asociado con un dipolo eléctrico, que consiste de dos cargas de igual magnitud pero signo opuesto.

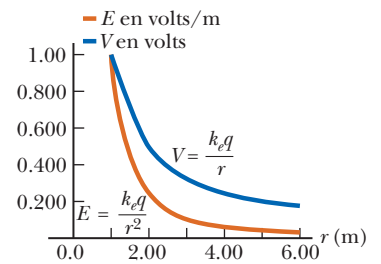


Figura 16.5 Campo eléctrico y potencial eléctrico contra distancia desde una carga puntual de 1.11×10^{-10} C. Observe que V es proporcional a $1/r$, mientras que E es proporcional a $1/r^2$.

◀ Potencial eléctrico creado por una carga puntual

◀ Principio de superposición

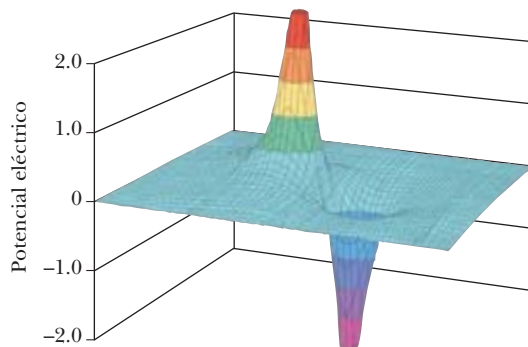


Figura 16.6 Potencial eléctrico (en unidades arbitrarias) en el plano que contiene un dipolo eléctrico. El potencial se grafica en la dimensión vertical.

Las cargas se encuentran en un plano horizontal en el centro de los picos de potencial. El valor del potencial se grafica en la dimensión vertical. El programa de computadora sumó el potencial de cada carga para llegar a valores totales del potencial.

Como en el caso de campos eléctricos constantes, existe una relación entre potencial eléctrico y energía potencial eléctrica. Si V_1 es el potencial eléctrico debido a la carga q_1 en un punto P (figura activa 16.7a), el trabajo requerido para llevar la carga q_2 del infinito a P sin aceleración es $q_2 V_1$. Por definición, este trabajo es igual a la energía potencial EP del sistema de dos partículas cuando éstas se separan una distancia r (figura activa 16.7b).

Por lo tanto, la energía potencial eléctrica del par de cargas se puede expresar como

$$EP = q_2 V_1 = k_e \frac{q_1 q_2}{r} \quad [16.5]$$

Energía potencial de un de par cargas ▶

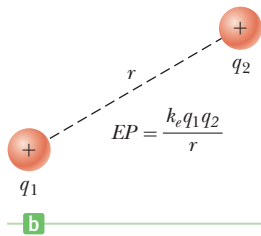
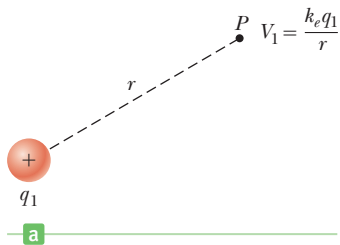


Figura activa 16.7 a) El potencial eléctrico V_1 en P debido a la carga puntual q_1 es $V_1 = k_e q_1 / r$. b) Si una segunda carga, q_2 , se lleva del infinito a P , la energía potencial del par es $EP = k_e q_1 q_2 / r$.

Si las cargas tienen el mismo signo, EP es positiva. Dado que cargas iguales se repelen, se debe realizar trabajo positivo sobre el sistema, mediante un agente externo, para hacer que las dos cargas se acerquen. Por el contrario, si las cargas son de signo opuesto, la fuerza es de atracción y EP es negativa. Esto significa que se debe realizar trabajo negativo para evitar que cargas distintas se aceleren una hacia otra conforme se acercan.

Examen rápido

16.5 Considere una colección de cargas en una región dada y suponga que todas las otras cargas están distantes y tiene un efecto despreciable. Más aún, el potencial eléctrico se considera cero en el infinito. Si el potencial eléctrico en un punto dado en la región es cero, ¿cuál de los siguientes enunciados debe ser cierto? a) El campo eléctrico es cero en dicho punto. b) La energía potencial eléctrica es un mínimo en dicho punto. c) No hay carga neta en la región. d) Algunas cargas en la región son positivas y algunas son negativas. e) Las cargas tienen el mismo signo y están ordenadas simétricamente en torno al punto dado.

16.6 Un globo esférico contiene una partícula con carga positiva en su centro. Conforme el globo se infla a un mayor volumen mientras la partícula cargada permanece en el centro, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es cierta? a) Aumenta el potencial eléctrico en la superficie del globo. b) Aumenta la magnitud del campo eléctrico en la superficie del globo. c) El flujo eléctrico a través del globo permanece igual. d) Ninguna de las anteriores.

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Potencial eléctrico

1. Dibuje un diagrama de todas las cargas y encierre en un círculo el punto de interés.
2. Calcule la distancia de cada carga al punto de interés y márcalo en el diagrama.
3. Para cada carga q , calcule la cantidad escalar $V = \frac{k_e q}{r}$. ¡Debe incluir el signo de cada carga en sus cálculos!
4. Sume todos los números que encontró en el paso anterior y obtenga el potencial eléctrico en el punto de interés.

EJEMPLO 16.4 Cómo encontrar el potencial eléctrico

OBJETIVO Calcular el potencial eléctrico debido a una colección de cargas puntuales.

PROBLEMA Una carga puntual de $5.00 \mu\text{C}$ está en el origen y una carga puntual $q_2 = -2.00 \mu\text{C}$ está sobre el eje x en $(3.00, 0)$ m, como se muestra en la figura 16.8. a) Si el potencial eléctrico se considera cero en el infinito, determine el

potencial eléctrico total debido a estas cargas en el punto P con coordenadas $(0, 4.00)$ m.
b) ¿Cuánto trabajo se requiere para llevar una tercera carga puntual de $4.00 \mu\text{C}$, desde el infinito hasta P ?

ESTRATEGIA Para el inciso a), el potencial eléctrico en P debido a cada carga se puede calcular a partir de $V = k_e q/r$. El potencial eléctrico total en P es la suma de estos dos números. Para el inciso b), use el teorema trabajo-energía, junto con la ecuación 16.5, y recuerde que el potencial en el infinito se considera cero.

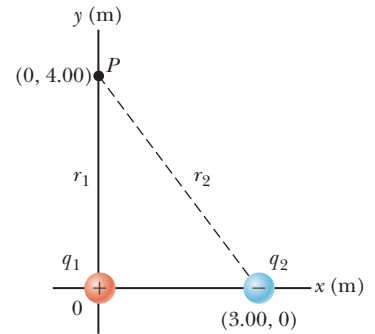


Figura 16.8 (Ejemplo 16.4) El potencial eléctrico en el punto P debido a las cargas puntuales q_1 y q_2 , es la suma algebraica de los potenciales debidos a las cargas individuales.

SOLUCIÓN

a) Determine el potencial eléctrico en el punto P .

Calcule el potencial eléctrico en P debido a la carga de $5.00 \mu\text{C}$:

$$V_1 = k_e \frac{q_1}{r_1} = \left(8.99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \left(\frac{5.00 \times 10^{-6} \text{ C}}{4.00 \text{ m}} \right) = 1.12 \times 10^4 \text{ V}$$

Encuentre el potencial eléctrico en P debido a la carga $-2.00 \mu\text{C}$:

$$V_2 = k_e \frac{q_2}{r_2} = \left(8.99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \left(\frac{-2.00 \times 10^{-6} \text{ C}}{5.00 \text{ m}} \right) = -0.360 \times 10^4 \text{ V}$$

Sume los dos números para encontrar el potencial eléctrico total en P :

$$V_P = V_1 + V_2 = 1.12 \times 10^4 \text{ V} + (-0.360 \times 10^4 \text{ V}) = 7.6 \times 10^3 \text{ V}$$

b) Determine el trabajo necesario para llevar la carga de $4.00 \mu\text{C}$ del infinito a P .

Aplique el teorema trabajo-energía, con la ecuación 16.5:

$$W = \Delta PE = q_3 \Delta V = q_3 (V_P - V_\infty) = (4.00 \times 10^{-6} \text{ C})(7.6 \times 10^3 \text{ V} - 0) = 3.0 \times 10^{-2} \text{ J}$$

COMENTARIOS A diferencia del campo eléctrico, donde se requiere suma vectorial, el potencial eléctrico debido a más de una carga se puede encontrar con una suma ordinaria de escalares. Más aún, observe que el trabajo requerido para mover la carga es igual al cambio en energía potencial eléctrica. La suma del trabajo realizado para mover la partícula más el trabajo realizado por el campo eléctrico es cero ($W_{\text{otro}} + W_{\text{eléctrico}} = 0$) porque la partícula comienza y termina en el reposo. Por tanto, $W_{\text{otro}} = -W_{\text{eléctrico}} = \Delta U_{\text{eléctrico}} = q \Delta V$.

PREGUNTA 16.4 Si q_2 se mueve hacia la derecha, ¿qué ocurriría al potencial eléctrico V_P en el punto P ? a) Aumentaría. b) Disminuiría. c) Permanecería igual.

EJERCICIO 16.4 Suponga que una carga de $-2.00 \mu\text{C}$ está en el origen y una carga de $3.00 \mu\text{C}$ está en el punto $(0, 3.00)$ m. a) Determine el potencial eléctrico en $(4.00, 0)$ m, si supone que el potencial eléctrico es cero en el infinito y b) determine el trabajo necesario para llevar una carga de $4.00 \mu\text{C}$ del infinito al punto $(4.00, 0)$ m.

RESPUESTAS a) $8.99 \times 10^2 \text{ V}$ b) $3.60 \times 10^{-3} \text{ J}$

EJEMPLO 16.5 Energía potencial eléctrica y dinámica

OBJETIVO Aplicar la conservación de la energía y la energía potencial eléctrica a una configuración de cargas.

PROBLEMA Suponga que tres protones están sobre el eje x , en reposo relativo unos con otros en un instante de tiempo dado, como en la figura 16.9. Si el protón q_3 a la derecha se libera mientras los otros se mantienen fijos en su lugar, encuentre una expresión simbólica para la rapidez del protón en el infinito y evalúa esta rapidez cuando $r_0 = 2.00 \text{ fm}$. (Nota: $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$.)

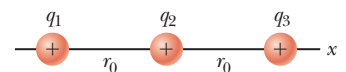


Figura 16.9 (Ejemplo 16.5)

(continúa)

ESTRATEGIA Calcule primero la energía potencial eléctrica inicial asociada con el sistema de tres partículas. Habrá tres términos, uno para cada par que interactúa. Luego calcule la energía potencial eléctrica final asociada con el sistema el protón a la derecha está arbitrariamente lejos. Puesto que la energía potencial eléctrica cae como $1/r$, dos de los términos desaparecerán. Con el uso de conservación de la energía, encuentre entonces la rapidez de la partícula en cuestión.

SOLUCIÓN

Calcule la energía potencial eléctrica asociada con la configuración inicial de cargas:

$$EP_i = \frac{k_e q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{k_e q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{k_e q_2 q_3}{r_{23}} = \frac{k_e e^2}{r_0} + \frac{k_e e^2}{2r_0} + \frac{k_e e^2}{r_0}$$

Calcule la energía potencial eléctrica asociada con la configuración final de cargas:

$$EP_f = \frac{k_e q_1 q_2}{r_{12}} = \frac{k_e e^2}{r_0}$$

Escriba la ecuación de conservación de la energía:

$$\Delta EC + \Delta EP = EC_f - EC_i + EP_f - EP_i = 0$$

Sustituya los términos apropiados:

$$\frac{1}{2} m_3 v_3^2 - 0 + \frac{k_e e^2}{r_0} - \left(\frac{k_e e^2}{r_0} + \frac{k_e e^2}{2r_0} + \frac{k_e e^2}{r_0} \right) = 0$$

$$\frac{1}{2} m_3 v_3^2 - \left(\frac{k_e e^2}{2r_0} + \frac{k_e e^2}{r_0} \right) = 0$$

Resuelva para v_3 después de combinar los dos términos restantes de energía potencial:

$$v_3 = \sqrt{\frac{3k_e e^2}{m_3 r_0}}$$

Evalúe al considerar $r_0 = 2.00$ fm:

$$v_3 = \sqrt{\frac{3(8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(2.00 \times 10^{-15} \text{ m})}} = 1.44 \times 10^7 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS La diferencia en las energías cinéticas inicial y final produce la energía disponible para el movimiento. Este cálculo es un poco artificioso porque sería difícil, aunque no imposible, ordenar tal configuración de protones; posiblemente podría ocurrir por casualidad dentro de una estrella.

PREGUNTA 16.5 Si un cuarto protón se coloca a la derecha de q_3 , ¿cuántos términos adicionales de energía potencial tendría que calcular en la configuración inicial?

EJERCICIO 16.5 A partir de la configuración inicial de tres protones, suponga que las dos partículas en los extremos se liberan simultáneamente y la partícula de en medio está fija. Obtenga una respuesta numérica para la rapidez de las dos partículas en el infinito. (Observe que sus rapidezces, por simetría, deben ser iguales.)

RESPUESTA 1.31×10^7 m/s

16.3 Potenciales y conductores cargados

El potencial eléctrico en todos los puntos sobre un conductor cargado se puede determinar al combinar las ecuaciones 16.1 y 16.2. A partir de la ecuación 16.1, vemos que el trabajo realizado por fuerzas eléctricas sobre una carga, se relaciona con el cambio en energía potencial eléctrica de la carga mediante

$$W = -\Delta EP$$

A partir de la ecuación 16.2, observamos que el cambio en energía potencial eléctrica entre dos puntos A y B se relaciona con la diferencia de potencial entre dichos puntos mediante

$$\Delta EP = q(V_B - V_A)$$

Al combinar estas dos ecuaciones, tenemos que

$$W = -q(V_B - V_A)$$

[16.6]

Con esta ecuación, obtenemos el siguiente resultado general: **no se requiere trabajo neto para mover una carga entre dos puntos que están al mismo potencial eléctrico.** En términos matemáticos, este resultado dice que $W = 0$ siempre que $V_B = V_A$.

En el capítulo 15 encontramos que, cuando un conductor está en equilibrio electrostático, una carga neta colocada sobre él reside por completo sobre su superficie. Más aún, demostramos que el campo eléctrico justo afuera de la superficie de un conductor cargado en equilibrio electrostático es perpendicular a la superficie y que el campo dentro del conductor es cero. Ahora mostramos que **todos los puntos sobre la superficie de un conductor cargado en equilibrio electrostático están al mismo potencial**.

Considere una trayectoria superficial que conecta cualesquier puntos A y B sobre un conductor cargado, como en la figura 16.10. Se supone que las cargas sobre el conductor están en equilibrio mutuo, así que ninguna se mueve. En este caso, el campo eléctrico \vec{E} siempre es perpendicular al desplazamiento a lo largo de esta trayectoria. Esto debe ser así, pues de otro modo la parte del campo eléctrico tangente a la superficie movería las cargas. Puesto que \vec{E} es perpendicular a la trayectoria, el campo eléctrico no realiza trabajo si una carga se mueve entre los dos puntos dados. A partir de la ecuación 16.6 vemos que, si el trabajo realizado es cero, la diferencia en potencial eléctrico, $V_B - V_A$, también es cero. Luego, **el potencial eléctrico es una constante en todas partes sobre la superficie de un conductor cargado en equilibrio**. Más aún, dado que el campo eléctrico dentro de un conductor es cero, no se requiere trabajo para mover una carga entre dos puntos dentro del conductor. Nuevamente, la ecuación 16.6 muestra que, si el trabajo realizado es cero, la diferencia en potencial eléctrico entre cualesquier dos puntos dentro de un conductor también debe ser cero. Concluyendo, el potencial eléctrico es constante en todas partes dentro de un conductor.

Finalmente, puesto que uno de los puntos dentro del conductor podrían estar arbitrariamente cerca de la superficie del conductor, concluimos que **el potencial eléctrico es constante en cualquier parte dentro de un conductor, e igual a dicho mismo valor en la superficie**. Como consecuencia, no se requiere trabajo para mover una carga desde el interior de un conductor cargado a su superficie. (Es importante darse cuenta de que el potencial dentro de un conductor no necesariamente es cero, aun cuando el campo eléctrico interior sea cero.)

El electrón-volt

Una unidad de energía de tamaño adecuado, de uso común en física atómica y nuclear, es el electrón-volt (eV). Por ejemplo, los electrones en los átomos normales por lo general tienen energías de decenas de eV, los electrones excitados en los átomos que emiten rayos X tienen energías de miles de eV y los rayos gamma de alta energía (ondas electromagnéticas) emitidos por el núcleo tienen energías de millones de eV.

El **electrón-volt** se define como la energía cinética que gana un electrón cuando acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V.

Puesto que $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$, y dado que la magnitud de la carga en el electrón es $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, se ve que el electrón-volt se relaciona con el joule mediante

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad [16.7]$$

Examen rápido

16.7 Un electrón inicialmente en reposo, acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V y gana energía cinética EC_e , mientras un protón, también inicialmente en reposo, acelera a través de una diferencia de potencial de -1 V y gana energía cinética EC_p . ¿Cuál de las siguientes relaciones se sostiene? a) $EC_e = EC_p$, b) $EC_e < EC_p$, c) $EC_e > EC_p$, d) La respuesta no se puede determinar a partir de la información dada.

Observe a partir de la separación de los signos positivos que la densidad de carga en la superficie no es uniforme.

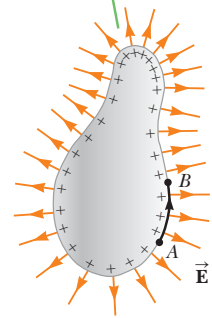


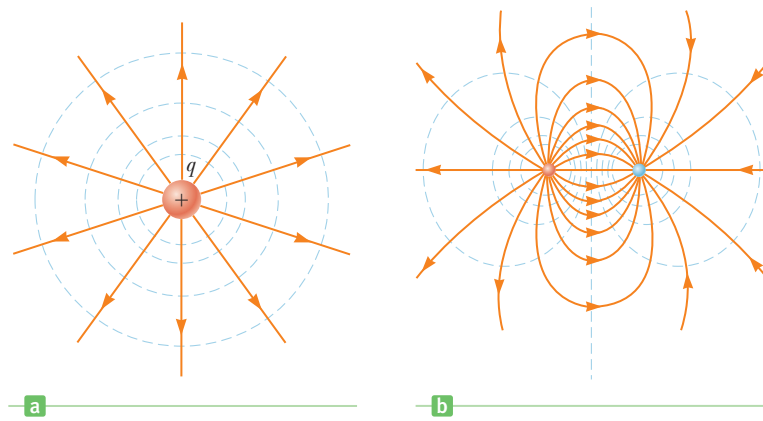
Figura 16.10 Un conductor de forma arbitraria con un exceso de carga positiva. Cuando el conductor está en equilibrio electrostático, toda la carga reside en la superficie, $\vec{E} = 0$, dentro del conductor y el campo eléctrico justo afuera del conductor es perpendicular a la superficie. El potencial es constante dentro del conductor y es igual al potencial en la superficie.

◀ Definición de electrón-volt

16.4 Superficies equipotenciales

Una superficie sobre la cual todos los puntos están al mismo potencial se llama **superficie equipotencial**. La diferencia de potencial entre cualesquier dos puntos sobre una superficie equipotencial es cero. Por lo tanto, **no se requiere trabajo para mover una carga con rapidez constante sobre una superficie equipotencial**.

Figura 16.11 Equipotenciales (líneas azules punteadas) y líneas de campo eléctrico (líneas anaranjadas) para a) una carga puntual positiva y b) dos cargas puntuales de igual magnitud y signo opuesto. En todos los casos, las equipotenciales son *perpendiculares* a las líneas de campo eléctrico en cada punto.



Las superficies equipotenciales tienen una relación simple con el campo eléctrico: **el campo eléctrico en cada punto de una superficie equipotencial es perpendicular a la superficie.** Si el campo eléctrico \vec{E} tiene un componente paralelo a la superficie, dicho componente produciría una fuerza eléctrica sobre una carga colocada sobre la superficie. Esta fuerza haría trabajo sobre la carga conforme se mueve de un punto a otro, en contradicción con la definición de una superficie equipotencial.

Las superficies equipotenciales se pueden representar como un diagrama al dibujar contornos equipotenciales, que son vistas bidimensionales de las intersecciones de las superficies equipotenciales con el plano del dibujo. Estos contornos por lo general se conocen simplemente como **equipotenciales**. La figura 16.11a muestra las éstas (en azul) asociadas con una carga puntual positiva. Observe que las equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico (en naranja) en todos los puntos. Recuerde que el potencial eléctrico creado por una carga puntual q está dado por $V = k_e q / r$. Esta relación muestra que, para una sola carga puntual, el potencial es constante en cualquier superficie sobre la cual r es constante. Así que los potenciales de una carga puntual son una familia de esferas con centro sobre la carga puntual. La figura 16.11b muestra las equipotenciales asociadas con dos cargas de igual magnitud y signo opuesto.

16.5 Aplicaciones

El precipitador electrostático

APLICACIÓN

El precipitador electrostático

Una importante aplicación de la descarga eléctrica en los gases es un dispositivo llamado *precipitador electrostático*. Este dispositivo remueve partículas de materia de los gases de combustión, lo que reduce la contaminación del aire. Es especialmente útil en las plantas eléctricas que queman carbón y en operaciones industriales que generan grandes cantidades de humo. Los sistemas actualmente en uso pueden eliminar aproximadamente 90% por masa de la ceniza y polvo del humo. Por desgracia, un porcentaje muy alto de las partículas más ligeras todavía escapan y ellas contribuyen significativamente al smog y la bruma.

La figura 16.12 ilustra la idea básica del precipitador electrostático. Un alto voltaje (por lo general de 40 a 100 kV) se mantiene entre un alambre que corre por el centro de un ducto y la pared exterior, que está aterrizada. El alambre se mantiene a un potencial eléctrico negativo con respecto a la pared, de modo que el campo eléctrico se dirige hacia el alambre. El campo eléctrico cerca del alambre llega a un valor lo suficientemente alto como para causar una descarga alrededor del alambre y la formación de iones positivos, electrones y iones negativos, como O_2^- . Conforme los electrones e iones negativos se aceleran hacia la pared exterior mediante el campo eléctrico no uniforme, las partículas de polvo en la corriente de gas se cargan mediante colisiones y captura de iones. Dado que la mayoría de las partículas de polvo cargadas son negativas, también son arrastradas hacia la pared exterior por el campo eléctrico. Cuando el ducto se sacude, las partículas caen y se recolectan en el fondo.



Figura 16.12 a) Diagrama de un precipitador electrostático. Compare la contaminación del aire cuando el precipitador b) opera y c) se apaga.

Además de reducir las cantidades de gases dañinos y partículas de materia en la atmósfera, el precipitador electrostático recupera valiosos óxidos metálicos de la chimenea.

Un dispositivo similar, llamado *limpiador electrostático de aire*, se usa en los hogares para aliviar la incomodidad de los pacientes alérgicos. Aire cargado con polvo y polen se lleva al dispositivo a través de una pantalla con malla cargada positivamente. Las partículas transportadas en el aire se cargan de manera positiva cuando hacen contacto con la pantalla, y luego pasan a través de una segunda malla con carga negativa. La fuerza de atracción electrostática entre las partículas con carga positiva en el aire y la pantalla con carga negativa hace que las partículas se precipiten fuera de la superficie de la pantalla, lo que remueve un porcentaje muy alto de contaminantes de la corriente de aire.

APLICACIÓN

Limpiador electrostático de aire

Xerografía e impresoras láser

La xerografía se usa ampliamente para hacer fotocopias de materiales impresos. La idea básica detrás del proceso la desarrolló Chester Carlson, quien recibió una patente por su invención en 1940. En 1947, la Xerox Corporation lanzó un programa de gran escala para desarrollar máquinas copadoras automáticas usando el proceso de Carlson. El enorme éxito de este desarrollo es evidente: en la actualidad, prácticamente todas las oficinas y bibliotecas tienen una o más máquinas copadoras y las capacidades de estas máquinas siguen evolucionando.

Algunas características del proceso xerográfico involucran conceptos simples de electrostática y óptica. Sin embargo, la idea que hace único al proceso es el uso de material fotoconductor para formar una imagen. Un fotoconductor es un material que es pobre conductor de electricidad en la oscuridad, pero un conductor razonablemente bueno cuando se expone a la luz.

La figura 16.13 (página 562) ilustra los pasos en el proceso xerográfico. Primero, la superficie de una placa o tambor se recubre con una delgada película del material fotoconductor (por lo general selenio o algún compuesto de selenio) y la superficie fotoconductor recibe una carga electrostática positiva en la oscuridad (figura 16.13a). Entonces la página a copiar se proyecta sobre la superficie cargada (figura 16.13b). La superficie fotoconductor se vuelve conductora sólo en las áreas donde incide la luz; ahí la luz produce portadores de carga en el fotoconductor que neutralizan la superficie con carga positiva.

APLICACIÓN

Fotocopiadoras xerográficas

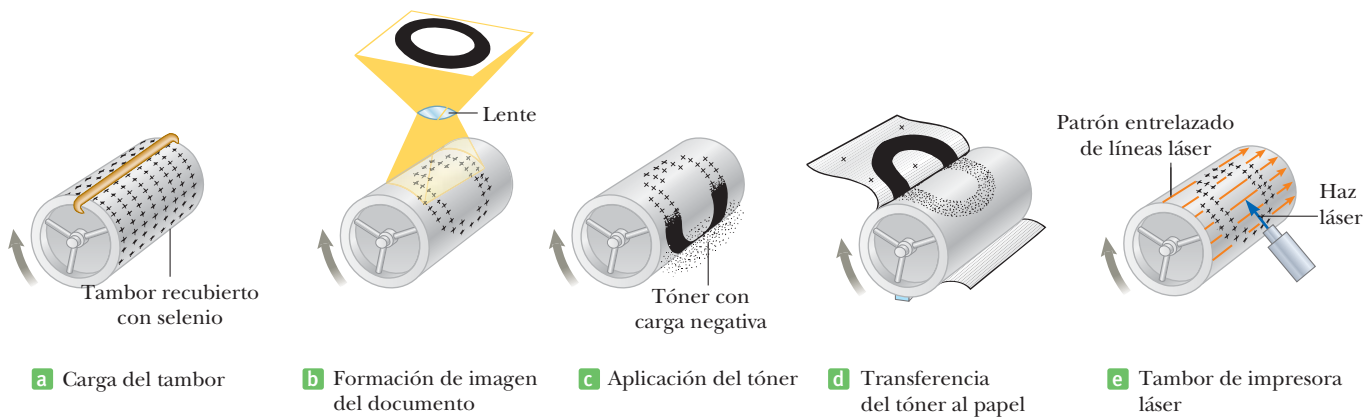


Figura 16.13 El proceso xerográfico. a) La superficie fotoconductor se carga positivamente. b) Con el uso de una fuente de luz y una lente, se forma una imagen oculta sobre la superficie cargada en forma de cargas positivas. c) La superficie que contiene la imagen se cubre con un polvo con carga positiva. d) Esto transfiere la imagen al papel, que luego se calienta para “fijar” el polvo al papel. e) La imagen sobre el tambor de una impresora láser se produce al encender y apagar un haz láser conforme barra a través del tambor cubierto con selenio.

Sin embargo, las cargas permanecen sobre aquellas áreas del fotoconductor no expuestas a la luz, lo que deja una imagen oculta del objeto en la forma de una distribución positiva de carga superficial.

A continuación, un polvo con carga negativa llamado *tóner* se espolvorea sobre la superficie fotoconductor (figura 16.13c). El polvo cargado se adhiere sólo a las áreas que contienen la imagen con carga positiva. En este punto, la imagen se vuelve visible. Entonces se transfiere a la superficie de una hoja de papel con carga positiva. Finalmente, el tóner se “fija” a la superficie del papel mediante calor (figura 16.13d), lo que resulta en una copia permanente del original.

Los pasos para producir un documento en una impresora láser son similares a los utilizados en una máquina fotocopidora en que las partes a), c) y d) de la figura 16.13 permanecen esencialmente iguales. La diferencia entre las dos técnicas se encuentra en la forma como la imagen se forma sobre el tambor recubierto con selenio. En una impresora láser, el comando para imprimir la letra *O*, por ejemplo, se envía a un láser desde la memoria de una computadora. Un espejo giratorio dentro de la impresora hace que el haz del láser barra a través del tambor recubierto con selenio en un patrón entrelazado (figura 16.13e). Señales eléctricas generadas por la impresora encienden y apagan el haz láser en un patrón que traza la letra *O* en la forma de cargas positivas sobre el selenio. Luego se aplica el tóner al tambor y la transferencia al papel se logra como en una máquina fotocopidora.

APLICACIÓN
Impresoras láser

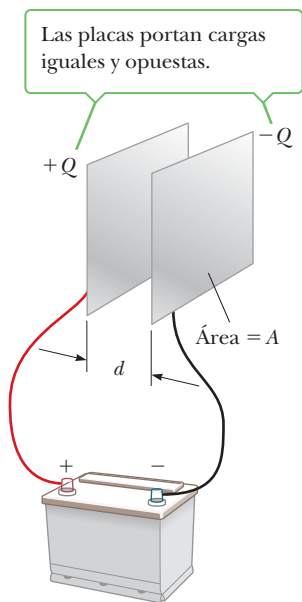


Figura 16.14 Un capacitor de placas paralelas consiste de dos placas paralelas, cada una con área A , separadas por una distancia d .

16.6 Capacitancia

Un **capacitor** es un dispositivo que se utiliza en varios circuitos eléctricos, como los que se usan para sintonizar la frecuencia de los receptores de radio, eliminar las chispas en los sistemas de encendido de los automóviles o almacenar energía por corto tiempo para liberación rápida en unidades de flash electrónico. La figura 16.14 muestra un diseño típico para un capacitor. Consiste de dos placas metálicas paralelas separadas a una distancia d . Cuando se usan en un circuito eléctrico, las placas se conectan a las terminales positiva y negativa de una batería o alguna otra fuente de voltaje. Cuando se hace esta conexión, los electrones se quitan de una de las placas, lo que la deja con una carga $+Q$, y se transfieren a través de la batería a la otra placa, lo que la deja con una carga $-Q$, como se muestra en la figura. La transferencia de carga se detiene cuando la diferencia de potencial a través de las placas es igual a la diferencia de potencial de la batería. Un capacitor cargado es un dispositivo que almacena energía que se puede reclamar cuando se necesita para una aplicación específica.

La capacitancia C de un capacitor es la razón de la magnitud de la carga sobre cualquier conductor (placa), a la magnitud de la diferencia de potencial entre los conductores (placas):

$$C \equiv \frac{Q}{\Delta V} \quad [16.8]$$

Unidad SI: farad (F) = coulomb por volt (C/V)

◀ Capacitancia de un par de conductores

Las cantidades Q y ΔV siempre se consideran como positivas cuando se usa en la ecuación 16.8. Por ejemplo, si un capacitor de $3.0 \mu\text{F}$ se conecta a una batería de 12 V , la magnitud de la carga sobre cada placa del capacitor es

$$Q = C\Delta V = (3.0 \times 10^{-6} \text{ F})(12 \text{ V}) = 36 \mu\text{C}$$

A partir de la ecuación 16.8 vemos que es necesaria una gran capacitancia para almacenar una gran cantidad de carga para un voltaje aplicado dado. El farad es una unidad de capacitancia muy grande. En la práctica, los capacitores más comunes tienen capacitancias que varían de microfarads ($1 \mu\text{F} = 1 \times 10^{-6} \text{ F}$) a picofarads ($1 \text{ pF} = 1 \times 10^{-12} \text{ F}$).

Tip 16.2 La diferencia de potencial es ΔV , no V

Use el símbolo ΔV para la diferencia de potencial a través de un elemento de circuito o un dispositivo (otros libros usan simplemente V para diferencia de potencial). El uso dual de V para representar potencial en un lugar y una diferencia de potencial en otro puede conducir a una confusión innecesaria.

16.7 El capacitor de placas paralelas

La capacitancia de un dispositivo depende del arreglo geométrico de los conductores. La capacitancia de un capacitor de placas paralelas con placas separadas por aire (véase la figura 16.14) se puede calcular fácilmente a partir de tres hechos. Primero, recuerde del capítulo 15 que la magnitud del campo eléctrico entre dos placas está dada por $E = \sigma/\epsilon_0$, donde σ es la magnitud de la carga por unidad de área sobre cada placa. Segundo, anteriormente se encontró en este capítulo que la diferencia de potencial entre dos placas es $\Delta V = Ed$, donde d es la distancia entre las placas. Tercero, la carga sobre una placa está dada por $Q = \sigma A$, donde A es el área de la placa. Al sustituir estos tres hechos en la definición de capacitancia se obtiene el resultado deseado:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\sigma A}{Ed} = \frac{\sigma A}{(\sigma/\epsilon_0)d}$$

Cancelar la carga por unidad de área, σ , produce

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad [16.9]$$

◀ Capacitancia de un capacitor de placas paralelas

donde A es el área de una de las placas, d es la distancia entre las placas y ϵ_0 es la permitividad del espacio libre.

A partir de la ecuación 16.9 vemos que las placas con área más grande pueden almacenar más carga. Lo mismo es cierto para una pequeña separación de placa d porque entonces las cargas positivas sobre una placa ejercen mayor fuerza sobre las cargas negativas de la otra placa, lo que permite que más carga se mantenga en las placas.

La figura 16.15 muestra las líneas de campo eléctrico de un capacitor de placas paralelas más realista. El campo eléctrico casi es constante en el centro entre las placas, mas se

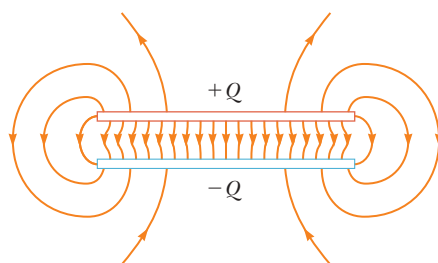
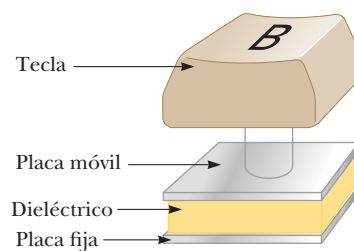


Figura 16.15 El campo eléctrico entre las placas de un capacitor de placas paralelas es uniforme cerca del centro, mas no es así cerca de los bordes.

Figura 16.16 Cuando se presiona la tecla de una letra en el teclado, la capacitancia de un capacitor de placas paralelas aumenta conforme el espaciado de la placa se reduce. La sustancia marcada como “dieléctrico” es un materia aislante, como se describe en la sección 16.10.



APLICACIÓN

Receptáculos de flash de cámara

APLICACIÓN

Teclados de computadora

APLICACIÓN

Confinamiento electrostático

vuelve menor conforme se aproxima a los bordes. No obstante, para la mayoría de los propósitos, el campo se puede considerar como constante en toda la región entre las placas.

Un dispositivo práctico que usa un capacitor es el receptáculo del flash de una cámara. Se usa una batería para cargar el capacitor y luego la carga almacenada se libera al presionar el botón del obturador y tomar una fotografía. La carga almacenada se entrega a un tubo de flash muy rápidamente, lo que ilumina al sujeto en el instante cuando se necesita más luz.

Las computadoras utilizan los capacitores en muchas formas. Por ejemplo, un tipo de teclado de computadora tiene capacitores en las bases de sus teclas, como en la figura 16.16. Cada tecla se conecta a una placa móvil, que representa un lado del capacitor; la placa fija sobre el fondo del teclado representa el otro lado del capacitor. Cuando se presiona una tecla, el espaciado del capacitor disminuye, lo que causa un aumento en capacitancia. Los circuitos electrónicos externos reconocen cada tecla por el *cambio* en su capacitancia cuando se oprime.

Los capacitores son útiles para almacenar una gran cantidad de carga que necesita entregarse rápidamente. Un buen ejemplo en la vanguardia de la investigación sobre la fusión es el confinamiento electrostático. En este papel, los capacitores descargan sus electrones a través de una rejilla. Los electrones con carga negativa en la rejilla extraen partículas con carga positiva hacia ellos y por lo tanto de manera mutua, lo que hace que algunas partículas se fusionen y liberen energía en el proceso.

■ EJEMPLO 16.6 Un capacitor de placas paralelas

OBJETIVO Calcular las propiedades físicas fundamentales de un capacitor de placas paralelas.

PROBLEMA Un capacitor con placas paralelas tiene una área $A = 2.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y una separación de placa $d = 1.00 \times 10^{-3} \text{ m}$. **a)** Encuentre su capacitancia. **b)** ¿Cuánta carga hay en la placa positiva si el capacitor se conecta a una batería de 3.00 V? Calcule **c)** la densidad de carga sobre la placa positiva, si supone que la densidad es uniforme y **d)** la magnitud del campo eléctrico entre las placas.

ESTRATEGIA Los incisos a) y b) se pueden resolver al sustituir en las ecuaciones básicas para capacitancia. En el inciso c) utilice la definición de densidad de carga y en el inciso d) use el hecho de que la diferencia de voltaje es igual al campo eléctrico por la distancia.

SOLUCIÓN

a) Determine la capacitancia.

Sustituya en la ecuación 16.9:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = (8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2) \left(\frac{2.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{1.00 \times 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$C = 1.77 \times 10^{-12} \text{ F} = 1.77 \text{ pF}$$

b) Determine la carga sobre la placa positiva después de que el capacitor se conecta a una batería de 3.00 V.

Sustituya en la ecuación 16.8:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow Q = C \Delta V = (1.77 \times 10^{-12} \text{ F})(3.00 \text{ V})$$

$$= 5.31 \times 10^{-12} \text{ C}$$

c) Calcule la densidad de carga sobre la placa positiva.

La densidad de carga es carga dividida por área:

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{5.31 \times 10^{-12} \text{ C}}{2.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 2.66 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$$

d) Calcule la magnitud del campo eléctrico entre las placas.

Aplique $\Delta V = Ed$:

$$E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{3.00 \text{ V}}{1.00 \times 10^{-3} \text{ m}} = 3.00 \times 10^3 \text{ V/m}$$

COMENTARIOS La respuesta al inciso d) también se podría obtener a partir del campo eléctrico derivado para un capacitor de placas paralelas, ecuación 15.13, $E = \sigma/\epsilon_0$.

PREGUNTA 16.6 ¿Cómo cambian las respuestas si se duplica la distancia entre las placas?

EJERCICIO 16.6 Dos placas, cada una con $3.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ de área, se usan para construir un capacitor de placas paralelas con capacitancia de 1.00 pF. a) Encuentre la distancia de separación necesaria. b) Si la placa positiva debe contener una carga de $5.00 \times 10^{-12} \text{ C}$, determine la densidad de carga. c) Encuentre el campo eléctrico entre las placas. d) ¿Qué voltaje de batería se debe unir a la placa para obtener los resultados anteriores?


RESPUESTAS a) $2.66 \times 10^{-3} \text{ m}$ b) $1.67 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ c) $1.89 \times 10^3 \text{ N/C}$ d) 5.00 V


Símbolos para elementos de circuito y circuitos

El símbolo que se usa comúnmente para representar un capacitor en un circuito es

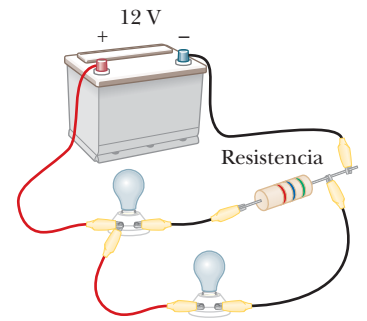
—||— o a veces —|(|— . No confunda alguno de estos símbolos con el símbolo de circuito

—|—, que se usa para designar una batería (o cualquier otra fuente de corriente directa).

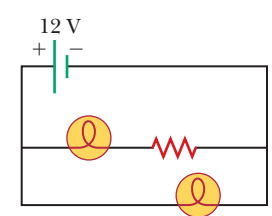
La terminal positiva de la batería está al potencial más alto y se representa mediante la línea vertical más larga en el símbolo de batería. En el siguiente capítulo se estudia otro elemento de circuito, llamado resistor, que se representa mediante el símbolo ——. Cuando los alambres en un circuito no tienen resistencia apreciable en comparación con la resistencia de otros elementos en el circuito, los alambres se representan mediante líneas rectas.

Es importante darse cuenta de que un circuito es una colección de objetos reales y por lo general contienen una fuente de energía eléctrica (como una batería) conectada a elementos que convierten energía eléctrica a otras formas (luz, calor, sonido) o almacenan la energía en campos eléctricos o magnéticos para su recuperación posterior. En la figura 16.17 se bosqueja lado a lado un circuito real y su diagrama. El símbolo de circuito para la bombilla que se muestra en la figura 16.17b es ——.

Si usted no está familiarizado con los diagramas de circuito, trace la trayectoria del circuito real con su dedo para que vea que es equivalente al diagrama geoméricamente regular.



a



b

Figura 16.17 a) Un circuito real y b) su diagrama de circuito equivalente.

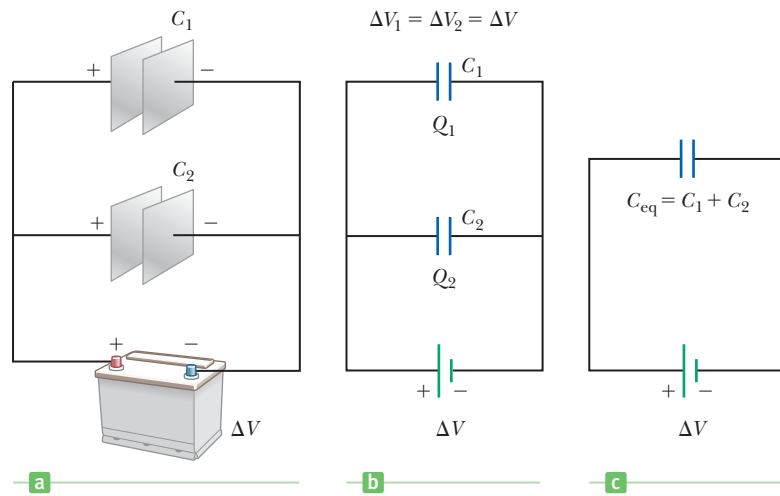
16.8 Combinaciones de capacitores

Dos o más capacitores se pueden combinar en circuitos en varias formas, pero la mayoría se reduce a dos configuraciones simples, llamadas *paralelo* y *serie*. Entonces, la idea es encontrar la capacitancia equivalente única debida a una combinación de muchos capacitores diferentes que están en paralelo o en serie unos con otros. Los capacitores se fabrican con capacitancias estándar diferentes y al combinarlos en distintas formas, se puede obtener cualquier valor deseado de la capacitancia.

Capacitores en paralelo

Dos capacitores conectados como se muestra en la figura activa 16.18a (página 566) se dice que están en *paralelo*. La placa izquierda de cada capacitor se conecta a la terminal positiva de la batería mediante un alambre conductor, de modo que las placas izquierdas

Figura activa 16.18 a) Una conexión en paralelo de dos capacitores. b) Diagrama de circuito para la combinación en paralelo. c) Las diferencias de potencial a través de los capacitores son las mismas y la capacitancia equivalente es $C_{\text{eq}} = C_1 + C_2$.



están al mismo potencial. En la misma forma, las placas derechas, conectadas a la terminal negativa de la batería, también están al mismo potencial. Esto significa que **los capacitores en paralelo tienen la misma diferencia de potencial ΔV a través de ellos**. En la figura activa 16.18b se ilustran los capacitores en paralelo.

Cuando los capacitores se conectan en el circuito por primera vez, los electrones se transfieren desde las placas izquierdas a través de la batería hasta las placas derechas, lo que deja a las placas izquierdas con carga positiva y a las placas derechas con carga negativa. La fuente de energía para esta transferencia de carga es la energía química interna almacenada en la batería, que se convierte en energía eléctrica. El flujo de carga se detiene cuando el voltaje a través de los capacitores iguala al voltaje de la batería, momento en el cual los capacitores tienen sus cargas máximas. Si las cargas máximas en los dos capacitores son Q_1 y Q_2 , respectivamente, la *carga total*, Q , almacenada por los dos capacitores es

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad [16.10]$$

Estos dos capacitores se pueden sustituir con un capacitor equivalente que tenga una capacitancia C_{eq} . Este capacitor equivalente debe tener exactamente el mismo efecto externo sobre el circuito que los dos originales, así que debe almacenar Q unidades de carga y tiene la misma diferencia de potencial a través de él. Las cargas respectivas sobre cada capacitor son

$$Q_1 = C_1 \Delta V \quad \text{y} \quad Q_2 = C_2 \Delta V$$

La carga sobre el capacitor equivalente es

$$Q = C_{\text{eq}} \Delta V$$

Al sustituir estas relaciones en la ecuación 16.10 se obtiene

$$C_{\text{eq}} \Delta V = C_1 \Delta V + C_2 \Delta V$$

o

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 \quad \left(\begin{array}{l} \text{combinación} \\ \text{en paralelo} \end{array} \right) \quad [16.11]$$

Si este tratamiento se extiende a tres o más capacitores conectados en paralelo, se encuentra que la capacitancia equivalente es

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad \left(\begin{array}{l} \text{combinación} \\ \text{en paralelo} \end{array} \right) \quad [16.12]$$

Vemos que **la capacitancia equivalente de una combinación de capacitores en paralelo es mayor que cualquiera de las capacitancias individuales**.

Tip 16.3 Voltaje es lo mismo que diferencia de potencial

Un voltaje *a través* de un dispositivo, como un capacitor, tiene el mismo significado que la diferencia de potencial a través del dispositivo. Por ejemplo, si decimos que el voltaje en un capacitor es de 12 V, queremos decir que la diferencia de potencial entre sus placas es de 12 V.

EJEMPLO 16.7 Cuatro capacitores conectados en paralelo

OBJETIVO Analizar un circuito con muchos capacitores en paralelo.

PROBLEMA a) Determine la capacitancia del capacitor solo que es equivalente a la combinación en paralelo de capacitores que se muestra en la figura 16.19. Encuentre b) la carga sobre el capacitor de $12.0 \mu\text{F}$ y c) la carga total contenida en la configuración. d) Derive una expresión simbólica para la fracción de la carga total contenida en uno de los capacitores.

ESTRATEGIA Para el inciso a), sume las capacitancias individuales. Para el inciso b), aplique la fórmula $C = Q/\Delta V$ al capacitor de $12.0 \mu\text{F}$. La diferencia de voltaje es la misma que la diferencia a través de la batería. Para encontrar la carga total contenida en los cuatro capacitores, use la capacitancia equivalente en la misma fórmula.

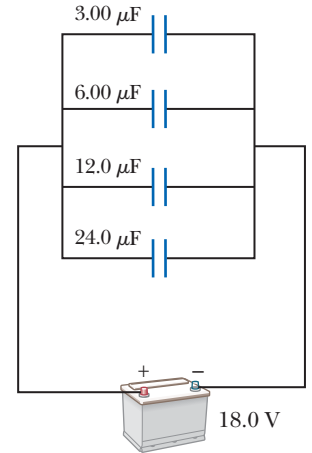


Figura 16.19 (Ejemplo 16.7) Cuatro capacitores conectados en paralelo.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la capacitancia equivalente.

Aplique la ecuación 16.12:

$$\begin{aligned} C_{\text{eq}} &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ &= 3.00 \mu\text{F} + 6.00 \mu\text{F} + 12.0 \mu\text{F} + 24.0 \mu\text{F} \\ &= 45.0 \mu\text{F} \end{aligned}$$

b) Encuentre la carga sobre el capacitor de $12 \mu\text{F}$ (designado C_3).

Resuelva la ecuación de capacitancia para Q y sustituya:

$$\begin{aligned} Q &= C_3 \Delta V = (12.0 \times 10^{-6} \text{ F})(18.0 \text{ V}) = 216 \times 10^{-6} \text{ C} \\ &= 216 \mu\text{C} \end{aligned}$$

c) Encuentre la carga total contenida en la configuración.

Use la capacitancia equivalente:

$$C_{\text{eq}} = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow Q = C_{\text{eq}} \Delta V = (45.0 \mu\text{F})(18.0 \text{ V}) = 8.10 \times 10^2 \mu\text{C}$$

d) Deduzca una expresión simbólica para la fracción de la carga total contenida en uno de los capacitores.

Escriba una expresión simbólica para la carga fraccional en el i -ésimo capacitor y use la definición de capacitor:

$$\frac{Q_i}{Q_{\text{total}}} = \frac{C_i \Delta V}{C_{\text{eq}} \Delta V} = \frac{C_i}{C_{\text{eq}}}$$

COMENTARIOS La carga sobre cualquiera de los capacitores paralelos se puede encontrar como en el inciso b), porque la diferencia de potencial es la misma. Observe que encontrar la carga total no requiere encontrar la carga sobre cada capacitor individual y sumar. Es más fácil usar la capacitancia equivalente en la definición de capacitancia.

PREGUNTA 16.7 Si los cuatro capacitores tienen la misma capacitancia, ¿qué fracción de la carga total tendría cada uno?

EJERCICIO 16.7 Encuentre la carga sobre el capacitor de $24.0 \mu\text{F}$.

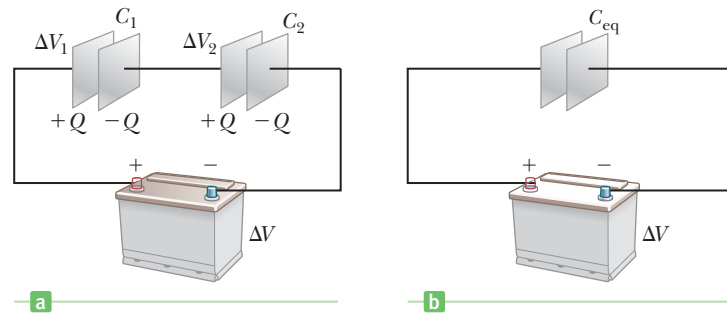
RESPUESTA $432 \mu\text{C}$

Capacitores en serie

Ahora considere dos capacitores conectados en *serie*, como se ilustra en la figura 16.20a. **Para una combinación de capacitores en serie, la magnitud de la carga debe ser la misma sobre todas las placas.** Para comprender este principio, considere el proceso de transferencia de carga con algo de detalle. Cuando una batería se conecta al circuito, los electrones

◀ Q es la misma para todos los capacitores conectados en serie

Figura activa 16.20 Una combinación en serie de dos capacitores. Las cargas sobre los capacitores son iguales y la capacitancia equivalente se puede calcular a partir de la relación recíproca $1/C_{eq} = (1/C_1) + (1/C_2)$.



con carga total $-Q$ se transfieren de la placa izquierda de C_1 a la placa derecha de C_2 a través de la batería, lo que deja la placa izquierda de C_1 con una carga de $+Q$. Como consecuencia, las magnitudes de las cargas sobre la placa izquierda de C_1 y la placa derecha de C_2 deben ser iguales. Ahora considera la placa derecha de C_1 y la placa izquierda de C_2 , en medio. Estas placas no se conectan a la batería (debido a la brecha a través de las placas) y, en conjunto, son eléctricamente neutras. Sin embargo, la carga de $+Q$ sobre la placa izquierda de C_1 atrae cargas negativas a la placa derecha de C_1 . Estas cargas continuarán acumulándose hasta que las placas izquierda y derecha de C_1 , en conjunto, se vuelvan eléctricamente neutras, lo cual significa que la carga sobre la placa derecha de C_1 es $-Q$. Esta carga negativa sólo podría provenir de la placa izquierda de C_2 , de modo que C_2 tiene una carga de $+Q$.

Por lo tanto, sin importar cuántos capacitores estén en serie o cuáles sean sus capacitancias, **todas las placas derechas ganan cargas de $-Q$ y todas las placas izquierdas tienen cargas de $+Q$** (una consecuencia de la conservación de la carga).

Después que un capacitor equivalente para una serie de capacitores está completamente cargado, **el capacitor equivalente debe terminar con una carga de $-Q$ sobre su placa derecha y una carga de $+Q$ sobre su placa izquierda**. Al aplicar la definición de capacitancia al circuito de la figura 16.20b, se tiene

$$\Delta V = \frac{Q}{C_{eq}}$$

donde ΔV es la diferencia de potencial entre las terminales de la batería y C_{eq} es la capacitancia equivalente. Como $Q = C\Delta V$ se puede aplicar a cada capacitor, las diferencias de potencial a través de ellos está dada por

$$\Delta V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad \Delta V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

A partir de la figura activa 16.20a, vemos que

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 \quad [16.13]$$

donde ΔV_1 y ΔV_2 son las diferencias de potencial a través de los capacitores C_1 y C_2 (una consecuencia de la conservación de la energía).

La diferencia de potencial a través de cualquier número de capacitores (u otros elementos de circuito) en serie, es igual a la suma de las diferencias de potencial a través de los capacitores individuales. Al sustituir estas expresiones en la ecuación 16.13 y observar que $\Delta V = Q/C_{eq}$, tenemos

$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

Al cancelar Q , llegamos a la siguiente relación:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \left(\begin{array}{l} \text{combinación} \\ \text{en serie} \end{array} \right) \quad [16.14]$$

Si este análisis se aplica a tres o más capacitores conectados en serie, encontramos que la capacitancia equivalente es

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \left(\begin{array}{l} \text{combinación} \\ \text{en serie} \end{array} \right) \quad [16.15]$$

Como se mostrará en el ejemplo 16.8, la ecuación 16.15 implica que **la capacitancia equivalente de una combinación en serie siempre es menor que cualquier capacitancia individual en la combinación.**

■ Examen rápido

16.8 Un capacitor se diseña de modo que una placa es grande y la otra es pequeña. Si las placas se conectan a una batería, a) la placa grande tiene una carga mayor que la placa pequeña, b) la placa grande tiene menos carga que la placa pequeña o c) las placas tienen carga igual pero opuesta.

■ EJEMPLO 16.8 Cuatro capacitores conectados en serie

OBJETIVO Encontrar una capacitancia equivalente de capacitores en serie, y la carga y voltaje sobre cada capacitor.

PROBLEMA Cuatro capacitores se conectan en serie con una batería, como en la figura 16.21. a) Calcule la capacitancia del capacitor equivalente. b) Calcule la carga sobre el capacitor de $12 \mu\text{F}$. c) Encuentre la caída de voltaje a través del capacitor de $12 \mu\text{F}$.

ESTRATEGIA Combine todos los capacitores en un solo capacitor equivalente con la ecuación 16.15. Encuentre la carga sobre este capacitor equivalente con la fórmula $C = Q/\Delta V$. Esta carga es la misma que sobre los capacitores individuales. Use de nuevo esta ecuación para encontrar la caída de voltaje a través del capacitor de $12 \mu\text{F}$.

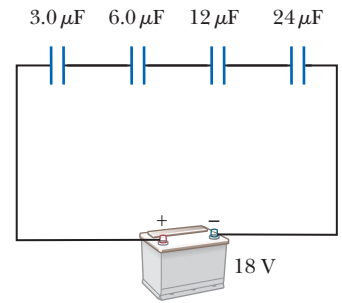


Figura 16.21 (Ejemplo 16.8) Cuatro capacitores conectados en serie.

SOLUCIÓN

a) Calcule la capacitancia equivalente de la serie.

Aplique la ecuación 16.15:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{3.0 \mu\text{F}} + \frac{1}{6.0 \mu\text{F}} + \frac{1}{12 \mu\text{F}} + \frac{1}{24 \mu\text{F}}$$

$$C_{eq} = 1.6 \mu\text{F}$$

b) Calcule la carga sobre el capacitor de $12 \mu\text{F}$.

La carga deseada es igual a la carga sobre el capacitor equivalente:

$$Q = C_{eq} \Delta V = (1.6 \times 10^{-6} \text{ F})(18 \text{ V}) = 29 \mu\text{C}$$

c) Encuentre la caída de voltaje a través del capacitor de $12 \mu\text{F}$.

Aplique la ecuación básica de capacitancia:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow \Delta V = \frac{Q}{C} = \frac{29 \mu\text{C}}{12 \mu\text{F}} = 2.4 \text{ V}$$

COMENTARIOS Observe que la capacitancia equivalente es menor que la de cualquiera de los capacitores individuales. La relación $C = Q/\Delta V$ se puede usar para encontrar las caídas de voltaje sobre los otros capacitores, tal como en el inciso c).

PREGUNTA 16.8 ¿Sobre cuál capacitor la caída de voltaje es menor? ¿Sobre cuál es mayor?

EJERCICIO 16.8 El capacitor de $24 \mu\text{F}$ se quita del circuito, lo que sólo deja tres capacitores en serie. Encuentre a) la capacitancia equivalente, b) la carga sobre el capacitor de $6 \mu\text{F}$ y c) la caída de voltaje a través del capacitor de $6 \mu\text{F}$.

RESPUESTAS a) $1.7 \mu\text{F}$ b) $31 \mu\text{C}$ c) 5.2 V

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Combinaciones complejas de capacitores

1. Combine capacitores que están en serie o en paralelo y siga las fórmulas derivadas.

2. **Vuelva a dibujar** el circuito después de cada combinación.
3. **Repita** los primeros dos pasos hasta que sólo haya un solo capacitor equivalente.
4. **Encuentre la carga** sobre el capacitor equivalente único, con la fórmula $C = Q/\Delta V$.
5. **Trabaje hacia atrás** a través de los diagramas hasta el original y encuentre la carga y la caída de voltaje a través de cada capacitor a lo largo del camino. Para hacer esto, use la siguiente colección de hechos:
 - A. La ecuación del capacitor: $C = Q/\Delta V$
 - B. Capacitores en paralelo: $C_{eq} = C_1 + C_2$
 - C. Los capacitores en paralelo tienen todos la misma diferencia de voltaje, ΔV , que su capacitor equivalente.
 - D. Capacitores en serie: $\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
 - E. Los capacitores en serie tienen todos la misma carga, Q , que su capacitor equivalente.

EJEMPLO 16.9 Capacitancia equivalente

OBJETIVO Resolver una combinación compleja de capacitores en serie y paralelo.

PROBLEMA a) Calcule la capacitancia equivalente entre a y b para la combinación de capacitores que se muestra en la figura 16.22a. Todas las capacitancias están en microfarads. b) Si una batería de 12 V se conecta a través del sistema entre los puntos a y b , encuentre la carga sobre el capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ en el primer diagrama y la caída de voltaje a través de él.

ESTRATEGIA Para el inciso a), use las ecuaciones 16.12 y 16.15 para reducir la combinación paso a paso, como se indica en la figura. En el inciso b), para encontrar la carga sobre el capacitor de $4.0 \mu\text{F}$, comience con la figura 16.22c y encuentre la carga sobre el capacitor de $2.0 \mu\text{F}$. Esta misma carga está sobre cada uno de los capacitores de $4.0 \mu\text{F}$ en el segundo diagrama, por el hecho 5E de la Estrategia para resolver problemas. Uno de estos capacitores de $4.0 \mu\text{F}$ en el segundo diagrama es simplemente el capacitor original de $4.0 \mu\text{F}$ en el primer diagrama.

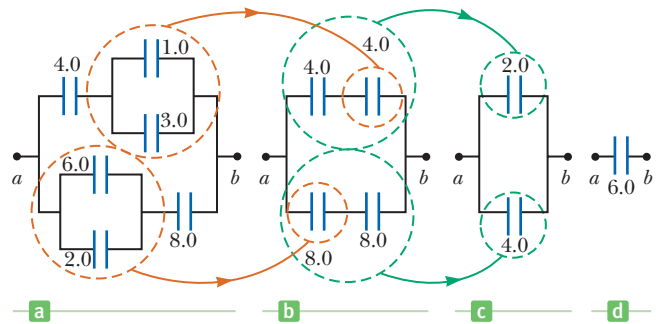


Figura 16.22 (Ejemplo 16.9) Para encontrar la capacitancia equivalente del circuito en a), utilice las reglas de serie y paralelo descritas en el texto para reducir exitosamente el circuito, como se indica en b), c) y d). Todos los capacitores están en microfarads.

SOLUCIÓN

a) Calcule la capacitancia equivalente.

Determine la capacitancia equivalente de los capacitores de $1.0 \mu\text{F}$ y $3.0 \mu\text{F}$ en paralelo en la figura 16.22a:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 1.0 \mu\text{F} + 3.0 \mu\text{F} = 4.0 \mu\text{F}$$

Determine la capacitancia equivalente de los capacitores de $2.0 \mu\text{F}$ y $6.0 \mu\text{F}$ en paralelo en la figura 16.22a:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 2.0 \mu\text{F} + 6.0 \mu\text{F} = 8.0 \mu\text{F}$$

Combine los dos capacitores de $4.0 \mu\text{F}$ en serie en la figura 16.22b:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{eq}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{4.0 \mu\text{F}} + \frac{1}{4.0 \mu\text{F}} \\ &= \frac{1}{2.0 \mu\text{F}} \rightarrow C_{eq} = 2.0 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Combine los dos capacitores de $8.0 \mu\text{F}$ en serie en la figura 16.22b:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{eq}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{8.0 \mu\text{F}} + \frac{1}{8.0 \mu\text{F}} \\ &= \frac{1}{4.0 \mu\text{F}} \rightarrow C_{eq} = 4.0 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Finalmente, combine los dos capacitores en paralelo en la figura 16.22c para determinar la capacitancia equivalente entre a y b :

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 2.0 \mu\text{F} + 4.0 \mu\text{F} = 6.0 \mu\text{F}$$

b) Determine la carga sobre el capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ y la caída de voltaje a través de él.

Calcule la carga sobre el capacitor de $2.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22c, que es la misma que la carga sobre el capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22a:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow Q = C\Delta V = (2.0 \mu\text{F})(12 \text{ V}) = 24 \mu\text{C}$$

Use la ecuación básica de capacitancia para encontrar la caída de voltaje a través del capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22a:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow \Delta V = \frac{Q}{C} = \frac{24 \mu\text{C}}{4.0 \mu\text{F}} = 6.0 \text{ V}$$

COMENTARIOS Para encontrar el resto de las cargas y caídas de voltaje, sólo es cuestión de usar $C = Q/\Delta V$ repetidamente, junto con los hechos 5C y 5E en la Estrategia para resolver problemas. La caída de voltaje a través del capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ también se podría encontrar al notar, en la figura 16.22b, que ambos capacitores tienen el mismo valor y por lo tanto, por simetría, dividirían la caída total de 12 volts entre ellos.

PREGUNTA 16.9 ¿Cuál capacitor tiene más carga, el capacitor de $1.0 \mu\text{F}$ o el capacitor de $3.0 \mu\text{F}$?

EJERCICIO 16.9 a) En el ejemplo 16.9, determine la carga sobre el capacitor de $8.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22a y la caída de voltaje a través de él. b) Haga lo mismo para el capacitor de $6.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22a.

RESPUESTAS a) $48 \mu\text{C}$, 6.0 V b) $36 \mu\text{C}$, 6.0 V

16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado

Casi todos quienes trabajan con equipo electrónico en algún momento han comprobado que un capacitor puede almacenar energía. Si las placas de un capacitor cargado se conectan mediante un conductor como un alambre, la carga se transfiere de una placa a la otra hasta que las dos están descargadas. Con frecuencia, la descarga puede observarse como una chispa visible. Si por accidente toca las placas opuestas de un capacitor cargado, sus dedos actuarían como una vía por la cual el capacitor podría descargarse, lo que le infligiría un choque eléctrico. El grado de choque dependería de la capacitancia y el voltaje aplicado al capacitor. *Donde se presentan altos voltajes y grandes cantidades de carga, como en la fuente de poder de un televisor, tal choque puede ser mortal.*

Los capacitores almacenan energía eléctrica y dicha energía es la misma que el trabajo requerido para mover carga hacia las placas. Si un capacitor inicialmente no tiene carga (ambas placas son neutras), de modo que las placas están al mismo potencial, se requiere muy poco trabajo para transferir una pequeña cantidad de carga ΔQ de una placa a la otra. Sin embargo, una vez que la carga se transfiere, entre las placas aparece una pequeña diferencia de potencial $\Delta V = \Delta Q/C$, de modo que se debe realizar trabajo para transferir carga adicional contra esta diferencia de potencial. A partir de la ecuación 16.6, si la diferencia de potencial en cualquier instante durante el proceso de carga es ΔV , el trabajo ΔW que se requiere para mover carga ΔQ a través de esta diferencia de potencial está dada por

$$\Delta W = \Delta V \Delta Q$$

Sabemos que $\Delta V = Q/C$ para un capacitor que tiene una carga total Q . Por lo tanto, una gráfica de voltaje contra carga total produce una línea recta con una pendiente de $1/C$, como se muestra en la figura 16.23. El trabajo ΔW , para una ΔV particular, es el área del rectángulo azul. Sumar todos los rectángulos produce una aproximación del trabajo total necesario para llenar el capacitor. En el límite cuando ΔQ se considera infinitesimalmente pequeño, el trabajo total necesario para cargar el capacitor a una carga final Q y voltaje ΔV es el área bajo la línea. Ésta es sólo el área de un triángulo, la mitad de la base por la altura, por ende tenemos que

$$W = \frac{1}{2} Q \Delta V \quad [16.16]$$

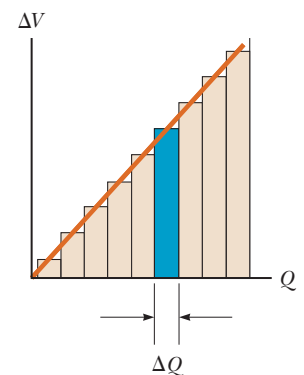


Figura 16.23 Una gráfica de voltaje contra carga para un capacitor es una línea recta con pendiente $1/C$. El trabajo requerido para mover una carga de ΔQ a través de una diferencia de potencial de ΔV atravesando las placas del capacitor es $\Delta W = \Delta V \Delta Q$, que es igual al área del rectángulo azul. El trabajo total requerido para cargar el capacitor a una carga total de Q es el área bajo la línea recta, que es igual a $Q\Delta V/2$.

Como se afirmó anteriormente, W también es la energía almacenada en el capacitor. A partir de la definición de capacitancia, se tiene $Q = C\Delta V$; por lo tanto, la energía almacenada se puede expresar de tres formas distintas:

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2}Q\Delta V = \frac{1}{2}C(\Delta V)^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad [16.17]$$

Por ejemplo, la cantidad de energía almacenada en un capacitor de $5.0 \mu\text{F}$ cuando se conecta a una batería de 120 V es

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2}C(\Delta V)^2 = \frac{1}{2}(5.0 \times 10^{-6} \text{ F})(120 \text{ V})^2 = 3.6 \times 10^{-2} \text{ J}$$

En la práctica, hay un límite a la energía máxima (o carga) que se puede almacenar en un capacitor. En algún punto, las fuerzas de Coulomb entre las cargas sobre las placas se vuelven tan fuertes que los electrones saltan a través de la brecha, lo que descarga al capacitor. Por esta razón, usualmente los capacitores se marcan con un voltaje operativo máximo. (Este hecho físico en realidad se puede explotar para producir un circuito con una luz que parpadea de manera regular.)

Los grandes capacitores pueden almacenar suficiente energía eléctrica como para causar quemaduras severas o incluso la muerte si se descargan de modo que el flujo de carga pasa a través del corazón. Sin embargo, bajo las condiciones apropiadas, se pueden usar para *sostener* la vida al detener la fibrilación cardíaca en las víctimas de ataque cardíaco. Cuando ocurre fibrilación, el corazón produce un rápido patrón irregular de latidos. Una descarga rápida de energía eléctrica a través del corazón puede regresar el órgano a su patrón de latido normal. Los equipos médicos de urgencias usan desfibriladores portátiles que contienen baterías capaces de cargar un capacitor a un alto voltaje. (En realidad, el circuito permite que el capacitor se cargue a un voltaje mucho más alto que la batería.) En este caso y otros (unidades de flash de cámara y láseres usados para experimentos de fusión), los capacitores funcionan como depósitos de energía que se pueden cargar lentamente y luego descargarse rápidamente para proporcionar grandes cantidades de energía en un pulso corto. La energía eléctrica almacenada se libera a través del corazón mediante electrodos conductores, llamados paletas, que se colocan a ambos lados del pecho de la víctima. Los paramédicos deben esperar entre aplicaciones de energía eléctrica debido al tiempo que tardan los capacitores en cargarse por completo. El alto voltaje en el capacitor se puede obtener a partir de una batería de bajo voltaje en una máquina portátil a través del fenómeno de *inducción electromagnética*, que se estudiará en el capítulo 20.

BIO APLICACIÓN

Desfibriladores

■ EJEMPLO 16.10 Voltaje típico, energía y tiempo de descarga para un desfibrilador

OBJETIVO Aplicar los conceptos de energía y potencia a un capacitor.

PROBLEMA Un desfibrilador completamente cargado contiene 1.20 kJ de energía almacenada en un capacitor de $1.10 \times 10^{-4} \text{ F}$. En una descarga a través de un paciente, en 2.50 ms se entregan $6.00 \times 10^2 \text{ J}$ de energía eléctrica. **a)** Determine el voltaje necesario para almacenar 1.20 kJ en la unidad. **b)** ¿Qué potencia promedio se entrega al paciente?

ESTRATEGIA Puesto que se conoce la energía almacenada y la capacitancia, se puede usar la ecuación 16.17 para encontrar el voltaje requerido en el inciso a). Para el inciso b), dividir la energía entregada entre el tiempo dada la potencia promedio.

SOLUCIÓN

a) Determine el voltaje necesario para almacenar 1.20 kJ en la unidad.

Resuelva la ecuación 16.17 para ΔV :

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2}C\Delta V^2$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= \sqrt{\frac{2 \times (\text{energía almacenada})}{C}} \\ &= \sqrt{\frac{2(1.20 \times 10^3 \text{ J})}{1.10 \times 10^{-4} \text{ F}}} \\ &= 4.67 \times 10^3 \text{ V} \end{aligned}$$

b) ¿Qué potencia promedio se entrega al paciente?

Divida la energía entregada entre el tiempo:

$$P_{\text{prom}} = \frac{\text{energía entregada}}{\Delta t} = \frac{6.00 \times 10^2 \text{ J}}{2.50 \times 10^{-3} \text{ s}} \\ = 2.40 \times 10^5 \text{ W}$$

COMENTARIOS La potencia entregada por un capacitor que se drena no es constante, como descubrirá en el estudio de los circuitos RC en el capítulo 18. Por esta razón, sólo es posible encontrar la potencia promedio. Los capacitores son necesarios en los desfibriladores porque pueden entregar energía mucho más rápido que las baterías. Las baterías proporcionan corriente a través de reacciones químicas relativamente lentas, mientras que los capacitores pueden liberar rápidamente carga que ya se produjo y almacenó.

PREGUNTA 16.10 Si el voltaje a través del capacitor se duplica, ¿la energía almacenada se a) reduciría a la mitad, b) duplicaría o c) cuadruplicaría?

EJERCICIO 16.10 a) Determine la energía contenida en un capacitor de placas paralelas de $2.50 \times 10^{-5} \text{ F}$ si tiene $1.75 \times 10^{-3} \text{ C}$ de carga. b) ¿Cuál es el voltaje entre las placas? c) ¿Qué nuevo voltaje resultará en una duplicación de la energía almacenada?

RESPUESTAS a) $6.13 \times 10^{-2} \text{ J}$ b) 70.0 V c) 99.0 V

■ FÍSICA APLICADA 16.1 Diseño de máxima energía

¿Cómo se deben conectar tres capacitores y dos baterías para que los capacitores almacenen la máxima energía posible?

EXPLICACIÓN La energía almacenada en el capacitor es proporcional a la capacitancia y al cuadrado de la diferencia

de potencial, así que se quiere maximizar cada una de estas cantidades. Si los tres capacitores se conectan en paralelo, sus capacitancias se suman y si las baterías están en serie, sus diferencias de potencial, de igual modo, también se suman. ■

■ Examen rápido

16.9 Un capacitor de placas paralelas se desconecta de una batería y las placas se separan un poco más. ¿Las siguientes cantidades aumentan, disminuyen o permanecen igual?

a) C b) Q c) E entre las placas d) ΔV e) la energía almacenada en el capacitor

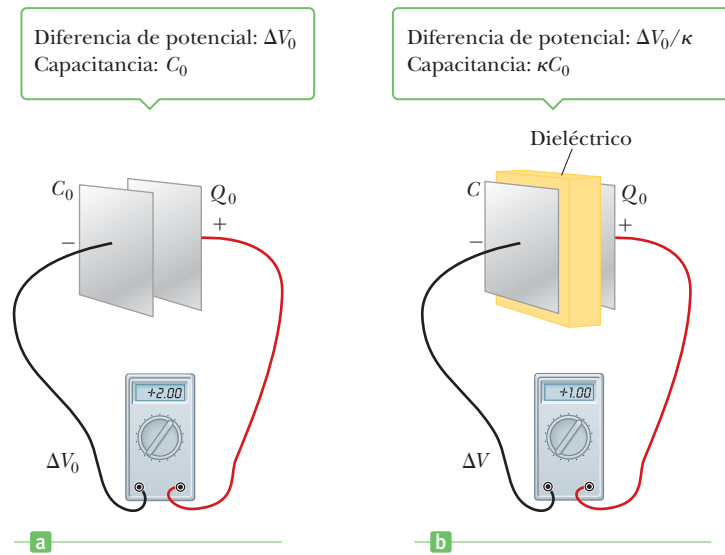
16.10 Capacitores con dieléctricos

Un **dieléctrico** es un material aislante, como caucho, plástico o papel encerado. Cuando un dieléctrico se inserta entre las placas de un capacitor, la capacitancia aumenta. Si el dieléctrico llena por completo el espacio entre las placas, la capacitancia se multiplica por el factor κ , llamado **constante dieléctrica**.

El siguiente experimento ilustra el efecto de un dieléctrico en un capacitor. Considere un capacitor de placas paralelas con carga Q_0 y capacitancia C_0 en ausencia de un dieléctrico. La diferencia de potencial a través de las placas del capacitor se puede medir y está dada por $\Delta V_0 = Q_0/C_0$ (figura 16.24a en la página 574). Puesto que el capacitor no está conectado a un circuito externo, no hay vía para que la carga salga o se agregue a las placas. Si ahora se inserta un dieléctrico entre las placas, como en la figura 16.24b, el voltaje a través de las placas se *reduce* por el factor κ al valor

$$\Delta V = \frac{\Delta V_0}{\kappa}$$

Figura 16.24 Cuando un dieléctrico con constante dieléctrica κ se inserta en un capacitor cargado que no está conectado a una batería, la diferencia de potencial se reduce a $\Delta V = \Delta V_0/\kappa$ y la capacitancia aumenta a $C = \kappa C_0$



Puesto que $\kappa > 1$, ΔV es menor que ΔV_0 . Dado que la carga Q_0 sobre el capacitor no cambia, concluimos que la capacitancia en presencia del dieléctrico debe cambiar al valor:

$$C = \frac{Q_0}{\Delta V} = \frac{Q_0}{\Delta V_0/\kappa} = \frac{\kappa Q_0}{\Delta V_0}$$

o

$$C = \kappa C_0 \quad [16.18]$$

De acuerdo con este resultado, la capacitancia se *multiplica* por el factor κ cuando el dieléctrico llena la región entre las placas. Para un capacitor de placas paralelas, donde la capacitancia en ausencia de un dieléctrico es $C_0 = \epsilon_0 A/d$, se puede expresar la capacitancia en presencia de un dieléctrico como

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad [16.19]$$

A partir de este resultado, parece que la capacitancia se podría hacer muy grande al disminuir d , la separación entre las placas. En la práctica, el valor más bajo de d está limitado por la descarga eléctrica que puede ocurrir a través del material dieléctrico que separa las placas. Para cualquier separación de placas dada, existe un campo eléctrico máximo que se puede producir en el dieléctrico antes que se rompa y comience a conducir. Este campo eléctrico máximo se llama **rigidez dieléctrica** y para el aire su valor es aproximadamente 3×10^6 V/m. La mayoría de los materiales aislantes tienen rigideces dieléctricas mayores que la del aire, como se indica por los valores que se mencionan en la tabla 16.1. La figura 16.25 muestra un ejemplo de rompimiento dieléctrico en aire.

Los capacitores comerciales con frecuencia se hacen con el uso de una hoja metálica entrelazada con hojas delgadas de papel impregnado con parafina o Mylar[®], que funciona como el material dieléctrico. Estas capas alternas de hoja metálica y dieléctrico se enrollan en un pequeño cilindro (figura 16.26a). Un tipo de capacitor de alto voltaje consiste de algunas placas metálicas entrelazadas sumergidas en aceite de silicón (figura 16.26b). Los capacitores pequeños con frecuencia se construyen a partir de materiales cerámicos. Los capacitores variables (por lo general de 10 a 500 pF) usualmente consisten de dos conjuntos entrelazados de placas metálicas, una fija y la otra móvil, con aire como dieléctrico.

Un capacitor electrolítico (figura 16.26c) se usa con frecuencia para almacenar grandes cantidades de carga a voltajes relativamente bajos. Consiste de una hoja metálica en contacto con un electrolito, una solución que conduce carga en virtud del movimiento de los iones que contiene. Cuando se aplica un voltaje entre la hoja y el electrolito, en la hoja se forma una delgada capa de óxido metálico (un aislante) y esta capa sirve como el dieléctrico. Se pueden lograr enormes capacitancias porque la capa de dieléctrico es muy delgada.



Figura 16.25 Rompimiento dieléctrico en aire. Las chispas se producen cuando un gran voltaje alterno se aplica a través de los alambres mediante una fuente de poder con bobina de inducción de alto voltaje.

Tabla 16.1 Constantes dieléctricas y rigideces dieléctricas de varios materiales a temperatura ambiente

Material	Constante dieléctrica κ	Rigidez dieléctrica (V/m)
Aire	1.000 59	3×10^6
Baquelita®	4.9	24×10^6
Cuarzo fundido	3.78	8×10^6
Neopreno	6.7	12×10^6
Nylon	3.4	14×10^6
Papel	3.7	16×10^6
Poliestireno	2.56	24×10^6
Vidrio Pyrex®	5.6	14×10^6
Aceite de silicona	2.5	15×10^6
Titanato de estroncio	233	8×10^6
Teflón®	2.1	60×10^6
Vacío	1.000 00	—
Agua	80	—

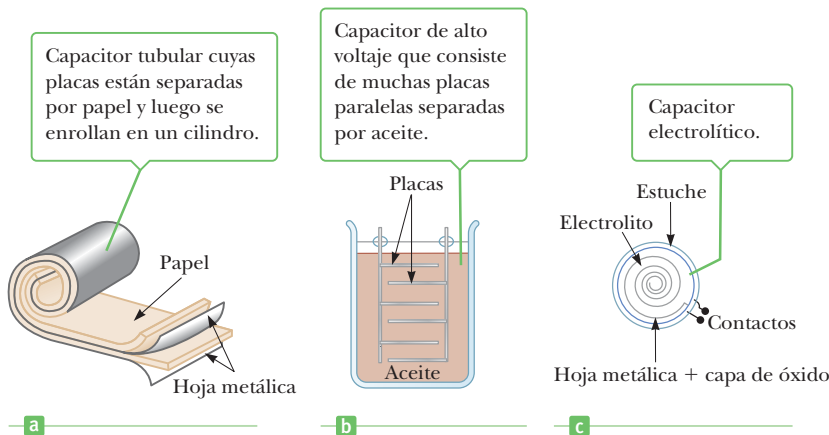


Figura 16.26 Tres diseños de capacitores comerciales.

La figura 16.27 muestra varios capacitores disponibles en el comercio. Los capacitores variables se usan en los radios para ajustar la frecuencia.

Cuando los capacitores electrolíticos se usan en circuitos, debe observarse la polaridad (los signos más y menos en el dispositivo). Si la polaridad del voltaje aplicado es opuesta a la pretendida, la capa de óxido se removerá y el capacitor conducirá en lugar de almacenar carga. Más aún, invertir la polaridad puede resultar en una corriente tan grande que el capacitor puede quemarse o producir vapor y explotar.



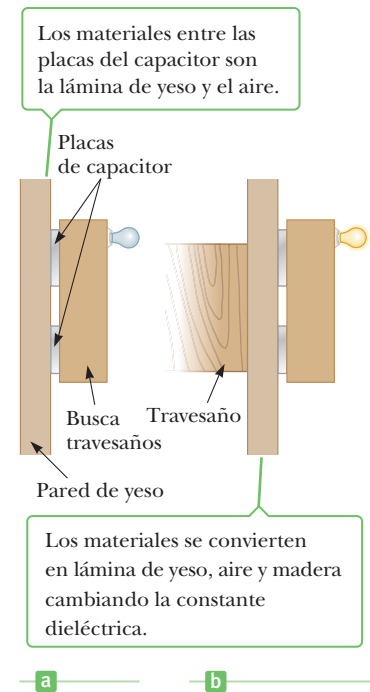
Figura 16.27 a) Una colección de capacitores utilizados en varias aplicaciones. b) Capacitor variable. Cuando un conjunto de placas metálicas gira de modo que se encuentra entre un conjunto fijo de placas, la capacitancia del dispositivo cambia.

■ FÍSICA APLICADA 16.2 Busca travesaños

Si alguna vez intentó colgar un cuadro en la pared con seguridad, sabe que puede ser difícil localizar un travesaño donde colocar su clavo o tornillo. Los principios discutidos en esta sección se pueden usar para detectar electrónicamente un travesaño. El elemento principal de un busca travesaños electrónico es un capacitor con sus placas ordenadas lado a lado en lugar de una frente a otra, como en la figura 16.28. ¿Cómo funciona este dispositivo?

EXPLICACIÓN Conforme el detector se mueve a lo largo de una pared, su capacitancia cambia cuando pasa a través de un travesaño porque cambia la constante dieléctrica del material “entre” las placas. El cambio en capacitancia se puede usar para hacer que una luz se encienda, lo que señala la presencia del travesaño. ■

Figura 16.28 (Física aplicada 16.2) Un busca travesaños produce un campo eléctrico que es afectado por la constante dieléctrica de los materiales colocados en este campo. Cuando el dispositivo se mueve por el travesaño, el cambio en la constante dieléctrica hace que se encienda una señal luminosa.



■ Examen rápido

16.10 Un capacitor de placas paralelas completamente cargado permanece conectado a una batería mientras un dieléctrico se desliza entre las placas. ¿Las siguientes cantidades aumentan, disminuyen o permanecen iguales? a) C b) Q c) E entre las placas d) ΔV e) la energía almacenada en el capacitor

■ EJEMPLO 16.11 Un capacitor lleno con papel

OBJETIVO Calcular las propiedades físicas fundamentales de un capacitor de placas paralelas con un dieléctrico.

PROBLEMA Un capacitor de placas paralelas tiene placas de 2.0 por 3.0 cm. Las placas están separadas por un papel de 1.0 mm de grosor. Determine **a)** la capacitancia de este dispositivo y **b)** la carga máxima que se puede colocar en el capacitor. **c)** Después de que el capacitor con carga completa se desconecta de la batería, el dieléctrico se remueve posteriormente. Encuentre el nuevo campo eléctrico a través del capacitor. ¿El capacitor se descarga?

ESTRATEGIA Para el inciso a), obtenga la constante dieléctrica para el papel a partir de la tabla 16.1 y sustituya, con las otras cantidades dadas, en la ecuación 16.19. Para el inciso b), observe que la tabla 16.1 también proporciona la rigidez dieléctrica del papel, que es el máximo campo eléctrico que se puede aplicar antes que ocurra rompimiento eléctrico. Use la ecuación 16.3, $\Delta V = Ed$, para obtener el voltaje máximo y sustituye en la ecuación básica de capacitancia. Para el inciso c), recuerde que desconectar la batería atrapa la carga adicional en las placas, que debe permanecer incluso después de remover el dieléctrico. Determine la densidad de carga sobre las placas y use la ley de Gauss para encontrar el nuevo campo eléctrico entre las placas.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la capacitancia de este dispositivo.

Sustituya en la ecuación 16.19:

$$\begin{aligned}
 C &= \kappa\epsilon_0 \frac{A}{d} \\
 &= 3.7 \left(8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \right) \left(\frac{6.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{1.0 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) \\
 &= 2.0 \times 10^{-11} \text{ F}
 \end{aligned}$$

b) Encuentre la carga máxima que se puede colocar sobre el capacitor.

Calcule el máximo voltaje aplicado, con la rigidez dieléctrica del papel, $E_{\text{máx}}$:

Resuelva la ecuación básica de capacitancia para $Q_{\text{máx}}$ y sustituya $\Delta V_{\text{máx}}$ y C :

c) Suponga que el capacitor completamente cargado se desconecta de la batería y que el dieléctrico se remueve posteriormente. Encuentre el nuevo campo eléctrico entre las placas del capacitor. ¿El capacitor se descarga?

Calcule la densidad de carga sobre las placas:

Calcule el campo eléctrico de la densidad de carga:

Puesto que el campo eléctrico sin el dieléctrico supera el valor de la rigidez dieléctrica del aire, el capacitor se descarga a través de la brecha.

COMENTARIOS Los dieléctricos permiten que κ veces más carga se almacene en un capacitor para un voltaje dado. También permiten un aumento en el voltaje aplicado al aumentar el umbral de rompimiento eléctrico.

PREGUNTA 16.11 Posterior al inciso c), el capacitor se vuelve a conectar a la batería. ¿La carga sobre las placas es a) mayor que, b) menor que o c) igual que la que se encontró en el inciso b)?

EJERCICIO 16.11 Un capacitor de placas paralelas tiene área de $2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ y distancia entre placas de 2.00 mm. a) Encuentre la máxima carga que se puede colocar en el capacitor si hay aire entre las placas. b) Encuentre la máxima carga si el aire se sustituye con poliestireno.

RESPUESTAS a) $7 \times 10^{-8} \text{ C}$ b) $1.4 \times 10^{-6} \text{ C}$

$$\Delta V_{\text{máx}} = E_{\text{máx}}d = (16 \times 10^6 \text{ V/m})(1.0 \times 10^{-3} \text{ m}) = 1.6 \times 10^4 \text{ V}$$

$$Q_{\text{máx}} = C \Delta V_{\text{máx}} = (2.0 \times 10^{-11} \text{ F})(1.6 \times 10^4 \text{ V}) = 0.32 \mu\text{C}$$

$$\sigma = \frac{Q_{\text{máx}}}{A} = \frac{3.2 \times 10^{-7} \text{ C}}{6.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 5.3 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{5.3 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2}{8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{m}^2 \cdot \text{N}} = 6.0 \times 10^7 \text{ N/C}$$

EJEMPLO 16.12 Capacitores con dos dieléctricos

OBJETIVO Derivar una expresión simbólica de un capacitor de placas paralelas con dos dieléctricos.

PROBLEMA Un capacitor de placas paralelas tiene dieléctricos con constantes κ_1 y κ_2 entre las dos placas, como se muestra en la figura 16.29. Cada dieléctrico llena exactamente la mitad del volumen entre las placas. Deducir expresiones para a) la diferencia de potencial entre las dos placas y b) la capacidad resultante del sistema.

ESTRATEGIA La magnitud de la diferencia de potencial entre las dos placas de un capacitor es igual a la del campo eléctrico multiplicado por la distancia entre las placas. El campo eléctrico en una región se reduce en un factor de $1/\kappa$ cuando un dieléctrico se introduce, por lo que $E = \sigma/\epsilon = \sigma/\kappa\epsilon_0$. Suma la diferencia de potencial a través de cada dieléctrico para encontrar la diferencia de potencial total de ΔV entre las placas. La diferencia de voltaje en cada dieléctrico está dada por $\Delta V = Ed$, donde E es el campo eléctrico y d el desplazamiento. Obtener la capacidad de la relación $C = Q/\Delta V$.

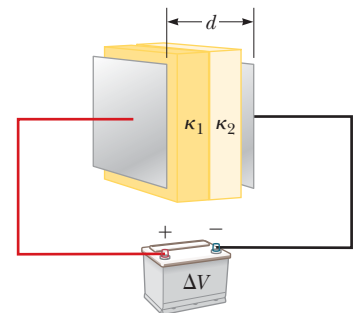


Figura 16.29 (Ejercicio 16.12)

SOLUCIÓN

a) Deduzca una ecuación para la diferencia de potencial entre las dos placas.

Escribir una ecuación general para la diferencia de potencial a través de ambos bloques:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = E_1d_1 + E_2d_2$$

(continúa)

Sustituya las ecuaciones para los campos eléctricos y los espesores de los dieléctricos, $d_1 = d_2 = d/2$:

$$\Delta V = \frac{\sigma}{\kappa_1 \epsilon_0} \frac{d}{2} + \frac{\sigma}{\kappa_2 \epsilon_0} \frac{d}{2} = \frac{\sigma d}{2\epsilon_0} \left(\frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2} \right)$$

b) Deduzca una ecuación para la capacitancia resultante del sistema.

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

Escriba la ecuación general de la capacitancia:

$$C = \frac{\sigma A}{\frac{\sigma d}{2\epsilon_0} \left(\frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2} \right)} = \frac{2\epsilon_0 A}{d} \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2}$$

Sustituya $Q = \sigma A$ y la ecuación para la diferencia de potencial del inciso a):

COMENTARIOS La respuesta es la misma que si hubiera habido dos capacitores en serie con los dieléctricos respectivos. Cuando un capacitor consta de dos dieléctricos como se muestra en la figura 16.30, sin embargo, es equivalente a dos capacitores diferentes en paralelo.

PREGUNTA 16.12 ¿Qué respuesta se obtiene cuando los dos dieléctricos se eliminan para que no haya vacío entre las placas?

EJERCICIO 16.12 Supongamos que un capacitor tiene dos dieléctricos dispuestos como se muestra en la figura 16.30, cada dieléctrico rellena exactamente la mitad del volumen entre las dos placas. Deduzca una ecuación para la capacitancia si cada dieléctrico llena exactamente la mitad del volumen entre las placas.

RESPUESTA $C = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d}$

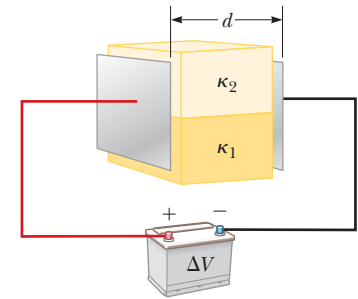


Figura 16.30 (Ejercicio 16.12)

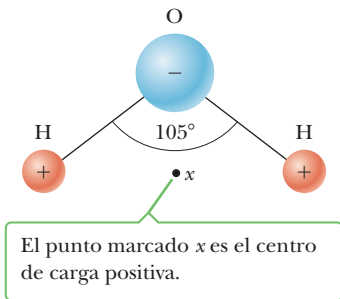


Figura 16.31 La molécula de agua, H_2O , tiene una polarización permanente que resulta de su geometría angular.

Descripción atómica de los dieléctricos

La explicación de por qué un dieléctrico aumenta la capacitancia de un capacitor se basa en una descripción atómica del material, que a su vez involucra una propiedad de algunas moléculas llamada **polarización**. Se dice que una molécula está polarizada cuando hay una separación entre las posiciones promedio de su carga negativa y su carga positiva. En algunas moléculas, como el agua, esta condición siempre está presente. Para ver por qué, considere la geometría de una molécula de agua (figura 16.31).

La molécula está ordenada de modo que el átomo negativo de oxígeno se dobla hacia los átomos de hidrógeno con carga positiva en un ángulo de 105° entre los dos enlaces. El centro de carga negativa está en el átomo de oxígeno y el centro de carga positiva se encuentra en un punto a la mitad de la línea que une los átomos de hidrógeno (punto x en el diagrama). Los materiales compuestos de moléculas que están permanentemente polarizados de esta forma tienen constantes dieléctricas grandes y, de hecho, la tabla 16.1 muestra que la constante dieléctrica del agua es grande ($\kappa = 80$) en comparación con otras sustancias comunes.

Una molécula simétrica (figura 16.32a) puede no tener polarización permanente, pero se le puede inducir una polarización mediante un campo eléctrico externo. Un campo dirigido hacia la izquierda, como en la figura 16.32b, haría que el centro de carga positiva se corra hacia la izquierda de su posición inicial y que el centro de carga negativa se corra hacia la derecha. Esta **polarización inducida** es el efecto que predomina en la mayoría de los materiales utilizados como dieléctricos en los capacitores.

Para entender por qué la polarización de un dieléctrico puede afectar la capacitancia, considere la losa de dieléctrico que se muestra en la figura 16.33. Antes de colocar la losa entre las placas del capacitor, las moléculas polares se orientan al azar (figura 16.33a). Las moléculas polares son dipolos y cada uno crea un campo eléctrico de dipolo, pero, debido a su orientación aleatoria, este campo promedia cero.

Después de insertar la losa de dieléctrico en el campo eléctrico \vec{E}_0 entre las placas (figura 16.33b), la placa positiva atrae los extremos negativos de los dipolos y la placa negativa atrae los extremos positivos de los dipolos. Estas fuerzas ejercen un torque sobre las moléculas

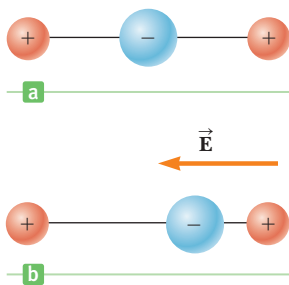


Figura 16.32 a) Una molécula simétrica no tiene polarización permanente. b) Un campo eléctrico externo induce una polarización en la molécula.

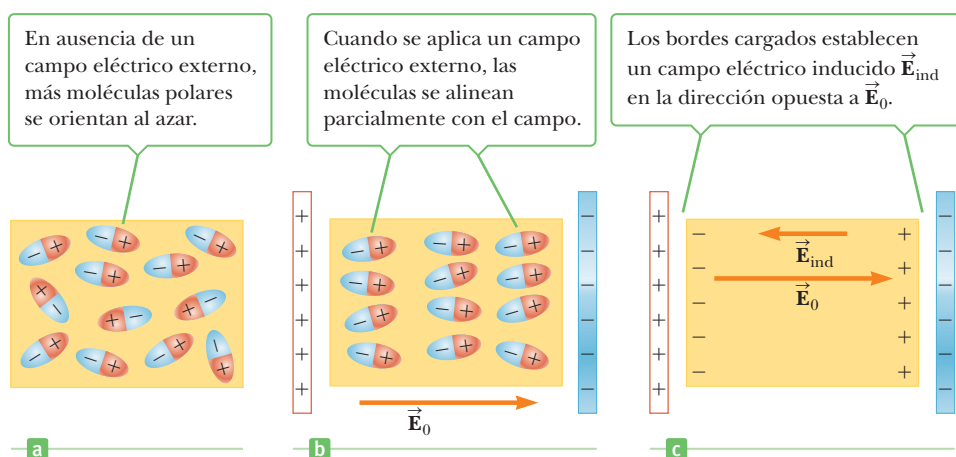


Figura 16.33 a) Moléculas polares se orientan al azar. b) Un campo eléctrico es aplicado al dieléctrico. c) Los bordes cargados del dieléctrico se pueden modelar como un par adicional de placas paralelas reduciendo el campo total entre las placas reales. El interior del dieléctrico permanece neutral.

que constituyen el dieléctrico, que los reorienta de modo que, en promedio, el polo negativo está más inclinado hacia la placa positiva y el polo positivo está más alineado hacia la placa negativa. Las cargas positiva y negativa en medio todavía se cancelan mutuamente, pero hay una acumulación neta de carga negativa en el dieléctrico junto a la placa positiva y una acumulación neta de carga positiva junto a la placa negativa. Esta configuración se puede modelar como un par adicional de placas cargadas, como en la figura 16.33c, lo que crea un campo eléctrico inducido \vec{E}_{ind} que parcialmente cancela el campo eléctrico original \vec{E}_0 . Si la batería no está conectada cuando se inserta el dieléctrico, la diferencia de potencial ΔV_0 a través de las placas se reduce a $\Delta V_0/\kappa$.

Sin embargo, si el capacitor todavía está conectado a la batería, los polos negativos jalan más electrones de la placa positiva, lo que la hace más positiva. Mientras tanto, los polos positivos atraen más electrones hacia la placa negativa. Esta situación continúa hasta que la diferencia de potencial a través de la batería llega a su magnitud original, igual a la ganancia de potencial a través de la batería. El efecto neto es un aumento en la cantidad de carga almacenada en el capacitor. Puesto que las placas pueden almacenar más carga para un voltaje dado, tenemos a partir de $C = Q\Delta V$ que la capacitancia debe aumentar.

Examen rápido

16.11 Considere un capacitor de placas paralelas con un material dieléctrico entre las placas. Si la temperatura del dieléctrico aumenta, ¿la capacitancia a) disminuye, b) aumenta o c) permanece igual?

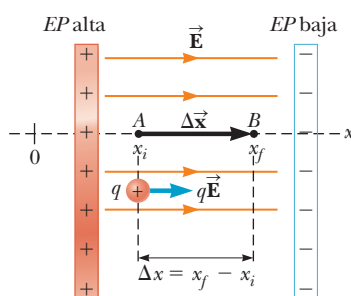
RESUMEN

16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico

El cambio en energía potencial eléctrico de un sistema que consiste de un objeto con carga q que se mueve a través de un desplazamiento Δx en un campo eléctrico constante \vec{E} está dado por

$$\Delta EP = W_{AB} = -qE_x \Delta x \quad [16.1]$$

Cuando una carga q se mueve en un campo eléctrico uniforme \vec{E} del punto A al punto B , el trabajo realizado en la carga por la fuerza del campo eléctrico es $qE_x \Delta x$.



donde E_x es el componente del campo eléctrico en la dirección x y $\Delta x = x_f - x_i$. La **diferencia en potencial eléctrico** entre dos puntos A y B es

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta EP}{q} \quad [16.2]$$

donde ΔEP es el *cambio* en energía potencial eléctrica conforme una carga q se mueve entre A y B . Las unidades de diferencia de potencial son joules por coulomb, o **volts**; $1 \text{ J/C} = 1 \text{ V}$.

La **diferencia de potencial eléctrico** entre dos puntos A y B en un campo eléctrico *uniforme* \vec{E} es

$$\Delta V = -E_x \Delta x \quad [16.3]$$

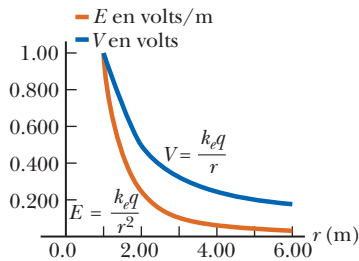
donde $\Delta x = x_f - x_i$ es el desplazamiento entre A y B y E_x es el componente x del campo eléctrico en dicha región.

16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales

El **potencial eléctrico** debido a una carga puntual q a una distancia r de la carga puntual es

$$V = k_e \frac{q}{r} \quad [16.4]$$

El campo eléctrico y potencial eléctrico contra la distancia de una carga puntual de 1.11×10^{-10} C. Tenga en cuenta que V es proporcional a $1/r$, mientras que E es proporcional a $1/r^2$.



La **energía potencial eléctrica** de un par de cargas puntuales separadas a una distancia r es

$$EP = k_e \frac{q_1 q_2}{r} \quad [16.5]$$

Estas ecuaciones se pueden usar en la solución de problemas de conservación de la energía y en el teorema trabajo-energía.

16.3 Potenciales y conductores cargados

16.4 Superficies equipotenciales

Todo punto sobre la superficie de un conductor cargado en equilibrio electrostático está al mismo potencial. Más aún, el potencial es constante en todas partes dentro del conductor y es igual al valor sobre la superficie.

El **electrón-volt** se define como la energía que un electrón (o protón) gana cuando se acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V. La conversión entre electrón-volt y joules es

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad [16.7]$$

Cualquier superficie sobre la cual el potencial es el mismo en cualquier punto se llama superficie equipotencial. El campo eléctrico siempre se orienta perpendicular a una superficie equipotencial.

16.6 Capacitancia

Un capacitor consiste de dos placas metálicas con cargas que son iguales en magnitud pero opuestas en signo. La capacitancia C de cualquier capacitor es la razón de la magnitud de la carga Q sobre cualquier placa a la magnitud de la diferencia de potencial ΔV entre ellas:

$$C \equiv \frac{Q}{\Delta V} \quad [16.8]$$

La capacitancia tiene unidades de coulombs por volt, o farads; $1 \text{ C/V} = 1 \text{ F}$.

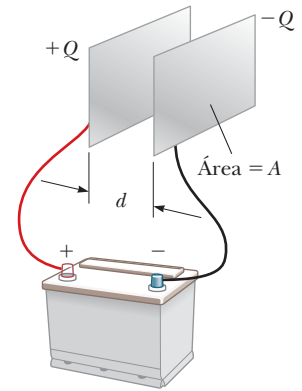
16.7 El capacitor de placas paralelas

La capacitancia de dos placas metálicas paralelas con área A separadas una distancia d es

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad [16.9]$$

donde $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ es una constante llamada **permitividad del espacio libre**.

Un capacitor de placas paralelas se compone de dos placas paralelas, cada una de área A , separadas por una distancia d .



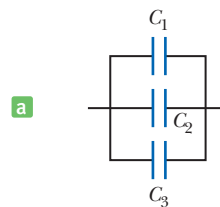
16.8 Combinaciones de capacitores

La **capacitancia equivalente de una combinación en paralelo** de capacitores es

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad [16.12]$$

Si dos o más capacitores se conectan en serie, la **capacitancia equivalente de la combinación en serie** es

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad [16.15]$$



$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3$$



$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Los capacitores a) en paralelo o b) en serie pueden escribirse como un solo capacitor equivalente.

Los problemas que involucran una combinación de capacitores se pueden resolver al aplicar las ecuaciones 16.12 y 16.15 repetidamente a un diagrama de circuito, lo que lo simplifica tanto como es posible. Este paso se sigue con la resolución hacia atrás al diagrama original y aplicar $C = Q/\Delta V$, ya que los capacitores en paralelo tienen la misma caída de voltaje y que los capacitores en serie tienen la misma carga.

16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado

Tres expresiones equivalentes para calcular la **energía almacenada** en un capacitor cargado son

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2} Q \Delta V = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad [16.17]$$

16.10 Capacitores con dieléctricos

Cuando un material no conductor, llamado **dieléctrico**, se coloca entre las placas de un capacitor, la capacitancia se multiplica por el factor κ , que se llama **constante dieléctrica**,

una propiedad del material dieléctrico. La capacitancia de un capacitor de placas paralelas lleno con un dieléctrico es

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad [16.19]$$

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un protón se libera en el origen en un campo eléctrico constante de 850 N/C , que actúa en la dirección x positiva. Encuentre el cambio en la energía potencial eléctrica asociado con el protón después de que viaja a $x = 2.5 \text{ m}$.
a) $3.4 \times 10^{-16} \text{ J}$ b) $-3.4 \times 10^{-16} \text{ J}$ c) $2.5 \times 10^{-16} \text{ J}$
d) $-2.5 \times 10^{-16} \text{ J}$ e) $-1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Un electrón en una máquina de rayos X se acelera a través de una diferencia de potencial de $1.00 \times 10^4 \text{ V}$ antes de golpear la pantalla. ¿Cuál es la energía cinética del electrón, en electrón-volts?
a) $1.00 \times 10^4 \text{ eV}$ b) $1.6 \times 10^{-15} \text{ eV}$
c) $1.60 \times 10^{-22} \text{ eV}$ d) $6.25 \times 10^{22} \text{ eV}$ e) $1.6 \times 10^{-19} \text{ eV}$
- El potencial eléctrico en $x = 3.0 \text{ m}$ es 120 V y el potencial eléctrico en $x = 5.0 \text{ m}$ es 190 V . ¿Cuál es el campo eléctrico en esta región, si suponemos que es constante?
a) 140 N/C b) -140 N/C c) 35 N/C d) -35 N/C e) 75 N/C
- Un núcleo de helio (carga = $2e$, masa = $6.63 \times 10^{-27} \text{ kg}$), que viaja con una rapidez de $6.20 \times 10^5 \text{ m/s}$, entra a un campo eléctrico, que va del punto **A**, a un potencial de $1.50 \times 10^3 \text{ V}$, al punto **B**, a $4.00 \times 10^3 \text{ V}$. ¿Cuál es su rapidez en el punto **B**?
a) $7.91 \times 10^5 \text{ m/s}$ b) $3.78 \times 10^5 \text{ m/s}$
c) $2.13 \times 10^5 \text{ m/s}$ d) $2.52 \times 10^6 \text{ m/s}$ e) $3.01 \times 10^8 \text{ m/s}$
- Si tres capacitores distintos, inicialmente sin carga, se conectan en serie a través de una batería, ¿cuál de los siguientes enunciados es cierto?
a) La capacitancia equivalente es mayor que cualquiera de las capacitancias individuales. b) El mayor voltaje aparece a través del capacitor con la capacitancia más baja. c) El mayor voltaje aparece a través del capacitor con la mayor capacitancia. d) El capacitor con la mayor capacitancia tiene la mayor carga. e) El capacitor con la menor capacitancia tiene la menor carga.
- Cuatro cargas puntuales se colocan en el borde de un círculo. La carga en cada una de las cuatro es $+5.0 \mu\text{C}$, $+1.5 \mu\text{C}$, $-1.0 \mu\text{C}$ y $-0.5 \mu\text{C}$. Si el potencial eléctrico en el centro del círculo debido a la carga sola de $+0.5 \mu\text{C}$ es $4.5 \times 10^4 \text{ V}$, ¿cuál es el potencial eléctrico total en el centro debido a las cuatro cargas?
a) $18.0 \times 10^4 \text{ V}$ b) $4.5 \times 10^4 \text{ V}$
c) 0 d) $-4.5 \times 10^4 \text{ V}$ e) $9.0 \times 10^4 \text{ V}$
- Un técnico en electrónica quiere construir un capacitor de placas paralelas con rutilo ($\kappa = 1.00 \times 10^2$) como el dieléctrico. Si el área transversal de las placas es 1.0 cm^2 , ¿cuál es la capacitancia si el grosor del rutilo es 1.0 mm ?
a) 88.5 pF b) 177.0 pF c) $8.85 \mu\text{F}$ d) $100.0 \mu\text{F}$ e) $354 \mu\text{F}$
- Un capacitor de placas paralelas se conecta a una batería. ¿Qué ocurre si la separación de placa se duplica mientras el capacitor permanece conectado a la batería?
a) La energía almacenada permanece igual. b) La energía almacenada se duplica. c) La energía almacenada disminuye por un factor de 2. d) La energía almacenada disminuye por un factor de 4. e) La energía almacenada aumenta por un factor de 4.
- Un capacitor de placas paralelas, lleno con aire, porta una carga Q . La batería se desconecta y una losa de material, con constante dieléctrica $\kappa = 2$, se inserta entre las placas. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto?
a) El voltaje a través del capacitor disminuye por un factor de 2. b) El voltaje a través del capacitor se duplica. c) La carga sobre las placas se duplica. d) La carga sobre las placas disminuye por un factor de 2. e) El campo eléctrico se duplica.
- Después de que un capacitor de placas paralelas se carga mediante una batería, se desconecta de la batería y su separación de placas aumenta. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto?
a) La energía almacenada en el capacitor disminuye. b) La energía almacenada en el capacitor aumenta. c) El campo eléctrico entre las placas disminuye. d) La diferencia de potencial entre las placas disminuye. e) La carga sobre las placas disminuye.
- Una batería se une a varios capacitores diferentes conectados en paralelo. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto?
a) Todos los capacitores tienen la misma carga y la capacitancia equivalente es mayor que la capacitancia de cualquiera de los capacitores en el grupo. b) El capacitor con la mayor capacitancia porta la menor carga. c) La diferencia de potencial a través de cada capacitor es la misma y la capacitancia equivalente es mayor que cualquiera de los capacitores en el grupo. d) El capacitor con la menor capacitancia porta la mayor carga. e) Las diferencias de potencial a través de los capacitores son iguales sólo si las capacitancias son iguales.
- Una batería se une a varios capacitores diferentes conectados en serie. ¿Cuál de los siguientes enunciados es

cierto? a) Todos los capacitores tienen la misma carga y la capacitancia equivalente es menor que la capacitancia de cualquiera de los capacitores individuales en el grupo. b) Todos los capacitores tienen la misma carga y la capacitancia equivalente es mayor que cualquiera de los capacitores individuales en el grupo. c) El capacitor con

la mayor capacitancia porta la mayor carga. d) La diferencia de potencial a través de cada capacitor debe ser la misma. e) La mayor diferencia de potencial aparece a través del capacitor que tiene la mayor capacitancia. f) La mayor diferencia de potencial aparece a través del capacitor con la capacitancia más baja.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. a) Describa el movimiento de un protón después de que se libera desde el reposo en un campo eléctrico uniforme. b) Describa los cambios (si hay alguno) en su energía cinética y la energía potencial eléctrica asociada con el protón.
2. Clasifique las energías potenciales de los cuatro sistemas de partículas mostrados en la figura PC16.2 de mayor a menor. Incluya igualdades si lo considera apropiado.

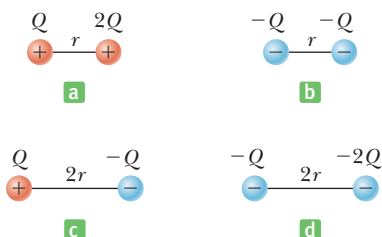


Figura PC16.2

3. Un capacitor de placas paralelas se carga mediante una batería y luego la batería se desconecta del capacitor. Puesto que las cargas sobre las placas del capacitor tienen signo opuesto, se atraen mutuamente. Por lo tanto, se requiere trabajo positivo para aumentar la separación de placas. Demuestre que el trabajo externo realizado cuando la separación de placas aumenta, conduce a un aumento en la energía almacenada en el capacitor.
4. Cuando partículas cargadas están separadas por una distancia infinita, la energía potencial eléctrica del par es cero. Cuando las partículas se aproximan, la energía potencial eléctrica de un par con el mismo signo es positiva, mientras que la energía potencial eléctrica de un par de signo contrario es negativa. Explique.
5. Suponga que está sentado dentro de un automóvil y que una línea eléctrica de 20 kV cae sobre el vehículo. ¿Debe permanecer en el auto o salir? El potencial de la línea eléctrica es 20 kV en comparación con el potencial del suelo.
6. ¿Por qué es importante evitar los bordes o puntos afilados en los conductores que se usan en el equipo de alto voltaje?
7. Explique por qué, bajo condiciones estáticas, todos los puntos en un conductor deben estar al mismo potencial eléctrico.

8. Si se le proporcionan a usted tres capacitores diferentes, C_1 , C_2 y C_3 , ¿cuántas combinaciones diferentes de capacitancia puede producir, si usa todos los capacitores en sus circuitos?
9. a) ¿Por qué es peligroso tocar las terminales de un capacitor de alto voltaje incluso después de que la fuente de voltaje que cargó la batería se desconecta del capacitor? b) ¿Qué se puede hacer para que el capacitor sea seguro de manipular después de remover la fuente de voltaje?
10. Las placas de un capacitor se conectan a una batería. ¿Qué ocurre con la carga sobre las placas si los alambres conectores se remueven de la batería? ¿Qué ocurre con la carga si los alambres se remueven de la batería y se conectan entre ellos?
11. Clasifique los potenciales eléctricos de los cuatro puntos mostrados en la figura PC16.11 de mayor a menor.

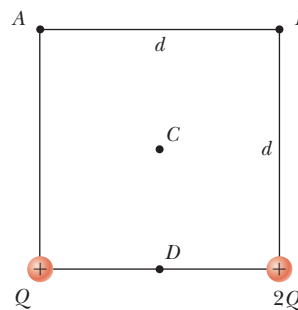


Figura PC16.11

12. Si se le pide diseñar un capacitor para el cual se requiera un tamaño pequeño y gran capacitancia, ¿qué factores serían importantes en su diseño?
13. ¿Siempre es posible reducir una combinación de capacitores a un capacitor equivalente con las reglas desarrolladas en este capítulo? Explique.
14. Explique por qué un dieléctrico aumenta el máximo voltaje operativo de un capacitor, aun cuando el tamaño físico del capacitor no cambia.

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos; 2. denota problema intermedio,
- 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico

- 1. Un campo eléctrico uniforme, de 375 N/C de magnitud, que apunta en la dirección x positiva, actúa sobre un electrón, que inicialmente está en reposo. Después de que el electrón se mueve 3.20 cm, ¿cuál es a) el trabajo realizado por el campo sobre el electrón, b) el cambio en energía potencial asociado con el electrón y c) la velocidad del electrón?
- 2. Un protón es liberado del reposo en un campo eléctrico uniforme de magnitud 385 N/C. Encuentre a) la fuerza eléctrica del protón, b) la aceleración del protón, y c) la distancia que viaja en 2.00 μ s.
- 3. BIO Entre las superficies interior y exterior de una membrana celular existe una diferencia de potencial de 90 mV. La superficie interior es negativa en relación con la superficie exterior. ¿Cuánto trabajo se requiere para expulsar un ion sodio positivo (Na^+) del interior de la célula?
- 4. Una esfera metálica de radio de 5.00 cm está inicialmente descargada. ¿Cuántos electrones tendrían que ser colocados en la esfera de producir un campo eléctrico de magnitud 1.50×10^5 N para/C en un punto de 8.00 cm desde el centro de la esfera?
- 5. La diferencia de potencial entre las placas aceleradoras de un televisor es de aproximadamente 25 kV. Si la distancia entre las placas es 1.5 cm, encuentre la magnitud del campo eléctrico uniforme en la región entre las placas.
- 6. Una carga puntual $q = +40.0 \mu\text{C}$ se mueve de A a B separados por una distancia $d = 0.180$ m en presencia de un campo eléctrico externo \vec{E} de magnitud 275 N/C dirigido hacia la derecha como se muestra en la figura P16.6. Encuentre a) la fuerza eléctrica ejercida sobre la carga, b) el trabajo realizado por la fuerza eléctrica, c) el cambio en la energía potencial eléctrica de la carga y d) la diferencia de potencial entre A y B.

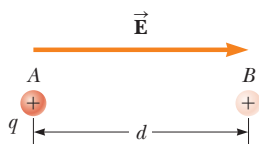


Figura PC16.6

- 7. M Placas paralelas con carga opuesta se separan 5.33 mm. Entre las placas existe una diferencia de potencial de 600 V. a) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico entre las

placas? b) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza sobre un electrón entre las placas? c) ¿Cuánto trabajo se debe realizar sobre un electrón para moverlo a la placa negativa, si inicialmente se ubica a 2.90 mm de la placa positiva?

- 8. C/C S a) Encuentre la diferencia de potencial ΔV_e que se requiere para detener a un electrón (llamado "potencial de frenado") que se mueve con una rapidez inicial de 2.85×10^7 m/s. b) Un protón que viaje a la misma rapidez requeriría una diferencia de potencial, ¿de mayor o menor magnitud? Explique. c) Encuentre una expresión simbólica para la razón del potencial de frenado del protón y el potencial de frenado del electrón, $\Delta V_p / \Delta V_e$. La respuesta debe estar en términos de la masa del protón m_p y la masa del electrón m_e .
- 9. C/C Un bloque de 74.0 g, que porta una carga $Q = 35.0 \mu\text{C}$, se conecta a un resorte para el cual $k = 78.0$ N/m. El bloque se encuentra sobre una superficie horizontal sin fricción y se sumerge en un campo eléctrico uniforme de magnitud $E = 4.86 \times 10^4$ N/C que se dirige como se muestra en la figura P16.9. Si el bloque se libera desde el reposo cuando el resorte no está estirado ($x = 0$), a) ¿a qué distancia máxima se mueve el bloque desde su posición inicial? b) Encuentre la posición de equilibrio posterior del bloque y la amplitud de su movimiento. c) Con la conservación de la energía, encuentre una relación simbólica que proporcione la diferencia de potencial entre su posición inicial y el punto de máxima extensión, en términos de la constante del resorte k , la amplitud A y la carga Q .

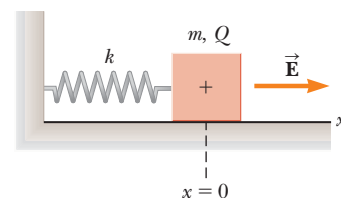


Figura PC16.9

- 10. En el planeta Tehar, la aceleración de caída libre es la misma que la de la Tierra, pero también hay un intenso campo eléctrico hacia abajo que es uniforme cerca de la superficie del planeta. Una bola de 2.00 kg, que tiene una carga de $5.00 \mu\text{C}$, se lanza hacia arriba con una rapidez de 20.1 m/s. La bola golpea el suelo después de un intervalo de 4.10 s. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre el punto de partida y el punto superior de la trayectoria?

16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales

16.3 Potenciales y conductores cargados

16.4 Superficies equipotenciales

11. **CIC** Un electrón está en el origen. a) Calcule el potencial eléctrico V_A en el punto A , $x = 0.250$ cm. b) Calcule el potencial eléctrico V_B en el punto B , $x = 0.750$ cm. ¿Cuál es la diferencia de potencial $V_B - V_A$? c) ¿Una partícula con carga negativa colocada en el punto A necesariamente pasaría por esta misma diferencia de potencial al llegar al punto B ? Explique.

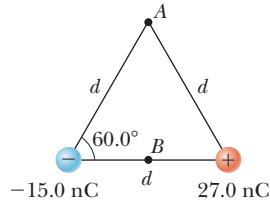


Figura P16.12

12. Las dos cargas en la figura P16.12 están separadas por $d = 2.00$ cm. Encuentre el potencial eléctrico en a) el punto A y b) el punto B , que está a medio camino entre las cargas.

13. a) Encuentre el potencial eléctrico, considerado cero en el infinito, en la esquina superior derecha (la esquina sin carga) del rectángulo de la figura P16.13. b) Repita si la carga de $2.00 \mu\text{C}$ se sustituye con una carga de $-2.00 \mu\text{C}$.

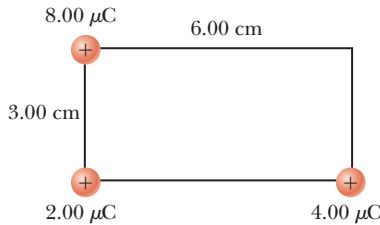


Figura P16.13 Problemas 13 y 14.

14. Tres cargas se colocan en las esquinas de un rectángulo, como en la figura P16.13. ¿Cuánta energía se gastaría para mover la carga de $8.00 \mu\text{C}$ al infinito?
15. **M CIC** Dos cargas puntuales, $Q_1 = +5.00$ nC y $Q_2 = -3.00$ nC, están separadas 35.0 cm. a) ¿Cuál es el potencial eléctrico en un punto a medio camino entre las cargas? b) ¿Cuál es la energía potencial del par de cargas? ¿Cuál es el significado del signo algebraico de su respuesta?

16. **CIC S** Tres cargas puntuales idénticas cada una de carga q se encuentran en los vértices de un triángulo equilátero como en la figura P16.16. La distancia desde el centro del triángulo a cada vértice es a . (a) Demostrar que el campo eléctrico en el centro del triángulo es igual a cero. b) Encontrar una expresión simbólica para el potencial eléctrico en el centro del triángulo. c) Dar una explicación física del hecho de que el potencial eléctrico no es cero, sin embargo, el campo eléctrico es cero en el centro.

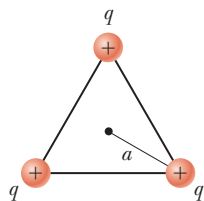


Figura P16.16

17. Las tres cargas de la figura P16.17 están en los vértices de un triángulo isósceles. Sea $q = 7.00$ nC y calcule el potencial eléctrico en el punto medio de la base.

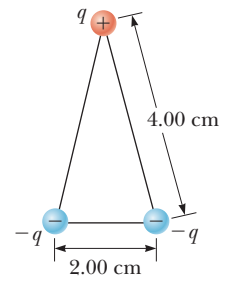


Figura P16.17

18. **S** Una carga puntual positiva $q = +2.50$ nC se encuentra a $x = 1.20$ m y una carga negativa de $-2q = -5.00$ nC se encuentra en el origen como en la figura P16.18. a) Dibuje el potencial eléctrico en función de x para los puntos a lo largo del eje x en el rango de $-1.50 \text{ m} < x < 1.50 \text{ m}$. b) Encontrar una expresión simbólica para el potencial en el eje x en un punto arbitrario P entre las dos cargas. c) Hallar el potencial eléctrico en $x = 0.600$ m d) Encuentre el punto a lo largo del eje x entre las dos cargas en donde el potencial eléctrico es cero.

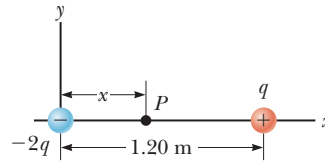


Figura P16.18

19. **PG** Un protón se ubica en el origen, y un segundo protón se ubica sobre el eje x en $x = 6.00$ fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). a) Calcule la energía potencial eléctrica asociada con esta configuración. b) Una partícula alfa (carga $= 2e$, masa $= 6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$) se coloca ahora en $(x, y) = (3.00, 3.00)$ fm. Calcule la energía potencial eléctrica asociada con esta configuración. c) A partir del sistema de tres partículas, encuentre el cambio en energía potencial eléctrica si la partícula alfa puede escapar al infinito mientras que los dos protones permanecen fijos en su lugar. (Durante todo el proceso, ignore cualquier efecto de radiación.) d) Use la conservación de la energía para calcular la rapidez de la partícula alfa en el infinito. e) Si los dos protones se liberan desde el reposo y la partícula alfa permanece fija, calcule la rapidez de los protones en el infinito.

20. **CIC** Un protón y una partícula alfa (carga $= 2e$, masa $= 6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$) inicialmente están en reposo, separados por $4.00 \times 10^{-15} \text{ m}$. a) Si ambos se liberan simultáneamente, explique por qué no puede encontrar sus velocidades en el infinito sólo con la conservación de la energía. b) ¿Qué otra ley de conservación de puede aplicar en este caso? c) Encuentre las rapidez del protón y la partícula alfa, respectivamente, en el infinito.

21. Una esfera pequeña de masa $8.00 \mu\text{g}$ y una carga de -2.80 nC está inicialmente a una distancia de $1.60 \mu\text{m}$ desde una carga fija de $+8.50$ nC. Si la esfera de $8.00 \mu\text{g}$ es liberada desde el reposo, determine a) su energía cinética cuando se encuentra a $0.500 \mu\text{m}$ de la carga fija y b) su rapidez cuando está a $0.500 \mu\text{m}$ de la carga fija.

22. La esfera metálica de un pequeño generador Van de Graaff que se ilustra en la figura 15.23 tiene un radio de 18 cm. Cuando el campo eléctrico en la superficie de la esfera llega a $3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$, el aire se degrada y el generador se descarga. ¿Cuál es el potencial máximo que la esfera puede tener antes de que se produzca la descomposición?
23. En el famoso experimento de dispersión de Rutherford, que condujo al modelo planetario del átomo, se dispararon partículas alfa (con cargas de $+2e$ y masas de $6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$) hacia un núcleo de oro con carga $+79e$. Una partícula alfa, inicialmente muy lejos del núcleo de oro, se disparó a $2.00 \times 10^7 \text{ m/s}$ directamente hacia el núcleo, como en la figura P16.23. ¿Cuánto se acerca la partícula alfa al núcleo de oro antes de dar la vuelta? Suponga que el núcleo de oro permanece estacionario.

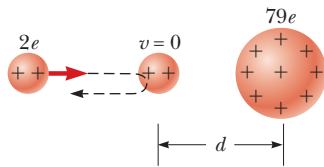


Figura P16.23

24. **S** Cuatro cargas puntuales, cada una con carga Q , se ubican en las esquinas de un cuadrado que tiene lados de longitud a . Encuentre expresiones simbólicas para a) el potencial eléctrico total en el centro del cuadrado debido a las cuatro cargas y b) el trabajo requerido para llevar una quinta carga q del infinito al centro del cuadrado.

16.6 Capacitancia

16.7 El capacitor de placas paralelas

25. Considere la Tierra y una capa de nubes 800 m arriba del planeta como las placas de un capacitor de placas paralelas. a) Si la capa de nubes tiene una área de $1.0 \text{ km}^2 = 1.0 \times 10^6 \text{ m}^2$, ¿cuál es la capacitancia? b) Si la intensidad de un campo eléctrico mayor que $3.0 \times 10^6 \text{ N/C}$ hace que el aire se “rompa” y conduzca carga (un relámpago), ¿cuál es la carga máxima que puede tener la nube?
26. a) Cuando una batería de 9.00 V se conecta a las placas de un capacitor, almacena una carga de $27.0 \mu\text{C}$. ¿Cuál es el valor de la capacitancia? b) Si el mismo capacitor se conecta a una batería de 12.0 V, ¿qué carga se almacena?
27. Un capacitor de placas paralelas lleno con aire tiene placas de 2.30 cm^2 de área, separadas por 1.50 mm. El capacitor se conecta a una batería de 12.0 V. a) Determine el valor de su capacitancia. b) ¿Cuál es la carga sobre el capacitor? c) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico uniforme entre las placas?
28. Dos conductores con cargas netas de $+10.0 \mu\text{C}$ y $-10.0 \mu\text{C}$ tienen un diferencia de potencial de 10.0 V entre ellos. a) Determinar la capacitancia del sistema. b) ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los dos conductores

si los cargas en cada uno se aumentó a $+100 \mu\text{C}$ y $-100 \mu\text{C}$?

29. **M** Un capacitor lleno con aire consiste de dos placas paralelas, cada una con área de 7.60 cm^2 y separadas una distancia de 1.80 mm. Si a estas placas se aplica una diferencia de potencial de 20.0 V, calcule a) el campo eléctrico entre las placas, b) la capacitancia y c) la carga sobre cada placa.
30. Un chip de memoria de computadora de 1 megabit contiene muchos capacitores de $60.0 \times 10^{-15} \text{ F}$. Cada capacitor tiene $21.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ de área de placa. Determine la separación de placas de tal capacitor. (Suponga una configuración de placas paralelas.) El diámetro de un átomo está en el orden de $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$. Expresé la separación de placa en ångstroms.
31. **C/C** Un capacitor de placas paralelas, con área 0.200 m^2 y separación de placas de 3.0 mm, se conecta a una batería de 6.00 V. a) ¿Cuál es la capacitancia? b) ¿Cuánta carga se almacena en las placas? c) ¿Cuál es el campo eléctrico entre las placas? d) Encuentre la magnitud de la densidad de carga sobre cada placa. e) Sin desconectar la batería, las placas se separan más. Cualitativamente, ¿qué ocurre con cada una de las respuestas previas?
32. Un pequeño objeto con una masa de $350 \mu\text{g}$ porta una carga de 30.0 nC y está suspendido mediante un hilo entre las placas verticales de un capacitor de placas paralelas. Las placas están separadas 4.00 cm. Si el hilo forma un ángulo de 15.0° con la vertical, ¿cuál es la diferencia de potencial entre las placas?

16.8 Combinaciones de capacitores

33. Dado un capacitor de $2.50 \mu\text{F}$, un capacitor de $6.25 \mu\text{F}$ y una batería de 6.00 V, encuentre la carga sobre cada capacitor si los conecta a) en serie a través de la batería y b) en paralelo a través de la batería.
34. Dos capacitores, $C_1 = 5.00 \mu\text{F}$ y $C_2 = 12.0 \mu\text{F}$, se conectan en paralelo y la combinación resultante se conecta a una batería de 9.00 V. Encuentre a) la capacitancia equivalente de la combinación, b) la diferencia de potencial en cada capacitor y c) la carga almacenada en cada capacitor.
35. Encuentre a) la capacitancia equivalente de los capacitores en la figura P16.35, b) la carga sobre cada capacitor y c) la diferencia de potencial a través de cada capacitor.

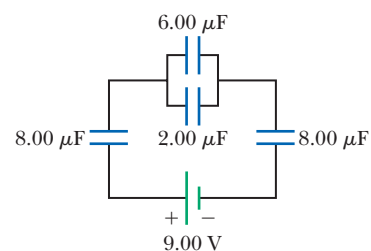


Figura P16.35

36. Dos capacitores dan una capacitancia equivalente de 9.00 pF cuando se conectan en paralelo y una capacitancia equivalente de 2.00 pF cuando se conectan en serie. ¿Cuál es la capacitancia de cada capacitor?
37. Para el sistema de capacitores que se muestra en la figura P16.37, encuentre a) la capacitancia equivalente del sistema, b) la carga sobre cada capacitor y c) la diferencia de potencial a través de cada capacitor.

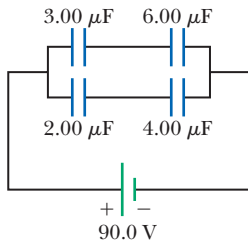


Figura P16.37 Problemas 37 y 56.

38. **PG** Considere la combinación de capacitores en la figura P16.38. a) Encuentre la capacitancia única equivalente de los dos capacitores en serie y vuelva a dibujar el diagrama (llamado diagrama 1) con esta capacitancia equivalente. b) En el diagrama 1, encuentre la capacitancia equivalente de los tres capacitores en paralelo y vuelva a dibujar el diagrama como una sola batería y un solo capacitor en una malla. c) Calcule la carga sobre el capacitor equivalente solo. d) Regrese al diagrama 1, calcule la carga sobre cada capacitor individual. ¿La suma concuerda con el valor que encontró en el inciso c)? e) ¿Cuál es la carga sobre el capacitor de 24.0 μF y sobre el capacitor de 8.00 μF ? f) Calcule la caída de voltaje a través del capacitor de 24.0 μF y g) el capacitor de 8.00 μF .

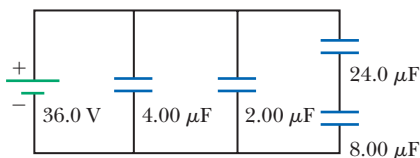


Figura P16.38

39. Encuentre la carga sobre cada uno de los capacitores de la figura P16.39

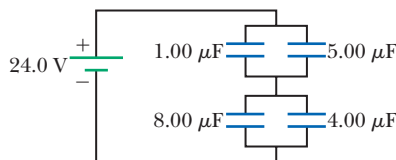


Figura P16.39

40. **CIC S** Tres capacitores están conectados a una batería como se muestra en la figura P16.40. Sus capacitancias son $C_1 = 3C$, $C_2 = C$ y $C_3 = 5C$.

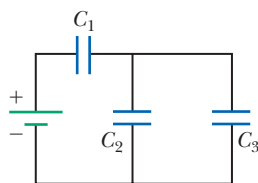


Figura P16.40

- a) ¿Cuál es la capacitancia equivalente de este conjunto de capacitores? b) Establezca la clasificación de los capacitores de acuerdo con la carga que almacenan de mayor a menor. c) Ordene los capacitores de acuerdo con las diferencias de potencial a través de ellos de mayor a menor. d) Suponga que C_3 es mayor. Explique lo que sucede con la carga almacenada en cada capacitor.

41. Un capacitor de 25.0 μF y un capacitor de 40.0 μF se cargan al conectarse a través de baterías separadas de 50.0 V . a) Determine la carga resultante sobre cada capacitor. b) Luego los capacitores se desconectan de sus baterías y se conectan uno con otro, con cada placa negativa conectada a la placa positiva del otro. ¿Cuál es la carga final de cada capacitor y cuál es la diferencia de potencial final a través del capacitor de 40.0 μF ?

42. a) Encuentre la capacitancia equivalente entre los puntos a y b para el grupo de capacitores conectados como se muestra en la figura P16.42, si $C_1 = 5.00 \text{ μF}$, $C_2 = 10.00 \text{ μF}$ y $C_3 = 2.00 \text{ μF}$. b) Si el potencial entre los puntos a y b es 60.0 V , ¿qué carga se almacena en C_3 ?

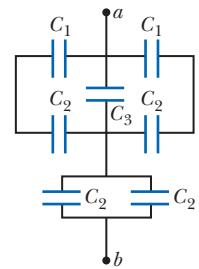


Figura P16.42

43. Un capacitor de 1.00 μF se carga al conectarse a través de una batería de 10.0 V . Luego se desconecta de la batería y se conecta a través de un capacitor sin carga de 2.00 μF . Determine la carga resultante sobre cada capacitor.

44. **M** Cuatro capacitores se conectan como se muestra en la figura P16.44. a) Determine la capacitancia equivalente entre los puntos a y b . b) Calcule la carga de cada capacitor, teniendo $\Delta V_{ab} = 15.0 \text{ V}$.

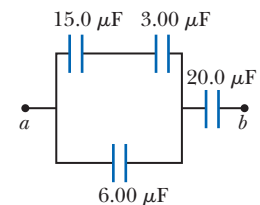


Figura P16.44

16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado

45. Una batería de 12.0 V se conecta a un capacitor de 4.50 μF . ¿Cuánta energía se almacena en el capacitor?
46. **CIC** Dos capacitores, $C_1 = 18.0 \text{ μF}$ y $C_2 = 36.0 \text{ μF}$, se conectan en serie, y una batería de 12.0 V se conecta a través de ellos. a) Encuentre la capacitancia equivalente y la energía contenida en este capacitor equivalente. b) Encuentre la energía almacenada en cada capacitor individual. Demuestre que la suma de estas dos energías es la misma que la energía que se encontró en el inciso a). ¿Esta igualdad siempre será cierta, o depende del número de capacitores y sus capacitancias? c) Si los mismos capacitores se conectaran en paralelo, ¿qué diferencia de potencial se requeriría a través de ellos de modo que la combinación almacene la misma energía que en el inciso a)? ¿Cuál capacitor almacena más energía en esta situación, C_1 o C_2 ?

47. Un capacitor de placas paralelas tiene capacitancia de $3.00 \mu\text{F}$. a) ¿Cuánta energía se almacena en el capacitor si se conecta a una batería de 6.00 V ? b) Si la batería se desconecta y la distancia entre las placas cargadas se duplica, ¿cuál es la energía almacenada? c) Posteriormente la batería se vuelve a unir al capacitor, pero la separación de placas permanece como en la parte b). ¿Cuánta energía se almacena? (Responda cada inciso en microjoules.)
48. Cierta nube de tormenta tiene una diferencia de potencial de $1.00 \times 10^8 \text{ V}$ en relación con un árbol. Si, durante una tormenta eléctrica, 50.0 C de carga se transfieren a través de esta diferencia de potencial y el árbol absorbe 1.00% de la energía, ¿cuánta agua (savia en el árbol), inicialmente a 30.0°C , puede hervir? El agua tiene un calor específico de $4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, un punto de ebullición de 100°C y un calor de vaporización de $2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}$.

16.10 Capacitores con dieléctricos

49. **CIC** El voltaje a través de un capacitor de placas paralelas lleno con aire se mide en 85.0 V . Cuando se inserta un dieléctrico y llena por completo el espacio entre las placas, como en la figura 16.49, el voltaje cae a 25.0 V . a) ¿Cuál es la constante dieléctrica del material insertado? ¿Puede usted identificar el dieléctrico? b) Si el dieléctrico no llena por completo el espacio entre las placas, ¿qué podría concluir acerca del voltaje a través de las placas?

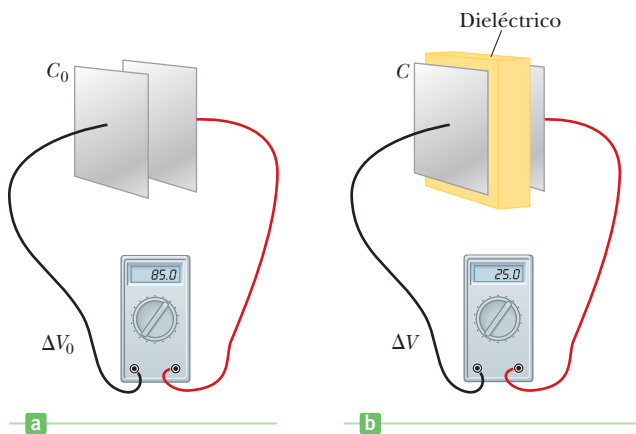


Figura P16.49

50. a) ¿Cuánta carga puede ser colocada en un capacitor con aire entre las placas antes de que se rompa si el área de cada placa es de 5.00 cm^2 ? b) Determinar la carga máxima en caso de utilizar poliestireno entre las placas en lugar de aire. Suponga que la rigidez dieléctrica del aire es $3.00 \times 10^6 \text{ V/m}$, y que la del poliestireno es $24.0 \times 10^6 \text{ V/m}$.

51. Determine a) la capacitancia y b) el máximo voltaje que se puede aplicar a un capacitor de placas paralelas lleno con teflón, que tiene una área de placa de 175 cm^2 y un grosor de aislante de 0.0400 mm .
52. Considere un de placas planas paralelas que está hecho de dos tiras de hoja de aluminio separadas por una tira de papel recubierto con parafina. Cada tira de hoja y papel mide 7.00 cm de ancho. La hoja mide 0.00400 mm de grosor, y el papel mide 0.0250 mm de grueso y tiene una constante dieléctrica de 3.70 . ¿Qué longitud deben tener las tiras si se desea una capacitancia de $9.50 \times 10^{-8} \text{ F}$? (Si después de que se forma este capacitor se agrega una segunda tira de papel debajo de la capa hoja-papel-hoja y el ensamble resultante se enrolla en una forma cilíndrica, similar a la que se muestra en la figura 16.26, la capacitancia puede ser duplicada, debido a que ambas superficies de cada tira de hoja pueden almacenar carga. Sin la segunda tira de papel, sin embargo, el enrollar las capas resultaría en un corto circuito.)

53. **BIO** Un modelo de un eritrocito representa a la célula como un capacitor esférico, una esfera líquida con carga positiva y área superficial A , separada del fluido circundante con carga negativa mediante una membrana de grosor t . Pequeños electrodos introducidos en el interior de la célula muestran una diferencia de potencial de 100 mV a través de la membrana. El grosor de la membrana se estima en 100 nm y tiene una constante dieléctrica de 5.00 . a) Si un eritrocito promedio tiene una masa de $1.00 \times 10^{-12} \text{ kg}$, estime el volumen de la célula y en consecuencia encuentre su área superficial. La densidad de la sangre es 1100 kg/m^3 . b) Estime la capacitancia de la célula al suponer que las superficies de la membrana actúan como placas paralelas. c) Calcule la carga sobre la superficie de la membrana. ¿Cuántas cargas electrónicas representa la carga superficial?

Problemas adicionales

54. Cuando una diferencia de potencial de 150 V se aplica a las placas llenas de aire de un capacitor de placas paralelas, las placas tienen una densidad superficial de carga de $3.00 \times 10^{-10} \text{ C/cm}^2$. ¿Cuál es la distancia entre las placas?
55. **S** Tres capacitores de placas paralelas se construyen, cada uno con la misma área de placa A y con C_1 con espaciamiento de placa d_1 , C_2 con espaciamiento de placa d_2 y C_3 con espaciamiento de placa d_3 . Demuestre que la capacitancia total C de los tres capacitores conectados en serie es la misma que un capacitor con área de placa A y espaciamiento de placa $d = d_1 + d_2 + d_3$.
56. **CIC** Para el sistema de cuatro capacitores que se muestra en la figura P16.37, encuentre a) la energía total almacenada en el sistema y b) la energía almacenada por cada capacitor. c) Compare la suma de las respuestas en el inciso b) con su resultado para el inciso a) y explique sus observaciones.
57. **S** Un capacitor de placas paralelas, con una separación de placa d , tiene una capacitancia C_0 en ausencia de die-

léctrico. Una losa de material dieléctrico, con constante dieléctrica κ y grosor $d/3$, se inserta entre las placas, como en la figura P16.57a. Demuestre que la capacitancia de esta capacitor parcialmente lleno está dada por

$$C = \left(\frac{3\kappa}{2\kappa + 1} \right) C_0$$

Sugerencia: Trate el sistema como dos capacitores conectados en serie, como en la figura 16.57b, uno con dieléctrico y otro vacío.

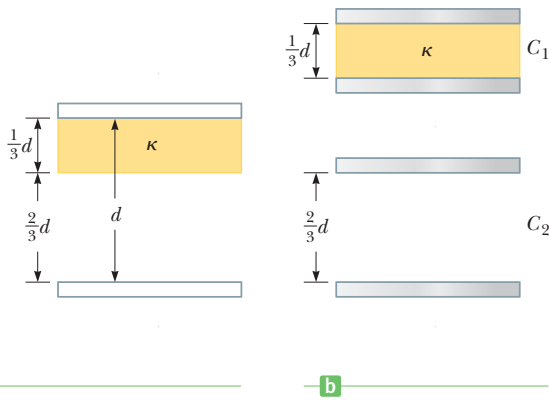


Figura P16.57

58. **S** Dos capacitores dan una capacitancia equivalente de C_p cuando se conectan en paralelo y una capacitancia equivalente de C_s cuando se conectan en serie. ¿Cuál es la capacitancia de cada capacitor?
59. **M** Un capacitor de placas paralelas se construye con un material dieléctrico cuya constante dieléctrica es 3.00 y cuya rigidez dieléctrica es 2.00×10^8 V/m. La capacidad deseada es $0.250 \mu\text{F}$, y el capacitor debe soportar una diferencia de potencial máxima de 4.00 kV. Encuentre el área mínima de las placas del capacitor.
60. Dos cargas, de $1.0 \mu\text{C}$ y $-2.0 \mu\text{C}$, están separadas 0.50 m en dos vértices de un triángulo equilátero, como en la figura P16.60. a) ¿Cuál es el potencial eléctrico debido a la carga de $1.0 \mu\text{C}$ en el tercer vértice, punto P? b) ¿Cuál es el potencial eléctrico debido a la carga de $-2.0 \mu\text{C}$ en P? c) Encuentre el potencial eléctrico total en P. d) ¿Cuál es el trabajo requerido para mover una carga de $3.0 \mu\text{C}$ del infinito a P?
61. Encuentre la capacitancia equivalente del grupo de capacitores que se muestra en la figura P16.61.

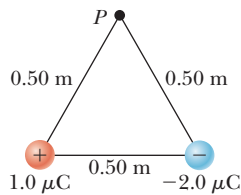


Figura P16.60

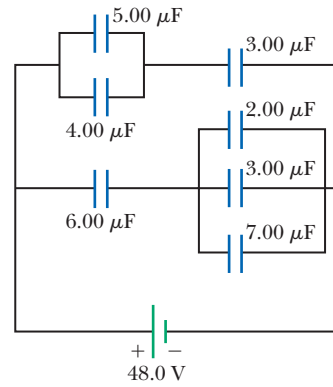


Figura P16.61

62. Un capacitor esférico consiste de un cascarón esférico conductor, de radio b y carga $-Q$ concéntrico con una esfera conductora más pequeña, con radio a y carga Q . a) Encuentre la capacitancia de este dispositivo. b) Demuestre que, conforme el radio b de la esfera exterior tiende a infinito, la capacitancia tiende al valor $a/k_e = 4\pi\epsilon_0 a$.
63. **BIO** La causa inmediata de muchas muertes es la fibrilación ventricular, un temblor descoordinado del corazón, en oposición a un latir adecuado. Un choque eléctrico en el pecho puede causar parálisis momentánea del músculo cardíaco, después del cual el corazón en ocasiones comenzará a latir nuevamente de manera organizada. Un *desfibrilador* es un dispositivo que aplica un fuerte choque eléctrico al pecho durante un tiempo de algunos milisegundos. El dispositivo contiene un capacitor de pocos microfarads, que se carga a muchos miles de volts. Electrodo llamado paletas, de aproximadamente 8 cm de ancho y recubiertos con pasta conductora, se mantienen contra el pecho a ambos lados del corazón. Sus manijas se aíslan para evitar lesiones al operador, que grita “¡Fuera!” y presiona un botón en una paleta para descargar el capacitor a través del pecho del paciente. Suponga que se entregará una energía de $300 \text{ W} \cdot \text{s}$ desde un capacitor de $30.0 \mu\text{F}$. ¿A qué diferencia de potencial se debe cargar?
64. Cuando cierto capacitor de placas paralelas lleno con aire se conecta a través de una batería, adquiere una carga de $150 \mu\text{C}$ en cada placa. Mientras se mantiene la conexión con la batería, se inserta una losa de dieléctrico y llena la región entre las placas. Esto resulta en la acumulación de una carga adicional de $200 \mu\text{C}$ sobre cada placa. ¿Cuál es la constante dieléctrica de la losa?
65. Los capacitores $C_1 = 6.0 \mu\text{F}$ y $C_2 = 2.0 \mu\text{F}$ se cargan como una combinación en paralelo a través de una batería de 250 V. Los capacitores se desconectan de la batería y uno de otro. Luego se conectan placa positiva con placa negativa, y placa negativa con placa positiva. Calcule la carga resultante sobre cada capacitor.

66. **S** Dos cargas positivas cada una de carga q se fijan en el eje y , una en $y = d$ y la otra en $y = -d$ como en la figura P16.66. Una tercera carga positiva $2q$ se encuentra en el eje x en $x = 2d$ que se libera desde el reposo. Encuentre expresiones simbólicas para a) el potencial eléctrico total debido a las dos primeras cargas en la posición de la carga $2q$, b) la energía potencial eléctrica de la carga $2q$, c) la energía cinética de la carga $2q$ después de que se haya trasladado infinitamente lejos de las otras cargas y d) la velocidad de la carga $2q$ después de que se ha movido infinitamente lejos de las otras cargas, si su masa es m .

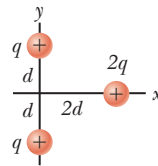


Figura P16.66

67. La esfera metálica A, de 12.0 cm de radio, porta una carga de $6.00 \mu\text{C}$, y la esfera metálica B, de 18.0 cm de radio, porta una carga de $-4.00 \mu\text{C}$. Si las dos esferas se unen mediante un hilo conductor muy largo, ¿cuál es la distribución de carga final sobre las dos esferas?

68. Un electrón se dispara con una rapidez $v_0 = 5.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ y a un ángulo $\theta_0 = -45^\circ$ entre dos placas paralelas conductoras que están separadas $D = 2.0 \text{ mm}$, como en la figura P16.68. Si la diferencia de voltaje entre las placas es $\Delta V = 100 \text{ V}$, determine a) cuán cerca, d , estará el electrón de la placa superior y b) dónde golpeará el electrón la placa superior.

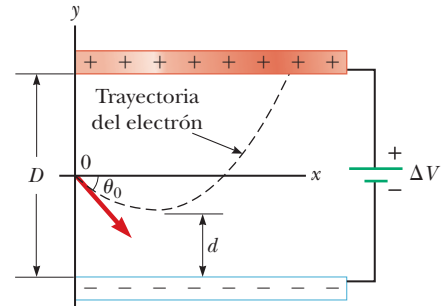
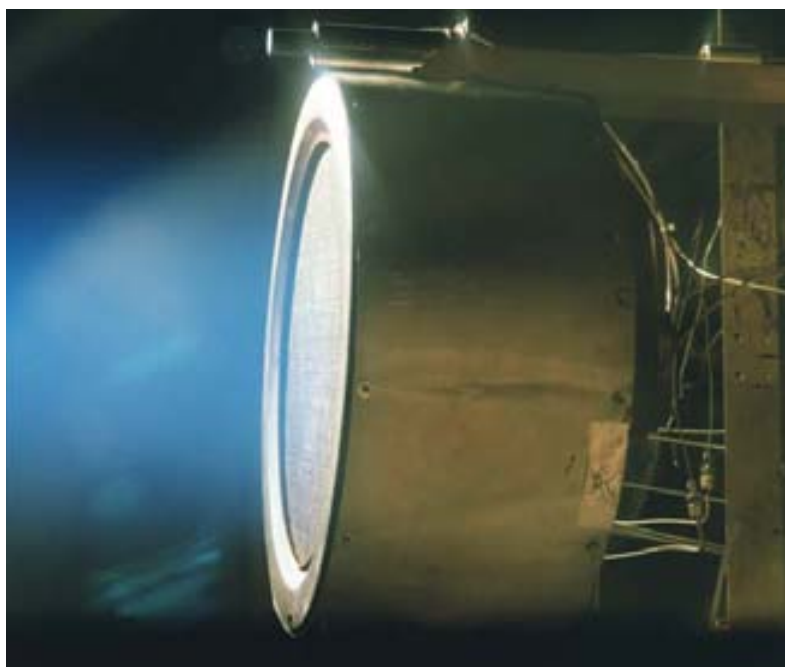


Figura P16.68

La luz azul proviene de la carga positiva de los átomos de xenón que son electrostáticamente acelerados y luego expulsados de un prototipo de un motor de iones. La corriente de iones produce 90 milinewtons de empuje de forma continua durante meses a la vez. Los electrones deben ser alimentados de nuevo en el tubo de escape para prevenir la acumulación de carga negativa. Estos motores son muy eficientes y adecuados para extender las misiones al espacio profundo.

Cortesía de la NASA Jet Propulsion Laboratory/PIA04238



17

Corriente y resistencia

- 17.1 Corriente eléctrica
- 17.2 Visión microscópica: corriente y rapidez de deriva
- 17.3 Medición de corriente y voltaje en circuitos
- 17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm
- 17.5 Variación de la resistencia con la temperatura
- 17.6 Energía eléctrica y potencia
- 17.7 Superconductores
- 17.8 Actividad eléctrica en el corazón

Muchas aplicaciones y dispositivos prácticos están basados en los principios de la electricidad estática, pero la electricidad estuvo destinada a convertirse en una parte inseparable de la vida cuando los científicos aprendieron cómo producir un flujo continuo de carga durante periodos de tiempo relativamente largos, mediante baterías. La batería o celda voltaica la inventó en 1800 el físico italiano Alessandro Volta. Las baterías proporcionan un flujo continuo de carga a bajo potencial, en contraste con los anteriores dispositivos electrostáticos que producían un pequeño flujo de carga a alto potencial durante breves periodos. Esta fuente estable de corriente eléctrica permitió a los científicos realizar experimentos para aprender cómo controlar el flujo de cargas eléctricas en los circuitos. En la actualidad, las corrientes eléctricas impulsan luces, radios, televisores, acondicionadores de aire, computadoras y refrigeradores. Encienden la gasolina en los motores de los automóviles, viajan a través de componentes miniatura que constituyen los chips de las microcomputadoras y proporcionan la potencia para otras incontables tareas invaluable.

En este capítulo definimos la corriente y analizamos algunos de los factores que contribuyen a la resistencia al flujo de carga en los conductores. También analizamos las transformaciones de energía en los circuitos eléctricos. Estos temas serán el fundamento para el trabajo adicional con circuitos en capítulos posteriores.

17.1 Corriente eléctrica

En la figura 17.1, las cargas se mueven en una dirección perpendicular a una superficie de área A . (El área podría ser el área de la sección transversal de un alambre, por ejemplo.) **La corriente es la tasa a la que fluye carga a través de esta superficie.**

Suponga que ΔQ es la cantidad de carga que fluye a través de un área A en un intervalo de tiempo Δt y que la dirección del flujo es perpendicular al área. Entonces, la **corriente promedio** I_{prom} es igual a la cantidad de carga dividida por el intervalo de tiempo:

$$I_{\text{prom}} \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [17.1a]$$

Unidad SI: coulomb/segundo (C/s) o ampere (A)

La corriente está compuesta de cargas individuales en movimiento, de modo que, para una corriente extremadamente baja, es concebible que una sola carga pueda pasar a través de un área A en un instante y que no pase carga en el instante siguiente. Entonces, todas las corrientes en esencia son promedios sobre el tiempo. Sin embargo, dado el enorme número de cargas involucradas, tiene sentido definir una corriente instantánea.

La **corriente instantánea** I es el límite de la corriente promedio conforme el intervalo de tiempo tiende a cero:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} I_{\text{prom}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [17.1b]$$

Unidad SI: coulomb/segundo (C/s) o ampere (A)

Cuando la corriente es estable, las corrientes promedio e instantánea son iguales. Observe que un ampere de corriente es equivalente a un coulomb de carga que pasa a través del área transversal en un intervalo de tiempo de 1 s.

Cuando las cargas fluyen a través de una superficie, como en la figura 17.1, pueden ser positivas, negativas o ambas. **La dirección de la corriente convencional que se usa en este libro es la dirección en que fluyen las cargas positivas.** (Esta convención histórica se originó hace aproximadamente 200 años, cuando se introdujeron las ideas de las cargas positiva y negativa.) En un conductor común como el cobre, la corriente se debe al movimiento de electrones con carga negativa, de modo que la dirección de la corriente es opuesta a la dirección de movimiento de los electrones. Por otra parte, para un haz de protones con carga positiva en un acelerador, la corriente es en la misma dirección que el movimiento de los protones. En algunos casos (gases y electrolitos, por ejemplo) la corriente es el resultado de los flujos de cargas tanto positivas como negativas. Las cargas en movimiento, ya sean positivas o negativas, se conocen como *portadores de carga*. En un metal, por ejemplo, los portadores de carga son electrones.

En electrostática, donde las cargas son estacionarias, el potencial eléctrico es el mismo en toda parte del conductor. Esto ya no es cierto para conductores que portan corriente: conforme las cargas se mueven a lo largo de un alambre, el potencial eléctrico disminuye de manera continua (excepto en el caso especial de superconductores). La disminución del potencial eléctrico significa que las cargas móviles pierden energía de acuerdo con la relación $\Delta U_{\text{cargas}} = q\Delta V$, mientras que una energía $\Delta U_{\text{cable}} = -q\Delta V$ se deposita en el alambre de conducción de corriente. (Esas expresiones se derivan de la ecuación 16.2.) Si q se toma como positivo, que corresponde a la convención de la corriente positiva, entonces $\Delta V = V_f - V_i$ es negativa ya que, en un circuito, las cargas positivas se mueven de regiones de alto potencial para las regiones de bajo potencial. Que a su vez significa $\Delta U_{\text{cargas}} = q\Delta V$ es negativo, como debe ser, porque las cargas móviles pierden energía. A menudo, sólo la magnitud que se desea, sin embargo, en cuyo caso los valores absolutos se sustituyen en q y ΔV . Si la corriente es constante, entonces dividiendo la energía por el tiempo transcurrido se obtiene la potencia suministrada a este elemento de circuito, como el filamento de un foco.

Tip 17.1 Flujo de corriente es redundante

La frase *flujo de corriente* es de uso común, pero aquí la palabra *flujo* es redundante porque corriente ya se define como un flujo (de carga). ¡Evita esta construcción!

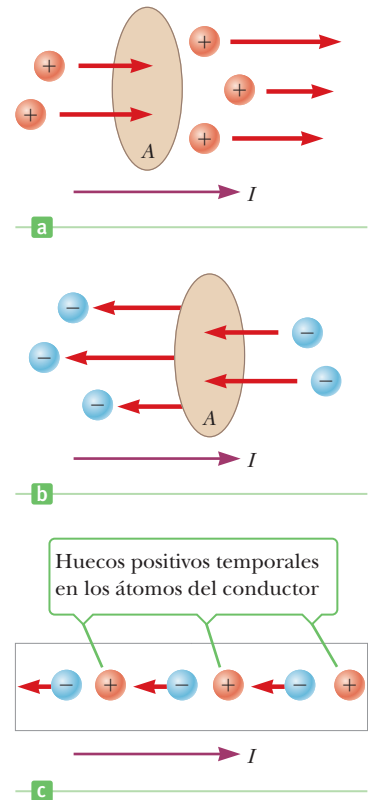


Figura 17.1 La tasa de tiempo de flujo de carga a través de la zona A es la corriente I . a) La dirección de la corriente es la misma que la del flujo de la carga positiva. b) Las cargas negativas que fluyen hacia la izquierda son equivalentes a una cantidad igual de cargas positivas que fluyen hacia la derecha. c) En un conductor, los electrones se mueven por los agujeros positivos abiertos en la red de átomos del conductor como respuesta a un potencial. Los electrones negativos que se mueven activamente a la izquierda son equivalentes a los huecos positivos que migran a la derecha.

EJEMPLO 17.1 Encender la luz**OBJETIVO** Aplicar el concepto de corriente.**PROBLEMA** La cantidad de carga que pasa a través del filamento de cierto foco en 2.00 s es 1.67 C. Determine **a)** la corriente promedio en el foco y **b)** el número de electrones que pasan a través del filamento en 5.00 s. **c)** Si la corriente es suministrada por una batería de 12.0 V, ¿cuál es la energía total entregada a los filamentos del foco? ¿Cuál es la potencia promedio?**ESTRATEGIA** Sustituya en la ecuación 17.1a para el inciso a), luego multiplique la respuesta por el tiempo dado en el inciso b) para obtener la carga total que pasa en dicho tiempo. La carga total es igual al número N de electrones que pasan a través del circuito multiplicado por la carga por electrón. Para obtener la energía entregada al foco, se multiplica la diferencia de potencial, ΔV , por la carga total. Divida la energía entre el tiempo para obtener la potencia media.**SOLUCIÓN****a)** Calcule la corriente promedio en el foco.

Sustituya la carga y el tiempo en la ecuación 17.1a:

$$I_{\text{prom}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1.67 \text{ C}}{2.00 \text{ s}} = 0.835 \text{ A}$$

b) Determine el número de electrones que pasan a través del filamento en 5.00 s.El número total N de electrones por la carga por electrón es igual a la carga total, $I_{\text{prom}} \Delta t$:

$$(1) \quad Nq = I_{\text{prom}} \Delta t$$

Sustituya y resuelva para N :

$$N(1.60 \times 10^{-19} \text{ C/electrón}) = (0.835 \text{ A})(5.00 \text{ s})$$

$$N = 2.61 \times 10^{19} \text{ electrones}$$

c) ¿Cuál es la energía total entregada a los filamentos del foco? ¿Cuál es la potencia promedio?

Multiplique la diferencia de potencial por la carga total para obtener la energía transferida al filamento:

$$(2) \quad \Delta U = q\Delta V = (1.67 \text{ C})(12.0 \text{ V}) = 20.0 \text{ J}$$

Divida la energía por el tiempo transcurrido para el cálculo de la potencia media:

$$P_{\text{prom}} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{20.0 \text{ J}}{2.00 \text{ s}} = 10.0 \text{ W}$$

COMENTARIOS Al desarrollar la solución, fue importante usar unidades que garantizaran la certeza de las ecuaciones, como la ecuación (1). Observe el enorme número de electrones que pasan a través de un punto dado en un circuito típico. Se utilizaron magnitudes en el cálculo de las energías en la ecuación (2). Técnicamente, los portadores de carga son electrones con carga negativa pasando de un menor potencial a un mayor potencial, por lo que el cambio en su energía es $\Delta U_{\text{carga}} = q\Delta V = (-1.67 \text{ C})(+12.0 \text{ V}) = -20.0 \text{ J}$, una pérdida de energía que se entrega al filamento, $\Delta U_{\text{fil}} = -\Delta U_{\text{carga}} = +20.0 \text{ J}$. La energía y la potencia, calculadas aquí usando las definiciones del capítulo 16, se abordarán en la sección 17.6.**PREGUNTA 17.1** ¿Es posible tener una corriente instantánea de $e/2$ por segundo? Explique. ¿La corriente promedio puede tomar este valor?**EJERCICIO 17.1** Una batería de 9.00 V suministra una corriente de 1.34 A al filamento del foco de una linterna de bolsillo. **a)** ¿Cuánta carga pasa por el filamento en 2.00 min? **b)** ¿Cuántos electrones pasan por el filamento? Calcule **c)** la energía entregada a la lámpara durante ese tiempo y **d)** la potencia suministrada por la batería.**RESPUESTAS** a) 161 C b) 1.01×10^{21} electrones c) $1.45 \times 10^3 \text{ J}$ d) 12.1 W**Examen rápido****17.1** Considere cargas positivas y negativas que se mueven horizontalmente a través de cuatro regiones en la figura 17.2. Clasifique las magnitudes de las corrientes en estas cuatro regiones, de menor a mayor. (I_a es la corriente en la figura 17.2a, I_b la corriente en la figura 17.2b, etcétera.) **a)** I_b, I_a, I_c, I_d **b)** I_a, I_c, I_b, I_d **c)** I_c, I_a, I_d, I_b **d)** I_d, I_b, I_c, I_a **e)** I_a, I_b, I_c, I_d **f)** Ninguna de éstas

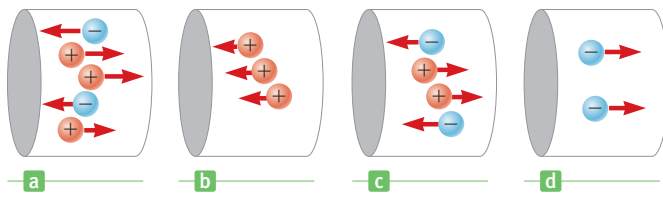


Figura 17.2
(Examen rápido 17.1)

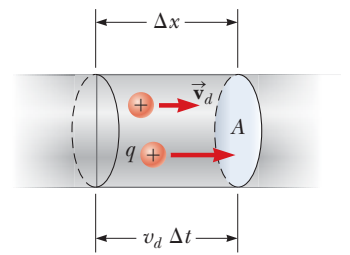


Figura 17.3 Una sección de un conductor uniforme con área transversal A . Los portadores de carga se mueven con una velocidad v_d y la distancia que recorren en el tiempo Δt está dada por $\Delta x = v_d \Delta t$. El número de portadores de carga móviles en la sección de longitud Δx está dado por $nAv_d \Delta t$, donde n es el número de portadores móviles por unidad de volumen.

17.2 Visión microscópica: corriente y velocidad de deriva

Las corrientes macroscópicas se pueden relacionar con el movimiento de los portadores de carga microscópicos que constituyen la corriente. Es evidente que la corriente depende de la rapidez promedio de los portadores de carga en la dirección de la corriente, el número de portadores de carga por unidad de volumen y el tamaño de la carga portada por cada uno.

Considere partículas con carga idéntica que se mueven en un conductor con área transversal A (figura 17.3). El volumen de un elemento de longitud Δx del conductor es $A \Delta x$. Si n representa el número de portadores de carga móviles por unidad de volumen, el número de portadores en el elemento de volumen es $nA \Delta x$. Por lo tanto, la carga móvil ΔQ en este elemento es

$$\Delta Q = \text{número de portadores} \times \text{carga por portador} = (nA \Delta x)q$$

donde q es la carga sobre cada portador. Si los portadores se mueven con una rapidez promedio constante llamada **velocidad de deriva** v_d , la distancia que recorren en el intervalo de tiempo Δt es $\Delta x = v_d \Delta t$. Entonces, podemos escribir

$$\Delta Q = (nAv_d \Delta t)q$$

Si ambos lados de esta ecuación se dividen por Δt y se toma el límite conforme Δt tiende a cero, vemos que la corriente en el conductor es

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_d A \quad [17.2]$$

Para comprender el significado de la velocidad de deriva, considere un conductor en el cual los portadores de carga son electrones libres. Si el conductor está aislado, estos electrones experimentan movimiento aleatorio similar al movimiento de las moléculas de un gas. La rapidez de deriva normalmente es mucho menor que la rapidez promedio de los electrones libres entre colisiones con los átomos fijos del conductor. Cuando entre las terminales del conductor se aplica una diferencia de potencial (por decir, con una batería), se establece un campo eléctrico en el conductor, lo que crea una fuerza eléctrica sobre los electrones y por lo tanto una corriente. En realidad, los electrones no simplemente se mueven en líneas rectas a lo largo del conductor. En vez de ello, experimentan colisiones repetidas con los átomos del metal y el resultado es un complicado movimiento en zigzag con sólo una pequeña rapidez de deriva promedio a lo largo del alambre (figura activa 17.4). La energía transferida de los electrones a los átomos metálicos durante una colisión aumenta la energía vibratoria de los átomos y causa un aumento correspondiente en la temperatura del conductor. Sin embargo, a pesar de las colisiones, los electrones se mueven lentamente a lo largo del conductor en una dirección opuesta a \vec{E} con la rapidez de deriva \vec{v}_d .

Aunque los electrones se mueven con velocidad promedio \vec{v}_d , las colisiones con átomos causan cambios bruscos y momentáneos de dirección.

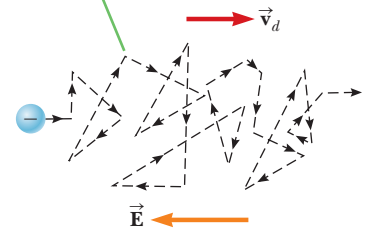


Figura activa 17.4 Representación esquemática del movimiento en zigzag de un portador de carga en un conductor. Los cambios agudos en dirección se deben a colisiones con átomos en el conductor. Observe que la velocidad de deriva \vec{v}_d es opuesta a la dirección del campo eléctrico.

■ EJEMPLO 17.2 Velocidad de deriva de electrones

OBJETIVO Calcular una velocidad de deriva y compárela con la rapidez rms de un gas de electrones.

PROBLEMA Un alambre de cobre, con área transversal de $3.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, porta una corriente de 10.0 A. **a)** Si supone que cada átomo de cobre contribuye con un electrón libre al metal, determine la velocidad de deriva de los electrones en este alambre. **b)** Use el modelo de gas ideal para comparar la velocidad de deriva con la rapidez rms aleatoria que tendría un electrón a 20.0°C . La densidad del cobre es 8.92 g/cm^3 y su masa atómica es 63.5 u.

(continúa)

ESTRATEGIA Todas las variables en la ecuación 17.2 se conocen, excepto n , el número de portadores de carga libres por unidad de volumen. Puede determinar n al recordar que un mol de cobre contiene un número de Avogadro (6.02×10^{23}) de átomos y cada átomo continúa con un portador de carga al metal. El volumen de un mol se puede encontrar a partir de la densidad conocida del cobre y su masa atómica. La masa atómica es la misma, numéricamente, que el número de gramos en un mol de la sustancia.

SOLUCIÓN

a) Determine la velocidad de deriva de los electrones.

Calcule el volumen de un mol de cobre a partir de su densidad y su masa atómica:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{63.5 \text{ g}}{8.92 \text{ g/cm}^3} = 7.12 \text{ cm}^3$$

Convierta el volumen de cm^3 a m^3 :

$$7.12 \text{ cm}^3 \left(\frac{1 \text{ m}}{10^2 \text{ cm}} \right)^3 = 7.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Divida el número de Avogadro (el número de electrones en un mol) entre el volumen por mol para obtener la densidad de número:

$$\begin{aligned} n &= \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ electrones/mol}}{7.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}} \\ &= 8.46 \times 10^{28} \text{ electrones/m}^3 \end{aligned}$$

Resuelva la ecuación 17.2 para la velocidad de deriva y sustituya:

$$\begin{aligned} v_d &= \frac{I}{nqA} \\ &= \frac{10.0 \text{ C/s}}{(8.46 \times 10^{28} \text{ electrones/m}^3)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(3.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} \\ v_d &= 2.46 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

b) Encuentre la velocidad rms de un gas de electrones a 20.0°C .

Aplique la ecuación 10.18:

Convierta la temperatura a la escala Kelvin y sustituya valores:

$$\begin{aligned} v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}} \\ v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(293 \text{ K})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} \\ &= 1.15 \times 10^5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

COMENTARIOS La velocidad de deriva de un electrón en un alambre es muy pequeña, sólo de aproximadamente un mil millonésimo de su rapidez térmica aleatoria.

PREGUNTA 17.2 Verdadero o Falso: La velocidad de deriva en un alambre de una composición dada es inversamente proporcional a la densidad de número de portadores de carga.

EJERCICIO 17.2 ¿Qué corriente en un alambre de cobre, con área transversal de $7.50 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, resultaría en una rapidez de deriva igual a $5.00 \times 10^{-4} \text{ m/s}$?

RESPUESTA 5.08 A

Tip 17.2 Los electrones están en todas partes en el circuito

Los electrones no tienen que viajar del interruptor de luz al foco para que éste opere. Los electrones que ya están en el filamento del foco se mueven en respuesta al campo eléctrico que establece la batería. Además, la batería *no* proporciona electrones al circuito; proporciona *energía* a los electrones existentes.

El ejemplo 17.2 muestra que las rapidezces de deriva por lo general son muy pequeñas. De hecho, la velocidad de deriva es mucho menor que la velocidad promedio entre colisiones. Los electrones que viajen a $2.46 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, como en el ejemplo, ¡tardarían aproximadamente 68 minutos en recorrer 1 m! En vista de esta baja rapidez, ¿por qué un foco se enciende casi de inmediato cuando se activa un interruptor? Piense en el flujo de agua a través de una tubería. Si una gota de agua se fuerza en un extremo de una tubería que ya está llena con agua, una gota debe empujarse afuera por el otro extremo de la tubería. Aunque a una gota individual puede tomarle mucho tiempo en pasar por la tubería, un flujo iniciado en un extremo produce un flujo similar en el otro extremo muy rápidamente. Otra analogía familiar es el movimiento de una cadena de bicicleta. Cuando la estrella mueve un eslabón, los otros eslabones se mueven todos más o menos de manera inmediata, aun cuando a un eslabón dado le tome algo de tiempo dar una vuelta completa. En un conductor, el campo eléctrico impulsa a los electrones libres a viajar con una velocidad

cercana a la de la luz, de modo que, cuando activa un interruptor de luz, ¡el mensaje para que los electrones comiencen a moverse a través del alambre (el campo eléctrico) llega a ellos con una rapidez del orden de 10^8 m/s!

Examen rápido

- 17.2** Suponga que un alambre portador de corriente tiene un área transversal que gradualmente se vuelve más pequeña a lo largo del alambre, de modo que el alambre tiene la forma de un cono truncado muy largo. ¿Cómo varía la velocidad de deriva a lo largo del alambre? a) Baja conforme la sección transversal se vuelve cada vez menor. b) Aumenta conforme la sección transversal se vuelve cada vez menor. c) No cambia. d) Se necesita más información.

17.3 Medición de corriente y voltaje en circuitos

Para estudiar la corriente eléctrica en los circuitos, es necesario entender cómo medir corrientes y voltajes.

El circuito que se muestra en la figura 17.5a es un dibujo del circuito real necesario para medir la corriente en el ejemplo 17.1. La figura 17.5b muestra una figura estilizada llamada diagrama de circuito que representa el circuito real de la figura 17.5a. Este circuito sólo consiste en una batería y un foco. La palabra *circuito* significa “malla cerrada de algún tipo alrededor de la cual circula corriente”. La batería bombea carga a través del foco y alrededor de la malla. No fluiría carga sin una trayectoria conductora completa, desde la terminal positiva de la batería hacia un lado del foco, con salida del otro lado y a través del alambre conductor de cobre de vuelta a la terminal negativa de la batería. Las cantidades más importantes que caracterizan cómo funciona el foco en diferentes situaciones son la corriente I en el foco y la diferencia de potencial ΔV a través del foco. Para medir la corriente en éste, coloque un amperímetro, el dispositivo para medir corriente, en la línea con el foco, de modo que no haya trayectoria para que la corriente evite al medidor; toda la carga que pasa a través del foco también pasa a través del amperímetro. El voltímetro mide la diferencia de potencial, o voltaje, entre las dos terminales del filamento del foco. Si se usan dos medidores simultáneamente, como en la figura 17.5a, podemos remover el voltímetro y ver si su presencia afecta la lectura de corriente. La figura 17.5c muestra un multímetro digital, un dispositivo conveniente, con una lectura digital, que se puede usar para medir voltaje, corriente o resistencia. Una ventaja de usar un multímetro digital como voltímetro es que por lo general no afectará la corriente porque un medidor digital tiene una enorme resistencia al flujo de carga en el modo voltímetro.

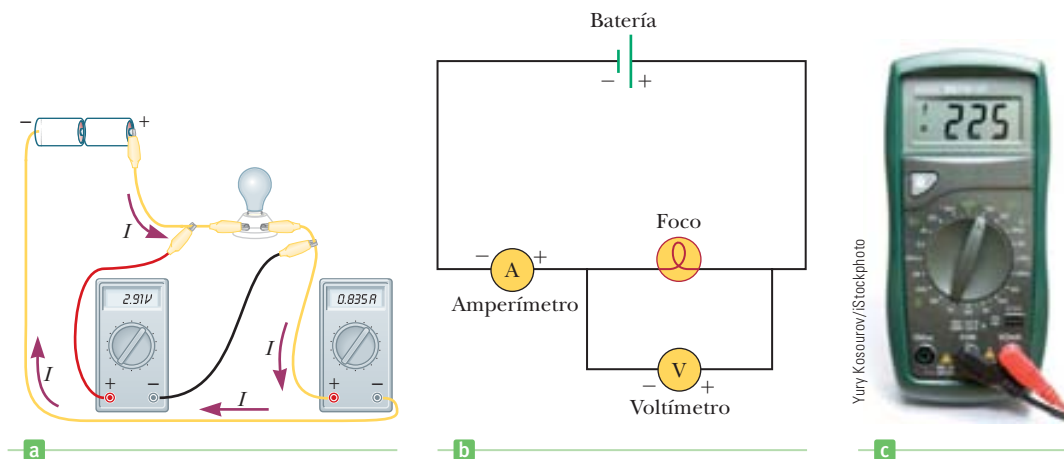


Figura 17.5 a) Bosquejo de un circuito real que se utiliza para medir la corriente en el foco de una linterna y la diferencia de potencial a través de él. b) Diagrama esquemático del circuito que se muestra en a). c) Se puede usar un multímetro digital para medir tanto corriente como diferencia de potencial.

En este punto, usted puede medir la corriente como función del voltaje (una curva $I - \Delta V$) de varios dispositivos en el laboratorio. Todo lo que necesita es una fuente de voltaje variable (una batería ajustable) capaz de suministrar diferencias de potencial de aproximadamente -5 V a $+5 \text{ V}$, un foco, un resistor, algunos alambres y mordazas de cocodrilo y un par de multímetros. Asegúrese de comenzar siempre sus mediciones en las escalas más altas del multímetro (por decir, 10 A y 1000 V) y aumentar la sensibilidad una escala a la vez para obtener la máxima precisión sin sobrecargar los medidores. (Aumentar la sensibilidad significa bajar la corriente o voltaje máximos que lee la escala.) Observe que el medidor se debe conectar con la polaridad adecuada con respecto a la fuente de voltaje, como se muestra en la figura 17.5b. Finalmente, siga cuidadosamente las instrucciones de su profesor para evitar dañar los medidores e incurrir en una elevada multa de laboratorio.

Examen rápido

17.3 Observe los cuatro “circuitos” que se muestran en la figura 17.6 y seleccione aquel que encenderá el foco.

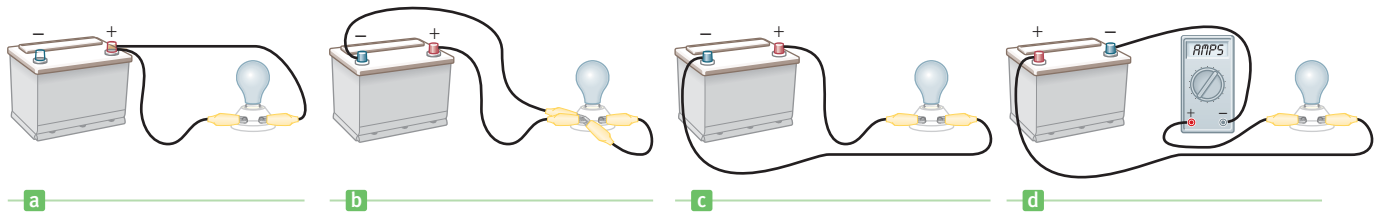


Figura 17.6 (Examen rápido 17.3)

17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm

Resistencia y ley de Ohm

Cuando un voltaje (diferencia de potencial) ΔV se aplica a través de las terminales de un conductor metálico, como en la figura 17.7, tenemos que la corriente en el conductor es proporcional al voltaje aplicado; $I \propto \Delta V$. Si la proporcionalidad se sostiene, puede escribir $\Delta V = IR$, donde la constante de proporcionalidad R se llama *resistencia* del conductor. De hecho, la **resistencia** se define como la razón del voltaje a través del conductor, a la corriente que porta:

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I} \quad [17.3]$$

La resistencia tiene unidades SI de volts por amperio, llamada **ohm** (Ω). Si una diferencia de potencial de 1 V a través de un conductor produce una corriente de 1 A , la resistencia del conductor es 1Ω . Por ejemplo, si un aparato electrodoméstico conectado a una fuente de 120 V porta una corriente de 6 A , su resistencia es 20Ω .

Los conceptos de corriente eléctrica, voltaje y resistencia se pueden comparar con el flujo de agua en un río. Conforme el agua fluye colina abajo en un río de ancho y profundidad constantes, la tasa de flujo (corriente de agua) depende de lo inclinado de la pendiente del río y de los efectos de rocas, el banco del río y otros obstáculos. La diferencia de voltaje es análoga a la inclinación y la resistencia a las obstrucciones. Con base en esta analogía, parece razonable que aumentar el voltaje aplicado a un circuito debe aumentar la corriente en el circuito, tal como aumentar la inclinación de la pendiente aumenta la corriente de agua. Además, aumentar las obstrucciones en la trayectoria del río reducirá la corriente de agua, tal como aumentar la resistencia en un circuito bajará la corriente eléctrica. La resistencia en un circuito surge debido a colisiones entre los electrones que portan la corriente con átomos fijos dentro del conductor. Estas colisiones inhiben el movimiento de las cargas en forma muy parecida a una fuerza de fricción. Para muchos mate-

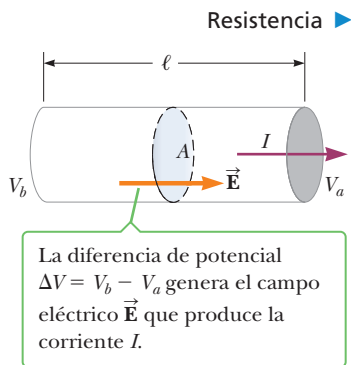


Figura 17.7 Conductor uniforme de longitud ℓ y área de sección transversal A . La corriente I en el conductor es proporcional a la diferencia de potencial o de manera equivalente al campo eléctrico y la longitud.

riales, incluidos la mayoría de los metales, los experimentos demuestran que **la resistencia permanece constante sobre un amplio rango de voltajes o corrientes aplicados**. Este enunciado se conoce como **ley de Ohm**, en honor de Georg Simon Ohm (1789-1854), quien fue el primero en realizar un estudio sistemático de la resistencia eléctrica.

La ley de Ohm está dada por

$$\Delta V = IR \quad [17.4]$$

donde R se entiende es independiente de ΔV , la caída de potencial a través del resistor, e I , la corriente en el resistor. Continuaremos con el uso de esta forma tradicional de la ley de Ohm cuando analicemos circuitos eléctricos. Un **resistor** es un conductor que proporciona una resistencia específica en un circuito eléctrico. El símbolo para un resistor en diagramas de circuito es una línea en zigzag:

La ley de Ohm es una relación empírica válida sólo para algunos materiales. Los materiales que obedecen la ley de Ohm y por lo tanto tienen una resistencia constante sobre un amplio rango de voltajes, se dice que son **óhmicos**. Los materiales que tienen resistencia que cambia con el voltaje o corriente son **no óhmicos**. Los materiales óhmicos tienen una relación corriente-voltaje lineal sobre un gran rango de voltajes aplicados (figura 17.8a). Los materiales no óhmicos tienen una relación corriente-voltaje no lineal (figura 17.8b). El **diodo**, un elemento de circuito que actúa como una válvula de una vía para la corriente, es un dispositivo semiconductor común que es no óhmico. Su resistencia es pequeña para corrientes en una dirección (ΔV positiva) y grande para corrientes en la dirección inversa (ΔV negativa). La mayoría de los dispositivos electrónicos modernos, como los transistores, tienen relaciones corriente-voltaje no lineales; su operación depende de las formas particulares en que violan la ley de Ohm.

■ Examen rápido

17.4 En la figura 17.8b, ¿la resistencia del diodo a) aumenta o b) disminuye conforme aumenta el voltaje positivo ΔV ?

17.5 Se requiere que todos los dispositivos eléctricos tengan placas de identificación que especifiquen sus características eléctricas. La placa en cierta plancha de vapor afirma que la plancha porta una corriente de 6.00 A cuando se conecta a una fuente de 1.20×10^2 V. ¿Cuál es la resistencia de la plancha de vapor? a) 0.050 Ω b) 20.0 Ω c) 36.0 Ω

Resistividad

Los electrones no se mueven en trayectorias en línea recta a través de un conductor. En vez de ello, experimentan repetidas colisiones con los átomos del metal. Considere un conductor con un voltaje aplicado a través de sus extremos. Un electrón gana rapidez conforme lo acelera la fuerza eléctrica asociada con el campo eléctrico interno, lo que le proporciona una velocidad en la dirección opuesta a la del campo eléctrico. Una colisión con un átomo “aleatoriza” la velocidad del electrón y la reduce en la dirección opuesta al campo. Entonces el proceso se repite a sí mismo. En conjunto, estas colisiones afectan un poco el electrón, conforme lo haría una fuerza de fricción interna. Este paso es el origen de la resistencia de un material.

La resistencia de un conductor óhmico aumenta con la longitud, lo cual tiene sentido porque los electrones que pasan a través deben experimentar más colisiones en un conductor más largo. Un área transversal menor también aumenta la resistencia de un conductor, tal como una tubería más pequeña frena el fluido que se mueve a través suyo. La resistencia, entonces, es proporcional a la longitud del conductor ℓ e inversamente proporcional a su área transversal A ,

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad [17.5]$$

donde la constante de proporcionalidad, ρ , se llama **resistividad** del material. Todo material tiene una resistividad característica que depende de su estructura electrónica y su temperatura. Los buenos conductores eléctricos tienen resistividades muy bajas y los buenos



© Bettmann/COBIS

Georg Simon Ohm (1789-1854)

Profesor de bachillerato en Colonia y más tarde profesor en Munich, Ohm formuló el concepto de resistencia y descubrió las proporcionalidades que se expresan en la ecuación 17.5.



Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman

Varios tipos de resistores utilizados para muchas aplicaciones en circuitos electrónicos.

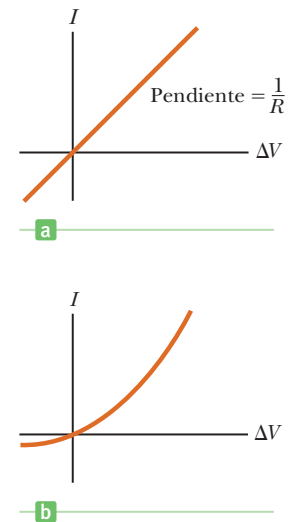


Figura 17.8 a) Curva corriente-voltaje para un material óhmico. La curva es lineal y la pendiente proporciona la resistencia del conductor. b) Curva corriente-voltaje no lineal para un diodo semiconductor. Este dispositivo no obedece la ley de Ohm.

Tabla 17.1 Resistividades y coeficientes de temperatura de la resistividad para varios materiales (a 20 °C)

Material	Resistividad ($\Omega \cdot \text{m}$)	Coefficiente de temperatura de la resistividad [(°C) ⁻¹]
Plata	1.59×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Cobre	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Oro	2.44×10^{-8}	3.4×10^{-3}
Aluminio	2.82×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Tungsteno	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Hierro	10.0×10^{-8}	5.0×10^{-3}
Platino	11×10^{-8}	3.92×10^{-3}
Plomo	22×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Nicromo ^a	150×10^{-8}	0.4×10^{-3}
Carbono	3.5×10^{-5}	-0.5×10^{-3}
Germanio	0.46	-48×10^{-3}
Silicio	640	-75×10^{-3}
Vidrio	10^{10} – 10^{14}	
Caucho duro	$\approx 10^{13}$	
Azufre	10^{15}	
Cuarzo (fundido)	75×10^{16}	

^aAleación de níquel-cromo de uso común en elementos calefactores.

aislantes tienen resistividades muy altas. La tabla 17.1 menciona las resistividades de varios materiales a 20 °C. Puesto que los valores de la resistencia están en ohms, los valores de resistividad deben estar en ohm-metros ($\Omega \cdot \text{m}$).

■ FÍSICA APLICADA 17.1 Poca iluminación de los focos viejos

Conforme un foco envejece, ¿por qué brinda menos luz que cuando está nuevo?

EXPLICACIÓN Existen dos razones para el comportamiento de los focos, una eléctrica y una óptica, pero ambas se relacionan con el mismo fenómeno que ocurre dentro del foco. El filamento de foco viejo está hecho de un alambre de tungsteno que se mantuvo a una alta temperatura durante muchas horas. Las altas temperaturas evaporan el tungsteno del filamento, lo que disminuye su radio. A partir de $R = \rho\ell/A$ vemos que un área transversal disminuida conduce a un aumento en la resistencia del filamento. Este aumento en

la resistencia con la edad significa que el filamento portará menos corriente para el mismo voltaje aplicado. Con menos corriente en el filamento, hay menos salida de luz y el filamento brilla con menos intensidad.

A la alta temperatura operativa del filamento, los átomos de tungsteno salen de su superficie, en gran medida como las moléculas de agua se evaporan de un charco de agua. Los átomos se alejan por corrientes de convección en el gas del foco y se depositan en la superficie interior del vidrio. Con el tiempo, el vidrio se vuelve menos transparente debido al recubrimiento de tungsteno, que disminuye la cantidad de luz que pasa a través del vidrio. ■

■ EJEMPLO 17.3 La resistencia del alambre de nicromo

OBJETIVO Combinar el concepto de resistividad con la ley de Ohm.

PROBLEMA a) Calcule la resistencia por unidad de longitud de un alambre de nicromo calibre 22 de 0.321 mm de radio. b) Si una diferencia de potencial de 10.0 V se mantiene a través de una longitud de 1.00 m de alambre de nicromo, ¿cuál es la corriente en el alambre? c) El alambre se funde y vuelve a formar con el doble de su longitud original. Encuentre la nueva resistencia R_N como múltiplo de la anterior resistencia R_O .

ESTRATEGIA El inciso a) requiere sustitución en la ecuación 17.5, después de calcular el área transversal, mientras que el inciso b) es cuestión de sustituir en la ley de Ohm. El inciso c) requiere algo de álgebra. La idea es tomar la expresión para la nueva resistencia y sustituir expresiones para ℓ_N y A_N , las nuevas longitud y área transversal, en términos de las antiguas longitud y sección transversal. Para la sustitución del área, recuerde que los volúmenes de los alambres anterior y nuevo son iguales.

SOLUCIÓN

a) Calcule la resistencia por unidad de longitud.

Encuentre el área de sección transversal del alambre:

$$A = \pi r^2 = \pi(0.321 \times 10^{-3} \text{ m})^2 = 3.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Obtenga la resistividad del nicromo en la tabla 17.1, resuelva la ecuación 17.5 para R/ℓ y sustituya:

$$\frac{R}{\ell} = \frac{\rho}{A} = \frac{1.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}}{3.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 4.6 \Omega/\text{m}$$

b) Encuentre la corriente en un segmento de 1.00 m del alambre, si la diferencia de potencial de él es 10.0 V.

Sustituya los valores dados en la ley de Ohm:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{10.0 \text{ V}}{4.6 \Omega} = 2.2 \text{ A}$$

c) Si el alambre se funde y vuelve a formarse de nuevo con el doble de su longitud original, encuentre la nueva resistencia como múltiplo de la anterior.

Encuentre el área nueva A_N en términos del área anterior A_O y use el hecho de que el volumen no cambia y $\ell_N = 2\ell_O$:

$$V_N = V_O \rightarrow A_N \ell_N = A_O \ell_O \rightarrow A_N = A_O(\ell_O/\ell_N)$$

$$A_N = A_O(\ell_O/2\ell_O) = A_O/2$$

Sustituya en la ecuación 17.5:

$$R_N = \frac{\rho \ell_N}{A_N} = \frac{\rho(2\ell_O)}{(A_O/2)} = 4 \frac{\rho \ell_O}{A_O} = 4R_O$$

COMENTARIOS A partir de la tabla 17.1, la resistividad del nicromo es de aproximadamente 100 veces la del cobre, un buen conductor típico. Por lo tanto, un alambre de cobre del mismo radio tendría una resistencia por unidad de longitud de sólo $0.052 \Omega/\text{m}$, y una longitud de 1.00 m de alambre de cobre del mismo radio portaría la misma corriente (2.2 A) con un voltaje aplicado de sólo 0.115 V.

Debido a su resistencia a la oxidación, el nicromo se usa con frecuencia para elementos calefactores en tostadores, planchas y calentadores eléctricos.

PREGUNTA 17.3 ¿Sustituir el nicromo con cobre resultaría en mayor o menor corriente?

EJERCICIO 17.3 ¿Cuál es la resistencia de una longitud de 6.0 m de alambre de nicromo que tenga un radio de 0.321 mm? ¿Cuánta corriente porta cuando se conecta a una fuente de 120 V?

RESPUESTAS 28 Ω ; 4.3 A

■ Examen rápido

17.6 Suponga que un alambre eléctrico se sustituye con uno que tiene cada dimensión lineal duplicada (es decir, la longitud y el radio tienen el doble de sus valores originales). ¿El alambre ahora tiene a) más resistencia que antes, b) menos resistencia o c) la misma resistencia?

17.5 Variación de la resistencia con la temperatura

La resistividad ρ , y por lo tanto la resistencia, de un conductor depende de algunos factores. Uno de los más importantes es la temperatura del metal. Para la mayoría de los metales, la resistividad aumenta con el incremento de temperatura. Esta correlación se puede entender del siguiente modo: conforme la temperatura del material aumenta, sus átomos constituyentes vibran con amplitudes mayores. Como resultado, los electrones encuentran más difícil llegar a dichos átomos, tal como es más difícil avanzar a través de una sala abarrotada cuando la gente se mueve que cuando está quieta de pie. La creciente dispersión de electrones con la temperatura creciente resulta en aumento de resistividad. Técnicamente, la expansión térmica también afecta la resistencia; sin embargo, éste es un efecto muy pequeño.

Sobre un rango limitado de temperaturas, la resistividad de la mayoría de los metales aumenta de manera lineal con el incremento de temperatura, de acuerdo con la expresión

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad [17.6]$$



En una antigua lámpara incandescente con filamento de carbono, la resistencia eléctrica por lo general es de 10Ω , pero cambia con la temperatura.

donde ρ es la resistividad a alguna temperatura T (en grados Celsius), ρ_0 es la resistividad a alguna temperatura de referencia T_0 (por lo general se considera como 20°C) y α es un parámetro llamado **coeficiente de temperatura de la resistividad**. En la tabla 17.1 se proporcionan los coeficientes de temperatura para varios materiales. Los valores negativos interesantes de α para semiconductores surgen porque dichos materiales poseen portadores de carga enlazados débilmente, que se liberan para moverse y contribuir a la corriente conforme se eleva la temperatura.

Debido a que la resistencia de un conductor con una sección transversal uniforme es proporcional a la resistividad, de acuerdo con la ecuación 17.5 ($R = \rho l/A$), la variación de resistencia con la temperatura se puede escribir

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad [17.7]$$

Mediciones precisas de temperatura a menudo se realizan usando esta propiedad, como se muestra mediante el siguiente ejemplo.

■ EJEMPLO 17.4 Un termómetro con resistencia de platino

OBJETIVO Aplicar la dependencia de la resistencia a la temperatura.

PROBLEMA Un termómetro de resistencia, que mide temperatura al medir el cambio en resistencia de un conductor, está hecho de platino y tiene una resistencia de 50.0Ω a 20.0°C . **a)** Cuando el dispositivo se sumerge en un recipiente que contiene indio fundido, su resistencia aumenta a 76.8Ω . A partir de esta información, encuentre el punto de fusión del indio. **b)** El indio se calienta todavía más hasta que alcanza una temperatura de 235°C . ¿Cuál es la razón de la nueva corriente en el platino con la corriente I_{pf} en el punto de fusión?

ESTRATEGIA Para el inciso a), resuelva la ecuación 17.7 para $T - T_0$, obtenga α para el platino en la tabla 17.1 y sustituya las cantidades conocidas. Para el inciso b), use la ley de Ohm en la ecuación 17.7.

SOLUCIÓN

a) Determine el punto de fusión del indio.

Resuelva la ecuación 17.7 para $T - T_0$:

$$T - T_0 = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{76.8 \Omega - 50.0 \Omega}{[3.92 \times 10^{-3} (\text{C}^{-1})][50.0 \Omega]}$$

Sustituya $T_0 = 20.0^\circ\text{C}$ y obtenga el punto de fusión del indio:

$$T = 157^\circ\text{C}$$

b) Determine la razón de la nueva corriente con la anterior cuando la temperatura se eleva de 157°C a 235°C .

Escriba la ecuación 17.7, con R_{pf} y T_{pf} , la resistencia y temperatura en el punto de fusión, en sustitución de R_0 y T_0 .

$$R = R_{\text{pf}}[1 + \alpha(T - T_{\text{pf}})]$$

De acuerdo con la ley de Ohm, $R = \Delta V/I$ y $R_{\text{pf}} = \Delta V/I_{\text{pf}}$. Sustituya estas expresiones en la ecuación 17.7:

$$\frac{\Delta V}{I} = \frac{\Delta V}{I_{\text{pf}}} [1 + \alpha(T - T_{\text{pf}})]$$

Cancele las diferencias de voltaje, invierta las dos expresiones y luego divida ambos lados por I_{pf} :

$$\frac{I}{I_{\text{pf}}} = \frac{1}{1 + \alpha(T - T_{\text{pf}})}$$

Sustituya $T = 235^\circ\text{C}$, $T_{\text{pf}} = 157^\circ\text{C}$ y el valor para α , y obtenga la razón deseada:

$$\frac{I}{I_{\text{pf}}} = 0.766$$

COMENTARIOS Conforme la temperatura se eleva, aumentan tanto la rapidez rms de los electrones en el metal y la resistencia.

PREGUNTA 17.4 ¿Qué ocurre con la rapidez de deriva de los electrones conforme la temperatura se eleva? **a)** Se vuelve mayor. **b)** Se vuelve menor. **c)** Permanece invariable.

EJERCICIO 17.4 Suponga que un alambre hecho de una aleación desconocida y que tiene una temperatura de 20.0°C, porta una corriente de 0.450 A. A 52.0°C la corriente es 0.370 A para la misma diferencia de potencial. Encuentre el coeficiente de temperatura de la resistividad de la aleación.

RESPUESTA $6.76 \times 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$

17.6 Energía eléctrica y potencia

Si se usa una batería para establecer una corriente eléctrica en un conductor, la energía química almacenada en la batería se transforma continuamente en energía cinética de los portadores de carga. Esta energía cinética se pierde rápidamente como resultado de colisiones entre los portadores de carga y átomos fijos en el conductor, lo que causa un aumento en la temperatura del conductor. De esta forma la energía química almacenada en la batería se transforma continuamente en energía térmica.

Para entender el proceso de transferencia de energía en un circuito simple, considere una batería con terminales conectadas a un resistor (figura activa 17.9; recuerde que la terminal positiva de la batería siempre está a mayor potencial). Ahora imagine seguir una cantidad de carga positiva ΔQ alrededor del circuito, desde el punto A, a través de la batería y el resistor, y de vuelta a A. El punto A es un punto de referencia que está aterrizado (el símbolo de tierra es $\text{---}\equiv$) y su potencial se considera como cero. Conforme la carga ΔQ se mueve de A a B a través de la batería, la energía potencial eléctrica del sistema aumenta por la cantidad $\Delta Q \Delta V$ y la energía potencial química en la batería disminuye por la misma cantidad. (Recuerde del capítulo 16 que $\Delta EP = q \Delta V$.) Sin embargo, conforme la carga se mueve de C a D a través del resistor, pierde esta energía potencial eléctrica durante colisiones con átomos en el resistor. En el proceso, la energía se transforma a energía interna correspondiente a movimiento vibratorio creciente de dichos átomos. Puesto que se puede ignorar la resistencia muy pequeña de los alambres conectores, no ocurre transformación de energía para las trayectorias BC y DA. Cuando la carga regresa al punto A, el resultado neto es que parte de la energía química en la batería se entregó al resistor y provocó su aumento de temperatura.

La carga ΔQ pierde energía $\Delta Q \Delta V$ mientras pasa a través del resistor. Si Δt es el tiempo que tarda la carga en pasar a través del resistor, la tasa instantánea a la que pierde energía potencial eléctrica es

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Delta V = I \Delta V$$

donde I es la corriente en el resistor y ΔV es la diferencia de potencial a través de él. Desde luego, la carga vuelve a recuperar esta energía cuando pasa a través de la batería, a costa de la energía química en la misma. La tasa a la que el sistema pierde energía potencial conforme la carga pasa a través del resistor es igual a la tasa a la que el sistema gana energía interna en el resistor. Por lo tanto, la potencia P , que representa la tasa a la que se entrega energía al resistor, es

$$P = I \Delta V$$

[17.8] ◀ Potencia

Aunque este resultado se desarrolló al considerar una batería que entrega energía a un resistor, la ecuación 17.8 se puede usar para determinar la potencia transferida de una fuente de voltaje a cualquier dispositivo que porte una corriente I y tenga una diferencia de potencial ΔV entre sus terminales.

Con la ecuación 17.8 y el hecho de que $\Delta V = IR$ para un resistor, la potencia entregada al resistor se puede expresar en las formas alternativas

$$P = I^2 R = \frac{\Delta V^2}{R}$$

[17.9] ◀ Potencia entregada a un resistor

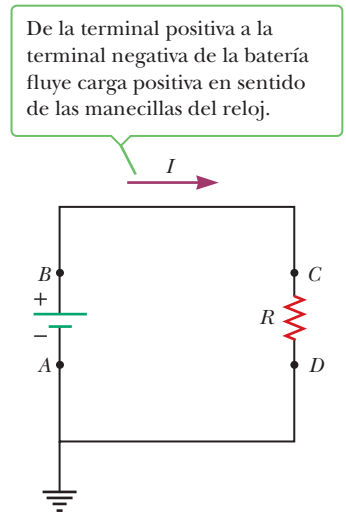


Figura activa 17.9
Un circuito que consiste en una batería y una resistencia R . El punto A está aterrizado.

Tip 17.3 Concepciones erróneas acerca de la corriente

La corriente *no* "se usa" en un resistor. En vez de ello, parte de la energía que las cargas reciben de la fuente de voltaje se entrega al resistor, con lo que se calienta y hace que radie. Además, la corriente no baja cuando pasa a través del resistor: es la misma a través del circuito.

Cuando I está en amperes, ΔV en volts y R en ohms, la unidad SI de potencia es el watt (que se introdujo en el capítulo 5). La potencia entregada a un conductor de resistencia R con frecuencia se le conoce como una *pérdida* I^2R . Observe que la ecuación 17.9 sólo se aplica a resistores y no a dispositivos no óhmicos como focos y diodos.

Sin importar las formas en que use la energía eléctrica en su casa, a final de cuentas usted paga por ella o se arriesga a quedarse sin electricidad. La unidad de energía que usan las compañías eléctricas para calcular el consumo, el **kilowatt-hora**, se define en términos de la unidad de potencia y la cantidad de tiempo que se suministra. Un kilowatt-hora (kWh) es la energía convertida o consumida en 1 h a la tasa constante de 1 kW. Tiene el valor numérico

$$1 \text{ kWh} = (10^3 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3.60 \times 10^6 \text{ J} \quad [17.10]$$

En un recibo eléctrico, la cantidad de electricidad utilizada en un periodo dado por lo general se menciona en múltiplos de kilowatt-horas.

FÍSICA APLICADA 17.2 Falla de focos

¿Por qué los focos fallan con tanta frecuencia inmediatamente después de que se encienden?

EXPLICACIÓN Una vez que el interruptor se cierra, a través del foco se aplica la línea de voltaje. Conforme el voltaje se aplica a través del filamento frío, cuando el foco se enciende por primera vez, la resistencia del filamento es baja, la corriente es alta y una cantidad relativamente

grande de potencia se entrega al foco. Este pico de corriente al comienzo de la operación es la razón por la que los focos fallan con frecuencia inmediatamente después que se encienden. Conforme el filamento se calienta, su resistencia se eleva y la corriente disminuye. Como resultado, la potencia entregada al foco disminuye y éste tiene menos probabilidad de quemarse. ■

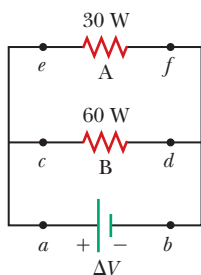


Figura 17.10 (Examen rápido 17.8)

Examen rápido

17.7 Un voltaje ΔV se aplica a través de las terminales de un alambre calefactor de nicromo que tiene un área transversal A y longitud L . El mismo voltaje se aplica a través de las terminales de un segundo alambre calefactor de nicromo que tiene un área transversal A y longitud $2L$. ¿Cuál alambre se calienta más? a) El alambre más corto. b) El alambre más largo. c) Se necesita más información.

17.8 Para los dos resistores que se muestran en la figura 17.10, clasifique las corrientes en los puntos del a al f , de mayor a menor. a) $I_a = I_b > I_e = I_f > I_c = I_d$
b) $I_a = I_b > I_c = I_d > I_e = I_f$ c) $I_e = I_f > I_c = I_d > I_a = I_b$

17.9 Dos resistores, A y B, se conectan en un circuito en serie con una batería. La resistencia de A es el doble que la de B. ¿Cuál resistor disipa más potencia? a) El resistor A. b) El resistor B. c) Se necesita más información.

17.10 El diámetro del alambre A es mayor que el diámetro del alambre B, pero sus longitudes y resistividades son idénticas. Para una diferencia de voltaje dada a través de las terminales, ¿cuál es la relación entre P_A y P_B , la potencia disipada para los alambres A y B, respectivamente? a) $P_A = P_B$ b) $P_A < P_B$ c) $P_A > P_B$

EJEMPLO 17.5 El costo de iluminar su vida

OBJETIVO Aplicar el concepto de potencia eléctrica y calcular el costo del consumo de potencia usando kilowatt-horas.

PROBLEMA Un circuito proporciona una corriente máxima de 20.0 A a un voltaje operativo de 1.20×10^2 V. a) ¿Cuántos focos de 75 W pueden operar con esta fuente de voltaje? b) A \$0.120 por kilowatt-hora, ¿cuánto cuesta operar estos focos durante 8.00 h?

ESTRATEGIA Encuentre la potencia necesaria con $P = I\Delta V$, luego divida por 75.0 W por foco para obtener el número total de focos. Para encontrar el costo, convierta la potencia a kilowatts y multiplique por el número de horas, luego multiplique por el costo por kilowatt-hora.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el número de focos que pueden iluminarse.

Sustituya en la ecuación 17.8 para obtener la potencia total:

$$P_{\text{total}} = I \Delta V = (20.0 \text{ A})(1.20 \times 10^2 \text{ V}) = 2.40 \times 10^3 \text{ W}$$

Divida la potencia total por la potencia por foco para obtener el número de focos:

$$\text{Número de focos} = \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{foco}}} = \frac{2.40 \times 10^3 \text{ W}}{75.0 \text{ W}} = 32.0$$

b) Calcule el costo de esta electricidad para un día de 8.00 h.

Encuentre la energía en kilowatt-horas:

$$\begin{aligned} \text{Energía} &= Pt = (2.40 \times 10^3 \text{ W}) \left(\frac{1.00 \text{ kW}}{1.00 \times 10^3 \text{ W}} \right) (8.00 \text{ h}) \\ &= 19.2 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Multiplique la energía por el costo por kilowatt-hora:

$$\text{Costo} = (19.2 \text{ kWh})(\$0.12/\text{kWh}) = \$2.30$$

COMENTARIOS Esta cantidad de energía puede corresponder a lo que consume una pequeña oficina en un día de trabajo, si toma en cuenta todos los requerimientos de potencia (no sólo la iluminación). En general, los dispositivos resistivos pueden tener salida de potencia variable, dependiendo de cómo se alambre el circuito. Aquí se especificaron las salidas de potencia, por lo que tales consideraciones fueron innecesarias.

PREGUNTA 17.5 Si considera cuán calientes se ponen las partes de un foco incandescente durante su operación, adivine qué fracción de la energía emitida por un foco incandescente está en la forma de luz visible. a) 10% b) 50% c) 80%

EJERCICIO 17.5 a) ¿Cuántas luces de árbol de Navidad, que extraen 5.00 W de potencia cada una, se podrían encender en un circuito que opera a $1.20 \times 10^2 \text{ V}$ y proporciona 15.0 A de corriente? b) Encuentre el costo de operar una de tales series 24.0 h al día durante la época navideña (dos semanas), a la tasa de $\$0.12/\text{kWh}$.

RESPUESTAS a) 3.60×10^2 focos b) $\$72.60$

■ EJEMPLO 17.6 Potencia convertida por un calentador eléctrico

OBJETIVO Calcular una salida de potencia eléctrica y vincularla con su efecto sobre el ambiente, a través de la primera ley de la termodinámica.

PROBLEMA Un calentador eléctrico se opera al aplicar una diferencia de potencial de 50.0 V a un alambre de nicromo con resistencia total de 8.00 Ω . a) Encuentre la corriente transportada por el alambre y la clasificación de potencia del calentador. b) Con este calentador, ¿cuánto tardaría calentar 2.50×10^3 moles de gas diatómico (por ejemplo, una mezcla de oxígeno y nitrógeno, o aire) de unos helados 10.0 °C a 25.0 °C? Considere que el calor específico molar a volumen constante del aire es $\frac{5}{2}R$. c) ¿Cuántos kilowatts-hora de electricidad se utilizan durante el tiempo calculado en b) y a qué precio, si el costo es $\$0.12$ por kilowatt-hora?

ESTRATEGIA Para el inciso a), encuentre la corriente con la ley de Ohm y sustituya en la expresión para potencia. El inciso b) es un proceso isovolumétrico, de modo que la energía térmica proporcionada por el calentador va toda al cambio en energía térmica, ΔU . Calcule esta cantidad con la primera ley de la termodinámica y divida entre la potencia para obtener el tiempo. Encontrar el número de kilowatts-hora utilizados, requiere de una simple técnica de conversión de unidades. Multiplicando por el costo por kilowatt se obtiene el costo total de operar el calentador por un tiempo dado.

SOLUCIÓN

a) Calcule la corriente y la salida de potencia.

Aplique la ley de Ohm para obtener la corriente:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{50.0 \text{ V}}{8.00 \Omega} = 6.25 \text{ A}$$

Sustituya en la ecuación 17.9 para encontrar la potencia:

$$P = I^2 R = (6.25 \text{ A})^2 (8.00 \Omega) = 313 \text{ W}$$

b) ¿Cuánto tarda en calentar el gas?

Calcule la transferencia de energía térmica a partir de la primera ley. Observe que $W = 0$ porque el volumen no cambia.

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U = nC_v \Delta T \\ &= (2.50 \times 10^3 \text{ mol}) \left(\frac{5}{2} \cdot 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \right) (298 \text{ K} - 283 \text{ K}) \\ &= 7.79 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

Divida la energía térmica entre la potencia para obtener el tiempo:

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{7.79 \times 10^5 \text{ J}}{313 \text{ W}} = 2.49 \times 10^3 \text{ s}$$

(continúa)

c) Calcule los kilowatt-hora utilizados y el costo.

Convierta la energía a kilowatt-hora, advirtiendo que $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$:

$$U = (7.79 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{s}) \left(\frac{1.00 \text{ kW}}{1.00 \times 10^3 \text{ W}} \right) \left(\frac{1.00 \text{ h}}{3.60 \times 10^3 \text{ s}} \right) = 0.216 \text{ kWh}$$

Multiplique el costo por $\$0.12/\text{kWh}$ para obtener el costo total de operación:

$$\text{Costo} = (0.216 \text{ kWh})(\$0.12/\text{kWh}) = \$0.026$$

COMENTARIOS El número de moles de gas que se proporciona aquí es aproximadamente lo que se encontraría en una recámara. Calentar el aire con este calentador de espacio requiere de aproximadamente 40 minutos. Sin embargo, el cálculo no toma en cuenta pérdidas por conducción. Recuerde que una pared de concreto de 20 cm de grueso, como se calculó en el capítulo 11, permite la pérdida de más de 2 megajoules por hora mediante conducción!

PREGUNTA 17.6 Si el alambre del calentador se sustituye con un alambre de resistencia más baja, ¿el tiempo requerido para calentar el gas a) no cambia, b) aumenta o c) disminuye?

EJERCICIO 17.6 Un calentador de agua caliente se clasifica a $4.50 \times 10^3 \text{ W}$ y opera a $2.40 \times 10^2 \text{ V}$. a) Encuentre la resistencia en el elemento calefactor y la corriente. b) ¿Cuánto tarda en calentar 125 L de agua, de 20.0 a 50.0°C , si desprecia la conducción y otras pérdidas? c) ¿Cuál es el costo a razón de $\$0.12/\text{kWh}$?

RESPUESTAS a) 12.8 Ω , 18.8 A b) $3.49 \times 10^3 \text{ s}$ c) $\$0.52$

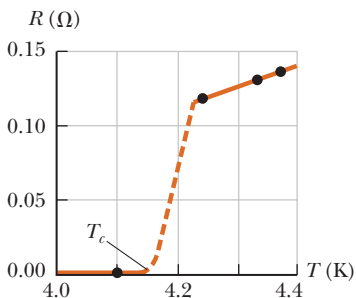


Figura 17.11 Resistencia frente a temperatura para una muestra de mercurio (Hg). La gráfica sigue la de un metal normal por encima de la temperatura crítica T_c . La resistencia cae a cero a la temperatura crítica, que es 4.2 K para el mercurio y permanece en cero para temperaturas más bajas.

Tabla 17.2 Temperaturas críticas para varios superconductores

Material	T_c (K)
Zn	0.88
Al	1.19
Sn	3.72
Hg	4.15
Pb	7.18
Nb	9.46
Nb ₃ Sn	18.05
Nb ₃ Ge	23.2
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92
Bi-Sr-Ca-Cu-O	105
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	134

17.7 Superconductores

Hay una clase de metales y compuestos con resistencias que caen virtualmente a *cero* abajo de cierta temperatura T_c llamada *temperatura crítica*. Estos materiales se conocen como **superconductores**. La gráfica de resistencia frente a temperatura para un superconductor sigue la de un metal normal a temperaturas por encima de T_c (figura 17.11). Sin embargo, cuando la temperatura está en o por debajo de T_c , la resistencia súbitamente cae a cero. Este fenómeno lo descubrió en 1911 el físico danés H. Kamerlingh Onnes cuando él y un estudiante graduado trabajaban con mercurio, que es un superconductor por abajo de 4.1 K. Mediciones recientes demostraron que las resistividades de los superconductores por debajo de T_c son menores que $4 \times 10^{-25} \Omega \cdot \text{m}$, alrededor de 10^{17} veces menor que la resistividad del cobre y en la práctica considerado como cero.

En la actualidad se conocen miles de superconductores, incluidos metales comunes como aluminio, estaño, plomo, zinc e indio. La tabla 17.2 menciona las temperaturas críticas de varios superconductores. El valor de T_c es sensible a la composición química, presión y estructura cristalina. De manera muy interesante el cobre, la plata y el oro, que son excelentes conductores, no muestran superconductividad.

Una característica verdaderamente notable de los superconductores es que, una vez que la corriente se establece en ellos, persiste *sin algún voltaje aplicado* (porque $R = 0$). De hecho, ¡se observó que corrientes estacionarias en rizados superconductores persistieron durante años sin decaimiento aparente!

Un importante desarrollo en física, que creó mucha excitación en la comunidad científica, fue el descubrimiento de superconductores de alta temperatura con base de óxido de cobre. La excitación comenzó con una publicación en 1986 por parte de J. Georg Bednorz y K. Alex Müller, científicos del IBM Zurich Research Laboratory en Suiza, en la que reportaron evidencia para superconductividad a una temperatura cercana a 30 K en un óxido de bario, lantano y cobre. Bednorz y Müller recibieron el Premio Nobel de física en 1987 por su importante descubrimiento. El descubrimiento fue notable porque la temperatura crítica era significativamente mayor que la de cualquier superconductor anteriormente conocido. Poco después, se investigó una nueva familia de compuestos y la actividad investigadora en el campo de la superconductividad avanzó vigorosamente. A principios de 1987, grupos en la Universidad de Alabama en Huntsville y la Universidad de Houston anunciaron el descubrimiento de superconductividad a aproximadamente 92 K en un óxido de itrio, bario y cobre (YBa₂Cu₃O₇). A finales de 1987, equipos de científicos de Japón y Estados Unidos reportaron superconductividad a 105 K en un óxido de bismuto,

estroncio, calcio y cobre. Más recientemente, científicos reportaron superconductividad a temperaturas tan altas como 150 K en un óxido que contiene mercurio. La búsqueda de novedosos materiales superconductores continúa, con la esperanza de algún día obtener un material superconductor a temperatura ambiente. Esta investigación es importante tanto por razones científicas como por aplicaciones prácticas. Un superconductor cerámico que levita un imán permanente se muestra en la figura 17.12.

Una importante y útil aplicación es la construcción de imanes superconductores en los cuales la intensidad de los campos magnéticos sean aproximadamente 10 veces mayor que la de los mejores electroimanes normales. Tales imanes se consideran como un medio para almacenar energía. La idea de usar líneas eléctricas superconductoras para transmitir electricidad de manera eficiente también recibe seria consideración. Se han construido modernos dispositivos electrónicos superconductores que consisten en dos delgadas películas superconductoras, separadas por un delgado aislante. Entre estos dispositivos están los magnetómetros (dispositivos medidores de campo magnético) y varios dispositivos microondas.

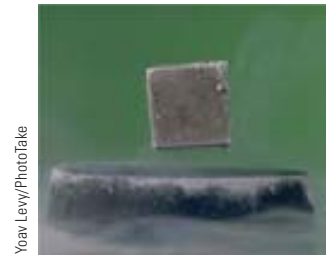


Figura 17.12 Un pequeño imán permanente flota libremente sobre un disco cerámico hecho de un superconductor enfriado con nitrógeno líquido. El superconductor tiene resistencia eléctrica cero y expulsa cualquier campo magnético aplicado desde el interior del superconductor creando una imagen especular de los polos magnéticos del imán permanente. Este “efecto Meissner” resulta en la levitación magnética del imán permanente.

17.8 Actividad eléctrica en el corazón **BIO**

Electrocardiogramas

Toda acción que involucra los músculos del cuerpo se inicia mediante actividad eléctrica. Los voltajes producidos por la acción muscular en el corazón son particularmente importantes para los médicos. Pulsos de voltaje hacen que el corazón lata y las ondas de excitación eléctrica que recorren el corazón, asociadas con el latido cardiaco, se conducen a través del cuerpo vía los fluidos corporales. Estos pulsos de voltaje son lo suficientemente grandes como para detectarse mediante un equipo de monitoreo adecuado unido a la piel. Un voltímetro sensible, que hace buen contacto eléctrico con la piel mediante contactos unidos con pasta conductora, se puede usar para medir los pulsos cardiacos, que por lo general son del orden de 1 mV en la superficie del cuerpo. Los pulsos de voltaje se pueden registrar en un instrumento llamado **electrocardiógrafo** y el patrón que se registra con este instrumento se llama **electrocardiograma** (ECG). Para entender la información contenida en un patrón ECG, es necesario describir primero los principios subyacentes concernientes a la actividad eléctrica en el corazón.

La aurícula derecha del corazón contiene un conjunto especializado de fibras musculares llamadas nodo SA (sinoauricular) que inician el latido cardiaco (figura 17.13). Los impulsos eléctricos que se originan en estas fibras gradualmente se dispersan de célula a célula a lo largo de los músculos auriculares derecho e izquierdo, lo que causa su contracción. El pulso que pasa a través de las células musculares con frecuencia se llama *onda de despolarización* debido a su efecto sobre células individuales. Si una célula muscular individual se examina en su estado de reposo, sobre su superficie se encontraría una distribución de carga eléctrica de doble capa, como se muestra en la figura 17.14a. El impulso generado por el nodo SA momentánea y localmente permite que la carga positiva en el exterior de la célula fluya hacia adentro y neutralice la carga negativa en la capa interior. Este efecto cambia la distribución de carga de la célula con la que se muestra en la figura 17.14b. Una vez que la onda de despolarización pasa a través de una célula muscular cardiaca individual, la célula recupera la distribución de carga de estado en reposo (positivo afuera, negativo adentro)

APLICACIÓN

Electrocardiogramas

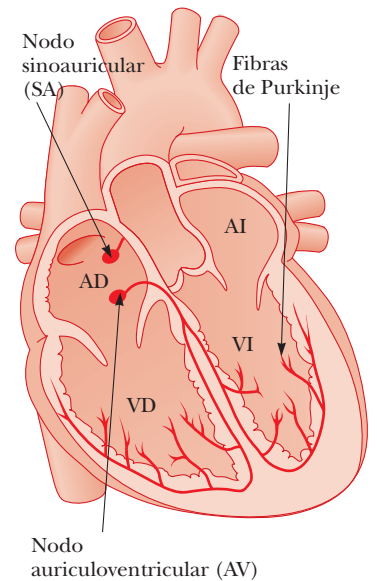


Figura 17.13 Sistema de conducción eléctrica del corazón humano. (AD: aurícula derecha; AI: aurícula izquierda; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo.)

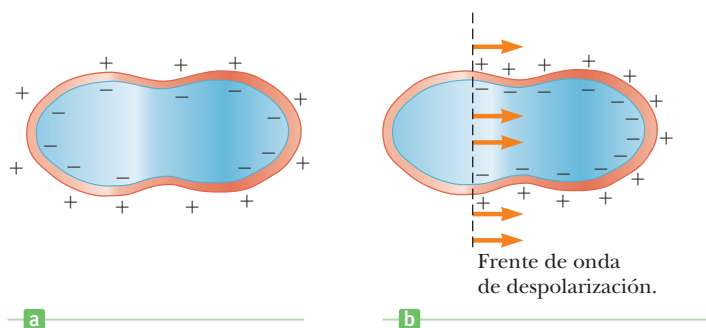


Figura 17.14 a) Distribución de carga de una célula muscular en la aurícula antes de que una onda de despolarización pase a través de la célula. b) Distribución de carga conforme pasa la onda.

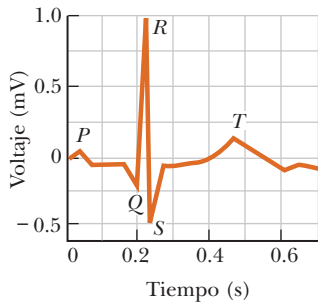


Figura 17.15 Un ECG de respuesta para un corazón normal.

BIO APLICACIÓN

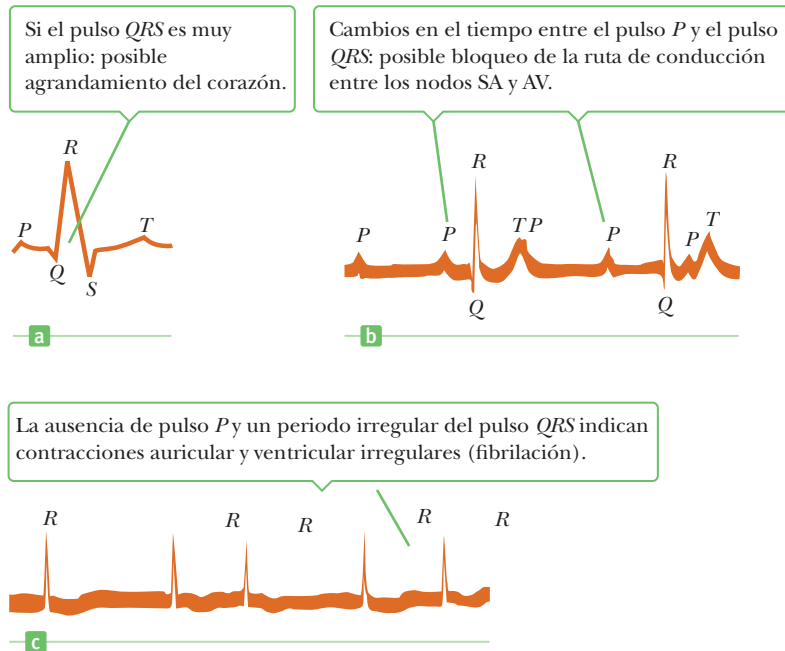
Marcapasos cardiacos

que se muestra en la figura 17.14a aproximadamente en 250 ms. Cuando el impulso llega al nodo auriculoventricular (AV) (figura 17.13), los músculos de la aurícula comienzan a relajarse y el pulso se dirige hacia los músculos ventriculares mediante el nodo AV. Los músculos de los ventrículos se contraen conforme la onda de despolarización se dispersa a través de los ventrículos a lo largo de un grupo de fibras llamadas *fibras de Purkinje*. Entonces los ventrículos se relajan después que el pulso pasa a través de ellos. En este punto, el nodo SA de nuevo se dispara y el ciclo se repite.

En la figura 17.15 se muestra un bosquejo de la actividad eléctrica registrada en un ECG para un latido de un corazón normal. El pulso que se indica con *P* ocurre justo antes que la aurícula comience a contraerse. El pulso *QRS* ocurre en el ventrículo justo antes que se contraiga y el pulso *T* ocurre cuando las células en los ventrículos comienzan a recuperarse. En la figura 17.16 se muestran los ECG para un corazón anormal. La porción *QRS* del patrón que se muestra en la figura 17.16a es más ancha que lo normal, lo que indica que el paciente puede tener un corazón agrandado. (¿Por qué?) La figura 17.16b indica que no hay una relación constante entre el pulso *P* y el pulso *QRS*. Esto sugiere un bloqueo en la ruta de conducción eléctrica entre los nodos SA y AV que resulta en que aurículas y ventrículos laten de manera independiente e ineficiente bombeo del corazón. Finalmente, la figura 17.16c muestra una situación donde no hay pulso *P* y un espaciamiento irregular entre los pulsos *QRS*. Esto es sintomático de contracción auricular irregular, que se llama *fibrilación*. En esta condición, las contracciones auriculares y ventriculares son irregulares.

Como se mencionó anteriormente, el nodo sinoauricular dirige el corazón a latir al ritmo adecuado, por lo general aproximadamente 72 latidos por minuto. Sin embargo, enfermedades o el proceso de envejecimiento pueden dañar el corazón y lentificar su latido, y tal vez sea necesario un auxiliar médico en forma de *marcapasos cardíaco* unido al corazón. Este dispositivo eléctrico del tamaño de una caja de cerillos, implantado bajo la piel, tiene una terminal que se conecta a la pared del ventrículo derecho. Los pulsos de esta terminal estimulan al corazón para que mantenga su propio ritmo. En general, un marcapasos se diseña para producir pulsos a una tasa de aproximadamente 60 por minuto, ligeramente menor que el número normal de latidos por minuto, pero suficientes para mantener la vida. Los circuitos consisten en un capacitor que se carga hasta cierto voltaje a partir de una batería

Figura 17.16 ECG anormales.



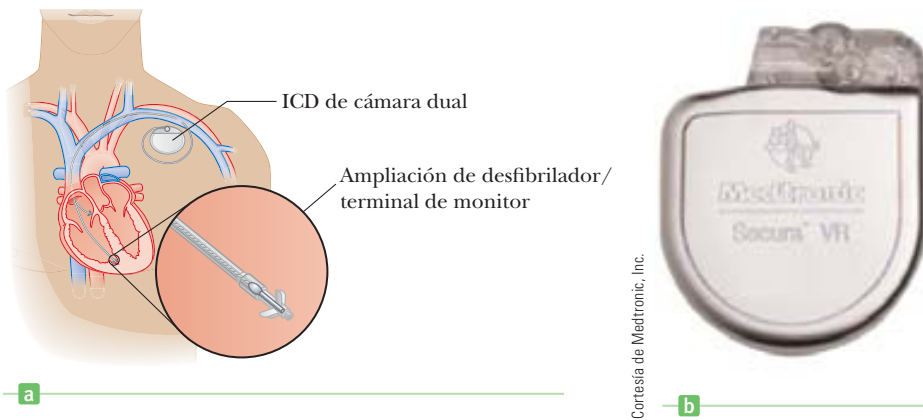


Figura 17.17 a) ICD de cámara dual con terminales en el corazón. Una terminal monitorea y estimula la aurícula derecha y la otra monitorea y estimula el ventrículo derecho. b) ICD Medtronic de cámara dual.

de litio y luego se descarga. El diseño del circuito es tal que, si el corazón late de manera normal, el capacitor no carga completamente y no envía pulsos al corazón.

Una sala de emergencias en el pecho

En junio de 2001, una operación al vicepresidente estadounidense Dick Cheney enfocó la atención en el progreso para el tratamiento de los problemas cardiacos con pequeños dispositivos eléctricos implantados. Llamado adecuadamente “una sala de emergencias en el pecho” por el médico que atendió a Cheney, los dispositivos llamados desfibriladores cardioversores implantables (**ICD**, por sus siglas en inglés) pueden monitorear, registrar y procesar lógicamente las señales cardiacas y luego suministrar diferentes señales correctivas a corazones que laten muy lentamente, muy rápidamente o de manera irregular. ¡Los ICD incluso pueden monitorear y enviar señales a aurículas y ventrículos de manera independiente! La figura 17.17a muestra un bosquejo de un ICD con terminales conductoras que se implantan en el corazón. La figura 17.17b muestra un ICD real con cámara dual encapsulado en titanio.

Los ICD más recientes son sofisticados dispositivos capaces de muchas funciones:

1. monitorear las cámaras auriculares y ventriculares para diferenciar entre arritmias auriculares y ventriculares potencialmente mortales, que requieren una regulación provocada
2. almacenamiento aproximado de media hora de señales cardiacas que un médico puede leer fácilmente
3. reprogramarse con facilidad mediante una vara magnética externa
4. realizar complicados análisis y comparaciones de señales
5. suministrar señales rítmicas repetitivas de 0.25 a 10 V para acelerar o frenar un corazón que funciona mal o un pulso de alto voltaje de aproximadamente 800 V para detener la condición potencialmente mortal de fibrilación ventricular, en la que el corazón se agita rápidamente en lugar de latir (las personas que experimentaron tal sacudida de alto voltaje dicen que se siente como una patada o una bomba que estalla en el pecho)
6. ajustar automáticamente el número de pulsos rítmicos por minuto para coincidir con la actividad del paciente

Los ICD se impulsan mediante baterías de litio y tienen tiempos de vida implantados de cuatro a seis años. En la tabla 17.3 se proporcionan algunas propiedades básicas de estos ICD ajustables. En la tabla, *taquicardia* significa “latido cardiaco rápido” y *bradicardia* significa “latido cardiaco lento”. Un factor clave para el desarrollo de pequeños implantes eléctricos que funcionan como desfibriladores es el desarrollo de capacitores con capacitancia relativamente grande ($125 \mu\text{F}$) y pequeño tamaño físico.

BIO APLICACIÓN

Desfibriladores cardioversores implantables

Tabla 17.3 Propiedades de los desfibriladores cardioversores implantables

Especificaciones físicas	
Masa (g)	85
Tamaño (cm)	$7.3 \times 6.2 \times 1.3$ (aproximadamente cinco monedas de dólar de plata apiladas)
Ritmo antitaquicardia	
	ICD entrega un estallido de pulsos de baja energía críticamente cronometrados
Número de estallidos	1–15
Longitud de ciclo de estallido (ms)	200–552
Número de pulsos por estallido	2–20
Amplitud de pulso (V)	7.5 o 10
Ancho de pulso (ms)	1.0 o 1.9
Desfibrilación de alto voltaje	
Energía de pulso (J)	37 almacenados/33 entregados
Amplitud de pulso (V)	801
Ritmo de bradicardia	
	Un ICD de cámara dual puede entregar de manera estable pulsos repetitivos tanto a la aurícula como al ventrículo
Frecuencia base (latidos/minuto)	40–100
Amplitud de pulso (V)	0.25–7.5
Ancho de pulso (ms)	0.05, 0.1–1.5, 1.9

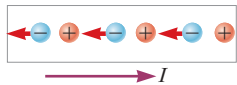
Nota: Para más información, visita www.photoncd.com/specs.html.

■ RESUMEN

17.1 Corriente eléctrica

La **corriente eléctrica promedio** I en un conductor se define como

$$I_{\text{prom}} \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [17.1a]$$



Corriente es la tasa de flujo de carga a través de una superficie.

donde ΔQ es la carga que pasa a través de una sección transversal del conductor en el tiempo Δt . La unidad SI de corriente es el **ampere** (A); $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$. Por convención, la dirección de la corriente es la dirección de flujo de la carga positiva.

La **corriente instantánea** I es el límite de la corriente promedio conforme el intervalo de tiempo tiende a cero:

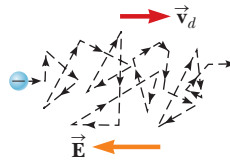
$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} I_{\text{prom}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [17.1b]$$

17.2 Visión microscópica: corriente y velocidad de deriva

La corriente en un conductor se relaciona con el movimiento de los portadores de carga mediante

$$I = nqv_d A \quad [17.2]$$

donde n es el número de portadores de carga móviles por unidad de volumen, q es la carga de cada portador, v_d es la velocidad de deriva de las cargas y A es el área transversal del conductor.

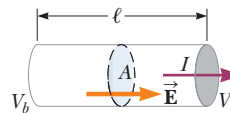


La corriente I en un conductor está relacionada con el número de densidad n de los conductores de carga, la carga q por conductor, la velocidad de deriva \vec{v}_d y el área de sección transversal A del conductor.

17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm

La **resistencia** R de un conductor se define como la razón de la diferencia de potencial a través del conductor, a la corriente en él:

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I} \quad [17.3]$$



La diferencia de potencial ΔV es proporcional a la corriente, I .

Las unidades SI de resistencia son volts por ampere, u **ohms** (Ω); $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$.

La **ley de Ohm** describe muchos conductores para los cuales el voltaje aplicado es directamente proporcional a la corriente que causa. La constante de proporcionalidad es la resistencia:

$$\Delta V = IR \quad [17.4]$$

Si un conductor tiene longitud ℓ y área transversal A , su **resistencia** es

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad [17.5]$$

donde ρ es una propiedad intrínseca del conductor llamada **resistividad eléctrica**. La unidad SI de resistividad es el **ohmetro** ($\Omega \cdot \text{m}$).

17.5 Variación de la resistencia con la temperatura

Sobre un rango limitado de temperaturas, la resistividad de un conductor varía con la temperatura de acuerdo con la expresión

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad [17.6]$$

donde α es el **coeficiente de temperatura de la resistividad** y ρ_0 es la resistividad a alguna temperatura de referencia T_0 (que por lo general se considera como 20°C).

La resistencia de un conductor varía con la temperatura de acuerdo con la expresión

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad [17.7]$$

17.6 Energía eléctrica y potencia

Si a través de un dispositivo eléctrico se mantiene una diferencia de potencial ΔV , la **potencia**, o tasa a la que se suministra energía al dispositivo, es

$$P = I\Delta V \quad [17.8]$$

Puesto que la diferencia de potencial a través de un resistor es $\Delta V = IR$, la **potencia entregada a un resistor** se puede expresar como

$$P = I^2R = \frac{\Delta V^2}{R} \quad [17.9]$$

Un **kilowatt-hora** es la cantidad de energía convertida o consumida en una hora por un dispositivo suministrado con potencia a la tasa de 1 kW. Es equivalente a

$$1 \text{ kWh} = 3.60 \times 10^6 \text{ J} \quad [17.10]$$

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un alambre conduce una corriente de 1.6 A. ¿Cuántos electrones por segundo pasan por un punto dado en el alambre? Elija la mejor estimación. a) 10^{17} b) 10^{18} c) 10^{19} d) 10^{20} e) 10^{21}
- El alambre A tiene la misma longitud y el doble del radio del alambre B. Ambos alambres están hechos del mismo material y portan la misma corriente. ¿Cuál de las siguientes ecuaciones es verdadera en cuanto a las velocidades de deriva v_A y v_B de los electrones en los alambres? a) $v_A = 2v_B$ b) $v_A = v_B$ c) $v_A = v_B/2$ d) $v_A = 4v_B$ e) $v_A = v_B/4$
- Un alambre de metal de la resistencia R se corta en tres partes iguales que se colocan una junto a la otra para formar un nuevo cable con una longitud igual a un tercio de la longitud original. ¿Cuál es la resistencia de este nuevo cable? a) $\frac{1}{3}R$ b) $\frac{1}{9}R$ c) R d) $3R$ e) $9R$
- Tres alambres están hechos de cobre y tienen secciones transversales circulares. El alambre 1 tiene una longitud L y radio r . El alambre 2 tiene una longitud L y radio $2r$. El alambre 3 tiene una longitud $2L$ y radio $3r$. ¿Cuál alambre tiene la menor resistencia? a) alambre 1 b) alambre 2 c) alambre 3 d) Los tres alambres tienen la misma resistencia. e) No se proporciona suficiente información para responder la pregunta.
- Las baterías de automóviles son a menudo clasificadas en amperes-hora. ¿Esta información designa la cantidad de a) corriente, b) potencia, c) energía, d) carga, o e) del potencial que la batería puede suministrar?
- En la figura POM17.6 se muestra el comportamiento corriente frente a voltaje de cierto dispositivo eléctrico. Cuando la diferencia de potencial a través del dispositivo

es 2 V, ¿cuál es la resistencia? a) 1Ω b) $\frac{3}{4}\Omega$ c) $\frac{4}{3}\Omega$ d) indefinido e) ninguno de éstos

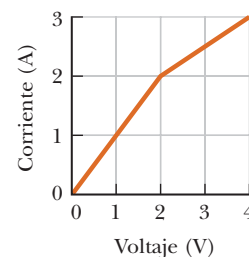


Figura POM17.6 Preguntas de opción múltiple 6 y 9.

- Un televisor a color extrae aproximadamente 2.5 A cuando se conecta a una fuente de 120 V. ¿Cuál es el costo (con energía eléctrica a 8 centavos/kWh) de hacer funcionar el aparato durante 8.0 horas? a) 2.0 centavos b) 4.0 centavos c) 19 centavos d) 40 centavos e) 62 centavos
- Un alambre metálico tiene una resistencia de 10.00Ω a una temperatura de 20.0°C . Si el mismo alambre tiene una resistencia de 10.55Ω a 90.0°C , ¿cuál es la resistencia de este mismo alambre cuando su temperatura es -20°C ? a) 0.700Ω b) 9.69Ω c) 10.3Ω d) 13.8Ω e) 6.59Ω
- En la figura POM17.6 se muestra el comportamiento corriente frente a voltaje de cierto dispositivo eléctrico. Cuando la diferencia de potencial a través del dispositivo es 3 V, ¿cuál es la resistencia? a) 0.83Ω b) 1.2Ω c) 3.0Ω d) 1.33Ω e) 2.3Ω

10. Tres resistores, A, B y C, se conectan en paralelo y unen una batería; la resistencia de A es la menor y la resistencia de C es la mayor. ¿Cuál resistor porta más corriente? a) A b) B c) C d) Todos los alambres portan la misma corriente. e) Se necesita más información para responder la pregunta.
11. Una diferencia de potencial de 1.0 V se mantiene a través de un resistor de 10.0Ω durante un periodo de 20 s. ¿Qué carga total pasa a través del alambre en este intervalo de tiempo? a) 200 C b) 20 C c) 2 C d) 0.005 C e) 0.05 C
12. Tres resistores, A, B y C, se conectan en serie en un lazo cerrado con una batería; la resistencia de A es la menor y la resistencia de C es la mayor. ¿A través de cuál resistor la caída de voltaje es mayor? a) A b) B c) C d) Las caídas de voltaje son iguales para cada uno. e) Se necesita más información para responder la pregunta.
13. Dos conductores hechos del mismo material se conectan a través de la misma diferencia de potencial. El conductor A tiene el doble de diámetro y dos veces la longitud del conductor B. ¿Cuál es la relación de la potencia suministrada a A a la potencia suministrada a B? a) 8 b) 4 c) 2 d) 1 e) $\frac{1}{2}$
14. Dos cables A y B con secciones circulares están hechos del mismo metal y tienen la misma longitud, pero la resistencia del cable A es tres veces mayor que la del cable B. ¿Cuál es la proporción del área de sección transversal de A a la de B? a) 3 b) $\sqrt{3}$ c) 1 d) $1/\sqrt{3}$ e) $\frac{1}{3}$

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Hemos visto que un campo eléctrico debe existir dentro de un conductor que porta una corriente. ¿Cómo es posible esto, en vista del hecho de que, en electrostática, concluimos que el campo eléctrico debe ser cero dentro de un conductor?
- Use la teoría atómica de la materia para explicar por qué la resistencia de un material debe aumentar conforme su temperatura se incrementa.
- Si las cargas fluyen muy lentamente a través de un metal, ¿por qué no se requieren varias horas cuando una luz se enciende o cuando se mueve un switch?
- En una analogía entre flujo de tráfico y corriente eléctrica, a) ¿a qué correspondería la carga Q ? b) ¿A qué correspondería la corriente I ?
- Cuando el voltaje a través de cierto conductor se duplica, la corriente se triplica. ¿Qué puede concluir acerca del conductor?
- Dos focos se conectan uno con otro a un voltaje de 120 V. Uno tiene una potencia de 25 W, b) el otro de 100 W. ¿Cuál foco tiene la mayor resistencia? a) ¿Cuál foco porta más corriente?
- Con frecuencia, los artículos periodísticos contienen enunciados tales como “10000 volts de electricidad pasaron a través del cuerpo de la víctima”. ¿Qué está mal en este enunciado?
- Hay un antiguo consejo que se da a los experimentadores de “poner la mano en el bolsillo” cuando se trabaje alrededor de altos voltajes. ¿Por qué esta advertencia es buena idea?
- ¿Qué pasaría con la velocidad de desplazamiento de los electrones en un alambre y con la corriente en el mismo, si los electrones se mueven libremente sin resistencia a través del alambre?
- Algunos hogares tienen reductores de intensidad que se operan al girar una perilla. ¿Qué cambia en el circuito eléctrico cuando se gira la perilla?
- ¿Cuándo se entrega más potencia a un foco, inmediatamente después de encenderlo, el brillo aumenta o después de estar encendido durante algunos segundos, el brillo es estable?

■ PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

I. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

I. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C|C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

17.1 Corriente eléctrica

17.2 Visión microscópica: corriente y velocidad de deriva

1. Si una corriente de 80.0 mA existe en un alambre metálico, a) ¿cuántos electrones fluyen por una sección transversal dada del alambre en 10.0 min? b) ¿En qué dirección viajan los electrones con respecto a la corriente?
2. **C|C** Un alambre de cobre tiene una sección transversal circular con un radio de 1.25 mm. a) Si el alambre porta

una corriente de 3.70 A, determine la velocidad de deriva de los electrones en el alambre. (Véase el ejemplo 17.2 para datos relevantes acerca del cobre.) b) Si todo lo demás se mantiene igual, ¿qué ocurre con la velocidad de deriva en los alambres hechos de metal que tienen mayor número de electrones de conducción por átomo que el cobre? Explique.

3. En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, un electrón en el estado de energía más bajo, se mueve con una velocidad de 2.19×10^6 m/s en una trayectoria circular que tiene un radio de 5.29×10^{-11} m. ¿Cuál es la corriente efectiva asociada con este electrón en órbita?
4. La corriente suministrada por una batería en un dispositivo portátil normalmente es 0.15 A. Encuentre el número de electrones que pasan a través del dispositivo en una hora.
5. Un experimento de un determinado laboratorio requiere de un cable de aluminio de longitud de 32.0 m y una resistencia de 2.50Ω a 20.0°C . ¿Qué diámetro de cable debe ser utilizado?
6. Si 3.25×10^{-3} kg de oro se depositan en el electrodo negativo de una celda electrolítica en un periodo de 2.78 h, ¿cuál es la corriente en la celda durante este periodo? Suponga que los iones de oro portan una unidad elemental de carga positiva.
7. **M** Una línea de transmisión de alto voltaje de 200 km de largo y 2.0 cm de diámetro porta una corriente estacionaria de 1000 A. Si el conductor es cobre con una densidad de carga libre de 8.5×10^{28} electrones por metro cúbico, ¿cuántos años tarda un electrón en recorrer toda la longitud del cable?
8. Un alambre de aluminio que porta una corriente de 5.0 A tiene un área transversal de 4.00×10^{-6} m². Determine la velocidad de deriva de los electrones en el alambre. La densidad del aluminio es 2.70 g/cm³. Suponga que cada átomo proporciona tres electrones.
9. **PG** Un alambre de hierro tiene un área transversal de 5.00×10^{-6} m². Realice los pasos del a) al e) para calcular la velocidad de deriva de los electrones de conducción en el alambre. a) ¿Cuántos kilogramos hay en 1 mol de hierro? b) A partir de la densidad del hierro y el resultado del inciso a), calcule la densidad molar del hierro (el número de moles de hierro por metro cúbico). c) Use el número de Avogadro para calcular la densidad de número de los átomos de hierro. d) Obtenga la densidad de número de electrones de conducción, dado que hay dos electrones de conducción por átomo de hierro. e) Si el alambre porta una corriente de 30.0 A, calcule la velocidad de deriva de los electrones de conducción.

17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm

10. Un calentador eléctrico porta una corriente de 13.5 A cuando opera a un voltaje de 1.20×10^2 V. ¿Cuál es la resistencia del calentador?

11. **BIO** Una persona siente un ligero choque si la corriente a lo largo de una trayectoria a través de sus dedos pulgar e índice supera $80 \mu\text{A}$. Compare el máximo voltaje posible sin choque a través de los dedos pulgar e índice con una resistencia de piel seca de $4.0 \times 10^5 \Omega$ y una resistencia de piel húmeda de 2000Ω .
12. Suponga que quiere fabricar un alambre uniforme a partir de 1.00 g de cobre. Si el alambre debe tener una resistencia $R = 0.500 \Omega$ y si todo el cobre se utiliza, ¿cuál será a) la longitud y b) el diámetro del alambre?
13. Para devanar una bobina calefactora se usará alambre de nicromo con radio transversal de 0.791 mm. Si la bobina debe transportar una corriente de 9.25 A cuando a través de sus extremos se aplique un voltaje de 1.20×10^2 V, determine a) la resistencia requerida de la bobina y b) la longitud de alambre que debe usar para devanar la bobina.
14. Un alambre de diámetro 0.800 mm y longitud 25.0 m tiene una medida de resistencia de 1.60Ω . ¿Cuál es la resistividad del alambre?
15. Se descubre que una diferencia de potencial de 12 V produce una corriente de 0.40 A en una longitud de 3.2 m de alambre, con un radio uniforme de 0.40 cm. ¿Cuál es a) la resistencia del alambre? b) ¿La resistividad del alambre?
16. **S** Se descubre que alambres de aluminio y cobre de igual longitud tienen la misma resistencia. ¿Cuál es la proporción entre sus radios?
17. **M** Un alambre de 50.0 m de largo y 2.00 mm de diámetro se conecta a una fuente con una diferencia de potencial de 9.11 V y la corriente es de 36.0 A. Suponga una temperatura de 20°C y, a partir de la tabla 17.1, identifique el metal del cual se hizo el alambre.
18. Un bloque rectangular de cobre tiene lados de 10, 20 y 40 cm de longitud. Si el bloque se conecta a una fuente de 6.0 V a través de dos de sus caras opuestas, ¿cuáles son a) la máxima corriente y b) la mínima corriente que puede transportar el bloque?
19. Un alambre con longitud inicial L_0 y radio r_0 tiene una resistencia medida de 1.0Ω . El alambre se lleva bajo esfuerzo de tensión a un nuevo radio uniforme $r = 0.25r_0$. ¿Cuál es la nueva resistencia del alambre?
20. **BIO C|C** El cuerpo humano puede exhibir un amplio rango de resistencia a la corriente, dependiendo de la trayectoria de la corriente, área de contacto y sudoración de la piel. Suponga que la resistencia a través del pecho, desde la mano izquierda hasta la mano derecha, es $1.0 \times 10^6 \Omega$. a) ¿Cuánto voltaje se requiere para causar posible fibrilación cardíaca en un hombre, que corresponde a 500 mA de corriente directa? b) ¿Por qué cuando se trabaja con electricidad alrededor se deben usar zapatos con suela de goma y guantes de hule?
21. **S** A partir de la ley de Ohm, demuestre que $E = J\rho$, donde E es la magnitud del campo eléctrico (supuesto constante) y $J = I/A$ se llama densidad de corriente. De hecho, el resultado es verdadero en general.

17.5 Variación de la resistencia con la temperatura

22. Si cierto alambre de plata tiene una resistencia de 6.00Ω a 20.0°C , ¿qué resistencia tendrá a 34.0°C ?
23. Mientras toma fotografías en Death Valley en un día cuando la temperatura es de 58.0°C , Bill Hiker encuentra que cierto voltaje aplicado a un alambre de cobre produce una corriente de 1.000 A . Entonces Bill viaja hacia la Antártida y aplica el mismo voltaje al mismo alambre. ¿Qué corriente registra ahí si la temperatura es -88.0°C ? Suponga que no ocurren cambios a la forma y tamaño del alambre.
24. **C|C** Una longitud de alambre de aluminio tiene una resistencia de 30.0Ω a 20.0°C . Cuando el alambre se calienta en un horno y alcanza equilibrio térmico, la resistencia del alambre aumenta a 46.2Ω . a) Desprecie la expansión térmica y determine la temperatura del horno. b) Cualitativamente, ¿cómo esperaría usted que la expansión térmica afecte la respuesta?
25. El oro es el más dúctil de todos los metales. Por ejemplo, un gramo de oro se puede atraer a un cable de 2.40 kilómetros de largo. La densidad del oro es de $19.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ y su resistividad es de $2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$? ¿Cuál es la resistencia de un alambre a 20.0°C ?
26. ¿A qué temperatura el aluminio tendrá una resistividad que sea tres veces la resistividad del cobre a temperatura ambiente?
27. A 20°C , el resistor de carbono en un circuito eléctrico conectado a una batería de 5.0 V tiene una resistencia de $2.0 \times 10^2 \Omega$. ¿Cuál es la corriente en el circuito cuando la temperatura del carbono se eleva a 80°C ?
28. Un alambre de 3.00 m de longitud y 0.450 mm^2 de área transversal tiene una resistencia de 41.0Ω a 20°C . Si su resistencia aumenta a 41.4Ω a 29.0°C , ¿cuál es el coeficiente de temperatura de la resistividad?
29. **M** a) Un alambre de cobre de 34.5 m de longitud a 20.0°C tiene un radio de 0.25 mm . Si a través de la longitud del alambre se aplica una diferencia de potencial de 9.0 V , determine la corriente en el alambre. b) Si el alambre se calienta a 30.0°C mientras se mantiene la diferencia de potencial de 9.0 V , ¿cuál es la corriente resultante en el alambre?
30. Una ingeniera necesita una resistencia con temperatura de cero global y un coeficiente de resistencia a 20.0°C . Ella diseña un par de cilindros circulares, uno de carbón y uno de nicromo como se muestra en la figura P17.30. El dispositivo debe tener una resistencia total de $R_1 + R_2 = 10.0 \Omega$ independiente de la temperatura y un radio uniforme $r = 1.50 \text{ mm}$. No haga caso de la expansión térmica de los cilindros y suponga que ambos están siempre a la misma temperatura. a) ¿Puede cumplir con el objetivo de diseño con este método? b) En caso afirmativo, indicar lo que usted puede determinar acerca de la longitud L_1 y L_2 de cada segmento. Si no es así, explique.



Figura P17.30

31. **BIO** En una forma de pletismógrafo (un dispositivo para medir volumen), un tubo capilar de caucho, con diámetro interior de 1.00 mm , se llena con mercurio a 20°C . La resistencia del mercurio se mide con la ayuda de electrodos sellados en los extremos del tubo. Si 100.00 cm del tubo se enrollan en espiral alrededor del brazo de un paciente, el flujo sanguíneo durante un latido cardíaco hace que el brazo se expanda, lo que estira el tubo a una longitud de 100.04 cm . A partir de esta observación y si supone simetría cilíndrica, puede encontrar el cambio en volumen del brazo, lo que da un indicio del flujo sanguíneo. a) Calcule la resistencia del mercurio. b) Calcule el cambio fraccional en resistencia durante el latido cardíaco. Considere $\rho_{\text{Hg}} = 9.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$. *Sugerencia:* Debido a que el volumen cilíndrico es constante, $V = A_i L_i = A_f L_f$ y $A_f = A_i (L_i / L_f)$.
32. Un termómetro con resistencia de platino tiene resistencias de 200.0Ω cuando se coloca en un baño de hielo a 0°C y 253.8Ω cuando se sumerge en un crisol que contiene potasio fundido. ¿Cuál es el punto de fusión del potasio? (*Sugerencia:* Determine primero la resistencia del termómetro con resistencia de platino a temperatura ambiente, 20°C .)

17.6 Energía eléctrica y potencia

33. Suponga que su wafflera se clasifica a 1.00 kW cuando se conecta a una fuente de $1.20 \times 10^2 \text{ V}$. a) ¿Qué corriente transporta la wafflera? b) ¿Cuál es su resistencia?
34. Si la energía eléctrica cuesta 12 centavos, o $\$0.12$, por kilowatt-hora, ¿cuánto cuesta a) tener encendida un foco de 100 W durante 24 horas? b) Operar un horno eléctrico durante 5.0 h , si porta una corriente de 20.0 A a 220 V ?
35. **C|C** Los códigos de construcción residencial por lo general requieren el uso de alambre de cobre de calibre 12 (diámetro de 0.205 cm) para los recipientes de cableado. Tales circuitos transportan corrientes tan grandes como 20.0 A . Si un cable de menor diámetro (con un número de calibre superior) lleva una gran cantidad de corriente, el cable podría llegar a una temperatura elevada y causar un incendio. a) Calcule la velocidad a la que se produce energía interna en 1.00 m de alambre de cobre de calibre 12 que lleva 20.0 A . b) Repita el cálculo para un alambre de aluminio de calibre 12. c) Explique si un alambre de aluminio de calibre 12 sería tan seguro como un alambre de cobre.
36. Una línea de transmisión de alto voltaje, con una resistencia de $0.31 \Omega/\text{km}$ porta una corriente de 1000 A . La línea está a un potencial de 700 kV en la estación eléctrica y porta la corriente a una ciudad ubicada a 160 km de

- la estación. a) ¿Cuál es la pérdida de potencia debida a resistencia en la línea? b) ¿Qué fracción de la potencia transmitida representa esta pérdida?
37. **M** El elemento calefactor de una cafetera opera a 120 V y porta una corriente de 2.00 A. Si supone que el agua absorbe toda la energía convertida por el resistor, calcule cuánto tardará en calentar 0.500 kg de agua, de temperatura ambiente (23.0 °C) al punto de ebullición.
38. La potencia suministrada a un televisor típico blanco y negro es de 90 W cuando el aparato se conecta a 120 V. a) ¿Cuánta energía eléctrica consume este aparato en 1 hora? b) Un televisor a color extrae aproximadamente 2.5 A cuando se conecta a 120 V. ¿Cuánto tiempo se requiere para que consuma la misma energía eléctrica que consume el modelo de blanco y negro en 1 hora?
39. **CIC** El foco A está marcado como “25.0 W 120 V”, y el foco B está marcado “100 W 120 V”. Estas etiquetas significan que cada foco tiene su respectiva potencia entregada cuando se conectan a una fuente constante de 120 V. a) Encuentre la resistencia de cada foco. b) ¿En qué intervalo de tiempo pasa 1.00 C por un foco? c) ¿Es diferente la carga a su salida comparada con su entrada en el foco? Explique. d) ¿En qué intervalo de tiempo pasa 1.00 J por un foco? e) ¿Mediante qué mecanismos la energía entra y sale del foco? Explique. f) Halle el costo de funcionamiento de un foco de forma continua durante 30.0 días, suponiendo que la compañía eléctrica vende su producto a \$0.110 por kWh.
40. Cierta tostador tiene un elemento calefactor hecho de alambre de nicromo. Cuando el tostador se conecta por primera vez a una fuente de diferencia de potencial de 120 V (y el alambre está a una temperatura de 20.0 °C), la corriente inicial es 1.80 A, pero la corriente comienza a disminuir conforme el elemento resistivo se calienta. Cuando el tostador alcanza su temperatura operativa final, la corriente cae a 1.53 A. a) Determine la potencia que convierte el tostador cuando alcanza su temperatura operativa. b) ¿Cuál es la temperatura final del elemento calefactor?
41. Un cable de cobre se diseña para portar una corriente de 300 A con una pérdida de potencia de 2.00 W/m. ¿Cuál es el radio requerido de este cable?
42. Las baterías se clasifican en términos de ampere-horas ($A \cdot h$). Por ejemplo, una batería que puede entregar una corriente de 3.0 A durante 5.0 h se clasifica a 15 $A \cdot h$. a) ¿Cuál es la energía total, en kilowatt-horas, que se almacena en una batería de 12 V clasificada a 55 $A \cdot h$? b) A \$0.12 por kilowatt-hora, ¿cuál es el valor de la electricidad que se puede producir por esta batería?
43. **BIO** La diferencia de potencial a través de una neurona en reposo es de aproximadamente 75.0 mV y porta una corriente de más o menos 0.200 mA. ¿Cuánta potencia libera la neurona?
44. El costo de la electricidad varía ampliamente a lo largo de Estados Unidos; \$0.120/kWh es un valor típico. A este precio unitario, calcule el costo de a) dejar encendida durante 2 semanas la luz del pórtico, de 40.0 W, mientras usted está de vacaciones, b) hacer una tostada durante 3.00 min con una tostadora de 970 W y c) secar una carga de ropa en 40.0 min en una secadora de 5 200 W.
45. Una compañía eléctrica suministra desde las líneas de alimentación principal (120 V) la casa de un cliente con dos hilos de cobre, cada uno de ellos es de 50.0 m de largo y tiene una resistencia de 0.108 Ω por cada 300 m. a) Halle la diferencia de potencial en la casa del cliente para una corriente de carga de 110 A. Para esta corriente de carga, determine b) la potencia suministrada al cliente.
46. **CIC** Un oficinista usa un calentador de inmersión para calentar 250 g de agua en una taza ligera, cubierta, aislada, de 20 a 100 °C en 4.00 minutos. El calentador es un alambre resistencia de nicromo que se conecta a una fuente de poder de 120 V. Suponga que el alambre está a 100 °C a lo largo del intervalo de tiempo de 4.00 min. a) Calcule la potencia promedio requerida para calentar el agua a 100 °C en 4.00 min. b) Calcule la resistencia requerida en el elemento de calentamiento a 100 °C. c) Calcule la resistencia del elemento calefactor a 20.0 °C. d) Establezca una relación entre el diámetro del alambre, la resistividad a 20.0 °C, ρ_0 , la resistencia a 20.0 °C, R_0 , y la longitud L . e) Si $L = 3.00$ m, ¿cuál es el diámetro del alambre?
47. **S** Dos cables A y B que están hechos del mismo material y tienen la misma longitud, están conectados a través de la misma fuente de voltaje. Si la potencia suministrada al cable A es tres veces la potencia suministrada al cable B, ¿cuál es la relación de sus diámetros?
48. **CIC** Un alambre de tungsteno en un vacío tiene 15.0 cm de longitud y 1.00 mm de radio. A través de él se aplica una diferencia de potencial. a) ¿Cuál es la resistencia del alambre a 293 K? b) Suponga que el alambre alcanza una temperatura de equilibrio tal que emite 75.0 W en la forma de radiación. Si se desprecia la absorción de cualquier radiación desde su entorno, ¿cuál es la temperatura del alambre? (Nota: $e = 0.320$ para tungsteno.) c) ¿Cuál es la resistencia del alambre a la temperatura que se encontró en el inciso b)? Suponga que la temperatura cambia linealmente sobre este rango de temperatura. d) ¿Qué caída de voltaje se requiere a través del alambre? e) ¿Por qué los focos de tungsteno son energéticamente ineficientes como fuentes de luz?

Problemas adicionales

49. Si una batería se clasifica a 60.0 $A \cdot h$, ¿cuánta carga total puede entregar antes de “morir”?
50. Un automovilista olvidó apagar los faros de su auto mientras se estaciona en su garaje. Si la batería de 12 V en su auto se clasifica a 90.0 $A \cdot h$ y cada faro requiere 36 W de

potencia, ¿cuánto tardará la batería en descargarse por completo?

51. Considere un alambre de aluminio de diámetro 0.600 mm y longitud 15.0 m. La resistividad del aluminio a 20.0 °C es $2.82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$. a) Determine la resistencia de este cable a 20.0 °C. b) Si una batería de 9.00 V se conecta a los extremos del cable, encuentre la corriente en el cable.
52. Un alambre de cobre dado tiene una resistencia de 5.00 Ω a 20.0 °C, mientras que un alambre de tungsteno del mismo diámetro tiene una resistencia de 4.75 Ω a 20.0 °C. ¿A qué temperatura los dos cables tienen la misma resistencia?
53. **M** Un alambre particular tiene una resistividad de $3.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ y un área transversal de $4.0 \times 10^{-6} m^2$. Una longitud de este alambre se usará como un resistor que desarrollará 48 W de potencia cuando se conecte a través de una batería de 20 V. ¿Qué longitud de alambre se requiere?
54. Las aves que descansan sobre las líneas de transmisión de alto voltaje son una imagen común. El alambre de cobre sobre el cual se posan mide 2.2 cm de diámetro y porta una corriente de 50 A. Si las patas del ave están separadas 4.0 cm, calcule la diferencia de potencial a través de su cuerpo.
55. Se realiza un experimento para medir la resistividad eléctrica del nicromo en la forma de alambres con diferentes longitudes y áreas transversales. Para un conjunto de mediciones, un estudiante usa alambre calibre 30, que tiene una área transversal de $7.30 \times 10^{-8} m^2$. El estudiante mide la diferencia de potencial a través del alambre y la corriente en el alambre con un voltímetro y un amperímetro, respectivamente. Para cada una de las mediciones proporcionadas en la siguiente tabla, tomadas sobre alambres de tres longitudes diferentes, calcule la resistencia de los alambres y el correspondiente valor de la resistividad.

L (m)	ΔV (V)	I (A)	R (Ω)	ρ ($\Omega \cdot m$)
0.540		5.22		0.500
1.028		5.82		0.276
1.543		5.94		0.187

¿Cuál es el valor promedio de la resistividad y cómo se compara este valor con el valor dado en la tabla 17.1?

56. Una muestra de 50.0 g de un material conductor es todo lo que está disponible. La resistencia del material medida es $11 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, y la densidad es 7.86 g/cm³. Con el material se puede formar un alambre cilíndrico sólido que tiene una resistencia total de 1.5 Ω . a) ¿Qué longitud de alambre se requiere? b) ¿Cuál debe ser el diámetro del alambre?
57. Usted prepara el desayuno para sí mismo y un amigo con una wafflera de 1200 W y una cafetera de 500 W. Por lo general, usted opera estos aparatos desde un tomacorriente de 110 V durante 0.500 h cada día. a) A 12 centavos por kWh, ¿cuánto gasta en cocinar el desayuno durante un periodo de 30.0 días? b) Descubre que es adicto a los

waffles y le gustaría acceder a una wafflera de 2400 W que le permitirá cocinar el doble de waffles durante un periodo de media hora, pero usted sabe que el disyuntor de su cocina es un interruptor de 20 A. ¿Puede hacer la mejora?

58. La corriente en un conductor varía en el tiempo como se muestra en la figura P17.58. a) ¿Cuántos coulombs de carga pasan a través de una sección transversal del conductor en el intervalo de $t = 0$ a $t = 5.0$ s? b) ¿Qué corriente constante transportaría la misma carga total durante el intervalo de 5.0 s como hace la corriente real?

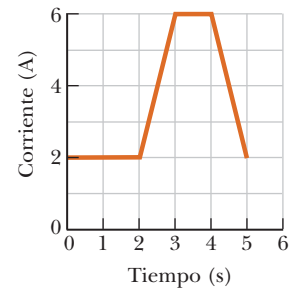


Figura P17.58

59. Un motor de 120 V tiene una salida de energía mecánica de 2.50 caballos de fuerza. Éste es 90.0% eficiente al convertir la energía eléctrica de la transmisión en energía mecánica. a) Encuentre la corriente en el motor. b) Determine la energía entregada al motor por la transmisión eléctrica en 3.00 h de operación. c) Si la compañía eléctrica cobra \$0.110/kWh, ¿cuál es el costo de hacer funcionar el motor por 3.00 h?
60. **C/C** Un elemento calefactor de nicromo en un horno tiene una resistencia de 8.0 Ω a 20 °C. a) ¿Cuál es su resistencia a 350 °C? b) ¿Qué hipótesis tiene que hacer para obtener su respuesta al inciso a)?
61. Un tramo de alambre metálico tiene un radio de $5.00 \times 10^{-3} m$ y una resistencia de 0.100 Ω . Cuando la diferencia de potencial a través del alambre es 15.0 V, se observa que la rapidez de deriva de los electrones es de $3.17 \times 10^{-4} m/s$. Sobre la base de estos datos, calcule la densidad de electrones libres en el alambre.
62. En cierto sistema estéreo, cada bocina tiene una resistencia de 4.00 Ω . El sistema se clasifica en 60.0 W por cada canal. Cada circuito de bocina incluye un fusible clasificado a una corriente máxima de 4.00 A. ¿Este sistema está protegido de manera adecuada contra sobrecarga?
63. Un resistor se construye con un material de $3.5 \times 10^5 \Omega \cdot m$ al que se le da forma de cilindro hueco de 4.0 cm de longitud y radios interior y exterior de 0.50 y 1.2 cm, respectivamente. Cuando está en uso, se aplica una diferencia de potencial entre los extremos del cilindro, lo que produce una corriente paralela a la longitud del cilindro. Determine la resistencia del cilindro.

64. **S** Cuando un alambre recto se calienta, su resistencia cambia de acuerdo con la ecuación

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

(ecuación 17.7), donde α es el coeficiente de temperatura de la resistividad. a) Demuestre que un resultado más preciso, que incluye el cambio en longitud y área de un alambre cuando se calienta, es

$$R = \frac{R_0[1 + \alpha(T - T_0)][1 + \alpha'(T - T_0)]}{[1 + 2\alpha'(T - T_0)]}$$

donde α' es el coeficiente de expansión lineal. (Véase el capítulo 10.) b) Compare los dos resultados para un alambre de cobre de 2.00 m de largo y 0.100 mm de radio, a partir de 20.0 °C y que se calienta a 100.0 °C.

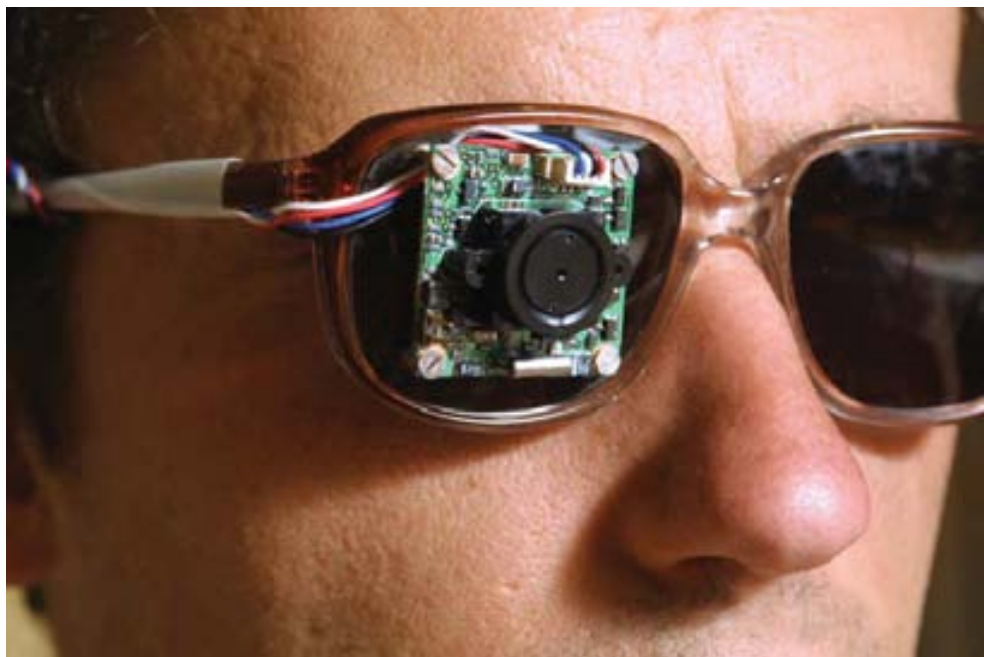
65. **BIO** Un tubo de rayos X que se usa para terapia contra el cáncer opera a 4.0 MV, con un haz de 25 mA de corriente que golpea el blanco metálico. Casi toda la potencia

en el haz se transfiere a una corriente de agua que fluye a través de orificios perforados en el blanco. ¿Qué tasa de flujo, en kilogramos por segundo, se necesita si el aumento de temperatura (ΔT) del agua no debe superar 50 °C?

66. Un hombre quiere aspirar su automóvil con una aspiradora de bote clasificada en 535 W a 120 V. El automóvil está estacionado lejos del edificio, así que usa una extensión de 15.0 m de largo para conectar la aspiradora a una fuente de 120 V. Suponga que la aspiradora tiene resistencia constante. a) Si la resistencia de cada uno de los dos conductores de la extensión es 0.900 Ω , ¿cuál es la potencia real que se entrega a la aspiradora? b) Si, en vez de ello, la potencia es de al menos 525 W, ¿cuál debe ser el diámetro de cada uno de los dos conductores de cobre idénticos en el cable que compra el hombre? c) Repita el inciso b) si la potencia debe ser al menos de 532 W. (*Sugerencia:* Una solución simbólica puede simplificar los cálculos.)

Este paciente con deterioro visual usa un dispositivo de visión artificial. Una cámara en la lente envía video a una computadora portátil. Entonces, la computadora convierte el video en señales que estimulan implantes en la corteza visual del paciente, lo que le da suficiente visión para deambular por su cuenta.

© Najjah Feanny/Corbis



18

Circuitos de corriente directa

- 18.1 Fuentes de fem
- 18.2 Resistores en serie
- 18.3 Resistores en paralelo
- 18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos
- 18.5 Circuitos RC
- 18.6 Circuitos domésticos
- 18.7 Seguridad eléctrica
- 18.8 Conducción de señales eléctricas por las neuronas

Baterías, resistores y capacitores se pueden usar en varias combinaciones para construir circuitos eléctricos, que dirigen y controlan el flujo de electricidad y la energía que portan. Tales circuitos posibilitan todas las comodidades modernas en una casa: luz eléctrica, quemadores de estufa y hornos eléctricos, máquinas lavadoras y un cúmulo de otros electrodomésticos y herramientas. Los circuitos eléctricos también se encuentran en los automóviles, en tractores que aumentan la productividad en las granjas y en todos los tipos de equipo médico que salvan tantas vidas cada día.

En este capítulo estudiará y analizará algunos circuitos simples de corriente directa. El análisis se simplifica con el uso de dos reglas conocidas como reglas de Kirchhoff, que se siguen del principio de conservación de la energía y de la ley de conservación de la carga. Se supone que la mayoría de los circuitos están en *estado estacionario*, lo cual significa que las corrientes son constantes en magnitud y dirección. El capítulo termina con un análisis de los circuitos que contienen resistores y capacitores, en los cuales la corriente varía con el tiempo.

18.1 Fuentes de fem

Una corriente se mantiene en un circuito cerrado mediante una fuente de fem.¹ Entre tales fuentes está cualquier dispositivo (por ejemplo, baterías y generadores) que aumentan la energía potencial de las cargas en circulación. Una fuente de fem se puede considerar como una “bomba de carga” que fuerza a los electrones a moverse en una dirección opuesta al campo electrostático dentro de la fuente. La fem \mathcal{E} de una fuente es el trabajo realizado por unidad de carga; por lo tanto, la unidad SI de fem es el volt.

¹El término originalmente fue una abreviatura para *fuerza electromotriz*, pero la fem en realidad no es una fuerza, así que se desalentó la forma larga.

Considere el circuito de la figura 18.1a, que consiste en una batería conectada a un resistor. Suponga que los alambres de conexión no tienen resistencia. Si desprecia la resistencia interna de la batería, la caída de potencial a través de la batería (el voltaje en terminales) es igual a la fem de la batería. Sin embargo, puesto que una batería real siempre tiene alguna resistencia interna r , el voltaje en terminales no es igual a la fem. El circuito de la figura 18.1a se puede describir esquemáticamente mediante el diagrama de la figura 18.1b. La batería, representada por el rectángulo rayado, consiste en una fuente de fem \mathcal{E} en serie con una resistencia interna r . Ahora imagine una carga positiva que se mueve a través de la batería desde a hasta b en la figura. Conforme la carga pasa de la terminal negativa a la positiva de la batería, el potencial de la carga aumenta por \mathcal{E} . Sin embargo, conforme la carga se mueve a través de la resistencia r , su potencial disminuye por la cantidad Ir , donde I es la corriente en el circuito. Por lo tanto, el voltaje en las terminales de la batería, $\Delta V = V_b - V_a$, está dado por

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir \quad [18.1]$$

A partir de esta expresión, vemos que \mathcal{E} es igual al voltaje en terminales cuando la corriente es cero, llamado **voltaje de circuito abierto**. Al inspeccionar la figura 18.1b, encontramos que el voltaje en las terminales ΔV también debe ser igual a la diferencia de potencial a través de la resistencia externa R , que con frecuencia se llama **resistencia de carga**; esto es, $\Delta V = IR$. Al combinar esta relación con la ecuación 18.1, se llega a

$$\mathcal{E} = IR + Ir \quad [18.2]$$

Al resolver para la corriente da como resultado

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

La ecuación anterior muestra que la corriente en este circuito simple depende tanto de la resistencia externa como de la batería y de la resistencia interna de la batería. Si R es mucho mayor que r , se puede despreciar r en el análisis (una opción que usualmente se selecciona).

Si la ecuación 18.2 se multiplica por la corriente I , obtenemos

$$I\mathcal{E} = I^2R + I^2r$$

Esta ecuación dice que la salida de potencia total $I\mathcal{E}$ de la fuente de fem se convierte a la tasa I^2R a la que se entrega energía a la resistencia de carga, *más* la tasa I^2r a la que se entrega energía a la resistencia interna. De nuevo, si $r \ll R$, la mayor parte de la potencia entregada por la batería se transfiere a la resistencia de carga.

A menos que se establezca de otro modo, en los ejemplos y problemas de fin de capítulo supondremos que la resistencia interna de una batería en un circuito es despreciable.

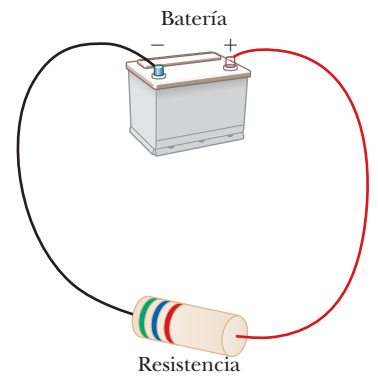
Examen rápido

18.1 Verdadero o Falso: Mientras se descarga, el voltaje en las terminales de una batería nunca puede ser mayor que la fem de la batería.

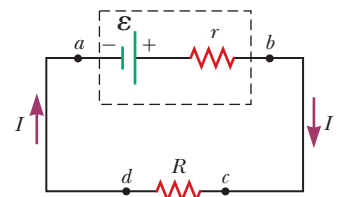
18.2 ¿Por qué una batería se calienta mientras está en uso?

18.2 Resistores en serie

Cuando dos o más resistores se conectan extremo con extremo como en la figura 18.2 (página 618), se dice que están en *serie*. Los resistores podrían ser dispositivos simples, como focos o elementos calefactores. Cuando dos resistores R_1 y R_2 se conectan a una batería como en la figura 18.2, **la corriente es la misma en los dos resistores porque cualquier carga que fluya a través de R_1 también debe fluir a través de R_2** . Esto es análogo al agua que fluye a través de una tubería con dos restricciones, que corresponden a R_1 y R_2 . Cualquier volumen de flujo de agua en un extremo en un intervalo dado, debe salir por el extremo opuesto.



a



b

Figura activa 18.1

a) Un circuito que consiste en un resistor conectado a las terminales de una batería. b) Diagrama de circuito de una fuente de fem \mathcal{E} que tiene resistencia interna r conectada a un resistor externo R .



Una variedad de baterías

Tip 18.1 ¿Qué es constante en una batería?

La ecuación 18.2 muestra que la corriente en un circuito depende de la resistencia de la batería, de modo que una batería no se puede considerar como fuente de corriente constante. Incluso el voltaje en las terminales de una batería, dado por la ecuación 18.1, no se puede considerar constante porque la resistencia interna puede cambiar (debido a calentamiento, por ejemplo, durante la operación de la batería). Sin embargo, una batería es una fuente de fem constante.

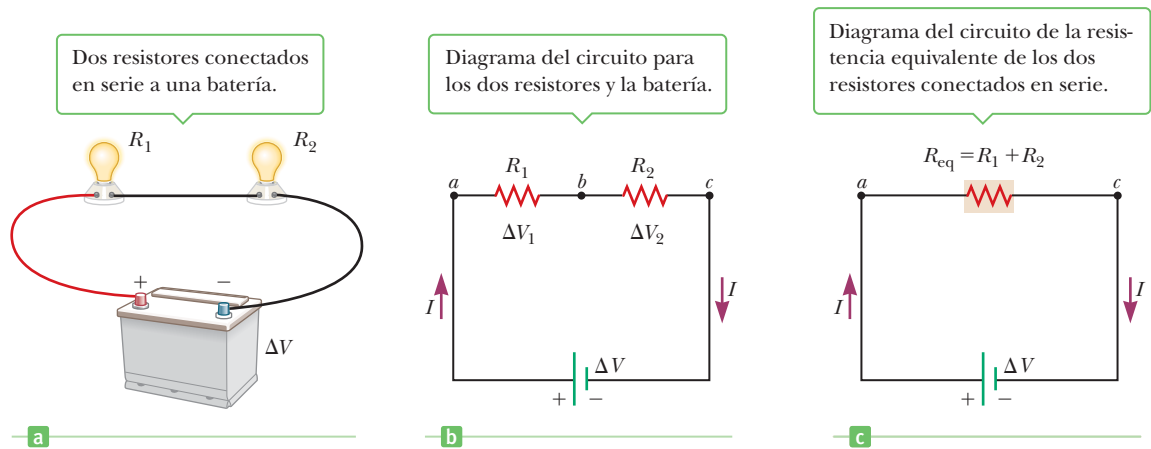


Figura activa 18.2

Conexión en serie a una batería, de dos resistores en forma de foco, R_1 y R_2 . Las corrientes en los resistores son las mismas y la resistencia equivalente de la combinación está dada por $R_{eq} = R_1 + R_2$.

Puesto que la diferencia de potencial entre a y b en la figura 18.2b es igual a IR_1 y la diferencia de potencial entre b y c es igual a IR_2 , la diferencia de potencial entre a y c es

$$\Delta V = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

Sin importar cuántos resistores se tengan en serie, la suma de las diferencias de potencial a través de los resistores es igual a la diferencia de potencial total a través de la combinación. Como veremos después, este resultado es una consecuencia de la conservación de la energía. La figura 18.2c muestra un resistor equivalente R_{eq} que puede sustituir los dos resistores del circuito original. El resistor equivalente tiene el mismo efecto sobre el circuito, debido a que resulta la misma corriente en el circuito que con los dos resistores. Al aplicar la ley de Ohm a esta ecuación, se tiene

$$\Delta V = IR_{eq}$$

Al igualar las dos expresiones anteriores, se tiene

$$IR_{eq} = I(R_1 + R_2)$$

o

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \text{ (combinación en serie)} \quad [18.3]$$

Una extensión del análisis anterior muestra que la resistencia equivalente de tres o más resistores conectados en serie es

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad [18.4]$$

Por lo tanto, **la resistencia equivalente de una combinación de resistores en serie es la suma algebraica de las resistencias individuales y siempre es mayor que cualquier resistencia individual.**

Note que, si falla el filamento de un foco en la figura activa 18.2a el circuito ya no estaría completo (existiría una condición de circuito abierto) y el segundo foco también se apagaría.

Resistencia equivalente de una combinación de resistores en serie

■ FÍSICA APLICADA 18.1 Luces de Navidad en serie

Un nuevo diseño de luces de Navidad les permite conectarse en serie. Un foco que falla en tal serie resultaría en un circui-

to abierto y todos los focos se apagarían. ¿Cómo se pueden rediseñar los focos para evitar que esto ocurra?

EXPLICACIÓN Si la serie de luces contiene el tipo usual de focos, un foco que falla sería difícil de ubicar. Cada foco tendría que sustituirse con un foco bueno, uno por uno, hasta encontrar el que falló. Si sucede que dos o más focos fallan en la serie de luces, encontrarla sería una labor tardada y pesada.

Las luces de Navidad usan focos especiales que tienen un lazo de alambre aislante (un puente o “jumper”) a través de los soportes conductores hacia los filamentos del foco (figura 18.3). Si el filamento se rompe y el foco falla, la resistencia del foco aumenta dramáticamente. Como resultado, la mayor parte del voltaje aplicado aparece a través del lazo de alambre. Este voltaje hace que el aislante alrededor del lazo de alambre se queme, lo que hace que el alambre metálico haga contacto eléctrico con los soportes. Esto produce una trayectoria conductora a través del foco, de modo que los otros focos permanecen encendidos. ■

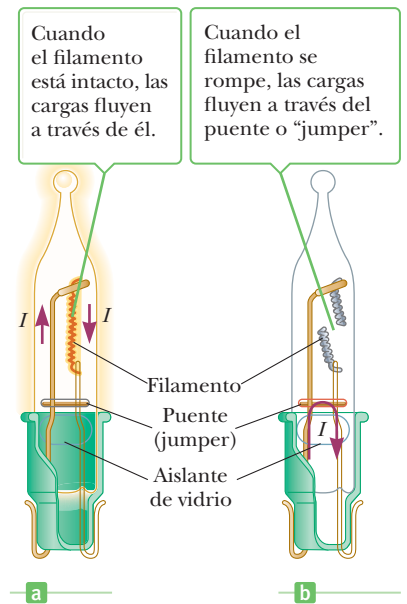


Figura 18.3 (Física aplicada 18.1) a) Diagrama esquemático de un moderno foco “miniatura” de fiesta, con una conexión puente para proporcionar una trayectoria de corriente si el filamento se rompe. Cuando el filamento está intacto, fluyen cargas en él. b) Foco con filamento roto. En este caso, fluyen cargas en la conexión puente.

■ Examen rápido

18.3 En la figura 18.4 la corriente se mide con el amperímetro en el fondo del circuito. Cuando se abre el interruptor, ¿la lectura en el amperímetro a) aumenta, b) disminuye o c) no cambia?

18.4 El circuito en la figura 18.4 consiste en dos resistores, un interruptor, un amperímetro y una batería. Cuando se cierra el interruptor, al resistor R_1 se entrega la potencia P_c . Cuando se abre el interruptor, ¿cuál de los siguientes enunciados es verdadero acerca de la potencia P_o que se entrega a R_1 ? a) $P_o < P_c$ b) $P_o = P_c$ c) $P_o > P_c$

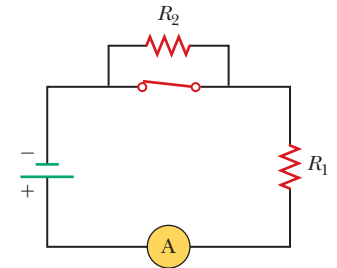


Figura 18.4 (Exámenes rápidos 18.3 y 18.4)

■ EJEMPLO 18.1 Cuatro resistores en serie

OBJETIVO Analizar varios resistores conectados en serie.

PROBLEMA Cuatro resistores se ordenan como se muestra en la figura 18.5a. Determine a) la resistencia equivalente del circuito y b) la corriente en el circuito si la fem de la batería es de 6.0 V. c) Calcule el potencial eléctrico en el punto A, si el potencial en la terminal positiva es de 6.0 V. d) Suponga que el voltaje en circuito abierto, o \mathcal{E} -fem, es de 6.2 V. Calcule la resistencia interna de la batería. e) ¿Qué fracción f de la energía de la batería es entregada a las resistencias de carga?

ESTRATEGIA Puesto que los resistores se conectan en serie, sume sus resistencias, lo que produce la resistencia equivalente. Entonces puede usar la ley de Ohm para encontrar la corriente. Para encontrar el potencial eléctrico en el punto A, calcule la caída de voltaje ΔV a través de la resistencia de 2.0- Ω y reste el resultado de 6.0 V. En el inciso d), utilice la ecuación 18.1 para encontrar la resistencia interna de la batería. La fracción de la potencia entregada a la resistencia de carga, es solamente la potencia entregada a la carga, ΔV , dividida por la potencia total $I\mathcal{E}$.

SOLUCIÓN

a) Determine la resistencia equivalente del circuito.

Aplice la ecuación 18.4 y sume las resistencias:

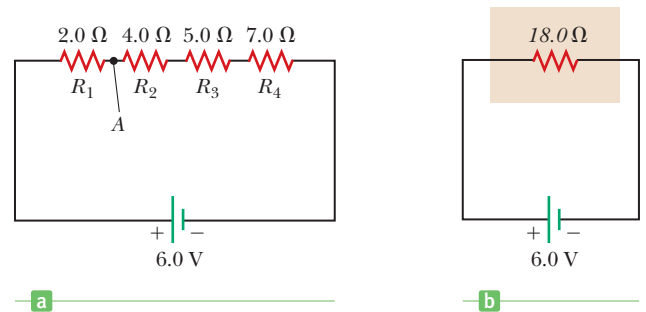


Figura 18.5 (Ejemplo 18.1) a) Cuatro resistores conectados en serie. b) Resistencia equivalente del circuito en a).

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 2.0 \Omega + 4.0 \Omega + 5.0 \Omega + 7.0 \Omega = 18.0 \Omega$$

(continúa)

b) Determine la corriente en el circuito.

Aplique la ley de Ohm al resistor equivalente en la figura 18.5b y resuelva para la corriente:

$$I = \frac{\Delta V}{R_{\text{eq}}} = \frac{6.0 \text{ V}}{18.0 \Omega} = 0.33 \text{ A}$$

c) Calcule el potencial eléctrico en el punto A.

Aplique la ley de Ohm al resistor de 2.0Ω para encontrar la caída de voltaje a través de él:

$$\Delta V = IR = (0.33 \text{ A})(2.0 \Omega) = 0.66 \text{ V}$$

Para encontrar el potencial en A, reste la caída de voltaje del potencial en el terminal positivo:

$$V_A = 6.0 \text{ V} - 0.66 \text{ V} = 5.3 \text{ V}$$

d) Calcule la resistencia interna de la batería si el fem de la batería es 6.2 V .

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir$$

Escriba la ecuación 18.1:

Resuelva para la resistencia interna r y sustituya valores:

$$r = \frac{\mathcal{E} - \Delta V}{I} = \frac{6.2 \text{ V} - 6.0 \text{ V}}{0.33 \text{ A}} = 0.6 \Omega$$

e) ¿Qué fracción f de la potencia de la batería es entregada a los resistores de carga?

Divida la potencia entregada a la carga por la potencia total de salida:

$$f = \frac{I\Delta V}{I\mathcal{E}} = \frac{\Delta V}{\mathcal{E}} = \frac{6.0 \text{ V}}{6.2 \text{ V}} = 0.97$$

COMENTARIOS Un error común es que la corriente se “agota” y declina de manera estable conforme avanza a través de una serie de resistores. Ésta sería una violación de la conservación de la carga. ¿en la energía potencial eléctrica de los portadores de carga, algunos de los cuales se entrega a cada resistencia? ¿Cuál es la energía potencial eléctrica utilizada en realidad en los portadores de carga, parte de la cual se entrega a cada resistencia?

PREGUNTA 18.1 Explique por qué la corriente en un circuito real disminuye muy lentamente con el tiempo en comparación con su valor inicial.

EJERCICIO 18.1 Un circuito consta de una batería con un circuito cerrado, un voltaje terminal de 12.0 V y resistencias conectadas en serie de 3.0Ω , 6.0Ω , 8.0Ω y 9.0Ω , orientado como en la figura 18.5a, con la batería en la parte inferior de la malla, la terminal positiva a la izquierda y las resistencias en orden ascendente, de izquierda a derecha, en la parte superior de la malla. Calcule a) la resistencia equivalente del circuito, b) la corriente y c) la potencia total disipada por las resistencias de carga. d) ¿Cuál es el potencial eléctrico en un punto entre las resistencias de 6.0Ω y 8.0Ω , si el potencial eléctrico en la terminal positiva es de 12.0 V ? e) Si la batería tiene una fem de 12.1 V , encuentre la resistencia interna de la batería.

RESPUESTAS a) 26.0Ω b) 0.462 A c) 5.54 W d) 7.84 V e) 0.2Ω

18.3 Resistores en paralelo

Ahora considere dos resistores conectados en paralelo, como en la figura activa 18.6. En este caso, **la diferencia de potencial a través de los resistores es la misma porque cada uno se conecta directamente a través de las terminales de la batería.** Las corrientes por lo general no son iguales. Cuando las cargas llegan al punto a (llamada unión o nodo) en la figura activa 18.6b, la corriente se divide en dos partes: I_1 , que fluye a través de R_1 ; e I_2 , que fluye a través de R_2 . Si R_1 es mayor que R_2 , entonces I_1 es menor que I_2 . En general, más carga viaja a través de la trayectoria con menos resistencia. **Puesto que la carga se conserva, la corriente I que entra al punto a debe ser igual a la corriente total $I_1 + I_2$ que sale de dicho punto.** Matemáticamente, esto se escribe

$$I = I_1 + I_2$$

La caída de potencial debe ser la misma para los dos resistores y también debe ser igual a la caída de potencial a través de la batería. La ley de Ohm aplicada a cada resistor produce

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} \quad I_2 = \frac{\Delta V}{R_2}$$

La ley de Ohm aplicada al resistor equivalente en la figura 18.6c produce

$$I = \frac{\Delta V}{R_{\text{eq}}}$$

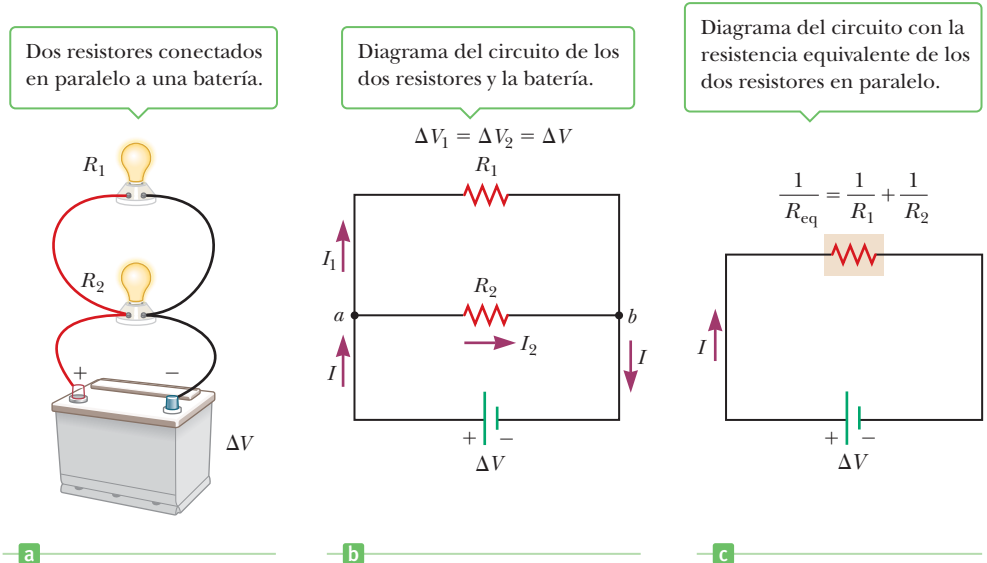


Figura activa 18.6 Conexión en paralelo de dos resistores R_1 y R_2 en la forma de dos focos, con una batería. Las diferencias de potencial a través de R_1 y R_2 son iguales. Las corrientes en los resistores son iguales y la resistencia equivalente de la combinación es $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$.

Cuando estas expresiones para las corrientes se sustituyen en la ecuación $I = I_1 + I_2$ y las ΔV se cancelan, obtenemos

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ (combinación en paralelo)} \quad [18.5]$$

Una extensión de este análisis a tres o más resistores en paralelo produce la siguiente expresión general para la resistencia equivalente:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad [18.6]$$

A partir de esta expresión, vemos que **el inverso de la resistencia equivalente de dos o más resistores conectados en paralelo es la suma de los inversos de las resistencias individuales y siempre es menor que la más pequeña resistencia en el grupo.**

◀ Resistencia equivalente de una combinación de resistores en paralelo

■ Examen rápido

18.5 En la figura 18.7, la corriente se mide con el amperímetro en el lado derecho del diagrama de circuito. Cuando se cierra el interruptor, ¿la lectura en el amperímetro a) aumenta, b) disminuye o c) permanece igual?

18.6 Cuando se abre el interruptor en la figura 18.7, al resistor R_1 se entrega potencia P_o . Cuando se cierra el interruptor, ¿cuál de los siguientes es verdadero para la potencia P_c que se entrega a R_1 ? (Desprecie la resistencia interna de la batería.) a) $P_c < P_o$ b) $P_c = P_o$ c) $P_c > P_o$

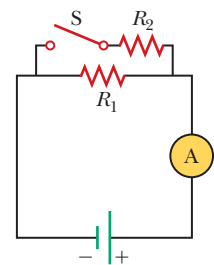


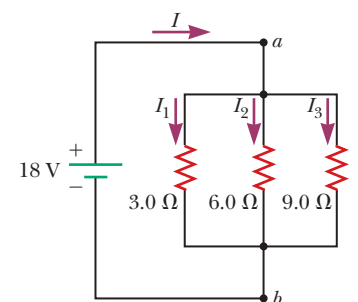
Figura 18.7 (Exámenes rápidos 18.5 y 18.6)

■ EJEMPLO 18.2 Tres resistores en paralelo

OBJETIVO Analizar un circuito que tiene resistores conectados en paralelo.

PROBLEMA Tres resistores se conectan en paralelo, como en la figura 18.8. Entre los puntos a y b se mantiene una diferencia de potencial de 18 V. **a)** Determine la corriente en cada resistor. **b)** Calcule la potencia que se entrega a cada resistor y la potencia total. **c)** Determine la resistencia equivalente del circuito. **d)** Determine la potencia total que se entrega a la resistencia equivalente.

Figura 18.8 (Ejemplo 18.2) Tres resistores conectados en paralelo. El voltaje a través de cada resistor es 18 V.



(continúa)

ESTRATEGIA Para obtener la corriente en cada resistor use la ley de Ohm y el hecho de que las caídas de voltaje a través de los resistores en paralelo son las mismas. El resto del problema sólo requiere sustitución en la ecuación para potencia entregada a un resistor, $P = I^2R$, y la ley de suma de recíprocos para resistores en paralelo.

SOLUCIÓN

a) Determine la corriente en cada resistor.

Aplique la ley de Ohm y resuelva para la corriente I que entrega la batería para encontrar la corriente en cada resistor:

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{18 \text{ V}}{3.0 \Omega} = 6.0 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{18 \text{ V}}{6.0 \Omega} = 3.0 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{\Delta V}{R_3} = \frac{18 \text{ V}}{9.0 \Omega} = 2.0 \text{ A}$$

b) Calcule la potencia que se entrega a cada resistor y la potencia total.

Aplique $P = I^2R$ a cada resistor y sustituya los resultados del inciso a):

$$3 \Omega: P_1 = I_1^2 R_1 = (6.0 \text{ A})^2 (3.0 \Omega) = 110 \text{ W}$$

$$6 \Omega: P_2 = I_2^2 R_2 = (3.0 \text{ A})^2 (6.0 \Omega) = 54 \text{ W}$$

$$9 \Omega: P_3 = I_3^2 R_3 = (2.0 \text{ A})^2 (9.0 \Omega) = 36 \text{ W}$$

Sume para obtener la potencia total:

$$P_{\text{total}} = 110 \text{ W} + 54 \text{ W} + 36 \text{ W} = 2.0 \times 10^2 \text{ W}$$

c) Determine la resistencia equivalente del circuito.

Aplique la regla de la suma de recíprocos, ecuación 18.6:

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{3.0 \Omega} + \frac{1}{6.0 \Omega} + \frac{1}{9.0 \Omega} = \frac{11}{18 \Omega}$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{18}{11} \Omega = 1.6 \Omega$$

d) Calcule la potencia disipada por la resistencia equivalente.

Use la ecuación de potencia alterna:

$$P = \frac{(\Delta V)^2}{R_{\text{eq}}} = \frac{(18 \text{ V})^2}{1.6 \Omega} = 2.0 \times 10^2 \text{ W}$$

COMENTARIOS Hay algo importante que advertir en el inciso a): el resistor más pequeño de 3.0Ω porta la mayor corriente, mientras que los otros resistores más grandes, de 6.0 y 9.0Ω , portan corrientes más pequeñas. La corriente más grande siempre se encuentra en la trayectoria de menor resistencia. En el inciso b), la potencia también podrá obtenerse con $P = (\Delta V)^2/R$. Note que $P_1 = 108 \text{ W}$, pero se redondea a 110 W porque sólo hay dos cifras significativas. Finalmente, observe que la potencia total disipada en el resistor equivalente es la misma que la suma de la potencia disipada en los resistores individuales, como debe ser.

Tip 18.2 ¡No olvide voltear!

El error más común al calcular la resistencia equivalente para resistores en paralelo, es olvidar invertir la respuesta después de sumar los recíprocos. ¡No olvide voltearlo!

PREGUNTA 18.2 Si se agrega un cuarto resistor en paralelo a los otros tres, ¿cómo cambiaría la resistencia equivalente? a) Sería mayor. b) Sería menor. c) Se requiere más información para determinar el efecto.

EJERCICIO 18.2 Suponga que las resistencias en el ejemplo son 1.0 , 2.0 y 3.0Ω , respectivamente y se proporciona una nueva fuente de voltaje. Si la corriente que se mide en el resistor de 3.0Ω es de 2.0 A , determine a) la diferencia de potencial que proporciona la nueva batería y las corrientes en cada uno de los resistores restantes, b) la potencia entregada a cada resistor y la potencia total, c) la resistencia equivalente y d) la corriente total y la potencia disipada por el resistor equivalente.

RESPUESTAS a) $\mathcal{E} = 6.0 \text{ V}$, $I_1 = 6.0 \text{ A}$, $I_2 = 3.0 \text{ A}$ b) $P_1 = 36 \text{ W}$, $P_2 = 18 \text{ W}$, $P_3 = 12 \text{ W}$, $P_{\text{total}} = 66 \text{ W}$ c) $\frac{6}{11} \Omega$ d) $I = 11 \text{ A}$, $P_{\text{eq}} = 66 \text{ W}$

Examen rápido

18.7 Suponga que tiene tres focos idénticos, algo de alambre y una batería. Conecte un foco a la batería y tome nota de su brillo. Agregue un foco, conéctelo en paralelo con el foco anterior y de nuevo tome nota del brillo. Repita el proceso con el tercer foco y conéctelo en paralelo con los otros dos. Conforme se agregan focos, ¿qué ocurre con a) el brillo de los focos? b) ¿Las corrientes individuales en los focos? c) ¿La potencia que entrega la batería? d) ¿La vida de la batería? (Desprecie la resistencia interna de la batería.)

18.8 Si los focos en la pregunta rápida 18.7 se conectan uno por uno en serie en lugar de en paralelo, ¿qué ocurre con a) el brillo de los focos? b) ¿Las corrientes individuales en los focos? c) ¿La potencia que entrega la batería? d) ¿La vida de la batería? (De nuevo, desprecie la resistencia interna de la batería.)

Los circuitos domésticos siempre están alambrados de modo que los dispositivos eléctricos se conecten en paralelo, como en la figura activa 18.6a. De esta forma, cada dispositivo opera de manera independiente de los otros, de modo que si uno se apaga, los otros permanecen encendidos. Por ejemplo, si uno de los focos en la figura 18.6 se remueve de su portafoco, el otro continuaría funcionando. Igualmente importante es que cada dispositivo opera al mismo voltaje. Si los dispositivos se conectan en serie, el voltaje a través de cualquier dispositivo dependería de cuántos dispositivos hay en la combinación y sobre sus resistencias individuales.

En muchos circuitos domésticos se usan interruptores en serie con otros elementos de circuito para propósitos de seguridad. Un interruptor se diseña para apagar y abrir el circuito a cierto valor máximo de la corriente (por lo general 15 o 20 A) que depende de la naturaleza del circuito. Si no se usa un interruptor, las corrientes excesivas causadas por la operación simultánea de varios dispositivos podría resultar en temperaturas excesivas de los alambres, que tal vez provoquen un incendio. En casas de construcción más antigua, en lugar de interruptores se usaban fusibles. Cuando la corriente en un circuito superaba cierto valor, el conductor en un fusible se funde y abre el circuito. La desventaja de los fusibles es que se destruyen en el proceso de abrir el circuito, mientras que los interruptores se pueden restablecer.

APLICACIÓN

Interruptores

FÍSICA APLICADA 18.2 Combinaciones de focos

Compare el brillo de los cuatro focos idénticos que se muestran en la figura 18.9. ¿Qué sucede si el foco A falla y por lo tanto no puede conducir corriente? ¿Y si falla C? ¿Y si falla D?

EXPLICACIÓN Los focos A y B se conectan en serie a través de la fem de la batería, mientras que el foco C se conecta a través de la batería. Esto significa que la caída de voltaje a través de C tiene la misma magnitud que la fem de la batería, mientras que esta misma fem se divide entre los focos A y B. Como resultado, el foco C brillará más intensamente que cualquiera de los focos A y B, que tendrán igual brillo. El foco D tiene un alambre a través de él —un cortocircuito— de modo que la diferencia de potencial a través del foco D es cero y no brilla. Si el foco A falla, B se apaga, pero C permanece encendido. Si C falla, no hay efecto sobre los otros focos. Si D falla, el evento es indetectable porque D no brillaba al inicio. ■

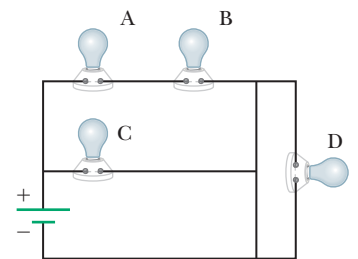


Figura 18.9 (Física aplicada 18.2)

FÍSICA APLICADA 18.3 Focos de tres vías

La figura 18.10 (página 624) ilustra cómo se construye un foco de tres vías para proporcionar tres niveles de intensidad luminosa. El portafoco está equipado con un mando de tres vías para seleccionar diferentes intensidades de luz. El foco contiene dos filamentos. ¿Por qué los filamentos se conectan

en paralelo? Explique cómo se usan los dos filamentos para proporcionar las tres diferentes intensidades luminosas.

EXPLICACIÓN Si los filamentos se conectan en serie y uno de ellos falla, no habrá corriente en el foco y no brillará, sin

importar la posición del mando. Sin embargo, cuando los filamentos se conectan en paralelo y uno de ellos (por decir, el filamento de 75 W) falla, el foco todavía opera en una de las posiciones del mando, porque hay corriente en el otro filamento (100 W). Las tres intensidades de luz son posibles al seleccionar uno de los tres valores de la resistencia del filamento, con un solo valor de 120 V para el voltaje aplicado. El filamento de 75 W ofrece un valor de resistencia, el filamento de 100 W ofrece un segundo valor y la tercera resistencia se obtiene al combinar los dos filamentos en paralelo. Cuando el mando S_1 se cierra y el mando S_2 se abre, sólo el filamento de 75 W porta corriente. Cuando el mando S_1 se abre y el mando S_2 se cierra, sólo el filamento de 100 W porta corriente. Cuando ambos mandos se cierran, los dos filamentos portan corriente y se obtiene una iluminación total que corresponde a 175 W. ■

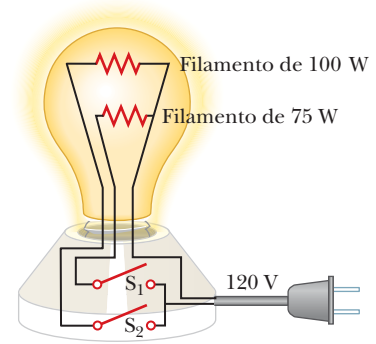


Figura 18.10 (Física aplicada 18.3)

■ **ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS**

Simplificación de circuitos con resistores

1. **Combine todos los resistores en serie** al sumar las resistencias individuales y dibuje el nuevo diagrama de circuito simplificado.

Hechos útiles: $R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

La corriente en cada resistor es la misma.

2. **Combine todos los resistores en paralelo** al sumar los recíprocos de las resistencias y luego tomar el recíproco del resultado. Dibuje el nuevo diagrama de circuito simplificado.

Hechos útiles: $\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$

La diferencia de potencial a través de cada resistor es la misma.

3. **Repita** los primeros dos pasos según requieras, hasta que ya no se puedan hacer más combinaciones. Si sólo hay una batería en el circuito, el resultado por lo general será un solo resistor equivalente en serie con la batería.
4. **Use la ley de Ohm**, $\Delta V = IR$, para determinar la corriente en el resistor equivalente. Luego trabaje hacia atrás a través de los diagramas y aplique los hechos útiles que se mencionan en los pasos 1 o 2 para encontrar las corrientes en los otros resistores. (En circuitos más complejos, necesitará las reglas de Kirchhoff, como se describe en la siguiente sección.)

■ **EJEMPLO 18.3** Resistencia equivalente

OBJETIVO Resolver un problema que involucra resistores en serie y en paralelo.

PROBLEMA Cuatro resistores se conectan como se muestra en la figura 18.11a. **a)** Encuentre la resistencia equivalente entre los puntos a y c . **b)** ¿Cuál es la corriente en cada resistor, si entre a y c se conecta una batería de 42 V?

ESTRATEGIA Reduzca el circuito en pasos, como se muestra en las figuras 18.11b y 18.11c, y use la regla de suma para resistores en serie y la regla de suma de recíprocos para resistores en paralelo. Determine las corrientes es cuestión de aplicar la ley de Ohm mientras trabaja hacia atrás a través de los diagramas.

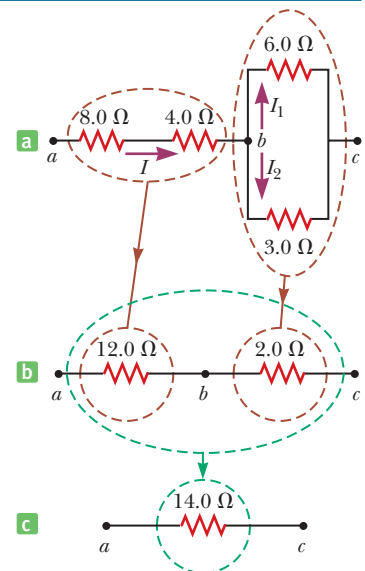


Figura 18.11 (Ejemplo 18.3) Los cuatro resistores que se muestran en a) pueden reducirse en pasos a un resistor equivalente de 14Ω .

SOLUCIÓN

a) Determine la resistencia equivalente del circuito.

Los resistores de 8.0Ω y 4.0Ω están en serie, así que use la regla de la suma para encontrar la resistencia equivalente entre a y b :

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 = 8.0 \Omega + 4.0 \Omega = 12.0 \Omega$$

Los resistores de 6.0Ω y 3.0Ω están en paralelo, así que use la regla de suma de recíprocos para encontrar la resistencia equivalente entre b y c (¡no olvide invertir!):

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{6.0 \Omega} + \frac{1}{3.0 \Omega} = \frac{1}{2.0 \Omega}$$

$$R_{\text{eq}} = 2.0 \Omega$$

En el nuevo diagrama, 18.11b, ahora hay dos resistores en serie. Combínelos con la regla de la suma para encontrar la resistencia equivalente del circuito:

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 = 12.0 \Omega + 2.0 \Omega = 14.0 \Omega$$

b) Encuentre la corriente en cada resistor, si una batería de 42 V se conecta entre los puntos a y c .

Encuentre la corriente en el resistor equivalente de la figura 18.11c, que es la corriente total. Los resistores en serie portan todos la misma corriente, de modo que el valor es la corriente en el resistor de 12Ω de la figura 18.11b y también en los resistores de 8.0Ω y 4.0Ω en la figura 18.11a.

$$I = \frac{\Delta V_{ac}}{R_{\text{eq}}} = \frac{42 \text{ V}}{14 \Omega} = 3.0 \text{ A}$$

Calcule la caída de voltaje ΔV_{para} a través del circuito en paralelo, que tiene una resistencia equivalente de 2Ω :

$$\Delta V_{\text{para}} = IR = (3.0 \text{ A})(2.0 \Omega) = 6.0 \text{ V}$$

Aplique otra vez la ley de Ohm para encontrar las corrientes en cada resistor del circuito paralelo:

$$I_1 = \frac{\Delta V_{\text{para}}}{R_{6.0 \Omega}} = \frac{6.0 \text{ V}}{6.0 \Omega} = 1.0 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta V_{\text{para}}}{R_{3.0 \Omega}} = \frac{6.0 \text{ V}}{3.0 \Omega} = 2.0 \text{ A}$$

COMENTARIOS Como comprobación final, advierta que $\Delta V_{bc} = (6.0 \Omega)I_1 = (3.0 \Omega)I_2 = 6.0 \text{ V}$ y $\Delta V_{ab} = (12 \Omega)I_1 = 36 \text{ V}$; por lo tanto, $\Delta V_{ac} = \Delta V_{ab} + V_{bc} = 42 \text{ V}$, como se esperaba.

PREGUNTA 18.3 ¿Cuál de los resistores originales disipa energía a la mayor razón?

EJERCICIO 18.3 Suponga que los resistores en serie en el ejemplo 18.3 ahora son de 6.00Ω y 3.00Ω , mientras que los resistores en paralelo son 8.00Ω (arriba) y 4.00Ω (abajo), y la batería proporciona una fem de 27.0 V . Encuentre a) la resistencia equivalente y b) las corrientes I , I_1 e I_2 .

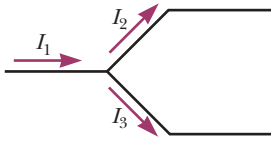
RESPUESTAS a) 11.7Ω b) $I = 2.31 \text{ A}$, $I_1 = 0.770 \text{ A}$, $I_2 = 1.54 \text{ A}$

18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos

Como se demostró en la sección anterior, los circuitos simples se pueden analizar con la ley de Ohm y las reglas para combinaciones de resistores en serie y en paralelo. Sin embargo, existen muchas formas en las que los resistores se pueden conectar de modo que los circuitos formados se puedan reducir a un solo resistor equivalente. El procedimiento para analizar circuitos más complejos se puede facilitar mediante el uso de dos reglas simples llamadas **reglas de Kirchhoff**:

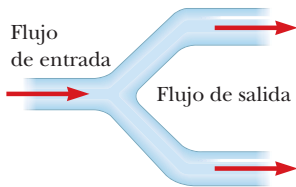
1. La suma de las corrientes que entran a cualquier unión debe ser igual a la suma de las corrientes que salen de dicha unión. (A esta regla con frecuencia se le llama **regla del nodo**.)
2. La suma de las diferencias de potencial a través de todos los elementos alrededor de cualquier lazo de circuito cerrado debe ser cero. (Esta regla usualmente se llama **regla de la malla**.)

La corriente I_1 que entra al nodo debe ser igual a la suma de las corrientes I_2 y I_3 que salen de él.



a

El flujo neto de entrada debe ser igual al flujo neto de salida.



b

Figura 18.12 a) Regla del nodo de Kirchhoff. b) Analogía mecánica de la regla del nodo.

En cada diagrama, $\Delta V = V_b - V_a$ y el elemento de circuito es atravesado de a a b , de izquierda a derecha.

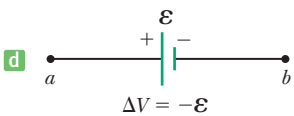
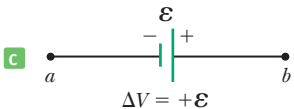
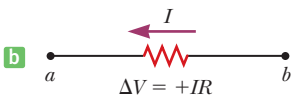
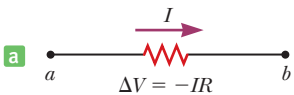


Figura 18.13 Reglas para determinar las diferencias de potencial a través de un resistor y una batería, si supone que la batería no tiene resistencia interna.

La regla del nodo es un enunciado de *conservación de carga*. Cualquier corriente que entra a un punto dado en un circuito debe salir de dicho punto, porque la carga no se puede crear o desaparecer en un punto. Si esta regla del nodo se aplica en la figura 18.12a, obtenemos

$$I_1 = I_2 + I_3$$

La figura 18.12b representa una analogía mecánica del circuito que se muestra en la figura 18.12a. En esta analogía, el agua fluye a través de una tubería ramificada sin fugas. La tasa de flujo en la tubería es igual a la tasa de flujo total fuera de las dos ramas.

La regla de la malla es equivalente al principio de *conservación de la energía*. Cualquier carga que se mueva alrededor de cualquier malla cerrada en un circuito (que comience y termine en el mismo punto) debe ganar tanta energía como la que pierde. Gana energía mientras se bombea a través de una fuente de fem. Su energía puede disminuir en la forma de una caída de potencial $-IR$ a través de un resistor o como resultado de fluir hacia atrás a través de una fuente de fem, desde la terminal positiva hasta la negativa, dentro de la batería. En el último caso, la energía eléctrica se convierte en energía química conforme la batería se carga.

Cuando aplique las reglas de Kirchhoff, debe tomar dos decisiones al principio del problema:

1. Asigne símbolos y direcciones a las corrientes en todas las ramas del circuito. No se preocupe si supone de manera incorrecta la dirección de una corriente, la respuesta será negativa, pero *su magnitud será correcta*. (Puesto que las ecuaciones son *lineales* en las corrientes, todas las corrientes están a la primera potencia.)
2. Cuando aplique la regla de la malla, debe elegir una dirección para recorrer la malla y ser consistente en ir en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario. Conforme recorra la malla, registre las caídas y subidas de voltaje de acuerdo con las siguientes reglas (que se resumen en la figura 18.13, donde se supuso que el movimiento se da del punto a hacia el punto b):
 - a) Si un resistor se recorre en la dirección de la corriente, el cambio en potencial eléctrico a través del resistor es $-IR$ (figura 18.13a).
 - b) Si un resistor se recorre en la dirección opuesta a la corriente, el cambio en potencial eléctrico a través del resistor es $+IR$ (figura 18.13b).
 - c) Si una fuente de fem se recorre en la dirección de la fem (de $-$ a $+$ en las terminales), el cambio en potencial eléctrico es $+\mathcal{E}$ (figura 18.13c).
 - d) Si una fuente de fem se recorre en la dirección opuesta a la fem (de $+$ a $-$ en las terminales), el cambio en potencial eléctrico es $-\mathcal{E}$ (figura 18.13d).

Existen límites al número de veces que se pueden usar las reglas del nodo y de la malla. La regla del nodo la puede usar con tanta frecuencia como la necesite, en tanto que, cada vez que escriba la ecuación, incluya una corriente que no haya utilizado en una ecuación de regla del nodo anterior. (Si no sigue el procedimiento, la nueva ecuación sólo será una combinación de otras dos ecuaciones que ya tiene.) En general, el número de veces que puede usar la regla del nodo es uno menos que el número de puntos de unión en el circuito. La regla de la malla también se puede usar tanto como requiera, en tanto un nuevo elemento de circuito (resistor o batería) o una nueva corriente aparezca en cada nueva ecuación. **Para resolver un problema de circuito particular, usted necesita tantas ecuaciones independientes como incógnitas tenga.**

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Aplicación de las reglas de Kirchhoff a un circuito

1. **Asigne marcas y símbolos** a todas las cantidades conocidas y desconocidas.
2. **Asigne direcciones a las corrientes** en cada parte del circuito. Aunque la asignación de direcciones de corriente es arbitraria, debe apegarse a sus elecciones originales a lo largo del problema conforme aplica las reglas de Kirchhoff.
3. **Aplique la regla del nodo** a cualquier unión en el circuito. La regla se puede aplicar tantas veces como una nueva corriente (una no utilizada en una ecuación anterior) aparezca en la ecuación resultante.



Gustav Kirchhoff
Físico alemán (1824-1887)

Junto con el químico alemán Robert Bunsen, Kirchhoff, profesor en Heidelberg, inventó el espectroscopio que se estudia en el capítulo 28. También formuló otra regla que afirma: “una sustancia fría absorberá luz de las mismas longitudes de onda que emite cuando está caliente”.

4. **Aplique la regla de la malla de Kirchhoff** a tantas mallas en el circuito como necesite para resolver las incógnitas. Para aplicar esta regla, debe identificar correctamente el cambio en potencial eléctrico conforme cruza cada elemento al recorrer la malla cerrada. ¡Cuidado con los signos!
5. **Resuelva las ecuaciones** simultáneamente para las cantidades desconocidas y use sustitución o cualquier otro método familiar para usted.
6. **Compruebe sus respuestas** al sustituirlas en las ecuaciones originales.

EJEMPLO 18.4 Aplicación de las reglas de Kirchhoff

OBJETIVO Usar las reglas de Kirchhoff para encontrar corrientes en un circuito con tres corrientes y una batería.

PROBLEMA Encuentre las corrientes en el circuito que se muestra en la figura 18.14, con el uso de las reglas de Kirchhoff.

ESTRATEGIA Existen tres corrientes incógnitas en este circuito, así que debe obtener tres ecuaciones independientes, que luego se pueden resolver por sustitución. Puede determinar las ecuaciones con una aplicación de la regla del nodo y dos aplicaciones de la regla de la malla. Elija la unión *c*. (La unión *d* proporciona la misma ecuación.) Para las mallas, elija la malla inferior y la malla superior, ambas se muestran mediante flechas azules, que indican la dirección en la que se recorrerá el circuito matemáticamente (no necesariamente la dirección de la corriente). La tercera malla da una ecuación que se puede obtener mediante una combinación lineal de las otras dos, así que no proporciona información adicional y no se usa.

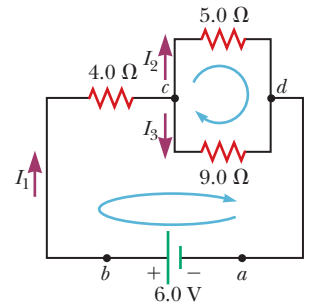


Figura 18.14 (Ejemplo 18.4)

SOLUCIÓN

Aplique la regla del nodo al punto *c*. I_1 se dirige hacia la unión, I_2 e I_3 se dirigen afuera de la unión.

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Seleccione la malla inferior y recórrela en sentido de las manecillas del reloj, a partir del punto *a*, y genere una ecuación con la regla de la malla:

$$\sum \Delta V = \Delta V_{\text{bat}} + \Delta V_{4.0\Omega} + \Delta V_{9.0\Omega} = 0$$

$$6.0 \text{ V} - (4.0 \Omega)I_1 - (9.0 \Omega)I_3 = 0$$

Seleccione la malla superior y recórrela en sentido de las manecillas del reloj desde el punto *c*. ¡Observe la ganancia a través del resistor de 9.0Ω porque se recorre *contra* la dirección de la corriente!

$$\sum \Delta V = \Delta V_{5.0\Omega} + \Delta V_{9.0\Omega} = 0$$

$$-(5.0 \Omega)I_2 + (9.0 \Omega)I_3 = 0$$

Reescriba las tres ecuaciones, reordene términos y elimine unidades por el momento, por conveniencia:

- (1) $I_1 = I_2 + I_3$
- (2) $4.0I_1 + 9.0I_3 = 6.0$
- (3) $-5.0I_2 + 9.0I_3 = 0$

Resuelva la ecuación (3) para I_2 y sustituya en la ecuación (1):

$$I_2 = 1.8I_3$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = 1.8I_3 + I_3 = 2.8I_3$$

(continúa)

Sustituya la última expresión en la ecuación (2) y resuelva para I_3 :

$$4.0(2.8I_3) + 9.0I_3 = 6.0 \rightarrow I_3 = 0.30 \text{ A}$$

Sustituya I_3 de vuelta en la ecuación (3) para obtener I_2 :

$$-5.0I_2 + 9.0(0.30 \text{ A}) = 0 \rightarrow I_2 = 0.54 \text{ A}$$

Sustituya I_3 en la ecuación (2) para obtener I_1 :

$$4.0I_1 + 9.0(0.30 \text{ A}) = 6.0 \rightarrow I_1 = 0.83 \text{ A}$$

COMENTARIOS Al sustituir estos valores de vuelta en las ecuaciones originales verifique que sean correctos, con cualquier pequeña discrepancia debida a redondeo. El problema también se puede resolver al combinar primero los resistores.

PREGUNTA 18.4 ¿Cómo cambiarían las respuestas si en la figura 18.14 se invierten las direcciones indicadas de las corrientes?

EJERCICIO 18.4 Suponga que la batería de 6.0 V se sustituye con una batería de fem desconocida y un amperímetro mide $I_1 = 1.5 \text{ A}$. Encuentre las otras dos corrientes y la fem de la batería.

RESPUESTAS $I_2 = 0.96 \text{ A}$, $I_3 = 0.54 \text{ A}$, $\mathcal{E} = 11 \text{ V}$

Tip 18.3 Más corriente pasa en la trayectoria de menor resistencia

Tal vez usted haya escuchado la afirmación: “la corriente sigue la trayectoria de menor resistencia”. Para una combinación de resistores en paralelo, esta afirmación es imprecisa porque la corriente en realidad sigue todas las trayectorias. Sin embargo, la mayor parte de la corriente viaja en la trayectoria de la menor resistencia.

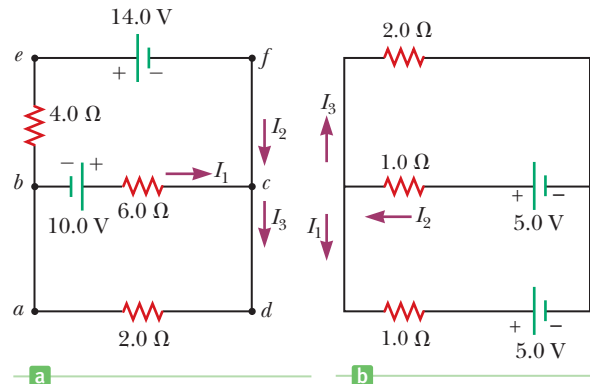
EJEMPLO 18.5 Otra aplicación de las reglas de Kirchhoff

OBJETIVO Determinar las corrientes en un circuito con tres corrientes y dos baterías, cuando algunas de las direcciones de corriente se eligen de manera equivocada.

PROBLEMA Encuentre I_1 , I_2 e I_3 en la figura 18.15a.

ESTRATEGIA Use las dos reglas de Kirchhoff, la regla del nodo una vez y la regla de la malla dos veces, para desarrollar tres ecuaciones para las tres corrientes incógnitas. Resuelva simultáneamente las ecuaciones.

Figura 18.15
a) (Ejemplo 18.5)
b) (Ejercicio 18.5)



SOLUCIÓN

Aplique la regla del nodo de Kirchhoff al nodo c . Debido a las direcciones de corriente elegidas, I_1 e I_2 se dirigen hacia el nodo, e I_3 se dirige afuera del nodo.

Aplique la regla de la malla de Kirchhoff a las mallas $abcd$ y $befc$. (La malla $afda$ no aporta nueva información.) En la malla $befc$ se obtiene un signo positivo cuando se recorre el resistor de 6.0Ω , porque la dirección de la trayectoria es opuesta a la dirección de la corriente I_1 .

Con la ecuación (1), elimine I_3 de la ecuación (2) (ignore unidades por el momento):

(1) $I_3 = I_1 + I_2$

(2) Malla $abcd$: $10 \text{ V} - (6.0 \Omega)I_1 - (2.0 \Omega)I_3 = 0$

(3) Malla $befc$: $-(4.0 \Omega)I_2 - 14 \text{ V} + (6.0 \Omega)I_1 - 10 \text{ V} = 0$

$$10 - 6.0I_1 - 2.0(I_1 + I_2) = 0$$

(4) $10 = 8.0I_1 + 2.0I_2$

(5) $-12 = -3.0I_1 + 2.0I_2$

Divida cada término en la ecuación (3) entre 2 y reordene la ecuación de modo que las corrientes estén en el lado correcto:

Al restar la ecuación (5) de la ecuación (4) elimina I_2 y se obtiene I_1 :

$$22 = 11I_1 \rightarrow I_1 = 2.0 \text{ A}$$

Al sustituir este valor de I_1 en la ecuación (5) se obtiene I_2 :

$$2.0I_2 = 3.0I_1 - 12 = 3.0(2.0) - 12 = -6.0 \text{ A}$$

$$I_2 = -3.0 \text{ A}$$

Finalmente, sustituya en la ecuación (1) los valores que encontró para I_1 e I_2 para obtener I_3 :

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2.0 \text{ A} - 3.0 \text{ A} = -1.0 \text{ A}$$

COMENTARIOS El hecho de que I_2 e I_3 sean ambos negativos indica que se eligieron las direcciones equivocadas para estas corrientes. No obstante, las magnitudes son correctas. Elegir las direcciones correctas de las corrientes al comienzo no es importante porque las ecuaciones son lineales, y las elecciones equivocadas sólo resultan en un signo menos en la respuesta.

PREGUNTA 18.5 ¿Es posible que la corriente en una batería se dirija desde la terminal positiva hacia la terminal negativa?

EJERCICIO 18.5 Encuentre las tres corrientes en la figura 18.15b. (¡Observe que la dirección de una corriente deliberadamente se eligió de manera errónea!)

RESPUESTAS $I_1 = -1.0 \text{ A}$, $I_2 = 1.0 \text{ A}$, $I_3 = 2.0 \text{ A}$

18.5 Circuitos RC

Hasta el momento, usted estudió circuitos con corrientes constantes. Ahora considerará circuitos de corriente directa que contienen capacitores, en los cuales las corrientes varían con el tiempo. Considere el circuito en serie de la figura activa 18.16. Suponga que el capacitor inicialmente no tiene carga y el interruptor está abierto. Después de cerrar el interruptor, la batería comienza a cargar las placas del capacitor y la carga pasa a través del resistor. Conforme el capacitor se carga, el circuito porta una corriente variable. El proceso de carga continúa hasta que el capacitor se carga a su máximo valor de equilibrio, $Q = C\mathcal{E}$, donde \mathcal{E} es el voltaje máximo a través del capacitor. Una vez que el capacitor está cargado por completo, la corriente en el circuito es cero. Si supone que el capacitor no tiene carga antes de cerrar el interruptor y si el interruptor se cierra en $t = 0$, encontramos que la carga sobre el capacitor varía con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$q = Q(1 - e^{-t/RC}) \quad [18.7]$$

donde $e = 2.718 \dots$ es la constante de Euler, la base de los logaritmos naturales. La figura activa 18.16b es una gráfica de esta ecuación. La carga es cero en $t = 0$ y tiende a su valor máximo, Q conforme t tiende a infinito. El voltaje ΔV a través del capacitor en cualquier tiempo se obtiene al dividir la carga entre la capacitancia: $\Delta V = q/C$.

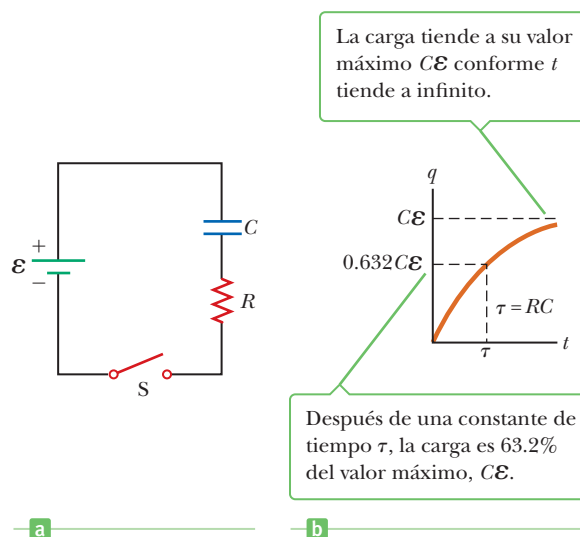
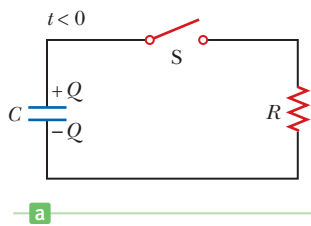


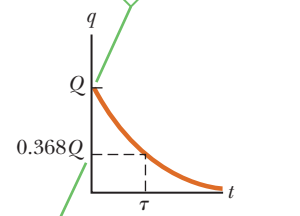
Figura activa 18.16

a) Un capacitor en serie con un resistor, una batería y un interruptor. b) Gráfica de carga en el capacitor frente al tiempo, después que se cierra el interruptor en el circuito.



a

La carga tiene su máximo valor Q en $t = 0$ y decae a cero exponencialmente cuando t tiende al infinito.



La carga cae a 36.8% de su valor inicial cuando ha transcurrido una constante de tiempo.

b

Figura activa 18.17

- a) Un capacitor cargado se conecta a un resistor y un interruptor.
- b) Gráfica de la carga sobre el capacitor frente al tiempo, después de cerrar el interruptor.

Como puede ver de la ecuación 18.7, en este modelo, tomaría una cantidad infinita de tiempo cargar por completo el capacitor. La razón es matemática: al obtener esta ecuación, las cargas se supusieron infinitamente pequeñas, mientras que en realidad la carga más pequeña es la de un electrón, con una magnitud de 1.60×10^{-19} C. Para todo propósito práctico, el capacitor se carga por completo después de una cantidad finita de tiempo. El término RC que aparece en la ecuación 18.7 se llama **constante de tiempo** τ (letra griega tau), de modo que

$$\tau = RC \quad [18.8]$$

La constante de tiempo representa el tiempo requerido para que la carga aumente desde cero hasta 63.2% de su valor de equilibrio máximo. Esto significa que, en un periodo de tiempo igual a una constante de tiempo, la carga en el capacitor aumenta desde cero hasta $0.632Q$. Esto se puede ver al sustituir $t = \tau = RC$ en la ecuación 18.7 y resolver para q . (Note que $1 - e^{-1} = 0.632$.) Es importante observar que un capacitor se carga muy lentamente en un circuito con una constante de tiempo larga, mientras que se carga muy rápido en un circuito con una constante de tiempo corta. Después de un tiempo igual a 10 constantes de tiempo, el capacitor está más que 99.99% cargado.

Ahora considere el circuito de la figura activa 18.17a, que consiste en un capacitor con una carga inicial Q , un resistor y un interruptor. Antes de cerrar el interruptor, la diferencia de potencial a través del capacitor cargado es Q/C . Una vez cerrado el interruptor, la carga comienza a fluir a través del resistor, desde una placa del capacitor hacia la otra, hasta que el capacitor se descarga por completo. Si el interruptor se cierra en $t = 0$, se puede demostrar que la carga q sobre el capacitor varía con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$q = Qe^{-t/RC} \quad [18.9]$$

La carga disminuye exponencialmente con el tiempo, como se muestra en la figura activa 18.17b. En el intervalo $t = \tau = RC$, la carga disminuye desde su valor inicial Q a $0.368Q$. En otras palabras, en un tiempo igual a una constante de tiempo, el capacitor pierde 63.2% de su carga inicial. Puesto que $\Delta V = q/C$, el voltaje a través del capacitor también disminuye exponencialmente con el tiempo, de acuerdo con la ecuación $\Delta V = \mathcal{E}e^{-t/RC}$, donde \mathcal{E} (que es igual a Q/C) es el voltaje inicial a través del capacitor cargado por completo.

■ FÍSICA APLICADA 18.4 Limpiaaparabrisas intermitentes

Muchos automóviles están equipados con limpiaaparabrisas que se pueden usar de manera intermitente durante una tormenta. ¿Cómo es que la operación de esta característica depende de la carga y descarga de un capacitor?

EXPLICACIÓN Los limpiadores son parte de un circuito RC con una constante de tiempo que puede variar al seleccionar diferentes valores de R a través de un interruptor de muchas posiciones. El breve tiempo que los limpiadores permanecen encendidos y el tiempo que están apagados se determina mediante el valor de la constante de tiempo del circuito. ■

■ FÍSICA APLICADA 18.5 Crecimiento bacterial

En aplicaciones biológicas que se preocupan por el crecimiento poblacional, se usa una ecuación que es similar a las ecuaciones exponenciales que se encuentran en el análisis de los circuitos RC . Aplicada a algunas bacterias, esta ecuación es

$$N_f = N_i 2^n$$

donde N_f es el número de bacterias presente después de n tiempos de duplicación, N_i es el número presente en un inicio y n es el número de ciclos de crecimiento o tiempos de duplicación. Los tiempos de duplicación varían de acuerdo con el organismo. El tiempo de duplicación para la bacteria responsable de la lepra es de aproximadamente 30 días y el de la salmonella responsable del envenenamiento de los

alimentos es de cerca de 20 minutos. Suponga que sólo 10 bacterias de salmonella llegan a la pata de un pavo después de su cena de Navidad. Cuatro horas después regresa por un bocadillo. ¿Cuántas bacterias hay ahora?

EXPLICACIÓN El número de veces de duplicación es de $240 \text{ min} / 20 \text{ min} = 12$. Por lo tanto,

$$N_f = N_i 2^n = (10 \text{ bacterias})(2^{12}) = 40960 \text{ bacterias}$$

Así que su sistema tendrá que lidiar con una invasión de aproximadamente 41 000 bacterias, que continuarán duplicándose en un ambiente muy prometedor. ■

■ FÍSICA APLICADA 18.6 Destelladores en la autopista

Muchos sitios de construcción en las autopistas tienen luces amarillas que destellan para advertir a los conductores de posibles peligros. ¿Qué hace que la luz destelle?

EXPLICACIÓN En la figura 18.18 se muestra un circuito típico para tal destellador. La lámpara L es una lámpara llena con gas que actúa como un circuito abierto hasta que una gran diferencia de potencial provoca una descarga, que despiden una luz brillante. Durante esta descarga, la carga fluye a través del gas entre los electrodos de la lámpara. Cuando el interruptor se cierra, la batería carga al capacitor. Al principio, la corriente es alta y la carga sobre el capacitor es baja, así que la mayoría de la diferencia de potencial aparece a través de la resistencia R. Conforme el capacitor se carga, más diferencia de potencial aparece a través de él, lo que refleja la menor corriente y menor diferencia de potencial a través del resistor. Eventualmente, la diferencia de potencial a través del capacitor alcanza un valor al cual la lámpara conducirá y provocará un destello. Este destello descarga al capacitor a través de la lámpara y el proceso de carga comienza de nuevo. El periodo entre destellos se puede ajustar al cambiar la constante de tiempo del circuito RC. ■

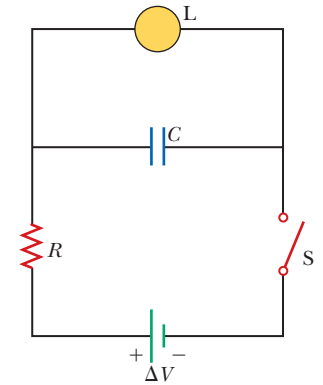


Figura 18.18 (Física aplicada 18.6)

■ Examen rápido

18.9 En la figura 18.19 se cierra el interruptor. Después de un largo tiempo, en comparación con la constante de tiempo del circuito, ¿cuál será la corriente en el resistor de 2 Ω? a) 4 A b) 3 A c) 2 A d) 1 A e) Se necesita más información.

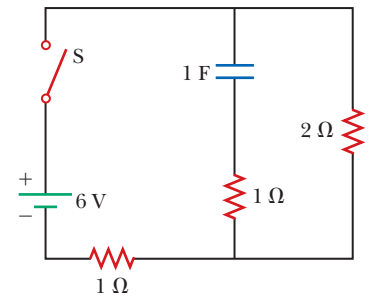


Figura 18.19 (Examen rápido 18.9)

■ EJEMPLO 18.6 Carga de un capacitor en un circuito RC

OBJETIVO Calcular las propiedades elementales de un circuito RC simple.

PROBLEMA Un capacitor sin carga y un resistor se conectan en serie a una batería, como en la figura 18.16a. Si $\mathcal{E} = 12.0 \text{ V}$, $C = 5.00 \mu\text{F}$ y $R = 8.00 \times 10^5 \Omega$, determine **a)** la constante de tiempo del circuito, **b)** la máxima carga sobre el capacitor, **c)** la carga sobre el capacitor después de 6.00 s, **d)** la diferencia de potencial a través del resistor después de 6.00 s y **e)** la corriente en el resistor en dicho tiempo.

ESTRATEGIA Encontrar la constante de tiempo en el inciso a) requiere sustitución en la ecuación 18.8. Para el inciso b), la

máxima carga ocurre después de un largo tiempo, cuando la corriente cae a cero. Por la ley de Ohm, $\Delta V = IR$, la diferencia de potencial a través del resistor también es cero en dicho tiempo y la regla de la malla de Kirchhoff proporciona entonces la carga máxima. Determinar la carga en algún tiempo particular, como en el inciso c), es cuestión de sustituir en la ecuación 18.7. Puede usar la regla de la malla de Kirchhoff y la ecuación de capacitancia para encontrar indirectamente la caída de potencial a través del resistor en el inciso d) y luego la ley de Ohm produce la corriente.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la constante de tiempo del circuito.

Use la definición de la constante de tiempo, ecuación 18.8:

b) Calcule la carga máxima sobre el capacitor.

Aplique la regla de la malla de Kirchhoff al circuito RC, en sentido de las manecillas del reloj, lo cual significa que la diferencia de voltaje a través de la batería es positiva y las diferencias a través del capacitor y resistor son negativas:

A partir de la definición de capacitancia (ecuación 16.8) y de la ley de Ohm, se tiene $\Delta V_C = -q/C$ y $\Delta V_R = -IR$. Éstas son caídas de voltaje, así que son negativas. Además, $\Delta V_{\text{bat}} = +\mathcal{E}$.

$$\tau = RC = (8.00 \times 10^5 \Omega)(5.00 \times 10^{-6} \text{ F}) = 4.00 \text{ s}$$

$$(1) \quad \Delta V_{\text{bat}} + \Delta V_C + \Delta V_R = 0$$

$$(2) \quad \mathcal{E} - \frac{q}{C} - IR = 0$$

(continúa)

Cuando se alcanza la carga máxima $q = Q$, $I = 0$. Resuelva la ecuación (2) para la carga máxima:

$$\mathcal{E} - \frac{Q}{C} = 0 \rightarrow Q = C\mathcal{E}$$

Sustituya para encontrar la carga máxima:

$$Q = (5.00 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 60.0 \mu\text{C}$$

c) Encuentre la carga sobre el capacitor después de 6.00 s.

Sustituya en la ecuación 18.7:

$$q = Q(1 - e^{-t/\tau}) = (60.0 \mu\text{C})(1 - e^{-6.00 \text{ s}/4.00 \text{ s}}) = 46.6 \mu\text{C}$$

d) Calcule la diferencia de potencial a través del resistor después de 6.00 s.

Calcule la caída de voltaje ΔV_C a través del capacitor en dicho tiempo:

$$\Delta V_C = -\frac{q}{C} = -\frac{46.6 \mu\text{C}}{5.00 \mu\text{F}} = -9.32 \text{ V}$$

Resuelva la ecuación (1) para ΔV_R y sustituya:

$$\Delta V_R = -\Delta V_{\text{bat}} - \Delta V_C = -12.0 \text{ V} - (-9.32 \text{ V}) = -2.68 \text{ V}$$

e) Encuentre la corriente en el resistor después de 6.00 s.

Aplique la ley de Ohm y use los resultados del inciso

d) (recuerde que, aquí, $\Delta V_R = -IR$):

$$I = \frac{-\Delta V_R}{R} = \frac{-(-2.68 \text{ V})}{(8.00 \times 10^5 \Omega)} = 3.35 \times 10^{-6} \text{ A}$$

COMENTARIOS Al resolver este problema, ponga mucha atención a los signos. Estos signos siempre se deben elegir cuando se aplica la regla de la malla de Kirchhoff y deben permanecer consistentes a lo largo del problema. De manera alternativa, puede usar magnitudes y elegir los signos mediante intuición física. Por ejemplo, la magnitud de la diferencia de potencial a través del resistor debe ser igual a la magnitud de la diferencia de potencial a través de la batería, menos la magnitud de la diferencia de potencial a través del capacitor.

PREGUNTA 18.6 En un circuito RC , como se muestra en la figura 18.16a, ¿qué ocurre con el tiempo requerido para que el capacitor se cargue a la mitad de su valor máximo, si

aumenta la resistencia o la capacitancia? a) Aumenta. b) Disminuye. c) Permanece igual.

EJERCICIO 18.6 Determine a) la carga sobre el capacitor después de transcurridos 2.00 s, b) la magnitud de la diferencia de potencial a través del capacitor después de 2.00 s y c) la magnitud de la diferencia de potencial a través del resistor en ese mismo tiempo.

RESPUESTAS a) $23.6 \mu\text{C}$ b) 4.72 V c) 7.28 V

■ EJEMPLO 18.7 Descarga de un capacitor en un circuito RC

OBJETIVO Calcular algunas propiedades elementales de un capacitor que se descarga en un circuito RC .

PROBLEMA Considere un capacitor C que se descarga a través de un resistor R , como en la figura 18.17a (página 630). **a)** ¿Cuánto tarda la carga en el capacitor en caer a un cuarto de su valor inicial? Responda como un múltiplo de τ . **b)** Calcule la carga inicial y la constante de tiempo. **c)** ¿Cuánto tarda en descargarse hasta que queda el último cuanto de carga, $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, si la diferencia de potencial inicial a través del capacitor es 12.0 V , la capacitancia es igual a $3.50 \times 10^{-6} \text{ F}$ y la resistencia es 2.00Ω ? (Suponga una disminución exponencial durante todo el proceso de descarga.)

ESTRATEGIA Este problema requiere sustituir valores dados en varias ecuaciones, así como algunas manipulaciones algebraicas que involucran al logaritmo natural. En el inciso a), establezca $q = \frac{1}{4}Q$ en la ecuación 18.9 para un capacitor que se descarga, donde Q es la carga inicial y resuelva para el tiempo t . En el inciso b), sustituya en las ecuaciones 16.8 y 18.8 para encontrar la carga inicial del capacitor y la constante de tiempo, respectivamente. En el inciso c), sustituya los resultados del inciso b) y $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ en la ecuación de descarga de capacitor, y de nuevo resuelva para el tiempo.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuánto tarda la carga en el capacitor para reducirse a un cuarto de su valor inicial?

Aplique la ecuación 18.9:

$$q(t) = Qe^{-t/RC}$$

Sustituya $q(t) = Q/4$ en la ecuación anterior y cancele Q :

$$\frac{1}{4}Q = Qe^{-t/RC} \rightarrow \frac{1}{4} = e^{-t/RC}$$

Tome logaritmos naturales a ambos lados y resuelva para el tiempo t :

$$\ln\left(\frac{1}{4}\right) = -t/RC$$

$$t = -RC \ln\left(\frac{1}{4}\right) = 1.39RC = 1.39\tau$$

b) Calcule la carga inicial y la constante de tiempo a partir de los datos dados.

Use la ecuación de capacitancia para encontrar la carga inicial:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow Q = C \Delta V = (3.50 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V})$$

$$Q = 4.20 \times 10^{-5} \text{ C}$$

Ahora calcule la constante de tiempo:

$$\tau = RC = (2.00 \Omega)(3.50 \times 10^{-6} \text{ F}) = 7.00 \times 10^{-6} \text{ s}$$

c) ¿Cuánto tarda en drenarse todo, menos el último cuanto de carga?

Aplique la ecuación 18.9, divida entre Q y tome logaritmos naturales de ambos lados:

$$q(t) = Qe^{-t/\tau} \rightarrow e^{-t/\tau} = \frac{q}{Q}$$

$$-t/\tau = \ln\left(\frac{q}{Q}\right) \rightarrow t = -\tau \ln\left(\frac{q}{Q}\right)$$

Tome logaritmos naturales de ambos lados:

Sustituya $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ y los valores para Q y τ que encontró en el inciso b):

$$t = -(7.00 \times 10^{-6} \text{ s}) \ln\left(\frac{1.60 \times 10^{-19} \text{ C}}{4.20 \times 10^{-5} \text{ C}}\right) = 2.32 \times 10^{-4} \text{ s}$$

COMENTARIOS El inciso a) muestra cómo a menudo se puede obtener información útil aun cuando no se conozcan detalles concernientes a capacitancias, resistencias o voltajes. El inciso c) demuestra que los capacitores se pueden descargar (o, por el contrario, cargarse) rápidamente, a pesar de la forma matemática de las ecuaciones 18.7 y 18.9, que indican que se requeriría un tiempo infinito.

PREGUNTA 18.7 Suponga que se duplica el voltaje inicial que se utilizó para cargar al capacitor. ¿El tiempo requerido para descargar todo, menos el último cuanto de carga, a) aumenta, b) disminuye, c) permanece igual?

EJERCICIO 18.7 Suponga que el mismo tipo de circuito en serie tiene $R = 8.00 \times 10^4 \Omega$, $C = 5.00 \mu\text{F}$ y un voltaje inicial a través del capacitor de 6.00 V. a) ¿Cuánto tarda el capacitor en perder la mitad de su carga inicial? b) ¿Cuánto tarda en perder todo, menos los últimos 10 electrones en la placa negativa?

RESPUESTAS a) 0.277 s b) 12.2 s

18.6 Circuitos domésticos

Los circuitos domésticos son una aplicación práctica de algunas de las ideas que se presentan en este capítulo. En una instalación típica, la compañía eléctrica distribuye la electricidad a hogares individuales con un par de alambres o líneas de transmisión. Los dispositivos eléctricos en un hogar se conectan entonces en paralelo a estas líneas, como se muestra en la figura 18.20. La diferencia de potencial entre los dos alambres es de aproximadamente 120 V. (Estas corrientes y voltajes en realidad son corrientes y voltajes alternos, pero para el análisis actual se supondrá que son corrientes y voltajes directos.) Uno de los alambres se conecta a tierra y el otro alambre, a veces llamado alambre “vivo”, está a un potencial de 120 V. Un medidor y un interruptor (o un fusible) se conectan en serie con el alambre que entra a la casa, como se indica en la figura.

En los hogares modernos, en lugar de fusibles se usan interruptores. Cuando la corriente en un circuito excede cierto valor (por lo general 15 o 20 A), el interruptor entra en acción y abre el circuito. La figura 18.21 (página 634) muestra un diseño para un

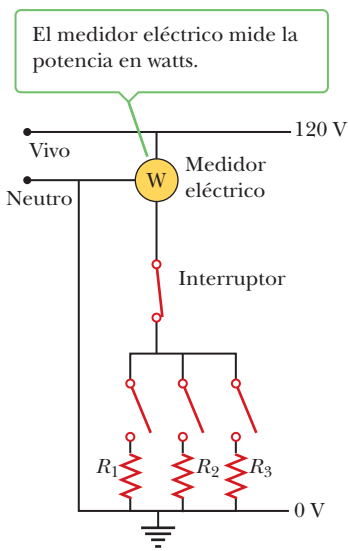


Figura 18.20 Diagrama de alambreado para un circuito doméstico. Las resistencias R_1 , R_2 y R_3 representan aparatos u otros dispositivos eléctricos que operan a un voltaje aplicado de 120 V.

APLICACIÓN

Fusibles e interruptores

interruptor. La corriente pasa a través de una tira bimetálica, cuya parte superior se dobla hacia la izquierda cuando corriente en exceso la calienta. Si la tira se dobla lo suficiente hacia la izquierda, se asienta en un surco en la barra metálica cargada con un resorte. Cuando ocurre este asentamiento, la barra cae lo suficiente para abrir el circuito en el punto de contacto. La barra también voltea una palanca que indica que el interruptor no está en operación. (Después de remover la sobrecarga, la palanca se puede voltear nuevamente.) Los interruptores basados en este diseño tienen la desventaja de que se requiere cierto tiempo para el calentamiento de la tira, de modo que el circuito puede no abrirse con suficiente rapidez cuando se sobrecarga. Por lo tanto, muchos interruptores ahora se diseñan para usar electroimanes (que se estudian en el capítulo 19).

El alambre y el interruptor se seleccionan cuidadosamente para satisfacer las demandas de corriente de un circuito. Si el circuito debe transportar corrientes tan grandes como 30 A, se deben usar un alambre de uso pesado y un interruptor apropiado. Los circuitos domésticos por lo general usan focos de potencia y pequeños electrodomésticos que a menudo requieren sólo 20 A. Cada circuito tiene su propio interruptor para acomodar su máxima carga segura.

Como ejemplo, considere un circuito que alimenta a un tostador, un horno de microondas y un calentador (que en la figura 18.20 se representan mediante R_1 , R_2 y R_3). Con la ecuación $P = I\Delta V$, puede calcular la corriente que transporta cada aparato. El tostador, de 1 000 W, extrae una corriente de $1\,000/120 = 8.33$ A. El horno de microondas, que se clasifica a 800 W, extrae una corriente de 6.67 A, y el calentador, clasificado de 1 300 W, extrae una corriente de 10.8 A. Si los tres aparatos se operan simultáneamente, extraen una corriente total de 25.8 A. Por lo tanto, el interruptor debe poder manejar al menos toda esta corriente, o de otro modo presentará fallas. Como alternativa, el tostador y el horno de microondas podrían operar en un circuito de 20 A y el calentador en un circuito separado de 20 A.

Muchos aparatos de uso pesado, como las estufas eléctricas y las secadoras de ropa, requieren 240 V para operar. La compañía eléctrica suministra este voltaje al proporcionar, además de un alambre vivo que está 120 V arriba del potencial de tierra, otro alambre, también considerado vivo, que está 120 V bajo el potencial de tierra (figura 18.22). Por lo tanto, la caída de potencial a través de los dos alambres vivos es de 240 V. Un aparato que opera a partir de una línea de 240 V requiere la mitad de corriente de uno que opera en una línea de 120 V; en consecuencia, se pueden usar alambres más pequeños en el circuito de voltaje más alto sin que se sobrecaliente.

18.7 Seguridad eléctrica

Una persona puede electrocutarse al tocar un alambre vivo mientras está en contacto con tierra. Tal peligro casi siempre se debe a un aislamiento raído que expone al alambre conductor. El contacto a tierra puede hacerse al tocar una tubería (que por lo general está a un potencial de tierra) o al estar de pie sobre tierra con los pies húmedos, porque el agua impura es un buen conductor. Obviamente, tales situaciones se deben evitar a toda costa.

Los choques eléctricos pueden resultar en quemaduras fatales o pueden causar mal funcionamiento de los músculos de órganos vitales, como el corazón. El grado de daño al cuerpo depende de la magnitud de la corriente, el tiempo durante el que actúa y la parte del cuerpo por donde pasa. Corrientes de 5 mA o menos pueden causar una sensación de choque, pero por lo regular causan poco o ningún daño. Si la corriente es más grande que aproximadamente 10 mA, los músculos de la mano se contraen y la persona puede ser incapaz de soltar el alambre vivo. Si una corriente de más o menos 100 mA pasa a través del cuerpo sólo durante algunos segundos, puede ser mortal. Tan grandes corrientes paralizan los músculos respiratorios. En algunos casos, corrientes cercanas a 1 A a través del cuerpo producen serias (y en ocasiones mortales) quemaduras.

Como característica de seguridad adicional para los consumidores, los fabricantes de equipo eléctrico ahora usan cordones eléctricos que tienen un tercer alambre, llamado *toma de tierra* (*case ground*). Para entender cómo funciona, considere el taladro que se usa en la figura 18.23. Un dispositivo de dos alambres tiene uno llamado alambre “vivo”, conectado al lado de alto potencial (120 V) de la línea eléctrica de entrada y el segundo alambre se conecta a tierra (0 V). Si el alambre de alto voltaje entra en contacto con el cuerpo del taladro (figura 18.23a), ocurre un corto circuito. En esta circunstancia inestable,

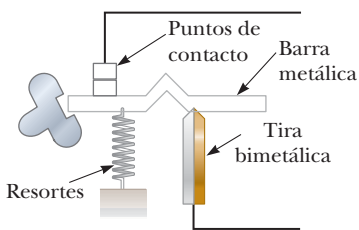


Figura 18.21 Interruptor que utiliza una tira bimetálica para su operación.

APLICACIÓN

Tercer alambre en aparatos al consumidor

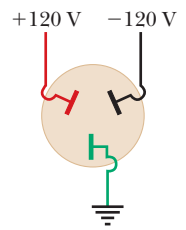
la trayectoria para la corriente es del alambre de alto voltaje, a través de la persona que sostiene el taladro y hacia tierra, una ruta que puede ser mortal. Un tercer alambre proporciona protección, conectado al cuerpo del taladro (figura 18.23b). En este caso, si ocurre un corto, la trayectoria de menor resistencia para la corriente es desde el alambre de alto voltaje, a través del taladro y de vuelta a tierra a través del tercer alambre. La alta corriente resultante que se produce quemará un fusible o activará un interruptor antes que el consumidor se lesione.

En cocinas, baños, sótanos y otras áreas peligrosas de las nuevas casas, ahora se usan tomacorrientes especiales llamados interruptores de fallo a tierra (GFI). Estos interruptores están diseñados para proteger a las personas de los choques eléctricos al “sentir” pequeñas corrientes, de aproximadamente 5 mA y más, que fuguen a tierra. Cuando se detecta corriente por arriba de este nivel, el dispositivo apaga (interrumpe) la corriente en menos de un milisegundo. (Los interruptores de fallo a tierra se estudiarán en el capítulo 20.)

18.8 Conducción de señales eléctricas por las neuronas² **BIO**

El uso más notable de los fenómenos eléctricos en los organismos vivos se encuentra en el sistema nervioso de los animales. Células especializadas en el cuerpo llamadas **neuronas** forman una compleja red que recibe, procesa y transmite información desde una parte del cuerpo a otra. El centro de esta red se ubica en el cerebro, que tiene la habilidad de almacenar y analizar información. Sobre la base de esta información, el sistema nervioso controla la parte del cuerpo.

El sistema nervioso es enormemente complejo y consiste en aproximadamente 10^{10} neuronas interconectadas. Algunos aspectos del sistema nervioso son bien conocidos. Durante las décadas pasadas se estableció el método de propagación de señal a través del sis-



© Cengage Learning/George Semple



b

Figura 18.22 a) Las conexiones para cada una de las aberturas en una toma de 240 V. b) Una salida para conexión a una fuente de 240 V.

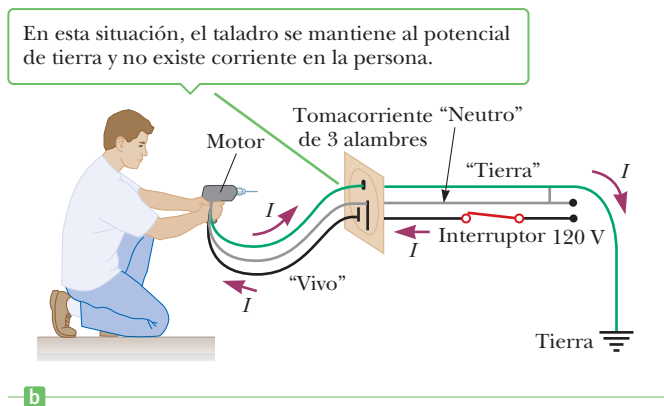
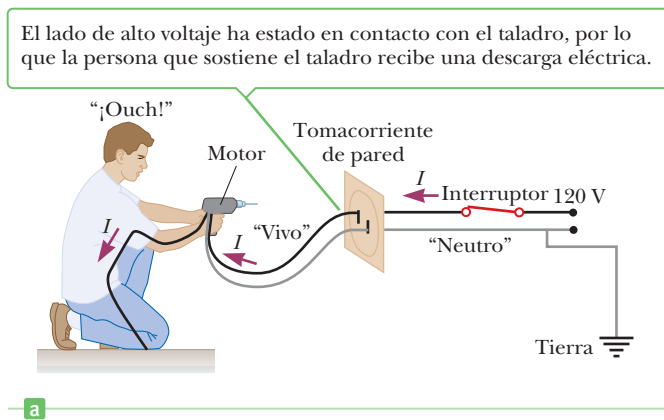


Figura 18.23 El alambre “caliente” (o “vivo”), a 120 V, siempre incluye un interruptor por seguridad. a) Cuando el taladro opera con dos alambres, la trayectoria de corriente normal es del alambre “caliente”, a través de las conexiones del motor y de vuelta a tierra a través del alambre “neutro”. Sin embargo, aquí el lado de alto voltaje entra en contacto con el cuerpo del taladro, de modo que la persona que sostiene el taladro recibe un choque eléctrico. b) El choque se puede evitar mediante un tercer alambre que va del cuerpo del taladro a tierra. Los colores de los cables eléctricos representan las normas: el cable “vivo” es de color negro, el cable de tierra es verde y el cable neutro es de color gris (de color gris en la figura).

²Esta sección se basa en un ensayo de Paul Davidovitz, del Boston College.

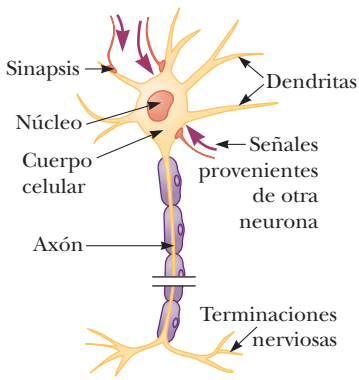


Figura 18.24 Diagrama de una neurona.

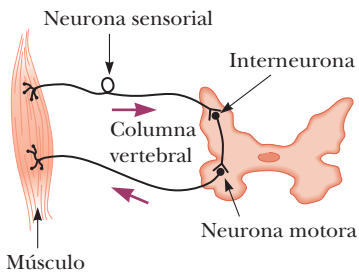


Figura 18.25 Circuito neuronal simple.



Figura 18.26 Neurona estrella de la corteza humana.

Figura 18.27 Un axón estimulado eléctricamente. La sonda izquierda inyecta un corto pulso de corriente y la sonda derecha mide el potencial de acción resultante como función.

tema nervioso. Los mensajes transmitidos por las neuronas son pulsos de voltaje llamados *potenciales de acción*. Cuando una neurona recibe un estímulo muy fuerte, produce pulsos de voltaje idénticos que se propagan de manera activa a lo largo de su estructura. La intensidad del estímulo se transporta mediante el número de pulsos producidos. Cuando los pulsos llegan al extremo de la neurona, activan células musculares u otras neuronas. Existe un “umbral de disparo” para las neuronas: los potenciales de acción se propagan a lo largo de una neurona sólo si el estímulo es suficientemente fuerte.

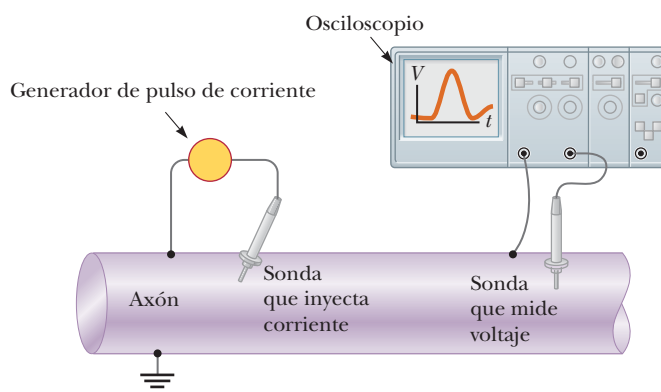
Las neuronas pueden dividirse en tres clases: neuronas sensoriales, neuronas motoras e interneuronas. Las neuronas sensoriales reciben estímulos de los órganos sensoriales que monitorean el ambiente externo e interno del cuerpo. Dependiendo de sus funciones especializadas, las neuronas sensoriales transmiten mensajes acerca de factores como luz, temperatura, presión, tensión muscular y olor a centros superiores en el sistema nervioso. Las neuronas motoras transportan mensajes que controlan a las células musculares. Los mensajes se basan en la información proporcionada por las neuronas sensoriales y por el cerebro. Las interneuronas transmiten información de una neurona a otra.

Cada neurona consiste en un cuerpo celular al cual se unen terminaciones de entrada llamadas **dendritas** y un largo tallo llamado **axón**, que transmite la señal desde la célula (figura 18.24). El extremo lejano del axón se ramifica en terminaciones nerviosas que transmiten la señal a través de pequeñas brechas hacia otras neuronas o a células musculares. En la figura 18.25 se muestra un circuito sensorio motriz simple. Un estímulo de un músculo produce impulsos nerviosos que viajan hacia la columna vertebral. Ahí la señal se transmite hacia una neurona motora, que a su vez envía impulsos para controlar el músculo. La figura 18.26 muestra una imagen de microscopio electrónico de neuronas en el cerebro.

El axón, que es una extensión de la neurona, conduce impulsos eléctricos desde el cuerpo celular. Algunos axones son extremadamente largos. En los humanos, por ejemplo, los axones que conectan la columna vertebral con los dedos de manos y pies miden más de 1 m de largo. La neurona puede transmitir mensajes debido a las activas características eléctricas especiales del axón. (El axón actúa como una fuente **activa** de energía, como una batería, en lugar de como una extensión **pasiva** de alambre resistivo.) Mucha de la información acerca de las propiedades eléctricas y químicas del axón se obtuvieron al insertar pequeñas sondas con forma de aguja en ellas. La figura 18.27 muestra una configuración experimental.

Observe que el exterior del axón está aterrizado, de modo que todos los voltajes son medidos con respecto a un potencial cero en el exterior. Con estas sondas es posible inyectar corriente en el axón, medir el potencial de acción resultante como función del tiempo en un punto fijo y tomar muestras de la composición química de la célula. Tales experimentos usualmente son difíciles de realizar porque el diámetro de la mayoría de los axones es muy pequeño. Incluso los axones más largos en el sistema nervioso humano tienen un diámetro de cerca de 20×10^{-4} cm. Sin embargo, el calamar gigante tiene un axón con un diámetro de aproximadamente 0.5 mm, que es lo suficiente grande para la conveniente inserción de sondas. Mucha de la información acerca de la transmisión de señales en el sistema nervioso proviene de experimentos con axón de calamar.

En el ambiente acuoso del cuerpo, sales y otras moléculas se disocian en iones positivos y negativos. Como resultado, los fluidos corporales son relativamente buenos conductores de electricidad. El interior del axón está lleno con un fluido iónico que se separa del fluido corporal circundante mediante una delgada membrana que tiene sólo alrededor de 5 a 10 nm



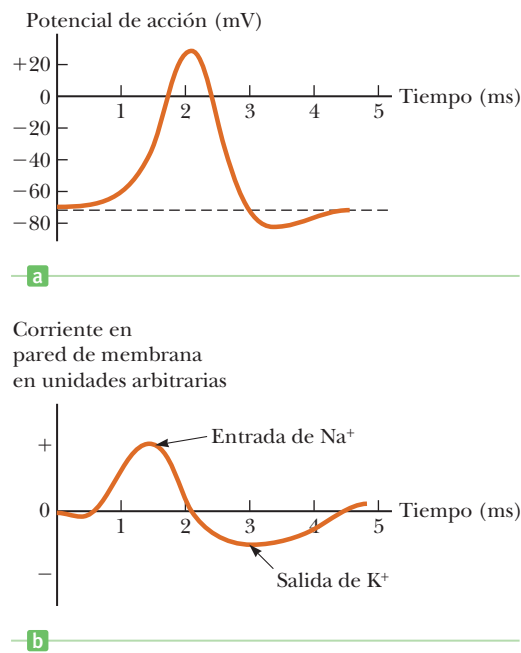


Figura 18.28 a) Potencial de acción típico como función del tiempo. b) Corriente en la pared de la membrana del axón como función del tiempo.

de grueso. Las resistividades de los fluidos interno y externo son casi las mismas, pero sus composiciones químicas son sustancialmente diferentes. El fluido externo es similar al agua de mar: sus solutos iónicos son principalmente iones sodio positivos y iones cloro negativos. Dentro del axón, los iones positivos son por lo regular iones potasio y los iones negativos son principalmente grandes iones orgánicos.

Normalmente, las concentraciones de iones sodio y potasio dentro y fuera del axón se igualarían mediante difusión. Sin embargo, el axón es una célula viva con un suministro de energía y puede cambiar la permeabilidad de sus membranas en una escala de tiempo de milisegundos.

Cuando el axón no conduce un pulso eléctrico, la membrana de éste es enormemente permeable a iones potasio, ligeramente permeable a iones sodio e impermeable a grandes iones orgánicos. En consecuencia, aunque los iones sodio no pueden entrar en forma fácil al axón, los iones potasio pueden salir. Sin embargo, conforme los iones potasio salen del axón, dejan detrás grandes iones orgánicos negativos, que no pueden seguirlos a través de la membrana. Como resultado, dentro del axón se acumula un potencial negativo con respecto al exterior. El potencial negativo final que se alcanza, que se midió en aproximadamente -70 mV, contiene la salida de iones potasio de modo que, en equilibrio, la concentración de iones es como se estableció.

El mecanismo para la producción de una señal eléctrica mediante la neurona es conceptualmente simple, pero fue difícil de sortear de manera experimental. Cuando una neurona cambia su potencial de reposo debido a un estímulo apropiado, las propiedades de su membrana cambian en forma local. Como resultado, hay un súbito flujo de iones sodio hacia la célula que dura cerca de 2 ms. Este flujo produce el pico de $+30$ mV en el potencial de acción que se muestra en la figura 18.28a. En seguida, hay un aumento en el flujo de iones potasio hacia afuera de la célula, que restaura el potencial de acción de reposo de -70 mV en un adicional 3 ms. Los flujos de iones Na^+ y K^+ se midieron con trazadores radiactivos Na y K. La señal nerviosa que se midió viaja a lo largo del axón con rapidez de 50 m/s a aproximadamente 150 m/s. Este flujo de partículas cargadas (o transmisión de señal) en un axón nervioso es *diferente* a la transmisión de señal en un alambre metálico. En un axón, las cargas se mueven en una dirección perpendicular a la dirección de viaje de la señal nerviosa y la señal nerviosa se mueve en forma más lenta que un pulso de voltaje que viaja a lo largo de un alambre metálico.

Aunque el axón es una estructura muy compleja y se desconoce mucho acerca de cómo se abren y cierran los canales iónicos Na^+ y K^+ , para analizar los axones se pueden usar los conceptos estándar de corriente y capacitancia en los circuitos eléctricos. Se deja como problema (problema 41) demostrar que el axón, que tiene cargas iguales y opuestas separadas por una delgada membrana dieléctrica, actúa como un capacitor.

RESUMEN**18.1 Fuentes de fem**

Cualquier dispositivo, como una batería o generador, que aumenta la energía potencial eléctrica de las cargas en un circuito eléctrico se llama **fuentes de fem**. Las baterías convierten energía química en energía potencial eléctrica y los generadores convierten energía mecánica en energía potencial eléctrica.

El voltaje ΔV en las terminales de una batería está dado por

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir \quad [18.1]$$

donde \mathcal{E} es la fem de la batería, I es la corriente y r es la resistencia interna de la batería. Por lo general, la resistencia interna es suficientemente pequeña para despreciarse.

18.2 Resistores en serie

La **resistencia equivalente** de un conjunto de resistores conectados en **serie** es

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad [18.4]$$



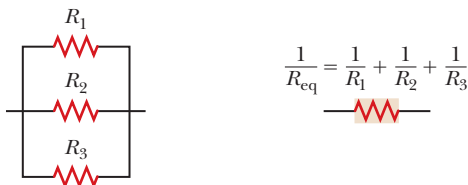
Varios resistores en serie pueden ser reemplazados con un solo resistor equivalente.

La corriente permanece a un valor constante conforme pasa a través de una serie de resistores. La diferencia de potencial a través de cualesquiera dos resistores en serie es diferente, a menos que los resistores tengan la misma resistencia.

18.3 Resistores en paralelo

La **resistencia equivalente** de un conjunto de resistores conectados en **paralelo** es

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad [18.6]$$



Varios resistores en paralelo pueden ser reemplazados con un solo resistor equivalente.

La diferencia de potencial a través de cualesquiera dos resistores en paralelo es la misma; sin embargo, la corriente en cada resistor será diferente a menos que las dos resistencias sean iguales.

18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos

Los circuitos complejos se pueden analizar con las **reglas de Kirchhoff**:

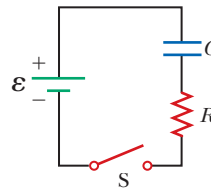
1. La suma de las corrientes que entran a cualquier nodo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen de dicho nodo.
2. La suma de las diferencias de potencial a través de todos los elementos alrededor de cualquier malla de circuito cerrada debe ser cero.

La primera regla, llamada regla del nodo, es un enunciado de **conservación de carga**. La segunda regla, llamada regla de la malla, es un enunciado de la **conservación de la energía**. Resolver problemas involucra el uso de estas reglas para generar tantas ecuaciones como incógnitas existan. Entonces las ecuaciones se pueden resolver de manera simultánea.

18.5 Circuitos RC

En un circuito RC simple, con una batería, un resistor y un capacitor en serie, la carga sobre el capacitor aumenta de acuerdo con la ecuación

$$q = Q(1 - e^{-t/RC}) \quad [18.7]$$



Circuito RC con una batería y una resistencia carga un condensador cuando el interruptor está cerrado.

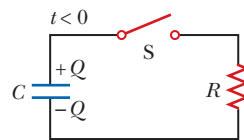
El término RC en la ecuación 18.7 se llama **constante de tiempo** τ (letra griega tau), de modo que

$$\tau = RC \quad [18.8]$$

La constante de tiempo representa el tiempo requerido para que la carga aumente de cero a 63.2% de su valor de equilibrio máximo.

Un circuito RC simple que consiste en un capacitor cargado en serie con un resistor se descarga de acuerdo con la expresión

$$q = Qe^{-t/RC} \quad [18.9]$$



Circuito RC con carga condensador se descarga a través de una resistencia cuando el interruptor está cerrado.

Los problemas se pueden resolver al sustituir en estas ecuaciones. El voltaje ΔV a través del capacitor en cualquier tiempo se obtiene al dividir la carga entre la capacitancia: $\Delta V = q/C$. El uso de la regla de Kirchhoff produce la diferencia de potencial a través del resistor. La ley de Ohm aplicada al resistor produce entonces la corriente.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Las terminales de una batería se conectan en paralelo a través de dos resistores diferentes. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) El resistor más grande porta más corriente que el resistor más pequeño. b) El resistor más grande porta menos corriente que el resistor más pequeño. c) La diferencia de voltaje a través de cada resistor es la misma. d) La diferencia de voltaje a través del resistor más grande es mayor que la diferencia de voltaje a través del resistor más pequeño. e) La diferencia de voltaje es mayor a través del resistor más cercano a la batería.
- Las terminales de una batería se conectan en serie a través de dos resistores diferentes. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) El resistor más pequeño porta más corriente. b) El resistor más grande porta menos corriente. c) La corriente en cada resistor es la misma. d) La diferencia de voltaje a través de cada resistor es la misma. e) La diferencia de voltaje es mayor a través del resistor más cercano a la terminal positiva.
- Resistores de 1.00 y 2.00Ω se conectan en paralelo. ¿Cuál es la resistencia individual equivalente? a) 1.50Ω b) 3.00Ω c) 0.667Ω d) 0.333Ω e) 1.33Ω
- Dos focos están conectados en serie, uno opera a 120 W y el otro a 60.0 W . Si la caída de voltaje a través de la combinación en serie es 120 V , ¿cuál es la corriente en el circuito? a) 1.0 A b) 1.5 A c) 2.0 A d) 2.5 A e) 3.0 A
- ¿Cuál de las siguientes ecuaciones no es consecuencia de las leyes de Kirchhoff, cuando se aplica a la figura POM18.5? a) $9 - I_1 - 2I_2 = 0$ b) $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ c) $4 - 2I_2 - 3I_3 = 0$ d) $5 - I_1 - 3I_3 = 0$ e) Todas estas ecuaciones son correctas.
- ¿Cuál es la corriente en la resistencia de 10Ω en el circuito que se muestra en la figura POM18.6? a) 0.59 A b) 1.0 A c) 11 A d) 16 A e) 5.3 A

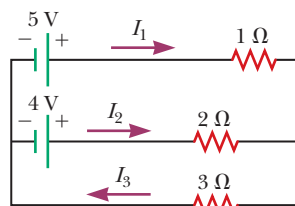


Figura POM18.5

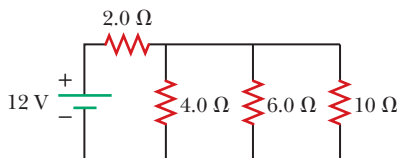


Figura POM18.6

- Cuando se conecta a una fuente de 120 V , un calentador eléctrico se clasifica a 1200 W y un tostador a $6.0 \times 10^2 \text{ W}$. Si ambos aparatos se operan en paralelo en un circuito

de 120 V , ¿qué corriente total se entrega mediante una fuente externa? a) 12 A b) 24 A c) 32 A d) 8.0 A e) 15 A

- Si las terminales de una batería se conectan en serie a través de dos resistores idénticos, la potencia total entregada por la batería es 8.0 W . Si la misma batería se conecta en paralelo a través de los resistores, ¿cuál es la potencia total entregada por la batería? a) 16 W b) 32 W c) 2.0 W d) 4.0 W e) 8.0 W
- ¿Cuál es la constante de tiempo del circuito que se muestra en la figura POM18.9? Cada uno de los cinco resistores tiene resistencia R , y cada uno de los cinco capacitores tiene capacitancia C . La resistencia interna de la batería es despreciable. a) RC b) $5RC$ c) $10RC$ d) $25RC$ e) Ninguna de estas respuestas es correcta.

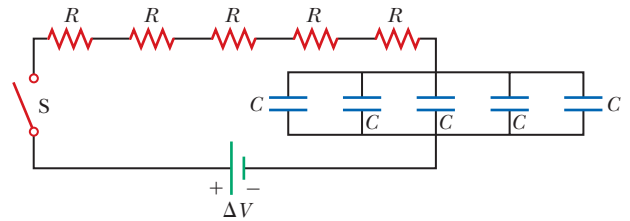


Figura POM18.9

- El capacitor en la figura POM18.10 tiene una gran capacitancia e inicialmente no tiene carga. Después de cerrar el interruptor, ¿qué ocurre con el foco? a) Nunca enciende porque el capacitor representa un circuito abierto. b) Brilla sólo después que el capacitor está cargado por completo. c) Brilla durante un tiempo muy corto conforme el capacitor se carga. d) Brilla de manera continua. e) Brilla de manera intermitente.
- Varios resistores se conectan en paralelo. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto acerca de la resistencia equivalente correspondiente? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) Es mayor que la resistencia de cualquiera de los resistores individuales. b) Es menor que la resistencia de cualquiera de los resistores individuales. c) Depende del voltaje aplicado a través de la serie. d) Es igual a la suma de las resistencias de todos los resistores en la serie. e) Es igual al recíproco de la suma de los inversos de las resistencias de todos los resistores.

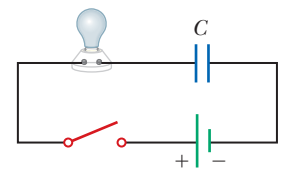


Figura POM18.10

- Cuando resistores con diferentes resistencias están conectados en serie, ¿cuál de las siguientes opciones debe ser la misma para cada resistencia? Elija todas las respuestas correctas. a) la diferencia de potencial b) la corriente c) la potencia suministrada d) la carga que entra en cada

resistencia en un intervalo dado e) ninguna de las respuestas.

13. El capacitor en la figura POM18.13 inicialmente no tiene carga. Cuando se cierra el interruptor en $t = 0$, ¿cuál es la caída de voltaje a través del capacitor después de transcurrida una constante de tiempo?
- a) 2.05 V b) 3.25 V c) 6.63 V
d) 3.79 V e) 4.43 V

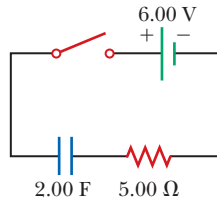


Figura POM18.13

14. El interruptor de un circuito cableado está a) en serie con el dispositivo está protegiendo, b) en paralelo, o c) ni en serie o en paralelo, o d) ¿es imposible decir?

15. Varios resistores están conectados en serie. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones son verdaderas para la resistencia equivalente correspondiente? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) Es mayor que cualquiera de las resistencias individuales. b) Es menor que cualquiera de las resistencias individuales. c) Depende del voltaje aplicado a través de la serie. d) Es igual a la suma de las resistencias de todas las individuales. e) Es igual al recíproco de la suma de los recíprocos de las resistencias de todas las resistencias.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- ¿La dirección de la corriente en una batería siempre va de la terminal negativa a la positiva? Explique.
- Dados tres focos y una batería, bosqueje tantos circuitos diferentes como pueda.
- Suponga que la energía transferida a una batería muerta durante la carga es W . Entonces la batería recargada se utiliza hasta que se descarga por completo nuevamente. ¿También es W la energía total transferida desde la batería durante su uso?
- Un cortocircuito es un circuito que contiene una trayectoria de muy baja resistencia en paralelo con alguna otra parte del circuito. Analice el efecto de un cortocircuito sobre la porción del circuito con la que es paralelo. Use como ejemplo una lámpara con un alambre raído.
- Conectar baterías en serie aumenta la fem aplicada a un circuito. ¿Qué ventaja puede haber al conectarlas en paralelo?
- Si la energía eléctrica se transmite a través de largas distancias, la resistencia de los alambres se vuelve significativa. ¿Por qué? ¿Qué modo de transmisión resultaría en menos pérdida de energía, alta corriente y bajo voltaje o baja corriente y alto voltaje? Discútalos.
- Si tiene los faros de su auto encendidos mientras lo arranca, ¿por qué se apagan mientras el coche enciende?
- Dos series de luces de Navidad están disponibles. Para la serie A, cuando un foco se remueve, los focos restantes permanecen iluminados. Para la serie B, cuando un foco se remueve, los focos restantes no operan. Explique la diferencia en alambrado para las dos series.
- ¿Por qué es posible que un ave se pose sobre un cable de alto voltaje sin electrocutarse? (Vea la figura POM18.9.)
- a) Dos resistores se conectan en serie a través de una batería. ¿La potencia entregada a cada resistor i) es la misma o ii) no necesariamente es la misma? b) Dos resis-



Superstock

Figura POM18.9

tores se conectan en paralelo a través de una batería. ¿La potencia entregada a cada resistor i) es la misma o ii) no necesariamente es la misma?

- Suponga que un paracaidista aterriza sobre una línea de alto voltaje y agarra el alambre mientras se prepara para su rescate. ¿Se electrocutará? Si entonces se rompe el cable, ¿debe continuar agarrándose del alambre mientras cae a tierra?
- Una estación de deportes de invierno consiste en algunos telesquíes y muchas pistas interconectadas colina abajo en las laderas de una montaña, con una cabaña en el fondo. Los telesquíes son análogos a baterías, y las pistas son análogas a resistores. Describa cómo dos pistas pueden estar en serie. Describa cómo tres pistas pueden estar en paralelo. Bosqueje un nodo de un telesquí y dos pistas. Uno de los esquiadores lleva un altímetro. Establezca las reglas del nodo y de la malla de Kirchhoff para la estación de esquí.
- En las reglas de Kirchhoff se representan dos leyes de conservación. ¿Cuáles son?
- ¿Por qué es peligroso encender una luz cuando está usted en una bañera?

PROBLEMAS

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

18.1 Fuentes de fem

18.2 Resistores en serie

18.3 Resistores en paralelo

- 1. Una batería, que tiene una fem de 9.00 V, entrega 117 mA cuando se conecta a una carga de 72.0 Ω. Determine la resistencia interna de la batería.
- 2. Tres resistores de 9.0 Ω se conectan en serie con una batería de 12 V. Encuentre a) la resistencia equivalente del circuito y b) la corriente en cada resistor. c) Repita para el caso en el que los tres resistores se conectan en paralelo a través de la batería.
- 3. Un foco marcado “75 W [a] 120 V” se atornilla en un portafocos que está en un extremo de una larga extensión en la que cada uno de los conductores tiene una resistencia de 0.800 Ω. El otro extremo de la extensión se conecta a un tomacorriente de 120 V. Dibuje un diagrama de circuito y encuentre la potencia real del foco en el circuito descrito.
- 4. a) Encuentre la corriente en un resistor de 8.00 Ω conectado a una batería que tiene una resistencia interna de 0.15 Ω, si el voltaje a través de la batería (el voltaje en terminales) es 9.00 V. b) ¿Cuál es la fem de la batería?

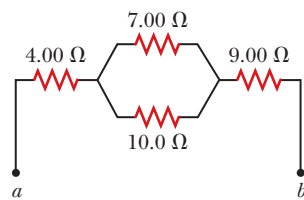


Figura P18.5

- 5. M a) Encuentre la resistencia equivalente entre los puntos *a* y *b* de la figura P18.5. b) Calcule la corriente en cada resistor si se aplica una diferencia de potencial de 34.0 V entre los puntos *a* y *b*.

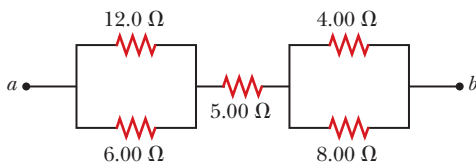


Figura P18.6

- 6. Considere la combinación de resistores que se muestra en la figura P18.6. a) Encuentre la resistencia equivalente entre los puntos *a* y *b*. b) Si se aplica un voltaje de 35.0 V entre los puntos *a* y *b*, encuentre la corriente en cada resistor.

- 7. Dos resistores conectados en serie tienen una resistencia equivalente de 690 Ω. Cuando están conectados en

paralelo, la resistencia equivalente es de 150 Ω. Determine la resistencia de cada resistor.

- 8. PG Considere el circuito que se muestra en la figura P18.8. a) Calcule la resistencia equivalente de los resistores de 10.0 y 5.00 Ω conectados en paralelo. b) Con el resultado del inciso a), calcule la resistencia combinada de los resistores de 10.0, 5.00 y 4.00 Ω. c) Calcule la resistencia equivalente de la resistencia combinada que encontró en el inciso b) y el resistor de 3.00 Ω en paralelo. d) Combine la resistencia equivalente que encontró en el inciso c) con el resistor de 2.00 Ω. e) Calcule la corriente total en el circuito. f) ¿Cuál es la caída de voltaje a través del resistor de 2.00 Ω? g) Reste el resultado del inciso f) del voltaje de la batería y encuentre el voltaje a través del resistor de 3.00 Ω. h) Calcule la corriente en el resistor de 3.00 Ω.

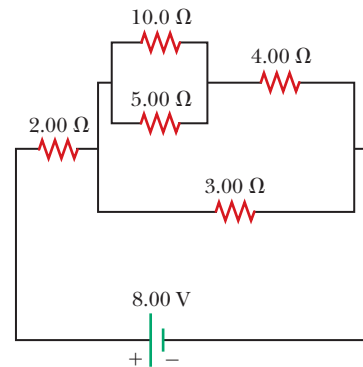


Figura P18.8

- 9. Considere el circuito que se muestra en la figura P18.9. Encuentre a) la diferencia de potencial entre los puntos *a* y *b* y b) la corriente en el resistor de 20.0 Ω.

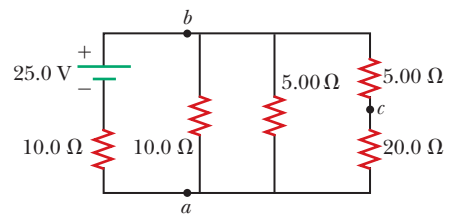


Figura P18.9

- 10. S Cuatro resistores están conectados a una batería como se muestra en la figura P18.10 (página 642). a) Determine

la diferencia de potencial en cada resistor en términos de \mathcal{E} . b) Determine la corriente en cada resistencia en términos de I .

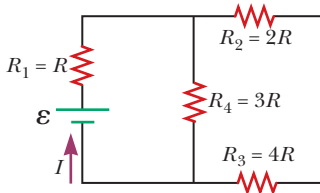


Figura P18.10

11. La resistencia entre las terminales a y b en la figura P18.11 es 75Ω . Si los resistores marcados R tienen el mismo valor, determine R .

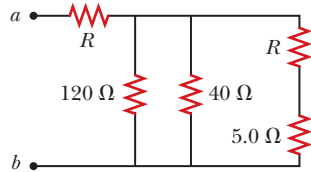


Figura P18.11

12. Una batería con $\mathcal{E} = 6.00 \text{ V}$ y sin resistencia interna suministra corriente al circuito de la figura P18.12. Cuando el interruptor S de doble tiro está abierto como se muestra en la figura, la corriente en la batería es de 1.00 mA . Cuando se cierra el interruptor en la posición a , la corriente en la batería es de 1.20 mA . Cuando se cierra el interruptor en la posición b , la corriente en la batería es de 2.00 mA . Encuentre las resistencias a) R_1 , b) R_2 y c) R_3 .

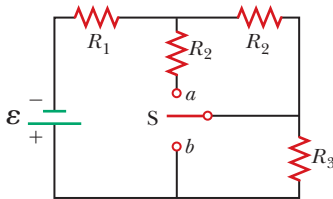


Figura P18.12

13. Determine la corriente en el resistor de 12Ω de la figura P18.13.

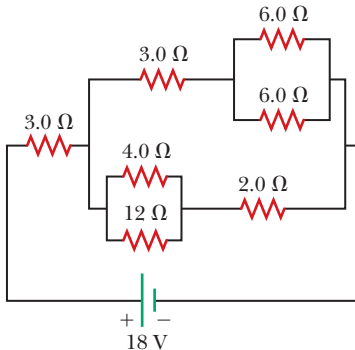


Figura P18.13

14. **CIC** a) ¿Es posible reducir el circuito que se muestra en la figura P18.14 a un solo resistor equivalente conectado a través de la batería? Explique. b) Determine la corriente en el resistor de 2.00Ω . c) Calcule la potencia que la batería entrega al circuito.

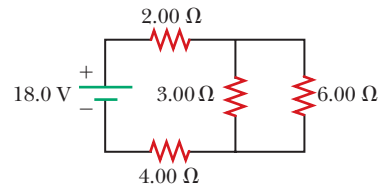


Figura P18.14

15. a) Usted necesita un resistor de 45Ω , pero el almacén sólo tiene resistores de 20 y 50Ω . ¿Cómo puede lograr la resistencia deseada bajo estas circunstancias? b) ¿Qué puede hacer si necesita un resistor de 35Ω ?

18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos

Nota: Para algunos circuitos, las corrientes no necesariamente están en la dirección que se muestra.

16. **S** a) Determine la corriente en cada resistor de la figura P18.16 con el uso de las reglas para resistores en serie y en paralelo. b) Escriba tres ecuaciones independientes para las tres corrientes con las leyes de Kirchhoff: una con la regla del nodo; una segunda con la regla de la malla a través de la batería, el resistor de 6.0Ω y el resistor de 24.0Ω ; y la tercera con la regla de la malla a través de los resistores de 12.0 y 24.0Ω . Resuelva para comprobar las respuestas que encontró en el inciso a).

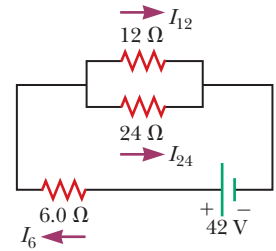


Figura P18.16

17. El amperímetro que se muestra en la figura P18.17 lee 2.00 A . Encuentre I_1 , I_2 y \mathcal{E} .

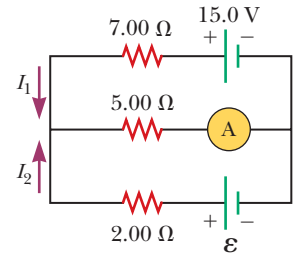


Figura P18.17

18. Para el circuito de la figura P18.18, calcular a) la corriente en la resistencia de 2.00Ω y b) la diferencia de potencial entre los puntos a y b , $\Delta V = V_b - V_a$.

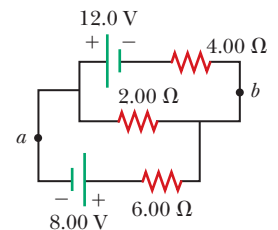


Figura P18.18

19. Tomando $R = 1.00 \text{ k}\Omega$ y $\mathcal{E} = 250 \text{ V}$ en la figura P18.19, determine la dirección y la magnitud de la corriente en el alambre horizontal entre a y e .

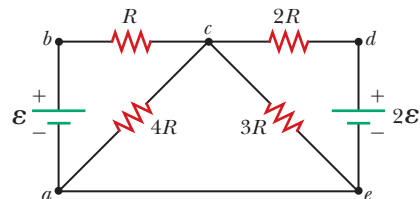


Figura P18.19

20. En el circuito de la figura P18.20, la corriente I_1 es 3.0 A y se desconocen los valores de \mathcal{E} y R . ¿Cuáles son las corrientes I_2 e I_3 ?

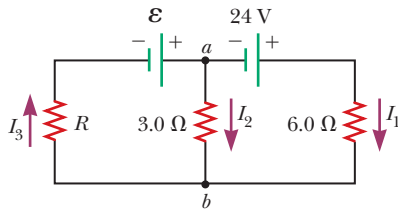


Figura P18.20

21. En el circuito de la figura P18.21, encuentre a) la corriente en cada resistor y b) la diferencia de potencial a través del resistor de 200 Ω .

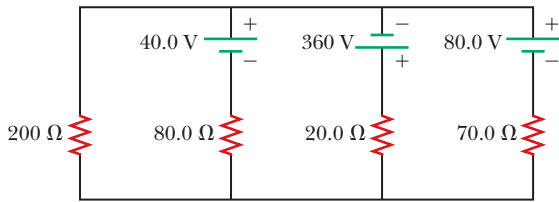


Figura P18.21

22. **CIC** Cuatro resistores se conectan a una batería con un voltaje en terminales de 12 V, como se muestra en la figura P18.22. a) ¿Cómo reduciría usted el circuito a un solo resistor equivalente conectado a la batería? Use este procedimiento para encontrar la resistencia equivalente del circuito. b) Encuentre la corriente entregada por la batería a esta resistencia equivalente. c) Determine la potencia entregada por la batería. d) Determine la potencia entregada al resistor de 50.0 Ω .
23. **M** Con las reglas de Kirchhoff, a) encuentre la corriente en cada resistor que se muestra en la figura P18.23 y b) encuentre la diferencia de potencial entre los puntos c y f .

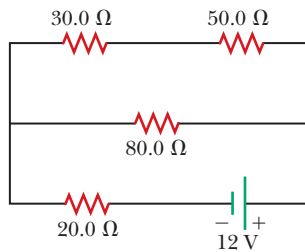


Figura P18.22

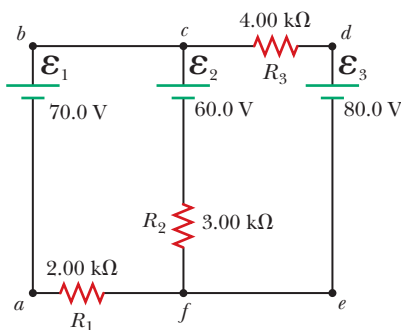


Figura P18.23

24. Dos baterías de 1.50 V, con sus terminales positivas en la misma dirección, se insertan en serie en el barril de una linterna. Una batería tiene una resistencia interna de 0.255 Ω , la otra una resistencia interna de 0.153 Ω . Cuando se cierra el interruptor, una corriente de 0.600 A pasa a través de la lámpara. a) ¿Cuál es la resistencia de la lámpara? b) ¿Qué fracción de la potencia se disipa en las baterías?

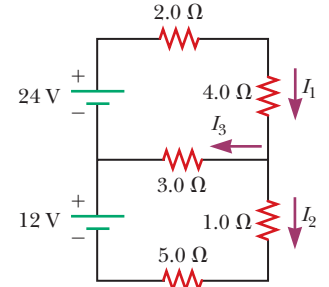


Figura P18.25

25. **CIC** a) ¿El circuito que se muestra en la figura P18.25 se puede reducir a un solo resistor conectado a las baterías? Explique. b) Calcule cada una de las corrientes desconocidas I_1 , I_2 e I_3 para el circuito.

26. Una batería muerta se carga al conectarla a la batería viva de otro automóvil mediante cables pasacorrente (figura P18.26). Determine la corriente a) en el arranque y b) en la batería muerta.

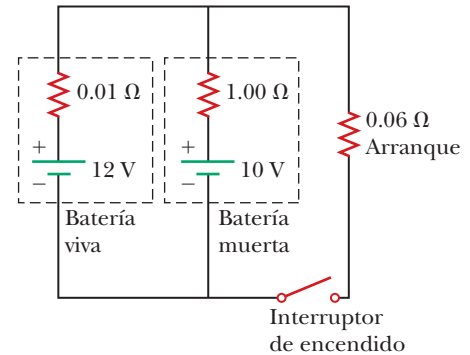


Figura P18.26

27. **CIC** a) ¿El circuito que se muestra en la figura P18.27 se puede reducir a un solo resistor conectado a las baterías? Explique. b) Encuentre la magnitud de la corriente y su dirección en cada resistor.

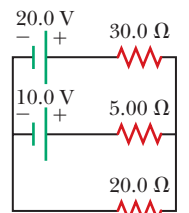


Figura P18.27

28. **PG S** Para el circuito que se muestra en la figura P18.28, use las reglas de Kirchhoff para obtener ecuaciones para a) la malla superior, b) la malla

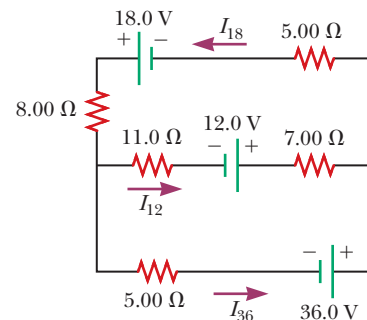


Figura P18.28

inferior y c) el nodo en el lado izquierdo. En cada caso suprima unidades para claridad y simplifique, al combinar términos iguales. d) Resuelva la ecuación del nodo para I_{36} . e) Con la ecuación que encontró en el inciso d), elimine I_{36} de la ecuación que encontró en el inciso b). f) Resuelva en forma simultánea las ecuaciones que encontró en los incisos a) y e) para las dos incógnitas I_{18} e I_{12} , respectivamente. g) Sustituya las respuestas que encontró en el inciso f) en la ecuación del nodo que encontró en el inciso d) y resuelva para I_{36} . h) ¿Cuál es el significado de la respuesta negativa para I_{12} ?

29. **M** Encuentre la diferencia de potencial a través de cada resistor en la figura P18.29.

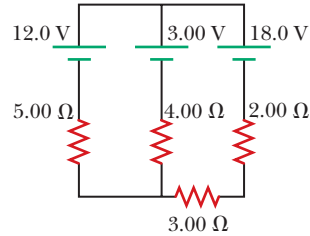


Figura P18.29

18.5 Circuitos RC

30. Demuestre que $\tau = RC$ tiene unidades de tiempo.
31. Considere el circuito RC en serie que se muestra en la figura 18.16 para la cual $R = 75.0 \text{ k}\Omega$, $C = 25.0 \text{ }\mu\text{F}$ y $\mathcal{E} = 12.0 \text{ V}$. Encuentre a) la constante de tiempo del circuito y b) la carga sobre el capacitor una constante de tiempo después de cerrar el interruptor.
32. Un capacitor sin carga y un resistor se conectan en serie a una fuente de fem. Si $\mathcal{E} = 9.00 \text{ V}$, $C = 20.0 \text{ }\mu\text{F}$ y $R = 100 \text{ }\Omega$, encuentre a) la constante de tiempo del circuito, b) la carga máxima sobre el capacitor y c) la carga sobre el capacitor después de una constante de tiempo.

33. Considere un circuito RC en serie como el de la figura 18.33 para el cual $R = 1.00 \text{ M}\Omega$, $C = 5.00 \text{ }\mu\text{F}$ y $\mathcal{E} = 30.0 \text{ V}$. Encuentre a) la constante de tiempo del circuito b) la máxima carga en el capacitor después de que se cierra el interruptor y c) la carga en el capacitor 10.0 s después de cerrar el interruptor.

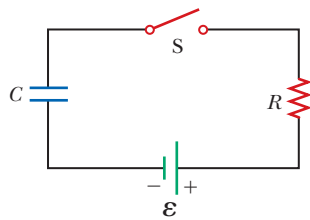


Figura P18.33
Problemas 33 y 34

34. Considere un circuito RC en serie como el de la figura 18.33 para el cual $R = 1.0 \text{ M}\Omega$, $C = 5.0 \text{ }\mu\text{F}$ y $\mathcal{E} = 30 \text{ V}$. Encuentre la carga sobre el capacitor 10 s después de cerrar el interruptor.

35. Un capacitor cargado se conecta a un resistor y a un interruptor como en la figura 18.35. El circuito tiene una constante de tiempo de 1.50 s. Después de cerrar el interruptor, la carga sobre el capacitor es 75.0% de su carga inicial. a) Encuentre el tiempo que tarda en alcanzar esta carga. b) Si $R = 250 \text{ k}\Omega$, ¿cuál es el valor de C ?

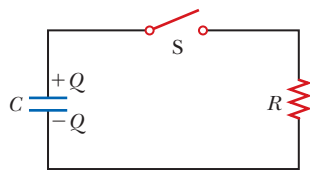


Figura P18.35

36. Un capacitor de $10.0 \text{ }\mu\text{F}$ se carga con una batería de 10.0 V a través de una resistencia R . El capacitor alcanza una diferencia de potencial de 4.00 V en un intervalo de 3.00 s después de que la carga comienza. Encuentre R .

18.6 Circuitos domésticos

37. ¿Qué número mínimo de focos de 75 W se deben conectar en paralelo a un solo circuito doméstico de 120 V para activar un interruptor de 30.0 A ?
38. Una lámpara ($R = 150 \text{ }\Omega$), un calentador eléctrico ($R = 25 \text{ }\Omega$) y un ventilador ($R = 50 \text{ }\Omega$) se conectan en paralelo a través de una línea de 120 V . a) ¿Qué corriente total se suministra al circuito? b) ¿Cuál es el voltaje a través del ventilador? c) ¿Cuál es la corriente en la lámpara? d) ¿Qué potencia se gasta en el calentador?
39. **M** Un elemento calefactor en una estufa se diseña para disipar 3000 W cuando se conecta a 240 V . a) Suponiendo que la resistencia es constante, calcule la corriente en el elemento calefactor si se conecta a 120 V . b) Calcule la potencia que disipa a dicho voltaje.

40. **C/C** Se tienen una cafetera a 1200 W , un tostador a 1100 W y una wafflera a 1400 W . Los tres aparatos se conectan en paralelo a un circuito doméstico común de 120 V . a) ¿Cuál es la corriente en cada electrodoméstico cuando operan de manera independiente? b) ¿Qué corriente total se entrega a los electrodomésticos cuando todos operan simultáneamente? c) ¿Un interruptor de 15 A es suficiente en esta situación? Explique.

18.8 Conducción de señales eléctricas por las neuronas

41. **BIO** Suponga que un tramo de membrana de axón de cerca de 0.10 m de longitud se excita mediante un potencial de acción (longitud excitada = rapidez nerviosa \times duración de pulso = $50.0 \text{ m/s} \times 2.0 \times 10^{-3} \text{ s} = 0.10 \text{ m}$). En el estado de reposo, la superficie exterior de la pared del axón se carga positivamente con iones K^+ y la pared interior tiene una carga igual y opuesta de iones orgánicos negativos, como se muestra en la figura P18.41. Modele al axón como un capacitor de placas paralelas y considere $C = \kappa\epsilon_0 A/d$ y $Q = C\Delta V$ para investigar la carga del modo siguiente. Use valores típicos para un axón cilíndrico con grosor de pared celular $d = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}$, radio de axón $r = 1.0 \times 10^1 \text{ }\mu\text{m}$ y constante dieléctrica de pared celular $\kappa = 3.0$. a) Calcule la carga positiva sobre el exterior del tramo de 0.10 m de axón cuando no conduce un pulso eléctrico. ¿Cuántos iones K^+ hay en el exterior del axón, si se supone una diferencia de potencial inicial de $7.0 \times 10^{-2} \text{ V}$? ¿Esto es una gran carga por unidad de área? [Sugerencia: Calcule la carga por unidad de área en términos del número de angstroms (\AA^2) por carga electrónica. Un átomo tiene una sección transversal de aproximadamente 1 \AA^2 ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).] b) ¿Cuánta carga positiva debe fluir a través de la membrana celular para llegar al estado excitado de $+3.0 \times 10^{-2} \text{ V}$ desde el estado de reposo de $-7.0 \times 10^{-2} \text{ V}$? ¿Cuántos iones sodio (Na^+) es esto? c) Si se requieren 2.0 ms para que los iones Na^+ entren al axón, ¿cuál es la corriente promedio en la pared del axón en este proceso? d) ¿Cuánta energía se necesita para elevar el potencial de la pared interior del

axón a $+3.0 \times 10^{-2} \text{ V}$, partiendo desde el potencial de reposo de $-7.0 \times 10^{-2} \text{ V}$?

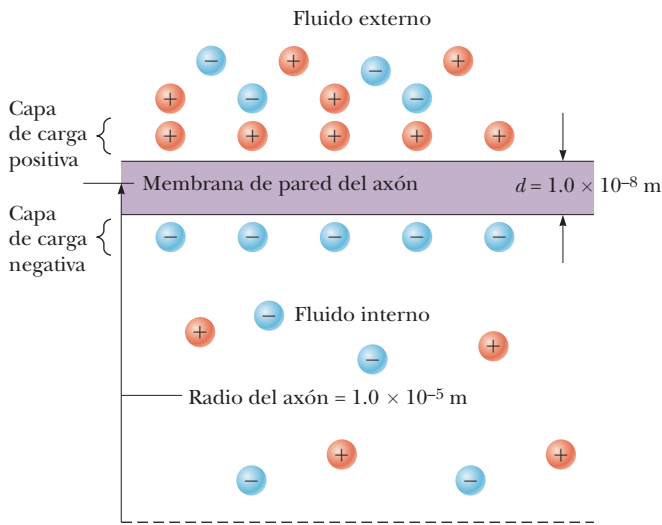


Figura P18.41 Problemas 41 y 42.

42. **BIO** Considere el modelo del axón como capacitor del problema 41 y la figura P18.41. a) ¿Cuánta energía se requiere para restaurar la pared interior del axón a $-7.0 \times 10^{-2} \text{ V}$, a partir de $+3.0 \times 10^{-2} \text{ V}$? b) Encuentre la corriente promedio en la pared del axón durante este proceso.
43. **BIO** Con base en la figura 18.28b y los resultados de los problemas 18.41d y 18.42a, encuentre la potencia suministrada por el axón por potencial de acción.

Problemas adicionales

44. ¿Cuántos valores de resistencia equivalente diferentes se pueden construir a partir de resistores de 2.0, 4.0 y 6.0 Ω ? Demuestre cómo obtendría cada valor de resistencia ya sea individualmente o al combinarlos.
45. a) Encuentre la diferencia de potencial entre los puntos *a* y *b* en la figura P18.45 y b) identifique cuál es el punto con mayor potencial.

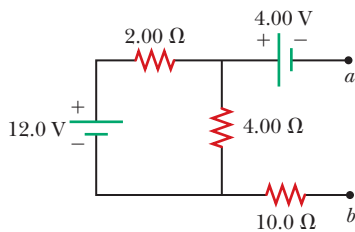


Figura P18.45

46. **CIC** Para el circuito que se muestra en la figura P18.46, el voltímetro lee 6.0 V y el amperímetro lee 3.0 mA. Encuentre a) el valor de *R*, b) la fem de la batería y c) el voltaje a través del resistor

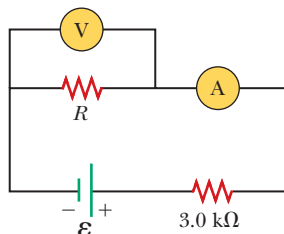


Figura P18.46

de 3.0 k Ω . d) ¿Qué suposiciones tuvo que hacer para resolver este problema?

47. Encuentre a) la resistencia equivalente del circuito en la figura P18.47, b) cada corriente en el circuito, c) la diferencia de potencial a través de cada resistor y d) la potencia disipada por cada resistor.

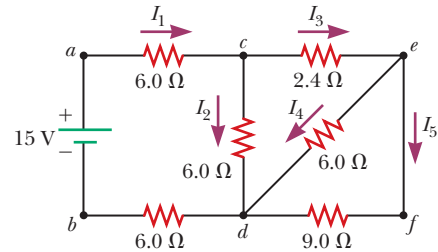


Figura P18.47

48. Tres focos de 60.0 W a 120 V se conectan a través de una fuente de potencia de 120 V, como se muestra en la figura P18.48. Encuentre a) la potencia total entregada a los tres focos y b) la diferencia de potencial a través de cada uno. Suponga que la resistencia de cada foco es constante (aun cuando, en realidad, la resistencia aumenta de manera notoria con la corriente).

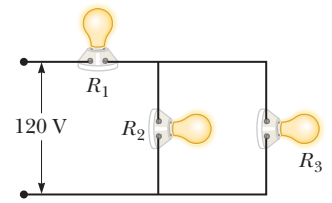


Figura P18.48

49. Cuando dos resistores desconocidos están conectados en serie con una batería, la batería suministra 225 W y conduce un total de corriente de 5.00 A. Por la misma corriente total, 50.0 W son entregados cuando las resistencias están conectadas en paralelo. Determinar el valor de cada resistor.
50. **CIC** El circuito de la figura P18.50a consta de tres resistores y una batería sin resistencia interna. a) Encontrar la corriente en la resistencia de 5.00 Ω . b) Hallar la potencia suministrada a la resistencia de 5.00 Ω . c) En cada uno de los circuitos de las figuras P18.50b, P18.50c y

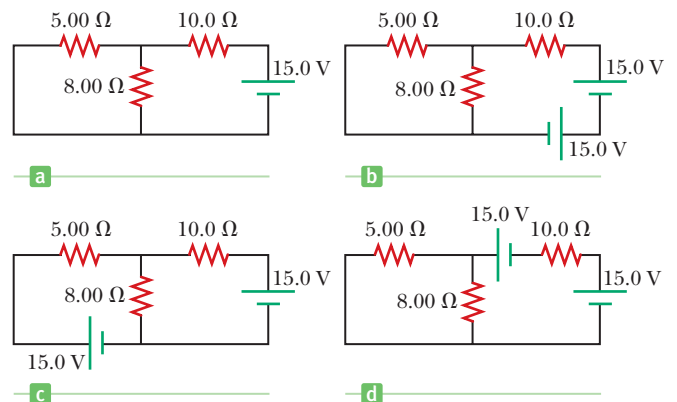


Figura P18.50

P18.50d, una batería adicional de 15.0 V se ha insertado en el circuito. ¿Cuál diagrama o diagramas representan un circuito que requiere el uso de reglas de Kirchhoff para encontrar las corrientes? Explique por qué. d) ¿En cuál de estos tres nuevos circuitos es menor la cantidad de energía entregada a la resistencia de 10.0 Ω? (No es necesario calcular la potencia en cada circuito si usted explica su respuesta.)

51. **CIC S** Un circuito consiste en tres lámparas idénticas, cada una con resistencia R , conectadas a una batería como en la figura P18.51. a) Calcule una expresión para la resistencia equivalente del circuito cuando se abre el interruptor. Repita el cálculo cuando se cierra el interruptor. b) Escriba una expresión para la potencia suministrada por la batería cuando se abre el interruptor. Repita el cálculo cuando se cierra el interruptor. c) Con los resultados ya obtenidos, explique qué ocurre con el brillo de las lámparas cuando se cierra el interruptor.

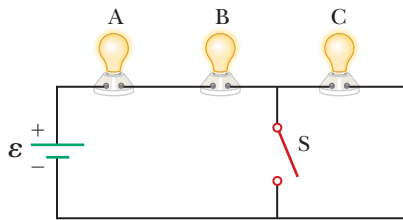


Figura P18.51

52. La resistencia entre los puntos a y b en la figura P18.52 cae a la mitad de su valor original cuando se cierra el interruptor S . Determine el valor de R .

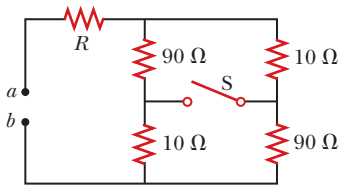


Figura P18.52

53. El circuito de la figura P18.53 se ha conectado durante varios segundos. Encuentre la corriente a) en la batería de 4.00 V, b) en el resistor de 3.00 Ω, c) en la batería de 8.00 V y d) en la batería de 3.00 V. e) Determinar la carga en el capacitor.

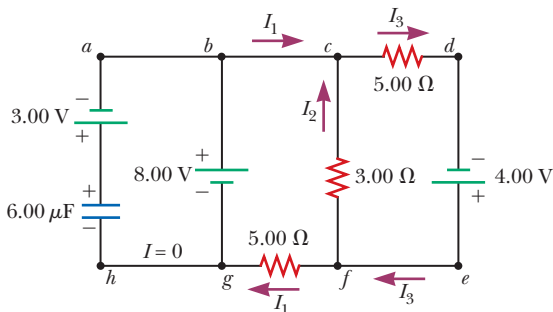


Figura P18.53

54. Una fem de 10 V se conecta a un circuito RC en serie que consiste en un resistor de $2.0 \times 10^6 \Omega$ y un capacitor de $3.0 \mu\text{F}$. Encuentre el tiempo requerido para que la carga sobre el capacitor llegue a 90% de su valor final.

55. El estudiante de ingeniería de una estación de radio universitaria quiere verificar la efectividad de la barra de iluminación en el mástil de la antena (figura P18.55). La resistencia desconocida R_x está entre los puntos C y E . El punto E es una “tierra verdadera”, pero es inaccesible para medición directa porque el estrato donde se ubica está varios metros bajo la superficie de la Tierra. Dos barras idénticas se clavan en el terreno en A y B , e introducen una resistencia desconocida R_y . El procedimiento para encontrar la resistencia desconocida R_x es el siguiente. Mida la resistencia R_1 entre los puntos A y B . Luego conecte A y B con un pesado alambre conductor y mida la resistencia R_2 entre los puntos A y C . a) Deduzca una fórmula para R_x en términos de las resistencias observables R_1 y R_2 . b) Una resistencia de tierra satisfactoria sería $R_x < 2.0 \Omega$. ¿El aterrizaje de la estación es adecuado si las mediciones dan $R_1 = 13 \Omega$ y $R_2 = 6.0 \Omega$?

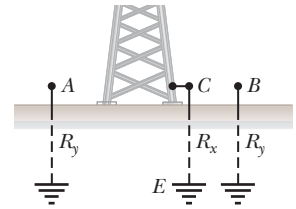


Figura P18.55

56. El resistor R en la figura P18.56 disipa 20 W de potencia. Determine el valor de R .

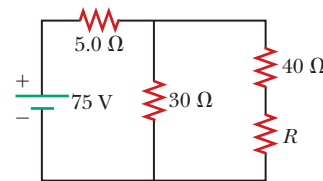


Figura P18.56

57. Un voltaje ΔV se aplica a una configuración en serie de n resistores, cada uno con resistencia R . Los componentes del circuito se vuelven a conectar en una configuración en paralelo y de nuevo se aplica el voltaje ΔV . Demuestre que la potencia consumida por la configuración en serie es $1/n^2$ veces la potencia consumida por la configuración en paralelo.

58. Para la red de la figura P18.58, demuestre que la resistencia entre los puntos a y b es $R_{ab} = \frac{27}{17} \Omega$. (Sugerencia: Conecte una batería con fem \mathcal{E} a través de los puntos a y b y determine \mathcal{E}/I , donde I es la corriente en la batería.)

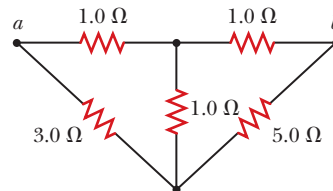


Figura P18.58

59. Una batería con una resistencia interna de 10.0Ω produce un voltaje de circuito abierto de 12.0 V . A través de la batería se conecta una resistencia de carga variable con un rango de 0 a 30.0Ω . (Nota: Una batería tiene una resistencia que depende de la condición de sus químicos y que aumenta conforme la batería envejece. Esta resistencia interna se puede representar mediante un simple diagrama de circuito como un resistor en serie con la batería.) a) Grafique la potencia disipada en el resistor de carga como función de la resistencia de carga. b) Con su gráfica, demuestre el siguiente e importante teorema: *La potencia que se entrega a una carga es un máximo si la resistencia de carga es igual a la resistencia interna de la fuente.*

60. El circuito de la figura P18.60 contiene dos resistores, $R_1 = 2.0 \text{ k}\Omega$ y $R_2 = 3.0 \text{ k}\Omega$, y dos capacitores, $C_1 = 2.0 \mu\text{F}$ y $C_2 = 3.0 \mu\text{F}$, conectados a una batería con fem $\mathcal{E} = 120 \text{ V}$. Si no hay cargas en los capacitores antes de cerrar el interruptor S, determine las cargas q_1 y q_2 en los capacitores C_1 y C_2 , respectivamente, como funciones del tiempo, después de cerrar el interruptor. *Sugerencia:* Primero reconstruya el circuito, de modo que se convierta en un circuito RC simple que contenga un resistor solo y un capacitor solo en serie, conectados a la batería, y luego determine la carga total q almacenada en el circuito.

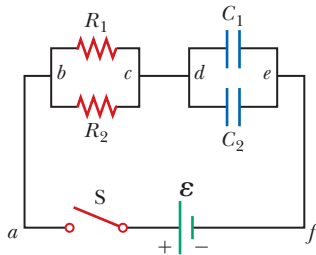


Figura P18.60

61. **BIO** Una anguila eléctrica genera corrientes eléctricas a través de su órgano de Hunter enormemente especializado, donde miles de células con forma de disco, llamadas electrocitos, se alinean en serie, en forma muy parecida a como las baterías se alinean en el interior de una linterna. Cuando se activa, cada electrocito puede mantener una diferencia de potencial cercano a 150 mV a una corriente de 1 A durante más o menos 2.0 ms . Suponga que una anguila eléctrica madura tiene 4.0×10^3 electrocitos y puede entregar hasta 300 choques en rápida sucesión durante aproximadamente 1 s . a) ¿Qué potencia eléctrica máxima puede generar una anguila eléctrica? b) ¿Aproximadamente cuánta energía libera en un choque? c) ¿Cuán alto tendría que elevarse una masa de 1 kg para que su energía potencial gravitacional sea igual a la energía liberada en 300 de tales choques?

62. En la figura P18.62, $R_1 = 0.100 \Omega$, $R_2 = 1.00 \Omega$ y $R_3 = 10.0 \Omega$. Encuentre la resistencia equivalente del circuito y la corriente

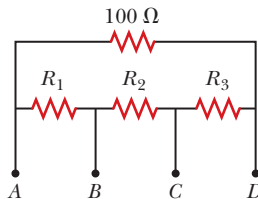


Figura P18.62

en cada resistor cuando una fuente de poder de 5.00 V se conecta entre a) los puntos A y B, b) los puntos A y C y c) los puntos A y D.

63. **M** ¿Cuáles son las lecturas esperadas del amperímetro y el voltímetro para el circuito en la figura P18.63?

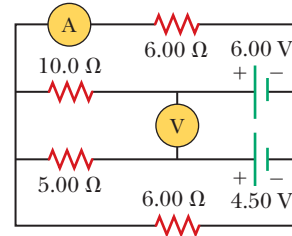


Figura P18.63

64. Considere los dos arreglos de baterías y focos que se muestran en la figura P18.64. Los dos focos son idénticos y tienen resistencia R , y las dos baterías son idénticas con voltaje de salida ΔV . a) En el caso 1, con los dos focos conectados en serie, compare el brillo de cada foco, la corriente en cada foco y la potencia que se entrega a cada foco. b) En el caso 2, con los dos focos conectados en paralelo, compare el brillo de cada foco, la corriente en cada foco y la potencia que se entrega a cada foco. c) ¿Cuáles focos son más brillantes, los del caso 1 o los del caso 2? d) En cada caso, si un foco falla, ¿el otro fallará también? Si el otro foco no falla, ¿será más brillante o permanecerá igual? (El problema 64 es cortesía de E. F. Redish. Para otros problemas de este tipo, visite <http://www.physics.umd.edu/perg/>.)

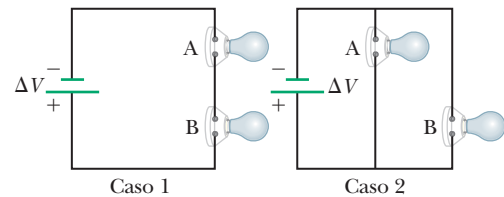


Figura P18.64

65. El par de capacitores dado en la figura P18.65 está completamente cargado por una batería de 12.0 V . La batería se desconecta y el circuito se cierra. Después de 1.00 ms , ¿cuánta carga permanece en a) el capacitor de $3.00 \mu\text{F}$? b) El capacitor de $2.00 \mu\text{F}$? c) ¿Cuál es la corriente en el resistor?

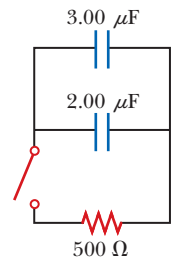


Figura P18.65

66. Un capacitor de 2.00 nF con una carga inicial de $5.10 \mu\text{C}$ se descarga a través de una resistencia de $1.30 \text{ k}\Omega$. a) Calcule la magnitud de la corriente en la resistencia de $9.00 \mu\text{s}$ después de que la resistencia se conecta a través de las terminales del capacitor. b) ¿Qué carga se mantiene en el capacitor después de $8.00 \mu\text{s}$? c) ¿Cuál es la corriente máxima en el resistor?

Aurora boreal, las luces del norte. Despliegues como éste son provocados por partículas de rayos cósmicos atrapadas en el campo magnético de la Tierra. Cuando las partículas chocan con los átomos en la atmósfera, hacen que los átomos emitan luz visible.

Constance McGuire/StockPhoto



19

Magnetismo

- 19.1 Imanes
- 19.2 Campo magnético de la Tierra
- 19.3 Campos magnéticos
- 19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente
- 19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos
- 19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético
- 19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère
- 19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos
- 19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides
- 19.10 Dominios magnéticos

En términos de aplicaciones, el magnetismo es uno de los campos más importantes en la física. Para levantar cargas pesadas se usan grandes electroimanes. Los imanes se usan en dispositivos como medidores, motores y bocinas. Las cintas y discos magnéticos se usan rutinariamente en equipos de grabación de sonido y video, y para almacenar datos de computadora. Los campos magnéticos intensos se usan en aparatos para la formación de imágenes por resonancia magnética (IRM) para explorar el cuerpo humano con mejor resolución y mayor seguridad que la que pueden proporcionar los rayos X. Imanes superconductores gigantes se usan en los ciclotrones que guían partículas hacia blancos casi a la velocidad de la luz. Los cañones de riel (figura 19.1) usan fuerzas magnéticas para disparar proyectiles a gran velocidad y las botellas magnéticas contienen antimateria, una posible clave para futuros sistemas de propulsión espacial.

El magnetismo está cercanamente relacionado con la electricidad. Los campos magnéticos afectan las cargas en movimiento y las cargas en movimiento producen campos magnéticos. Los campos magnéticos variables incluso pueden crear campos eléctricos. Estos fenómenos significan una unidad subyacente de electricidad y magnetismo, que James Clerk Maxwell describió por primera vez en siglo XIX. La fuente última de cualquier campo magnético es la corriente eléctrica.

19.1 Imanes

La mayoría de las personas han experimentado con alguna forma de imán. Es posible que usted esté más familiarizado con el imán de hierro común con forma de herradura que levanta objetos que contienen hierro, como sujetapapeles y clavos. En el análisis siguiente, suponemos que el imán tiene la forma de una barra. Los objetos de hierro son atraídos con más intensidad hacia cualquier extremo de uno de tales imanes de barra, extremos a los que se llama **polos**. Un extremo se llama **polo norte** y el otro **polo sur**. Los nombres provienen del comportamiento de un imán en presencia del campo magnético de la Tierra. Si un imán de barra se suspende de su punto medio mediante un trozo de cuerda, de modo que puede balancearse libremente en un plano horizontal, girará hasta que su polo norte apunte hacia el norte y su polo sur apunte hacia el sur. La misma idea se usa para



Defense Threat Reduction Agency (DTRA)

Figura 19.1 Los cañones de riel lanzan proyectiles con gran velocidad mediante fuerza magnética. Las versiones más grandes podrían enviar cargas hacia el espacio o usarse como propulsores para mover asteroides ricos en metal desde el espacio profundo hacia la órbita de la Tierra. En esta fotografía, un cañón de riel en Sandia National Laboratories en Albuquerque, Nuevo México, dispara un proyectil a más de tres kilómetros por segundo. (Para más información acerca de esto, consulte Física aplicada 20.2 en las páginas 698-699.)

construir una brújula simple. Los polos magnéticos también ejercen fuerzas atractivas o repulsivas uno sobre otro similar a las fuerzas eléctricas entre objetos cargados. De hecho, experimentos simples con dos imanes de barra muestran que **polos iguales se repelen y polos opuestos se atraen mutuamente**.

Aunque la fuerza entre polos magnéticos opuestos es similar a la fuerza entre cargas eléctricas positivas y negativas, existe una diferencia importante: las cargas eléctricas positiva y negativa pueden existir aisladas una de otra; los polos norte y sur no pueden hacerlo. Sin importar cuántas veces se corte un imán permanente, cada pieza siempre tendrá un polo norte y un polo sur. Sin embargo, existe cierta base teórica para la especulación de que los monopolos magnéticos (polos norte o sur aislados) existen en la naturaleza y el intento por detectarlos es en la actualidad un activo campo de investigación experimental.

Un trozo de hierro sin magnetizar, al golpearlo con un imán se puede magnetizar. El magnetismo también se puede inducir en el hierro (y otros materiales) por otros medios. Por ejemplo, si una pieza de hierro sin magnetizar se coloca cerca de un fuerte imán permanente, el trozo de hierro eventualmente queda magnetizado. El proceso se puede acelerar al calentar y luego enfriar el hierro.

Los materiales magnéticos que se encuentran en la naturaleza, como la magnetita, se magnetizan de esta forma, porque están sujetas al campo magnético de la Tierra durante largos periodos. La medida en la que un trozo de material retiene su magnetismo depende de si se clasifica como magnéticamente duro o blando. Los materiales magnéticos **blandos**, como el hierro, se magnetizan fácilmente, pero también tienden a perder su magnetismo con facilidad. Estos materiales se utilizan en los núcleos de transformadores, generadores y motores. El hierro es la opción más común porque es barato. Otros materiales magnéticamente blandos incluyen el níquel, aleaciones de níquel-hierro y ferritas. Las ferritas son combinaciones de un óxido de metal divalente de níquel o de magnesio con óxido de hierro. Las ferritas son utilizadas en aplicaciones de alta frecuencia, como el radar.

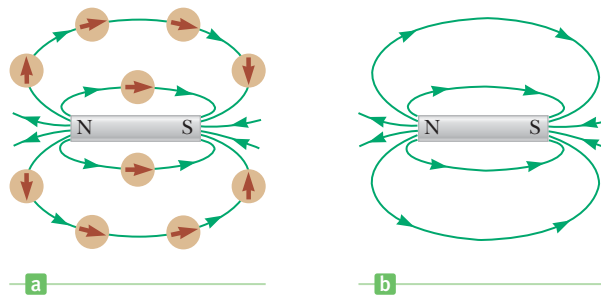
Los materiales magnéticos **duros** se utilizan en los imanes permanentes. Tales imanes proporcionan campos magnéticos sin el uso de la electricidad. Los imanes permanentes se utilizan en muchos dispositivos, incluyendo altavoces, motores de imán permanente y la lectura/escritura de las cabezas de escritura de los discos duros de computadora. Hay un gran número de diferentes materiales utilizados en imanes permanentes. Alnico es un nombre genérico para varias aleaciones de hierro, cobalto y níquel, junto con pequeñas cantidades de aluminio, cobre u otros elementos. Tierras raras, como el samario y neodimio se usan también en combinación con otros elementos para hacer fuertes imanes permanentes.

En capítulos anteriores se describió la interacción entre objetos cargados en términos de campos eléctricos. Recuerde que un campo eléctrico rodea a cualquier carga eléctrica estacionaria. La región del espacio que rodea a una carga *en movimiento* incluye también un campo magnético. Un campo magnético también rodea a un material magnetizado de manera adecuada.

Para describir cualquier tipo de campo vectorial, usted debe definir su magnitud o intensidad y su dirección. La dirección de un campo magnético \vec{B} en cualquier ubicación es la dirección en la que el polo norte de una brújula de aguja apunta en dicha ubicación. La figura activa 19.2a muestra cómo se puede trazar, con la ayuda de una brújula, el cam-

Figura activa 19.2

- a) Trazado del campo magnético de un imán de barra con brújula.
 b) Muchas líneas de campo magnético de un imán de barra.



po magnético de un imán de barra, lo que define una **línea de campo magnético**. Muchas líneas de campo magnético de un imán de barra trazadas de esta forma aparecen en la representación bidimensional de la figura activa 19.2b. Los patrones de campo magnético se pueden mostrar al colocar pequeñas limaduras de hierro en la vecindad de un imán, como en la figura 19.3.

APLICACIÓN

Polvos para huellas digitales

Los científicos forenses usan una técnica similar a la que se muestra en la figura 19.3 para encontrar huellas digitales en una escena criminal. Una forma de encontrar impresiones latentes o invisibles, es al rociar un polvo de hierro sobre una superficie. El hierro se adhiere a cualquier aceite de transpiración o corporal que esté presente y se puede esparcir sobre la superficie con un cepillo magnético que nunca entra en contacto con el polvo o la superficie.

19.2 Campo magnético de la Tierra

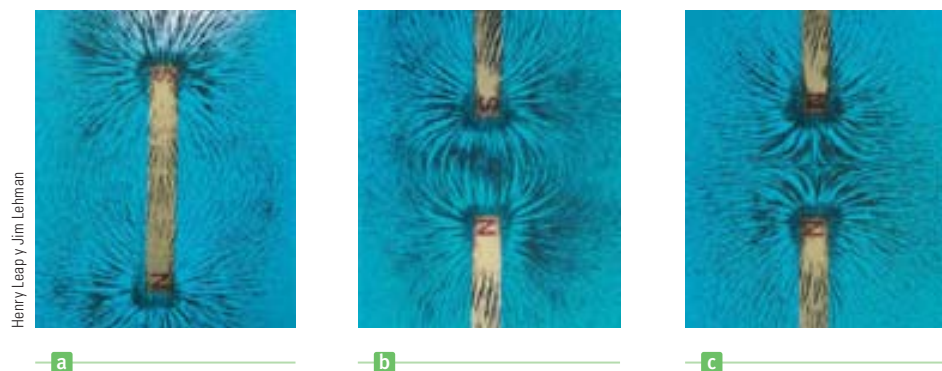
Se dice que un pequeño imán de barra tiene polos norte y sur, pero es más preciso decir que tiene un polo “que busca el norte” y un polo “que busca el sur”. Mediante estas expresiones, se entiende que, si tal imán se usa como brújula, un extremo apuntará o “buscará”, el polo norte geográfico de la Tierra y el otro extremo apuntará o “buscará”, el polo sur geográfico de la Tierra. Concluimos que **el polo norte geográfico de la Tierra corresponde a un polo sur magnético y que el polo sur geográfico de la Tierra corresponde a un polo norte magnético**. De hecho, la configuración del campo magnético de la Tierra, que se bosqueja en la figura 19.4, se parece mucho a lo que se observaría si un enorme imán de barra se enterrara profundamente en el interior de la Tierra.

Si la aguja de una brújula se suspende en cojinetes que le permitan girar en el plano vertical, así como en el plano horizontal, la aguja está horizontal con respecto a la superficie de la Tierra sólo cerca del ecuador. Conforme el dispositivo se mueve hacia el norte, la aguja gira de modo que apunta cada vez más hacia la superficie de la Tierra. El ángulo entre la dirección del campo magnético y la horizontal se llama **inclinación**. Finalmente, en un punto justo al norte de la bahía Hudson en Canadá, el polo norte de la aguja apunta directamente hacia abajo, con una inclinación de 90° . Este sitio, que se encontró por primera vez en 1832, se considera la ubicación del polo magnético sur de la Tierra. Está

Tip 19.1 El polo norte geográfico es el polo sur magnético

El polo norte de un imán en una brújula apunta al norte porque lo atrae el polo *magnético* sur de la Tierra, que se ubica cerca del polo norte *geográfico* de la Tierra.

Figura 19.3 a) Patrón de campo magnético de un imán de barra, como se muestra mediante limaduras de hierro sobre una hoja de papel. b) Patrón de campo magnético entre polos *opuestos* de dos imanes de barra, que se muestra con limaduras de hierro. c) Patrón de campo magnético entre dos polos *iguales*.



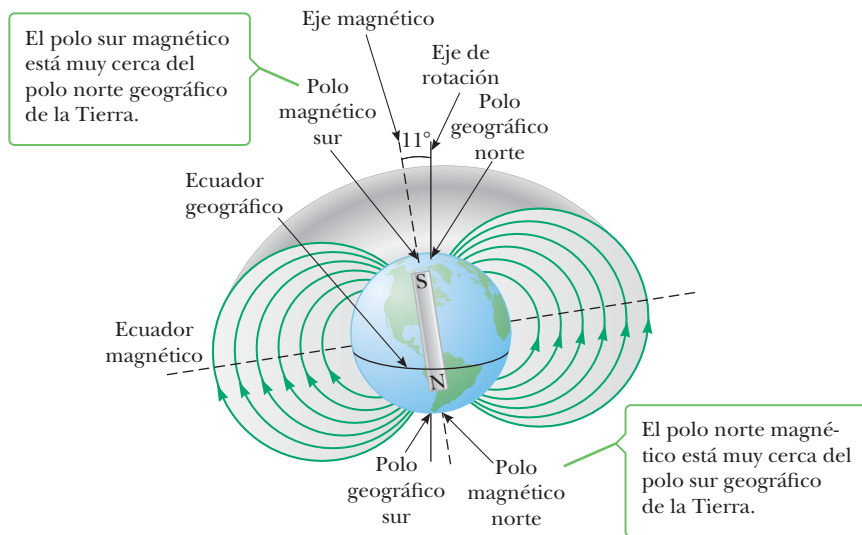


Figura 19.4 Líneas de campo magnético de la Tierra. Observe que el sur magnético está en el polo geográfico norte y el norte magnético está en el polo geográfico sur.

aproximadamente a 2100 km del polo norte geográfico de la Tierra y varía con el tiempo. De igual modo, el polo norte magnético de la Tierra está aproximadamente a 1900 km de su polo sur geográfico. Esto significa que las agujas de las brújulas apuntan sólo aproximadamente al norte. La diferencia entre el norte verdadero, que se define como el polo norte geográfico y el norte que indica una brújula varía de punto a punto sobre la Tierra, esta diferencia se conoce como *declinación magnética*. Por ejemplo, a lo largo de una línea que pasa a través de Carolina del Sur y los grandes lagos, una brújula indica el norte verdadero, mientras que en el estado de Washington se alinea 25° al este del norte verdadero (figura 19.5).

Aunque el patrón de campo magnético de la Tierra es similar al patrón que se establecería mediante un imán de barra colocado en su centro, la fuente del campo de la Tierra no puede consistir de grandes masas de material permanentemente magnetizado. La Tierra tiene grandes depósitos profundos de mineral de hierro bajo su superficie, pero las altas temperaturas en el núcleo evitan que el hierro retenga cualquier magnetización permanente. Se considera más probable que la fuente verdadera del campo magnético de la Tierra es la corriente eléctrica en la parte líquida de su núcleo. Esta corriente, que no está bien comprendida, acaso puede darse mediante una interacción entre la rotación del planeta y la convección en el núcleo líquido caliente. Existe cierta evidencia de que la intensidad del campo magnético de un planeta se relaciona con la tasa de rotación del planeta. Por ejemplo, Júpiter gira más rápido que la Tierra y sondas espaciales recientes indican que el campo magnético de Júpiter es más intenso que el de la Tierra, aun cuando Júpiter carezca de un núcleo de hierro. Venus, por otra parte, gira más lentamente que la Tierra y su campo magnético es más débil. La investigación de la causa del magnetismo de la Tierra continúa.

Un hecho interesante en cuanto al campo magnético de la Tierra es que su dirección se invierte cada cierto número de millones de años. La evidencia de este fenómeno la proporciona el basalto (una roca que contiene hierro) que en ocasiones es vertida en el suelo marino por la actividad volcánica. Conforme la lava se enfría, se solidifica y conserva una imagen de la dirección del campo magnético de la Tierra. Cuando los depósitos de basalto se datan, proporcionan evidencia de inversiones periódicas del campo magnético. La causa de estas inversiones de campo todavía no se comprende.

Desde hace mucho se especula que algunos animales, como las aves, usan el campo magnético de la Tierra para guiar sus migraciones. Los estudios demuestran que un tipo de bacteria anaeróbica que vive en los pantanos tiene una cadena magnetizada de magnetita como parte de su estructura interna. (El término *anaeróbica* significa que estas bacterias viven y crecen sin oxígeno; de hecho, el oxígeno es tóxico para ellas.) La cadena magnetizada actúa como una brújula que permite a las bacterias alinearse con el campo magnético de la Tierra. Cuando se encuentran fuera del lodo en el fondo del pantano, regresan a su ambiente libre de oxígeno al seguir las líneas de campo magnético de la Tierra. La mayor evidencia de su habilidad de percepción magnética es que las bacterias que se encuentran

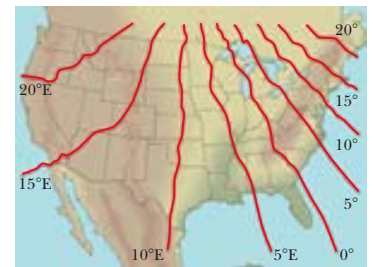


Figura 19.5 Mapa de Estados Unidos continental que muestra la declinación de una brújula del norte verdadero.

BIO APLICACIÓN

Bacterias magnéticas

en el hemisferio norte tienen cadenas internas de magnetita que son opuestas en polaridad a las de bacterias similares en el hemisferio sur. De igual modo, en el hemisferio norte, el campo de la Tierra tiene una componente descendente, mientras que en el hemisferio sur tiene una componente ascendente. Recientemente, se descubrió que un meteorito que se originó en Marte contiene una cadena de magnetita. Los científicos de la NASA creen que puede ser el fósil de una antigua vida bacterial marciana.

El campo magnético de la Tierra se usa para marcar las pistas de aterrizaje en los aeropuertos de acuerdo con su dirección. En el extremo de la pista se pinta un gran número, de modo que lo pueda leer el piloto de un avión que se aproxima. Este número describe la dirección en la que viaja el avión, expresada como dirección magnética, en grados medidos en sentido de las manecillas del reloj desde el norte magnético, dividido por 10. Una pista marcada 9 se dirigiría hacia el este (90° dividido por 10), mientras que una pista marcada 18 se dirigiría hacia el sur magnético.

APLICACIÓN

Marcaje de las pistas de aterrizaje en los aeropuertos

■ FÍSICA APLICADA 19.1 Brújulas en Australia

En un viaje de negocios a Australia, usted lleva su brújula hecha en Estados Unidos, la que tal vez usó en un campamento. ¿Esta brújula funciona correctamente en Australia?

EXPLICACIÓN No hay problema con usar la brújula en Australia. Al polo norte del imán en la brújula lo atraerá el polo magnético sur cerca del polo norte geográfico, tal

como si estuviera en Estados Unidos. La única diferencia en las líneas de campo magnético es que tienen una componente ascendente en Australia, mientras que tienen una componente descendente en Estados Unidos. Sin embargo, si usted la sostiene en un plano horizontal, su brújula no puede detectar esta diferencia; sólo muestra la dirección de la componente horizontal del campo magnético. ■

19.3 Campos magnéticos

Los experimentos demuestran que una partícula cargada estacionaria no interactúa con un campo magnético estático. **Sin embargo, cuando una partícula cargada se mueve a través de un campo magnético, sobre ella actúa una fuerza magnética.** Esta fuerza tiene su valor máximo cuando la carga se mueve en una dirección perpendicular a las líneas del campo magnético y disminuye en valor a otros ángulos, y se vuelve cero cuando la partícula se mueve a lo largo de las líneas de campo. Esto es diferente de la fuerza eléctrica, que ejerce una fuerza sobre una partícula cargada si se mueve o está en reposo. Más aún, la fuerza eléctrica se dirige paralela al campo eléctrico, mientras que la fuerza magnética sobre una carga en movimiento se dirige perpendicular al campo magnético.

En el estudio de la electricidad, el campo eléctrico en algún punto en el espacio se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga que actúa sobre alguna carga de prueba colocada en dicho punto. De forma similar, se pueden describir las propiedades del campo magnético \vec{B} en algún punto en términos de la fuerza magnética que se ejerce sobre una carga de prueba en dicho punto. El objeto de prueba es una carga q que se mueve con velocidad \vec{v} . Experimentalmente se descubre que la intensidad de la fuerza magnética sobre la partícula es proporcional a la magnitud de la carga q , la magnitud de la velocidad \vec{v} , la intensidad del campo magnético externo \vec{B} y el seno del ángulo θ entre la dirección de \vec{v} y la dirección de \vec{B} . Estas observaciones se pueden resumir al escribir la magnitud de la fuerza magnética como

$$F = qvB \sin \theta \quad [19.1]$$

Esta expresión se usa para definir la magnitud del campo magnético como

$$B \equiv \frac{F}{qv \sin \theta} \quad [19.2]$$

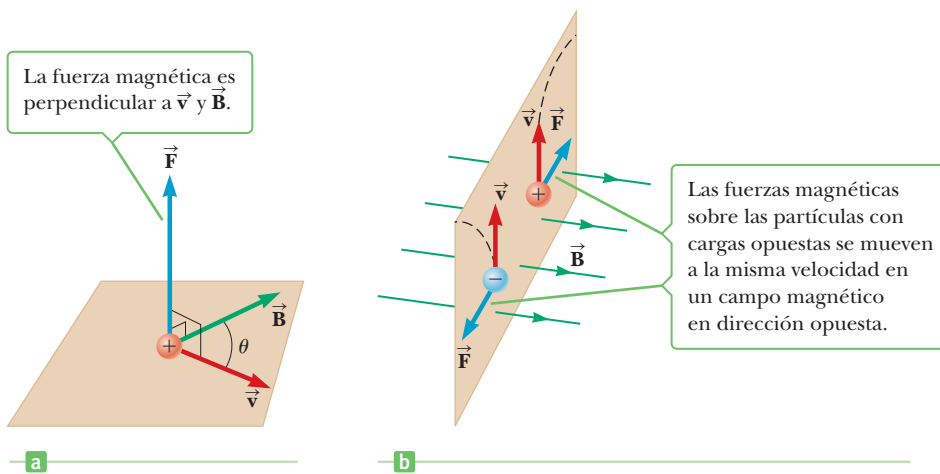


Figura 19.6 a) Dirección de la fuerza magnética \vec{F} sobre una partícula con carga positiva que se mueve con una velocidad \vec{v} en la presencia de un campo magnético \vec{B} . b) Fuerzas magnéticas sobre cargas positivas y negativas. Las líneas punteadas muestran las trayectorias de las partículas, que se investigarán en la sección 19.6.

Si F está en newtons, q en coulombs y v en metros por segundo, la unidad SI del campo magnético es el **tesla** (T), también llamado **weber** (Wb) **por metro cuadrado** ($1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$). Si una carga de 1 C se mueve en una dirección perpendicular a un campo magnético de 1 T de magnitud con una rapidez de 1 m/s, la fuerza magnética que se ejerce sobre la carga es 1 N. Las unidades de \vec{B} se pueden expresar como

$$[\mathbf{B}] = \text{T} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}} = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad [19.3]$$

En la práctica, a menudo se usa la unidad cgs para campo magnético, el **gauss** (G). El gauss se relaciona con el tesla mediante la conversión

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

Los imanes convencionales de laboratorio pueden producir campos magnéticos tan grandes como aproximadamente 25000 G, o 2.5 T. Se han construido imanes superconductores que pueden generar campos magnéticos tan grandes como $3 \times 10^5 \text{ G}$, o 30 T. Estos valores se pueden comparar con el valor del campo magnético de la Tierra cerca de su superficie, que es de más o menos 0.5 G, o $0.5 \times 10^{-4} \text{ T}$.

A partir de la ecuación 19.1, vemos que la fuerza sobre una partícula cargada que se mueve en un campo magnético tiene su valor máximo cuando el movimiento de la partícula es *perpendicular* al campo magnético, que corresponde a $\theta = 90^\circ$, de modo que $\sin \theta = 1$. La magnitud de esta fuerza magnética tiene el valor

$$F_{\text{máx}} = qvB \quad [19.4]$$

También a partir de la ecuación 19.1, F es cero cuando \vec{v} es paralela a \vec{B} (lo que corresponde a $\theta = 0^\circ$ o 180°), de modo que ninguna fuerza magnética se ejerce sobre una partícula cargada cuando se mueve en la dirección del campo magnético u opuesta al campo.

Los experimentos demuestran que la dirección de la fuerza magnética siempre es perpendicular tanto a \vec{v} como a \vec{B} , como se muestra en la figura 19.6 para una partícula con carga positiva. Para determinar la dirección de la fuerza, se emplea la **regla de la mano derecha 1**:

1. Apunte los dedos de su mano derecha en la dirección de la velocidad \vec{v} .
2. Enrolle los dedos en la dirección del campo magnético \vec{B} , que se mueve a través de ángulos más pequeños (como en la figura 19.7).
3. Su pulgar ahora apunta en la dirección de la fuerza magnética \vec{F} que se ejerce sobre una carga positiva.

Si la carga es negativa en lugar de positiva, la fuerza \vec{F} se dirige *opuesta* a la que se muestra en las figuras 19.6a y 19.7. De modo que, si q es negativa, simplemente use la regla de la mano derecha para encontrar la dirección para q positiva y luego invertir dicha dirección para la carga negativa. La figura 19.6b muestra el efecto de un campo magnético sobre partículas cargadas con signos opuestos.

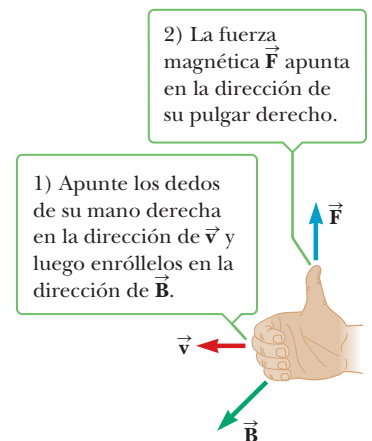


Figura 19.7 Regla de la mano derecha número 1 para determinar la dirección de la fuerza magnética sobre una carga positiva que se mueve con una velocidad \vec{v} en un campo magnético \vec{B} .

Examen rápido

19.1 Una partícula cargada se mueve en una línea recta a través de una región del espacio. ¿Cuál de las siguientes respuestas *debe* ser verdadera? (Suponga que cualquier otro campo es despreciable.) El campo magnético a) tiene una magnitud de cero, b) tiene una componente perpendicular cero a la velocidad de la partícula, c) tiene una componente cero paralela a la velocidad de la partícula en dicha región.

19.2 El polo norte de un imán de barra se sostiene cerca de una pieza de plástico con carga positiva estacionaria. El imán, ¿a) atrae, b) repele o c) no afecta al plástico?

EJEMPLO 19.1 Un protón que viaja en el campo magnético de la Tierra

OBJETIVO Calcular la magnitud y dirección de una fuerza magnética.

PROBLEMA Un protón se mueve con una velocidad de 1.00×10^5 m/s a través del campo magnético de la Tierra, que tiene un valor de $55.0 \mu\text{T}$ en una ubicación particular. Cuando el protón se mueve hacia el este, la fuerza magnética que actúa sobre él se dirige en línea recta hacia arriba y cuando se mueve hacia el norte, ninguna fuerza magnética actúa sobre él. a) ¿Cuál es la dirección del campo magnético y b) cuál es la intensidad de la fuerza magnética cuando el protón se mueve hacia el este? c) Calcule la fuerza gravitacional sobre el protón y compárela con la fuerza magnética. Com-

párela también con la fuerza eléctrica si hubiera un campo eléctrico con una magnitud igual a $E = 1.50 \times 10^2$ N/C en dicha ubicación, un valor común en la superficie de la Tierra. Observe que la masa del protón es 1.67×10^{-27} kg.

ESTRATEGIA La dirección del campo magnético se puede encontrar a partir de una aplicación de la regla de la mano derecha, junto con el hecho de que ninguna fuerza se ejerce sobre el protón cuando viaja hacia el norte. Al sustituir en la ecuación 19.1 se obtiene la magnitud del campo magnético.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la dirección del campo magnético.

Ninguna fuerza magnética actúa sobre el protón cuando se dirige hacia el norte, así que el ángulo que tal protón forma con la dirección del campo magnético debe ser 0° o 180° . Por lo tanto, el campo magnético \vec{B} debe apuntar al

norte o al sur. Ahora aplique la regla de la mano derecha. Cuando la partícula viaja hacia el este, la fuerza magnética se dirige hacia arriba. Apunte su pulgar en la dirección de la fuerza y sus dedos en la dirección de la velocidad hacia el este. Cuando enrolla sus dedos, apuntan al norte, que por lo tanto debe ser la dirección del campo magnético.

b) Determine la magnitud de la fuerza magnética.

Sustituya los valores dados y la carga de un protón en la ecuación 19.1. Del inciso a), el ángulo entre la velocidad \vec{v} del protón y el campo magnético \vec{B} es 90.0° .

$$\begin{aligned} F &= qvB \sin \theta \\ &= (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.00 \times 10^5 \text{ m/s}) \times (55.0 \times 10^{-6} \text{ T}) \sin (90.0^\circ) \\ &= 8.80 \times 10^{-19} \text{ N} \end{aligned}$$

c) Calcule la fuerza gravitacional sobre el protón y compárela con la fuerza magnética y también con la fuerza eléctrica si $E = 1.50 \times 10^2$ N/C.

$$\begin{aligned} F_{\text{grav}} &= mg = (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \\ &= 1.64 \times 10^{-26} \text{ N} \\ F_{\text{elec}} &= qE = (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.50 \times 10^{-19} \text{ N/C}) \\ &= 2.40 \times 10^{-17} \text{ N} \end{aligned}$$

COMENTARIOS En la información concerniente a un protón que se mueve hacia el norte fue necesario ajustar la dirección del campo magnético. De otro modo, un campo magnético que apunta a alguna parte al noreste o noroeste podría causar una fuerza magnética hacia arriba sobre un protón que se mueve hacia el este. Observe en el inciso c) las intensidades relativas de las fuerzas, con la fuerza eléctrica más grande que la fuerza magnética y ambas mucho más grandes que la fuerza gravitacional, todo para valores de campo típicos que se encuentran en la naturaleza.

PREGUNTA 19.1 Un electrón y un protón que se mueven con la misma velocidad entran a un campo magnético uniforme. ¿En qué par de formas el campo magnético afecta al electrón de manera diferente al protón?

EJERCICIO 19.1 Suponga que un electrón se mueve hacia el oeste en el mismo campo magnético que en el ejemplo 19.1, con una rapidez de 2.50×10^9 m/s. Determine la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre el electrón.

RESPUESTA 2.20×10^{-18} N, recto hacia arriba. (No olvide: ¡el electrón tiene carga negativa!)

EJEMPLO 19.2 Un protón que se mueve en un campo magnético

OBJETIVO Calcular la fuerza magnética y la aceleración cuando una partícula se mueve en un ángulo distinto a 90° en el campo.

PROBLEMA Un protón se mueve a 8.00×10^6 m/s a lo largo del eje x . Entra a una región donde hay un campo magnético de 2.50 T de magnitud, dirigido a un ángulo de 60.0° con el eje x y yace en el plano xy (figura 19.8). **a)** Encuentre la magnitud y dirección iniciales de la fuerza magnética sobre el protón. **b)** Calcule la aceleración inicial del protón.

ESTRATEGIA Para encontrar la magnitud y dirección de la fuerza magnética necesita sustituir valores en la ecuación para fuerza magnética, ecuación 19.1, y use la regla de la mano derecha. Al aplicar la segunda ley de Newton resuelve el inciso b).

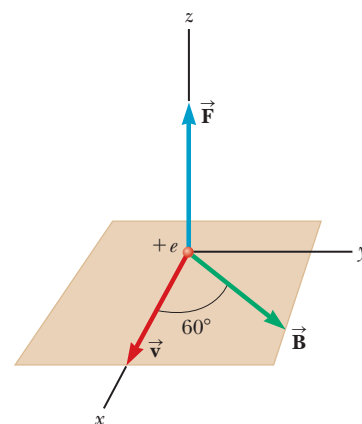


Figura 19.8 (Ejemplo 19.2) La fuerza magnética \vec{F} sobre un protón está en la dirección z positiva cuando \vec{v} y \vec{B} se encuentran en el plano xy .

SOLUCIÓN

a) Determine la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre el protón.

Sustituya $v = 8.00 \times 10^6$ m/s, la intensidad del campo magnético $B = 2.50$ T, el ángulo y la carga de un protón en la ecuación 19.1:

Aplique la regla de la mano derecha número 1 para encontrar la dirección inicial de la fuerza magnética:

b) Calcule la aceleración inicial del protón.

Sustituya la fuerza y la masa de un protón en la segunda ley de Newton:

$$F = qvB \sin \theta$$

$$= (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(8.00 \times 10^6 \text{ m/s})(2.50 \text{ T})(\sin 60^\circ)$$

$$F = 2.77 \times 10^{-12} \text{ N}$$

Apunte los dedos de la mano derecha en la dirección x (la dirección de \vec{v}) y luego enróllelos hacia \vec{B} . El pulgar apunta hacia arriba, en la dirección z positiva.

$$ma = F \rightarrow (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})a = 2.77 \times 10^{-12} \text{ N}$$

$$a = 1.66 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS La aceleración inicial también está en la dirección z positiva. Sin embargo, puesto que la dirección de \vec{v} cambia, la dirección posterior de la fuerza magnética también cambia. Al aplicar la regla de la mano derecha número 1 para encontrar la dirección, fue importante tomar en consideración la carga. Una partícula con carga negativa acelera en la dirección opuesta.

PREGUNTA 19.2 ¿Un campo magnético constante puede cambiar la velocidad de una partícula cargada? Explique.

EJERCICIO 19.2 Calcule la aceleración de un electrón que se mueve a través del mismo campo magnético del ejemplo 19.2, a la misma rapidez que el protón. La masa de un electrón es 9.11×10^{-31} kg.

RESPUESTA 3.04×10^{18} m/s² en la dirección z negativa.

19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente

Si un campo magnético ejerce una fuerza sobre una sola partícula cargada cuando se mueve a través de un campo magnético, no debe sorprenderle que también se ejerzan fuerzas magnéticas sobre un alambre portador de corriente (véase la figura 19.9 en la página 656). Puesto que la corriente es una colección de muchas partículas cargadas en movimiento, la fuerza resultante sobre el alambre se debe a la suma de las fuerzas individuales sobre

Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman



Figura 19.9 Este aparato demuestra la fuerza sobre un conductor portador de corriente en un campo magnético externo. ¿Por qué la barra se balancea alejándose del imán después de cerrar el interruptor?

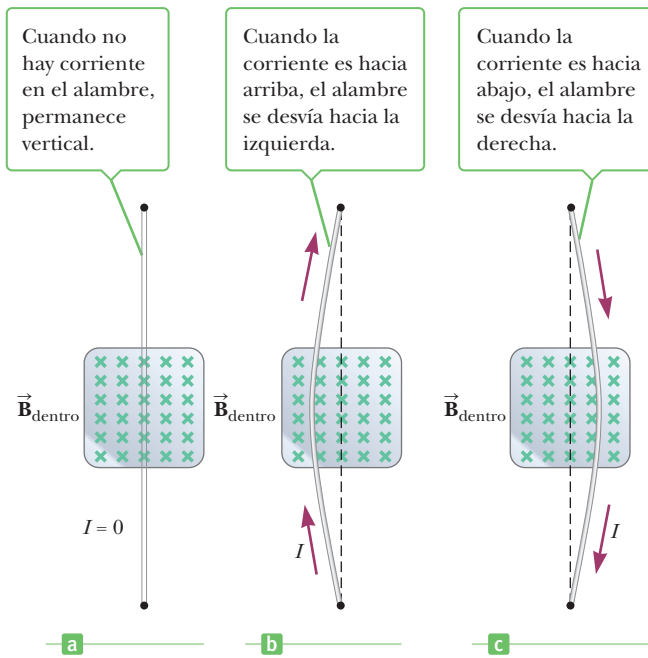


Figura 19.10 Segmento de un alambre vertical flexible parcialmente estirado entre los polos de un imán, con el campo (cruces verdes) dirigido hacia la página.

las partículas cargadas. La fuerza sobre las partículas se transmite hacia el “volumen” del alambre mediante colisiones con los átomos que constituyen al alambre.

Es necesaria cierta explicación en cuanto a la notación en muchas de las figuras. Para indicar la dirección de \vec{B} , se usan las siguientes convenciones:

Si \vec{B} se dirige hacia la página, como en la figura 19.10, se usa una serie de cruces verdes, que representan las colas de las flechas. Si \vec{B} se dirige afuera de la página, se usa una serie de puntos verdes, que representan las puntas de las flechas. Si \vec{B} yace en el plano de la página, se usa una serie de líneas de campo verde con puntas de flecha.

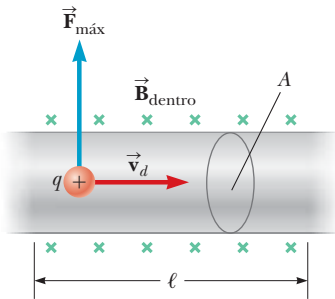


Figura 19.11 Sección de un alambre que contiene cargas en movimiento en un campo magnético externo \vec{B} .

Tip 19.2 El origen de la fuerza magnética sobre un alambre

Cuando un campo magnético se aplica en cierto ángulo a un alambre que porta una corriente, se ejerce una fuerza magnética sobre cada carga en movimiento en el alambre. La fuerza magnética total sobre el alambre es la suma de todas las fuerzas magnéticas sobre las cargas individuales, lo que produce la corriente.

La fuerza sobre un conductor portador de corriente se puede demostrar al colgar un alambre entre los polos de un imán, como en la figura 19.10. En esta figura, el campo magnético se dirige hacia la página y cubre la región dentro del área sombreada. El alambre se desvía hacia la derecha o izquierda cuando porta una corriente.

Este análisis se puede cuantificar al considerar un segmento recto de alambre de longitud ℓ y área transversal A que porta corriente I en un campo magnético uniforme externo \vec{B} , como en la figura 19.11. Suponga que el campo magnético es perpendicular al alambre y se dirige hacia la página. Una fuerza de magnitud $F_{\text{máx}} = qv_dB$ se ejerce sobre cada portador de carga en el alambre, donde v_d es la velocidad de deriva de la carga. Para encontrar la fuerza total sobre el alambre, multiplique la fuerza sobre un portador de carga por el número de portadores en el segmento. Puesto que el volumen del segmento es $A\ell$, el número de portadores es $nA\ell$, donde n es el número de portadores por unidad de volumen. En consecuencia, la magnitud de la fuerza magnética total sobre el alambre de longitud ℓ es la siguiente:

Fuerza total = fuerza sobre cada portador de carga \times número total de portadores

$$F_{\text{máx}} = (qv_dB)(nA\ell)$$

Sin embargo, del capítulo 17 sabemos que la corriente en el alambre está dada por la expresión $I = nqv_dA$, de modo que

$$F_{\text{máx}} = BI\ell \quad [19.5]$$

Esta ecuación se puede usar sólo cuando la corriente y el campo magnético forman un ángulo recto entre sí.

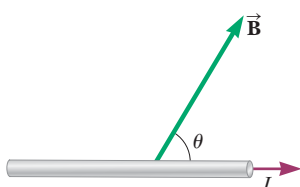


Figura 19.12 Un alambre portador de corriente I en presencia de un campo magnético externo \vec{B} que forma un ángulo θ con el alambre. El vector de la fuerza magnética sale de la página.

Si el alambre no es perpendicular al campo sino que está formando algún ángulo arbitrario, como en la figura 19.12, la magnitud de la fuerza magnética sobre el alambre es

$$F = BIl \sin \theta \quad [19.6]$$

donde θ es el ángulo entre \vec{B} y la dirección de la corriente. La dirección de esta fuerza se puede obtener con el uso de la regla de la mano derecha número 1. Sin embargo, en este caso, debe colocar sus dedos en la dirección de la corriente positiva I , en lugar de \vec{v} en la dirección de \vec{B} . La corriente, naturalmente, se constituye con cargas que se mueven con cierta velocidad, de modo que ésta en realidad no es una regla separada. En la figura 19.12 la dirección de la fuerza magnética sobre el alambre es hacia afuera de la página.

Finalmente, cuando la corriente está ya sea en la dirección del campo u opuesta a la dirección del campo, la fuerza magnética sobre el alambre es cero.

Una fuerza magnética que actúa sobre un alambre portador de corriente en un campo magnético es el principio operativo de la mayoría de las bocinas en los sistemas de sonido. El diseño de una bocina, que se muestra en la figura 19.13, consiste en una bobina de alambre llamada bobina de altavoz, un cono de papel flexible que actúa como la bocina y un imán permanente. A la bobina de alambre que rodea el polo norte del imán se le da una forma tal que las líneas de campo magnético se dirigen radialmente hacia afuera desde el eje de la bobina. Cuando una señal eléctrica se envía a la bobina, lo que produce una corriente en ésta como en la figura 19.13, una fuerza magnética hacia la izquierda actúa sobre la misma. (Esto se puede observar al aplicar la regla de la mano derecha número 1 a cada vuelta de alambre.) Cuando la corriente invierte su dirección, como sería para una corriente que varía sinusoidalmente, la fuerza magnética sobre la bobina también invierte su dirección y el cono, que se une a la bobina, acelera hacia la derecha. Una corriente alterna a través de la bobina causa una fuerza alterna sobre ella, que resulta en vibraciones del cono. El cono que vibra crea ondas sonoras conforme empuja y jala el aire enfrente de él. De esta forma, una señal eléctrica de 1 kHz se convierte en una onda sonora de 1 kHz.

Una aplicación de la fuerza sobre un conductor portador de corriente se ilustra mediante la bomba electromagnética que se muestra en la figura 19.14. Los corazones artificiales requieren una bomba para mantener el flujo de sangre y las máquinas de diálisis renal también requieren una bomba para auxiliar al corazón a bombear la sangre que se debe limpiar. Las bombas mecánicas ordinarias crean problemas porque dañan las células sanguíneas conforme se mueven a través de la bomba. El mecanismo que se muestra en la figura ha mostrado ser prometedor en tales aplicaciones. A través de un segmento del tubo que contiene la sangre, que fluye en la dirección de la velocidad \vec{v} , se establece un campo magnético. Una corriente eléctrica que pasa a través del fluido en la dirección que se muestra tiene una fuerza magnética que actúa sobre él en la dirección de \vec{v} , como se muestra al aplicar la regla de la mano derecha. Esta fuerza ayuda a mantener la sangre en movimiento.

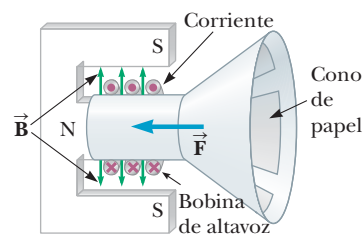


Figura 19.13 Diagrama de una bocina.

APLICACIÓN

Operación de bocina

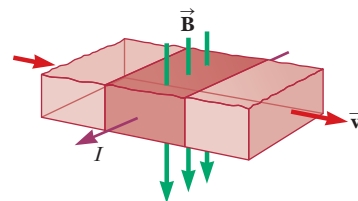


Figura 19.14 Una bomba electromagnética simple no tiene partes móviles que pueden dañar un fluido conductor, como la sangre que pasa por él. Aplicación de la regla número uno de la derecha (los dedos justo en la dirección de la corriente I , girados en la dirección de \vec{B} , el pulgar apunta en la dirección de la fuerza) muestra que la fuerza en el segmento de transporte de corriente del fluido se encuentra en el dirección de la velocidad.

BIO APLICACIÓN

Bombas electromagnéticas para corazones y riñones artificiales

■ FÍSICA APLICADA 19.2 Relámpagos

En un relámpago existe un rápido movimiento de carga negativa desde una nube hasta el suelo. ¿En qué dirección se desvía un relámpago por el campo magnético de la Tierra?

EXPLICACIÓN El flujo descendente de carga negativa en un relámpago es equivalente a una corriente que se mueve

hacia arriba. En consecuencia, se tiene una corriente que se mueve hacia arriba en un campo magnético que se dirige hacia el norte. De acuerdo con la regla de la mano derecha número 1, el relámpago se desviaría hacia el oeste. ■

■ EJEMPLO 19.3 Un alambre que porta corriente en el campo magnético de la Tierra

OBJETIVO Comparar la fuerza magnética sobre un alambre portador de corriente con la fuerza gravitacional que se ejerce sobre el alambre.

PROBLEMA Un alambre porta una corriente de 22.0 A de oeste a este. Suponga que el campo magnético de la Tierra en esta ubicación es horizontal y se dirige de sur a norte y tiene una magnitud de 0.500×10^{-4} T. **a)** Encuentre la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre una longitud de alambre de 36.0 m. **b)** Calcule la fuerza gravitacional sobre la misma longitud de alambre si está hecho de cobre y tiene un área transversal de 2.50×10^{-6} m².

SOLUCIÓN

a) Calcule la fuerza magnética sobre el alambre.

$$F = BI\ell \sin \theta = (0.500 \times 10^{-4} \text{ T})(22.0 \text{ A})(36.0 \text{ m}) \sin 90.0^\circ \\ = 3.96 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Sustituya en la ecuación 19.6 y use el hecho de que el campo magnético y la corriente forman un ángulo recto entre sí:

Aplique la regla de la mano derecha número 1 para encontrar la dirección de la fuerza magnética:

Con los dedos de su mano derecha apuntando de oeste a este en la dirección de la corriente, enróllelos al norte en la dirección del campo magnético. Su pulgar apunta **hacia arriba**.

b) Calcule la fuerza gravitacional sobre el segmento de alambre.

Primero, obtenga la masa del alambre a partir de la densidad del cobre, la longitud y el área transversal del alambre:

$$m = \rho V = \rho(A\ell) \\ = (8.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(2.50 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 36.0 \text{ m}) \\ = 0.803 \text{ kg}$$

Para obtener la fuerza gravitacional, multiplique la masa por la aceleración de la gravedad:

$$F_{\text{grav}} = mg = 7.87 \text{ N}$$

COMENTARIOS Este cálculo demuestra que, bajo circunstancias normales, la fuerza gravitacional sobre un conductor portador de corriente es mucho mayor que la fuerza magnética debida al campo magnético de la Tierra.

PREGUNTA 19.3 ¿Qué fuerza magnética se ejerce sobre un alambre portador de corriente paralelo a la dirección del campo magnético?

EJERCICIO 19.3 ¿Qué corriente haría que la fuerza magnética en el ejemplo sea igual en magnitud a la fuerza gravitatoria?

RESPUESTA 4.37×10^3 A, una gran corriente que muy rápidamente calentaría y fundiría el alambre.

19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos

En la sección anterior mostramos cómo se ejerce una fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente cuando el conductor se coloca en un campo magnético externo. Con este punto de partida, ahora mostraremos que, sobre una espira de corriente colocado en un campo magnético, se ejerce un torque. Los resultados de este análisis serán de gran valor práctico cuando estudie los generadores y motores en el capítulo 20.

Considere una espira rectangular que porta corriente I en presencia de un campo magnético uniforme externo en el plano de la espira, como se muestra en la figura 19.15a. Las fuerzas sobre los lados de longitud a son cero porque dichos alambres son paralelos al campo. Sin embargo, las magnitudes de las fuerzas magnéticas sobre los lados de longitud b son

$$F_1 = F_2 = BIb$$

La dirección de \vec{F}_1 , la fuerza sobre el lado izquierdo del lazo, es hacia afuera de la página y que \vec{F}_2 , la fuerza en el lado derecho de la espira, es hacia adentro de la página. Si ve el lazo desde el lado, como en la figura 19.15b, las fuerzas se dirigen como se muestran. Si

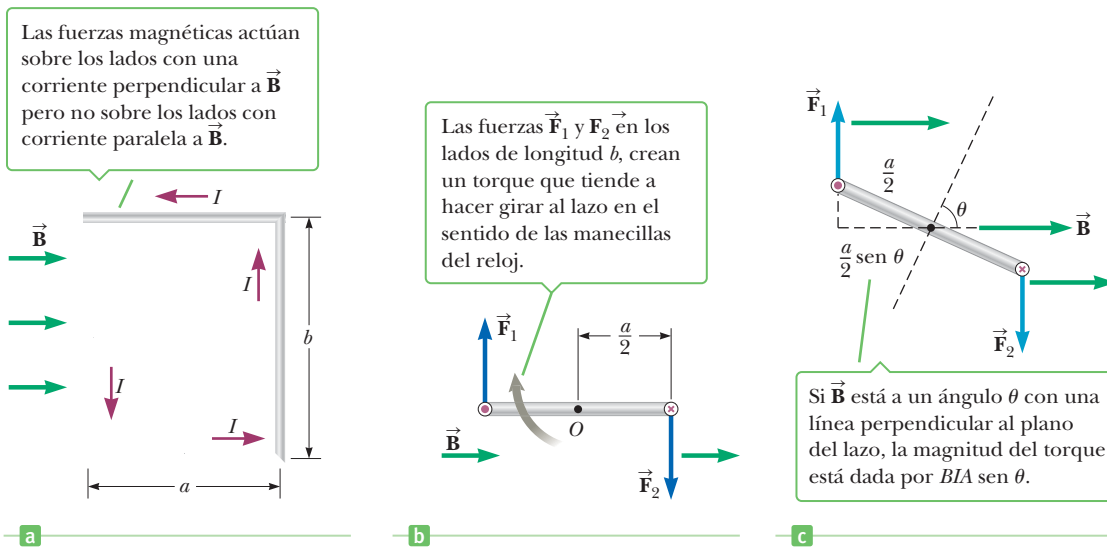


Figura 19.15 a) Vista superior de un lazo rectangular en un campo magnético uniforme. b) Una vista lateral del lazo rectangular del inciso a). c) Una vista lateral del lazo el inciso a) con la perpendicular al lazo que está a un ángulo θ con respecto al campo magnético.

supone que la espira tiene pivote de modo que puede girar en torno al punto O , vemos que estas dos fuerzas producen un torque en torno a O , que gira a la espira en sentido de las manecillas del reloj. La magnitud de este torque, $\tau_{\text{máx}}$, es

$$\tau_{\text{máx}} = F_1 \frac{a}{2} + F_2 \frac{a}{2} = (Bib) \frac{a}{2} + (Bib) \frac{a}{2} = BIab$$

donde el brazo de momento en torno a O es $a/2$ para ambas fuerzas. Puesto que el área del lazo es $A = ab$, el torque se puede expresar como

$$\tau_{\text{máx}} = BIA \tag{19.7}$$

Este resultado sólo es válido cuando el campo magnético es *paralelo* al plano del lazo, como en la figura 19.15b. Si el campo forma un ángulo θ con una línea perpendicular al plano de la espira, como en la figura 19.15c, el brazo de momento para cada fuerza está dada por $(a/2) \text{ sen } \theta$. Un análisis similar al anterior produce, para la magnitud del torque,

$$\tau = BIA \text{ sen } \theta \tag{19.8}$$

Este resultado muestra que el torque tiene el *máximo* valor BIA cuando el campo es *paralelo* al plano de la espira ($\theta = 90^\circ$) y es *cero* cuando el campo es *perpendicular* al plano de la espira ($\theta = 0$). Como se ve en la figura 19.15c, el lado tiende a girar a valores más pequeños de θ (de modo que la normal al plano de la espira gira hacia la dirección del campo magnético).

Aunque el análisis anterior fue para una espira rectangular, una derivación más general muestra que la ecuación 19.8 se aplica sin importar la forma de la espira. Más aún, el torque sobre una bobina con N vueltas es

$$\tau = BIAN \text{ sen } \theta \tag{19.9a}$$

La cantidad $\mu = IAN$ se define como la magnitud del vector $\vec{\mu}$ llamado *momento magnético* de la bobina. El vector $\vec{\mu}$ siempre apunta perpendicular al plano de la espira y es tal que si el pulgar de la mano derecha apunta en la dirección de $\vec{\mu}$, los dedos de la mano apuntan en la dirección de la corriente. El ángulo θ en las ecuaciones 19.8 y 19.9 yace entre las direcciones del momento magnético $\vec{\mu}$ y el campo magnético \vec{B} . El torque magnético se puede escribir entonces

$$\tau = \mu B \text{ sen } \theta \tag{19.9b}$$

Observe que el torque $\vec{\tau}$ es siempre perpendicular al momento magnético $\vec{\mu}$ y el campo magnético \vec{B} .

Examen rápido

19.3 Una espira cuadrada y una circular con la misma área yacen en el plano xy , donde hay un campo magnético uniforme \vec{B} que apunta en cierto ángulo θ con respecto a la dirección z positiva. Cada espira porta la misma corriente, en la misma dirección. ¿Cuál torque magnético es más grande? a) el torque sobre la espira cuadrada, b) el torque sobre la espira circular, c) los torques son iguales, d) se necesita más información.

EJEMPLO 19.4

El torque sobre una espira circular en un campo magnético

OBJETIVO Calcular un torque magnético sobre una espira de corriente.

PROBLEMA Una espira de alambre circular, de 1.00 m de radio, se coloca en un campo magnético de 0.500 T de magnitud. La normal al plano de la espira forma un ángulo de 30.0° con el campo magnético (figura 19.16a). La corriente en la espira es 2.00 A en la dirección que se muestra. **a)** Encuentre el momento magnético de la espira y la magnitud del torque en este instante. **b)** La misma corriente la porta una bobina rectangular de 2.00 por 3.00 m con tres espiras que se muestra en la figura 19.16b. Encuentre el momento magnético de la bobina y la magnitud del torque que actúa sobre la bobina en dicho instante.

ESTRATEGIA Para cada inciso, sólo tiene que calcular el área, usarla en el cálculo del momento magnético y multiplicar el resultado por $B \sin \theta$. En conjunto, este proceso equivale a sustituir valores en la ecuación 19.9b.

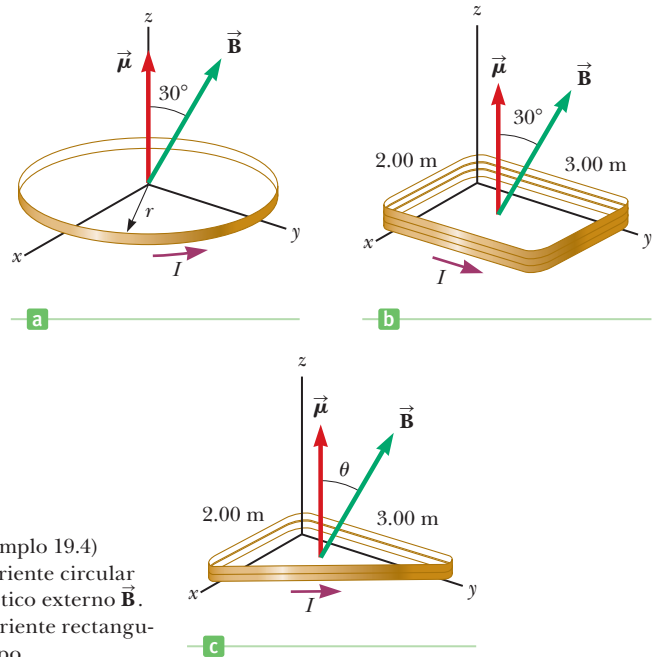


Figura 19.16 (Ejemplo 19.4) a) Una espira de corriente circular en un campo magnético externo \vec{B} . b) Una espira de corriente rectangular en el mismo campo. c) (Ejercicio 19.4).

SOLUCIÓN

a) Encuentre el momento magnético de la espira circular y el torque magnético que se ejerce sobre él.

Primero, calcule el área encerrada de la espira circular:
 Calcule el momento magnético de la espira:

$$A = \pi r^2 = \pi(1.00 \text{ m})^2 = 3.14 \text{ m}^2$$

$$\mu = IAN = (2.00 \text{ A})(3.14 \text{ m}^2)(1) = 6.28 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Ahora sustituya valores para el momento magnético, campo magnético y θ en la ecuación 19.9b:

$$\tau = \mu B \sin \theta = (6.28 \text{ A} \cdot \text{m}^2)(0.500 \text{ T})(\sin 30.0^\circ)$$

$$= 1.57 \text{ N} \cdot \text{m}$$

b) Encuentre el momento magnético de la bobina rectangular y el torque magnético que se ejerce sobre ella.

Calcule el área de la bobina:
 Calcule el momento magnético de la bobina:

$$A = L \times H = (2.00 \text{ m})(3.00 \text{ m}) = 6.00 \text{ m}^2$$

$$\mu = IAN = (2.00 \text{ A})(6.00 \text{ m}^2)(3) = 36.0 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Sustituya valores en la ecuación 19.9b:

$$\tau = \mu B \sin \theta = (0.500 \text{ T})(36.0 \text{ A} \cdot \text{m}^2)(\sin 30.0^\circ)$$

$$= 9.00 \text{ N} \cdot \text{m}$$

COMENTARIOS Al calcular un torque magnético, no es estrictamente necesario calcular el momento magnético. En vez de ello, puede usar directamente la ecuación 19.9a.

PREGUNTA 19.4 ¿Qué ocurre con la magnitud del torque si el ángulo aumenta hacia 90° ? ¿Va más allá de 90° ?

EJERCICIO 19.4 Suponga que una bobina triangular recta, con 2.00 m de base y 3.00 m de alto, tiene dos espiras que portan una corriente de 2.00 A, como se muestra en la figura 19.16c. Encuentre el momento magnético y el torque sobre la bobina. El campo magnético de nuevo es 0.500 T y forma un ángulo de 30.0° con respecto a la dirección normal.

RESPUESTAS $\mu = 12.0 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, $\tau = 3.00 \text{ N} \cdot \text{m}$

Motores eléctricos

Es difícil imaginar la vida en el siglo XXI sin motores eléctricos. Algunas aplicaciones que contienen motores incluyen las unidades de disco de las computadoras, los reproductores de CD y DVD, los procesadores de alimentos y licuadoras, los arranques de los autos, hornos y acondicionadores de aire. Los motores convierten la energía eléctrica en energía cinética de rotación y consisten en una espira rígida portadora de corriente que gira cuando se coloca en el campo de un imán.

Como acaba de ver (figura 19.15), el torque sobre la espira lo hace girar a valores más pequeños de θ hasta que el torque se vuelve cero, cuando el campo magnético es perpendicular al plano de la espira y $\theta = 0$. Si el giro de la espira pasa por este ángulo y la corriente permanece en la dirección que se muestra en la figura, el torque invierte la dirección y hace girar la espira en la dirección opuesta, esto es, contra las manecillas del reloj. Para superar esta dificultad y proporcionar rotación continua en una dirección, la corriente en la espira debe invertir su dirección periódicamente. En los motores de corriente alterna (CA), tal inversión ocurre de manera natural 120 veces cada segundo. En los motores de corriente directa (CD), la inversión se logra mecánicamente con contactos de collar partido (conmutadores) y escobillas, como se muestra en la figura activa 19.17.

Aunque los motores reales contienen muchas espiras de corriente y conmutadores, por simplicidad la figura activa 19.17 sólo muestra una sola espira y un solo conjunto de contactos de collar partido (conmutadores) rígidamente unidos a, y que giran con, la espira. Los contactos eléctricos estacionarios llamados *escobillas* se mantienen en contacto eléctrico con los conmutadores giratorios. Estas escobillas por lo general están hechas de grafito porque es un buen conductor eléctrico, así como un buen lubricante. Justo cuando la espira queda perpendicular al campo magnético y el torque es cero, la inercia lleva la espira hacia adelante, en la dirección de las manecillas del reloj y las escobillas cruzan las brechas en los anillos conmutadores, lo que hace que la corriente en la espira invierta su dirección. Esta inversión proporciona otro pulso de torque en la dirección de las manecillas del reloj durante otros 180° , la corriente se invierte y el proceso se repite a sí mismo. La figura 19.18 muestra un motor moderno que se usa para impulsar un automóvil híbrido gasolina-eléctrico.

APLICACIÓN

Motores eléctricos

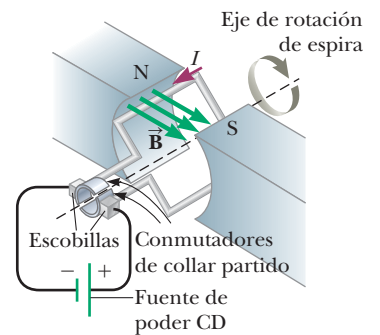


Figura activa 19.17

Bosquejo simplificado de un motor eléctrico CD.



John W. Jewett, Jr.

Figura 19.18 Compartimento del motor del Toyota Prius, un vehículo híbrido.

19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético

Considere el caso de una partícula con carga positiva que se mueve en un campo magnético uniforme, de modo que la dirección de la velocidad de la partícula es *perpendicular al campo*, como en la figura activa 19.19 (página 662). La marca $\mathbf{B}_{\text{adentro}}$ y las cruces indican que \mathbf{B} se dirige hacia la página. La aplicación de la regla de la mano derecha en el punto P muestra que la dirección de la fuerza magnética \mathbf{F} en la posición es hacia arriba. La fuerza hace que la partícula altere su dirección de viaje y siga una trayectoria curva. La aplicación de la regla de la mano derecha a cualquier punto muestra que **la fuerza magnética siempre se dirige hacia el centro de la trayectoria circular**; por lo tanto, la fuerza magnética causa una aceleración centrípeta, que cambia sólo la dirección de \vec{v} y no su magnitud. Puesto

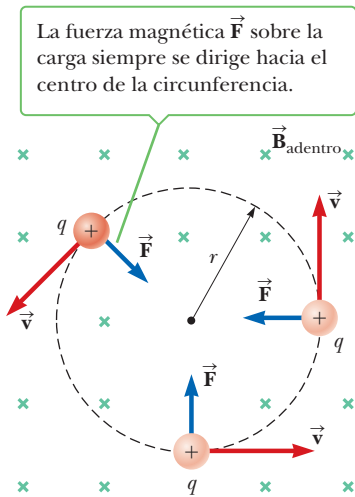
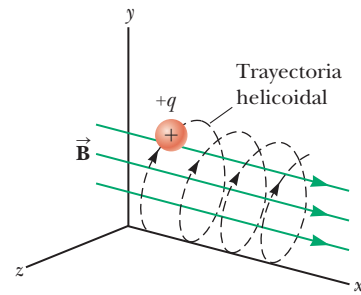


Figura activa 19.19

Cuando la velocidad de una partícula cargada es perpendicular a un campo magnético uniforme, la partícula se mueve en una circunferencia cuyo plano es perpendicular a \vec{B} , que se dirige hacia la página. (Las cruces representan las colas de los vectores de campo magnético.)

Figura activa 19.20

Una partícula cargada que tiene una velocidad dirigida en un ángulo con un campo magnético uniforme se mueve en una trayectoria helicoidal.



que \vec{F} produce la aceleración centrípeta, es posible igualar su magnitud, qvB en este caso, con la masa de la partícula multiplicada por la aceleración centrípeta v^2/r . A partir de la segunda ley de Newton, se encuentra que

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

lo que produce

$$r = \frac{mv}{qB}$$

[19.10]

Esta ecuación dice que el radio de la trayectoria es proporcional a la cantidad de movimiento mv de la partícula y es inversamente proporcional a la carga y el campo magnético. La ecuación 19.10 con frecuencia se llama *ecuación de ciclotrón*, porque se usa en el diseño de estos instrumentos (popularmente conocidos como destrozadores de átomos).

Si la dirección inicial de la velocidad de la partícula cargada no es perpendicular al campo magnético, como se muestra en la figura activa 19.20, la trayectoria que sigue la partícula es una espiral (llamada hélice) a lo largo de las líneas del campo magnético.

■ FÍSICA APLICADA 19.3 Captura de cargas

Almacenar partículas cargadas es importante para varias aplicaciones. Suponga que en una región finita del espacio existe un campo magnético uniforme. ¿Es posible inyectar desde el exterior una partícula cargada en esta región y que quede atrapada en la región sólo mediante fuerza magnética?

EXPLICACIÓN Es mejor considerar por separado las componentes de velocidad de la partícula paralela y perpendicular a las líneas de campo en la región. No existe fuerza magnética sobre la partícula asociada con la componente de velocidad paralela a las líneas de campo, de modo que la componente de velocidad permanece invariable.

Ahora considere la componente de velocidad perpendicular a las líneas de campo. Esta componente resultará en una fuerza magnética que es perpendicular tanto a las líneas de campo como a la componente de velocidad en sí. La trayectoria de una partícula para la cual la fuerza siempre es perpendicular a la velocidad es una circunferencia. Por lo tanto, la partícula sigue un arco circular y sale del campo en el otro lado de la circunferencia, como se muestra en la figura 19.21 para una partícula con energía cinética constante. Por otra parte, una partícula puede quedar atrapada si pierde algo de energía cinética en una colisión después de entrar al campo.

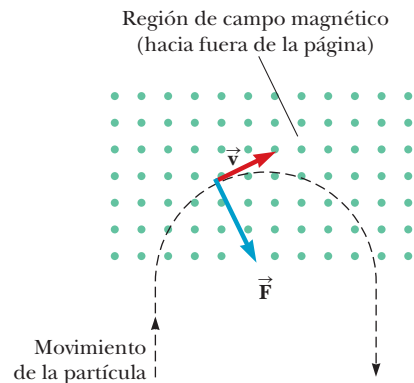


Figura 19.21 (Física aplicada 19.3)

Las partículas *pueden* inyectarse y quedar contenidas si, además del campo magnético, se involucran campos electrostáticos. Estos campos se usan en la *trampa de Penning*. Con estos dispositivos, es posible almacenar partículas cargadas durante largos periodos. Tales trampas son útiles, por ejemplo, en el almacenamiento de antimateria, que se desintegran por completo en contacto con la materia ordinaria. ■

■ Examen rápido

19.4 Conforme una partícula cargada se mueve libremente en una trayectoria circular en presencia de un campo magnético constante aplicado perpendicular a la velocidad de la partícula, la energía de la partícula a) permanece constante, b) aumenta o c) disminuye.

■ EJEMPLO 19.5 El espectrómetro de masas: identificación de partículas

OBJETIVO Usar la ecuación del ciclotrón para identificar una partícula.

PROBLEMA Una partícula cargada entra al campo magnético de un espectrómetro de masas con una velocidad de 1.79×10^6 m/s. Posteriormente se mueve en una órbita circular con un radio de 16.0 cm en un campo magnético uniforme de 0.350 T de magnitud que tiene una dirección perpendicular a la velocidad de la partícula. Encuentre la razón masa a carga de la partícula e identifíquela con base en la tabla de abajo.

ESTRATEGIA Después de encontrar la razón masa a carga con la ecuación 19.10, compárela con los valores en la tabla e identifique la partícula.

SOLUCIÓN

Escriba la ecuación del ciclotrón:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Resuelva esta ecuación para la masa dividida por la carga, m/q , y sustituya valores:

$$\frac{m}{q} = \frac{rB}{v} = \frac{(0.160 \text{ m})(0.350 \text{ T})}{1.79 \times 10^6 \text{ m/s}} = 3.13 \times 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{C}}$$

Identifique la partícula en la tabla. Todas las partículas están completamente ionizadas.

Núcleo	m (kg)	q (C)	m/q (kg/C)
Hidrógeno	1.67×10^{-27}	1.60×10^{-19}	1.04×10^{-8}
Deuterio	3.35×10^{-27}	1.60×10^{-19}	2.09×10^{-8}
Tritio	5.01×10^{-27}	1.60×10^{-19}	3.13×10^{-8}
Helio-3	5.01×10^{-27}	3.20×10^{-19}	1.57×10^{-8}

La partícula es **tritio**.

COMENTARIOS El espectrómetro de masas es una importante herramienta tanto en química como en física. Los químicos desconocidos se pueden calentar y ionizar y las partículas resultantes pasan a través del espectrómetro de masas y posteriormente se identifican.

PREGUNTA 19.5 ¿Qué ocurre con la cantidad de movimiento de una partícula cargada en un campo magnético uniforme?

EJERCICIO 19.5 Suponga que una segunda partícula cargada entra al espectrómetro de masas con la misma rapidez que la partícula del ejemplo 19.5. Si viaja en una circunferencia de 10.7 cm de radio, encuentre la razón masa a carga e identifique la partícula en la tabla anterior.

RESPUESTAS 2.09×10^{-8} kg/C; deuterio

■ EJEMPLO 19.6 El espectrómetro de masas: separación de isótopos

OBJETIVO Aplicar la ecuación del ciclotrón al proceso de separación de isótopos.

PROBLEMA Dos átomos individualmente ionizados se mueven afuera de una rendija en el punto S de la figura 19.22 y hacia un campo magnético de 0.100 T de magnitud que apunta hacia la página. Cada uno tiene una velocidad de 1.00×10^6 m/s. El núcleo del primer átomo contiene un protón y tiene una masa de 1.67×10^{-27} kg, mientras que el núcleo del segundo átomo contiene un protón y un neutrón y tiene una masa de 3.34×10^{-27} kg. Los átomos con el mismo número de protones en el núcleo pero diferentes masas se llaman isótopos. Los dos isótopos aquí son hidrógeno y deuterio. Encuentre su distancia de separación cuando golpean una placa fotográfica en P .

APLICACIÓN

Espectrómetros de masas

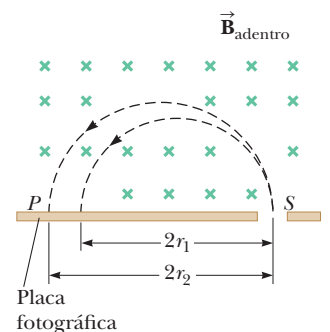


Figura 19.22 (Ejemplo 19.6) Dos isótopos dejan la rendija en el punto S y viajan en diferentes trayectorias circulares antes de golpear una placa fotográfica en P .

(continúa)

ESTRATEGIA Aplique la ecuación del ciclotrón a cada átomo y encuentre el radio de la trayectoria de cada uno. Duplique los radios para determinar los diámetros de trayectoria y luego encuentre su diferencia.

SOLUCIÓN

Use la ecuación 19.10 para encontrar el radio de la trayectoria circular que sigue el isótopo más ligero, hidrógeno:

$$r_1 = \frac{m_1 v}{qB} = \frac{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(1.00 \times 10^6 \text{ m/s})}{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(0.100 \text{ T})} = 0.104 \text{ m}$$

Use la misma ecuación para calcular el radio de la trayectoria de deuterio, el isótopo más pesado:

$$r_2 = \frac{m_2 v}{qB} = \frac{(3.34 \times 10^{-27} \text{ kg})(1.00 \times 10^6 \text{ m/s})}{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(0.100 \text{ T})} = 0.209 \text{ m}$$

Multiplique los radios por 2 para encontrar los diámetros y tomar la diferencia, con lo que se obtiene la separación x entre los isótopos:

$$x = 2r_2 - 2r_1 = 0.210 \text{ m}$$

COMENTARIOS Durante la Segunda Guerra Mundial, los espectrómetros de masas se usaron para separar el isótopo radiactivo del uranio U-235 de su isótopo mucho más común, U-238.

PREGUNTA 19.6 Estime el radio de la circunferencia que traza un átomo de plomo individualmente ionizado que se mueve con la misma velocidad.

EJERCICIO 19.6 Use el mismo espectrómetro de masas del ejemplo 19.6 para encontrar la separación entre dos isótopos de helio: el helio-4 normal, que tiene un núcleo que consiste en dos protones y dos neutrones, y el helio-3, que tiene dos protones y un solo neutrón. Suponga que ambos núcleos, doblemente ionizados (con carga de $2e = 3.20 \times 10^{-19} \text{ C}$), entran al campo en $1.00 \times 10^6 \text{ m/s}$. El núcleo de helio-4 tiene una masa de $6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$, y el núcleo de helio-3 tiene una masa de $5.01 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

RESPUESTA 0.102 m

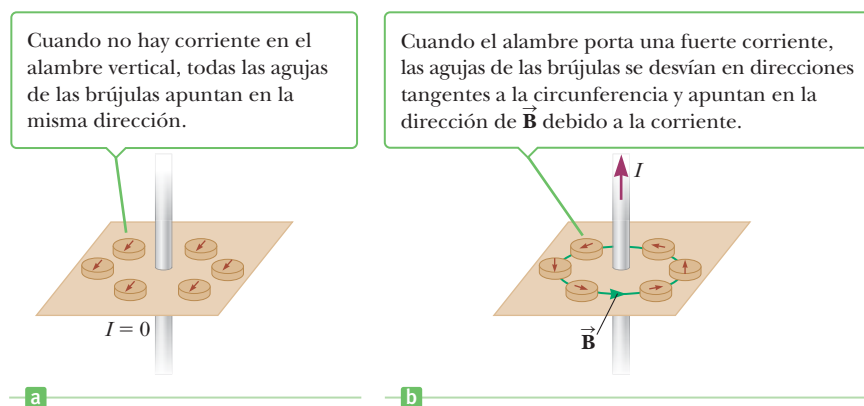
19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère

Durante una conferencia de demostración en 1819, el científico danés Hans Oersted (1777-1851) descubrió que una corriente eléctrica en un alambre desviaba la aguja de una brújula cercana. Este descubrimiento momentáneo, que ligaba un campo magnético con una corriente eléctrica por primera vez, fue el comienzo de la comprensión del origen del magnetismo.

Un experimento simple que realizó por primera vez Oersted en 1820 demuestra claramente que un conductor portador de corriente produce un campo magnético. En este experimento, muchas brújulas se colocaron en un plano horizontal cerca de un largo alambre vertical, como en la figura activa 19.23a. Cuando no había corriente en el alambre, todas

Figura activa 19.23

a), b) Brújulas que muestran los efectos de la corriente en la cercanía de un alambre.



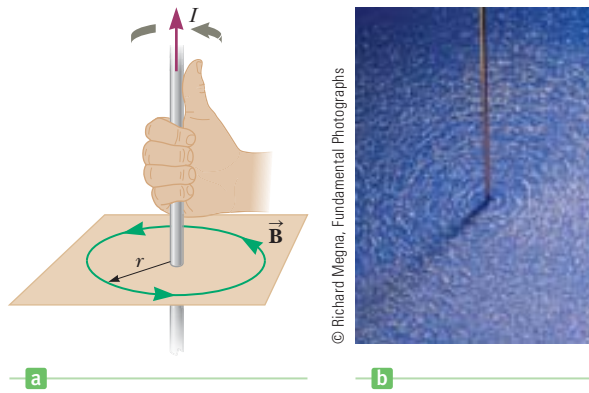


Figura 19.24 a) Regla de la mano derecha número 2 para determinar la dirección del campo magnético debido a un alambre largo recto que porta una corriente. Observe que las líneas del campo magnético forman circunferencias alrededor del alambre. b) Líneas de campo magnético circular que rodean un alambre portador de corriente, que se muestran mediante las limaduras de hierro.

las agujas apuntaban en la misma dirección (la del campo de la Tierra), como uno esperaría. Sin embargo, cuando el alambre porta una fuerte corriente estacionaria, las agujas se desvían en direcciones tangentes a la circunferencia, como en la figura activa 19.23b. Estas observaciones muestran que la dirección de \vec{B} es consistente con la siguiente regla conveniente, la **regla de la mano derecha número 2**:

Apunte el pulgar de su mano derecha a lo largo del alambre en la dirección de corriente positiva, como en la figura 19.24a. Entonces sus dedos se enrollan de manera natural en la dirección del campo magnético \vec{B} .

Cuando la corriente se invierte, las limaduras en la figura 19.24b también se invierten.

Puesto que las limaduras apuntan en la dirección de \vec{B} , concluimos que las líneas de \vec{B} forman circunferencias en torno al alambre. Por simetría, la magnitud de \vec{B} es la misma en todas partes sobre una trayectoria circular con centro en el alambre y que yace en un plano perpendicular al alambre. Al variar la corriente y la distancia desde el alambre, se puede determinar experimentalmente que \vec{B} es proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la distancia desde el alambre. Estas observaciones condujeron a una expresión matemática para la intensidad del campo magnético debido a la corriente I en un largo alambre recto:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [19.11]$$

La constante de proporcionalidad μ_0 , llamada **permeabilidad del espacio libre**, tiene el valor

$$\mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A} \quad [19.12]$$

Ley de Ampère y un alambre largo recto

La ecuación 19.11 le permite calcular el campo magnético debido a un alambre largo recto que porta una corriente. Un procedimiento general para deducir tales ecuaciones lo propuso el científico francés André-Marie Ampère (1775-1836); proporciona una relación entre la corriente en un alambre con forma arbitraria y el campo magnético producido por el alambre.

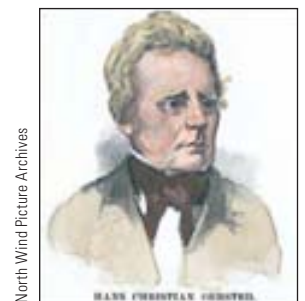
Considere una trayectoria cerrada arbitraria que rodea una corriente, como en la figura 19.25 (página 666). La trayectoria consiste en muchos segmentos cortos, cada uno de longitud $\Delta\ell$. Multiplique una de dichas longitudes por el componente del campo magnético paralelo a dicho segmento, donde el producto se marca $B_{\parallel} \Delta\ell$. De acuerdo con Ampère, la suma de todos esos productos sobre la trayectoria cerrada es igual a μ_0 por la corriente neta I que pasa a través de la superficie acotada por la trayectoria cerrada. Este enunciado, conocido como **ley de circuito de Ampère**, se puede escribir

$$\sum B_{\parallel} \Delta\ell = \mu_0 I \quad [19.13]$$

Tip 19.3 ¡Levante su mano derecha!

En este capítulo se introdujeron dos reglas de la mano derecha. Asegúrese de usar *sólo* su mano derecha cuando aplique estas reglas.

◀ Campo magnético debido a un largo alambre recto



Hans Christian Ørsted Físico y químico danés (1777-1851)

Ørsted es reconocido por observar que la aguja de una brújula se desvía cuando se coloca cerca de un alambre que porta una corriente. Este importante descubrimiento fue la primera evidencia de la conexión entre fenómenos eléctricos y magnéticos. Ørsted también fue el primero en preparar aluminio puro.

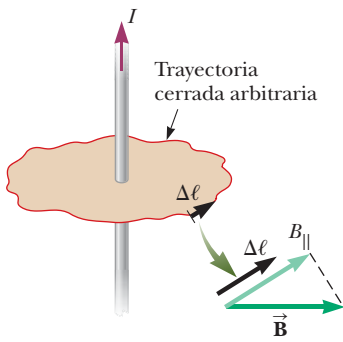
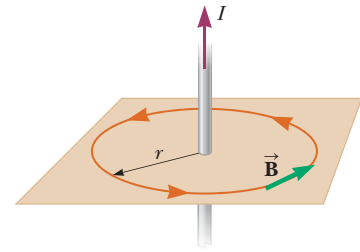


Figura 19.25 Para calcular el campo magnético de la corriente con la regla de Ampère, se usa una trayectoria cerrada arbitraria alrededor de una corriente.

Figura 19.26 Para calcular el campo magnético que establece un alambre se usa una trayectoria circular cerrada, de radio r , en torno a un largo alambre recto portador de corriente.



donde B_{\parallel} es la componente de \vec{B} paralela al segmento de longitud $\Delta\ell$ y $\sum B_{\parallel} \Delta\ell$, significa que se toma la suma sobre todos los productos $B_{\parallel} \Delta\ell$, alrededor de la trayectoria cerrada. La ley de Ampère es la ley fundamental que describe cómo las corrientes eléctricas crean campos magnéticos en el espacio vacío circundante.

Podemos usar la ley de circuito de Ampère para deducir el campo magnético debido a un largo alambre recto que porta una corriente I . Como se analizó anteriormente, cada una de las líneas de campo magnético de esta configuración forma una circunferencia con el alambre en su centro. El campo magnético es tangente a esta circunferencia en todo punto y su magnitud tiene el mismo valor B sobre toda la circunferencia de un círculo de radio r , de modo que $B_{\parallel} = B$, como se muestra en la figura 19.26. Al calcular la suma $\sum B_{\parallel} \Delta\ell$, sobre la trayectoria circular, observe que B_{\parallel} se puede quitar de la suma (porque tiene el mismo valor B para cada elemento en la circunferencia). La ecuación 19.13 produce entonces

$$\sum B_{\parallel} \Delta\ell = B_{\parallel} \sum \Delta\ell = B(2\pi r) = \mu_0 I$$

Al dividir ambos lados entre la circunferencia $2\pi r$, se obtiene

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Este resultado es idéntico a la ecuación 19.11, que es el campo magnético debido a la corriente I en un alambre largo recto.

La ley del circuito de Ampère proporciona un método elegante y simple para calcular los campos magnéticos de configuraciones de corriente enormemente simétricas, pero no se puede usar fácilmente para calcular campos magnéticos para configuraciones de corriente complejas que carecen de simetría. Además, la ley del circuito de Ampère en esta forma sólo es válida cuando las corrientes y campos no cambian con el tiempo.



Leonard de Selva/CORBIS

André-Marie Ampère (1775-1836)

Ampère, francés, se le acredita el descubrimiento del electromagnetismo, la relación entre corrientes eléctricas y campos magnéticos.

EJEMPLO 19.7 Campo magnético de un cable coaxial

OBJETIVO Usar la ley de Ampère para calcular el campo magnético para corrientes cilíndricas y simétricas.

PROBLEMA Un cable coaxial consta de un cable aislado de conducción de corriente $I_1 = 3.00$ A rodeado por un conductor cilíndrico de conducción de corriente $I_2 = 1.00$ A en la dirección opuesta, como en la figura 19.27. **a)** Calcule el campo magnético en el interior del conductor cilíndrico en $r_{\text{int}} = 0.500$ cm. **b)** Calcule el campo magnético fuera del conductor cilíndrico en $r_{\text{ext}} = 1.50$ cm.

ESTRATEGIA Construya una trayectoria circular alrededor del alambre interior, como en la figura 19.27. Sólo la corriente dentro de esa circunferencia contribuye al campo magnético B_{int} en puntos de la circunferencia. Para calcular el campo magnético exterior B_{ext} en el cilindro, construya una trayectoria circular fuera del cilindro. Ahora ambas corrientes deben ser incluidas en el cálculo, pero la corriente que va hacia abajo de la página se debe restar de la corriente en el cable.

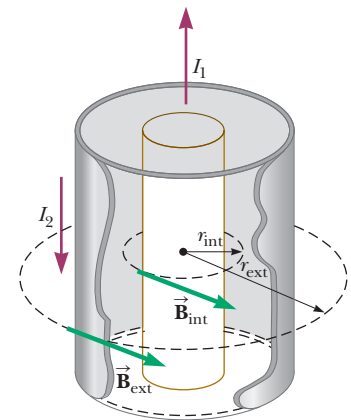


Figura 19.27 (Ejemplo 19.7)

SOLUCIÓN

a) Calcule el campo magnético B_{int} dentro del conductor cilíndrico en $r_{\text{int}} = 0.500$ cm.

Escriba la ley de Ampère:

El campo magnético es constante en la trayectoria dada y la longitud total de esta es $2\pi r_{\text{int}}$:

Despeje B_{int} y sustituya valores:

$$\begin{aligned} \sum B_{\parallel} \Delta \ell &= \mu_0 I \\ B_{\text{int}}(2\pi r_{\text{int}}) &= \mu_0 I_1 \\ B_{\text{int}} &= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_{\text{int}}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(3.00 \text{ A})}{2\pi(0.005 \text{ m})} \\ &= 1.20 \times 10^{-4} \text{ T} \end{aligned}$$

b) Calcule el campo magnético B_{ext} fuera del conductor cilíndrico en $r_{\text{ext}} = 1.50$ cm.

Escriba la ley de Ampère:

El campo magnético de nuevo es constante en la trayectoria dada y la longitud total de esta es $2\pi r_{\text{ext}}$:

Despeje B_{ext} y sustituya valores:

$$\begin{aligned} \sum B_{\parallel} \Delta \ell &= \mu_0 I \\ B_{\text{ext}}(2\pi r_{\text{ext}}) &= \mu_0(I_1 - I_2) \\ B_{\text{ext}} &= \frac{\mu_0(I_1 - I_2)}{2\pi r_{\text{ext}}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(3.00 \text{ A} - 1.00 \text{ A})}{2\pi(0.015 \text{ m})} \\ &= 2.67 \times 10^{-5} \text{ T} \end{aligned}$$

COMENTARIOS La dirección del campo, tanto dentro como fuera del cilindro está dado por la regla de la mano derecha o en sentido contrario a las manecillas del reloj en la perspectiva de la figura 19.27. Los cables coaxiales se pueden utilizar para minimizar los efectos magnéticos de la corriente, siempre que las corrientes en el interior del alambre y el cilindro sean iguales en magnitud y opuestas en dirección.

PREGUNTA 19.7 ¿En qué dirección está la fuerza magnética sobre un protón viajando hacia arriba de la página a) a la derecha del cable? b) ¿En el lado izquierdo?

EJERCICIO 19.7 Supongamos que la corriente en el cable es de 4.00 A hacia abajo y la corriente en el conductor cilíndrico es de 5.00 A hacia arriba. Encuentre la magnitud del campo magnético a) en el interior del cable en $r_{\text{int}} = 0.25$ cm y b) fuera del cable en $r_{\text{ext}} = 1.25$ cm.

RESPUESTAS a) 3.20×10^{24} T b) 1.60×10^{25} T

19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos

Como hemos visto, una fuerza magnética actúa sobre un conductor portador de corriente cuando el conductor se coloca en un campo magnético externo. Puesto que un conductor que porta corriente crea un campo magnético alrededor suyo, es fácil comprender que dos alambres portadores de corriente colocados juntos ejercen fuerzas magnéticas uno sobre otro. Considera dos alambres largos paralelos rectos separados por la distancia d y que portan las corrientes I_1 e I_2 en la misma dirección, como se muestra en la figura activa 19.28. El alambre 1 está directamente arriba del alambre 2. ¿Cuál es la fuerza magnética sobre un alambre a causa de un campo magnético que establece el otro alambre?

En este cálculo se encuentra la fuerza sobre el alambre 1 debida al campo magnético del alambre 2. La corriente I_2 establece el campo magnético \vec{B}_2 en el alambre 1. La dirección de \vec{B}_2 es perpendicular al alambre, como se muestra en la figura. Al usar la ecuación 19.11, se encuentra que la magnitud de este campo magnético es

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

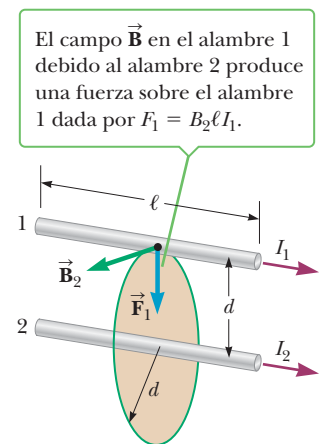


Figura activa 19.28

Dos alambres paralelos, orientados verticalmente, portan corrientes estacionarias y ejercen fuerzas uno sobre el otro. La fuerza es atractiva si las corrientes tienen la misma dirección, como se muestra y repulsiva si las dos corrientes tienen direcciones opuestas.

De acuerdo con la ecuación 19.5, la magnitud de la fuerza magnética sobre el alambre 1 en presencia del campo \vec{B}_2 debido a I_2 es

$$F_1 = B_2 I_1 \ell = \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} \right) I_1 \ell = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi d}$$

Esta relación se puede reescribir en términos de la fuerza por unidad de longitud:

$$\frac{F_1}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \quad [19.14]$$

La dirección de \vec{F}_1 es hacia abajo, hacia el alambre 2, como se indica mediante la regla de la mano derecha número 1. Este cálculo es completamente simétrico, lo que significa que la fuerza \vec{F}_2 sobre el alambre 2 es igual y opuesta a \vec{F}_1 , como se espera a partir de la tercera ley de Newton, de acción-reacción.

Demostramos que los conductores paralelos que portan corrientes en la misma dirección *se atraen* mutuamente. Debe usar el planteamiento que se indica en la figura activa 19.28 y los pasos que condujeron a la ecuación 19.14 para demostrar que los conductores paralelos portadores de corriente en direcciones opuestas *se repelen* mutuamente.

La fuerza entre dos alambres paralelos que portan corriente se usa para definir la unidad SI de corriente, el **ampere** (A), del modo siguiente:

Definición de ampere ▶

Si dos alambres largos paralelos, separados 1 m, portan la misma corriente y la fuerza magnética por unidad de longitud sobre cada alambre es 2×10^{-7} N/m, la corriente se define como 1 A.

La unidad SI de carga, el **coulomb** (C), ahora se puede definir en términos del ampere del modo siguiente:

Definición de coulomb ▶

Si un conductor porta una corriente estacionaria de 1 A, la cantidad de carga que fluye a través de cualquier sección transversal en 1 s es 1 C.

■ **Examen rápido**

19.5 ¿Cuál de las siguientes acciones duplicaría la magnitud de la fuerza magnética por unidad de longitud entre dos alambres paralelos portadores de corriente? Elija todas las respuestas correctas. a) Duplicar una de las corrientes. b) Duplicar la distancia entre ellos. c) Reducir a la mitad la distancia entre ellos. d) Duplicar ambas corrientes.

19.6 Si, en la figura 19.28, $I_1 = 2$ A e $I_2 = 6$ A, ¿cuál de las siguientes es cierta? a) $F_1 = 3F_2$ b) $F_1 = F_2$ c) $F_1 = F_2/3$

■ **EJEMPLO 19.8** Levitación de un alambre

OBJETIVO Calcular la fuerza magnética de un alambre portador de corriente sobre un alambre paralelo portador de corriente.

PROBLEMA Dos alambres, cada uno con un peso por unidad de longitud de 1.00×10^{-4} N/m, son paralelos con uno directamente sobre el otro. Suponga que los alambres portan corrientes que son iguales en magnitud y opuestas en dirección. Los alambres están separados 0.10 m y la suma de la fuerza magnética y la fuerza gravitacional sobre el alambre superior es cero. Determine la corriente en los alambres. (Desprecie el campo magnético de la Tierra.)

ESTRATEGIA El alambre superior debe estar en equilibrio bajo las fuerzas de repulsión magnética y gravedad. Iguale a cero la suma de las fuerzas y resuelva para la corriente desconocida, I .

SOLUCIÓN

Igualé a cero la suma de las fuerzas y sustituya las expresiones apropiadas. Observe que la fuerza magnética entre los alambres es repulsiva.

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{grav}} + \vec{F}_{\text{mag}} &= 0 \\ -mg + \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \ell &= 0 \end{aligned}$$

Las corrientes son iguales, de modo que $I_1 = I_2 = I$. Realice estas sustituciones y resuelva para I^2 :

$$\frac{\mu_0 I^2}{2\pi d} \ell = mg \rightarrow I^2 = \frac{(2\pi d)(mg/\ell)}{\mu_0}$$

Sustituya los valores dados, encuentre I^2 , luego obtenga la raíz cuadrada. Observe que el peso por unidad de longitud, mg/ℓ , está dado.

$$I^2 = \frac{(2\pi \cdot 0.100 \text{ m})(1.00 \times 10^{-4} \text{ N/m})}{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m})} = 50.0 \text{ A}^2$$

$$I = 7.07 \text{ A}$$

COMENTARIOS El ejercicio 19.3 demostró que usar el campo magnético de la Tierra para levantar un alambre requería corrientes extremadamente grandes. Las corrientes en los alambres pueden crear campos magnéticos mucho más intensos que el campo magnético de la Tierra en regiones cercanas al alambre.

PREGUNTA 19.8 ¿Por qué no se pueden construir automóviles que puedan levantar magnéticamente en el campo magnético de la Tierra?

EJERCICIO 19.8 Si se duplica la corriente en cada alambre, ¿cuán separados se deben colocar los alambres si las magnitudes de las fuerzas gravitacional y magnética sobre el alambre superior deben ser iguales?

RESPUESTA 0.400 m

19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides

La intensidad del campo magnético que establece un trozo de alambre que porta una corriente se puede mejorar en una ubicación específica si al alambre se le da forma de espira. Puede comprender esto al considerar el efecto de muchos pequeños segmentos de la espira de corriente, como en la figura 19.29. El pequeño segmento en la parte superior de la espira, marcado Δx_1 , produce un campo magnético de magnitud B_1 en el centro de la espira, dirigido afuera de la página. La dirección de \vec{B} se puede verificar usando la regla de la mano derecha número 2 para un alambre largo recto. Imagine sostener el alambre con su mano derecha, con su pulgar apuntando en la dirección de la corriente. Entonces sus dedos se enrollan en torno a la dirección de \vec{B} .

Un segmento de longitud Δx_2 en el fondo de la espira también contribuye al campo en el centro, lo que aumenta su intensidad. El campo producido en el centro por el segmento Δx_2 tiene la misma magnitud que B_1 y también se dirige afuera de la página. De igual modo, todos los demás segmentos de la espira de corriente contribuyen al campo. El efecto neto es un campo magnético para la espira de corriente como se muestra en la figura 19.30a.

Observe en la figura 19.30a que las líneas del campo magnético entran en el fondo de la espira de corriente y salen en la parte superior. Compare esa figura con la figura 19.30b, que ilustra el campo de un imán de barra. Los dos campos son similares. Un lado de la espira actúa como si estuviera en el polo norte de un imán y el otro actúa como un polo sur. La similitud de estos dos campos se usará para estudiar el magnetismo en la materia en una sección posterior.

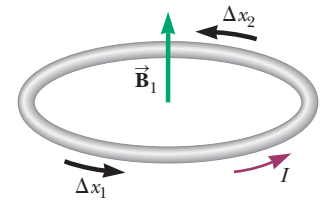


Figura 19.29 Todos los segmentos de la espira de corriente producen un campo magnético en el centro de la espira, dirigido afuera de la página.

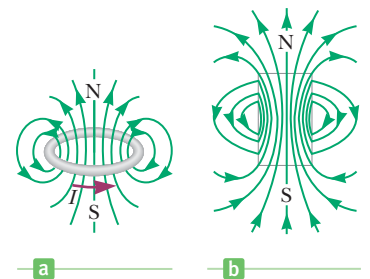


Figura 19.30 a) Líneas de campo magnético para una espira de corriente. Observe que las líneas se parecen a las de un imán de barra. b) El campo magnético de un imán de barra es similar al de una espira de corriente. c) Líneas de campo de una espira de corriente, que se muestran mediante limaduras de hierro.

■ FÍSICA APLICADA 19.4 Alambres trenzados

En los circuitos eléctricos con frecuencia se da el caso de que alambres aislados portadores de corriente en direcciones opuestas se enrollan entre ellos. ¿Cuál es la ventaja de hacer esto?

EXPLICACIÓN Si los alambres no se trenzan juntos, la combinación de los dos alambres forma una espira de corriente,

que produce un campo magnético relativamente fuerte. Este campo magnético generado por la espira podría ser suficientemente intenso para afectar a circuitos o componentes adyacentes. Cuando los alambres se trenzan juntos, sus campos magnéticos tienden a cancelarse. ■

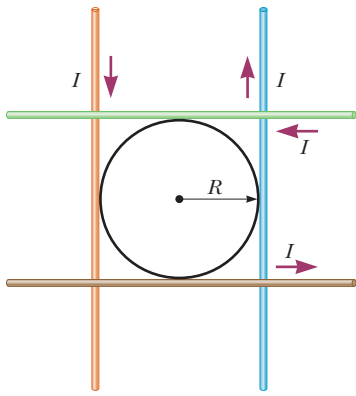


Figura 19.31 El campo de una espira circular portadora de corriente I se puede aproximar mediante el campo debido a cuatro alambres rectos, donde cada uno porta corriente I .

La magnitud del campo magnético en el centro de una espira circular que porta corriente I como en la figura 19.30a está dada por

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Esta ecuación se debe deducir con cálculo. Sin embargo, se puede demostrar que es razonable al calcular el campo en el centro de cuatro alambres largos portadores cada uno de corriente I y que forman un cuadrado, como en la figura 19.31, con una circunferencia de radio R inscrito dentro de él. Intuitivamente, este arreglo debe proporcionar un campo magnético en el centro que es similar en magnitud al campo producido por la espira circular. La corriente en el alambre circular está más cerca del centro, de modo que el alambre tendría un campo magnético un poco más intenso que sólo los cuatro lados del rectángulo, pero las longitudes de los alambres rectos más allá del rectángulo lo compensan. Cada alambre contribuye al mismo campo magnético en el centro exacto, de modo que el campo total está dado por

$$B = 4 \times \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\mu_0 I}{2R} \right) = (1.27) \left(\frac{\mu_0 I}{2R} \right)$$

Este resultado es *aproximadamente* el mismo que el campo producido por la espira circular de corriente.

Cuando la bobina tiene N espiras, y cada una porta corriente I , el campo magnético en el centro está dado por

$$B = N \frac{\mu_0 I}{2R} \quad [19.15]$$

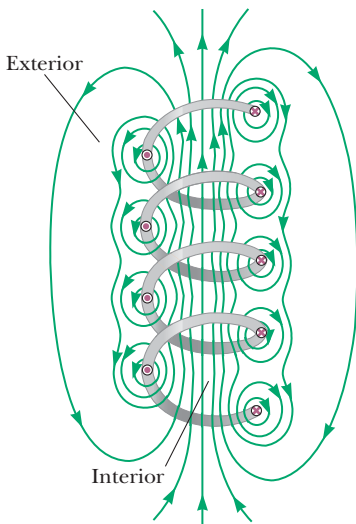


Figura 19.32 Líneas de campo magnético para un solenoide devanado con holgura.

Campo magnético de un solenoide

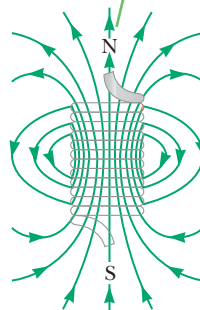
Si un alambre largo recto se dobla en una bobina de varias espiras cercanamente espaciadas, el dispositivo resultante es un **solenoid**, con frecuencia llamado **electroimán**. Este dispositivo es importante en muchas aplicaciones porque actúa como un imán sólo cuando porta una corriente. El campo magnético dentro de un solenoide aumenta con la corriente y es proporcional al número de espiras por unidad de longitud.

La figura 19.32 muestra las líneas de campo magnético de un solenoide devanado con holgura, de longitud ℓ y número total de vueltas N . Observe que las líneas de campo dentro del solenoide son casi paralelas, uniformemente espaciadas y muy juntas. Como resultado, el campo dentro del solenoide es fuerte y aproximadamente uniforme. El campo exterior a los lados del solenoide no es uniforme, mucho más débil que el campo interior y *opuesto en dirección* al campo dentro del solenoide.

Si las vueltas están muy juntas, las líneas de campo son como se muestra en la figura 19.33a, y entran en un extremo del solenoide y salen por el otro. Un extremo del solenoide

Figura 19.33 a) Líneas de campo magnético para un solenoide firmemente devanado de longitud finita que porta una corriente estacionaria. El campo dentro del solenoide es casi uniforme y fuerte. b) Patrón de campo magnético de un imán de barra, que se muestra mediante pequeñas limaduras de hierro sobre una hoja de papel.

Las líneas de campo recuerdan a las de un imán de barra, de modo que el solenoide efectivamente tiene polos norte y sur.



Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman

de actúa como polo norte y el otro extremo como polo sur. Si la longitud del solenoide es mucho mayor que su radio, las líneas que salen del extremo norte del solenoide se dispersan sobre una amplia región antes de regresar para entrar en el extremo sur. Mientras más separadas estén las líneas del campo, más débil será el campo. Esto contrasta con un campo mucho más intenso *dentro* del solenoide, donde las líneas están juntas. Además, el campo adentro de éste tiene una magnitud constante en todos los puntos lejos de sus extremos. Como se mostrará posteriormente, estas consideraciones permiten la aplicación de la ley de Ampère al solenoide, lo que da un resultado de

$$B = \mu_0 n I \quad [19.16]$$

para el campo dentro del solenoide, donde $n = N/\ell$ es el número de vueltas por unidad de longitud del solenoide.

Numerosos dispositivos crean haces de partículas cargadas con diferentes propósitos, y esas partículas son generalmente controladas y dirigidas por los campos electromagnéticos. Los antiguos televisores de rayos catódicos utilizaban imanes de dirección rápida y precisa, dirigen un haz de electrones a través de una pantalla de fósforo en un movimiento de barrido, creando la ilusión de una imagen en movimiento de una serie de puntos brillantes. (Ver figura 19.34.) Los microscopios electrónicos (ver figura 27.17b, página 924) usan un arma similar y lentes electrostáticas y electromagnéticas para enfocar el haz. Los aceleradores de partículas requieren electroimanes muy grandes para girar partículas moviéndose a casi la velocidad de la luz. Tokamaks, dispositivos experimentales utilizados en la investigación de energía de fusión, usan campos magnéticos para contener plasma caliente. La figura 19.35 es una fotografía de uno de esos dispositivos.

◀ Campo magnético dentro de un solenoide

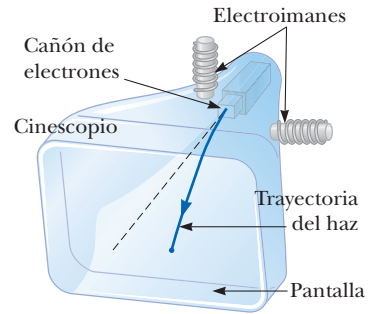


Figura 19.34 Los electroimanes se usan para desviar electrones hacia las posiciones deseadas sobre la pantalla de un cinescopio.

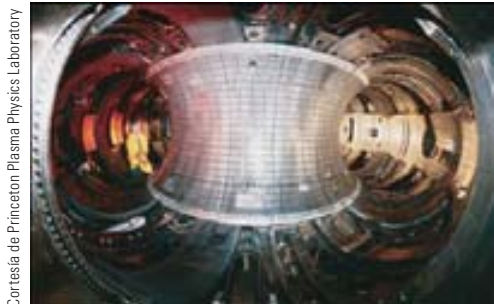


Figura 19.35 Vista interior del reactor experimental de fusión en Tokamak cerrado (TFTR) en el Princeton Plasma Physics Laboratory.

Cortesía de Princeton Plasma Physics Laboratory

■ EJEMPLO 19.9 Campo magnético dentro de un solenoide

OBJETIVO Calcular el campo magnético de un solenoide a partir de los datos y la cantidad de movimiento de una partícula cargada en este campo.

PROBLEMA Cierta solenoide consiste en 100 vueltas de alambre y tiene una longitud de 10.0 cm. **a)** Determine la magnitud del campo magnético dentro del solenoide cuando porta una corriente de 0.500 A. **b)** ¿Cuál es la cantidad de movimiento de un protón que orbita dentro del solenoide en una circunferencia con un radio de 0.020 m? El eje del solenoide es perpendicular al plano de la órbita. **c)** ¿Aproximadamente cuánto alambre se necesitaría para construir este solenoide? Suponga que el radio del solenoide es de 5.00 cm.

ESTRATEGIA En el inciso a) calcule el número de vueltas por metro y sustituya esto y la información dada en la ecuación 19.16, lo que produce la magnitud del campo magnético. El inciso b) es una aplicación de la segunda ley de Newton.

SOLUCIÓN

a) Determine la magnitud del campo magnético dentro del solenoide cuando porta una corriente de 0.500 A.

Calcule el número de vueltas por unidad de longitud:

$$n = \frac{N}{\ell} = \frac{100 \text{ vueltas}}{0.100 \text{ m}} = 1.00 \times 10^3 \text{ vueltas/m}$$

(continúa)

Sustituya n e I en la ecuación 19.16 para encontrar la magnitud del campo magnético:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 n I \\ &= (4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(1.00 \times 10^3 \text{ vueltas/m})(0.500 \text{ A}) \\ &= 6.28 \times 10^{-4} \text{ T} \end{aligned}$$

b) Determine la cantidad de movimiento de un protón que orbita en un círculo de radio 0.020 m cerca del centro del solenoide.

Escriba la segunda ley de Newton para el protón:

$$ma = F = qvB$$

Sustituya la aceleración centrípeta $a = v^2/r$:

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

Cancele un factor de v en ambos lados y multiplique por r , lo que produce la cantidad de movimiento mv :

$$\begin{aligned} mv &= r q B = (0.020 \text{ m})(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(6.28 \times 10^{-4} \text{ T}) \\ p &= mv = 2.01 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

c) ¿Aproximadamente cuánto alambre se necesitaría para construir este solenoide?

Multiplique el número de vueltas por la circunferencia de una espira:

$$\begin{aligned} \text{Longitud de alambre} &\approx (\text{número de vueltas})(2\pi r) \\ &= (1.00 \times 10^2 \text{ vueltas})(2\pi \cdot 0.050 \text{ m}) \\ &= 31.4 \text{ m} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Un electrón en el inciso b) tendría la misma cantidad de movimiento que el protón, pero una velocidad mucho mayor. También orbitaría en la dirección opuesta. La longitud de alambre en el inciso c) sólo es una estimación porque el alambre tiene cierto grosor, lo que aumenta ligeramente el tamaño de cada espira. Además, las espiras de alambre no son circunferencias perfectas porque se devanan lentamente a lo largo del solenoide.

PREGUNTA 19.9 ¿Qué ocurriría al protón en órbita si el solenoide se orientara verticalmente?

EJERCICIO 19.9 Suponga que tiene un tramo de 32.0 m de alambre de cobre. Si el alambre se enrolla en un solenoide de 0.240 m de largo y tiene un radio de 0.040 m, ¿cuán fuerte es el campo magnético resultante en su centro, cuando la corriente es 12.0 A?

RESPUESTA $8.00 \times 10^{-3} \text{ T}$

Ley de Ampère aplicada a un solenoide

Puede usar la ley de Ampère para obtener la expresión para el campo magnético dentro de un solenoide que porta una corriente I . En la figura 19.36 se muestra una sección transversal tomada a lo largo de la longitud de parte del solenoide. $\vec{\mathbf{B}}$ dentro del solenoide es uniforme y paralelo al eje, y $\vec{\mathbf{B}}$ afuera es aproximadamente cero. Considere una trayectoria rectangular de longitud L y ancho w , como se muestra en la figura. Puede aplicar la ley de Ampère a esta trayectoria al evaluar la suma de $B_{\parallel} \Delta \ell$, sobre cada lado del rectángulo. La contribución a lo largo del lado 3 claramente es cero porque $\vec{\mathbf{B}} = 0$ en esta región. Las aportaciones de los lados 2 y 4 son ambas cero porque $\vec{\mathbf{B}}$ es perpendicular a $\Delta \ell$ a lo largo de estas trayectorias. El lado 1 de la longitud L dan una aportación BL a la suma porque $\vec{\mathbf{B}}$ es uniforme a lo largo de esta trayectoria y paralelo a $\Delta \ell$. Por lo tanto, la suma sobre la trayectoria rectangular cerrada tiene el valor

$$\sum B_{\parallel} \Delta \ell = BL$$

El lado derecho de la ley de Ampère involucra la corriente total que pasa a través del área acotada por la trayectoria elegida. En este caso, la corriente total a través de la trayectoria

rectangular es igual a la corriente a través de cada vuelta del solenoide, multiplicada por el número de vueltas. Si N es el número de vueltas en la longitud L , entonces la corriente total a través de la trayectoria rectangular es igual a NI . En consecuencia, la ley de Ampère aplicada a esta trayectoria produce

$$\sum B_{\parallel} \Delta \ell = BL = \mu_0 NI$$

o

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 n I$$

donde $n = N/L$ es el número de vueltas por unidad de longitud.

19.10 Dominios magnéticos

El campo magnético producido por una corriente en una bobina de alambre da una pista acerca de qué puede provocar que ciertos materiales muestren fuertes propiedades magnéticas. Una sola bobina como la de la figura 19.30a tiene un polo norte y un polo sur, pero si esto es cierto para una bobina de alambre, debe también ser cierto para cualquier corriente confinada a una trayectoria circular. En particular, *un átomo individual debe actuar como un imán debido al movimiento de los electrones en torno al núcleo*. Cada electrón, con su carga de 1.6×10^{-19} C, da vueltas al átomo una vez en más o menos 10^{-16} s. Si dividimos la carga eléctrica entre este intervalo vemos que el electrón en órbita es equivalente a una corriente de 1.6×10^{-3} A. Tal corriente produce un campo magnético en el orden de 20 T en el centro de la trayectoria circular. A partir de esto observamos que se produciría un campo magnético muy intenso si muchos de estos imanes atómicos se pudieran alinear dentro de un material. Sin embargo, esto no ocurre porque el modelo simple que se describió no es toda la historia. Un análisis completo de la estructura atómica muestra que el campo magnético producido por un electrón en un átomo con frecuencia se cancela mediante un electrón que da vueltas en sentido opuesto en el mismo átomo. El resultado neto es que **el efecto magnético producido por los electrones que orbitan el núcleo es o cero o muy pequeño para la mayoría de los materiales**.

Las propiedades magnéticas de muchos materiales se pueden explicar por el hecho de que un electrón no sólo da vueltas en una órbita, sino que también gira sobre su eje como un trompo, con momento magnético de espín como se muestra (figura 19.37). (Esta descripción clásica no se debe tomar de manera literal. La propiedad de *espín* del electrón sólo se puede comprender en el contexto de la mecánica cuántica, que no se analizará aquí.) El electrón que gira sobre su eje representa una carga en movimiento que produce un campo magnético. El campo debido al giro sobre su eje por lo general es más intenso que el campo debido al movimiento orbital. En los átomos que contienen muchos electrones, éstos por lo general se acoplan con su espín mutuamente opuesto, de modo que sus campos se cancelan uno con otro. Es por esto que la mayoría de las sustancias no son imanes. Sin embargo, en ciertos materiales fuertemente magnéticos, como hierro, cobalto y níquel, los campos magnéticos producidos por el espín de los electrones no se cancelan por completo. Se dice que tales materiales son **ferromagnéticos**. En los materiales ferromagnéticos ocurre fuerte acoplamiento entre átomos vecinos, lo que forma grandes grupos de átomos con espines que se alinean. El tamaño de estos grupos, llamados **dominios**, por lo general varía de aproximadamente 10^{-4} a 0.1 cm. En una sustancia no magnetizada los dominios se orientan al azar, como se muestra en la figura 19.38a (página 674). Cuando se aplica un campo externo, como en las figuras 19.38b y 19.38c, el campo magnético de cada dominio tiende a un alineamiento más cercano con el campo externo, lo que resulta en magnetización.

En los que se llaman materiales magnéticos duros, los dominios permanecen alineados incluso después que se remueve el campo externo; el resultado es un **imán permanente**. En los materiales magnéticos blandos, como el hierro, una vez que se remueve el campo

La ley de Ampère aplicada a la trayectoria rectangular de rayas azules se puede usar entonces para calcular el campo dentro del solenoide.

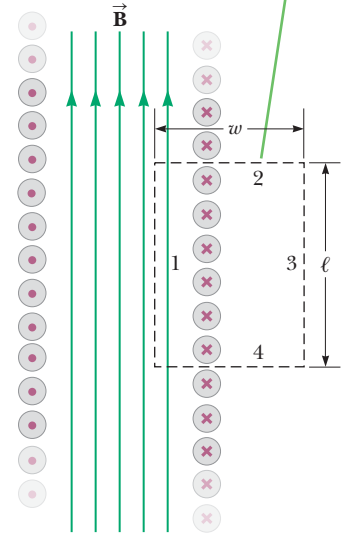


Figura 19.36 Sección transversal de un solenoide firmemente devanado. Si el solenoide es largo en relación con su radio, se puede suponer que el campo magnético interior es uniforme y que el campo afuera es cero.

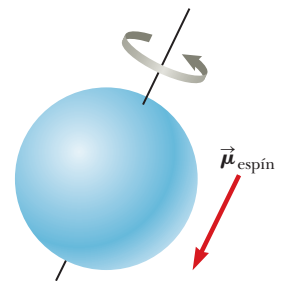


Figura 19.37 Modelo clásico del giro de un electrón.

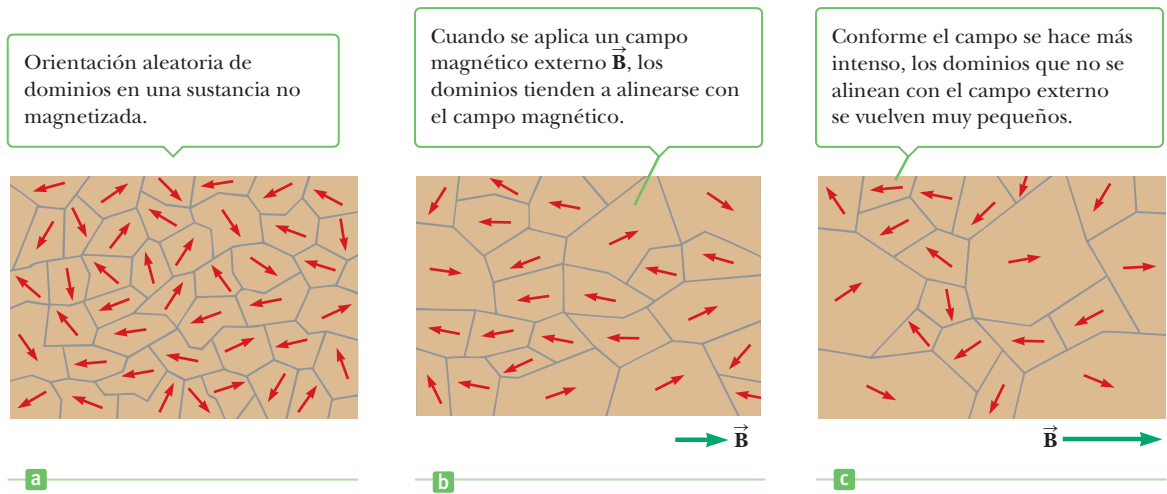


Figura 19.38 Orientación de los dipolos magnéticos antes y después de que se aplica un campo magnético a una sustancia ferromagnética.



© Cengage Learning/George Sample

Figura 19.39 El imán permanente (rojo) magnetiza temporalmente algunos sujetapapeles, que entonces escalan uno sobre otro mediante fuerzas magnéticas.

externo, la agitación térmica produce movimiento de los dominios y el material rápidamente regresa a un estado no magnetizado.

La alineación de dominios explica por qué la intensidad de un electroimán aumenta dramáticamente por la inserción de un núcleo de hierro en el centro del imán. El campo magnético producido por la corriente en las espiras hace que los dominios se alineen, lo que por ende produce un gran campo externo neto. El uso de hierro como núcleo también es ventajoso porque es un material magnético blando que pierde su magnetismo casi instantáneamente después que la corriente en las bobinas se apaga.

La formación de dominios en las sustancias ferromagnéticas también explica por qué tales sustancias son atraídas por los imanes permanentes. El campo magnético de un imán permanente realinea los dominios en un objeto ferromagnético de modo que el objeto queda temporalmente magnetizado. Entonces los polos del objeto son atraídos hacia los polos opuestos correspondientes del imán permanente. El objeto puede atraer de igual modo otros objetos ferromagnéticos, como se ilustra en la figura 19.39.

Tipos de materiales magnéticos

Los materiales magnéticos se pueden clasificar de acuerdo con su reacción a la aplicación de un campo magnético. En los materiales **ferromagnéticos** los átomos tienen momentos magnéticos permanentes que se alinean fácilmente con un campo magnético externo aplicado. Ejemplos de estos materiales son hierro, cobalto y níquel. Tales sustancias pueden retener algo de su magnetización incluso después que se remueve el campo magnético aplicado.

Los materiales **paramagnéticos** también tienen momentos magnéticos que tienden a alinearse con un campo magnético aplicado externo, pero la respuesta es extremadamente débil en comparación con la de los materiales ferromagnéticos. Ejemplos de sustancias paramagnéticas son aluminio, calcio y platino. Un material ferromagnético puede volverse paramagnético cuando se calienta a cierta temperatura crítica, la temperatura de Curie, que depende del material.

En los materiales **diamagnéticos**, un campo magnético externo aplicado induce una magnetización muy débil que es opuesta al campo aplicado. Usualmente el diamagnetismo no se observa porque los efectos paramagnéticos y ferromagnéticos son más intensos. Sin embargo, en la figura 19.40 un campo magnético muy alto ejerce una fuerza de levitación sobre las moléculas de agua diamagnéticas en una rana.

Tip 19.4 El electrón gira sobre su eje, ¡pero no lo hace!

Aun cuando se use la palabra *espín* (girar sobre su eje), el electrón, a diferencia con el trompo de un niño, físicamente no gira sobre su eje en este sentido. El electrón tiene una cantidad de movimiento angular intrínseca que hace que actúe *como si girase sobre su eje* pero el concepto de cantidad de movimiento angular de espín en realidad es un efecto cuántico relativista.

High Field Magnet Laboratory, University of Nijmegen, The Netherlands



Figura 19.40 Diamagnetismo. Una rana levita en un campo magnético de 16 T en el Nijmegen High Field Magnet Laboratory en Holanda. La fuerza de levitación se ejerce sobre las moléculas de agua diamagnéticas en el cuerpo de la rana. La rana no sufrió efectos dañinos por la experiencia de levitación.

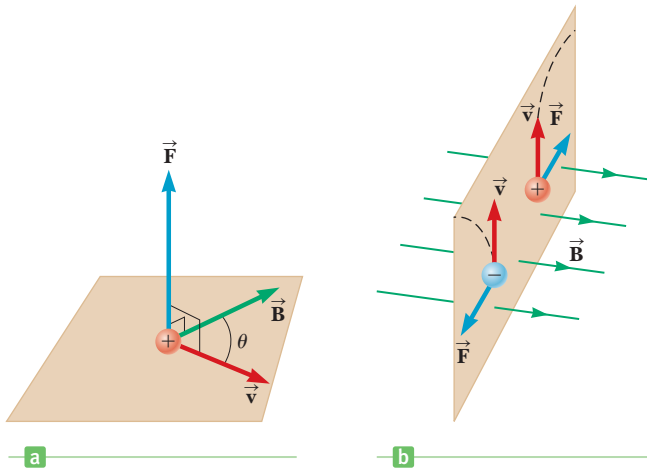
RESUMEN

19.3 Campos magnéticos

La **fuerza magnética** que actúa sobre una carga q que se mueve con velocidad \vec{v} en un campo magnético \vec{B} tiene magnitud

$$F = qvB \sin \theta \quad [19.1]$$

donde θ es el ángulo entre \vec{v} y \vec{B} .



a) La dirección de la fuerza magnética \vec{F} sobre una partícula cargada que se mueve con una velocidad \vec{v} en presencia de un campo magnético \vec{B} . La fuerza magnética es perpendicular a \vec{v} y \vec{B} . b) Las fuerzas magnéticas sobre cargas positivas y negativas. Las líneas punteadas muestran las trayectorias de las partículas, que se investigan en la sección 19.6. Las fuerzas magnéticas sobre las partículas con cargas opuestas se mueven a la misma velocidad en un campo magnético en direcciones opuestas.

Para encontrar la dirección de esta fuerza, use la **regla de la mano derecha número 1**: apunte los dedos de su mano derecha abierta en la dirección de \vec{v} y luego enróllelos en la dirección de \vec{B} . Entonces su pulgar apunta en la dirección de la fuerza magnética \vec{F} .

Si la carga es *negativa* en lugar de positiva, la fuerza se dirige de modo opuesto a la fuerza dada por la regla de la mano de derecha.

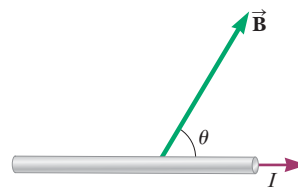
La unidad SI del campo magnético es el **tesla** (T), o weber por metro cuadrado (Wb/m^2). Una unidad adicional de uso común para el campo magnético es el **gauss** (G); $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$.

19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente

Si un conductor recto de longitud ℓ porta corriente I , la fuerza magnética sobre dicho conductor cuando se coloca en un campo magnético externo uniforme \vec{B} es

$$F = B\ell \sin \theta \quad [19.6]$$

donde θ es el ángulo entre la dirección de la corriente y la dirección del campo magnético.



La fuerza magnética sobre este conductor con corriente se dirige hacia arriba fuera de la página.

La regla de la mano derecha número 1 también proporciona la dirección de la fuerza magnética sobre el conductor. Sin embargo, en este caso, usted debe apuntar sus dedos en la dirección de la corriente en lugar de en la dirección de \vec{v} .

19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos

El torque τ sobre una espira de alambre portadora de corriente en un campo magnético \vec{B} tiene magnitud

$$\tau = BIA \sin \theta \quad [19.8]$$

donde I es la corriente en la espira y A es su área de sección transversal. La magnitud del momento magnético de una bobina portadora de corriente se define mediante $\mu = IAN$, donde N es el número de espiras. El momento magnético se considera un vector, $\vec{\mu}$, que es perpendicular al plano de la espira. El ángulo entre \vec{B} y $\vec{\mu}$ es θ .

19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético

Si una partícula cargada se mueve en un campo magnético uniforme de modo que su velocidad inicial es perpendicular

al campo, se moverá en una trayectoria circular en un plano perpendicular al campo magnético. El radio r de la trayectoria circular se puede encontrar a partir de la segunda ley de Newton y la aceleración centrípeta, y está dado por

$$r = \frac{mv}{qB} \quad [19.10]$$

donde m es la masa de la partícula y q su carga.

19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère

El campo magnético a una distancia r desde un **alambre largo recto** que porta corriente I tiene la magnitud

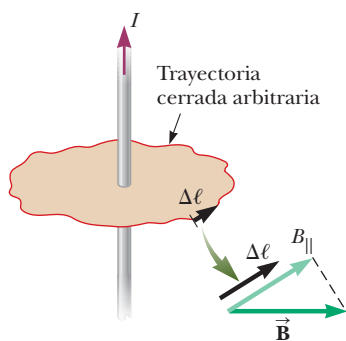
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [19.11]$$

donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ es la **permeabilidad del espacio libre**. Las líneas de campo magnético alrededor de un alambre largo recto son circunferencias concéntricas con el alambre.

La **ley de Ampère** se puede usar para encontrar el campo magnético alrededor de ciertos conductores simples portadores de corriente. Se puede escribir

$$\sum B_{\parallel} \Delta \ell = \mu_0 I \quad [19.13]$$

donde B_{\parallel} es la componente de \vec{B} tangente a un pequeño elemento de corriente de longitud $\Delta \ell$ que es parte de una trayectoria cerrada e I es la corriente total que penetra la trayectoria cerrada.



Una trayectoria cerrada arbitraria alrededor de una corriente se utiliza para calcular el campo magnético de la corriente por el uso de la regla de Ampère.

19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos

La fuerza por unidad de longitud sobre cada uno de dos alambres paralelos separados por la distancia d y que portan las corrientes I_1 e I_2 tiene la magnitud

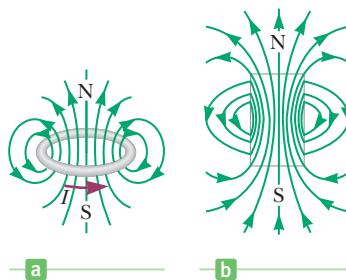
$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \quad [19.14]$$

Las fuerzas son atractivas si las corrientes están en la misma dirección y repulsiva si están en direcciones opuestas.

19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides

El campo magnético en el centro de una bobina de N espiras circulares de radio R , donde cada una porta corriente I , está dado por

$$B = N \frac{\mu_0 I}{2R} \quad [19.15]$$

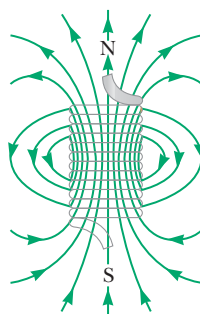


a) Las líneas del campo magnético de una espira de corriente. Tenga en cuenta que las líneas se asemejan a las de un imán de barra. b) El campo magnético de un imán de barra es similar al de una espira de corriente.

El campo magnético dentro de un solenoide tiene la magnitud

$$B = \mu_0 n I \quad [19.16]$$

donde $n = N/\ell$ es el número de vueltas de alambre por unidad de longitud.



Líneas del campo magnético de un solenoide de longitud finita por el que circula una corriente constante. El campo en el interior del solenoide es casi uniforme y fuerte. Observe que las líneas de campo se asemejan a las de un imán de barra, por lo que el solenoide efectivamente tiene polos norte y sur.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un alambre de 0.50 m de longitud porta una corriente de 0.10 A en la dirección x positiva, paralelo al suelo. Si el alambre tiene un peso de 1.0×10^{-2} N, ¿cuál es la magnitud mínima del campo magnético que ejerce una fuerza magnética sobre el alambre igual al peso del alambre? a) 0.20 T b) 0.30 T c) 0.40 T d) 0.50 T e) 0.60 T
- Un electrón se mueve a través del ecuador con una velocidad de 2.5×10^6 m/s y en una dirección 35° N de E.

En este punto, el campo magnético de la Tierra tiene una dirección hacia el norte, es paralelo a la superficie y tiene una magnitud de 0.10×10^{-4} T. ¿Cuál es la fuerza que actúa sobre el electrón debida a su interacción con el campo magnético de la Tierra? a) 5.1×10^{-18} N hacia el oeste b) 4.0×10^{-18} N hacia la superficie de la Tierra c) 2.4×10^{-18} N alejándose de la superficie de la Tierra d) 3.3×10^{-18} N hacia la superficie de la Tierra e) 4.0×10^{-18} N alejándose de la superficie de la Tierra.

3. Una bobina rectangular de alambre que consiste en 10 espiras, cada una con 0.20 m de longitud y 0.30 m de ancho, yace en el plano xy . Si la bobina porta una corriente de 2.0 A, ¿cuál es el torque que ejerce un campo magnético de 0.010 T de magnitud que se dirige a un ángulo de 30.0° con respecto al eje z positivo? a) $1.2 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ b) $2.4 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ c) $6.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ d) $4.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ e) $3.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$
4. Un largo alambre porta una corriente de 1 A. Determine la magnitud del campo magnético a 2 m de distancia del alambre. a) $1 \times 10^{-3} \text{ T}$ b) $1 \times 10^{-4} \text{ T}$ c) $1 \times 10^{-6} \text{ T}$ d) $1 \times 10^{-7} \text{ T}$ e) $1 \times 10^{-10} \text{ T}$
5. Un protón entra a un campo magnético constante de 0.050 T de magnitud y atraviesa un semicírculo de 1.0 mm de radio antes de salir del campo. ¿Cuál es la velocidad del protón? a) $1.6 \times 10^3 \text{ m/s}$ b) $2.3 \times 10^3 \text{ m/s}$ c) $2.8 \times 10^4 \text{ m/s}$ d) $1.8 \times 10^2 \text{ m/s}$ e) $4.8 \times 10^3 \text{ m/s}$
6. Estime la magnitud de la fuerza magnética por unidad de longitud entre un par de alambres paralelos separados por 2 m si cada uno porta una corriente de 3 A. a) $1 \times 10^{-1} \text{ N/m}$ b) $1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ c) $1 \times 10^{-4} \text{ N/m}$ d) $1 \times 10^{-6} \text{ N/m}$ e) $1 \times 10^{-8} \text{ N/m}$
7. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético en el núcleo de un solenoide de 120 vueltas, de 0.50 m de longitud, que porta una corriente de 2.0 A? a) $2.4 \times 10^{-4} \text{ T}$ b) $4.8 \times 10^{-5} \text{ T}$ c) $1.2 \times 10^{-6} \text{ T}$ d) $3.6 \times 10^{-5} \text{ T}$ e) $6.0 \times 10^{-4} \text{ T}$
8. Una partícula cargada viaja a través de un campo magnético uniforme. ¿Cuál de los siguientes enunciados del campo magnético son ciertos? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) Ejerce una fuerza sobre la partícula que es paralela al campo. b) Ejerce una fuerza sobre la partícula a lo largo de la dirección de su movimiento. c) Aumenta la energía cinética de la partícula. d) Ejerce una fuerza que es perpendicular a la dirección de movimiento. e) No cambia la magnitud de la cantidad de movimiento de la partícula.
9. ¿En cuál de las siguientes circunstancias un campo magnético espacialmente uniforme no puede ejercer una fuerza magnética sobre una partícula? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) La partícula está cargada. b) La partícula se mueve perpendicular al campo. c) La partícula se mueve paralela al campo. d) La magnitud del campo magnético cambia con el tiempo. e) La partícula está en reposo.
10. Un protón que se mueve horizontalmente entra a una región donde un campo magnético uniforme se dirige perpendicular a la velocidad del protón, como se muestra en la figura POM19.10. Después que el protón entra

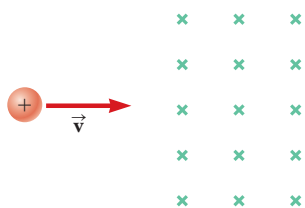


Figura POM19.10

al campo, ¿a) se desvía hacia abajo, manteniendo su velocidad constante; b) continúa moviéndose en la dirección horizontal con velocidad constante; c) se mueve en una órbita circular y queda atrapado por el campo; d) se desvía hacia arriba, se mueve en una trayectoria semicircular con velocidad constante y sale del campo con movimiento hacia la izquierda, o e) se desvía afuera del plano del papel?

11. Dos alambres largos paralelos portan cada uno la misma corriente como en la figura POM19.11. ¿El campo magnético total en el punto P a la mitad entre los alambres a) es cero, b) se dirige hacia la página, c) se dirige afuera de la página, d) se dirige hacia la izquierda o e) se dirige a la derecha?
12. Dos alambres largos rectos se cruzan mutuamente en ángulo recto y cada uno porta la misma corriente, como en la figura POM19.12. ¿Cuáles de los siguientes enunciados son ciertos en cuanto al campo magnético total en los varios puntos debidos a los dos alambres? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) El campo es más intenso en los puntos B y D. b) El campo es más intenso en los puntos A y C. c) El campo es hacia afuera de la página en el punto B y hacia adentro de la página en el punto D. d) El campo es hacia afuera de la página en el punto C y hacia afuera de la página en el punto D. e) El campo tiene la misma magnitud en los cuatro puntos.

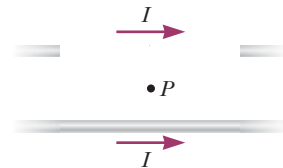


Figura POM19.11

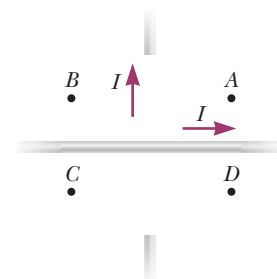


Figura POM19.12

13. Un campo magnético ejerce un torque sobre cada una de las espiras de alambre individuales portadoras de corriente que se muestran en la figura POM19.13. Las

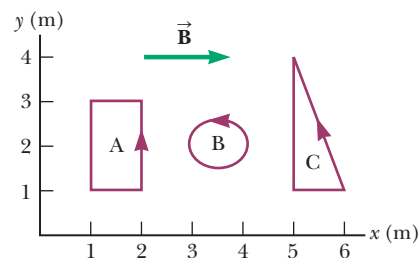


Figura POM19.13

espiras se encuentran en el plano xy y cada uno porta la misma magnitud de corriente y el campo magnético uniforme apunta en la dirección x positiva. Clasifique las espiras por la magnitud del torque que el campo ejerce sobre ellos, de mayor a menor. a) A, B, C, b) A, C, B, c) B, A, C, d) B, C, A y e) C, A, B

14. Dos largos alambres paralelos portan corrientes de 20 A y 10 A en direcciones opuestas, como en la figura POM19.14. ¿Cuál de los siguientes enunciados debe ser cierto? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) En la región I el campo magnético es hacia la página y nunca es cero. b) En la región II el campo es hacia la página y puede ser cero. c) En la región III es posible que el campo sea cero. d) En la región I el campo magnético es hacia afuera de la página y nunca es cero. e) No hay puntos donde el campo sea cero.

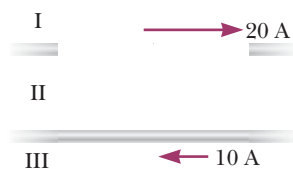


Figura POM19.14

15. Un alambre largo recto porta una corriente I como en la figura POM19.15. ¿Cuáles de los siguientes enunciados son ciertos en cuanto al

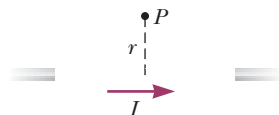


Figura POM19.15

campo magnético debido al alambre? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) El campo es proporcional a I/r y hacia afuera de la página en P . b) El campo es proporcional a I/r^2 y es hacia afuera de la página en P . c) El campo es proporcional a I/r y es hacia la página en P . d) La intensidad del campo es proporcional a I , pero no depende de r . e) El campo es proporcional a I/r^2 y es hacia la página en P .

16. El solenoide A tiene longitud L y N vueltas; el solenoide B tiene longitud $2L$ y N vueltas, y el solenoide C tiene longitud $L/2$ y $2N$ vueltas. Si cada solenoide porta la misma corriente, clasifique por la intensidad del campo magnético en el centro de cada solenoide, de mayor a menor. a) A, B, C, b) A, C, B, c) B, C, A, d) C, A, B y e) C, B, A
17. En un cierto instante, un protón se está moviendo en la dirección x positiva a través de un campo magnético en la dirección z negativa. ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética ejercida sobre el protón? a) dirección z positiva b) negativo dirección z c) dirección y positiva d) y negativo de dirección e) La fuerza es igual a cero.
18. Responda a cada pregunta sí o no. Suponga que los movimientos y las corrientes mencionadas están a lo largo del eje x y campos se encuentran en la dirección y . a) ¿Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre un objeto inmóvil cargado? b) ¿Un campo magnético puede hacerlo? c) ¿Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre un objeto que se mueve cargado? d) ¿Un campo magnético puede hacerlo? e) ¿Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre un cable recto conductor de corriente? f) ¿Un campo magnético puede hacerlo? g) ¿Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre un haz de electrones que se mueven? h) ¿Un campo magnético puede hacerlo?

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En televisor antiguo, un haz de electrones se mueve desde la parte trasera del cinescopio hacia la pantalla, donde golpea un punto fluorescente que brilla con un color particular cuando golpea. El campo magnético de la Tierra en la posición del televisor es horizontal y hacia el norte. ¿En cuál(es) dirección(es) se debe orientar el televisor de modo que el haz experimente la mayor desviación?
- ¿En cuál dirección apuntaría una brújula si usted estuviera en el polo norte magnético de la Tierra?
- ¿Cómo puede usarse el movimiento de una partícula cargada para distinguir entre un campo magnético y un campo eléctrico en cierta región?
- ¿Un campo magnético constante puede poner en movimiento a un protón en reposo? Explique su respuesta.
- Explique por qué dos alambres paralelos que transportan corrientes en direcciones opuestas se repelen entre sí.
- ¿Un clavo se atraerá a cualquier polo de un imán? Explique que es lo que ocurre dentro del clavo cuando se coloca cerca del imán.
- Un gobernante hindú alguna vez sugirió que fuera enterrado en un ataúd magnético con la polaridad arreglada de modo que pudiera estar suspendido por siempre entre el cielo y la Tierra. ¿Tal levitación magnética es posible? Analice.
- Un imán atrae un trozo de hierro. Entonces el hierro puede atraer a otra pieza de hierro. Sobre la base del alineamiento de dominios, explique lo que ocurre en cada trozo de hierro.
- ¿Puede usted usar una brújula para detectar las corrientes en los alambres en las paredes cerca de los interruptores de luz en su casa?
- ¿El campo magnético que crea una espira de corriente es uniforme? Explique.
- Suponga que se mueve a lo largo de un alambre con la misma velocidad que la velocidad de deriva de los electrones en el alambre. ¿Ahora mide un campo magnético cero?
- ¿Por qué las partículas cargadas del espacio exterior, llamadas rayos cósmicos, golpean la Tierra con más frecuencia en los polos que en el ecuador?

13. Un Slinky® colgante se une a una poderosa batería y un interruptor. Cuando el interruptor se cierra de modo que el juguete ahora porta corriente, ¿el Slinky se comprime o estira?
14. ¿Cómo se puede usar una espira de corriente para determinar la presencia de un campo magnético en una región dada del espacio?
15. Alambres paralelos ejercen fuerzas magnéticas uno sobre el otro. ¿Y qué hay de los alambres perpendiculares? Imagine dos alambres orientados mutuamente perpendiculares y casi en contacto. Cada alambre porta una corriente. ¿Existe una fuerza entre los alambres?
16. La figura PC19.16 muestra cuatro imanes permanentes, cada uno con un orificio en su centro. Observe que

los imanes azul y amarillo levitan sobre los rojos. a) ¿Cómo ocurre esta levitación? b) ¿Qué propósito tienen las barras? c) ¿Qué puede decir acerca de los polos de los imanes a partir de esta observación? d) Si el imán superior se invierte, ¿qué supone que sucederá?



Figura PC19.16

17. Dos partículas cargadas se proyectan en la misma dirección en un campo magnético perpendicular a sus velocidades. Si las dos partículas son desviadas en direcciones opuestas, ¿qué se puede decir de ellas?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- 1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

19.3 Campos magnéticos

1. Considere un electrón cerca del ecuador de la Tierra. ¿En qué dirección tiende a desviarse, si su velocidad es a) dirigida hacia abajo, b) dirigida hacia el norte, c) dirigida hacia el oeste, d) dirigida hacia el sureste?
2. a) Determine la dirección de la fuerza sobre un protón (una partícula con carga positiva) que se mueve a través de los campos magnéticos en la figura P19.2, como se muestra. b) Repita el inciso a), si supone que la partícula en movimiento es un electrón.

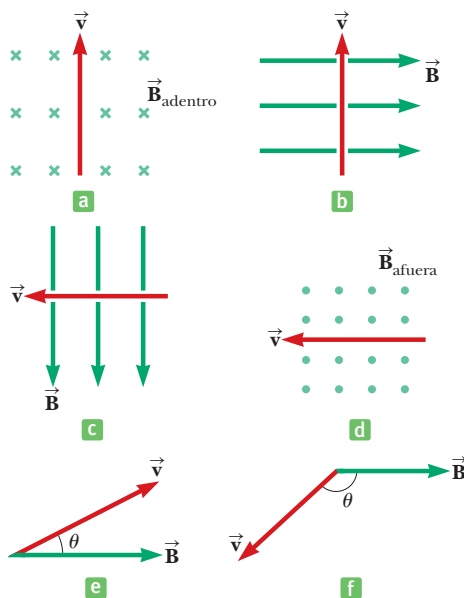


Figura P19.2 (Problemas 2 y 12)

3. Determine la dirección del campo magnético que actúa sobre la partícula con carga positiva que se mueve en las varias situaciones que se muestran en la figura P19.3, si la dirección de la fuerza que actúa sobre ella es como se indica.

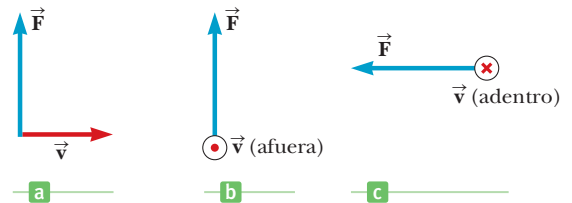


Figura P19.3 (Problemas 3 y 15) Para el problema 15, sustituya el vector velocidad con una corriente en dicha dirección.

4. Determine la dirección inicial de la desviación de las partículas cargadas conforme entran a los campos magnéticos, como se muestra en la figura P19.4.

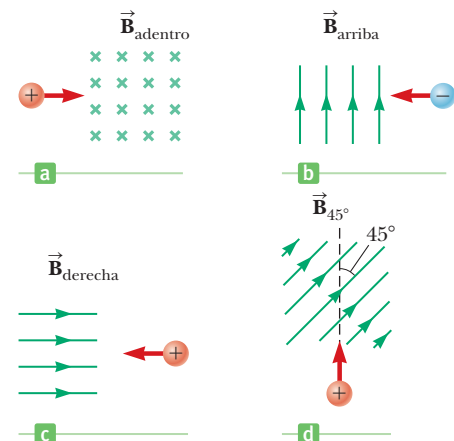


Figura P19.4

5. **CIC** Un electroimán de laboratorio produce un campo magnético de 1.50 T de magnitud. Un protón se mueve a través de este campo con una velocidad de 6.00×10^6 m/s. a) Encuentre la magnitud de la fuerza magnética máxima que se podría ejercer sobre el protón. b) ¿Cuál es la magnitud de la máxima aceleración del protón? c) ¿El campo ejercería la misma fuerza magnética sobre un electrón que se mueve a través del campo con la misma velocidad? ¿El electrón experimentaría la misma aceleración? Explique.
6. **M** Un protón se mueve perpendicularmente a un campo magnético uniforme \vec{B} a una velocidad de 1.00×10^7 m/s y experimenta una aceleración de 2.00×10^{13} m/s² en el sentido positivo de las x cuando su velocidad se encuentra en la dirección z positiva. Determinar la magnitud y dirección del campo.
7. ¿Qué velocidad necesitaría un protón para dar vueltas a la Tierra a 1000 km sobre el ecuador magnético, donde el campo magnético de la Tierra se dirige horizontalmente al norte y tiene una magnitud de 4.00×10^{-8} T?
8. Un electrón se acelera a través de 2400 V desde el reposo y luego entra a una región donde hay un campo magnético uniforme de 1.70 T. ¿Cuáles son las magnitudes a) máxima y b) mínima de la fuerza magnética que actúa sobre este electrón?
9. **M** Un protón se mueve a 4.00×10^6 m/s a través de un campo magnético de magnitud 1.70 T experimenta una fuerza magnética de magnitud 8.20×10^{-13} N. ¿Cuál es el ángulo entre la velocidad del protón y el campo?
10. **BIO** Los iones sodio (Na^+) se mueven a 0.851 m/s a través del torrente sanguíneo en el brazo de una persona que está de pie cerca de un gran imán. El campo magnético tiene una intensidad de 0.254 T y forma un ángulo de 51.0° con el movimiento de los iones sodio. El brazo contiene 100 cm^3 de sangre con una concentración de 3.00×10^{20} de iones Na^+ por centímetro cúbico. Si ningún otro ion está presente en el brazo, ¿cuál sería la fuerza magnética sobre el brazo?
11. En el ecuador, cerca de la superficie de la Tierra, el campo magnético es aproximadamente de $50.0 \mu\text{T}$ hacia el norte y el campo eléctrico es aproximadamente 100 N/C hacia abajo en buen clima. Encuentre las fuerzas gravitacional, eléctrica y magnética sobre un electrón con una velocidad instantánea de 6.00×10^6 m/s dirigida hacia el este en este ambiente.

19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente

12. En la figura P19.2, suponga en cada caso que el vector velocidad que se muestra se sustituye con un alambre que porta una corriente en la dirección del vector velocidad. Para cada caso, encuentre la dirección de la fuerza magnética que actúa sobre el alambre.
13. Una corriente $I = 15$ A se dirige a lo largo del eje positivo x y perpendicular a un campo magnético. Una fuerza magnética por unidad de longitud de 0.12 N/m actúa sobre el conductor en la dirección y negativa. Calcule la

magnitud y dirección del campo magnético en la región a través de la cual pasa la corriente.

14. **CIC** Un alambre recto que porta una corriente de 3.0 A se coloca en un campo magnético uniforme de 0.28 T de magnitud que se dirige perpendicular al alambre. a) Encuentre la magnitud de la fuerza magnética sobre una sección del alambre que tiene una longitud de 14 cm. b) Explique por qué no puede determinar la dirección de la fuerza magnética a partir de la información dada en el problema.
15. En la figura P19.3, suponga en cada caso que el vector velocidad que se muestra se sustituye con un alambre que porta una corriente en la dirección del vector velocidad. Para cada caso, encuentre la dirección del campo magnético que producirá la fuerza magnética que se muestra.
16. Un alambre, que tiene una masa por unidad de longitud de 0.500 g/cm, porta una corriente de 2.00 A horizontalmente hacia el sur. ¿Cuáles son la dirección y magnitud del campo magnético mínimo necesario para levantar este alambre verticalmente hacia arriba?
17. Un alambre porta una corriente de 10.0 A en una dirección que forma un ángulo de 30.0° con la dirección de un campo magnético de 0.300 T de intensidad. Encuentre la fuerza magnética sobre una longitud de 5.00 m del alambre.
18. En cierta ubicación, la Tierra tiene un campo magnético de 0.60×10^{-4} T, que apunta 75° bajo de la horizontal en un plano norte-sur. Un alambre recto de 10.0 m porta una corriente de 15 A. a) Si la corriente se dirige horizontalmente hacia el este, ¿cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre el alambre? b) ¿Cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza si la corriente se dirige verticalmente hacia arriba?
19. Un alambre con una masa de 1.00 g/cm se coloca sobre una superficie horizontal con un coeficiente de fricción de 0.200. El alambre porta una corriente de 1.50 A hacia el este y se mueve horizontalmente hacia el norte. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección del campo magnético vertical *más pequeño* que permite al alambre moverse de esta forma?
20. Un conductor suspendido mediante dos alambres flexibles, como se muestra en la figura P19.20, tiene una masa por unidad de longitud de 0.040 0 kg/m. ¿Qué corriente debe existir en el conductor para que la tensión en los alambres de soporte sea cero cuando el campo magnético es de 3.60 T hacia la página? ¿Cuál es la dirección requerida para la corriente?

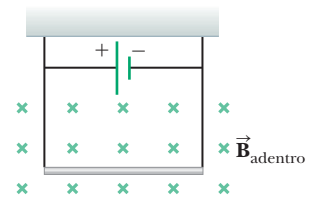


Figura P19.20

21. **CIC** Considere el sistema que se muestra en la figura P19.21. Una longitud de 15 cm de un conductor de 15 g de masa, libre para moverse verticalmente, se coloca entre dos delgados conductores verticales y un campo magnético uniforme actúa perpendicular a la página. Cuando

una corriente de 5.0 A se dirige como se muestra en la figura, el alambre horizontal se mueve hacia arriba con velocidad constante en presencia de la gravedad. a) ¿Qué fuerzas actúan sobre el alambre horizontal y bajo qué condición el alambre puede moverse hacia arriba con velocidad constante? b) Encuentre la magnitud y dirección del campo magnético mínimo que se requiere para mover el alambre con velocidad constante. c) ¿Qué ocurre si el campo magnético supera este valor mínimo? (El alambre se desliza sin fricción sobre los dos conductores verticales.)

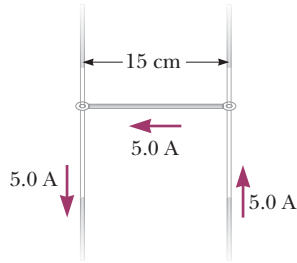


Figura P19.21

22. **S** Una barra de metal de masa m que lleva una corriente que se desliza sobre dos rieles horizontales separados por una distancia d . Si el coeficiente de rozamiento cinético entre la barra y los rieles es μ_k , ¿qué campo magnético vertical es necesario para mantener la barra en movimiento a una velocidad constante?

23. En la figura P19.23 el cubo tiene 40.0 cm por lado. Cuatro segmentos rectos de alambre (ab , bc , cd y da) forman una espira cerrada que porta una corriente $I = 5.00$ A en la dirección que se muestra. Un campo magnético uniforme de magnitud $B = 0.020$ T está en la dirección y positiva. Determine la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre cada segmento.

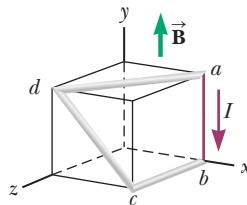


Figura P19.23

24. Una línea de transmisión horizontal, de 58 m de largo, porta una corriente de 2.2 kA, como se muestra en la figura P19.24. El campo magnético de la Tierra en esta ubicación tiene una magnitud de 5.0×10^{-5} T y forma un ángulo de 65° con la línea de transmisión. Encuentre la magnitud y la dirección de la fuerza magnética sobre la línea de transmisión.

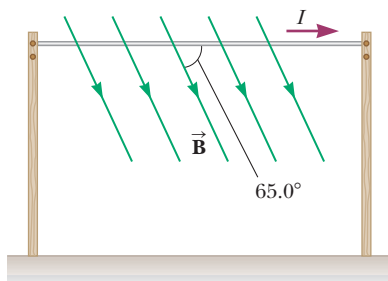


Figura P19.24

19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos

25. Un cable forma una circunferencia con un diámetro de 10.0 cm y se coloca en un campo magnético uniforme de 3.00 mT. El cable lleva una corriente de 5.00 A. Encuentre el torque máximo en el cable.

26. Una corriente de 17.0 mA se mantiene en una sola espira circular con una circunferencia de 2.00 m. Un campo magnético de 0.800 T se dirige paralelo al plano de la espira. ¿Cuál es la magnitud del torque que ejerce el campo magnético sobre la espira?

27. **M** Una bobina de 8 espiras encierra un área elíptica que tiene un eje mayor de 40.0 cm y un eje menor de 30.0 cm (figura P19.27). La bobina se encuentra en el plano de la página y tiene una corriente de 6.00 A que fluye en sentido de las manecillas del reloj en torno a ella. Si la bobina está en un campo magnético uniforme de 2.00×10^{-4} T dirigido hacia la izquierda de la página, ¿cuál es la magnitud del torque sobre la bobina? (Sugerencia: El área de una elipse es $A = \pi ab$, donde a y b son, respectivamente, los ejes mayor y menor de la elipse.)

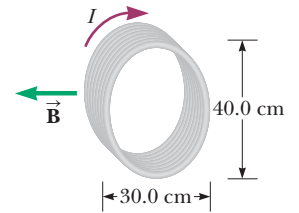


Figura P19.27

28. Una espira rectangular consiste en 100 vueltas cercanamente enrolladas y tiene dimensiones de 0.40 por 0.30 m. La espira puede girar a lo largo del eje y y el plano de la bobina forma un ángulo de 30.0° con el eje x (figura P19.28). ¿Cuál es la magnitud del torque que ejerce sobre la espira un campo magnético uniforme de 0.800 T que se dirige a lo largo del eje x , cuando la corriente en los devanados tiene un valor de 1.20 A en la dirección que se muestra? ¿Cuál es la dirección de rotación esperada de la espira?

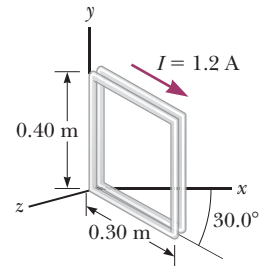


Figura P19.28

29. Una bobina rectangular de 200 espiras, que tiene dimensiones de 3.0 por 5.0 cm, se coloca en un campo magnético uniforme de 0.90 T de magnitud. a) Encuentre la corriente en la bobina si el torque máximo que ejerce sobre ella el campo magnético es de 0.15 N · m. b) Encuentre la magnitud del torque sobre la bobina cuando el campo magnético forma un ángulo de 25° con la normal al plano de la bobina.

30. Un alambre de cobre tiene 8.00 m de largo y un área transversal de 1.00×10^{-4} m². El alambre forma una espira de una vuelta en la forma de cuadrado y luego se conecta a una batería que aplica una diferencia de potencial de 0.100 V. Si la espira se coloca en un campo magnético uniforme de 0.400 T de magnitud, ¿cuál es el torque máximo que puede actuar sobre él? La resistividad del cobre es 1.70×10^{-8} Ω · m.

31. Un largo trozo de alambre, con una masa de 0.100 kg y una longitud total de 4.00 m, se usa para hacer una bobina cuadrada con un lado de 0.100 m. La bobina puede girar a lo largo del lado horizontal, porta una corriente de 3.40 A y se coloca en un campo magnético de 0.010 0 T de magnitud. a) Determine el ángulo que el plano de la bobina forma con la vertical cuando la bobina está en equilibrio. b) Encuentre el torque que actúa sobre la bobina debido a la fuerza magnética en equilibrio.

32. **PG** Una espira rectangular tiene dimensiones de 0.500 por 0.300 m. La espira puede girar a lo largo del eje x y yace en el plano xy (figura P19.32). Un campo magnético uniforme de 1.50 T se dirige en un ángulo de 40.0° con respecto al eje y positivo y se encuentra paralelo en todas partes al plano yz . La espira porta una corriente de 0.900 A en la dirección que se muestra. (Ignore la gravitación.) a) ¿En qué dirección se ejerce la fuerza magnética sobre el segmento de alambre ab ? ¿Cuál es la dirección del torque magnético asociado con esta fuerza, como se calcula con respecto al eje x ? b) ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética que se ejerce sobre el segmento cd ? ¿Cuál es la dirección del torque magnético asociado con esta fuerza, de nuevo calculada con respecto al eje x ? c) ¿Las fuerzas que se examinan en los incisos a) y b) se pueden combinar para hacer que la espira gire en torno al eje x ? ¿Pueden afectar el movimiento de la espira en alguna forma? Explique. d) ¿Cuál es la dirección (en el plano yz) de la fuerza magnética que se ejerce sobre el segmento bc ? Al medir los torques con respecto al eje x , ¿cuál es la dirección del torque que ejerce la fuerza sobre el segmento bc ? e) Al mirar hacia el origen a lo largo del eje x positivo, ¿la espira girará en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario? f) Calcule la magnitud del momento magnético de la espira. g) ¿Cuál es el ángulo entre el vector de momento magnético y el campo magnético? h) Calcule el torque sobre la espira con los valores que se encuentran para el momento magnético y el campo magnético.

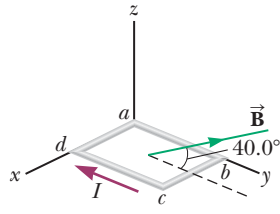


Figura P19.32

19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético

33. Un electrón se mueve en una trayectoria circular perpendicular a un campo magnético uniforme con una magnitud de 0.235 T. Si la energía cinética del electrón es 3.30×10^{-19} J, determine a) la velocidad del electrón y b) el radio de la trayectoria circular.
34. Un protón viaja con una velocidad de 5.02×10^6 m/s a un ángulo de 60° con la dirección de un campo magnético de 0.180 T de magnitud en la dirección x positiva. ¿Cuáles son a) la magnitud de la fuerza magnética sobre el protón y b) la aceleración del protón?
35. La figura P19.35a es un diagrama de un dispositivo llamado selector de velocidad, en el que las partículas de una velocidad específica pasan a través sin desviarse mientras

que las que tienen mayor o menor velocidad se desvían hacia arriba o hacia abajo. Un campo eléctrico se dirige perpendicular a un campo magnético, lo que produce una fuerza eléctrica y una fuerza magnética sobre la partícula cargada que puede ser igual en magnitud y opuesta en dirección (figura P19.35b) y por lo tanto se cancela. Demuestre que las partículas con una velocidad de $v = E/B$ pasarán a través del selector de velocidad sin desviarse.

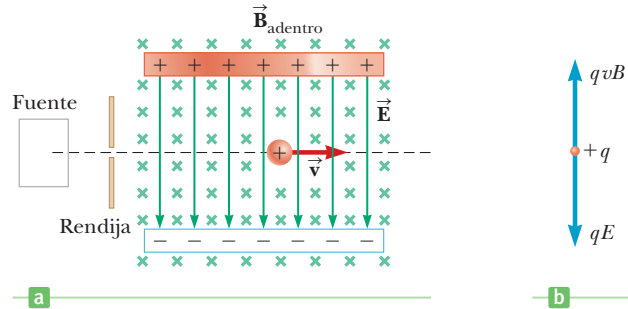


Figura P19.35

36. Considere el espectrómetro de masas que se muestra esquemáticamente en la figura P19.36. El campo eléctrico entre las placas del selector de velocidad es 950 V/m y los campos magnéticos tanto en el selector de velocidad como en la cámara de desviación tienen magnitudes de 0.930 T. Calcule el radio de la trayectoria en el sistema para un solo ion cargado con masa $m = 1.28 \times 10^{-26}$ kg. (Sugerencia: Véase el problema 35.)

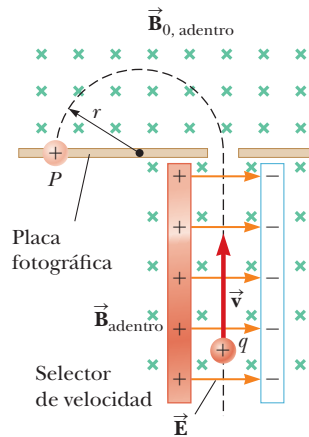


Figura P19.36 (Problemas 36 y 41) Un espectrómetro de masas. Las partículas cargadas primero se envían a través de un selector de velocidad. Luego entran a una región donde un campo magnético \vec{B}_0 (que se dirige hacia adentro) hace que los iones positivos se muevan en una trayectoria semicircular y golpeen una película fotográfica en P.

37. Un solo ion con carga positiva tiene una masa de 2.50×10^{-26} kg. Después de acelerar a través de una diferencia de potencial de 250 V, el ion entra a un campo magnético de 0.500 T, en una dirección perpendicular al campo. Calcule el radio de la trayectoria del ion en el campo.
38. Un espectrómetro de masas se usa para examinar los isótopos de uranio. Los iones en el haz salen del selector de velocidad con una velocidad de 3.00×10^5 m/s y entran

a un campo magnético uniforme de 0.600 T dirigido perpendicularmente a la velocidad de los iones. ¿Cuál es la distancia entre los puntos de impacto que se forman en la placa fotográfica por iones con carga única de ^{235}U y ^{238}U ?

39. Un protón está en reposo en la frontera vertical plana de una región que contiene un campo magnético vertical uniforme B . Una partícula alfa que se mueve horizontalmente tiene una colisión frontal elástica con el protón. Inmediatamente después del choque, ambas partículas entran al campo magnético y se mueven perpendiculares a la dirección del campo. El radio de la trayectoria del protón es R . Encuentre el radio de la trayectoria de la partícula alfa. La masa de la partícula alfa es cuatro veces la del protón y su carga es el doble que la del protón.

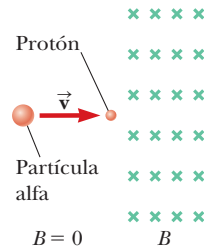


Figura P19.39

40. **S** Una partícula con carga q y energía cinética E_0 viaja en un campo magnético uniforme de magnitud B . Si la partícula se mueve en una trayectoria circular de radio R , encuentre una expresión a) para su velocidad y b) su masa.
41. Una partícula pasa a través de un espectrómetro de masas como se ilustra en la figura P19.36. El campo eléctrico entre las placas del selector de velocidad tiene una magnitud de 8 250 V/m y los campos magnéticos tanto en el selector de velocidad como en la cámara de desviación tienen magnitudes de 0.093 T. En la cámara de desviación la partícula golpea una placa fotográfica recorrida 39.6 cm de su punto de salida después de viajar en un semicírculo. a) ¿Cuál es la razón masa a carga de la partícula? b) ¿Cuál es la masa de la partícula si es doblemente ionizada? c) ¿Cuál es su identidad, si supone que es un elemento?
42. **S** Un protón (carga $+e$, masa de m_p), un deuterón (carga $+e$, masa de $2m_p$) y una partícula alfa (carga $+2e$, masa de $4m_p$) se aceleran desde el reposo a través de una diferencia de potencial ΔV común. Cada una de las partículas entra a un campo magnético uniforme \vec{B} , con su velocidad en una dirección perpendicular a \vec{B} . El protón se mueve en una trayectoria circular de radio de r_p . En términos de r_p , determine a) el radio r_d de la órbita circular para el deuterón y b) el radio r_a de la partícula alfa.

19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère

43. Un relámpago puede transportar una corriente de 1.00×10^4 A durante corto tiempo. ¿Cuál es el campo magnético resultante a 100 m del relámpago? Suponga que el relámpago se extiende muy arriba y abajo del punto de observación.

44. En cada uno de los incisos a), b) y c) de la figura P19.44, encuentre la dirección de la corriente en el alambre que produciría un campo magnético dirigido como se muestra.

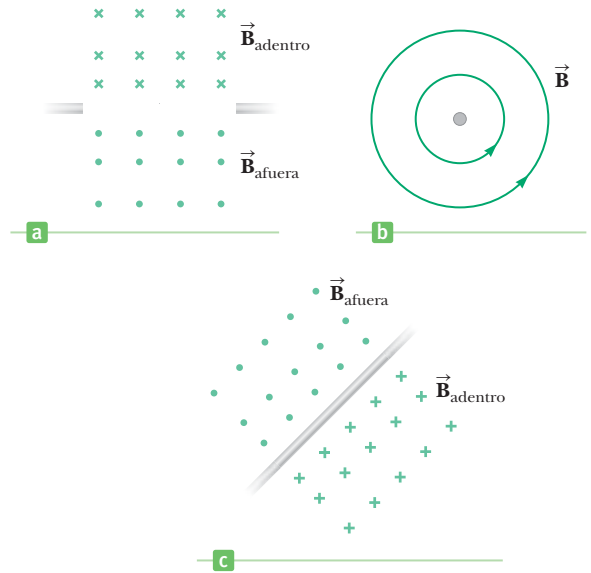


Figura P19.44

45. **BIO** Las neuronas en su cuerpo portan corrientes débiles que producen campos magnéticos detectables. Para estudiar la actividad eléctrica en el cerebro con este concepto se usa una técnica llamada *magnetoencefalografía*, o MEG. Esta técnica es capaz de detectar campos magnéticos tan débiles como 1.0×10^{-15} T. Modele la neurona como un largo alambre portador de corriente y encuentre la corriente que debe portar para producir un campo de esta magnitud a una distancia de 4.0 cm de la neurona.
46. En 1962, en el Observatorio Geofísico de Tulsa, Oklahoma, se realizaron mediciones del campo magnético de un gran tornado. Si la magnitud del campo del tornado fue $B = 1.50 \times 10^{-8}$ T y apuntaba al norte cuando el tornado estaba a 9.00 km al este del observatorio, ¿qué corriente llevaba arriba o abajo el embudo del tornado? Modele el vórtice como un largo alambre recto que porta una corriente.
47. **BIO** Un campo magnético estático tan pequeño como 1.7 mT puede afectar un marcapasos cardíaco. ¿Cuán cerca de un largo alambre recto portador de 20 A puede aproximarse el usuario de un marcapasos?
48. Los dos alambres que se muestran en la figura P19.48 portan corrientes de 5.00 A en direcciones opuestas y

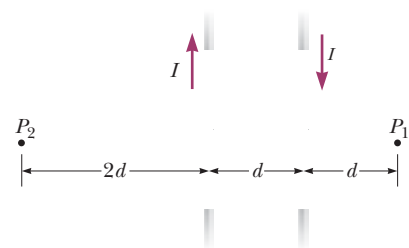


Figura P19.48

están separados por 10.0 cm. Encuentre la dirección y magnitud del campo magnético neto a) en un punto a la mitad entre los alambres; b) un punto P_1 , 10.0 cm a la derecha del alambre a la derecha, y c) en el punto P_2 , 20.0 cm a la izquierda del alambre a la izquierda.

49. Cuatro conductores paralelos largos portan igual corriente $I = 5.00$ A. La figura P19.49 es una vista transversal de los conductores. La dirección de la corriente es hacia la página en los puntos A y B (que se indica mediante las cruces) y hacia afuera de la página en C y D (que se indica mediante los puntos). Calcule la magnitud y dirección del campo magnético en el punto P, ubicado en el centro del cuadrado con lado de longitud 0.200 m.

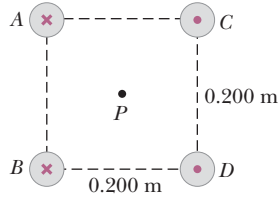


Figura P19.49

50. Dos alambres largos y paralelos portan corrientes $I_1 = 3.00$ A y $I_2 = 5.00$ A en la dirección que se indica en la figura 19.50. a) Encuentre la dirección y magnitud del campo magnético en un punto a la mitad entre los alambres ($d = 20.0$ cm). b) Encuentre la magnitud y dirección del campo magnético en el punto P, ubicado $d = 20.0$ cm arriba del alambre que porta 5.00 A de corriente.

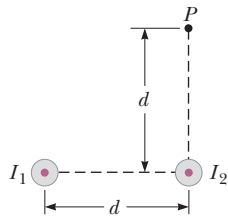


Figura P19.50

51. **M** Un alambre porta una corriente de 7.00 A a lo largo del eje x y otro alambre porta una corriente de 6.00 A a lo largo del eje y, como se muestra en la figura P19.51. ¿Cuál es el campo magnético en el punto P, ubicado en $x = 4.00$ m, $y = 3.00$ m?

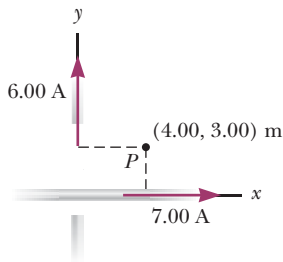


Figura P19.51

52. **PG** Un alambre largo recto yace sobre una mesa horizontal en el plano xy y porta una corriente de $1.20 \mu\text{A}$ en la dirección x positiva a lo largo del eje x. Un protón recorre, en la dirección x negativa, con velocidad de 2.30×10^4 m/s, una distancia d arriba del alambre (es decir: $z = d$). a) ¿Cuál es la dirección del campo magnético del alambre en la posición del protón? b) ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética que actúa sobre el protón? c) Explique por qué la dirección de movimiento del protón no cambia. d) Con la segunda ley de Newton, encuentre una

expresión simbólica para d en términos de la aceleración de la gravedad g, la masa del protón m, su velocidad v, la carga q y la corriente I. e) Encuentre la respuesta numérica para la distancia d usando los resultados del inciso d).

53. El campo magnético a 40.0 cm de un largo alambre recto, que porta una corriente de 2.00 A, es $1.00 \mu\text{T}$. a) ¿A qué distancia es de $0.100 \mu\text{T}$? b) En un instante, los dos conductores en una larga extensión doméstica portan iguales corrientes de 2.00 A en direcciones opuestas. Los dos alambres están separados 3.00 mm. Encuentre el campo magnético a 40.0 cm de la mitad del cordón recto, en el plano de los dos alambres. c) ¿A qué distancia es un décimo de su valor? d) El alambre central en un cable coaxial porta corriente de 2.00 A en una dirección y la envoltura alrededor suyo porta corriente de 2.00 A en la dirección opuesta. ¿Qué campo magnético crea el cable en puntos exteriores?

54. **CIC S** Dos alambres largos paralelos, separados por una distancia 2d, portan iguales corrientes en la misma dirección. En la figura P19.54 se muestra una vista lateral de los dos alambres, donde las corrientes están afuera de la página. a) ¿Cuál es la dirección del campo magnético en P sobre el eje x, que establecen los dos alambres? b) Encuentre una expresión para la magnitud del campo en P. c) A partir de su resultado para el inciso b), determine el campo en un punto a la mitad entre los dos alambres. ¿El resultado coincide con sus expectativas? Explique.

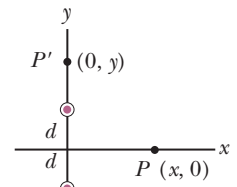


Figura P19.54

19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos

55. Dos alambres largos y paralelos separados por 2.50 cm transportan corrientes en direcciones opuestas. La corriente en un cable es de 1.25 A y la corriente en el otro es de 3.50 A. a) Hallar la magnitud de la fuerza por unidad de longitud que ejerce un alambre sobre el otro. b) ¿La fuerza es atractiva o repulsiva?
56. **CIC** Dos alambres paralelos, separados por 4.0 cm, se repelen mutuamente con una fuerza por unidad de longitud de 2.0×10^{-4} N/m. La corriente en un alambre es 5.0 A. a) Encuentre la corriente en el otro alambre. b) ¿Las corrientes están en la misma dirección o en direcciones opuestas? c) ¿Qué sucedería si la dirección de una corriente se invirtiera y duplicara?

57. Un alambre, con un peso por unidad de longitud de 0.080 N/m, se suspende directamente sobre un segundo alambre. El alambre superior porta una corriente de 30.0 A y el alambre inferior porta una corriente de 60.0 A. Encuentre la distancia de separación entre los alambres, de modo que el alambre superior todavía se mantenga en su lugar por repulsión magnética.

58. En la figura P19.58, la corriente en el alambre largo recto es $I_1 = 5.00$ A, y el alambre se encuentra en el plano de la espira rectangular, que porta 10.0 A. Las dimensiones

que se muestran son $c = 0.100$ m, $a = 0.150$ m y $\ell = 0.450$ m. Encuentre la magnitud y dirección de la fuerza neta que ejerce sobre el lazo el campo magnético debido al alambre recto.

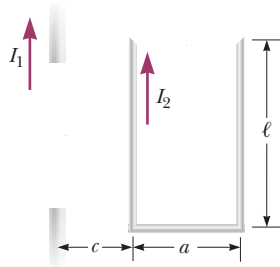


Figura P19.58

19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides

- 59. **M** Un solenoide largo que tiene 1 000 vueltas distribuidas de manera uniforme en una longitud de 0.400 m produce un campo magnético de magnitud 1.00×10^{-24} T en su centro. ¿Qué corriente es necesaria en las bobinas para que eso ocurra?
- 60. Cierta imán superconductor, en forma de solenoide de 0.50 cm de longitud, puede generar un campo magnético de 9.0 T en su núcleo cuando sus bobinas portan una corriente de 75 A. Los devanados, hechos de una aleación de niobio-titanio, deben enfriarse a 4.2 K. Encuentre el número de espiras en el solenoide.
- 61. Se quiere construir un solenoide que tenga una resistencia de 5.00Ω (a 20°C) y produzca un campo magnético de 4.00×10^{-2} T en su centro cuando porte una corriente de 4.00 A. El solenoide se construirá a partir de alambre de cobre que tiene un diámetro de 0.500 mm. Si el radio del solenoide será de 1.00 cm, determine a) el número de espiras de alambre necesarias y b) la longitud que debe tener el solenoide.
- 62. Un solenoide de 10.0 cm de diámetro y 75.0 cm de largo está hecho de alambre de cobre de diámetro 0.100 cm, con un aislamiento muy delgado. El cable se enrolla en un tubo de cartón en una sola capa, con vueltas adyacentes que se tocan. ¿Qué potencia tiene que ser entregada al solenoide para producir un campo de 8.00 mT en su centro?
- 63. Un electrón se mueve con una velocidad de 1.0×10^4 m/s en una trayectoria circular de 2.0 cm de radio dentro de un solenoide. El campo magnético del solenoide es perpendicular al plano de la trayectoria del electrón. Encuentre a) la intensidad del campo magnético dentro del solenoide y b) la corriente en el solenoide si tiene 25 vueltas por centímetro.

Problemas adicionales

- 64. **CIC** La figura P19.64 es una configuración que se puede usar para medir campos magnéticos. Una bobina rectangular de alambre que contiene N vueltas tiene ancho w . La bobina está unida a un brazo de una balanza y está suspendida entre los polos de un imán. El campo es uniforme y perpendicular al plano de la bobina. El sistema

se equilibra primero cuando la corriente en la bobina es cero. Cuando se cierra el interruptor y la bobina porta una corriente I , se debe agregar una masa m al lado derecho para equilibrar el sistema. a) Encuentre una expresión para la magnitud del campo magnético y determine su dirección. b) ¿Por qué el resultado es independiente de la dimensión vertical de la bobina? c) Suponga que la bobina tiene 50 vueltas y ancho de 5.0 cm. Cuando se cierra el interruptor, la bobina porta una corriente de 0.30 A, y se debe agregar una masa de 20.0 g en el lado derecho para equilibrar el sistema. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético?

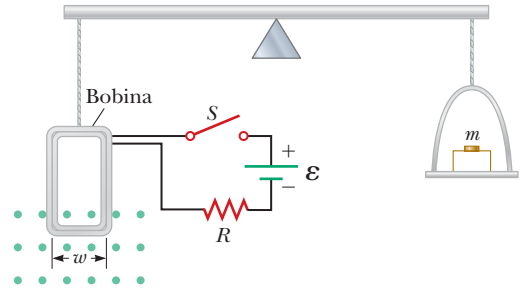


Figura P19.64

- 65. Dos espiras circulares coplanares concéntricas de alambre portan corrientes $I_1 = 5.00$ A e $I_2 = 3.00$ A en direcciones opuestas, como en la figura P19.65. Si $r_1 = 12.0$ cm y $r_2 = 9.00$ cm, ¿cuál es la magnitud y b) dirección del campo magnético neto en el centro de las dos espiras? c) Si r_1 permanece fijo en 12.0 cm y r_2 es una variable. Determine el valor de r_2 tal que el campo neto en el centro del lazo es cero.
- 66. Un electrón se mueve en una trayectoria circular perpendicular a un campo magnético constante de magnitud 1.00 mT. El momento angular del electrón alrededor del centro de la circunferencia es de 4.00×10^{-25} kg · m²/s. Determine a) el radio de la trayectoria circular y b) la velocidad del electrón.
- 67. Dos largos alambres rectos se cruzan mutuamente en ángulo recto, como se muestra en la figura P19.67. a) Encuentre

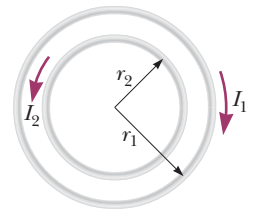


Figura P19.65

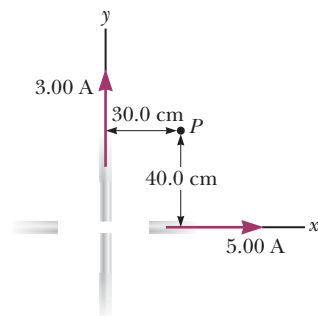


Figura P19.67

la dirección y magnitud del campo magnético en el punto P , que está en el mismo plano que los dos alambres. b) Encuentre el campo magnético en un punto a 30.0 cm arriba del punto de intersección (30.0 cm afuera de la página, hacia usted).

68. Una barra metálica de 0.200 kg, que porta una corriente de 10.0 A, se desliza sobre dos rieles horizontales separados 0.500 m. ¿Qué campo magnético vertical se requiere para mantener la barra en movimiento con velocidad constante, si el coeficiente de fricción cinética entre la barra y los rieles es 0.100?

69. **BIO** Usando un flujómetro electromagnético (figura P19.69), un cirujano del corazón monitorea la tasa de flujo de sangre a través de una arteria. Los electrodos A y B hacen contacto con la superficie exterior del vaso sanguíneo, que tiene diámetro interior de 3.00 mm. a) Para un campo magnético de 0.040 T de magnitud, entre los electrodos aparece una diferencia de potencial de 160 μ V. Calcule la velocidad de la sangre. b) Verifique que el electrodo A es positivo, como se muestra. ¿El signo de la fem depende de si los iones móviles en la sangre tienen carga predominantemente positiva o negativa?

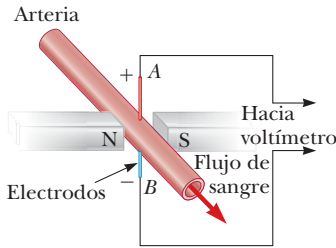


Figura P19.69

70. Un alambre horizontal uniforme, con una densidad de masa lineal de 0.50 g/m, porta una corriente de 2.0 A. Se le coloca en un campo magnético constante con una intensidad de 4.0×10^{-3} T. El campo es horizontal y perpendicular al alambre. Conforme el alambre se mueve hacia arriba, partiendo del reposo, a) ¿cuál es su aceleración y b) cuánto tarda en elevarse 50 cm? Desprecie el campo magnético de la Tierra.

71. Tres conductores paralelos largos portan corrientes de $I = 2.0$ A. La figura P19.71 es una vista transversal de los conductores, donde cada corriente viene desde afuera de la página. Dado que $a = 1.0$ cm, determine la magnitud y dirección del campo magnético en los puntos A , B y C .

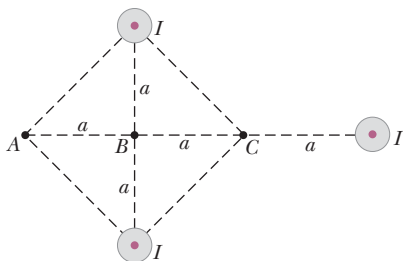


Figura P19.71

72. Dos alambres paralelos largos, cada uno con una masa por unidad de longitud de 40 g/m, se sostienen en un plano horizontal mediante cuerdas de 6.0 cm de largo, como se muestra en la figura P19.72. Cada alambre porta la misma corriente I , lo que hace que los alambres se repelan mutuamente de modo que el ángulo θ entre las cuerdas de soporte es 16° . a) ¿Las corrientes están en direcciones iguales u opuestas? b) Determine la magnitud de cada corriente.

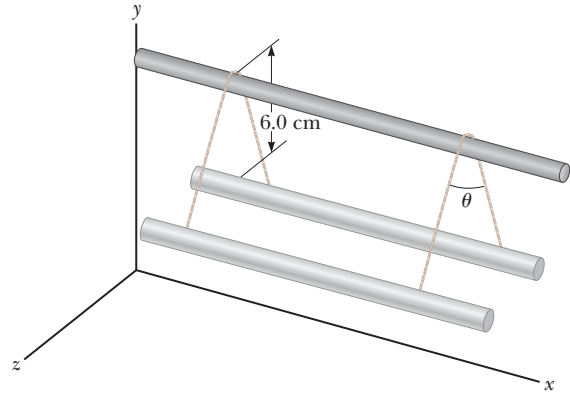


Figura P19.72

73. Protones que tienen una energía cinética de 5.00 MeV se mueven en la dirección x positiva y entran a un campo magnético de 0.050 T en la dirección z , afuera del plano de la página y se extienden desde $x = 0$ hasta $x = 1.00$ m, como en la figura P19.73. a) Calcule el componente y de la cantidad de movimiento de los protones conforme salen del campo magnético. b) Encuentre el ángulo α entre el vector velocidad inicial del haz de protones y el vector velocidad después que el haz sale del campo. (Sugerencia: Ignore efectos relativistas y tenga en cuenta que $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$.)

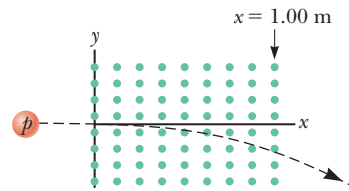


Figura P19.73

74. Un alambre recto, de 10.0 g de masa y 5.0 cm de longitud, está suspendido de dos resortes idénticos que, a su vez, forman un circuito cerrado (figura P19.74). Los resortes se estiran una distancia de 0.50 cm bajo el peso del alambre. El circuito tiene una resistencia total de 12 Ω . Cuando se activa un campo magnético dirigido afuera de la página (que se indica mediante los puntos en la figura), se observa que los resortes se estiran 0.30 cm adicionales. ¿Cuál es la intensidad del campo magnético? (La porción superior del circuito está fija.)

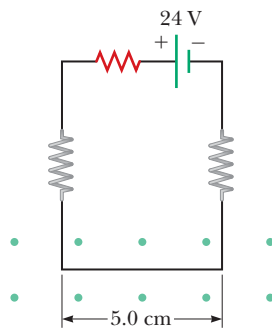


Figura P19.74

75. Una bola de 1.00 kg, que tiene carga neta $Q = 5.00 \mu\text{C}$, se lanza por una ventana horizontalmente, con una velocidad

$v = 20.0 \text{ m/s}$. La ventana está a una altura $h = 20.0 \text{ m}$ sobre el nivel del suelo. Un campo magnético horizontal uniforme de magnitud $B = 0.010 \text{ T}$ es perpendicular al plano de la trayectoria de la bola. Encuentre la magnitud de la fuerza magnética que actúa sobre la bola justo antes de golpear el suelo. *Sugerencia:* Ignore las fuerzas magnéticas al encontrar la velocidad final de la bola.

76. Dos largos conductores paralelos, separados por 10.0 cm, portan corrientes en la misma dirección. El primer alambre porta una corriente $I_1 = 5.00 \text{ A}$, y el segundo porta $I_2 = 8.00 \text{ A}$. a) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético que crea I_1 en la posición de I_2 ? b) ¿Cuál es la fuerza por unidad de longitud que ejerce I_1 sobre I_2 ? c) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético que crea I_2 en la posición de I_1 ? d) ¿Cuál es la fuerza por unidad de longitud que ejerce I_2 sobre I_1 ?

Un bosque de luces fluorescentes, no conectados a fuente de poder alguna, encienden mediante inducción electromagnética. Las corrientes variables en las líneas de transmisión sobre ellos crean flujo magnético dependiente del tiempo en la vecindad de los tubos, lo que induce un voltaje a través de ellos.

South West News Service



20

Voltajes inducidos e inductancia

- 20.1 Fem inducida y flujo magnético
- 20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz
- 20.3 Fem de movimiento
- 20.4 Generadores
- 20.5 Autoinductancia
- 20.6 Circuitos RL
- 20.7 Energía almacenada en un campo magnético

En 1819, Hans Christian Oersted descubrió que una corriente eléctrica ejercía una fuerza sobre una brújula. Aunque durante mucho tiempo hubo especulaciones acerca de que tal relación existía, el descubrimiento de Oersted fue la primera evidencia de un vínculo entre electricidad y magnetismo. Puesto que la naturaleza con frecuencia es simétrica, el descubrimiento de que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos condujo a los científicos a sospechar que los campos magnéticos podían producir corrientes eléctricas. De hecho, los experimentos realizados por Michael Faraday en Inglaterra y de manera independiente por Joseph Henry en Estados Unidos en 1831, demostraron que un campo magnético variable podía inducir una corriente eléctrica en un circuito. Los resultados de estos experimentos condujeron a una ley básica e importante conocida como ley de Faraday. En este capítulo se estudian la ley de Faraday y muchas aplicaciones prácticas, una de las cuales es la producción de energía eléctrica en las plantas de generación de electricidad a lo largo del mundo.

20.1 Fem inducida y flujo magnético

Un experimento realizado por primera vez por Faraday demostró que un campo magnético variable puede producir una corriente. El aparato que se muestra en la figura 20.1 consiste en una bobina conectada a un interruptor y una batería. A esta bobina se le llama *bobina primaria* y al circuito correspondiente, circuito primario. La bobina se enrolla en torno a un anillo de hierro para intensificar el campo magnético producido por la corriente en la bobina. Una segunda bobina, llamada *bobina secundaria*, a la derecha, se enrolla en torno al anillo de hierro y se conecta a un amperímetro. El circuito correspondiente se llama circuito secundario. Es importante notar que **no hay batería en el circuito secundario.**

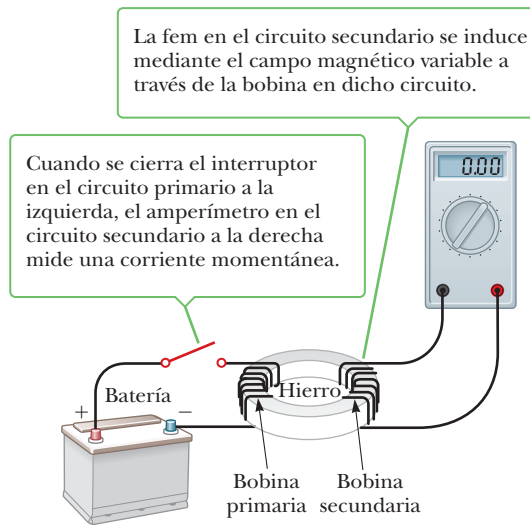


Figura 20.1 Experimento de Faraday.

A primera vista, puede suponer que nunca se detectaría corriente alguna en el circuito secundario. Sin embargo, cuando súbitamente se cierra el interruptor en el circuito primario de la figura 20.1, algo sorprendente sucede: ¡el amperímetro mide una corriente en el circuito secundario y luego regresa a cero! Cuando el interruptor se abre de nuevo, el amperímetro lee una corriente en la dirección opuesta y otra vez regresa a cero. Finalmente, siempre que haya una corriente estable en el circuito primario, el amperímetro lee cero.

A partir de tales observaciones, Faraday concluyó que se podía producir una corriente eléctrica mediante un campo magnético *variable*. (Un campo magnético estacionario no produce una corriente a menos que la bobina se mueva, como se explica más adelante.) La corriente producida en el circuito secundario ocurre sólo durante un instante mientras el campo magnético a través de la bobina secundaria es variable. En efecto, el circuito secundario se comporta como si una fuente de fem se conectara a él durante un corto tiempo. Es obligado decir que **en el circuito secundario un campo magnético variable produce una fem inducida**.

Flujo magnético

Para evaluar cuantitativamente las fem inducidas, es necesario entender qué factores afectan el fenómeno. Aunque los campos magnéticos variables siempre inducen campos eléctricos, en otras situaciones el campo magnético permanece constante, aunque todavía se produce un campo eléctrico inducido. El mejor ejemplo de esto es un generador eléctrico: una espira de conductor que gira en un campo magnético constante produce corriente eléctrica.

La cantidad física asociada con el magnetismo que genera un campo eléctrico es un **flujo magnético variable**. El flujo magnético se define en la misma forma que el flujo eléctrico (sección 15.9) y es proporcional tanto a la intensidad del campo magnético que pasa a través del plano de una espira de alambre, como al área de la espira.

El **flujo magnético** Φ_B a través de una espira de alambre con área A se define mediante

$$\Phi_B \equiv B_{\perp} A = BA \cos \theta \quad [20.1]$$

donde B_{\perp} es la componente de \vec{B} perpendicular al plano de la espira, como en la figura 20.2a, y θ es el ángulo entre \vec{B} y la normal (perpendicular) al plano de la espira.

Unidad SI: weber (Wb)

Observe que siempre hay dos direcciones normales a una superficie plana dada. En la figura 20.2, por ejemplo, que la dirección podría ser elegida para estar a la derecha, lo que resulta en un flujo positivo. La dirección normal también puede ser elegida para apuntar

Con el permiso del Presidente y Consejo de la Real Sociedad



Michael Faraday
Físico y químico inglés
(1791-1867)

A menudo Faraday es considerado como el mayor científico experimental del siglo XIX. Sus aportaciones al estudio de la electricidad incluyen la invención del motor eléctrico, el generador eléctrico y el transformador, así como el descubrimiento de la inducción electromagnética y las leyes de la electrólisis. Enormemente influido por la religión, rechazó trabajar en gas venenoso militar para el gobierno británico.

◀ Flujo magnético

Figura 20.2 a) Un campo magnético uniforme \vec{B} que forma un ángulo θ con una dirección normal al plano de una espira de alambre de área A . b) Vista lateral del lazo.

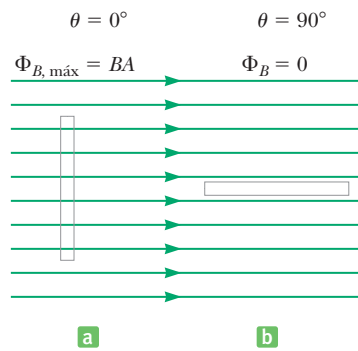
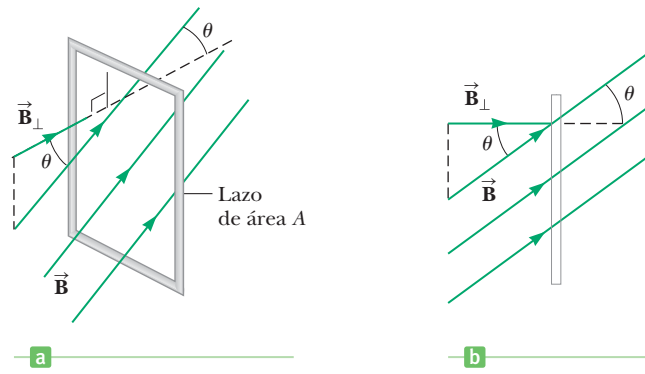


Figura 20.3 Vista lateral de una espira en un campo magnético uniforme. a) Cuando las líneas de campo son perpendiculares al plano de la espira, el flujo magnético a través de la espira es un máximo e igual a $\Phi_B = BA$. b) Cuando las líneas de campo son paralelas al plano de la espira, el flujo magnético a través de la espira es cero.

a la izquierda, lo que resultaría en un flujo negativo de la misma magnitud. La elección de la dirección normal se llama la orientación de la superficie. Una vez elegida en un determinado problema, la dirección normal se mantiene fija. Una buena opción predeterminada es elegir la dirección normal de modo que el ángulo inicial entre el campo magnético y la dirección normal sea menor de 90° .

A partir de la ecuación 20.1, tenemos que $B_\perp = B \cos \theta$. El flujo magnético, en otras palabras, es la magnitud de la parte de \vec{B} , que es perpendicular al plano de la espira por el área de la espira. La figura 20.2b es una vista lateral de la espira y de las líneas de campo magnético que penetran. Cuando el campo es perpendicular al plano de la espira, como en la figura 20.3a, $\theta = 0$ y Φ_B tiene un valor máximo, $\Phi_{B,\text{máx}} = BA$. Cuando el plano de la espira es paralelo a \vec{B} , como en la figura 20.3b, $\theta = 90^\circ$ y $\Phi_B = 0$. El flujo también puede ser negativo. Por ejemplo, cuando $\theta = 180^\circ$, el flujo es igual a $-BA$. Puesto que la unidad SI de B es el tesla o weber por metro cuadrado, la unidad de flujo es $T \cdot m^2$, o weber (Wb).

Es posible enfatizar el significado cualitativo de la ecuación 20.1 al dibujar primero las líneas de campo magnético, como en la figura 20.3. El número de líneas por unidad de área aumenta conforme aumenta la intensidad del campo. **El valor del flujo magnético es proporcional al número total de líneas que pasan a través de la espira.** Vemos que pasan más líneas a través de la espira cuando su plano es perpendicular al campo, como en la figura 20.3a, de modo que el flujo tiene su valor máximo en dicha posición. Como muestra la figura 20.3b, ninguna línea pasa a través de la espira cuando su plano es paralelo al campo, de modo que en ese caso $\Phi_B = 0$.

FÍSICA APLICADA 20.1 Comparación de flujo

Argentina tiene más área de terreno ($2.8 \times 10^6 \text{ km}^2$) que Groenlandia ($2.2 \times 10^6 \text{ km}^2$). ¿Por qué el flujo magnético del campo magnético de la Tierra es más grande a través de Groenlandia que a través de Argentina?

EXPLICACIÓN Groenlandia (latitud 60° norte a 80° norte) está más cerca de un polo magnético que Argentina (latitud 20° sur a 50° sur), de modo que el campo magné-

tico es más intenso ahí. Esto en sí mismo no es suficiente para concluir que el flujo magnético es mayor, pero la proximidad de Groenlandia a un polo también significa que el ángulo que las líneas de campo magnético forman con la vertical es menor que en Argentina. Como resultado, más líneas de campo penetran la superficie en Groenlandia, a pesar del área ligeramente mayor de Argentina. ■

EJEMPLO 20.1 Flujo magnético

OBJETIVO Calcular el flujo magnético y un cambio en flujo.

PROBLEMA Una espira circular conductora, de 0.250 m de radio, se coloca en el plano xy en un campo magnético uniforme de 0.360 T que apunta en la dirección z positiva, la misma dirección que la normal al plano. **a)** Calcule el flujo magnético a través de la espira. **b)** Suponga que la espira gira en sentido de las manecillas del reloj alrededor del eje x , de modo que la dirección normal ahora apunta en un ángulo de 45.0° con respecto al eje z . Vuelva a calcular el flujo magnético a través de la espira. **c)** ¿Cuál es el cambio en flujo debido a la rotación de la espira?

ESTRATEGIA Después de encontrar el área, sustituya valores en la ecuación para flujo magnético para cada inciso. Debido a que la dirección normal fue elegida para ser la misma dirección que la del campo magnético, el ángulo entre el campo magnético y la normal es inicialmente 0° . Después de la rotación, se convierte en un ángulo de 45° .

SOLUCIÓN

a) Calcule el flujo magnético inicial a través de la espira.

Primero, calcule el área de la espira:

$$A = \pi r^2 = \pi(0.250 \text{ m})^2 = 0.196 \text{ m}^2$$

Sustituya A , B y $\theta = 0^\circ$ en la ecuación 20.1 para encontrar el flujo magnético inicial:

$$\begin{aligned}\Phi_B &= AB \cos \theta = (0.196 \text{ m}^2)(0.360 \text{ T}) \cos(0^\circ) \\ &= 0.0706 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 0.0706 \text{ Wb}\end{aligned}$$

b) Calcule el flujo magnético a través de la espira después de que gira 45.0° en torno al eje x .

Realice las mismas sustituciones como en el inciso a), excepto que el ángulo entre \vec{B} y la normal ahora es $\theta = 45.0^\circ$:

$$\begin{aligned}\Phi_B &= AB \cos \theta = (0.196 \text{ m}^2)(0.360 \text{ T}) \cos(45.0^\circ) \\ &= 0.0499 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 0.0499 \text{ Wb}\end{aligned}$$

c) Encuentre el cambio en el flujo magnético debido a la rotación de la espira.

Reste el resultado del inciso a) del resultado del inciso b):

$$\Delta \Phi_B = 0.0499 \text{ Wb} - 0.0706 \text{ Wb} = -0.0207 \text{ Wb}$$

COMENTARIOS Observe que la rotación de la espira, es responsable por el cambio en el flujo, no cualquier cambio en el campo magnético. Este flujo magnético variable es esencial en el funcionamiento de los motores y generadores eléctricos.

PREGUNTA 20.1 Verdadero o Falso: Si la espira gira en la dirección opuesta por la misma cantidad, el cambio en flujo magnético tiene la misma magnitud pero signo opuesto.

EJERCICIO 20.1 La espira, que giró 45° , gira en sentido de las manecillas del reloj otros 30° , de modo que la normal al plano apunta en un ángulo de 75° con respecto a la dirección del campo magnético. Encuentre a) el flujo magnético a través de la espira cuando $\theta = 75^\circ$ y b) el cambio en flujo magnético durante la rotación de 45° a 75° .

RESPUESTAS a) 0.0183 Wb b) -0.0316 Wb

20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz

La utilidad del concepto de flujo magnético se puede hacer obvia mediante otro experimento simple que demuestra la idea básica de la inducción electromagnética. Considere una espira de alambre conectado a un amperímetro, como en la figura activa 20.4, (página 692). Si un imán se mueve hacia la espira, el amperímetro lee una corriente en una dirección, como en la figura activa 20.4a. Cuando el imán se sostiene estacionario, como en la figura activa 20.4b, el amperímetro lee una corriente en la dirección opuesta, como en la figura activa 20.4c. Si el imán se mantiene estacionario y la espira se mueve hacia o desde el imán, el amperímetro también lee una corriente. A partir de estas observaciones, se puede concluir que **en el circuito se establece una corriente en tanto haya un movimiento relativo entre el imán y la espira**. Los mismos resultados experimentales se encuentran si la espira se mueve o si el imán se mueve. A la corriente se le llama **corriente inducida** porque se produce mediante una **fem inducida**.

Este experimento es similar al experimento de Faraday que se estudió en la sección 20.1. En cada caso se induce una fem en un circuito cuando el flujo magnético a través del circuito cambia con el tiempo. Se hace evidente que la fem inducida instantánea en un circuito es igual al negativo de la razón de cambio del flujo magnético con respecto al tiempo a través del circuito. Ésta es la **ley de inducción magnética de Faraday**.

Tip 20.1 La corriente inducida requiere un cambio en flujo magnético

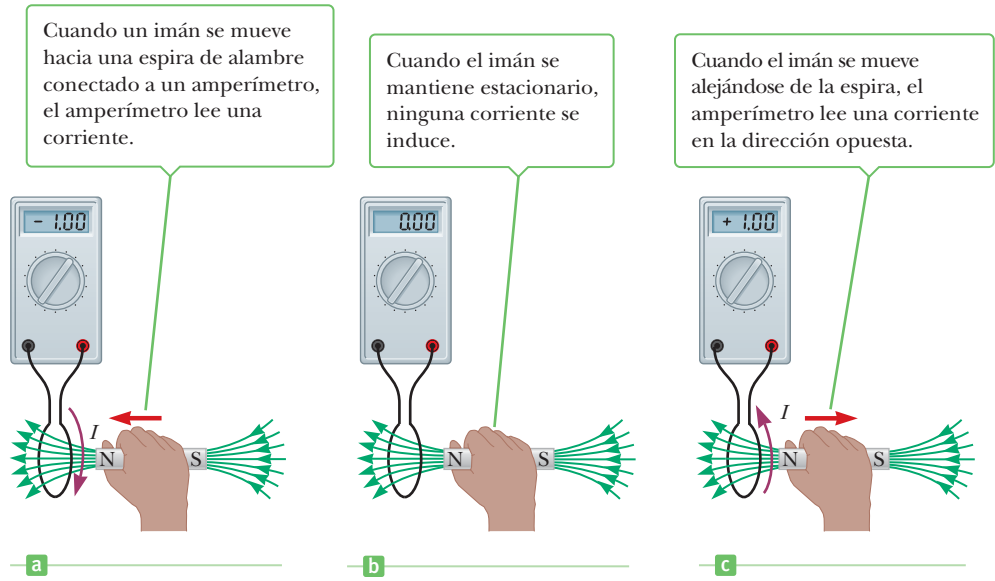
La existencia de flujo magnético a través de un área no es suficiente para crear una fem inducida. Debe ocurrir un *cambio* en el flujo magnético a través de cierto intervalo Δt para inducir una fem.

Figura activa 20.4

Un simple experimento que muestra que se induce una corriente en un circuito cuando el imán se mueve hacia o desde la espira.

Tip 20.2 Hay dos campos magnéticos a considerar

Al aplicar la ley de Lenz se consideran *dos* campos magnéticos. El primero es el campo magnético externo que induce la corriente en el lazo conductor. El segundo es el campo magnético producido por la corriente inducida en el lazo.



Ley de Faraday ▶

Si un circuito contiene N espiras firmemente devanadas y el flujo magnético a través de cada espira cambia por la cantidad $\Delta\Phi_B$ durante el intervalo Δt , la fem inducida promedio en el circuito durante el tiempo Δt es

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \quad [20.2]$$

Puesto que $\Phi_B = BA \cos \theta$, un cambio de alguno de los factores B , A o θ con el tiempo produce una fem. En las siguientes secciones se explora el efecto de un cambio en cada uno de estos factores. El signo menos en la ecuación 20.2 se incluye para indicar la polaridad de la fem inducida. Esta polaridad determina en cuál de las dos direcciones fluirá la corriente en una espira, una dirección dada por la **ley de Lenz**:

La corriente causada por la fem inducida viaja en la dirección que crea un campo magnético con el flujo que se opone al cambio en el flujo original a través del circuito.

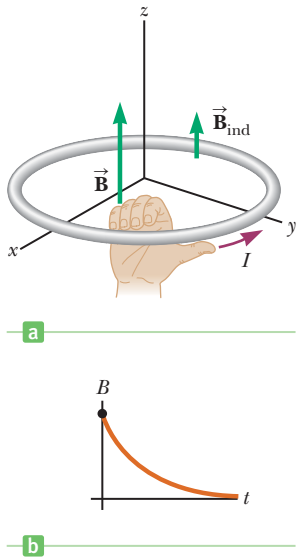


Figura 20.5 a) El campo magnético \vec{B} se vuelve menor con el tiempo, lo que reduce el flujo, de modo que se induce corriente en una dirección que crea un campo magnético inducido \vec{B}_{ind} que se opone al cambio en flujo magnético. b) Gráfica de la magnitud del campo magnético como función del tiempo.

La ley de Lenz dice que si el flujo magnético a través de una espira se hace más positivo, por decir, entonces la fem inducida crea una corriente y campo magnético asociado que produce flujo magnético negativo. Algunos creen que este “contracampo magnético” creado por la corriente inducida, llamado \vec{B}_{ind} (“ind” por inducido), siempre apuntará en una dirección opuesta al campo magnético aplicado \vec{B} , ¡pero que sólo es cierto la mitad del tiempo! La figura 20.5a muestra un campo que penetra una espira. La gráfica en la figura 20.5b muestra que la magnitud del campo magnético \vec{B} se reduce con el tiempo, lo que significa que el flujo de \vec{B} se reduce con el tiempo, de modo que el campo inducido \vec{B}_{ind} en realidad estará en la misma dirección que \vec{B} . En efecto, \vec{B}_{ind} “apuntala” al campo \vec{B} , lo que frena la pérdida de flujo a través de la espira.

La dirección de la corriente en la figura 20.5a se puede determinar mediante la regla de la mano derecha número 2: apunte su pulgar derecho en la dirección que hará que los dedos de su mano derecha se enrollen en la dirección del campo inducido \vec{B}_{ind} . En este caso, dicha dirección es contra las manecillas del reloj; con su pulgar derecho apuntando en la dirección de la corriente, sus dedos se enrollan afuera de la espira y en torno y **arriba a través del interior de la espira**. Recuerde: dentro de la espira es donde es importante que apunte el campo magnético inducido.

■ Examen rápido

20.1 La figura 20.6 es una gráfica de la magnitud B frente al tiempo para un campo magnético que pasa a través de una espira fija y se orienta perpendicular al plano de la espira. Clasifique, de mayor a menor, las magnitudes de la fem que se genera en la espira en los tres instantes que se indican.

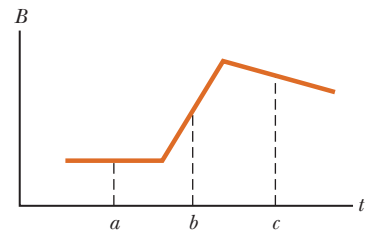


Figura 20.6 (Examen rápido 20.1)

■ EJEMPLO 20.2 Faraday y Lenz al rescate

OBJETIVO Calcular una fem inducida y la corriente con la ley de Faraday y aplicar la ley de Lenz cuando el campo magnético cambia con el tiempo.

PROBLEMA Una bobina con 25 espiras de alambre se enrolla sobre un marco con una sección transversal cuadrada de 1.80 cm de lado. Cada espira tiene la misma área, igual a la del marco y la resistencia total de la bobina es 0.350Ω . Un campo magnético uniforme aplicado es perpendicular al plano de la bobina, como en la figura 20.7. a) Si el campo cambia de manera uniforme desde 0.00 T hasta 0.500 T en 0.800 s, ¿cuál es la fem inducida en la bobina mientras cambia en campo? Encuentre b) la magnitud y c) la dirección de la corriente inducida en la bobina mientras cambia el campo.

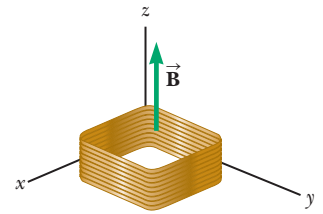


Figura 20.7 (Ejemplo 20.2)

ESTRATEGIA El inciso a) requiere la sustitución en la ley de Faraday, ecuación 20.2. Se proporciona la información necesaria, excepto $\Delta\Phi_B$, el cambio en el flujo magnético durante el tiempo transcurrido. Utilice la dirección normal para coincidir con el eje z positivo, calcule los flujos magnéticos inicial y final con la ecuación 20.1, encuentre la diferencia y junte todos los términos en la ley de Faraday. Entonces, la corriente se puede encontrar con la ley de Ohm y su dirección con la ley de Lenz.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fem inducida en la bobina.

Para calcular el flujo, usted necesita el área de la bobina:

El flujo magnético $\Phi_{B,i}$ a través de la bobina en $t = 0$ es cero porque $B = 0$. Calcule el flujo en $t = 0.800$ s:

Calcule el cambio en el flujo magnético a través de la sección transversal de la bobina durante el intervalo de 0.800 s:

Sustituya en la ley de inducción de Faraday para encontrar la fem inducida en la bobina:

b) Encuentre la magnitud de la corriente inducida en la bobina.

Sustituya la diferencia de voltaje y la resistencia en la ley de Ohm, donde $\Delta V = \mathcal{E}$:

c) Encuentre la dirección de la corriente inducida en la bobina.

El campo magnético aumenta a través de la espira, en la misma dirección que la normal al plano; por lo tanto, el flujo es positivo y también aumenta. Un campo magnético inducido que apunta hacia abajo creará flujo negativo, que se opone al cambio. Si apunta su pulgar derecho en la dirección

$$A = L^2 = (0.0180 \text{ m})^2 = 3.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\Phi_{B,f} = BA \cos \theta = (0.500 \text{ T})(3.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \cos (0^\circ) = 1.62 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Delta\Phi_B = \Phi_{B,f} - \Phi_{B,i} = 1.62 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -(25 \text{ vueltas}) \left(\frac{1.62 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{0.800 \text{ s}} \right) = -5.06 \times 10^{-3} \text{ V}$$

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{5.06 \times 10^{-3} \text{ V}}{0.350 \Omega} = 1.45 \times 10^{-2} \text{ A}$$

de las manecillas del reloj a lo largo de la espira, sus dedos se enrollan a través de la espira, que es la dirección correcta para el contracampo magnético. En consecuencia, la corriente debe proceder en una dirección en sentido de las manecillas del reloj.

COMENTARIOS La ley de Lenz se puede manejar mejor al bosquejar primero un diagrama.

PREGUNTA 20.2 ¿Qué fem promedio se induce en la espira si, en vez de ello, el campo magnético cambia uniformemente desde 0.500 T hasta 0? ¿Cómo afectaría esto la corriente inducida?

(continúa)

EJERCICIO 20.2 Suponga que el campo magnético cambia uniformemente desde 0.500 T hasta 0.200 T en los siguientes 0.600 s. Calcule a) la fem inducida en la bobina y b) la magnitud y dirección de la corriente inducida.

RESPUESTAS a) 4.05×10^{-3} V b) 1.16×10^{-2} A, contra las manecillas del reloj

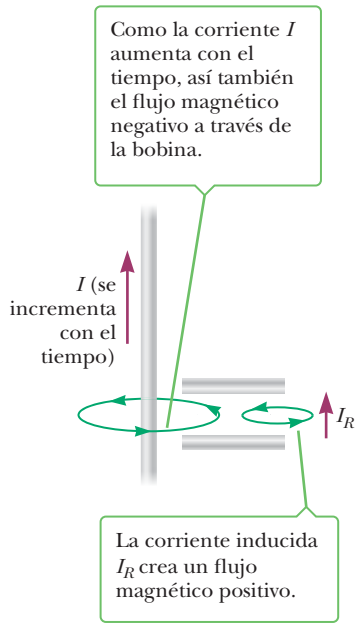


Figura 20.8 (Ejemplo 1 de la ley de Lenz) La corriente I aumenta en magnitud con el tiempo, fortaleciendo el campo magnético que circula alrededor del cable.

Encontrar la dirección de la corriente inducida

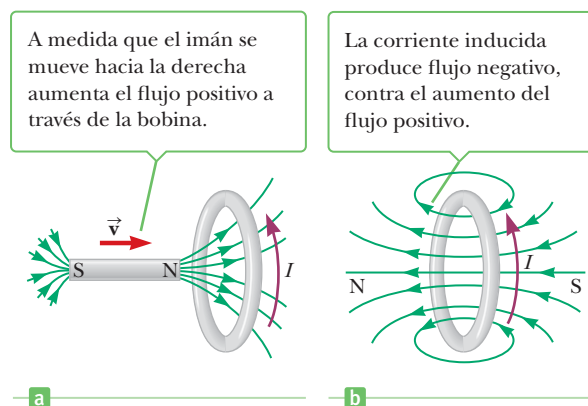
Encontrar la dirección de la corriente inducida puede ser complicado. Los siguientes tres ejemplos ilustran cómo se encuentra la dirección utilizando la ley de Lenz.

Ejemplo 1 de la ley de Lenz La corriente en el cable de la figura 20.8 es cada vez mayor en la dirección indicada. Vamos a escoger la dirección normal hacia afuera de la página para que los vectores de campo magnético que salen de la página produzcan un flujo magnético positivo. El campo magnético creado por la corriente I que circula por el alambre, entra en la página por el lado derecho del cable largo en la región de la bobina rectangular y sale de la página por el lado izquierdo del alambre recto largo. Por lo tanto, el flujo magnético a través de la bobina rectangular debido a la corriente I es negativo. A causa de que la corriente aumenta hacia arriba de la página, el campo magnético es cada vez más fuerte, incrementando la magnitud del flujo negativo a través de la bobina rectangular. Por la ley de Lenz, la corriente inducida en la bobina produce flujo positivo, contra el aumento del flujo negativo. Se requiere un campo magnético inducido apuntando hacia afuera de la página a través de la bobina. Mentalmente enrolle los dedos de la mano derecha alrededor de la rama derecha de la bobina rectangular, y observe que los dedos apuntan hacia arriba de la página a través de la bobina, como se requiere. El pulgar derecho, por su parte, señala la página, indicando la dirección de la corriente en esa parte de la bobina. Por lo tanto, la corriente inducida en la bobina está en sentido contrario.

Ejemplo 2 de la ley de Lenz En la figura 20.9a, el polo norte del imán se mueve hacia la bobina. Si la dirección normal se elige a la derecha, entonces el flujo magnético es a través de la bobina, debido a que el imán es positivo y aumenta con el tiempo. Un flujo negativo a la izquierda, por lo tanto, debe ser creado por la corriente inducida en la bobina, por lo que el campo magnético inducido también debe apuntar a la izquierda como se indica en la figura 20.9b. Imagine que enrolla los dedos de la mano derecha alrededor de la bobina para que apunten a través de ésta a la izquierda. El pulgar derecho apunta hacia arriba, lo que indica que la corriente inducida es contraria al giro de las manecillas del reloj, vista desde el extremo izquierdo de la espira.

Ejemplo 3 de la ley de Lenz Considere la posibilidad de una bobina de alambre colocada cerca de un solenoide en la figura 20.10a. El cable se enrolla de tal manera como para crear un polo sur magnético en el extremo derecho cuando el interruptor se cierra en la figura 20.10b. Elija la dirección normal a la izquierda. Cuando el interruptor está cerrado, la corriente en el solenoide comienza a aumentar y el flujo magnético a través de la bobina es positivo y creciente con el tiempo. Por lo tanto, la corriente inducida en la

Figura 20.9 (Ejemplo 2 de la ley de Lenz) a) El polo norte del imán se acerca a la bobina de la izquierda, con la dirección normal hacia la derecha. b) Se induce una corriente en la bobina.



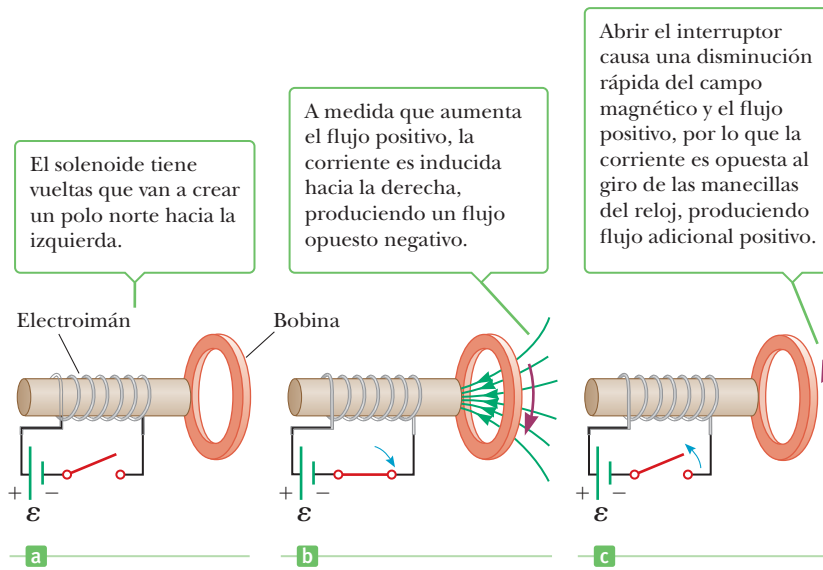


Figura 20.10 (Ejemplo 3 de la ley de Lenz) a) Las vueltas del solenoide crean un campo magnético con el polo norte apuntando a la izquierda, que también se toma como la dirección normal. b) Cuando el interruptor está cerrado, el flujo positivo comienza a incrementarse a través de la bobina y las líneas de campo convergen en el polo sur del solenoide. c) Abrir el interruptor causa que el campo del solenoide disminuya rápidamente.

bobina debe crear flujo magnético negativo para contrarrestar el aumento del flujo positivo creado por la corriente en el solenoide. Esto requiere un campo magnético inducido dirigido hacia la derecha a través de la bobina. Gire la mano derecha para que el pulgar apunte hacia abajo, así los dedos se pueden enroscar alrededor de la bobina y hacia la derecha. La corriente inducida en la bobina sigue la dirección del pulgar derecho, que es horario visto desde el extremo izquierdo de la bobina. Cuando el interruptor se abre de nuevo en la figura 20.10c la corriente en el solenoide cambia de dirección, porque el campo magnético y el flujo positivo comienzan a disminuir. En sentido contrario a las manecillas del reloj, la corriente inducida crea flujo positivo a través de la bobina, opuesto a la disminución del flujo positivo.

En estos tres ejemplos, la idea fundamental es que un flujo cambiante provoca una corriente inducida, y el correspondiente campo magnético inducido produce flujo opuesto al cambio en el flujo de acuerdo con la ley de Lenz. Cuando el flujo deja de cambiar, se detiene la corriente inducida. Aunque en cada caso el flujo magnético cambia a causa de un campo magnético variable, las corrientes inducidas pueden resultar incluso cuando el campo magnético es constante, siempre que el flujo cambie a través de las espiras. Este hecho se pondrá de manifiesto cuando se hable de fem de movimiento en la sección 20.3 y generadores en la sección 20.4.

■ Examen rápido

20.2 Un imán de barra cae hacia el centro de una espira de alambre, con el polo norte orientado hacia abajo. Visto desde el mismo lado de la espira que el imán, conforme el polo norte se aproxima a la espira, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida? a) en sentido de las manecillas del reloj, b) cero, c) contra las manecillas del reloj, d) a lo largo de la longitud del imán.

20.3 Dos espiras circulares están lado a lado y yacen en el plano xy . Se cierra un interruptor y comienza una corriente contra las manecillas del reloj en la espira izquierda, visto desde un punto en el eje z positivo que pasa a través del centro de la espira. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto para la espira a la derecha? a) La corriente sigue siendo cero. b) Una corriente inducida se mueve contra las manecillas del reloj. c) Una corriente inducida se mueve en sentido de las manecillas del reloj.

El interruptor de fallo a tierra (GFI) es un interesante dispositivo de seguridad que protege a las personas contra choque eléctrico cuando tocan electrodomésticos y herramientas eléctricas. Su operación utiliza la ley de Faraday. La figura 20.11 muestra las partes esenciales de un interruptor de fallo a tierra. El alambre 1 va del tomacorriente en la pared al aparato a proteger y el alambre 2 va de regreso del aparato al tomacorriente en la pared. Un

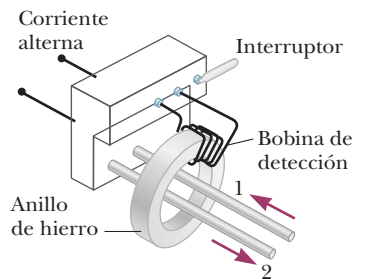


Figura 20.11 Componentes esenciales de un interruptor de fallo a tierra (contenido de la caja gris en la figura 20.12a, página 696). En las casas más recientes, tales dispositivos se construyen directamente en los tomacorrientes de pared. El propósito de la bobina de detección y del interruptor es cortar la corriente antes de que se genere daño.

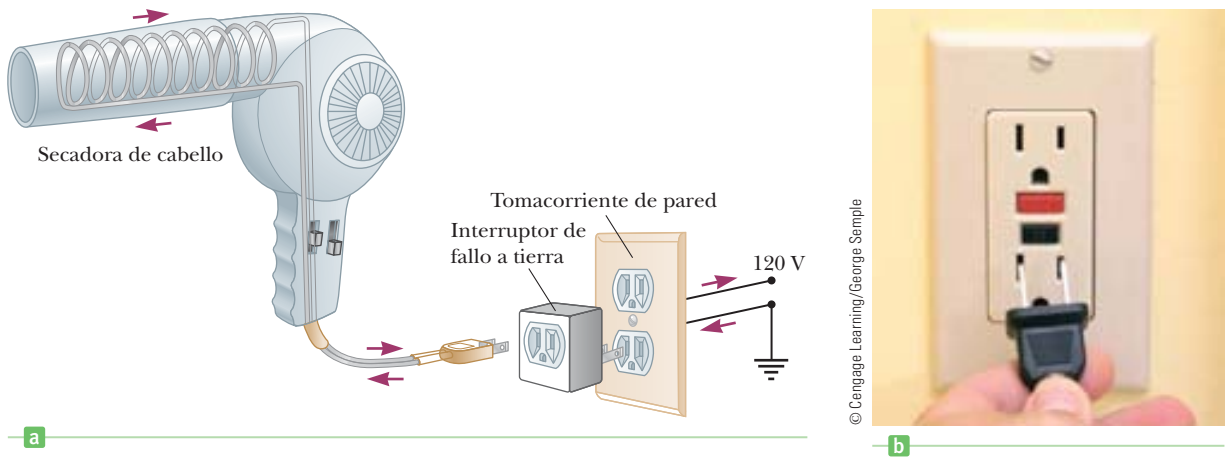


Figura 20.12 a) Esta secadora de cabello se conectó en un interruptor de fallo a tierra que a su vez se conecta en un tomacorriente sin protección. b) Probablemente has visto este tipo de interruptor de fallo a tierra en el baño de un hotel, donde los huéspedes con frecuencia usan las secadoras de cabello y las rasuradoras eléctricas justo afuera de la ducha o tocando una tubería de agua, lo que proporciona una vía fácil a tierra en el evento de un cortocircuito.

APLICACIÓN

Interruptores de fallo a tierra

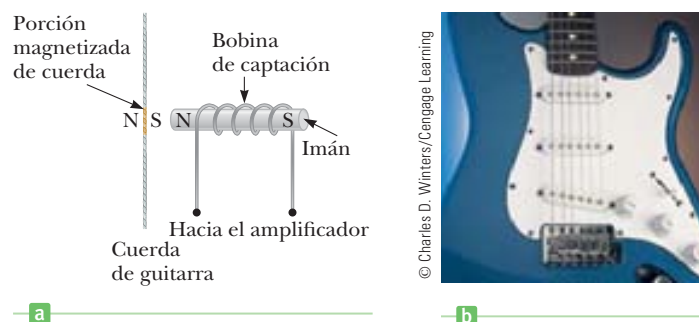
anillo de hierro rodea los dos alambres para confinar el campo magnético que establece cada alambre. Una bobina de detección, que puede activar un interruptor cuando ocurre un cambio en flujo magnético, se enrolla en torno a una parte del anillo de hierro. Puesto que las corrientes en los alambres están en direcciones opuestas, el campo magnético neto a través de la bobina de detección debido a las corrientes es cero. Sin embargo, si ocurre un cortocircuito en el aparato, de modo que no hay corriente de retorno, el campo magnético neto a través de la bobina de detección ya no es cero. Un cortocircuito puede ocurrir si, por ejemplo, uno de los alambres pierde su aislamiento, lo que proporciona una ruta a través de usted hacia tierra si sucede que toca el aparato y usted está aterrizado como en la figura 18.23a. Puesto que la corriente es alterna, el flujo magnético a través de la bobina de detección cambia con el tiempo, lo que produce un voltaje inducido en la bobina. Este voltaje inducido se usa para disparar un interruptor, lo que detiene la corriente muy rápido (en aproximadamente 1 ms) antes de llegar a un nivel que puede ser dañino para la persona que usa el aparato. Un interruptor de fallo a tierra proporciona protección más rápida y más completa incluso que la combinación de toma de tierra y el interruptor que se muestra en la figura 18.23b. Por esta razón, los interruptores de fallo a tierra por lo general se encuentran en baños, donde la electricidad plantea un riesgo para las personas. (Véase la figura 20.12.)

APLICACIÓN

Bobinas de captación de guitarra eléctrica

Otra interesante aplicación de la ley de Faraday es la producción de sonido en una guitarra eléctrica. Una cuerda que vibra induce un fem en una bobina (figura 20.13). La bobina de captación se coloca cerca a una cuerda de guitarra en vibración, que está hecha de un metal que se puede magnetizar. El imán permanente dentro de la bobina magnetiza la porción de la cuerda más cercana a la bobina. Cuando la cuerda de la guitarra vibra a cierta frecuencia, su segmento magnetizado produce un flujo magnético variable a través de la bobina de captación. El flujo variable induce un voltaje en la bobina; el voltaje se alimenta a un amplificador. La salida del amplificador se envía a las bocinas, lo que produce las ondas sonoras que usted escucha.

Figura 20.13 a) En una guitarra eléctrica, la cuerda que vibra induce un voltaje en la bobina de captación. b) Muchas captoras permiten que la vibración se detecte desde diferentes porciones de la cuerda.



Cortesía de PediLink Pediatric Healthcare Resources, Newport Beach, CA



Figura 20.14 Este bebé viste un monitor diseñado para alertar a los cuidadores si la respiración se detiene. Observe los dos alambres unidos a lados opuestos del pecho.

El síndrome de muerte súbita del lactante, o SMSL, es una afección devastadora en la que un bebé súbitamente deja de respirar durante el sueño sin una causa aparente. En ocasiones se utiliza un tipo de dispositivo de monitoreo, llamado monitor de apnea, que alerta a los cuidadores del cese de la respiración. El dispositivo usa corrientes inducidas, como se muestra en la figura 20.14. Una bobina de alambre unida a un lado del pecho porta una corriente alterna. El flujo magnético variable producido por esta corriente pasa a través de una bobina de captación unida al lado opuesto del pecho. La expansión y contracción del pecho provocada por la respiración o el movimiento cambian la intensidad del voltaje inducido en la bobina de captación. Sin embargo, si la respiración se detiene, el patrón del voltaje inducido se estabiliza y circuitos externos que monitorean el voltaje activan una alarma para que el cuidador, después de una pausa momentánea, se asegure de que en realidad existe un problema.

BIO APLICACIÓN

Monitores de apnea

20.3 Fem de movimiento

En la sección 20.2 se consideran fem inducidas en un circuito cuando el campo magnético cambia con el tiempo. En esta sección se describe una aplicación particular de la ley de Faraday en la que se produce una llamada **fem de movimiento**. Es la fem inducida en un conductor que se mueve a través de un campo magnético.

Considere primero un conductor recto de longitud ℓ que se mueve con velocidad constante a través de un campo magnético uniforme que se dirige hacia el papel, como en la figura 20.15. Por simplicidad, suponga que el conductor se mueve en una dirección perpendicular al campo. Una fuerza magnética de magnitud $F_m = qvB$, que se dirige hacia abajo, actúa sobre los electrones en el conductor. Debido a esta fuerza magnética, los electrones libres se mueven hacia el extremo más bajo del conductor y se acumulan ahí, lo que deja una carga positiva neta en el extremo superior. Como resultado de esta separación de carga, en el conductor se produce un campo eléctrico. La carga en los extremos se acumula hasta que la fuerza magnética descendente qvB se equilibra mediante la fuerza eléctrica hacia arriba qE . En este punto, la carga deja de fluir y la condición para el equilibrio requiere que

$$qE = qvB \quad \text{o} \quad E = vB$$

Puesto que el campo eléctrico es uniforme, el campo producido en el conductor se relaciona con la diferencia de potencial a través de los extremos mediante $\Delta V = E\ell$, lo que produce

$$\Delta V = E\ell = B\ell v \quad [20.3]$$

Dado que existe un exceso de carga positiva en el extremo superior del conductor y un exceso de carga negativa en el extremo inferior, el extremo superior está a un potencial más alto que el extremo inferior. A través de un conductor existe una diferencia de potencial en tanto se mueve a través de un campo. Si el movimiento se invierte, la polaridad de la diferencia de potencial también se invierte.

Una situación más interesante ocurre si el conductor en movimiento es parte de una trayectoria conductora cerrada. Esta situación es particularmente útil para ilustrar cómo

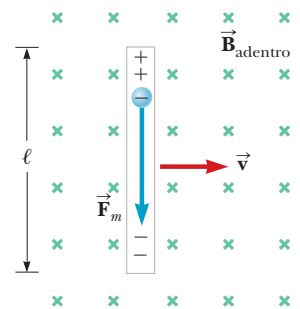


Figura 20.15 Conductor recto de longitud ℓ que se mueve con velocidad \vec{v} a través de un campo magnético uniforme \vec{B} perpendicular a \vec{v} . El vector \vec{F}_m es la fuerza magnética sobre un electrón en el conductor. Entre las terminales de la barra se induce una fem de $B\ell v$.

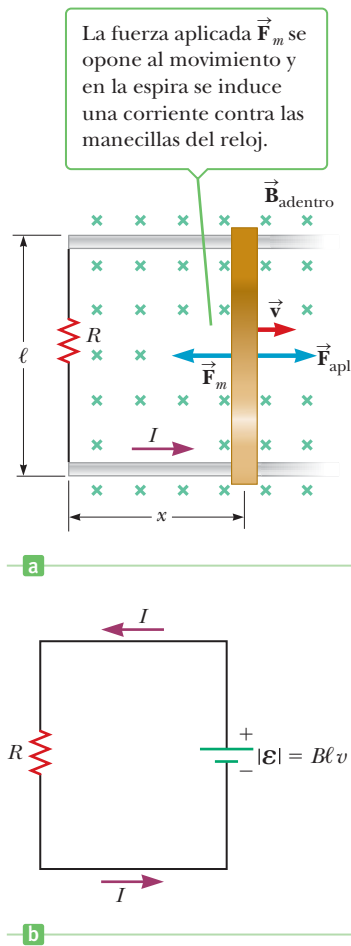
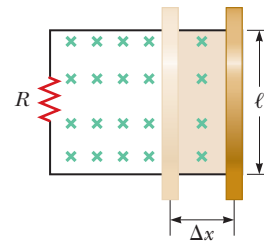


Figura 20.17 Conforme la barra se mueve hacia la derecha, el área que recorre la espira aumenta por la cantidad $\ell\Delta x$ y el flujo magnético a través de la espira aumenta por $B\ell\Delta x$.



el área variable que recorre una espira induce una corriente en un circuito cerrado, lo que se describe mediante la ley de Faraday. Considere un circuito que consiste en una barra conductora de longitud ℓ , que se desliza a lo largo de dos rieles conductores paralelos fijos, como en la figura activa 20.16a. Por simplicidad, suponga que la barra en movimiento tiene resistencia cero y la parte estacionaria del circuito tiene resistencia constante R . Un campo magnético uniforme y constante \mathbf{B} se aplica perpendicular al plano del circuito. Conforme la barra se jala hacia la derecha con velocidad \vec{v} bajo la influencia de una fuerza aplicada \vec{F}_{apl} , una fuerza magnética a lo largo de la longitud de la barra actúa sobre las cargas libres en la barra. Esta fuerza a su vez establece una corriente inducida porque las cargas tienen libertad para moverse en una trayectoria conductora cerrada. En este caso, el flujo magnético variable a través de la espira y la correspondiente fem inducida a través de la barra en movimiento surge del cambio en el área que recorre la espira conforme la barra se mueve a través del campo magnético. Debido a que el flujo dentro de la página aumenta, por la ley de Lenz, la corriente circula inducida en sentido contrario, produciendo el flujo que sale de la página que se opone al cambio.

Suponga que la barra se mueve una distancia Δx en el tiempo Δt , como se muestra en la figura 20.17. El aumento en flujo $\Delta\Phi_B$ a través de la espira en dicho tiempo es la cantidad de flujo que ahora pasa a través de la porción del circuito que tiene área $\ell \Delta x$:

$$\Delta\Phi_B = BA = B\ell \Delta x$$

Con la ley de Faraday, y al notar que existe una espira ($N = 1$), encontramos que la magnitud de la fem inducida es

$$|\mathcal{E}| = \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = B\ell \frac{\Delta x}{\Delta t} = B\ell v \quad [20.4]$$

Esta fem inducida con frecuencia se llama **fem de movimiento** porque surge del movimiento de un conductor a través de un campo magnético.

Más aún, si la resistencia del circuito es R , la magnitud de la corriente inducida en el circuito es

$$I = \frac{|\mathcal{E}|}{R} = \frac{B\ell v}{R} \quad [20.5]$$

La figura activa 20.16b muestra el diagrama de circuito equivalente para este ejemplo.

Figura activa 20.16 a) Barra conductora deslizando con velocidad \vec{v} a lo largo de dos rieles conductores bajo la acción de una fuerza aplicada \vec{F}_{apl} b) Circuito equivalente al de a).

FÍSICA APLICADA 20.2 Catapulta espacial

Aplicar una fuerza sobre la barra resultará en una fem inducida en el circuito que se muestra en la figura activa 20.16. Suponga que se remueve el campo magnético externo en el diagrama y el resistor se sustituye con una fuente de alto voltaje y un interruptor, como en la figura activa 20.18. ¿Qué sucederá cuando el interruptor se cierre? ¿La barra se moverá, e importa de qué forma se conecte la fuente de alto voltaje?

EXPLICACIÓN Suponga que la fuente es capaz de establecer alta corriente. Entonces las dos barras conductoras horizontales crearán un fuerte campo magnético en el área entre ellas, dirigido hacia la página. (La barra móvil también crea un campo magnético, pero este campo no puede

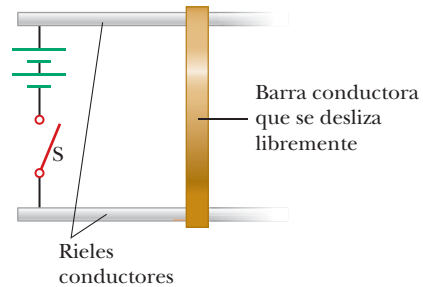


Figura 20.18 (Física aplicada 20.2)

ejercer fuerza sobre la barra.) Puesto que la barra en movimiento porta una corriente hacia abajo, sobre la barra se ejerce una fuerza magnética, dirigida hacia la derecha. Por lo tanto, la barra acelera a lo largo de los rieles alejándose de la fuente de poder. Si la polaridad de la potencia se invirtiera, el campo magnético estaría afuera de la página, la corriente en la barra sería hacia arriba y la fuerza sobre la barra todavía se dirigiría hacia la derecha. La fuerza $B\ell$ que ejerce un campo magnético de acuerdo con la ecuación 19.6 hace que la barra acelere alejándose de la fuente de voltaje. Algunos estudios mostraron que es posible lanzar cargas al espacio con esta tecnología. (Éste es el principio

operativo de un cañón de riel.) Con la tecnología actual se pueden obtener aceleraciones muy grandes, con cargas que se aceleran a una velocidad de muchos kilómetros por segundo en una fracción de segundo. Esta aceleración es más grande de la que pueden tolerar los humanos.

Los cañones de riel se han propuesto como sistemas de propulsión para mover asteroides hacia órbitas más útiles. El material del asteroide se podría minar y lanzarse de la superficie mediante un cañón de riel, que actuaría como un motor de cohete, lo que modificaría la velocidad y en consecuencia la órbita del asteroide. Algunos asteroides contienen billones de dólares en metales valiosos. ■

■ Examen rápido

20.4 Una barra metálica horizontal orientada de este a oeste se suelta recto hacia abajo en una ubicación donde el campo magnético de la Tierra es hacia el norte. Como resultado, entre los extremos se genera una fem. ¿Cuál extremo tiene carga positiva? a) el extremo este, b) el extremo oeste, c) ningún extremo porta carga.

20.5 Su intención es mover una espira rectangular de alambre en una región de campo magnético uniforme con una velocidad dada de modo que induzca una fem en la espira. El plano de la espira debe permanecer perpendicular a las líneas de campo magnético. ¿En qué orientación debe sostener la espira mientras lo mueve en la región con el campo magnético para generar la fem más grande? a) con la dimensión larga de la espira paralela al vector velocidad, b) con la dimensión corta de la espira paralela al vector velocidad, c) de cualquier forma, porque la fem es la misma sin importar la orientación.

■ EJEMPLO 20.3 Una diferencia de potencial inducida a través de las alas de un avión

OBJETIVO Encontrar la fem inducida por el movimiento a través de un campo magnético.

PROBLEMA Un avión con una envergadura de 30.0 m vuela hacia el norte en una ubicación donde la componente descendente del campo magnético de la Tierra es 0.600×10^{-4} T. También existe una componente que apunta hacia el norte que tiene una magnitud de 0.470×10^{-4} T. **a)** Encuentre la diferencia en potencial entre las puntas de las alas cuando la velocidad del avión es 2.50×10^2 m/s. **b)** ¿Cuál punta de ala es positiva?

ESTRATEGIA Puesto que el avión vuela hacia la norte, la componente hacia el norte del campo magnético no tendrá efecto alguno sobre la fem inducida. La fem inducida a través del ala es producto exclusivo del componente descendente del campo magnético de la Tierra. Sustituya las cantidades dadas en la ecuación 20.4. Use la regla de la mano derecha número 1 para encontrar la dirección en que la fuerza magnética impulsaría las cargas positivas.

SOLUCIÓN

a) Calcule la diferencia en potencial a través de las puntas de las alas.

Escriba la ecuación de fem de movimiento y sustituya las cantidades dadas:

b) ¿Cuál punta de ala es positiva?

Aplique la regla de la mano derecha número 1:

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= B\ell v = (0.600 \times 10^{-4} \text{ T})(30.0 \text{ m})(2.50 \times 10^2 \text{ m/s}) \\ &= 0.450 \text{ V}\end{aligned}$$

Apunte los dedos de su mano derecha al norte, en la dirección de la velocidad, y enróllelos hacia abajo, en la dirección del campo magnético. Su pulgar apunta al oeste. Por lo tanto, la punta del ala oeste es positiva.

COMENTARIOS Una fem inducida como ésta puede causar problemas en una aeronave.

PREGUNTA 20.3 ¿En qué direcciones se ejercen fuerzas magnéticas sobre electrones en el avión metálico si vuela hacia el oeste? a) norte b) sur c) este d) oeste e) arriba f) abajo

(continúa)

EJERCICIO 20.3 Suponga que el campo magnético en una región dada del espacio es paralelo a la superficie de la Tierra, apunta al norte y tiene 1.80×10^{-4} T de magnitud. Un cable metálico unido a una estación espacial se estira radialmente hacia afuera 2.50 km. a) Estime la diferencia de potencial que se desarrolla entre los extremos del cable si viaja hacia el este alrededor de la Tierra a 7.70×10^3 m/s. b) ¿Cuál extremo del cable es positivo, el extremo inferior o el extremo superior?

RESPUESTAS a) 3.47×10^3 V b) El extremo superior es positivo.

■ EJEMPLO 20.4 ¿Dónde está la fuente de energía?

OBJETIVO Usar fem de movimiento para encontrar una fem inducida y una corriente.

PROBLEMA a) La barra deslizante en la figura activa 20.16a tiene una longitud de 0.500 m y se mueve a 2.00 m/s en un campo magnético de 0.250 T de magnitud. Con el concepto de fem de movimiento, encuentre el voltaje inducido en la barra en movimiento. b) Si la resistencia en el circuito es 0.500Ω , encuentre la corriente en el circuito y la potencia entregada al resistor. (*Nota:* En este caso la corriente va contra las manecillas del reloj alrededor de la espira.) c) Calcule la fuerza magnética sobre la barra. d) Use los conceptos de trabajo y potencia para calcular la fuerza aplicada.

ESTRATEGIA Para el inciso a), sustituya en la ecuación 20.4 para la fem de movimiento. Una vez que encuentre la fem, la sustitución en la ley de Ohm produce la corriente. En el inciso c), use la ecuación 19.6 para la fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente. En el inciso d), use el hecho de que la potencia disipada por el resistor, multiplicada por el tiempo transcurrido, debe ser igual al trabajo realizado por la fuerza aplicada.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fem inducida con el concepto de fem de movimiento.

Sustituya en la ecuación 20.4 para encontrar la fem inducida:

$$\mathcal{E} = Blv = (0.250 \text{ T})(0.500 \text{ m})(2.00 \text{ m/s}) = 0.250 \text{ V}$$

b) Encuentre la corriente inducida en el circuito y la potencia disipada por el resistor.

Sustituya la fem y la resistencia en la ley de Ohm para encontrar la corriente inducida:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{0.250 \text{ V}}{0.500 \Omega} = 0.500 \text{ A}$$

Sustituya $I = 0.500$ A y $\mathcal{E} = 0.250$ V en la ecuación 17.8 para encontrar la potencia disipada por el resistor de 0.500Ω :

$$P = I\Delta V = (0.500 \text{ A})(0.250 \text{ V}) = 0.125 \text{ W}$$

c) Calcule la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre la barra.

Sustituya valores para I , B y ℓ en la ecuación 19.6, con $\sin \theta = \sin(90^\circ) = 1$, para encontrar la magnitud de la fuerza:

$$F_m = IB\ell = (0.500 \text{ A})(0.250 \text{ T})(0.500 \text{ m}) = 6.25 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Aplique la regla de la mano derecha número 2 para encontrar la dirección de la fuerza:

Apunte los dedos de su mano derecha en la dirección de la corriente positiva, luego enróllelos en la dirección del campo magnético. Su pulgar apunta en la dirección x negativa.

d) Encuentre el valor de F_{apl} , la fuerza aplicada.

Igualé el trabajo realizado por la fuerza aplicada con la potencia disipada por el tiempo transcurrido:

$$W_{\text{apl}} = F_{\text{apl}}d = P\Delta t$$

Resuelva para F_{apl} y sustituya $d = v\Delta t$:

$$F_{\text{apl}} = \frac{P\Delta t}{d} = \frac{P\Delta t}{v\Delta t} = \frac{P}{v} = \frac{0.125 \text{ W}}{2.00 \text{ m/s}} = 6.25 \times 10^{-2} \text{ N}$$

COMENTARIOS El inciso d) podría resolverse con la segunda ley de Newton para un objeto en equilibrio: dos fuerzas actúan horizontalmente sobre la barra y la aceleración de la barra es cero, así que las fuerzas deben ser iguales en magnitud y opuestas en dirección. Observe la concordancia entre las respuestas para F_m y F_{apl} , a pesar de la diferencia entre los conceptos usados.

PREGUNTA 20.4 Suponga que se remueven la fuerza aplicada y el campo magnético en la figura 20.16a, pero una batería crea una corriente en la misma dirección que se indica. ¿Qué ocurre con la barra?

EJERCICIO 20.4 Suponga que la corriente súbitamente aumenta a 1.25 A en la misma dirección que antes debido a un aumento en la velocidad de la barra. Encuentre a) la fem inducida en la barra y b) la nueva velocidad de la barra.

RESPUESTAS a) 0.625 V b) 5.00 m/s

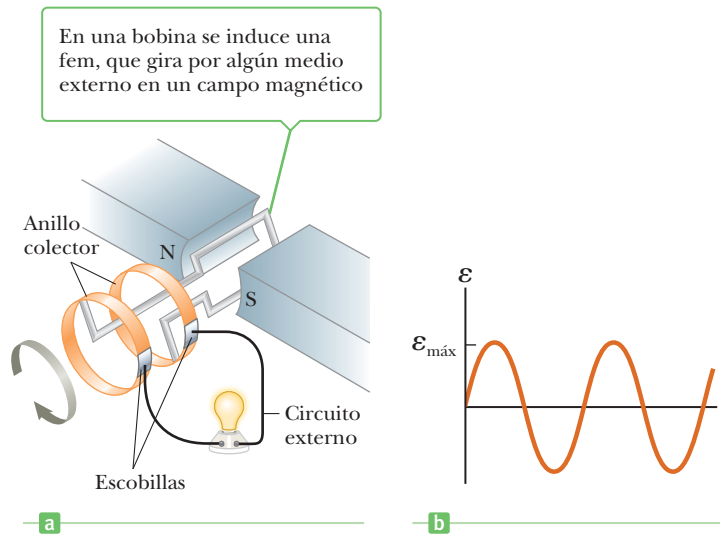


Figura activa 20.19

a) Diagrama esquemático de un generador CA. En una bobina se induce una fem, que gira por algún medio externo en un campo magnético. b) Gráfica de la fem alterna inducida en la espira frente al tiempo.

20.4 Generadores

Los generadores y motores son importantes dispositivos prácticos que operan bajo el principio de inducción electromagnética. Primero, considere al **generador de corriente alterna (CA)**, un dispositivo que convierte energía mecánica a energía eléctrica. En su forma más simple, el generador CA consiste en una espira de alambre que gira en un campo magnético activado por algún medio externo (figura activa 20.19a). En las plantas de electricidad comerciales, la energía requerida para girar la espira se puede derivar de varias fuentes. En una planta hidroeléctrica, por ejemplo, el agua que cae y se dirige contra las aspas de una turbina produce el movimiento giratorio; en una planta impulsada por carbón, el calor que se produce por la quema del carbón se usa para convertir agua en vapor y este vapor se dirige contra las aspas de la turbina. Conforme la espira gira, el flujo magnético a través de ella cambia con el tiempo, lo que induce una fem y una corriente en un circuito externo. Los extremos de la espira se conectan a anillos colectores que giran con la espira. Las conexiones con el circuito externo se hacen mediante escobillas estacionarias en contacto con los anillos colectores.

Se puede deducir una expresión para la fem generada en la espira giratoria al usar la ecuación para fem de movimiento, $\mathcal{E} = B\ell v$. La figura 20.20a muestra una espira de alambre que gira en sentido de las manecillas del reloj en un campo magnético uniforme que se dirige hacia la derecha. La fuerza magnética (qvB) sobre las cargas en los alambres

APLICACIÓN

Generadores de corriente alterna

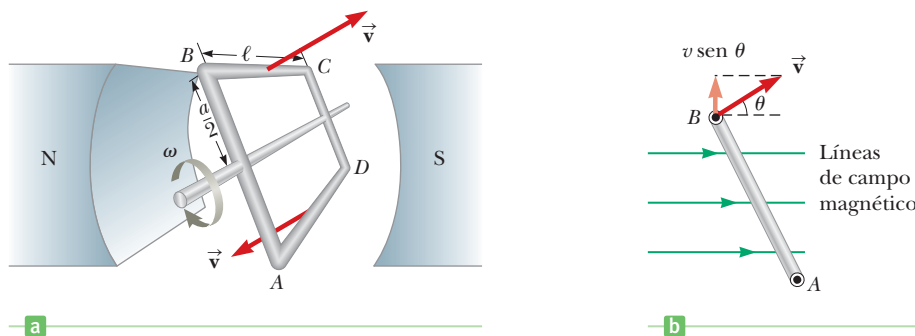


Figura 20.20 a) Espira que gira con cierta velocidad angular constante en un campo magnético externo. La fem inducida en la espira varía de manera sinusoidal con el tiempo. b) Vista lateral de la espira giratoria.



Luis Castañeda, Inc.

Turbinas que hacen girar los generadores eléctricos en una planta hidroeléctrica.

AB y CD no es a lo largo de las longitudes de los alambres. (La fuerza sobre los electrones en estos alambres es perpendicular a los alambres.) Por lo tanto, una fem se genera sólo en los alambres BC y AD . En algún instante, el alambre BC tiene velocidad \vec{v} a un ángulo θ con el campo magnético, como se muestra en la figura 20.20b. (Observe que la componente de velocidad paralela al campo no tiene efecto sobre las cargas en el alambre, mientras que el componente de velocidad perpendicular al campo produce una fuerza magnética sobre las cargas que mueve electrones de C a B .) La fem que se genera en el alambre BC es igual a $B\ell v_{\perp}$, donde ℓ es la longitud del alambre y v_{\perp} es la componente de velocidad perpendicular al campo. También se genera una fem de $B\ell v_{\perp}$ en el alambre DA y el sentido de esta fem es el mismo que en el alambre BC . Dado que $v_{\perp} = v \text{ sen } \theta$, la fem inducida total es

$$\mathcal{E} = 2B\ell v_{\perp} = 2B\ell v \text{ sen } \theta \quad [20.6]$$

Si la espira gira con una velocidad angular constante ω , se puede usar la relación $\theta = \omega t$ en la ecuación 20.6. Más aún, dado que cada punto sobre los alambres BC y DA gira en trayectoria circular en torno al eje de rotación con la misma velocidad angular ω , se tiene $v = r\omega = (a/2)\omega$, donde a es la longitud de lados AB y CD . Por lo tanto, la ecuación 20.6 se reduce a

$$\mathcal{E} = 2B\ell \left(\frac{a}{2}\right)\omega \text{ sen } \omega t = B\ell a\omega \text{ sen } \omega t$$

Si una bobina tiene N espiras, la fem es N veces mayor porque cada espira tiene la misma fem inducida. Más aún, puesto que el área de la espira es $A = \ell a$, la fem total es

$$\mathcal{E} = NBA\omega \text{ sen } \omega t \quad [20.7]$$

Este resultado muestra que la fem varía sinusoidalmente con el tiempo, como se grafica en la figura activa 20.19b. Observe que la fem máxima tiene el valor

$$\mathcal{E}_{\text{máx}} = NBA\omega \quad [20.8]$$

que ocurre cuando $\omega t = 90^\circ$ o 270° . En otras palabras, $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{máx}}$ cuando el plano de la espira es paralelo al campo magnético. Más aún, la fem es cero cuando $\omega t = 0$ o 180° , que ocurre siempre que el campo magnético es perpendicular al plano de la espira. En Estados Unidos y Canadá la frecuencia de rotación para generadores comerciales es 60 Hz, mientras que en algunos países europeos se usa 50 Hz. (Recuerde que $\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia en hertz.)

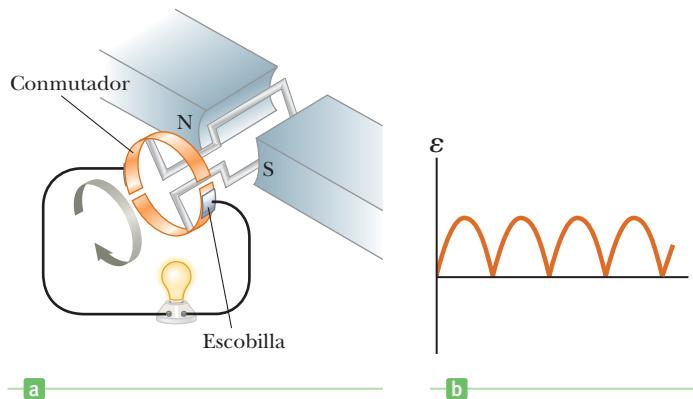
APLICACIÓN

Generadores de corriente directa

El **generador de corriente directa (CD)** se ilustra en la figura activa 20.21a. Las componentes en esencia son las mismas que los del generador CA, excepto que los contactos a la espira giratoria están hechos mediante un anillo colector, o conmutador. En este diseño el voltaje de salida siempre tiene la misma polaridad y la corriente es una corriente directa que pulsa, como en la figura activa 20.21b. Observe que los contactos al anillo colector invierten sus papeles cada medio ciclo. Al mismo tiempo, la polaridad de la fem inducida se invierte. Por lo tanto, la polaridad del anillo colector permanece igual.

Figura activa 20.21

a) Diagrama esquemático de un generador CD. b) La fem fluctúa en magnitud, pero siempre tiene la misma polaridad.



Una corriente CD que pulsa no es adecuada para la mayoría de las aplicaciones. Para producir una corriente CD estacionaria, los generadores CD comerciales usan muchas espiras y conmutadores distribuidos en torno al eje de rotación, de modo que los pulsos sinusoidales de las espiras se traslapan en fase. Cuando estos pulsos se superponen, la salida CD casi está libre de fluctuaciones.

■ EJEMPLO 20.5 Fem inducida en un generador CA

OBJETIVO Comprender los aspectos físicos de un generador CA.

PROBLEMA Un generador CA consiste en ocho espiras de alambre, cada una con área $A = 0.0900 \text{ m}^2$, con una resistencia total de 12.0Ω . La bobina gira en un campo magnético de 0.500 T a una frecuencia constante de 60.0 Hz , con eje de rotación perpendicular a la dirección del campo magnético. **a)** Encuentre la máxima fem inducida. **b)** ¿Cuál es la máxima corriente inducida? **c)** Determine la fem inducida y la corriente como funciones del tiempo. **d)** ¿Qué torque máximo se debe aplicar para mantener la bobina dando vueltas?

ESTRATEGIA A partir de la frecuencia dada, calcule la frecuencia angular ω y sustituya, junto con las cantidades dadas, en la ecuación 20.8. Como funciones del tiempo, la fem y la corriente tienen la forma $A \text{ sen } \omega t$, donde A es la máxima fem o corriente, respectivamente. Para el inciso d), calcule el torque magnético sobre la bobina cuando la corriente está en un máximo. (Véase el capítulo 19.) El torque aplicado debe realizar trabajo contra este torque magnético para mantener la bobina dando vueltas.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la máxima fem inducida.

Primero, calcule la frecuencia angular del movimiento rotacional:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(60.0 \text{ Hz}) = 377 \text{ rad/s}$$

Sustituya los valores para N , A , B y ω en la ecuación 20.8, y obtenga la máxima fem inducida:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{máx}} &= NAB\omega = 8(0.0900 \text{ m}^2)(0.500 \text{ T})(377 \text{ rad/s}) \\ &= 136 \text{ V} \end{aligned}$$

b) ¿Cuál es la máxima corriente inducida?

Sustituya la máxima fem inducida $\mathcal{E}_{\text{máx}}$ y la resistencia R en la ley de Ohm para encontrar la máxima corriente inducida:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{máx}}}{R} = \frac{136 \text{ V}}{12.0 \Omega} = 11.3 \text{ A}$$

c) Determine la fem inducida y la corriente como funciones del tiempo.

Sustituya $\mathcal{E}_{\text{máx}}$ y ω en la ecuación 20.7 para obtener la variación de \mathcal{E} con el tiempo t en segundos:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t = (136 \text{ V}) \text{ sen } 377t$$

La variación de la corriente en el tiempo se parece a esta expresión, excepto con la máxima corriente afuera en el frente:

$$I = (11.3 \text{ A}) \text{ sen } 377t$$

d) Calcule el máximo torque aplicado necesario para mantener la bobina dando vueltas.

Escriba la ecuación para torque magnético:

$$\tau = \mu B \text{ sen } \theta$$

Calcule el máximo momento magnético de la bobina, μ :

$$\mu = I_{\text{máx}} AN = (11.3 \text{ A})(0.0900 \text{ m}^2)(8) = 8.14 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Sustituya en la ecuación de torque magnético, con $\theta = 90^\circ$ para encontrar el máximo torque aplicado:

$$\tau_{\text{máx}} = (8.14 \text{ A} \cdot \text{m}^2)(0.500 \text{ T}) \text{ sen } 90^\circ = 4.07 \text{ N} \cdot \text{m}$$

COMENTARIOS El número de espiras, N , no puede ser arbitrario, porque debe haber una fuerza suficientemente fuerte para hacer girar la bobina.

PREGUNTA 20.5 ¿Qué efecto tiene sobre la máxima fem inducida el duplicar la frecuencia?

(continúa)

EJERCICIO 20.5 Un generador de CA debe tener una salida máxima de 301 V. Cada espira circular de alambre tiene un área de 0.100 m^2 y una resistencia de 0.80Ω . La bobina gira en un campo magnético de 0.600 T , con una frecuencia de 40.0 Hz , con el eje de rotación perpendicular a la dirección del campo magnético. a) ¿Cuántas espiras de alambre debe tener la bobina para producir la fem deseada? b) Encuentre la corriente máxima inducida en la bobina. c) Determine la fem inducida como función del tiempo.

RESPUESTAS a) 20 espiras b) 18.8 A c) $\mathcal{E} = (301 \text{ V}) \text{ sen } 251t$

APLICACIÓN

Motores

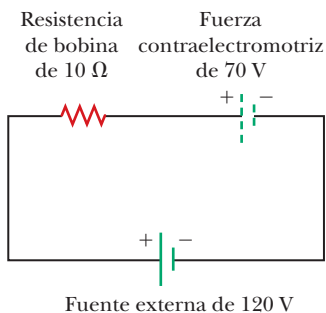


Figura 20.22 Un motor se puede representar como una resistencia más una fuerza contraelectromotriz.

Motores y fuerza contraelectromotriz

Los motores son dispositivos que convierten energía eléctrica en energía mecánica. En esencia, **un motor es un generador que corre a la inversa**: en lugar de generar una corriente mediante una espira giratoria, se suministra una corriente a la espira mediante una fuente de fem y el torque magnético sobre la espira portadora de corriente hace que gire.

Un motor puede realizar trabajo mecánico útil cuando un eje conectado a su bobina giratoria se une a algún dispositivo externo. Sin embargo, conforme gira la bobina en el motor, el flujo magnético variable a través de ella induce una fem que actúa para reducir la corriente en la bobina. Si *aumenta* la corriente, la ley de Lenz se violaría. La frase **fuerza contraelectromotriz** se usa para una fem que tiende a reducir la corriente aplicada. La fuerza contraelectromotriz aumenta en magnitud conforme aumenta la velocidad rotatoria de la bobina. Este estado de asuntos se puede ilustrar como el circuito equivalente en la figura 20.22. Para propósitos de ilustración, suponga que la fuente de poder externa que suministra corriente en la bobina del motor tiene un voltaje de 120 V , la bobina tiene una resistencia de 10Ω y la fuerza contraelectromotriz inducida en la bobina en este instante es de 70 V . El voltaje disponible para suministrar corriente es igual a la diferencia entre el voltaje aplicado y la fuerza contraelectromotriz, o 50 V en este caso. La corriente siempre se reduce por la fuerza contraelectromotriz.

Cuando se enciende un motor, inicialmente no hay fuerza contraelectromotriz y la corriente es muy grande porque está limitada sólo por la resistencia de la bobina. Conforme la bobina comienza a girar, la fuerza contraelectromotriz inducida se opone al voltaje aplicado y la corriente en la bobina se reduce. Si la carga mecánica aumenta, el motor se frena, lo que disminuye la fuerza contraelectromotriz. Esta reducción en la fuerza contraelectromotriz aumenta la corriente en la bobina y por lo tanto también aumenta la potencia necesaria de la fuente de voltaje externo. Como resultado, los requerimientos de potencia para arrancar un motor y para operarlo bajo cargas pesadas son mayores que aquellas para operar el motor bajo cargas promedio. Si al motor se le permite operar bajo ninguna carga mecánica, la fuerza contraelectromotriz reduce la corriente a un valor lo suficientemente grande para equilibrar las pérdidas de energía por calor y fricción.

■ EJEMPLO 20.6 Corriente inducida en un motor

OBJETIVO Aplicar el concepto de una fuerza contraelectromotriz para calcular la corriente inducida en un motor.

PROBLEMA Un motor tiene bobinas con una resistencia de 10.0Ω y se alimenta mediante un voltaje de $\Delta V = 1.20 \times 10^2 \text{ V}$. Cuando el motor opera a su máxima velocidad, la fuerza contraelectromotriz es 70.0 V . Encuentre la corriente en las bobinas **a)** cuando el motor se enciende por primera vez y **b)** cuando el motor alcanza su máxima velocidad de rotación.

ESTRATEGIA Para cada parte, encuentre el voltaje neto, que es el voltaje aplicado menos la fem inducida. Divida el voltaje neto entre la resistencia para obtener la corriente.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la corriente inicial, cuando el motor se enciende por primera vez.

Si la bobina no gira, la fuerza contraelectromotriz es cero y la corriente tiene su valor máximo. Calcule la diferencia entre la fem y la fuerza contraelectromotriz inicial y divida entre la resistencia R , para obtener la corriente inicial:

$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{contra}}}{R} = \frac{1.20 \times 10^2 \text{ V} - 0}{10.0 \Omega} = 12.0 \text{ A}$$

b) Encuentre la corriente cuando el motor gira a su velocidad máxima.

Repita el cálculo con el uso del valor máximo de la fuerza contraelectromotriz:

$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{contra}}}{R} = \frac{1.20 \times 10^2 \text{ V} - 70.0 \text{ V}}{10.0 \Omega} = \frac{50.0 \text{ V}}{10.0 \Omega} = 5.00 \text{ A}$$

COMENTARIOS El fenómeno de la fuerza contraelectromotriz es una forma en que se limita la velocidad de rotación de los motores eléctricos.

PREGUNTA 20.6 Conforme un motor aumenta su velocidad, ¿qué ocurre con la magnitud del torque magnético?
 a) Aumenta. b) Disminuye. c) Permanece constante.

EJERCICIO 20.6 Si la corriente en el motor es 8.00 A en algún instante, ¿cuál es la fuerza contraelectromotriz en este tiempo?

RESPUESTA 40.0 V

20.5 Autoinductancia

Considere un circuito que consiste en un interruptor, un resistor y una fuente de fem, como en la figura 20.23. Cuando se cierra el interruptor, la corriente no cambia de inmediato desde cero hasta su valor máximo, \mathcal{E}/R . La ley de inducción electromagnética, la ley de Faraday, evita este cambio. Lo que ocurre es lo siguiente: conforme la corriente aumenta con el tiempo, el flujo magnético a través del circuito debido a esta corriente también aumenta. El flujo creciente induce una fem en el circuito que se opone al cambio en flujo magnético. Por la ley de Lenz, la fem inducida está en la dirección que se indica por la batería rayada en la figura. La diferencia de potencial neto a través del resistor es la fem de la batería menos la fem inducida que se opone. Conforme la magnitud de la corriente aumenta, la *tasa* de aumento se reduce y por ende la fem inducida disminuye. Esta fem que se opone resulta en un aumento gradual en la corriente. Por la misma razón, cuando se abre el interruptor, la corriente no cae inmediatamente a cero. Este efecto se llama **autoinducción** porque el flujo variable a través del circuito surge del circuito en sí. La fem que se establece en el circuito se llama **fem autoinducida**.

Como segundo ejemplo de autoinductancia, considere la figura 20.24, que muestra una bobina devanada sobre un núcleo de hierro cilíndrico. (Un dispositivo práctico tendría muchos cientos de espiras.) Suponga que la corriente cambia con el tiempo. Cuando la corriente está en la dirección que se muestra, dentro de la bobina se establece un campo magnético, que se dirige de derecha a izquierda. Como resultado, algunas líneas de flujo magnético pasan a través del área transversal de la bobina. Conforme la corriente cambia con el tiempo, el flujo a través de la bobina cambia e induce una fem en la bobina. La ley de Lenz muestra que esta fem inducida tiene una dirección que se opone al cambio en la corriente. Si la corriente aumenta, la fem inducida es como se muestra en la figura 20.24b, y si la corriente disminuye, la fem inducida es como se muestra en la figura 20.24c.

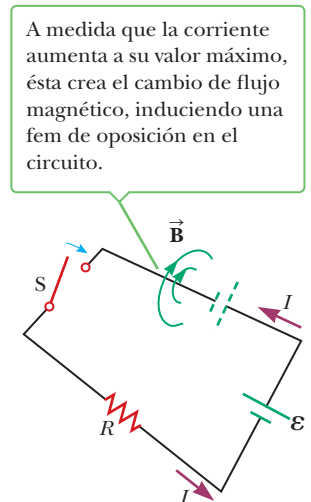


Figura 20.23 Después de que se cierra el interruptor en el circuito, la corriente produce su propio flujo magnético a través del circuito. Conforme la corriente aumenta hacia su valor de equilibrio, el flujo cambia en el tiempo e induce una fem en el circuito. La batería dibujada con líneas rayadas es un símbolo para la fem autoinducida.

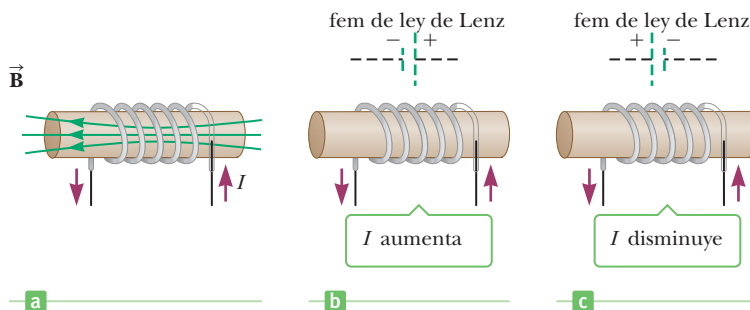


Figura 20.24 a) Una corriente en la bobina produce un campo magnético que se dirige hacia la izquierda. b) Si la corriente aumenta, la bobina actúa como una fuente de fem que se dirige, como se muestra, mediante la batería rayada. c) La fem inducida en la bobina cambia su polaridad si la corriente disminuye. Los símbolos de batería dibujados con líneas discontinuas representan la fem incluida en la bobina.



Joseph Henry

Físico estadounidense (1797-1878)

Henry fue el primer director del Instituto Smithsonian y el primer presidente de la Academia de Ciencias Naturales de Estados Unidos. Fue el primero en producir una corriente eléctrica con un campo magnético, pero no publicó sus resultados antes que Faraday debido a sus pesadas cargas académicas en la Academia Albany en el estado de Nueva York. Mejoró el diseño del electroimán y construyó uno de los primeros motores. También descubrió el fenómeno de autoinducción. La unidad de inductancia, el henry, se llamó así en su honor.

Inductancia ►

Para evaluar cuantitativamente la autoinductancia, observe primero que, de acuerdo con la ley de Faraday, la fem inducida está dada por la ecuación 20.2:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

El flujo magnético es proporcional al campo magnético, que es proporcional a la corriente en la bobina. Por lo tanto, **la fem autoinducida debe ser proporcional a la razón de cambio de la corriente con el tiempo**, o

$$\mathcal{E} \equiv -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [20.9]$$

donde L es una constante de proporcionalidad llamada **inductancia** del dispositivo. El signo negativo indica que una corriente variable induce una fem en oposición al cambio. En otras palabras, si la corriente aumenta (ΔI positiva), la fem inducida es negativa, lo que indica oposición al aumento en corriente. Del mismo modo, si la corriente disminuye (ΔI negativa), el signo de la fem inducida es positivo, lo que indica que la fem actúa para oponerse a la disminución.

La inductancia de una bobina depende del área transversal de la bobina y otras cantidades, que se pueden agrupar todas bajo el encabezado general de factores geométricos. La unidad SI de inductancia es el **henry** (H), que, de la ecuación 20.9, es igual a 1 volt-segundo por ampere:

$$1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$$

En el proceso de calcular autoinductancia, con frecuencia es conveniente igualar las ecuaciones 20.2 y 20.9 para encontrar una expresión para L :

$$N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$L = N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta I} = \frac{N\Phi_B}{I} \quad [20.10]$$

■ FÍSICA APLICADA 20.3 **Cómo sacar chispas**

En algunos circuitos ocurre una chispa entre los polos de un interruptor cuando el interruptor se abre. ¿Por qué no hay una chispa cuando se cierra el interruptor de este circuito?

EXPLICACIÓN De acuerdo con la ley de Lenz, la dirección de las fem inducidas es tal que el campo magnético inducido se opone al cambio en el flujo magnético original. Cuando el interruptor se abre, la caída súbita en el campo

magnético en el circuito induce una fem en una dirección que se opone al cambio en la corriente original. Esta fem inducida puede provocar una chispa conforme la corriente zanja la brecha de aire entre los polos del interruptor. La chispa no ocurre cuando el interruptor se cierra, porque la corriente original es cero y la fem inducida se opone a cualquier cambio en dicha corriente. ■

En general, la determinación de la inductancia de un elemento de corriente dado puede ser desafiante. Sin embargo, encontrar una expresión para la inductancia de un solenoide común es sencillo. Sea N el número de espiras que tiene el solenoide y ℓ su longitud. Suponga que ℓ es grande en comparación con el radio y el núcleo del solenoide es aire. Considere que el campo magnético interior es uniforme y está dado por la ecuación 19.16,

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$$

donde $n = N/\ell$ es el número de espiras por unidad de longitud. Por lo tanto, el flujo magnético a través de cada espira es

$$\Phi_B = BA = \mu_0 \frac{N}{\ell} AI$$

donde A es el área transversal del solenoide. A partir de esta expresión y la ecuación 20.10, encontramos que

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad [20.11a]$$

Esta ecuación muestra que L depende de los factores geométricos ℓ y A , y de μ_0 , y es proporcional al cuadrado del número de espiras. Puesto que $N = n\ell$, el resultado también se puede expresar en la forma

$$L = \mu_0 \frac{(n\ell)^2}{\ell} A = \mu_0 n^2 A \ell = \mu_0 n^2 V \quad [20.11b]$$

donde $V = A\ell$ es el volumen del solenoide.

■ EJEMPLO 20.7 Inductancia, fem autoinducida y solenoides

OBJETIVO Calcular la inductancia y la fem autoinducida de un solenoide.

PROBLEMA a) Calcule la inductancia de un solenoide que contiene 300 espiras, si la longitud del solenoide es 25.0 cm y su área transversal es $4.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. b) Calcule la fem autoinducida en el solenoide descrito en el inciso a) si la corriente en el solenoide disminuye a razón de 50.0 A/s.

ESTRATEGIA Al sustituir las cantidades dadas en la ecuación 20.11a se produce la inductancia L . Para el inciso b), sustituya el resultado del inciso a) y $\Delta I/\Delta t = -50.0 \text{ A/s}$ en la ecuación 20.9 para obtener la fem autoinducida.

SOLUCIÓN

a) Calcule la inductancia del solenoide.

Sustituya el número N de espiras, el área A y la longitud ℓ en la ecuación 20.11a para encontrar la inductancia:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \\ &= (4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}) \frac{(300)^2 (4.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{25.0 \times 10^{-2} \text{ m}} \\ &= 1.81 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{A} = \mathbf{0.181 \text{ mH}} \end{aligned}$$

b) Calcule la fem autoinducida en el solenoide.

Sustituya L y $\Delta I/\Delta t = -50.0 \text{ A/s}$ en la ecuación 20.9, para encontrar la fem autoinducida:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -(1.81 \times 10^{-4} \text{ H})(-50.0 \text{ A/s}) \\ &= \mathbf{9.05 \text{ mV}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Note que $\Delta I/\Delta t$ es negativa porque la corriente disminuye con el tiempo. La expresión de la inductancia en el inciso (a) se basa en el supuesto de que el radio del solenoide es pequeño en comparación con su longitud.

PREGUNTA 20.7 Si el solenoide se enrolla en un círculo de modo que se convierta en un solenoide toroidal, ¿qué sería cierto de su autoinductancia? a) Sería la misma. b) Sería mayor. c) Sería menor.

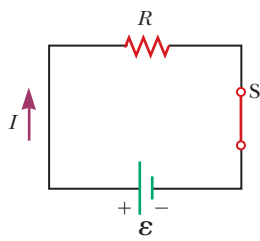
EJERCICIO 20.7 Un solenoide debe tener una inductancia de 0.285 mH, un área transversal de $6.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y una longitud de 36.0 cm. a) ¿Cuántas espiras por unidad de longitud debe tener? b) Si la fem autoinducida es -12.5 mV en un tiempo dado, ¿a qué razón cambia la corriente en dicho instante?

RESPUESTAS a) 1.02×10^3 espiras/m b) 43.9 A/s

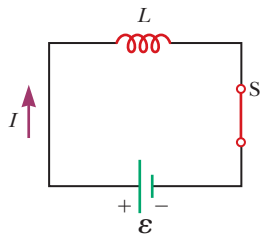
20.6 Circuitos RL

Un elemento de circuito que tiene una gran inductancia, como una bobina de muchas espiras enrolladas apretadamente, se llama **inductor**. El símbolo de circuito para un inductor es . Siempre se supondrá que la autoinductancia del resto del circuito es despreciable en comparación con la del inductor en el circuito.

Para comprender el efecto de un inductor en un circuito, considere los dos circuitos en la figura 20.25 (página 708). La figura 20.25a muestra un resistor conectado a las terminales



a



b

Figura 20.25 Comparación del efecto de un resistor con el de un inductor en un circuito simple.

de una batería. Para este circuito, la regla de la malla de Kirchhoff es $\mathcal{E} - IR = 0$. La caída de voltaje a través del resistor es

$$\Delta V_R = -IR \quad [20.12]$$

En este caso, **la resistencia se interpreta como una medida de la oposición a la corriente**. Ahora considere el circuito en la figura 20.25b, que consiste en un inductor conectado a las terminales de una batería. En el instante cuando se cierra el interruptor en el circuito, puesto que $IR = 0$, la fem de la batería es igual a la fuerza contraelectromotriz generada en la bobina. Por lo tanto, se tiene

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [20.13]$$

A partir de esta expresión, **L se interpreta como una medida de oposición a la razón de cambio de la corriente**.

La figura activa 20.26 muestra un circuito que consiste en un resistor, un inductor y una batería. Suponga que el interruptor se cierra en $t = 0$. La corriente comienza a aumentar, pero el inductor produce una fem que se opone a la corriente creciente. Como resultado, la corriente no puede cambiar instantáneamente desde cero hasta su valor máximo de \mathcal{E}/R . La ecuación 20.13 muestra que la fem inducida es un máximo cuando la corriente cambia más rápido, lo que ocurre cuando el interruptor se cierra por primera vez. Conforme la corriente tiende a su valor de estado estacionario, la fuerza contraelectromotriz de la bobina cae porque la corriente cambia de manera más lenta. Finalmente, cuando la corriente alcanza su valor de estado estacionario, la razón de cambio es cero y la fuerza contraelectromotriz también es cero. La figura activa 20.27 grafica la corriente en el circuito como una función del tiempo. Esta gráfica es similar a la de la carga sobre un capacitor como una función del tiempo, que se estudió en el capítulo 18 en la sección 5 en conexión con los circuitos RC. En este caso, encontramos que es conveniente introducir una cantidad llamada *constante de tiempo del circuito*, lo que dice algo acerca del tiempo que se requiere para que el capacitor tienda a su carga de estado estacionario. En la misma forma, las constantes de tiempo se definen para circuitos que contienen resistores e inductores. La **constante de tiempo** τ para un circuito RL es el tiempo que se requiere para que la corriente en el circuito alcance 63.2% de su valor inicial \mathcal{E}/R ; la constante de tiempo de un circuito RL está dada por

Constante de tiempo para un circuito RL ▶

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [20.14]$$

Utilizando métodos de cálculo se puede demostrar que la corriente en tal circuito está dada por

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \quad [20.15]$$

Esta ecuación es consistente con la intuición: cuando el interruptor se cierra en $t = 0$, la corriente inicialmente es cero, que se eleva con el tiempo hasta algún valor máximo.

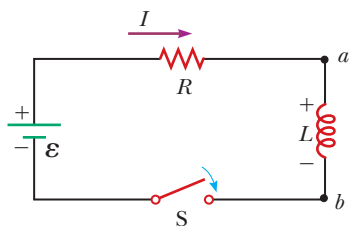
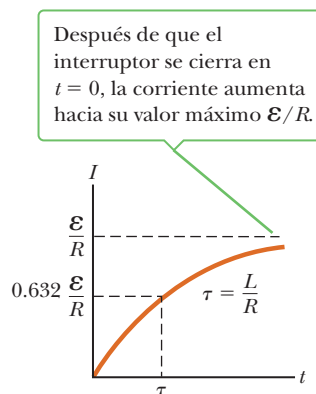


Figura activa 20.26 Un circuito RL en serie. Como la corriente se incrementa hasta su valor máximo, el inductor produce una fem que se opone al incremento de la corriente.

Figura activa 20.27 Gráfica de corriente frente al tiempo para el circuito RL que se muestra en la figura 20.26. El interruptor se cierra en $t = 0$ y la corriente aumenta hacia su valor máximo \mathcal{E}/R . La constante de tiempo τ es el tiempo que la corriente tarda en llegar a 63.2% de su valor máximo.



Observe la similitud matemática entre la ecuación 20.15 y la ecuación 18.7, que presenta un capacitor en lugar de un inductor. Como en el caso de un capacitor, la forma de la ecuación sugiere que se requiere una cantidad de tiempo infinita para que la corriente en el inductor alcance su valor máximo. Es útil suponer que la corriente se compone de cargas en movimiento que son infinitesimales, como se mostrará en el ejemplo 20.9.

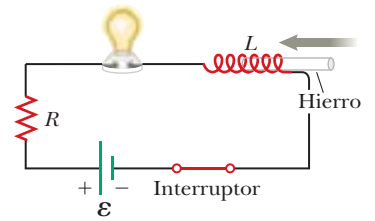


Figura 20.28 (Examen rápido 20.6)

■ Examen rápido

20.6 El interruptor en el circuito que se muestra en la figura 20.28 se cierra, y el foco brilla de manera estable. El inductor es un solenoide simple con núcleo de aire. Una barra de hierro se inserta en el interior del solenoide, lo que aumenta la magnitud del campo magnético en el solenoide. Conforme la barra se inserta, la brillantez del foco a) aumenta, b) disminuye o c) permanece igual.

■ EJEMPLO 20.8 Un circuito RL

OBJETIVO Calcular la constante de tiempo y relacionarla con la corriente en un circuito RL.

PROBLEMA Una batería de 12.6 V está en un circuito con un inductor de 30.0 mH y un resistor de 0.150 Ω, como en la figura 20.26. El interruptor se cierra en $t = 0$. **a)** Encuentre la constante de tiempo del circuito. **b)** Encuentre la corriente después de transcurrida la constante de tiempo. **c)** Encuentre la caída de voltaje a través del resistor cuando $t = 0$ y $t =$ una constante de tiempo. **d)** ¿Cuál es la razón de cambio de la corriente después de una constante de tiempo?

ESTRATEGIA El inciso a) sólo requiere sustitución en la definición de la constante de tiempo. Con este valor y la ley de Ohm, se puede encontrar la corriente después de una constante de tiempo y al multiplicar esta corriente por la resistencia produce la caída de voltaje a través del resistor después de una constante de tiempo. Con la caída de voltaje y la regla de la malla de Kirchhoff, se puede encontrar el voltaje a través del inductor. Este valor se puede sustituir en la ecuación 20.13 para obtener la razón de cambio de la corriente.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuál es la constante de tiempo del circuito?

Sustituya la inductancia L y la resistencia R en la ecuación 20.14, para encontrar la constante de tiempo:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{30.0 \times 10^{-3} \text{ H}}{0.150 \Omega} = 0.200 \text{ s}$$

b) Encuentre la corriente después de transcurrida una constante de tiempo.

Primero, use la ley de Ohm para calcular el valor final de la corriente después de transcurridas muchas constantes de tiempo:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{12.6 \text{ V}}{0.150 \Omega} = 84.0 \text{ A}$$

Después de una constante de tiempo, la corriente se eleva a 63.2% de su valor final:

$$I_{1\tau} = (0.632)I_{\text{máx}} = (0.632)(84.0 \text{ A}) = 53.1 \text{ A}$$

c) Encuentre las caídas de voltaje a través de la resistencia cuando $t = 0$ y $t =$ una constante de tiempo.

Inicialmente, la corriente en el circuito es cero, así que, a partir de la ley de Ohm, el voltaje a través del resistor es cero:

$$\Delta V_R = IR$$

$$\Delta V_R(t = 0 \text{ s}) = (0 \text{ A})(0.150 \Omega) = 0$$

A continuación, use la ley de Ohm y encuentre la magnitud de la caída de voltaje a través del resistor después de una constante de tiempo:

$$\Delta V_R(t = 0.200 \text{ s}) = (53.1 \text{ A})(0.150 \Omega) = 7.97 \text{ V}$$

d) ¿Cuál es la razón de cambio de la corriente después de una constante de tiempo?

Use la regla de voltaje de Kirchhoff y calcule la caída de voltaje a través del inductor en dicho tiempo:

$$\mathcal{E} + \Delta V_R + \Delta V_L = 0$$

Resuelva para ΔV_L :

$$\Delta V_L = -\mathcal{E} - \Delta V_R = -12.6 \text{ V} - (-7.97 \text{ V}) = -4.6 \text{ V}$$

(continúa)

Ahora resuelva la ecuación 20.13 para $\Delta I/\Delta t$ y sustituya:

$$\Delta V_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{\Delta V_L}{L} = -\frac{-4.6 \text{ V}}{30.0 \times 10^{-3} \text{ H}} = 150 \text{ A/s}$$

OBSERVACIONES Los valores utilizados en este problema fueron tomados de los componentes reales recuperados desde el sistema de arranque de un coche. Debido a que la corriente en dicho circuito RL es inicialmente cero, los inductores se denominan a veces como “ahogadores” porque temporalmente ahogan la corriente. En la solución del inciso d), atravesamos el circuito en la dirección de la corriente positiva, por lo que la diferencia de voltaje a través de la batería fue positiva y las diferencias entre la resistencia y el inductor fueron negativas.

PREGUNTA 20.8 Halle la corriente en el circuito después de dos constantes de tiempo.

EJERCICIO 20.8 Una batería de 12.6 V está en serie con una resistencia de 0.350Ω y un inductor. a) Después de un largo tiempo, ¿cuál es la corriente en el circuito? b) ¿Cuál es la corriente después de una constante de tiempo? c) ¿Cuál es la caída de voltaje en la bobina en este momento? d) Hallar la inductancia, si la constante de tiempo es 0.130 s.

RESPUESTAS a) 36.0 A b) 22.8 A c) 4.62 V d) $4.55 \times 10^{-2} \text{ H}$

■ EJEMPLO 20.9 Formación de un campo magnético

OBJETIVO Comprender el papel del tiempo en el establecimiento de un campo magnético en un inductor.

PROBLEMA Dado el circuito RL del ejemplo 20.8, encuentre el tiempo que se requiere para que la corriente alcance 99.9% de su valor máximo después de que se cierra el interruptor.

ESTRATEGIA La solución requiere resolver la ecuación 20.15 para el tiempo, seguido de sustitución. Observe que la corriente máxima es $I_{\text{máx}} = \mathcal{E}/R$.

SOLUCIÓN

Escriba la ecuación 20.15, con I_f sustituida por la corriente: $I_f = \frac{\mathcal{E}}{R}(1 - e^{-t/\tau}) = I_{\text{máx}}(1 - e^{-t/\tau})$

Divida ambos lados entre $I_{\text{máx}}$: $\frac{I_f}{I_{\text{máx}}} = 1 - e^{-t/\tau}$

Reste 1 de ambos lados y luego multiplique ambos lados por -1 : $1 - \frac{I_f}{I_{\text{máx}}} = e^{-t/\tau}$

Obtenga el logaritmo natural de ambos lados: $\ln\left(1 - \frac{I_f}{I_{\text{máx}}}\right) = \ln(e^{-t/\tau}) = -t/\tau$

Resuelva para t y sustituya la expresión para τ de la ecuación 20.14: $t = -\frac{L}{R} \ln\left(1 - \frac{I_f}{I_{\text{máx}}}\right)$

Sustituya valores y obtenga el tiempo deseado: $t = -\frac{30.0 \times 10^{-3} \text{ H}}{0.150 \Omega} \ln(1 - 0.999) = 1.38 \text{ s}$

COMENTARIOS A partir de este cálculo, se descubre que formar el campo magnético en un inductor y aproximarse a la corriente máxima ocurre con relativa rapidez. Contrario a lo que se podría esperar a partir de la forma matemática de la ecuación 20.15, en realidad no se requiere una cantidad infinita de tiempo.

PREGUNTA 20.9 Si la inductancia se duplica, ¿en qué factor cambiaría la longitud de tiempo? a) 1 (esto es, sin cambio), b) 2, c) $\frac{1}{2}$

EJERCICIO 20.9 Suponga que un circuito RL en serie está compuesto de un resistor de 2.00Ω , un inductor de 15.0 H y una batería de 6.00 V. a) ¿Cuál es la constante de tiempo para este circuito? b) Una vez que se cierra el interruptor, ¿cuánto tarda la corriente en alcanzar la mitad de su valor máximo?

RESPUESTAS a) 7.50 s b) 5.20 s

20.7 Energía almacenada en un campo magnético

La fem inducida por un inductor evita que una batería establezca una corriente instantánea en un circuito. La batería tiene que realizar trabajo para producir una corriente. Podemos pensar en este trabajo necesario como en energía almacenada en el inductor en su campo magnético. En forma similar a la que se usó en la sección 16.9 para encontrar la energía almacenada en un capacitor, encontramos que la energía almacenada por un inductor es

$$EP_L = \frac{1}{2}LI^2$$

[20.16]

◀ Energía almacenada en un inductor

Observe que el resultado es similar en forma a la expresión para la energía almacenada en un capacitor cargado (ecuación 16.18):

$$EP_C = \frac{1}{2}C(\Delta V)^2$$

◀ Energía almacenada en un capacitor

■ EJEMPLO 20.10 Energía magnética

OBJETIVO Relacionar el almacenamiento de energía magnética con las corrientes en un circuito RL .

PROBLEMA Una batería de 12.0 V se conecta en serie con un resistor de 25.0 Ω y un inductor de 5.00 H. **a)** Encuentre la corriente máxima en el circuito. **b)** Encuentre la energía almacenada en el inductor en este tiempo. **c)** ¿Cuánta energía se almacena en el inductor cuando la corriente cambia a razón de 1.50 A/s?

ESTRATEGIA En el inciso a) la ley de Ohm y la regla de voltaje de Kirchhoff produce la corriente máxima porque el voltaje a través del inductor es cero cuando la corriente es máxima. Al sustituir la corriente en la ecuación 20.16 se obtiene la energía almacenada en el inductor. En el inciso c) la razón de cambio dada en la corriente se puede usar para calcular la caída de voltaje a través del inductor en el tiempo especificado. La regla de voltaje de Kirchhoff y la ley de Ohm proporcionan entonces la corriente I en dicho tiempo, lo que se puede usar para encontrar la energía almacenada en el inductor.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la corriente máxima en el circuito.

Aplique al circuito la regla de voltaje de Kirchhoff:

$$\Delta V_{\text{bat}} + \Delta V_R + \Delta V_L = 0$$

$$\mathcal{E} - IR - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$$

Cuando se alcanza la corriente máxima, $\Delta I/\Delta t$ es cero, de modo que la caída de voltaje a través del inductor es cero. Resuelva para la corriente máxima $I_{\text{máx}}$:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{12.0 \text{ V}}{25.0 \Omega} = 0.480 \text{ A}$$

b) Encuentre la energía almacenada en el inductor en este tiempo.

Sustituya los valores conocidos en la ecuación 20.16:

$$EP_L = \frac{1}{2}LI_{\text{máx}}^2 = \frac{1}{2}(5.00 \text{ H})(0.480 \text{ A})^2 = 0.576 \text{ J}$$

c) Encuentre la energía en el inductor cuando la corriente cambia a razón de 1.50 A/s.

Aplique la regla de voltaje de Kirchhoff al circuito una vez más:

$$\mathcal{E} - IR - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$$

Resuelva esta ecuación para la corriente I y sustituya:

$$I = \frac{1}{R} \left(\mathcal{E} - L \frac{\Delta I}{\Delta t} \right)$$

$$= \frac{1}{25.0 \Omega} [12.0 \text{ V} - (5.00 \text{ H})(1.50 \text{ A/s})] = 0.180 \text{ A}$$

Finalmente, sustituya el valor para la corriente en la ecuación 20.15 y encuentre la energía almacenada en el inductor:

$$EP_L = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}(5.00 \text{ H})(0.180 \text{ A})^2 = 0.081 \text{ J}$$

(continúa)

COMENTARIOS Observe cuán importante es combinar los conceptos de capítulos anteriores. Aquí la ley de Ohm y la regla de la malla de Kirchhoff fueron esenciales para la solución del problema.

PREGUNTA 20.10 Verdadero o Falso: Mientras más grande sea el valor de la inductancia en tal circuito RL , mayor es la corriente máxima.

EJERCICIO 20.10 Para el mismo circuito, encuentre la energía almacenada en el inductor cuando la tasa de cambio de la corriente es 1.00 A/s .

RESPUESTA 0.196 J

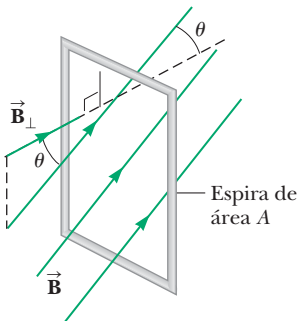
RESUMEN

20.1 Fem inducida y flujo magnético

El flujo magnético Φ_B a través de una espira cerrada se define como

$$\Phi_B \equiv BA \cos \theta \quad [20.1]$$

donde B es la intensidad del campo magnético uniforme, A es el área transversal de la espira y θ es el ángulo entre \vec{B} y una dirección perpendicular al plano de la espira.



En este punto de vista de una espira de área A , el componente del campo magnético perpendicular a la superficie \vec{B} multiplicado por el área da como resultado el flujo magnético a través de la superficie.

20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz

La **ley de inducción de Faraday** afirma que la fem inducida instantánea en un circuito es igual al negativo de la razón de cambio del flujo magnético a través del circuito,

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad [20.2]$$

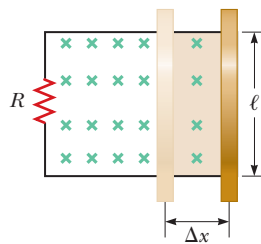
donde N es el número de espiras en el circuito. El flujo magnético Φ_B puede cambiar con el tiempo siempre que el campo magnético \vec{B} , el área A o el ángulo θ cambien con el tiempo.

La **ley de Lenz** afirma que la corriente proveniente de la fem inducida crea un campo magnético con flujo que se opone al *cambio* en flujo magnético a través de un circuito.

20.3 Fem de movimiento

Si una barra conductora de longitud ℓ se mueve a través de un campo magnético con una velocidad v , de modo que \vec{B} es perpendicular a la barra, la fem inducida en la barra, usualmente llamada **fem de movimiento** es

$$|\mathcal{E}| = B\ell v \quad [20.4]$$

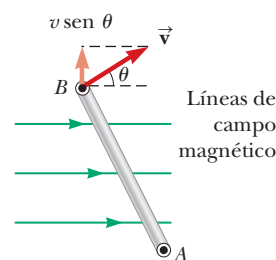


A medida que la barra se mueve hacia la derecha, el área que recorre la espira aumenta la cantidad $\ell \Delta x$ y el flujo magnético aumenta a través del lazo $B\ell \Delta x$.

20.4 Generadores

Cuando una bobina de alambre con N espiras, cada una con área A , gira con velocidad angular constante ω en un campo magnético uniforme \vec{B} , la fem inducida en la bobina es

$$\mathcal{E} = NBA\omega \sin \omega t \quad [20.7]$$



En este punto de vista de un circuito de rotación, el flujo magnético cambia continuamente, generando una corriente alterna en el circuito.

Tales generadores naturalmente producen corriente alterna (CA), que cambia de dirección con la frecuencia $\omega/2\pi$. La corriente CA se puede transformar en corriente directa.

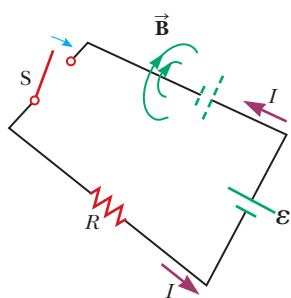
20.5 Autoinductancia

20.6 Circuitos RL

Cuando la corriente en una bobina cambia con el tiempo, en la bobina se induce una fem de acuerdo con la ley de Faraday. Esta **fem autoinducida** se define mediante la expresión

$$\mathcal{E} \equiv -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [20.9]$$

donde L es la inductancia de la bobina. La unidad SI para inductancia es el henry (H); $1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$.



Cuando el interruptor está cerrado, un campo magnético comienza a desarrollarse como se muestra. El flujo magnético variable crea una fem autoinducida en la dirección opuesta, representada por las líneas punteadas.

La **inductancia** de una bobina se puede encontrar a partir de la expresión

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} \quad [20.10]$$

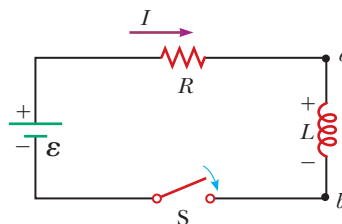
donde N es el número de espiras sobre la bobina, I es la corriente en la bobina y Φ_B es el flujo magnético a través de la bobina producida por dicha corriente. Para un solenoide, la inductancia está dada por

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad [20.11a]$$

Si un resistor y un inductor se conectan en serie con una batería y un interruptor se cierra en $t = 0$, la corriente en el circuito no se eleva instantáneamente a su valor máximo. Después

de una **constante de tiempo** $\tau = L/R$, la corriente en el circuito es 63.2% de su valor final \mathcal{E}/R . Conforme la corriente se aproxima a su valor máximo final, la caída de voltaje a través del inductor tiende a cero. La corriente I en tal circuito en cualquier tiempo t después de que el circuito se completa es

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \quad [20.15]$$



Un circuito RL en serie. A medida que la corriente aumenta a su valor máximo, el inductor produce una fem que se opone al incremento de la corriente.

20.7 Energía almacenada en un campo magnético

La **energía almacenada** en el campo magnético de un inductor que porta corriente I es

$$EP_L = \frac{1}{2}LI^2 \quad [20.16]$$

Conforme la corriente en un circuito RL tiende a su valor máximo, la energía almacenada tiende a un valor máximo.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una bobina plana de alambre se coloca en un campo magnético uniforme que está en la dirección y . El flujo magnético a través de la bobina es máximo si el plano de la bobina está ¿dónde? a) en el plano xy b) en el plano yz c) en el plano xz d) en cualquier orientación, ya que es constante.
- Una bobina cuadrada de 10 espiras, de 0.50 m por lado, se encuentra en el plano xy . Un campo magnético uniforme, de 1.0 T de magnitud en la dirección z negativa, cambia de manera estable a 3.0 T en la dirección z positiva, un proceso que tarda 2.0 s. ¿Cuál es la magnitud de la fem inducida en la bobina? a) 2.0 V b) 5.0 V c) 3.0 V d) 4.0 V e) 6.0 V
- La corriente en un inductor de 5.00 H disminuye de manera uniforme a razón de 2.00 A/s. ¿Cuál es la caída de voltaje a través del inductor? a) 2.50 V b) 5.00 V c) 0.400 V d) 10.0 V e) 7.50 V
- Un generador contiene una bobina de 100 espiras que gira 10.0 veces por segundo. Si cada espira tiene un área de 0.100 m^2 y el campo magnético a través de las bobinas es 0.050 T, ¿cuál es la fem máxima inducida en la bobina? a) 31.4 V b) 62.8 V c) 0.314 V d) 6.28 V e) 3.14 V
- Un pequeño avión, con envergadura de 12 m, vuela horizontalmente y hacia el norte con una velocidad de 60.0 m/s en una región donde el campo magnético de la Tierra es

60.0 μT dirigido 60.0° bajo la horizontal. ¿Cuál es la magnitud de la fem inducida entre las puntas de las alas del avión? a) 51 mV b) 31 mV c) 37 mV d) 44 mV e) 22 mV

- La barra en la figura POM 20.6 se mueve sobre rieles a la derecha con una velocidad \vec{v} , y un campo magnético constante uniforme se dirige fuera de la página. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta? (Más de una respuesta puede ser correcta.) a) La corriente inducida en el circuito es cero.

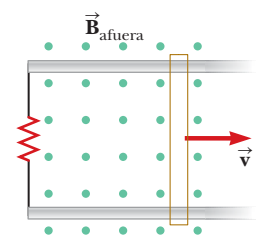


Figura POM20.6

- La corriente inducida en el circuito es a la derecha.
 - La corriente inducida en el circuito es a la izquierda.
 - Una fuerza externa es necesaria para mantener la barra en movimiento a velocidad constante.
 - No se requiere fuerza para mantener la barra moviéndose a velocidad constante.
- ¿Qué sucede con la amplitud de la fem inducida cuando la velocidad de rotación de una bobina del generador se duplica? a) Se convierte cuatro veces más grande. b) Se hace dos veces más grande. c) Se mantiene sin cambios. d) Se vuelve un medio más grande. e) Se convierte en un cuarto más grande.

8. Cuando una bobina se coloca en un campo magnético externo constante, que se dirige perpendicular al plano de la bobina, ¿cuál de las siguientes acciones *no* induce una fem en la bobina? a) Colapsar la bobina. b) Cambiar la intensidad del campo magnético. c) Mover la bobina a través del campo sin cambiar su orientación con respecto al campo. d) Girar la bobina. e) Remover la bobina del campo.
9. Un lazo rectangular se coloca cerca de un alambre largo que porta una corriente I , como se muestra en la figura POM20.9. Si I disminuye en el tiempo, ¿qué se puede decir de la corriente inducida en la espira? a) La corriente tiene una dirección que depende del tamaño de la espira. b) La corriente es en el sentido de las manecillas del reloj. c) La corriente es contra las manecillas del reloj. d) La corriente es cero. e) No se puede decir nada de la corriente y de la espira sin más información.



Figura POM20.9

10. Dos espiras de alambre rectangulares se encuentran en el mismo plano, como se muestra en la figura POM20.10. Si la corriente I en la espira exterior es contra las manecillas del reloj y aumenta con el tiempo, ¿qué es cierto de la corriente inducida en la espira interior? a) Es cero. b) Es en sentido de las manecillas del reloj. c) Es contra las manecillas del reloj. d) Su magnitud depende de las dimensiones de las espiras. e) Su dirección depende de las dimensiones de las espiras.



Figura POM20.10

11. Un imán de barra se sostiene sobre el centro de una espira de alambre que yace en el plano horizontal, como se muestra en la figura POM20.11. El extremo sur del imán apunta hacia la espira. Después de que el imán se suelta, ¿qué es cierto de la corriente en el resistor, visto desde arriba? a) Es en sentido de las manecillas del reloj conforme el imán cae hacia la espira. b) Es contra las manecillas del reloj conforme el imán cae hacia la espira. c) Es en sentido de las manecillas del reloj después de que el imán se mueve a través de la espira y alejándose de él. d) Siempre es en sentido de las manecillas del reloj. e) Primero es contra las manecillas del reloj, conforme el imán se aproxima a la espira y luego en sentido de las manecillas del reloj después de que pasa a través de la espira.

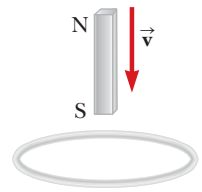


Figura POM20.11

12. Un circuito consiste en un foco conectado a dos rieles conductores y una barra móvil conductora, como se muestra en la figura POM20.12. Un campo magnético externo se dirige perpendicular al plano del circuito. ¿Durante cuál de las siguientes acciones el foco se encenderá? (Puede aplicarse más de un enunciado.) a) La barra se mueve hacia la izquierda. b) La barra se mueve hacia la derecha. c) La magnitud del campo magnético aumenta con el tiempo. d) La magnitud del campo magnético disminuye con el tiempo. e) El campo magnético permanece constante en el tiempo.

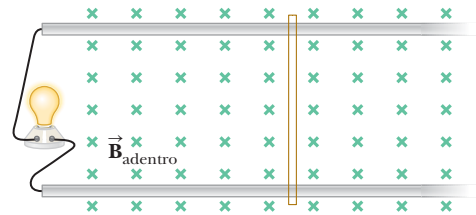


Figura POM20.12

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Una nave espacial que orbita la Tierra tiene una bobina de alambre en ella. Un astronauta mide una pequeña corriente en la bobina, aunque no tiene batería conectada y no hay imanes en la nave espacial. ¿Qué causa la corriente?
2. ¿Soltar un imán por un tubo de cobre produce una corriente en el tubo? Explique.
3. Una espira circular se ubica en un campo magnético uniforme y constante. Describa cómo se puede inducir una fem en la espira en esta situación.
4. Una espira de alambre se coloca en un campo magnético uniforme. a) ¿Para qué orientación del lazo el flujo mag-

nético es un máximo? b) ¿Para qué orientación el flujo es cero?

5. Conforme la barra conductora de la figura PC20.5 se mueve hacia la derecha, se establece un campo eléctrico que se dirige hacia abajo. Si la barra se moviera hacia la izquierda, explique por qué el campo eléctrico sería hacia arriba.
6. ¿Cómo se produce la energía eléctrica en las presas? (Esto es:

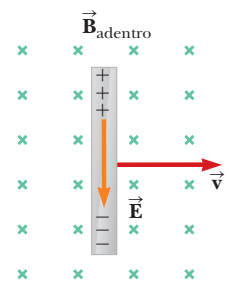


Figura PC20.5 Preguntas conceptuales 5 y 8.

¿cómo la energía de movimiento del agua se convierte en electricidad CA?)

- Usar un brazaletes metálico en una región de campo intenso magnético podría ser peligroso. Analice esta afirmación.
- Conforme la barra de la figura PC20.5 se mueve perpendicular al campo, ¿se requiere una fuerza externa para mantenerla en movimiento con velocidad constante?

9. Las corrientes parásitas son corrientes inducidas que se establecen en una pieza de metal cuando se mueve a través de un campo magnético no uniforme. Por ejemplo, considere la placa metálica plana que se balancea en el extremo de una barra como péndulo, como se muestra en la figura PC20.9. a) En la posición 1, el péndulo se mueve desde una región donde no hay campo magnético hacia una región donde el campo $\vec{B}_{adentro}$ se dirige hacia el papel. Demuestre que, en la posición 1, la dirección de la corriente parásita es contra las manecillas del reloj. b) En la posición 2, el péndulo se mueve afuera del campo hacia una región de campo cero. Demuestre que la dirección de la corriente parásita en este caso es en sentido de las manecillas del reloj. c) Use la regla de la mano derecha número 2 para demostrar que estas corrientes parásitas conducen a una fuerza magnética sobre la placa que se dirige como se muestra en la figura. Puesto que la corriente parásita inducida siempre produce una fuerza retardadora cuando la placa entra o sale del campo, la placa en balanceo rápidamente llega al reposo.

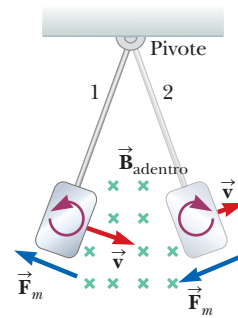


Figura PC20.9

- Un imán de barra se suelta hacia un anillo conductor que yace en el piso. Conforme el imán cae hacia el anillo, ¿se mueve como un objeto en caída libre? Explique.
- Un trozo de aluminio se suelta verticalmente hacia abajo entre los polos de un electroimán. ¿El campo magnético afecta la velocidad del aluminio? *Sugerencia:* Lea la pregunta conceptual 9.
- Cuando el interruptor de la figura PC20.12a está cerrado, la corriente se establece en la bobina y los anillos de metal saltan hacia arriba (figura PC20.12b). Explique este comportamiento.

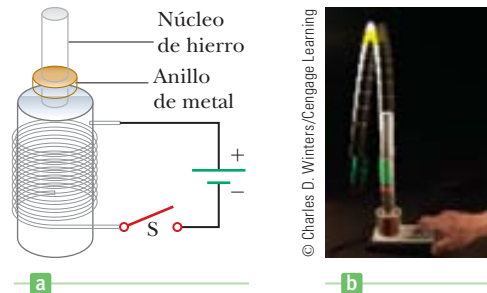


Figura PC20.12 Preguntas conceptuales 12 y 13.

- Suponer que la batería en la figura PC20.12a se sustituye por una fuente de CA y el interruptor se mantiene cerrado. Si se mantiene cerrado, el anillo de metal en la parte superior del solenoide se calienta. ¿Por qué?
- Un imán se usa para causar una chispa en una bujía en muchas podadoras modernas. Un magneto consiste en un imán permanente montado sobre un volante, de modo que gira frente a una bobina fija. Explique cómo este arreglo genera una diferencia de potencial suficientemente grande para causar la chispa.

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

20.1 Fem inducida y flujo magnético

- Un campo magnético uniforme de 0.50 T de magnitud se dirige perpendicular al plano de una espira rectangular que tiene dimensiones de 8.0 por 12 cm. Encuentre el flujo magnético a través de la espira.
- Encuentre el flujo del campo magnético de la Tierra, de 5.00×10^{-5} T, a través de una espira cuadrado de 20.0 cm^2 de área cuando el campo a) es perpendicular al plano de la espira, b) forma un ángulo de 30.0° con la normal al plano de la espira y c) forma un ángulo de 90.0° con la normal al plano.

- Una espira circular de 12.0 cm de radio se coloca en un campo magnético uniforme. a) Si el campo se dirige perpendicular al plano de la espira y el flujo magnético a través de la espira es $8.00 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2$, ¿cuál es la intensidad del campo magnético? b) Si el campo magnético se dirige paralelo al plano de la espira, ¿cuál es el flujo magnético a través de la espira?
- Un alambre largo recto, que porta una corriente de 2.00 A, se coloca a lo largo del eje de un cilindro de 0.500 m de radio y una longitud de 3.00 m. Determine el flujo magnético total a través del cilindro.

5. Un alambre largo recto se encuentra en el plano de una bobina circular con un radio de 0.010 m. El alambre porta una corriente de 2.0 A y se coloca a lo largo de un diámetro de la bobina. a) ¿Cuál es el flujo neto a través de la bobina? b) Si el alambre pasa a través del centro de la bobina y es perpendicular al plano de la bobina, ¿cuál es el flujo neto a través de la bobina?
6. Un solenoide de 400 espiras, 36.0 cm de longitud y 3.00 cm de radio porta una corriente de 5.00 A. Encuentre a) la intensidad del campo magnético dentro de la bobina en su punto medio y b) el flujo magnético a través de un área transversal circular del solenoide en su punto medio.

7. **M** Un cubo con aristas de longitud $\ell = 2.5$ cm es colocado como se muestra en la figura P20.7. A través de la región existe un campo magnético uniforme con componentes $B_x = +5.0$ T, $B_y = +4.0$ T y $B_z = +3.0$ T. a) Calcule el flujo a través de la cara sombreada del cubo. b) ¿Cuál es el flujo total que sale del volumen encerrado por el cubo (esto es: el flujo total a través de las seis caras)?

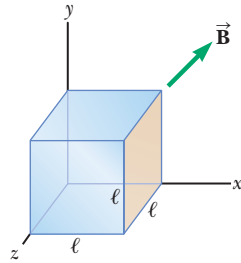


Figura P20.7

20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz

8. **BIO** La estimulación magnética transcraneal (TMS, por sus siglas en inglés) es una técnica no invasiva que se usa para estimular regiones del cerebro humano. Una pequeña bobina se coloca en el cuero cabelludo y un breve estallido de corriente en la bobina produce un campo magnético que varía rápidamente dentro del cerebro. La fem inducida puede ser suficiente para estimular actividad neuronal. Uno de tales dispositivos genera un campo magnético dentro del cerebro que se eleva de cero a 1.5 T en 120 ms. Determine la fem inducida dentro de un círculo de tejido de 1.6 mm de radio y que es perpendicular a la dirección del campo.
9. Tres espiras de alambre se mueven cerca de un alambre largo y recto que conduce una corriente como en la figura P20.9. ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida, en su caso, en a) espira A, b) espira B y c) espira C.

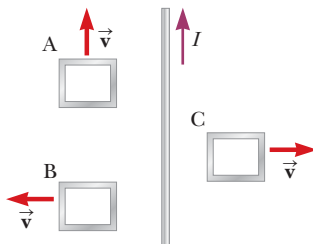


Figura P20.9

10. La espira flexible de la figura P20.10 tiene un radio de 12 cm y está en un campo magnético de 0.15 T de intensidad. La espira se sujeta en los puntos A y B y se estira hasta que su área casi es cero. Si cerrar la espira tarda

0.20 s, ¿cuál es la magnitud de la fem inducida promedio en él durante este tiempo?

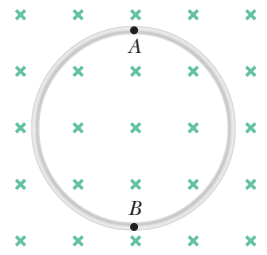


Figura P20.10
Problemas 10, 12 y 22

11. Una espira de alambre de 0.30 m de radio yace de modo que un campo magnético externo, de 0.30 T de magnitud, es perpendicular a la espira. El campo invierte su dirección y su magnitud cambia a 0.20 T en 1.5 s. Encuentre la magnitud de la fem inducida promedio en la espira durante este tiempo.
12. Una espira circular de alambre, de 12.0 cm de radio, se coloca en un campo magnético que se dirige perpendicular al plano de la espira, como se muestra en la figura P20.10. Si el campo disminuye a la razón de 0.050 T/s en cierto intervalo, ¿cuál es la magnitud de la fem inducida en la espira durante este intervalo?
13. Un técnico con una banda circular de metal en la muñeca mueve la mano en un campo magnético uniforme de magnitud 2.5 T en un tiempo de 0.18 s. Si el diámetro de la banda es de 6.5 cm y el campo está en un ángulo de 45° con el plano de la banda de metal mientras que la mano está en el campo, encuentre la magnitud de la fem promedio inducida en la banda.
14. En la figura P20.14, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida en la resistencia en el instante en que se cierra el interruptor?
15. Un imán de barra se coloca cerca de una bobina de alambre, como se muestra en la figura P20.15. ¿Cuál es la dirección de la corriente en la resistencia cuando el imán se mueve a) a la izquierda y b) a la derecha?
16. Encontrar la dirección de la corriente en la resistencia que se muestra en la figura P20.16 a) en el instante en que se cierra el interruptor, b) después de que el interruptor ha estado cerrado durante varios minutos, y c) en el instante en que el interruptor se abre.

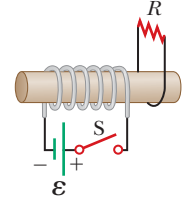


Figura P20.14

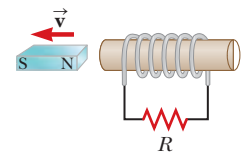


Figura P20.15

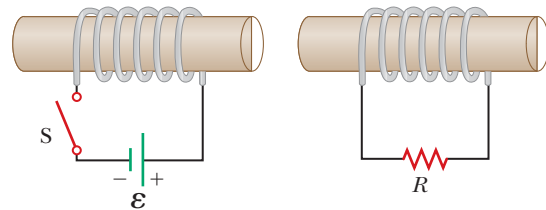


Figura P20.16

17. Un circuito circular de alambre se encuentra por debajo de un cable largo por el que circula una corriente que va en aumento como en la figura P20.17a. a) ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en el circuito, si es el

caso? b) Supongamos ahora que el circuito está al lado del mismo cable como en P20.17b. ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en el circuito, si es el caso? Explique sus respuestas.

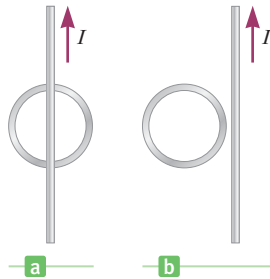


Figura P20.17

18. Una espira de alambre cuadrado de una sola vuelta $\ell = 1.00$ cm por lado, se coloca dentro de un solenoide que tiene una sección transversal circular de $r = 3.00$ cm, como se muestra en la figura P20.18. El solenoide tiene 20.0 cm de largo y se devana con 100 espiras de alambre. a) Si la corriente en el solenoide es de 3.00 A, ¿cuál es el flujo a través de la espira?

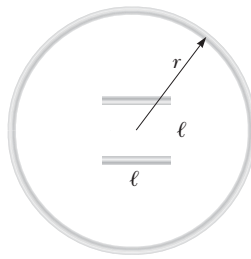


Figura P20.18

b) Si la corriente en el solenoide se reduce a cero en 3.00 s, ¿cuál es la magnitud de la fem inducida promedio en la espira?

19. **PG** Un solenoide de 300 espiras, con una longitud de 20.0 cm y un radio de 1.50 cm, porta una corriente de 2.00 A. Una segunda bobina de cuatro espiras se enrolla apretadamente alrededor de este solenoide, de modo que se puede considerar que tiene el mismo radio que el solenoide. La corriente en el solenoide de 300 espiras aumenta de manera estable hasta 5.00 A en 0.900 s. a) Use la ley de Ampere para calcular el campo magnético inicial en medio del solenoide de 300 espiras. b) Calcule el campo magnético del solenoide de 300 espiras después de 0.900 s. c) Calcule el área de la bobina de 4 espiras. d) Calcule el cambio en el flujo magnético a través de la bobina de 4 espiras durante el mismo periodo. e) Calcule la fem inducida promedio en la bobina de 4 espiras. ¿Es igual a la fem inducida instantánea? f) ¿Por qué en este cálculo podría usted despreciar las aportaciones al campo magnético por parte de la corriente en la bobina de 4 espiras?

20. **M** Una bobina circular, que encierra un área de 100 cm², está hecha de 200 espiras de alambre de cobre. El alambre del que está hecha la bobina tiene una resistencia de 5.0Ω y los extremos del alambre se conectan para formar un circuito cerrado. Inicialmente, un campo magnético uniforme de 1.1 T apunta en forma perpendicular hacia arriba a través del plano de la bobina. Entonces la dirección del campo se invierte de modo que el campo magnético final tiene una magnitud de 1.1 T y apunta hacia abajo a través de la bobina. Si el tiempo que se requiere para que el campo invierta su dirección es de 0.10 s,

¿qué corriente promedio fluye a través de la bobina durante este tiempo?

21. **BIO** Para monitorear la respiración de un paciente de hospital, un delgado cinturón se ciñe alrededor de su pecho, como en la figura P20.21. El cinturón es una bobina de 200 espiras. Cuando el paciente inhala, el área que encierra la bobina aumenta en 39.0 cm². La magnitud del campo magnético de la Tierra es $50.0 \mu\text{T}$ y forma un ángulo de 28.0° con el plano de la bobina. Suponiendo que un paciente tarda 1.80 s en inhalar, encuentre la magnitud de la fem inducida promedio en la bobina durante este tiempo.

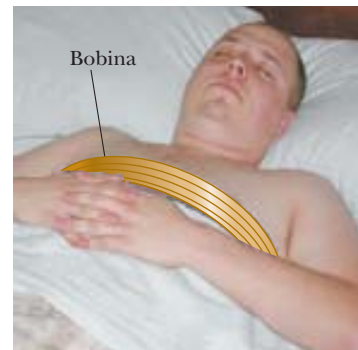


Figura P20.21

22. **CIC S** Una bobina de alambre circular de N espiras, de radio r , yace en el plano xy , como se muestra en la figura P20.10. Se enciende un campo magnético uniforme y aumenta de manera estable desde 0 hasta B_0 en la dirección z positiva en t segundos. a) Encuentre una expresión simbólica para la fem que se induce en la bobina, \mathcal{E} , en términos de las variables dadas. b) Al mirar hacia abajo el plano xy desde el eje z positivo, ¿la dirección de la corriente inducida es en sentido de las manecillas del reloj o en dirección contraria? c) Si cada espira tiene resistencia R , encuentre una expresión para la magnitud de la corriente inducida, I .

20.3 Fem de movimiento

23. Un camión lleva una viga de acero de longitud 15.0 m en una autopista. Un accidente hace que la viga sea lanzada del camión y se desliza horizontalmente por el suelo a una velocidad de 25.0 m/s. La velocidad del centro de masa de la viga está dirigida hacia el norte, mientras que la viga mantiene una orientación longitudinal este-oeste. La componente vertical del campo magnético de la Tierra en este lugar tiene una magnitud de $35.0 \mu\text{T}$. ¿Cuál es la magnitud de la fem inducida entre los extremos de la viga?

24. 2.00 m de alambre se sostienen en una dirección este-oeste y se mueven horizontalmente hacia el norte con una velocidad de 15.0 m/s. La componente vertical del campo magnético de la Tierra en esta región es $40.0 \mu\text{T}$ y se dirige hacia abajo. Calcule la fem inducida entre los extremos del alambre y determine cuál extremo es positivo.

25. Una camioneta pickup tiene un ancho de 79.8 pulgadas. Si viaja hacia el norte a 37 m/s a través de un campo

magnético con componente vertical de $35 \mu\text{T}$, ¿qué magnitud de fem se induce entre el conductor y el lado del pasajero de la camioneta?

26. **CIC** Un imán se mantiene estacionario, mientras que una espira circular de alambre se mueve hacia el imán a una velocidad constante en la posición *A* como en la figura P20.26. La espira pasa por el imán en la posición *B* y se aleja del imán en la posición *C*. Encuentre la dirección de la corriente inducida en el circuito con la ley de Lenz a) en la posición *A*, y b) en la posición *C*. c) ¿Cuál es la corriente inducida en el circuito en la posición *B*? Explique.

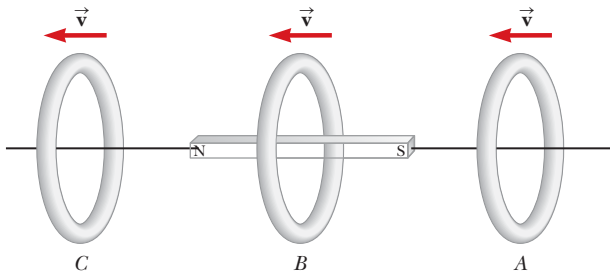


Figura P20.26 Problemas 26 y 43.

27. **M** Un automóvil tiene una antena de radio vertical de 1.20 m de largo. El automóvil viaja a 65.0 km/h sobre un camino horizontal donde el campo magnético de la Tierra es $50.0 \mu\text{T}$, que se dirige hacia el norte y hacia abajo en un ángulo de 65.0° bajo la horizontal. a) Especifique la dirección en que debe moverse el automóvil para generar la fem máxima de movimiento en la antena, con la parte superior de la antena positiva en relación con el fondo. b) Calcule la magnitud de esta fem inducida.
28. **CIC** Una astronauta se conecta a su nave espacial mediante una cuerda de amarre de 25 m de largo mientras ella y la nave espacial orbitan la Tierra en una trayectoria circular con una velocidad de $3.0 \times 10^3 \text{ m/s}$. En un instante, el voltaje medido entre los extremos de un alambre incrustado en el cordón se mide en 0.45 V. Suponga que la dimensión larga del alambre es perpendicular al componente vertical del campo magnético de la Tierra en dicho instante. a) ¿Cuál es la magnitud de la componente vertical del campo de la Tierra en esta posición? b) ¿El voltaje medido cambia conforme el sistema se mueve desde una posición a otra? Explique.

29. La figura P20.29 muestra una barra de masa $m = 0.200 \text{ kg}$ que puede deslizarse sin fricción sobre un par de carriles

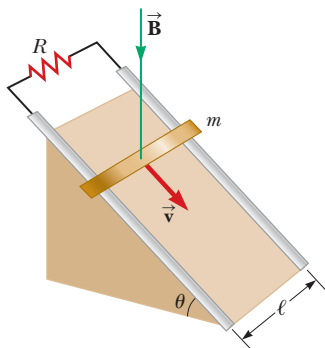


Figura P20.29

separados por una distancia $\ell = 1.20 \text{ m}$ situada en un plano inclinado que forma un ángulo $\theta = 25.0^\circ$ con respecto al suelo. La resistencia es $R = 1.00 \Omega$, y un campo magnético uniforme de magnitud $B = 0.500 \text{ T}$ está dirigido hacia abajo, perpendicular al suelo, sobre toda la región a través de la cual se mueve la barra. ¿Con qué velocidad constante v se desliza la barra a lo largo de los rieles?

30. Considere el arreglo que se muestra en la figura P20.30. Suponga que $R = 6.00 \Omega$, $\ell = 1.20 \text{ m}$ y un campo magnético uniforme de 2.50 T se dirige *hacia* la página. ¿Con qué velocidad se debe mover la barra para producir una corriente de 0.500 A en el resistor?

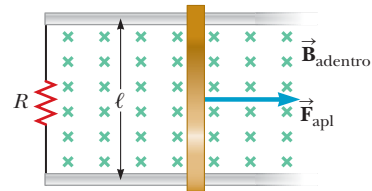


Figura P20.30 Problemas 30, 56 y 59

20.4 Generadores

31. Una bobina cuadrada de alambre de lado 2.80 cm se coloca en un campo magnético uniforme de magnitud 1.25 T dirigido hacia la página como en la figura P20.31. La bobina tiene 28.0 vueltas y una resistencia de 0.780Ω . Si la bobina se hace girar en un ángulo de 90.0° sobre el eje horizontal 0.335 s, halle a) la magnitud de la fem promedio inducida en la bobina durante esta rotación y b) la corriente promedio inducida en la bobina durante esta rotación.

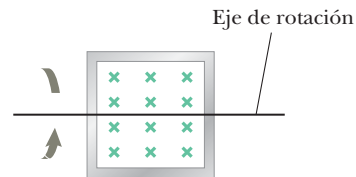


Figura P20.31

32. Una bobina de alambre cuadrada de 100 espiras, de 0.040 m^2 de área, gira en torno a un eje vertical a 1500 rev/min, como se indica en la figura P20.32. El componente horizontal del campo magnético de la Tierra en la ubicación de la bobina es $2.0 \times 10^{-5} \text{ T}$. Calcule la fem máxima inducida en la bobina por el campo de la Tierra.

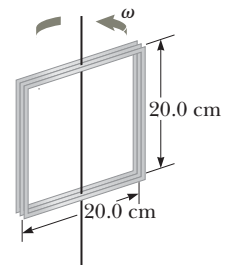


Figura P20.32

33. **BIO** Se realiza considerable trabajo científico en la actualidad para determinar si los campos magnéticos oscilatorios débiles, como los que se encuentran cerca de las líneas de transmisión eléctrica exteriores, pueden afectar la salud humana. Un estudio indica que un campo magnético de 1.0×10^{-3}

T de magnitud, que oscila a 60 Hz, puede estimular los eritrocitos para volverse cancerosos. Si el diámetro de un eritrocito es $8.0 \mu\text{m}$, determine la fem máxima que se puede generar en torno al perímetro de la célula.

- 34. Una bobina plana, que encierra un área de 0.10 m^2 gira a 60 rev/s , con su eje de rotación perpendicular a un campo magnético de 0.20 T . a) Si en la bobina hay 1 000 espiras, ¿cuál es el máximo voltaje inducido en la bobina? b) Cuando ocurre el máximo voltaje inducido, ¿cuál es la orientación de la bobina con respecto al campo magnético?
- 35. En un modelo de generador CA, una bobina rectangular de 500 espiras, de 8.0 por 20 cm , gira a 120 rev/min en un campo magnético uniforme de 0.60 T . a) ¿Cuál es la fem máxima inducida en la bobina? b) ¿Cuál es el valor instantáneo de la fem en la bobina a $t = (\pi/32) \text{ s}$? Suponga que la fem es cero en $t = 0$. c) ¿Cuál es el menor valor de t para el cual la fem tendrá su máximo valor?
- 36. Un motor tiene bobinas con una resistencia de 30Ω y opera a partir de un voltaje de 240 V . Cuando el motor opera a su velocidad máxima, la fuerza contraelectromotriz es 145 V . Determine la corriente en las bobinas a) cuando el motor se enciende por primera vez y b) cuando el motor alcanza su velocidad máxima. c) Si la corriente en el motor es 6.0 A en algún instante, ¿cuál es la fuerza contraelectromotriz en ese tiempo?
- 37. Una bobina de 10.0 espiras adquiere la forma de una elipse que tiene un eje mayor de 10.0 cm y un eje menor de 4.00 cm . La bobina gira a 100 rpm en una región donde la magnitud del campo magnético de la Tierra es $55 \mu\text{T}$. ¿Cuál es el voltaje máximo inducido en la bobina si el eje de rotación de la bobina es a lo largo de su eje mayor y se alinea a) perpendicular al campo magnético de la Tierra y b) paralelo al campo magnético de la Tierra? *Nota:* El área de una elipse está dada por $A = \pi ab$, donde a es la longitud del semieje mayor y b es la longitud del semieje menor.

20.5 Autoinductancia

- 38. Un técnico enrolla alambre en torno a un tubo de 36 cm de longitud que tiene un diámetro de 8.0 cm . Cuando los devanados están equitativamente dispersos sobre toda la longitud del tubo, el resultado es un solenoide que contiene 580 espiras de alambre. a) Determine la autoinductancia de este solenoide. b) Si la corriente en este solenoide aumenta a la tasa de 4.0 A/s , ¿cuál es la fem autoinducida en el solenoide?
- 39. La corriente en una bobina cambia de 3.5 a 2.0 A en 0.50 s . Si la fem inducida promedio en la bobina es 12 mV , ¿cuál es la autoinductancia de la bobina?
- 40. **S** Demuestre que las dos expresiones para inductancia dadas por

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} \quad \text{y} \quad L = \frac{-\mathcal{E}}{\Delta I/\Delta t}$$

tienen las mismas unidades.

- 41. **M** Un solenoide de 2.5 cm de radio tiene 400 espiras y una longitud de 20 cm . Encuentre a) su inductancia y b) razón a la que debe cambiar la corriente a través de él para producir una fem de 75 mV .
- 42. Una fem de 24.0 mV se induce en una bobina de 500 espiras cuando la corriente cambia a una tasa de 10.0 A/s . ¿Cuál es el flujo magnético a través de cada espira de la bobina en un instante cuando la corriente es de 4.00 A ?

20.6 Circuitos RL

- 43. Un electroimán se puede modelar como un inductor en serie con una resistencia. Considere la posibilidad de un gran electroimán de inductancia $L = 12.0 \text{ H}$ y la resistencia $R = 4.50 \Omega$ conectados a una batería de 24.0 V y un interruptor como en la figura P20.43. Después de que el interruptor se cierra, encuentre a) la corriente máxima soportada por el electroimán, b) la constante de tiempo del circuito y c) el tiempo que toma la corriente para llegar a 95.0% de su valor máximo.
- 44. Un circuito RL con $L = 3.00 \text{ H}$ y un circuito RC con $C = 3.00 \mu\text{F}$ tiene la misma constante de tiempo. Si los dos circuitos tienen la misma resistencia R , a) ¿cuál es el valor de R y b) cuál es esta constante de tiempo común?

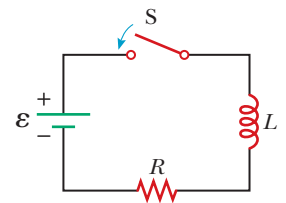


Figura P20.43
Problemas 43, 45, 46 y 48

- 45. Una batería se conecta en serie con un resistor de 0.30Ω y un inductor, como se muestra en la figura P20.43. El interruptor se cierra en $t = 0$. La constante de tiempo del circuito es 0.25 s , y la máxima corriente en el circuito es 8.0 A . Encuentre a) la fem de la batería, b) la inductancia del circuito, c) la corriente en el circuito después de transcurrida una constante de tiempo y d) el voltaje a través del resistor y el voltaje a través del inductor después de transcurrida una constante de tiempo.
- 46. Un inductor de 25 mH , un resistor de 8.0Ω y una batería de 6.0 V se conectan en serie, figura P20.43. El interruptor se cierra en $t = 0$. Determine la caída de voltaje a través del resistor a) en $t = 0$ y b) después de transcurrida una constante de tiempo. Además, encuentre la caída de voltaje a través del inductor c) en $t = 0$ y d) después de transcurrida una constante de tiempo.
- 47. Calcule la resistencia en un circuito RL en el que $L = 2.50 \text{ H}$ y la corriente aumenta a 90.0% de su valor final en 3.00 s .
- 48. Considere el circuito que se muestra en la figura P20.43. Considere $\mathcal{E} = 6.00 \text{ V}$, $L = 8.00 \text{ mH}$ y $R = 4.00 \Omega$. a) ¿Cuál es la constante de tiempo inductiva del circuito? b) Calcule la corriente en el circuito $250 \mu\text{s}$ después de que se cierra el interruptor. c) ¿Cuál es el valor de la corriente de estado estacionario final? d) ¿Cuánto tarda la corriente en alcanzar 80.0% de su valor máximo?

20.7 Energía almacenada en un campo magnético

49. a) Si un inductor que porta una corriente de 1.70 A almacena una energía de 0.300 mJ, ¿cuál es su inductancia?
 b) ¿Cuánta energía almacena el mismo inductor si porta una corriente de 3.0 A?
50. Un solenoide de 300 espiras tiene un radio de 5.00 cm y una longitud de 20.0 cm. Determine a) la inductancia del solenoide y b) la energía almacenada en el solenoide cuando la corriente en sus devanados es 0.500 A.
51. **M** Una batería de 24 V se conecta en serie con un resistor y un inductor, con $R = 8.0 \Omega$ y $L = 4.0 \text{ H}$, respectivamente. Determine la energía almacenada en el inductor a) cuando la corriente alcanza su valor máximo y b) una constante de tiempo después de cerrar el interruptor.
52. **PG** Una longitud de 60.0 m de alambre de cobre aislado se enrolla para formar un solenoide de 2.0 cm de radio. El alambre de cobre tiene un radio de 0.50 mm. a) ¿Cuál es la resistencia del alambre? b) Si trata cada espira del solenoide como una circunferencia, ¿cuántas espiras se pueden hacer con el alambre? c) ¿Cuán largo es el solenoide resultante? d) ¿Cuál es la autoinductancia del solenoide? e) Si el solenoide se une a una batería con una fem de 6.0 V y resistencia interna de 350 mΩ, calcule la constante de tiempo del circuito. f) ¿Cuál es la corriente máxima que se logra? g) ¿Cuánto tarda en alcanzar 99.9% de su corriente máxima? h) ¿Qué energía máxima se almacena en el inductor?

Problemas adicionales

53. Dos espiras circulares de alambre rodean una barra de aislamiento como en la figura P20.53. La espira 1 lleva una corriente I en la dirección de las agujas del reloj cuando se mira desde el extremo izquierdo. Si la espira 1 se mueve hacia la espira 2, que permanece inmóvil, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida en la espira 2 cuando se ve desde el extremo izquierdo?

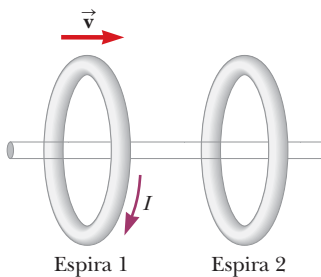


Figura P20.53

54. Una espira circular de alambre de resistencia $R = 0.500 \Omega$ y radio $r = 8.00 \text{ cm}$ está en un campo magnético uniforme dirigido hacia afuera de la página como en la figura P20.54. Si una corriente hacia la derecha de $I = 2.50 \text{ mA}$ es inducida en el circuito, a) ¿el campo magnético aumenta o disminuye en el tiempo? b) Halle la velocidad a la que el campo está cambiando con el tiempo.

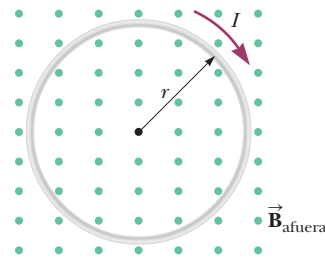


Figura P20.54

55. Una bobina rectangular con resistencia R tiene N vueltas, cada una de longitud ℓ y anchura w , como se muestra en la figura P20.55. La bobina se mueve en un campo magnético uniforme \vec{B}_{adentro} con \vec{v} velocidad constante. ¿Cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza magnética total de la bobina (a) al entrar en el campo magnético, b) al moverse dentro del campo y c) al salir del campo?

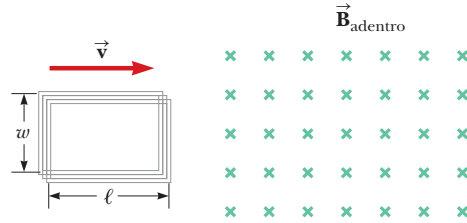


Figura P20.55

56. **CIC** Una barra conductora de longitud ℓ , se mueve hacia la derecha sobre dos rieles sin fricción, como se muestra en la figura P20.30. Un campo magnético uniforme dirigido hacia la página tiene una magnitud de 0.30 T. Suponga $\ell = 35 \text{ cm}$ y $R = 9.0 \Omega$. a) ¿A qué velocidad constante tendrían que moverse las barras para producir una corriente de 8.5 mA en la resistencia? ¿Cuál es la dirección de esta corriente inducida? b) ¿A qué razón es entregada la energía a la resistencia? c) Explique el origen de la energía que se entrega a la resistencia.
57. Una bobina de alambre de 820 espiras, de 24.0Ω de resistencia, se coloca en la parte superior de un solenoide de 7.00 cm de largo y 12500 espiras, como en la figura P20.57. Tanto bobina como solenoide tienen áreas transversales de $1.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. a) ¿Cuánto tarda la corriente en el solenoide en alcanzar 0.632 veces su valor máximo? b) Determine la fuerza contraelectromotriz promedio causada por la autoinductancia del solenoide durante este intervalo. El campo magnético producido por el solenoide en la posición de la bobina es la mitad de intenso que el campo en el centro del solenoide. c) Determine

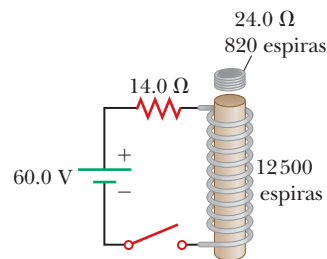


Figura P20.57

la razón de cambio promedio en flujo magnético a través de cada espira de la bobina durante el intervalo establecido. d) Encuentre la magnitud de la corriente inducida promedio en la bobina.

58. **CIC** Una nave espacial está en una órbita circular de 3.0×10^4 km de radio en torno a un pulsar de 2.0×10^{30} kg. El campo magnético del pulsar a dicha distancia radial es 1.0×10^2 T dirigido perpendicular a la velocidad de la nave espacial. La nave espacial tiene 0.20 km de largo, con un radio de 0.040 km y se mueve contra las manecillas del reloj en el plano xy en torno al pulsar. a) ¿Cuál es la velocidad de la nave espacial? b) Si el campo magnético apunta en la dirección z positiva, ¿la fem inducida es de la parte posterior al frente de la nave espacial, o de lado a lado? c) Calcule la fem inducida. d) Describa los riesgos para los astronautas dentro de cualquier nave espacial que se mueve en la vecindad de un pulsar.
59. **CIC** Una barra conductora de longitud ℓ se mueve sobre dos rieles sin fricción horizontales, como en la figura P20.30. Una fuerza constante de 1.00 N de magnitud mueve la barra con una velocidad uniforme de 2.00 m/s a través de un campo magnético \vec{B} que se dirige hacia la página. a) ¿Cuál es la corriente en un resistor R de 8.00Ω ? b) ¿Cuál es la razón de disipación de energía en el resistor? c) ¿Cuál es la potencia mecánica entregada por la fuerza constante?
60. Un solenoide largo de radio $r = 2.00$ cm se enrolla con 3.50×10^3 vueltas/m, y lleva una corriente que cambia a razón de 28.5 A/s como en la figura P20.60. ¿Cuál es la magnitud de la fem inducida en la espira cuadrada conductora que rodea el centro del solenoide?

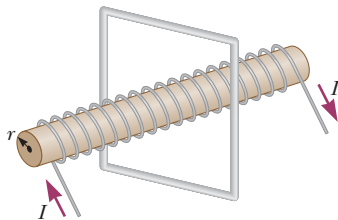


Figura P20.60

61. El relámpago que se muestra en la figura P20.61 pasa a 200 m de una bobina de 100 espiras orientada como se muestra. Si la corriente en el relámpago cae de 6.02×10^6 A a cero en $10.5 \mu\text{s}$, ¿cuál es el voltaje promedio inducido en la bobina? Suponga que la distancia al centro de la bobina determina el campo magnético promedio en la posición de la bobina. Trate el relámpago como un largo alambre vertical.

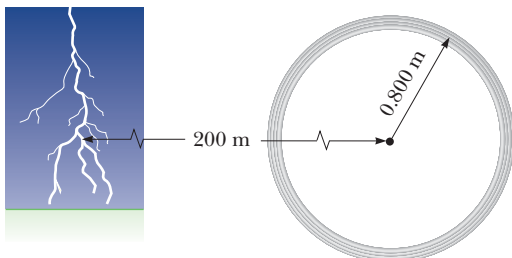


Figura P20.61

62. La espira cuadrada de la figura P20.62 está hecha de alambres con una resistencia en serie total de 10.0Ω . Se coloca en un campo magnético uniforme de 0.100 T que se dirige perpendicular hacia el plano del papel. La espira, que puede girar en cada esquina, se jala como se muestra hasta que la separación entre los puntos A y B es 3.00 m. Si este proceso tarda 0.100 s, ¿cuál es la corriente promedio generada en la espira? ¿Cuál es la dirección de la corriente?

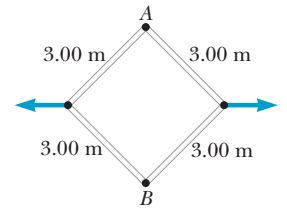


Figura P20.62

63. El campo magnético que se muestra en la figura P20.63 tiene una magnitud uniforme de 25.0 mT que se dirige hacia el papel. El diámetro inicial de la espira es 2.00 cm. a) El alambre rápidamente se tensa y la espira se encoge a un diámetro de cero en 50.0 ms. Determine el voltaje promedio inducido entre los puntos extremos A y B. Incluya la polaridad. b) Suponga que la espira no se afecta, pero que el campo magnético aumenta a 100 mT en 4.00×10^{-3} s. Determine el voltaje promedio a través de las terminales A y B, incluida polaridad, durante este periodo.

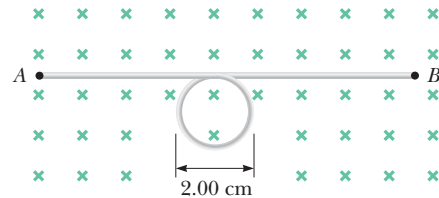


Figura P20.63

64. Un anillo de aluminio de 5.00 cm de radio y $3.00 \times 10^{-4} \Omega$ de resistencia se coloca en torno a la parte superior de un largo solenoide con núcleo de aire con 1000 espiras por metro y un radio más pequeño de 3.00 cm, como en la figura P20.64. Si la corriente en el solenoide aumenta a razón constante de 270 A/s, ¿cuál es la corriente inducida en el anillo? Suponga que el campo magnético que produce el solenoide sobre el área en el extremo del solenoide es la mitad de intenso que el campo en el centro del solenoide. Suponga también que el solenoide produce un campo despreciable afuera de su área transversal.

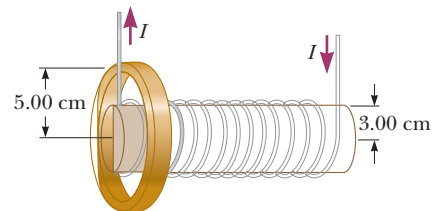


Figura P20.64

65. En la figura P20.65 (página 722), el eje que rueda, de 1.50 m de largo, se jala a lo largo de rieles horizontales con una velocidad constante $v = 3.00$ m/s. Un resistor

$R = 0.400 \Omega$ se conecta a los rieles en los puntos a y b , uno directamente opuesto al otro. (Las ruedas tienen buen contacto eléctrico con los rieles, de modo que eje, rieles y R forman un circuito cerrado. La única resistencia significativa en el circuito es R .) Un campo magnético uniforme $B = 0.800 \text{ T}$ se dirige en forma vertical hacia abajo. a) Encuentre la corriente inducida I en el resistor. b) ¿Qué fuerza horizontal \vec{F} se requiere para mantener el eje en rodamiento con velocidad constante? c) ¿Cuál extremo del resistor, a o b , está al potencial eléctrico más alto? d) Después de que el eje rueda por el resistor, ¿la corriente en R invierte su dirección? Explique su respuesta.

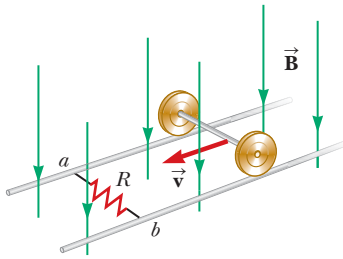


Figura P20.65

66. **CIC S** Una bobina cuadrada de N espiras, con lado ℓ y resistencia R , se jala hacia la derecha con velocidad constante v en la dirección x positiva en presencia de un campo magnético uniforme B que actúa perpendicular a la bobina, como se muestra en la figura P20.66. En $t = 0$, el lado derecho de la bobina está en el borde del campo. Después de transcurrido un tiempo t , toda la bobina está en la región donde $B = 0$. En términos de las cantidades N , B , ℓ , v y R , encuentre expresiones simbólicas para

- a) la magnitud de la fem inducida en la espira durante el intervalo t , b) la magnitud de la corriente inducida en la bobina, c) la potencia entregada a la bobina y d) la fuerza que requiere para remover la bobina del campo. e) ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en la espira? ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética sobre la espira mientras se jala fuera del campo?

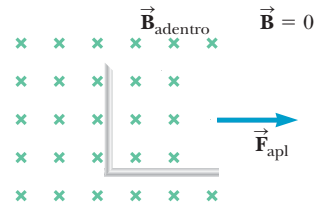


Figura P20.66

67. **S** Una espira conductora rectangular de masa M , resistencia R y dimensiones ℓ y w , cae desde el reposo en un campo magnético \vec{B} , como se muestra en la figura P20.67. Durante el intervalo antes de que el borde superior de la espira llegue al campo, la espira se acerca a una velocidad terminal v_T
- a) Demuestre que

$$v_T = \frac{MgR}{B^2 w^2}$$

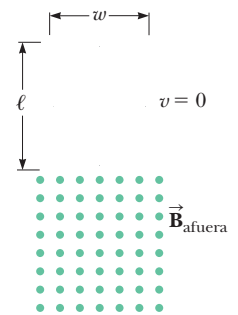


Figura P20.67

- b) ¿Por qué es v_T proporcional a R ? c) ¿Por qué es inversamente proporcional a B^2 ?



Arecibo, un gran radiotelescopio en Puerto Rico, recoge radiación electromagnética en la forma de ondas de radio. Estas largas longitudes de onda pasan a través de nubes de polvo que oscurecen, lo que permite a los astrónomos crear imágenes de la región central de la Vía Láctea, que no se podrían observar en el espectro visible.

© Bettmann/Corbis

Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas

21

Cada vez que usted enciende un televisor, un equipo de sonido o cualquier otro aparato eléctrico, hace que una corriente alterna (CA) proporcione la potencia para operarlos. El estudio de los circuitos CA comienza con el examen de las características de un circuito que contiene una fuente de fem y algún otro elemento de circuito: un resistor, un capacitor o un inductor. Luego se examina lo que ocurre cuando dichos elementos se conectan en combinación unos con otros. El estudio se limita a configuraciones simples en serie de los tres tipos de elementos.

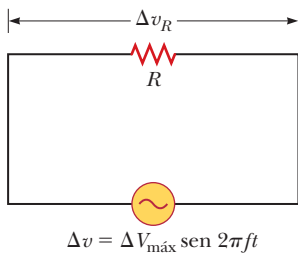
Este capítulo concluye con un análisis de las ondas electromagnéticas, que están compuestas de campos eléctricos y magnéticos fluctuantes. Las **ondas electromagnéticas** en forma de luz visible le permiten a usted ver el mundo a su alrededor; las ondas infrarrojas calientan el ambiente; las ondas de radiofrecuencia transportan los programas de televisión y radio, así como la información acerca de los procesos en el centro de la galaxia; y los rayos X permiten percibir estructuras ocultas dentro de su cuerpo y estudiar las propiedades de estrellas colapsadas distantes. La luz es clave para comprender el Universo.

21.1 Resistores en un circuito CA

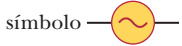
Un circuito CA consiste de combinaciones de elementos de circuito y un generador CA o una fuente CA, que proporciona corriente alterna. Ya vimos que la salida de un generador CA es sinusoidal y varía con el tiempo de acuerdo con

$$\Delta v = \Delta V_{\text{máx}} \text{sen } 2\pi ft \quad [21.1]$$

- 21.1 Resistores en un circuito CA
- 21.2 Capacitores en un circuito CA
- 21.3 Inductores en un circuito CA
- 21.4 El circuito *RLC* en serie
- 21.5 Potencia en un circuito CA
- 21.6 Resonancia en un circuito *RLC* en serie
- 21.7 El transformador
- 21.8 Predicciones de Maxwell
- 21.9 Confirmación de Hertz de las predicciones de Maxwell
- 21.10 Producción de ondas electromagnéticas mediante una antena
- 21.11 Propiedades de las ondas electromagnéticas
- 21.12 El espectro de las ondas electromagnéticas
- 21.13 El efecto Doppler para ondas electromagnéticas

**Figura activa 21.1**

Un circuito en serie que consiste de un resistor R conectado a un generador CA, que se designa mediante el símbolo



donde Δv es el voltaje instantáneo, $\Delta V_{\text{máx}}$ es el voltaje máximo del generador CA y f es la frecuencia a la que cambia el voltaje, medido en hertz (Hz). (Compare las ecuaciones 20.7 y 20.8 con la ecuación 21.1 y recuerde $\omega = 2\pi f$.) Primero considere un circuito simple que consiste de un resistor y una fuente CA (que se designa mediante el símbolo), como en la figura activa 21.1. La corriente y el voltaje contra el tiempo a través del resistor se muestran en la figura activa 21.2.

Para explicar el concepto de corriente alterna, primero analizaremos la curva de corriente frente a la curva de tiempo en la figura activa 21.2. En el punto a sobre la curva, la corriente tiene un valor máximo en una dirección, que arbitrariamente se llamó dirección positiva. Entre los puntos a y b , la corriente disminuye en magnitud pero todavía está en la dirección positiva. En el punto b , la corriente momentáneamente es cero; luego comienza a aumentar en la dirección opuesta (negativa) entre los puntos b y c . En el punto c , la corriente alcanza su valor máximo en la dirección negativa.

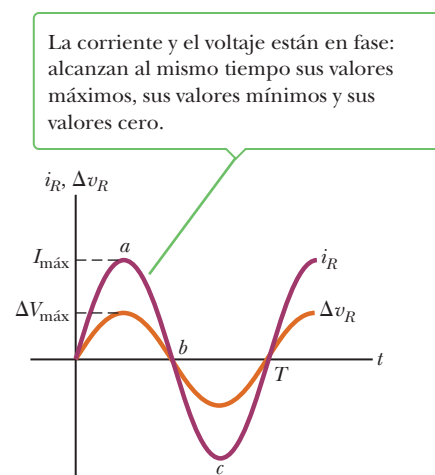
La corriente y el voltaje están a la par uno con otro porque varían de manera idéntica con el tiempo. **Puesto que la corriente y el voltaje alcanzan sus valores máximos al mismo tiempo, se dice que están en fase.** Observe que **el valor promedio de la corriente durante un ciclo es cero** porque la corriente se mantiene en una dirección (la dirección positiva) por la misma cantidad de tiempo y a la misma magnitud que está en la dirección opuesta (la dirección negativa). Sin embargo, la dirección de la corriente no tiene efecto sobre el comportamiento del resistor en el circuito: las colisiones entre los electrones y los átomos fijos del resistor resultan en un aumento en la temperatura del resistor sin importar la dirección de la corriente.

Este análisis se cuantifica al recordar que la razón a la que se disipa la energía eléctrica en un resistor, la potencia P , es

$$P = i^2 R$$

donde i es la corriente *instantánea* en el resistor. Debido a que el efecto de calentamiento de una corriente es proporcional al *cuadrado* de la corriente, no hace diferencia si el signo asociado con la corriente es positivo o negativo. Sin embargo, el efecto de calentamiento que se produce mediante una corriente alterna con un valor máximo de $I_{\text{máx}}$ *no es el mismo* que el producido por una corriente directa del mismo valor. La razón es que la corriente alterna tiene este valor máximo sólo durante un instante de tiempo durante un ciclo. La cantidad importante en un circuito CA es un tipo especial de valor promedio de corriente, llamado **corriente rms**: la corriente directa que disipa la misma cantidad de energía en un resistor que es disipada mediante la corriente alterna real. Encontrar el promedio de la corriente alterna I , representado en la figura 21.3 a no sería útil, ya que el promedio es cero, mientras que la corriente efectiva siempre es positiva. Para encontrar la corriente rms, primero se eleva al cuadrado la corriente, luego se encuentra su valor promedio y finalmente se saca la raíz cuadrada de este valor promedio. Por lo tanto, la corriente rms es la *raíz cuadrada del promedio (mean) del cuadrado (square) de la corriente*. Puesto que i^2 varía como

Figura activa 21.2 La gráfica de la corriente y el voltaje cruza la gráfica de un resistor contra tiempo.



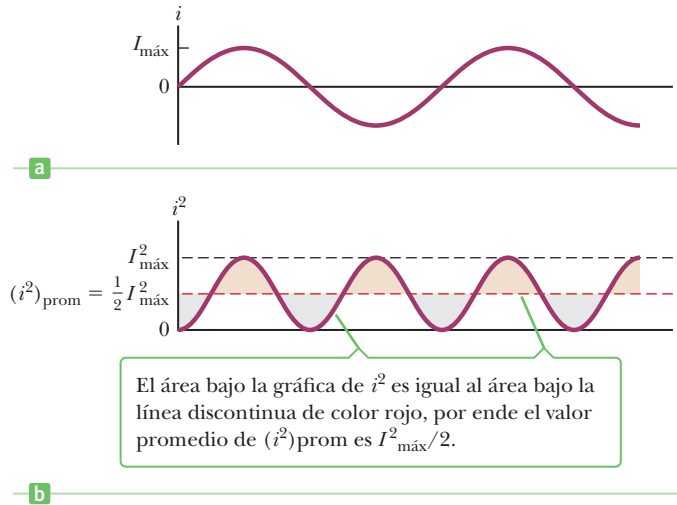


Figura 21.3 a) Gráfica de la corriente en un resistor como función del tiempo. b) Gráfica del cuadrado de la corriente en un resistor como función del tiempo. El área bajo la línea discontinua de color rojo, omite las regiones sombreadas con color, sin embargo está compuesta por la inclusión de las regiones sombreadas en gris con la misma área. Esto demuestra que el área bajo la curva de i^2 es igual al área sombreada bajo la línea discontinua de color rojo, así $(i^2)_{\text{prom}} = I_{\text{máx}}^2/2$.

$\text{sen}^2 2\pi ft$, el valor promedio de i^2 es $\frac{1}{2} I_{\text{máx}}^2$ (figura 21.3b).¹ Por lo tanto, la corriente rms I_{rms} se relaciona con el valor máximo de la corriente alterna $I_{\text{máx}}$ mediante

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = 0.707 I_{\text{máx}} \quad [21.2]$$

Esta ecuación dice que una corriente alterna con un valor máximo de 3 A produce el mismo efecto de calentamiento en un resistor que una corriente directa de $(3/\sqrt{2})$ A. En consecuencia, se puede decir que la potencia promedio disipada en un resistor que porta corriente alterna I es

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 R$$

Los voltajes alternos también se estudian mejor en términos de voltajes rms, con una relación idéntica a la precedente,

$$\Delta V_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = 0.707 \Delta V_{\text{máx}} \quad [21.3]$$

◀ voltaje rms

donde ΔV_{rms} es el voltaje rms y $\Delta V_{\text{máx}}$ es el valor máximo del voltaje alterno.

Cuando se habla de medir un voltaje CA de 120 V desde un tomacorriente eléctrico, en realidad se entiende un voltaje rms de 120 V. Un cálculo rápido con la ecuación 21.3 muestra que tal voltaje CA en realidad tiene un valor pico de aproximadamente 170 V. En este capítulo se usan valores rms cuando se discuten corrientes y voltajes alternos. Una razón es que los amperímetros y voltímetros CA están diseñados para leer valores rms. Más aún, si se usan valores rms, muchas de las ecuaciones para corriente alterna tendrán la misma forma que las que se usan en el estudio de los circuitos de corriente directa (CD). La tabla 21.1 (página 726) resume las notaciones que se utilizan a lo largo de este capítulo.

¹Se puede demostrar que $(i^2)_{\text{prom}} = I_{\text{máx}}^2/2$ del modo siguiente: la corriente en el circuito varía con el tiempo de acuerdo con la expresión $i = I_{\text{máx}} \text{sen } 2\pi ft$, de modo que $i^2 = I_{\text{máx}}^2 \text{sen}^2 2\pi ft$. Por lo tanto, se puede encontrar el valor promedio de i^2 al calcular el valor promedio de $\text{sen}^2 2\pi ft$. Observe que una gráfica de $\text{cos}^2 2\pi ft$ contra el tiempo es idéntica a una gráfica de $\text{sen}^2 2\pi ft$ contra el tiempo, excepto que los puntos se recorren sobre el eje tiempo. Por ende, el promedio en el tiempo de $\text{sen}^2 2\pi ft$ es igual al promedio en el tiempo de $\text{cos}^2 2\pi ft$, tomado sobre uno o más ciclos. Esto es,

$$(\text{sen}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} = (\text{cos}^2 2\pi ft)_{\text{prom}}$$

Con este hecho y la identidad trigonométrica $\text{sen}^2 \theta + \text{cos}^2 \theta = 1$, se obtiene

$$(\text{sen}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} + (\text{cos}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} = 2(\text{sen}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} = 1$$

$$(\text{sen}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} = \frac{1}{2}$$

Cuando este resultado se sustituye en la expresión $i^2 = I_{\text{máx}}^2 \text{sen}^2 2\pi ft$, se obtiene $(i^2)_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 = I_{\text{máx}}^2/2$, o $I_{\text{rms}} = I_{\text{máx}}/\sqrt{2}$, donde I_{rms} es la corriente rms.

Tabla 21.1 Notación que se usa en este capítulo

	Voltaje Corriente	
Valor instantáneo	Δv	i
Valor máximo	$\Delta V_{\text{máx}}$	$I_{\text{máx}}$
Valor rms	ΔV_{rms}	I_{rms}

Considere el circuito en serie de la figura activa 21.1 activa (página 724), que consiste de un resistor conectado a un generador CA. Un resistor impide la corriente en un circuito CA, tal como lo hace en un circuito CD. Por lo tanto, la ley de Ohm es válida para un circuito CA y se tiene

$$\Delta V_{R,\text{rms}} = I_{\text{rms}}R \quad [21.4a]$$

El voltaje rms a través de un resistor es igual a la corriente rms en el circuito, por la resistencia. Esta ecuación también es cierta si se usan valores máximos de corriente y voltaje:

$$\Delta V_{R,\text{rms}} = I_{\text{máx}}R \quad [21.4b]$$

Examen rápido

21.1 ¿Cuál de los siguientes enunciados puede ser verdadero para un resistor que, en un circuito simple en serie, se conecta a un generador CA en operación? a) $P_{\text{prom}} = 0$ e $i_{\text{prom}} = 0$ b) $P_{\text{prom}} = 0$ e $i_{\text{prom}} > 0$ c) $P_{\text{prom}} > 0$ e $i_{\text{prom}} = 0$ d) $P_{\text{prom}} > 0$ e $i_{\text{prom}} > 0$

EJEMPLO 21.1 ¿Cuál es la corriente rms?

OBJETIVO Realizar cálculos básicos de circuito CA para un circuito meramente resistivo.

PROBLEMA Una fuente de voltaje CA tiene una salida de $\Delta v = (2.00 \times 10^2 \text{ V}) \text{ sen } 2\pi ft$. Esta fuente se conecta a un resistor de $1.00 \times 10^2 \Omega$ como en la figura 21.1. Encuentre el voltaje rms y la corriente rms en el resistor.

ESTRATEGIA Compare la expresión para la salida de voltaje recién dada con la forma general, $\Delta v = \Delta V_{\text{máx}} \text{ sen } 2\pi ft$, y encuentre el voltaje máximo. Sustituya este resultado en la expresión para el voltaje rms.

SOLUCIÓN

Obtenga el voltaje máximo mediante comparación de la expresión dada para la salida, con la expresión general:

$$\Delta v = (2.00 \times 10^2 \text{ V}) \text{ sen } 2\pi ft \quad \Delta v = \Delta V_{\text{máx}} \text{ sen } 2\pi ft$$

$$\rightarrow \Delta V_{\text{máx}} = 2.00 \times 10^2 \text{ V}$$

A continuación, sustituya en la ecuación 21.3 para encontrar el voltaje rms de la fuente:

$$\Delta V_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{2.00 \times 10^2 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 141 \text{ V}$$

Sustituya este resultado en la ley de Ohm para encontrar la corriente rms:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{R} = \frac{141 \text{ V}}{1.00 \times 10^2 \Omega} = 1.41 \text{ A}$$

COMENTARIOS Note cómo el concepto de valores rms permite el manejo de un circuito CA de manera cuantitativa en forma muy parecida a un circuito CD.

PREGUNTA 21.1 Verdadero o Falso: La corriente rms en un circuito CA oscila sinusoidalmente con el tiempo.

EJERCICIO 21.1 Encuentre la corriente máxima en el circuito y la potencia promedio que se entrega al circuito.

RESPUESTA 2.00 A; $2.00 \times 10^2 \text{ W}$

FÍSICA APLICADA 21.1 Campos eléctricos y tratamiento del cáncer **BIO**

Las células cancerosas se multiplican con mucha más frecuencia que la mayoría de las células normales, se dispersan en todo el cuerpo, usan sus recursos e interfieren con el funcionamiento normal. La mayoría de las terapias dañan tanto las células cancerosas como las sanas, así que encontrar métodos que hagan blanco en las células cancerosas es importante para desarrollar mejores tratamientos para la enfermedad.

Puesto que las células cancerosas se multiplican rápidamente, es natural considerar tratamientos que eviten o perturben la división celular. Los tratamientos como la quimioterapia interfieren con el ciclo de división celular, pero también pueden dañar las células sanas. Recientemente se descubrió que los campos eléctricos alternos que se producen mediante corrientes CA en el rango de 100 kHz pueden

perturbar el ciclo de división celular o frenar la división o hacer que una célula que se divide se desintegre. Las células sanas que se dividen solamente a una tasa muy lenta, son menos vulnerables que las células cancerosas de rápida división, así que tal terapia es prometedora para ciertos tipos de cáncer.

Se cree que los campos eléctricos alternos afectan el proceso de mitosis, que es la división del núcleo celular en dos conjuntos de cromosomas idénticos. Casi al final de la primera fase de la mitosis, llamada profase, se forma el huso mitótico, una estructura de filamentos finos que guía los dos conjuntos

replicados de cromosomas hacia células hijas separadas. El huso mitótico se hace a partir de una polimerización de dímeros de tubulina, una proteína con un gran momento de dipolo eléctrico. El campo eléctrico alterno ejerce fuerzas sobre estos dipolos, lo que perturba su funcionamiento adecuado.

La terapia de campo eléctrico es especialmente prometedora para el tratamiento de tumores cerebrales porque las células cerebrales sanas no se dividen y, en consecuencia, no serían dañadas por los campos eléctricos alternos. Continúa la investigación sobre tales terapias. ■

21.2 Capacitores en un circuito CA

Para entender el efecto de un capacitor sobre el comportamiento de un circuito que contiene una fuente de voltaje CA, primero revise lo que ocurre cuando un capacitor se coloca en un circuito que contiene una fuente CD, como una batería. Cuando el interruptor se cierra en un circuito en serie que contiene una batería, un resistor y un capacitor, la carga inicial sobre las placas del capacitor es cero. Por lo tanto, el movimiento de carga a través del circuito es relativamente libre y hay una gran corriente en el circuito. Conforme más carga se acumula sobre el capacitor, crece el voltaje a través de él y se opone a la corriente. Después de cierto intervalo de tiempo, que depende de la constante de tiempo RC , la corriente tiende a cero. En consecuencia, un capacitor en un circuito CD limita o impide la corriente, de modo que tiende a cero después de un breve tiempo.

Ahora considere el circuito simple en serie de la figura activa 21.4, que consiste de un capacitor conectado a un generador CA. Bosqueje las curvas de corriente contra tiempo y voltaje contra tiempo, y luego intente que las gráficas parezcan razonables. Las curvas se muestran en la figura 21.5. Primero, observe que el segmento de la curva de corriente de a a b indica que la corriente comienza en un valor más bien grande. Este valor grande se puede entender al reconocer que no hay carga sobre el capacitor en $t = 0$; como consecuencia, no hay nada en el circuito excepto la resistencia de los alambres para dificultar el flujo de carga en este instante. Sin embargo, la corriente disminuye mientras el voltaje a través del capacitor aumenta de c a d en la curva de voltaje. Cuando el voltaje está en el punto d , la corriente se invierte y comienza a aumentar en la dirección opuesta (de b a e sobre la curva de corriente). Durante este tiempo, el voltaje a través del capacitor disminuye de d a f porque las placas ahora pierden la carga que acumularon anteriormente. El resto del ciclo para voltaje y corriente es una repetición de lo que ocurrió durante la primera mitad del ciclo. La corriente alcanza un valor máximo en la dirección opuesta en el punto e sobre la curva de corriente y luego disminuye conforme se acumula el voltaje a través del capacitor.

En un circuito meramente resistivo, la corriente y el voltaje siempre están a la par uno con otro. Éste no es el caso cuando un capacitor está en el circuito. En la figura 21.5, cuando a través de un capacitor se aplica un voltaje alterno, el voltaje alcanza su valor máximo un cuarto de ciclo después que la corriente alcanza su valor máximo. Se dice que **el voltaje a través de un capacitor siempre se retrasa a la corriente por 90°** .

El efecto de impedimento de un capacitor en la corriente en un circuito CA se expresa en términos de un factor llamado **reactancia capacitiva** X_C , que se define como

$$X_C \equiv \frac{1}{2\pi fC}$$

[21.5]

Cuando C está en farads y f en hertz, la unidad de X_C es el ohm. Observe que $2\pi f = \omega$, la frecuencia angular.

A partir de la ecuación 21.5, conforme aumenta la frecuencia f de la fuente de voltaje, la reactancia capacitiva X_C (el efecto de impedimento del capacitor) disminuye, de modo que la corriente aumenta. A una alta frecuencia existe menos tiempo disponible para cargar el capacitor, así que menos carga y voltaje se acumulan en el capacitor, lo que se

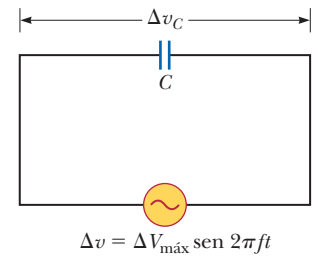


Figura activa 21.4 Circuito en serie que contiene un capacitor C conectado a un generador CA.

El voltaje alcanza su valor máximo 90° después de que la corriente alcanza su valor máximo, así que el voltaje se “retrasa” a la corriente.

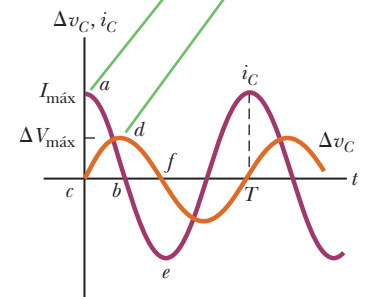


Figura activa 21.5 Gráficas de corrientes y voltaje a través de un capacitor contra el tiempo en un circuito CA.

◀ El voltaje a través de un capacitor se retrasa a la corriente por 90°

◀ Reactancia capacitiva

traduce en menos oposición al flujo de carga y, en consecuencia, a mayor corriente. La analogía entre reactancia capacitiva y resistencia significa que se puede escribir una ecuación de la misma forma que la ley de Ohm para describir los circuitos CA que contienen capacitores. Esta ecuación relaciona el voltaje rms y la corriente rms en el circuito con la reactancia capacitiva:

$$\Delta V_{C,\text{rms}} = I_{\text{máx}} X_C \quad [21.6]$$

■ EJEMPLO 21.2 Un circuito CA meramente capacitivo

OBJETIVO Realizar cálculos básicos de circuito CA para un circuito capacitivo.

PROBLEMA Un capacitor de $8.00 \mu\text{F}$ se conecta a las terminales de un generador CA con un voltaje rms de $1.50 \times 10^2 \text{ V}$ y una frecuencia de 60.0 Hz . Encuentre la reactancia capacitiva y la corriente rms en el circuito.

ESTRATEGIA Sustituya valores en las ecuaciones 21.5 y 21.6.

SOLUCIÓN

Sustituya los valores de f y C en la ecuación 21.5:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi(60.0 \text{ Hz})(8.00 \times 10^{-6} \text{ F})} = 332 \Omega$$

Resuelva la ecuación 21.6 para la corriente y sustituya los valores para X_C y el voltaje rms para encontrar la corriente rms:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{C,\text{rms}}}{X_C} = \frac{1.50 \times 10^2 \text{ V}}{332 \Omega} = 0.452 \text{ A}$$

COMENTARIOS De nuevo, observe cuán similar es la técnica con la de analizar un circuito CD con un resistor.

PREGUNTA 21.2 Verdadero o Falso: Mientras más grande sea la capacitancia de un capacitor, mayor será la reactancia capacitiva.

EJERCICIO 21.2 Si la frecuencia se duplica, ¿qué ocurre con la reactancia capacitiva y la corriente rms?

RESPUESTA X_C se reduce a la mitad e I_{rms} se duplica.

21.3 Inductores en un circuito CA

Ahora considere un circuito CA que consiste de un inductor conectado a las terminales de una fuente CA, como en la figura activa 21.6. (En cualquier circuito real existe alguna resistencia en el alambre que forma la bobina inductiva, pero por ahora se ignora esta consideración.) La salida de corriente variable del generador produce una fuerza contraelectromotriz que impide la corriente en el circuito. La magnitud de esta fuerza contraelectromotriz es

$$\Delta v_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [21.7]$$

La resistencia efectiva de la bobina en un circuito CA se mide mediante una cantidad llamada **reactancia inductiva**, X_L :

$$X_L \equiv 2\pi f L \quad [21.8]$$

Cuando f está en hertz y L en henrys, la unidad de X_L es el ohm. La reactancia inductiva *aumenta* con frecuencia e inductancia crecientes. Estos hechos contrastan con los capacitores, donde aumentar frecuencia o capacitancia *disminuye* la reactancia capacitiva.

Para entender el significado de la reactancia inductiva, compare la ecuación 21.8 con la ecuación 21.7. Primero, observe de la ecuación 21.8 que la reactancia inductiva depen-

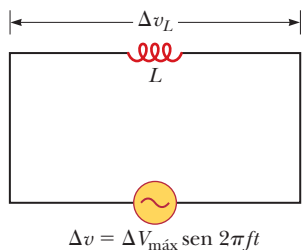


Figura activa 21.6

Circuito en serie que consiste de un inductor L conectado a un generador CA.

de de la inductancia L , que es razonable porque la fuerza contraelectromotriz (ecuación 21.7) es grande para valores grandes de L . Segundo, observe que la reactancia inductiva depende de la frecuencia f . Esta dependencia también es razonable porque la fuerza contraelectromotriz depende de $\Delta I/\Delta t$, una cantidad que es grande cuando la corriente cambia rápidamente, como lo sería para altas frecuencias.

Con esta definición de reactancia inductiva se puede escribir una ecuación de la misma forma que la ley de Ohm para el voltaje a través de la bobina o el inductor:

$$\Delta V_{L,\text{rms}} = I_{\text{rms}} X_L \quad [21.9]$$

donde $\Delta V_{L,\text{rms}}$ es el voltaje rms a través de la bobina e I_{rms} es la corriente rms en la bobina.

La figura activa 21.7 muestra el voltaje instantáneo y la corriente instantánea a través de la bobina como función del tiempo. Cuando a través de un inductor se aplica un voltaje sinusoidal, el voltaje alcanza su valor máximo un cuarto de periodo de oscilación antes de que la corriente alcance su valor máximo. En esta situación se dice que **el voltaje a través de un inductor siempre se adelanta a la corriente por 90°** .

Para ver por qué hay una relación de fase entre voltaje y corriente, examine algunos puntos sobre las curvas de la figura activa 21.7. En el punto a sobre la curva de corriente, la corriente comienza a aumentar en la dirección positiva. En este instante la razón de cambio de la corriente, $\Delta I/\Delta t$ (la pendiente de la curva de corriente), está en un máximo y de la ecuación 21.7 vemos que el voltaje a través del inductor en consecuencia también está en un máximo. Conforme la corriente se eleva entre los puntos a y b sobre la curva, $\Delta I/\Delta t$ gradualmente disminuye hasta que llega a cero en el punto b . Como resultado, el voltaje a través del inductor disminuye durante este mismo intervalo de tiempo, como indica el segmento entre c y d sobre la curva de voltaje. Inmediatamente después del punto b , la corriente comienza a disminuir, aunque todavía tiene la misma dirección que tenía durante el cuarto de ciclo anterior. Conforme la corriente disminuye a cero (desde b hasta e sobre la curva), de nuevo se induce un voltaje en la bobina (de d a f), pero la polaridad de este voltaje es opuesto a la polaridad del voltaje inducida entre c y d . Esto ocurre porque las fuerzas contraelectromotrices siempre se oponen al cambio en la corriente.

Usted podría continuar examinando otros segmentos de la curva, pero no obtendría nueva información porque las variaciones de corriente y voltaje son repetitivas.

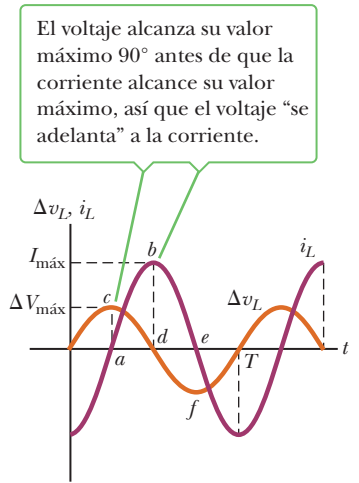


Figura activa 21.7 Gráficas de corriente y voltaje a través de un inductor contra el tiempo, en un circuito CA.

■ EJEMPLO 21.3 Un circuito CA meramente inductivo

OBJETIVO Realizar cálculos básicos de circuito CA para un circuito inductivo.

PROBLEMA En un circuito CA meramente inductivo (véase la figura activa 21.6), $L = 25.0$ mH y el voltaje rms es 1.50×10^2 V. Encuentre la reactancia inductiva y la corriente rms en el circuito si la frecuencia es 60.0 Hz.

SOLUCIÓN

Sustituya L y f en la ecuación 21.8 para obtener la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(60.0 \text{ s}^{-1})(25.0 \times 10^{-3} \text{ H}) = 9.42 \Omega$$

Resuelva la ecuación 21.9 para la corriente rms y sustituya:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{L,\text{rms}}}{X_L} = \frac{1.50 \times 10^2 \text{ V}}{9.42 \Omega} = 15.9 \text{ A}$$

COMENTARIOS La analogía con los circuitos CD es incluso más cercana que en el caso capacitivo porque en el equivalente inductivo de la ley de Ohm, el voltaje a través de un inductor es *proporcional* a la inductancia L , tal como el voltaje a través de un resistor es proporcional a R en la ley de Ohm.

PREGUNTA 21.3 Verdadero o Falso: Una mayor inductancia o frecuencia resulta en una mayor reactancia inductiva.

EJERCICIO 21.3 Calcule la reactancia inductiva y la corriente rms en un circuito similar, si la frecuencia de nuevo es 60.0 Hz, pero el voltaje rms es 85.0 V y la inductancia es 47.0 mH.

RESPUESTA $X_L = 17.7 \Omega$, $I = 4.80 \text{ A}$

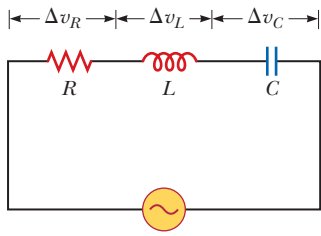


Figura activa 21.8

Circuito en serie que consiste de un resistor, un inductor y un capacitor conectados a un generador CA.

21.4 El circuito RLC en serie

En las secciones anteriores se examinaron los efectos de un inductor, un capacitor y un resistor cuando se conectan por separado a través de una fuente de voltaje CA. Ahora consideraremos lo que ocurre cuando estos elementos se combinan.

La figura activa 21.8 muestra un circuito que contiene un resistor, un inductor y un capacitor conectados en serie a través de una fuente CA que suministra un voltaje total Δv en cierto instante. La corriente en el circuito es la misma en todos los puntos del circuito en cualquier instante y varía sinusoidalmente con el tiempo, como se indica en la figura activa 21.9a. Este hecho se puede expresar matemáticamente como

$$i = I_{\text{máx}} \text{sen } 2\pi ft$$

Anteriormente aprendió que el voltaje a través de cada elemento puede o no estar en fase con la corriente. Los voltajes instantáneos a través de los tres elementos, que se muestran en la figura activa 21.9, tienen las siguientes relaciones de fase con la corriente instantánea:

1. El voltaje instantáneo Δv_R a través del resistor está *en fase* con la corriente instantánea. (Véase la figura activa 21.9b.)
2. El voltaje instantáneo Δv_L a través del inductor *se adelanta* a la corriente por 90° . (Véase la figura activa 21.9c.)
3. El voltaje instantáneo Δv_C a través del capacitor *se retrasa* a la corriente por 90° . (Véase la figura activa 21.9d.)

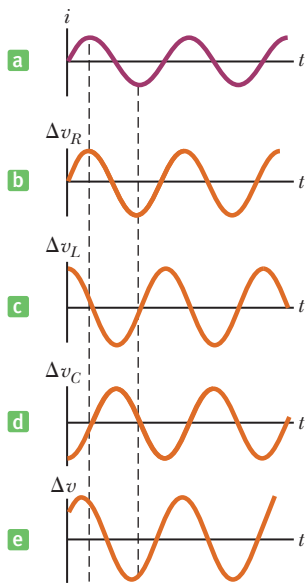


Figura activa 21.9 Relaciones de fase en el circuito RLC en serie que se muestra en la figura activa 21.8.

El voltaje instantáneo neto Δv proporcionado por la fuente CA es igual a la suma de los voltajes instantáneos a través de los elementos separados: $\Delta v = \Delta v_R + \Delta v_C + \Delta v_L$. Sin embargo, ¡esto no significa que los voltajes medidos con un voltímetro CA a través de R , C y L sumen el voltaje fuente medido! De hecho, el voltaje medido *no* suma el voltaje fuente medido porque los voltajes a través de R , C y L tienen todas fases diferentes.

Para explicar las diferentes fases de las caídas de voltaje se usa una técnica que involucra vectores. El voltaje a través de cada elemento se representa con un vector giratorio, como en la figura 21.10. A los vectores giratorios se les conoce como **fasores** y el diagrama se llama **diagrama de fasores**. Este diagrama particular representa el voltaje del circuito dado por la expresión $\Delta v = \Delta V_{\text{máx}} \text{sen } (2\pi ft + \phi)$, donde $\Delta V_{\text{máx}}$ es el voltaje máximo (la magnitud o longitud del vector giratorio o fasor) y ϕ es el ángulo entre el fasor y el eje x positivo cuando $t = 0$. El fasor se puede ver como un vector de magnitud $\Delta V_{\text{máx}}$ que gira con una frecuencia constante f de modo que su proyección a lo largo del eje y es el voltaje instantáneo en el circuito. Puesto que ϕ es el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente en el circuito, el fasor para la corriente (que no se muestra en la figura 21.10) yace a lo largo del eje x positivo cuando $t = 0$ y se expresa mediante la relación $i = I_{\text{máx}} \text{sen } (2\pi ft)$.

Los diagramas de fasores en la figura 21.11 son útiles para analizar el circuito RLC en serie. Los voltajes en fase con la corriente se representan mediante vectores a lo largo del eje x positivo y los voltajes fuera de fase con la corriente yacen a lo largo de otras direcciones. ΔV_R es horizontal y a la derecha porque no está en fase con la corriente. Del mismo modo, ΔV_L se representa mediante un fasor a lo largo del eje x positivo porque se adelanta a la corriente por 90° . Finalmente, ΔV_C está a lo largo del eje y negativo porque se retrasa a la corriente² por 90° . Si los fasores se suman como cantidades vectoriales, de modo que expliquen las diferentes fases de los voltajes a través de R , L y C , la figura 21.11a muestra que el único componente x para los voltajes es ΔV_R y el componente y neto es $\Delta V_L - \Delta V_C$. Ahora se suman los fasores vectorialmente para encontrar el fasor $\Delta V_{\text{máx}}$ (figura 21.11b),

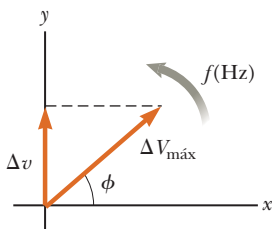


Figura 21.10 Diagrama de fasores para el voltaje en un circuito CA, donde ϕ es el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente y Δv es el voltaje instantáneo.

² Un mnemotécnico para ayudar a recordar las relaciones de fase en los circuitos RLC es "ELI the ICE man". E representa el voltaje \mathcal{E} , I la corriente, L la inductancia y C la capacitancia. Por ende, el nombre ELI significa que, en un circuito inductivo, el voltaje \mathcal{E} adelanta a la corriente I . En un circuito capacitivo, ICE significa que la corriente adelanta al voltaje.

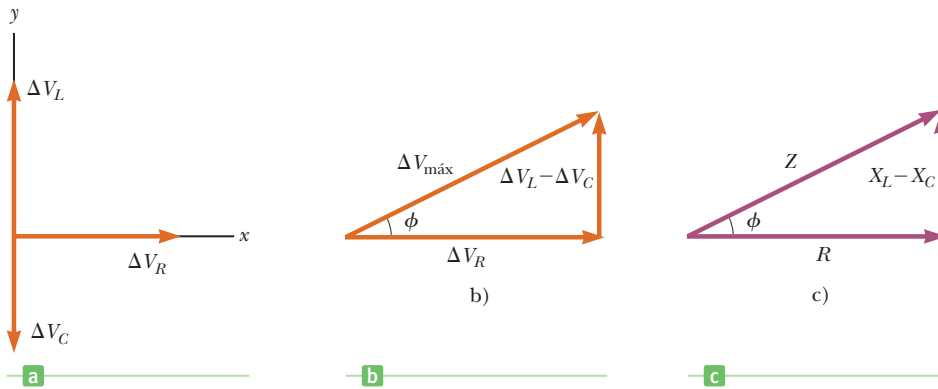


Figura 21.11 a) Diagrama de fasores para el circuito RLC. b) La suma de los fasores como vectores produce $\Delta V_{\text{máx}} = \sqrt{\Delta V_R^2 + (\Delta V_L - \Delta V_C)^2}$. c) Triángulo de reactancia que produce la relación de impedancia $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

que representa el voltaje máximo. El triángulo rectángulo en la figura 21.11b proporciona las siguientes ecuaciones para el voltaje máximo y el ángulo de fase ϕ entre el voltaje máximo y la corriente:

$$\Delta V_{\text{máx}} = \sqrt{\Delta V_R^2 + (\Delta V_L - \Delta V_C)^2} \quad [21.10]$$

$$\tan \phi = \frac{\Delta V_L - \Delta V_C}{\Delta V_R} \quad [21.11]$$

En estas ecuaciones, todos los voltajes son valores máximos. Aunque se elige usar voltajes máximos en el análisis, las ecuaciones anteriores se aplican bien a voltajes rms por igual porque las dos cantidades se relacionan mutuamente por el mismo factor para todos los elementos del circuito. El resultado para el voltaje máximo $\Delta V_{\text{máx}}$ dado por la ecuación 21.10 refuerza el hecho de que **los voltajes a través del resistor, capacitor e inductor no están en fase, así que no simplemente se pueden sumar para obtener el voltaje a través de la combinación de elementos o para obtener el voltaje fuente.**

Examen rápido

21.2 Para el circuito de la figura 21.8, ¿el voltaje instantáneo de la fuente es igual a a) la suma de los voltajes máximos a través de los elementos, b) la suma de los voltajes instantáneos a través de los elementos o c) la suma de los voltajes rms a través de los elementos?

La ecuación 21.10 se puede escribir en la forma de ley de Ohm, al usar las relaciones $\Delta V_R = I_{\text{máx}}R$, $\Delta V_L = I_{\text{máx}}X_L$ y $\Delta V_C = I_{\text{máx}}X_C$, donde $I_{\text{máx}}$ es la corriente máxima en el circuito:

$$\Delta V_{\text{máx}} = I_{\text{máx}}\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad [21.12]$$

Es conveniente definir un parámetro llamado **impedancia** Z del circuito como

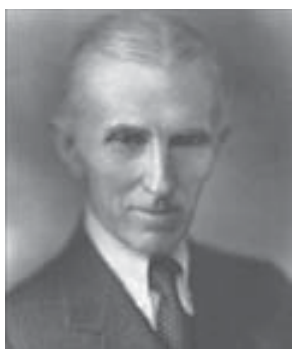
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad [21.13] \quad \leftarrow \text{Impedancia}$$

de modo que la ecuación 21.12 se convierte en

$$\Delta V_{\text{máx}} = I_{\text{máx}}Z \quad [21.14]$$

La ecuación 21.14 está en la forma de ley de Ohm, $\Delta V = IR$, con la impedancia en ohms en sustitución de R . De hecho, la ecuación 21.14 se puede considerar como una forma generalizada de la ley de Ohm aplicada a un circuito CA en serie. La impedancia y, por lo tanto, la corriente en un circuito CA dependen de la resistencia, la inductancia, la capacitancia y la frecuencia (porque las reactancias son dependientes de la frecuencia).

Bettmann/Corbis



Nikola Tesla (1856-1943)

Tesla nació en Croacia, pero pasó la mayor parte de su vida profesional como inventor en Estados Unidos. Fue una figura clave en el desarrollo de la electricidad de corriente alterna, los transformadores de alto voltaje y el transporte de energía eléctrica vía líneas de transmisión CA. El punto de vista de Tesla estuvo en desacuerdo con las ideas de Edison, quien se comprometió con el uso de la corriente directa en las líneas de transmisión. Ganó el enfoque CA de Tesla.

Tabla 21.2 Valores de impedancia y ángulos de fase para varias combinaciones de elementos de circuito

Elementos de circuito	Impedancia Z	Ángulo de fase ϕ
	R	0°
	X_C	-90°
	X_L	$+90^\circ$
	$\sqrt{R^2 + X_C^2}$	Negativo, entre -90° y 0°
	$\sqrt{R^2 + X_L^2}$	Positivo, entre 0° y 90°
	$\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	Negativo si $X_C > X_L$ Positivo si $X_C < X_L$

Nota: En cada caso se aplica un voltaje CA (no se muestra) a través de la combinación de elementos (esto es, a través de los puntos).

Es útil representar la impedancia Z con un diagrama vectorial tal como el que se muestra en la figura 21.11c. Se construye un triángulo rectángulo con lado opuesto a ϕ $X_L - X_C$, base R e hipotenusa Z . Al aplicar el teorema de Pitágoras a este triángulo, vemos que

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

es la ecuación 21.13. Más aún, a partir del diagrama vectorial en la figura 21.11c vemos que el ángulo de fase ϕ entre la corriente y el voltaje obedece la relación

$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R} \tag{21.15}$$

Ángulo de fase ϕ ►

El significado físico del ángulo de fase será aparente en la sección 21.5.

La tabla 21.2 proporciona valores de impedancia y ángulos de fase para algunos circuitos en serie que contienen diferentes combinaciones de elementos de circuito.

Los circuitos de corriente alterna en paralelo también son útiles en aplicaciones cotidianas. Sin embargo, no se les tratará aquí, porque su análisis está más allá del ámbito de este libro.

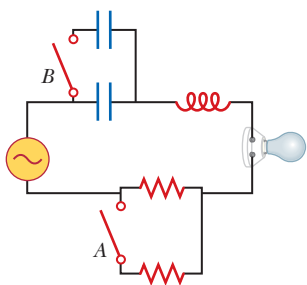


Figura 21.12 (Exámenes rápidos 21.3–21.6)

Examen rápido

21.3 Si el interruptor A se cierra en la figura 21.12, ¿qué ocurre con la impedancia del circuito? a) Aumenta. b) Disminuye. c) No cambia.

21.4 Suponga $X_L > X_C$ en la figura 21.12. Si el interruptor A se cierra, ¿qué ocurre con el ángulo de fase? a) Aumenta. b) Disminuye. c) No cambia.

21.5 Suponga $X_L > X_C$ en la figura 21.12. Si el interruptor A queda abierto y el interruptor B se cierra, ¿qué ocurre con el ángulo de fase? a) Aumenta. b) Disminuye. c) No cambia.

21.6 Suponga $X_L > X_C$ en la figura 21.12 y, con ambos interruptores abiertos, una pieza de hierro se desliza en el inductor. Durante este proceso, ¿qué ocurre con el brillo del foco? a) Aumenta. b) Disminuye. c) No cambia.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Circuitos RLC

Se recomienda el siguiente procedimiento para resolver problemas de circuitos RLC en serie:

1. Calcule las reactancias inductiva y capacitiva, X_L y X_C .
2. Use X_L y X_C junto con la resistencia R para calcular la impedancia Z del circuito.
3. Encuentre la máxima corriente o máxima caída de voltaje con la ley de Ohm equivalente, $\Delta V_{\text{máx}} = I_{\text{máx}}Z$.
4. Calcule las caídas de voltaje a través de los elementos individuales con las variaciones apropiadas de la ley de Ohm: $\Delta V_{R,\text{máx}} = I_{\text{máx}}R$, $\Delta V_{L,\text{máx}} = I_{\text{máx}}X_L$ y $\Delta V_{C,\text{máx}} = I_{\text{máx}}X_C$.
5. Obtenga el ángulo de fase con el uso de $\tan \phi = (X_L - X_C)/R$.

■ EJEMPLO 21.4 Un circuito RLC

OBJETIVO Analizar un circuito CA RLC en serie y encontrar el ángulo de fase.

PROBLEMA Un circuito CA RLC en serie tiene resistencia $R = 2.50 \times 10^2 \Omega$, inductancia $L = 0.600 \text{ H}$, capacitancia $C = 3.50 \mu\text{F}$, frecuencia $f = 60.0 \text{ Hz}$ y voltaje máximo $\Delta V_{\text{máx}} = 1.50 \times 10^2 \text{ V}$. Encuentre **a)** la impedancia del circuito, **b)** la corriente máxima en el circuito, **c)** el ángulo de fase y **d)** los voltajes máximos a través de los elementos.

ESTRATEGIA Calcule las reactancias inductiva y capacitiva, que se pueden usar con la resistencia para calcular la impedancia y el ángulo de fase. La impedancia y la ley de Ohm producen la corriente máxima.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la impedancia del circuito.

Primero, calcule las reactancias inductiva y capacitiva:

$$X_L = 2\pi fL = 226 \Omega \quad X_C = 1/2\pi fC = 758 \Omega$$

Sustituya estos resultados y la resistencia R en la ecuación 21.13 para obtener la impedancia del circuito:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \\ = \sqrt{(2.50 \times 10^2 \Omega)^2 + (226 \Omega - 758 \Omega)^2} = 588 \Omega$$

b) Encuentre la corriente máxima en el circuito.

Use la ecuación 21.12, la ley de Ohm equivalente, para encontrar la corriente máxima:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{Z} = \frac{1.50 \times 10^2 \text{ V}}{588 \Omega} = 0.255 \text{ A}$$

c) Encuentre el ángulo de fase.

Calcule el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje con la ecuación 21.15:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = \tan^{-1} \left(\frac{226 \Omega - 758 \Omega}{2.50 \times 10^2 \Omega} \right) = -64.8^\circ$$

d) Encuentre los voltajes máximos a través de los elementos.

Sustituya en la “ley de Ohm” expresiones para cada tipo individual de elemento de corriente:

$$\Delta V_{R,\text{máx}} = I_{\text{máx}}R = (0.255 \text{ A})(2.50 \times 10^2 \Omega) = 63.8 \text{ V}$$

$$\Delta V_{L,\text{máx}} = I_{\text{máx}}X_L = (0.255 \text{ A})(2.26 \times 10^2 \Omega) = 57.6 \text{ V}$$

$$\Delta V_{C,\text{máx}} = I_{\text{máx}}X_C = (0.255 \text{ A})(7.58 \times 10^2 \Omega) = 193 \text{ V}$$

COMENTARIOS Puesto que el circuito es más capacitivo que inductivo ($X_C > X_L$), ϕ es negativo. Un ángulo de fase negativo significa que la corriente se adelanta al voltaje aplicado. Observe también que la suma de los voltajes máximos a través de los elementos es $\Delta V_R + \Delta V_L + \Delta V_C = 314 \text{ V}$, que es mucho mayor que 150 V el voltaje máximo del generador. Como se vio en el examen rápido 21.2, la suma de los voltajes máximos es una cantidad sin significado porque, cuando se suman voltajes alternos, se deben tomar en cuenta *tanto sus amplitudes como sus fases*. Sabemos que los voltajes máximos a través de varios elementos ocurren en diferentes momentos, así que no tiene sentido sumar todos los valores máximos. La forma correcta de “sumar” los voltajes es a través de la ecuación 21.10.

(continúa)

PREGUNTA 21.4 Verdadero o Falso: En un circuito RLC , la impedancia siempre debe ser mayor o igual a la resistencia.

EJERCICIO 21.4 Analice un circuito CA RLC en serie para el que $R = 175 \Omega$, $L = 0.500 \text{ H}$, $C = 22.5 \mu\text{F}$, $f = 60.0 \text{ Hz}$ y $\Delta V_{\text{máx}} = 325 \text{ V}$. Encuentre: a) la impedancia, b) la corriente máxima, c) el ángulo de fase y d) los voltajes máximos a través de los elementos.

RESPUESTAS a) 189Ω b) 1.72 A c) 22.0° d) $\Delta V_{R,\text{máx}} = 301 \text{ V}$, $\Delta V_{L,\text{máx}} = 324 \text{ V}$, $\Delta V_{C,\text{máx}} = 203 \text{ V}$

21.5 Potencia en un circuito CA

En un circuito CA no se asocian pérdidas de potencia con capacitores puros e inductores puros. Un capacitor puro, por definición, no tiene resistencia o inductancia, mientras que un inductor puro no tiene resistencia o capacitancia. (Estas definiciones son idealizaciones: en un capacitor real, por ejemplo, los efectos inductivos podrían volverse importantes a altas frecuencias.) Comience con el análisis de la potencia disipada en un circuito CA que sólo contiene un generador y un capacitor.

Cuando la corriente aumenta en una dirección en un circuito CA, la carga se acumula sobre el capacitor y a través de él aparece una caída de voltaje. Cuando el voltaje alcanza su valor máximo, la energía almacenada en el capacitor es

$$EP_C = \frac{1}{2} C (\Delta V_{\text{máx}})^2$$

Sin embargo, este almacenamiento de energía sólo es momentáneo: cuando la corriente invierte su dirección, la carga sale de las placas del capacitor y regresa a la fuente de voltaje. Durante la mitad de cada ciclo el capacitor se carga y durante la otra mitad la carga regresa a la fuente de voltaje. Por lo tanto, la potencia promedio que suministra la fuente es cero. En otras palabras, **no ocurre pérdida de potencia en un capacitor en un circuito CA.**

De igual modo, la fuente debe realizar trabajo contra la fuerza contraelectromotriz de un inductor que porta una corriente. Cuando la corriente alcanza su valor máximo, la energía almacenada en el inductor es un máximo y está dada por

$$EP_L = \frac{1}{2} LI_{\text{máx}}^2$$

Cuando la corriente comienza a disminuir en el circuito, esta energía almacenada regresa a la fuente conforme el inductor intenta mantener la corriente en el circuito. La potencia promedio que se entrega a un resistor en un circuito RLC es

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 R \quad [21.16]$$

La potencia promedio que entrega el generador se convierte en energía interna en el resistor. En un capacitor o inductor ideal no ocurre pérdida de potencia.

Una ecuación alternativa para la pérdida de potencia promedio en un circuito CA se puede encontrar al sustituir (de la ley de Ohm) $R = \Delta V_{R,\text{rms}}/I_{\text{rms}}$ en la ecuación 21.16:

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{R,\text{rms}}$$

Es conveniente consultar un triángulo de voltaje que muestre la relación entre ΔV_{rms} , $\Delta V_{R,\text{rms}}$ y $\Delta V_{L,\text{rms}} - \Delta V_{C,\text{rms}}$, como la figura 21.11b. (Recuerde que la figura 21.11 se aplica tanto a voltajes máximos como a rms.) A partir de esta figura, vemos que la caída de voltaje a través de un resistor se puede escribir en términos del voltaje de la fuente, ΔV_{rms} :

$$\Delta V_{R,\text{rms}} = \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi$$

Por lo tanto, la potencia promedio que entrega un generador en un circuito CA es:

Potencia promedio ►

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi \quad [21.17]$$

donde la cantidad $\cos \phi$ se llama **factor de potencia**.

La ecuación 21.17 muestra que la potencia que entrega una fuente CA a cualquier circuito depende de la diferencia de fase entre el voltaje fuente y la corriente resultante.

Este hecho tiene muchas aplicaciones interesantes. Por ejemplo, las fábricas con frecuencia usan dispositivos como grandes motores en máquinas, generadores y transformadores que tienen una gran carga inductiva debida a todos los devanados. Para entregar mayor potencia a tales dispositivos sin usar voltajes excesivamente altos, los técnicos de las fábricas introducen capacitancia en los circuitos para correr la fase.

APLICACIÓN

Corrimiento de fase para entregar más potencia

■ EJEMPLO 21.5 Potencia promedio en un circuito RLC en serie

OBJETIVO Reconocer la potencia en los circuitos RLC en serie.

PROBLEMA Calcule la potencia promedio que se entrega al circuito RLC en serie que se describe en el ejemplo 21.4.

ESTRATEGIA Después de encontrar la corriente rms y el voltaje rms con las ecuaciones 21.2 y 21.3, sustituya en la ecuación 21.17, y use el ángulo de fase que encontró en el ejemplo 21.4.

SOLUCIÓN

Primero, use las ecuaciones 21.2 y 21.3 para calcular la corriente rms y el voltaje rms:

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{0.255 \text{ A}}{\sqrt{2}} = 0.180 \text{ A}$$

$$\Delta V_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{1.50 \times 10^2 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 106 \text{ V}$$

Sustituya estos resultados y el ángulo de fase $\phi = -64.8^\circ$ en la ecuación 21.17 para encontrar la potencia promedio:

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi = (0.180 \text{ A})(106 \text{ V}) \cos(-64.8^\circ) = 8.12 \text{ W}$$

COMENTARIOS El mismo resultado se puede obtener a partir de la ecuación 21.16, $P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 R$.

PREGUNTA 21.5 ¿Bajo qué circunstancias la potencia promedio de un circuito RLC puede ser cero?

EJERCICIO 21.5 Repita este problema con el sistema que se describe en el ejercicio 21.4.

RESPUESTA 259 W

21.6 Resonancia en un circuito RLC en serie

En general, la corriente rms en un circuito RLC en serie se puede escribir

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad [21.18]$$

A partir de esta ecuación, vemos que si la frecuencia varía, la corriente tiene su valor *máximo* cuando la impedancia tiene su valor *mínimo*, lo que ocurre cuando $X_L = X_C$. En tal circunstancia, la impedancia del circuito se reduce a $Z = R$. La frecuencia f_0 a la que esto ocurre se llama **frecuencia de resonancia** del circuito. Para encontrar f_0 , establezca $X_L = X_C$, lo que produce, a partir de las ecuaciones 21.5 y 21.8,

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad [21.19]$$

La figura 21.13 es una gráfica de la corriente como función de la frecuencia para un circuito que contiene un valor fijo tanto para capacitancia como para inductancia. A partir de la ecuación 21.18, se debe concluir que la corriente se volvería infinita a resonancia cuando $R = 0$. Aunque la ecuación 21.18 predice este resultado, los circuitos reales siempre tienen cierta resistencia, lo que limita el valor de la corriente.

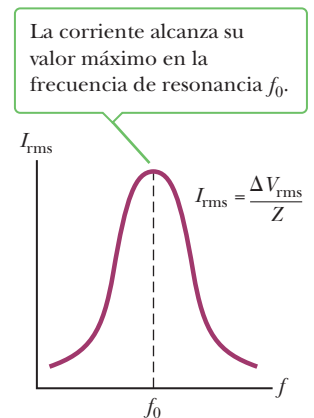


Figura activa 21.13 Gráfica de amplitud de corriente en un circuito RLC en serie, contra frecuencia del voltaje del generador.

APLICACIÓN

Sintonía de su radio

El circuito sintonizador de un radio es una importante aplicación de un circuito resonante en serie. El radio se sintoniza en una estación particular (que transmite una señal de radiofrecuencia específica) al variar un capacitor, que cambia la frecuencia de resonancia del circuito sintonizador. Cuando esta frecuencia de resonancia coincide con la onda de radio entrante, la corriente en el circuito sintonizador aumenta.

FÍSICA APLICADA 21.2 Detectores de metales en el juzgado

Cuando usted camina a través de las puertas del detector de metales de un juzgado, como lo hace la persona en la figura 21.14, en realidad camina a través de una bobina de muchas espiras. ¿Cómo funciona el detector de metales?

EXPLICACIÓN El detector de metales en esencia es un circuito resonante. El portal por el que cruza es un inductor (una gran espira de alambre conductor) que es parte del circuito. La frecuencia del circuito se sintoniza a la frecuencia de resonancia del circuito cuando no hay metal en el inductor. Cuando camina a través del arco con metal en su bolsillo, cambia la inductancia efectiva del circuito resonante, lo que resulta en un cambio en la corriente en el circuito. Este cambio en corriente se detecta y un circuito electrónico hace que se emita un sonido como alarma. ■



Figura 21.14 (Física aplicada 21.2) Detector de metales en el juzgado.

Kira Vuille-Kowling

EJEMPLO 21.6 Un circuito en resonancia

OBJETIVO Identificar la frecuencia de resonancia y su relación con inductancia, capacitancia y corriente rms.

PROBLEMA Considere un circuito RLC en serie para el que $R = 1.50 \times 10^2 \Omega$, $L = 20.0 \text{ mH}$, $\Delta V_{\text{rms}} = 20.0 \text{ V}$ y $f = 796 \text{ s}^{-1}$.
a) Determine el valor de la capacitancia para la cual la corriente rms es un máximo. **b)** Encuentre la corriente máxima rms en el circuito.

ESTRATEGIA La corriente es un máximo a la frecuencia de resonancia f_0 , que se debe igualar con la frecuencia impulsora, 796 s^{-1} . La ecuación resultante se puede resolver para C . Para el inciso b), sustituya en la ecuación 21.18 para obtener la corriente rms máxima.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la capacitancia dada la corriente máxima en el circuito (la condición de resonancia).

Resuelva la frecuencia de resonancia para la capacitancia:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \rightarrow \sqrt{LC} = \frac{1}{2\pi f_0} \rightarrow LC = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 (796 \text{ Hz})^2 (20.0 \times 10^{-3} \text{ H})} = 2.00 \times 10^{-6} \text{ F}$$

Inserte los valores dados y sustituya la frecuencia fuente para la frecuencia de resonancia, f_0 :

b) Encuentre la corriente máxima rms en el circuito.

Las reactancias capacitiva e inductiva son iguales, de modo que $Z = R = 1.50 \times 10^2 \Omega$. Sustituya en la ecuación 21.18 para encontrar la corriente rms:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{20.0 \text{ V}}{1.50 \times 10^2 \Omega} = 0.133 \text{ A}$$

COMENTARIOS Puesto que la impedancia Z está en el denominador de la ecuación 21.18, la corriente máxima siempre ocurrirá cuando $X_L = X_C$, porque esto produce el valor mínimo de Z .

PREGUNTA 21.6 Verdadero o Falso: La magnitud de la corriente en un circuito RLC nunca es mayor que la corriente rms.

EJERCICIO 21.6 Considere un circuito RLC en serie para el que $R = 1.20 \times 10^2 \Omega$, $C = 3.10 \times 10^{-5} \text{ F}$, $\Delta V_{\text{rms}} = 35.0 \text{ V}$ y $f = 60.0 \text{ s}^{-1}$. a) Determine el valor de la inductancia para el cual la corriente rms es un máximo. b) Encuentre la corriente máxima rms en el circuito.

RESPUESTAS a) 0.227 H b) 0.292 A

21.7 El transformador

Con frecuencia es necesario cambiar un pequeño voltaje CA a uno mayor o viceversa. Tales cambios se realizan con un dispositivo llamado transformador.

En su forma más simple, el **transformador CA** consiste de dos bobinas de alambre devanadas alrededor de un núcleo de hierro blando, como se muestra en la figura 21.15. La bobina a la izquierda, que se conecta a la entrada de la fuente de voltaje CA y tiene N_1 espiras, se llama devanado primario, o el *primario*. La bobina a la derecha, que se conecta a un resistor R y consiste de N_2 espiras, es el *secundario*. El propósito del núcleo de hierro común es aumentar el flujo magnético y proporcionar un medio en el que casi todo el flujo a través de una bobina pase a través de la otra.

Cuando se aplica un voltaje CA de entrada ΔV_1 al primario, el voltaje inducido a través de él está dado por

$$\Delta V_1 = -N_1 \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad [21.20]$$

donde Φ_B es el flujo magnético a través de cada espira. Si supone que no escapa flujo del núcleo de hierro, entonces el flujo a través de cada espira del primario es igual al flujo a través de cada espira del secundario. Por lo tanto, el voltaje a través de la bobina secundaria es

$$\Delta V_2 = -N_2 \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad [21.21]$$

El término $\Phi_B/\Delta t$ es común a las ecuaciones 21.20 y 21.21 y se puede eliminar algebraicamente, lo que produce

$$\Delta V_2 = \frac{N_2}{N_1} \Delta V_1 \quad [21.22]$$

Cuando N_2 es mayor que N_1 , ΔV_2 supera a ΔV_1 y al transformador se le conoce como *transformador de subida*. Cuando N_2 es menor que N_1 , lo que hace ΔV_2 menor que ΔV_1 , se tiene un *transformador de bajada*.

Por la ley de Faraday, se genera un voltaje a través del secundario sólo cuando hay un *cambio* en el número de líneas de flujo que pasan a través del secundario. Por lo tanto, la corriente de entrada en el primario cambia con el tiempo, que es lo que ocurre cuando se utiliza una corriente alterna. Sin embargo, cuando la entrada al primario es una corriente directa, ocurre una salida de voltaje en el secundario sólo en el instante cuando un interruptor en el circuito primario se abre o cierra. Una vez que la corriente en el primario alcanza un valor estacionario, el voltaje de salida en el secundario es cero.

Puede parecer que un transformador es un dispositivo en el que es posible obtener algo a partir de nada. Por ejemplo, un transformador de subida puede cambiar un voltaje de entrada de, por decir, 10 a 100 V. Esto significa que cada coulomb de carga que sale del secundario tiene 100 J de energía, mientras que cada coulomb de carga que entra al primario sólo tiene 10 J de energía. Sin embargo, éste no es el caso, porque **la potencia de entrada al primario es igual a la potencia de salida en el secundario**:

$$I_1 \Delta V_1 = I_2 \Delta V_2 \quad [21.23]$$

Aunque el *voltaje* en el secundario puede ser, por decir, 10 veces mayor que el voltaje en el primario, la *corriente* en el secundario será menor que la corriente del primario por un factor de 10. La ecuación 21.23 supone un **transformador ideal** en el que no existen pérdidas de potencia entre el primario y el secundario. Los transformadores reales por lo general tienen eficiencias de potencia que varían de 90 a 99%. Las pérdidas de potencia

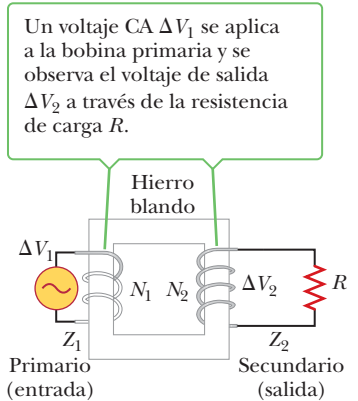


Figura 21.15 Un transformador ideal consiste de dos bobinas devanadas sobre el mismo núcleo de hierro blando. Un voltaje CA ΔV_1 se aplica a la bobina primaria y se observa el voltaje de salida ΔV_2 a través de la resistencia de carga R después de cerrar el interruptor.

◀ En un transformador ideal, la potencia de entrada es igual a la potencia de salida

APLICACIÓN

Transmisión de energía eléctrica a larga distancia

ocurren debido a factores como corrientes parásitas inducidas en el núcleo de hierro del transformador, que disipa energía en la forma de pérdidas I^2R .

Cuando la energía eléctrica se transmite a través de largas distancias, es económico usar un voltaje alto y una corriente baja porque la pérdida de potencia vía calentamiento resistivo en las líneas de transmisión varía como I^2R . Si una compañía eléctrica puede reducir la corriente por un factor de diez, por ejemplo, la pérdida de potencia se reduce por un factor de cien. En la práctica, el voltaje sube a alrededor de 230 000 V en la estación generadora, luego se baja a alrededor de 20 000 V en una estación de distribución y finalmente se baja a 120 V en el poste eléctrico del consumidor.

EJEMPLO 21.7 Distribución de electricidad en una ciudad

OBJETIVO Identificar los transformadores y su papel en la reducción de pérdidas de potencia.

PROBLEMA Un generador en una compañía eléctrica produce 1.00×10^2 A de corriente a 4.00×10^3 V. El voltaje se sube a 2.40×10^5 V mediante un transformador antes de enviarse a una línea de transmisión de alto voltaje a través de un área rural hasta una ciudad. Suponga que la resistencia efectiva de la línea de transmisión es 30.0Ω y que los transformadores son ideales. **a)** Determine el porcentaje de pérdida de potencia en la línea de transmisión. **b)** ¿Qué porcentaje de la potencia original se perdería en la línea de transmisión si el voltaje no se subiera?

ESTRATEGIA Resolver este problema sólo es cuestión de sustitución en la ecuación para transformadores y la ecuación para pérdida de potencia. Para obtener la fracción de pérdida de potencia, también es necesario calcular la salida de potencia del generador: la corriente por la diferencia de potencial que crea el generador.

SOLUCIÓN

a) Determine el porcentaje de pérdida de potencia en la línea.

Sustituya en la ecuación 21.23 para encontrar la corriente en la línea de transmisión:

$$I_2 = \frac{I_1 \Delta V_1}{\Delta V_2} = \frac{(1.00 \times 10^2 \text{ A})(4.00 \times 10^3 \text{ V})}{2.40 \times 10^5 \text{ V}} = 1.67 \text{ A}$$

Ahora use la ecuación 21.16 para encontrar la pérdida de potencia en la línea de transmisión:

$$(1) P_{\text{perdida}} = I_2^2 R = (1.67 \text{ A})^2 (30.0 \Omega) = 83.7 \text{ W}$$

Calcule la salida de potencia del generador:

$$P = I_1 \Delta V_1 = (1.00 \times 10^2 \text{ A})(4.00 \times 10^3 \text{ V}) = 4.00 \times 10^5 \text{ W}$$

Finalmente, divida P_{perdida} entre la salida de potencia y multiplique por cien para encontrar el porcentaje de pérdida de potencia:

$$\% \text{ potencia perdida} = \left(\frac{83.7 \text{ W}}{4.00 \times 10^5 \text{ W}} \right) \times 100 = 0.0209\%$$

b) ¿Qué porcentaje de la potencia original se perdería en la línea de transmisión si el voltaje no se subiera?

Sustituya la corriente subida en la ecuación (1) por la corriente original de 1.00×10^2 A:

$$P_{\text{perdida}} = I^2 R = (1.00 \times 10^2 \text{ A})^2 (30.0 \Omega) = 3.00 \times 10^5 \text{ W}$$

Calcule el porcentaje de pérdida, como antes:

$$\% \text{ potencia perdida} = \left(\frac{3.00 \times 10^5 \text{ W}}{4.00 \times 10^5 \text{ W}} \right) \times 100 = 75\%$$

COMENTARIOS Este ejemplo ilustra la ventaja de las líneas de transmisión de alto voltaje. En la ciudad, un transformador en una subestación baja de nuevo el voltaje a aproximadamente 4000 V y este voltaje se mantiene a través de las líneas eléctricas a lo largo de la ciudad. Cuando la potencia se usa en una casa o negocio, un transformador en el poste eléctrico cerca del establecimiento reduce el voltaje a 240 o 120 V.

PREGUNTA 21.7 Si el voltaje se sube al doble de la cantidad en este problema, ¿en qué factor cambia la pérdida de potencia? a) 2 b) no cambia c) $\frac{1}{2}$ d) $\frac{1}{4}$

Este transformador cilíndrico de bajada disminuye el voltaje de 4000 a 220 V para entregar a un grupo de casas.



© George Sample/Cengage Learning

EJERCICIO 21.7 Suponga que el mismo generador tiene el voltaje subido a sólo 7.50×10^4 V y que la resistencia de la línea es 85.0Ω . Encuentre el porcentaje de pérdida de potencia en este caso.

RESPUESTA 0.604%

21.8 Predicciones de Maxwell

Durante las primeras etapas de su estudio y desarrollo, los fenómenos eléctrico y magnético se consideraron como no relacionados. Sin embargo, en 1865, James Clerk Maxwell (1831-1879) proporcionó una teoría matemática que demostró una relación cercana entre todos los fenómenos eléctricos y magnéticos. Además de unificar los campos anteriormente separados de electricidad y magnetismo, su brillante teoría predijo que los campos eléctrico y magnético pueden moverse a través del espacio como ondas. La teoría que desarrolló se basa en las siguientes cuatro piezas de información:

1. Las líneas de campo eléctrico se originan en las cargas positivas y terminan en cargas negativas.
2. Las líneas de campo magnético siempre forman rizos cerrados; no comienzan o terminan en alguna parte.
3. Un campo magnético variable induce una fem y por lo tanto un campo eléctrico. Este hecho es un enunciado de la ley de Faraday (capítulo 20).
4. Los campos magnéticos se generan mediante cargas en movimiento (o corrientes), como se resume en la ley de Ampère (capítulo 19).

El primer enunciado es una consecuencia de la naturaleza de la fuerza electrostática entre partículas cargadas, dada por la ley de Coulomb. Representa el hecho de que **en la naturaleza existen cargas libres (monopolos eléctricos)**.

El segundo enunciado, que los campos magnéticos forman rizos continuos, se ejemplifica mediante las líneas de campo magnético en torno a un largo alambre recto, que son circunferencias cerradas y las líneas de campo magnético de un imán de barra, que forman rizos cerrados. Dice, en contraste con el primer enunciado, que **en la naturaleza no existen cargas magnéticas libres (monopolos magnéticos)**.

El tercer enunciado es equivalente a la ley de inducción de Faraday, y el cuarto es equivalente a la ley de Ampère.

En uno de los más grandes desarrollos teóricos del siglo XIX, Maxwell usó estos cuatro enunciados dentro de un marco matemático correspondiente para probar que los campos eléctrico y magnético juegan papeles simétricos en la naturaleza. Ya se sabía, por los experimentos, que un campo magnético variable produce un campo eléctrico de acuerdo con la ley de Faraday. Maxwell creía que la naturaleza era simétrica y por lo tanto hipotetizó que un campo eléctrico variable produciría un campo magnético. Esta hipótesis no se pudo probar experimentalmente en la época cuando se desarrolló, porque los campos magnéticos generados por los campos eléctricos variables por lo general son muy débiles y en consecuencia difíciles de detectar.

Para justificar su hipótesis, Maxwell investigó otros fenómenos que pudieran explicarse mediante ella. Volteó su atención hacia el movimiento de cargas de rápida oscilación (aceleradas), como las que existen en una barra conductora conectada a un voltaje alterno. Tales cargas son aceleradas y, de acuerdo con las predicciones de Maxwell, generan campos eléctrico y magnético variables. Los campos variables causan perturbaciones electromagnéticas que viajan a través del espacio como ondas, similar a la dispersión de las ondas en el agua creadas por un guijarro que se lanza hacia un estanque. Las ondas que envían las cargas oscilatorias son campos eléctrico y magnético fluctuantes, por lo que se llaman *ondas electromagnéticas*. A partir de la ley de Faraday y de la propia generalización de Maxwell de la ley de Ampère, Maxwell calculó la velocidad de las ondas como igual a la velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^8$ m/s. Maxwell concluyó que la luz visible y otras ondas electromagnéticas consisten de campos eléctrico y magnético fluctuantes que viajan a través del espacio vacío, ¡y que cada campo variable induce al otro! El suyo fue uno de los más grandes descubrimientos de la ciencia, a la par con el descubrimiento de Newton de



North Wind Photo Archives

James Clerk Maxwell Físico teórico escocés (1831-1879)

Maxwell desarrolló la teoría electromagnética de la luz y la teoría cinética de los gases, además explicó la naturaleza de los anillos de Saturno y la visión a color. La exitosa interpretación de Maxwell al campo electromagnético resultó en las ecuaciones que llevan su nombre. Formidable habilidad matemática, combinada con gran comprensión, le permitieron ir adelante en el estudio del electromagnetismo y la teoría cinética.

las leyes del movimiento. Al igual que las leyes de Newton, tuvo profunda influencia sobre desarrollos científicos posteriores.

21.9 Confirmación de Hertz de las predicciones de Maxwell

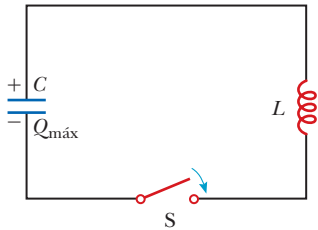


Figura 21.16 Circuito LC simple. El capacitor tiene una carga inicial de $Q_{\text{máx}}$ y el interruptor se cierra en $t = 0$.

En 1887, después de la muerte de Maxwell, Heinrich Hertz (1857-1894) fue el primero en generar y detectar ondas electromagnéticas en un laboratorio, con el uso de circuitos LC. En tal circuito, un capacitor cargado se conecta a un inductor, como en la figura 21.16. Cuando el interruptor se cierra, ocurren oscilaciones en la corriente en el circuito y en la carga sobre el capacitor. Si la resistencia del circuito es despreciable, no se disipa energía y las oscilaciones continúan.

En el siguiente análisis se desprecia la resistencia en el circuito. Suponga que el capacitor tiene una carga inicial $Q_{\text{máx}}$ y que el interruptor se cierra en $t = 0$. Cuando el capacitor está totalmente cargado, la energía total en el circuito se almacena en el campo eléctrico del capacitor y es igual a $Q_{\text{máx}}^2/2C$. En este tiempo, la corriente es cero, de modo que no se almacena energía en el inductor. Conforme el capacitor comienza a descargarse, la energía almacenada en su campo eléctrico disminuye. Al mismo tiempo, la corriente aumenta y la energía igual a $LI^2/2$ ahora se almacena en el campo magnético del inductor. Por lo tanto, se transfiere energía del campo eléctrico del capacitor al campo magnético del inductor. Cuando el capacitor está completamente descargado, no almacena energía. En este momento, la corriente alcanza su valor máximo y toda la energía se almacena en el inductor. Entonces el proceso se repite en la dirección inversa. La energía continúa para transferir entre el inductor y el capacitor, lo que corresponde a oscilaciones en la corriente y carga.

Como vimos en la sección 21.6, la frecuencia de oscilación de un circuito LC se llama *frecuencia de resonancia* del circuito y está dada por

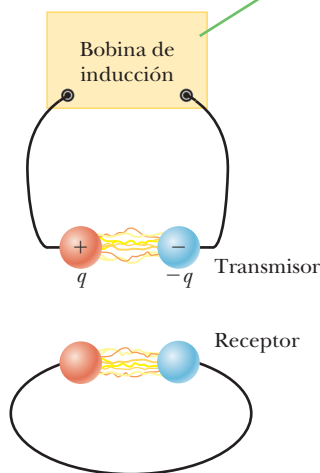
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

El circuito que usó Hertz en sus investigaciones de las ondas electromagnéticas es similar al que recién se estudió y se muestra de manera esquemática en la figura 21.17. Una bobina de inducción (una gran bobina de alambre) se conecta a dos esferas metálicas con una brecha angosta entre ellas para formar un capacitor. Las oscilaciones inician en el circuito mediante pulsos de voltaje cortos que se envían a través de la bobina hacia las esferas y carga una positiva y la otra negativa. Puesto que L y C son muy pequeñas en este circuito, la frecuencia de oscilación es muy alta, $f \approx 100$ MHz. Este circuito se llama transmisor porque produce ondas electromagnéticas.

A varios metros del circuito transmisor, Hertz colocó un segundo circuito, el receptor, que consistió de una sola espira de alambre conectada a dos esferas. Tenía su propia inductancia, capacitancia y frecuencia natural de oscilación efectivas. Hertz descubrió que la energía se enviaba desde el transmisor hasta el receptor cuando la frecuencia de resonancia del receptor se ajustaba para coincidir con la del transmisor. La transferencia de energía se detectó cuando el voltaje a través de las esferas en el circuito receptor se volvía lo suficientemente alto como para producir ionización en el aire, que generaba la aparición de chispas en la brecha de aire que separa las esferas. El experimento de Hertz es análogo al fenómeno mecánico en el que un diapason recoge las vibraciones de otro diapason idéntico.

Hertz planteó como hipótesis que la energía transferida del transmisor al receptor se transporta en la forma de ondas, ahora reconocidas como ondas electromagnéticas. En una serie de experimentos, también demostró que la radiación generada por el transmisor muestra propiedades ondulatorias: interferencia, difracción, reflexión, refracción y polarización. Como verá dentro de poco, todas estas propiedades las manifiesta la luz. Se volvió evidente que las ondas electromagnéticas de Hertz tenían las mismas propiedades conocidas de las ondas de luz y sólo diferían en frecuencia y longitud de onda. Hertz efectivamente

El transmisor consiste de dos electrodos esféricos conectados a una bobina de inducción, que proporciona cortos pulsos de voltaje a las esferas, lo que establece oscilaciones en la descarga.



El receptor es una sola espira de alambre cercana que contiene una segunda brecha de chispa.

Figura 21.17 Diagrama esquemático del aparato de Hertz para generar y detectar ondas electromagnéticas.

confirmó la teoría de Maxwell al demostrar que existían las misteriosas ondas electromagnéticas de Maxwell y que todas tenían las propiedades de las ondas de luz.

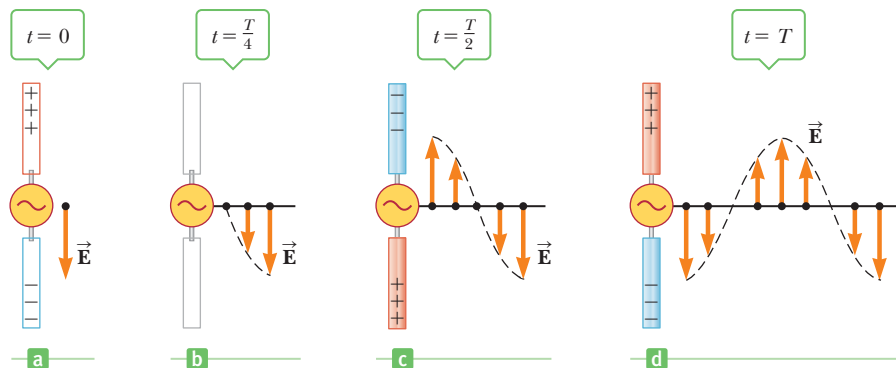
Acaso el experimento más convincente que realizó Hertz fue la medición de la velocidad de las ondas desde el transmisor, lo que logró del modo siguiente: ondas de frecuencia conocida desde el transmisor se reflejaban de una hoja metálica de modo que se establecía un patrón de interferencia, en forma muy parecida al patrón de onda estacionaria sobre una cuerda estirada. Como lo aprendió en el estudio de las ondas estacionarias, la distancia entre nodos es $\lambda/2$, de modo que Hertz pudo determinar la longitud de onda λ . Al usar la relación $v = \lambda f$, encontró que v estaba cerca de 3×10^8 m/s, la velocidad conocida de la luz visible. En consecuencia, los experimentos de Hertz proporcionaron la primera evidencia en apoyo a la teoría de Maxwell.

21.10 Producción de ondas electromagnéticas mediante una antena

En la sección anterior encontramos que la energía almacenada en un circuito LC se transfiere de manera continua entre el campo eléctrico del capacitor y el campo magnético del inductor. Sin embargo, esta transferencia de energía continúa durante prolongados periodos de tiempo sólo cuando los cambios ocurren con lentitud. Si la corriente alterna rápidamente, el circuito pierde parte de su energía en la forma de ondas electromagnéticas. De hecho, *cualquier* circuito que porte una corriente alterna radia ondas electromagnéticas. El mecanismo fundamental responsable por esta radiación es la aceleración de una partícula cargada. **Siempre que una partícula cargada acelere, radia energía.**

Un voltaje alterno aplicado a los alambres de una antena fuerza las cargas eléctricas en la antena a oscilar. Esta técnica común para acelerar partículas cargadas es la fuente de las ondas de radio emitidas por la antena de transmisión de una estación de radio.

La figura 21.18 ilustra la producción de una onda electromagnética al oscilar cargas eléctricas en una antena. Dos barras metálicas se conectan a una fuente CA y hace que las cargas oscilen entre las barras. El voltaje de salida del generador es sinusoidal. En $t = 0$, a la barra superior se le proporciona una carga positiva máxima y a la barra inferior una carga negativa igual, como en la figura 21.18a. En la figura también se muestra el campo eléctrico cerca de la antena en este instante. Conforme las cargas oscilan, las barras quedan con menos carga, el campo cerca de las barras disminuye en intensidad y el campo eléctrico máximo que se dirige hacia abajo, producido en $t = 0$, se aleja de la barra. Cuando las cargas se neutralizan, como en la figura 21.18b, el campo eléctrico se vuelve cero, después de un intervalo igual a un cuarto del periodo de oscilación. Al continuar de esta forma, la barra superior pronto obtiene una carga negativa máxima y la barra inferior se vuelve positiva, como en la figura 21.18c, lo que resulta en un campo eléctrico que se dirige hacia arriba. Esto ocurre después de un intervalo igual a un medio del periodo de oscilación. Las oscilaciones continúan como se indica en la figura 21.18d.



Bettmann/Corbis

Heinrich Rudolf Hertz Físico alemán (1857-1894)

Hertz hizo su más importante descubrimiento de las ondas de radio en 1887. Después de descubrir que la velocidad de una onda de radio era la misma que la de la luz, Hertz demostró que las ondas de radio, como las ondas de luz, se podían reflejar, refractar y difractar. Hertz murió de envenenamiento sanguíneo a la edad de 36 años. Durante su corta vida realizó muchas contribuciones a la ciencia. El hertz, igual a una vibración o ciclo completo por segundo, se llama así en su honor.

APLICACIÓN

Transmisión de ondas de radio

Figura 21.18 Campo eléctrico establecido por cargas oscilatorias en una antena. El campo se mueve alejándose de la antena con la velocidad de la luz.

Tip 21.1 Las cargas aceleradas producen ondas electromagnéticas

Las cargas estacionarias sólo producen campos eléctricos, mientras que las cargas en movimiento uniforme (es decir, velocidad constante) producen campos eléctricos y magnéticos, mas no ondas electromagnéticas. En contraste, las cargas aceleradas producen ondas electromagnéticas, así como campos eléctricos y magnéticos. Una carga en aceleración también radia energía.

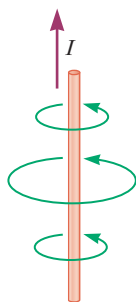


Figura 21.19 Líneas de campo magnético en torno a una antena que porta una corriente variable.

Observe que el campo eléctrico cerca de la antena oscila en fase con la distribución de carga: el campo apunta abajo cuando la barra superior es positiva y arriba cuando la barra superior es negativa. Más aún, la magnitud del campo en cualquier instante depende de la cantidad de carga sobre las barras en dicho instante.

Conforme las cargas continúan oscilando (y acelerando) entre las barras, el campo eléctrico que establecen las cargas se aleja de la antena en todas direcciones con la velocidad de la luz. La figura 21.18 muestra el patrón de campo eléctrico en un lado de la antena en ciertos tiempos durante el ciclo de oscilación. Como puede ver, un ciclo de oscilación de carga produce una longitud de onda completa en el patrón de campo eléctrico.

Puesto que las cargas en oscilación crean una corriente en las barras, también se genera un campo magnético cuando la corriente en las barras es hacia arriba, como se muestra en la figura 21.19. Las líneas de campo magnético dan vueltas a la antena (recuerde la regla de la mano derecha número 2) y son perpendiculares al campo eléctrico en todos los puntos. Conforme la corriente cambia con el tiempo, las líneas de campo magnético se dispersan desde la antena. A grandes distancias de la antena, las intensidades de los campos eléctrico y magnético se vuelven muy débiles. Sin embargo, a estas distancias es necesario tomar en cuenta los hechos de que 1) un campo magnético variable produce un campo eléctrico y 2) un campo eléctrico variable produce un campo magnético, como predijo Maxwell. Estos campos eléctrico y magnético inducidos están en fase: en cualquier punto, los dos campos alcanzan sus valores máximos en el mismo instante. Esta sincronía se ilustra en un instante de tiempo en la figura activa 21.20. Observe que 1) los campos \vec{E} y \vec{B} son mutuamente perpendiculares y 2) ambos campos son perpendiculares a la dirección de movimiento de la onda. Esta segunda propiedad es característica de las ondas transversales. Por lo tanto, vemos que **una onda electromagnética es una onda transversal**.

21.11 Propiedades de las ondas electromagnéticas

Vimos que el análisis detallado de Maxwell predijo la existencia y las propiedades de las ondas electromagnéticas. En esta sección se resume lo que se conoce acerca de las ondas electromagnéticas hasta el momento y se consideran algunas propiedades adicionales. En el presente análisis y en secciones futuras, con frecuencia se hará referencia a un tipo de onda llamada **onda plana**. Una onda electromagnética plana es una onda que viaja desde una fuente muy distante. La figura activa 21.20 representa tal onda en un instante de tiempo dado. En este caso las oscilaciones de los campos eléctrico y magnético tienen lugar en planos perpendiculares al eje xy y por lo tanto son perpendiculares a la dirección de viaje de la onda. Debido a la última propiedad, las ondas electromagnéticas son ondas transversales. En la figura el campo eléctrico \vec{E} está en la dirección y y el campo magnético \vec{B} está en la dirección z . La luz se propaga en una dirección perpendicular a estos dos campos. Esta dirección se determina todavía mediante otra regla de mano derecha: 1) apunte los dedos de su mano derecha en la dirección de \vec{E} , 2) enróllelos en la dirección de \vec{B} y 3) entonces el pulgar derecho apunta en la dirección de propagación de la onda.

Las ondas electromagnéticas viajan con la velocidad de la luz. De hecho, se puede demostrar que la velocidad de una onda electromagnética se relaciona con la permeabilidad y permitividad del medio a través del cual viaja. Maxwell encontró que esta relación en el espacio libre era

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad [21.24]$$

donde c es la velocidad de la luz, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$ es la constante de permeabilidad del vacío y $\epsilon_0 = 8.854 19 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ es la permitividad del espacio libre. Al sustituir estos valores en la ecuación 21.24, se encuentra que

$$c = 2.997 92 \times 10^8 \text{ m/s} \quad [21.25]$$

Velocidad de la luz ►

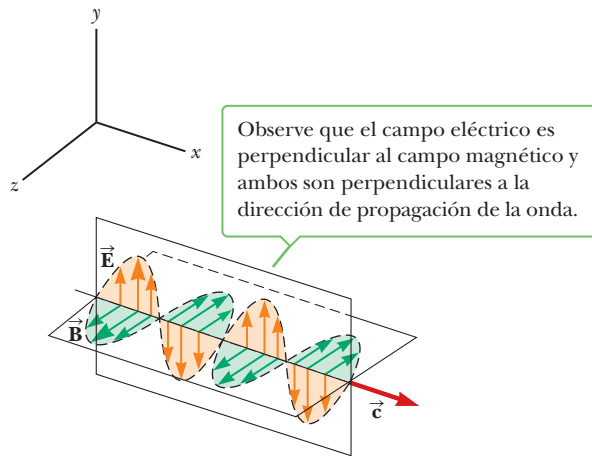


Figura activa 21.20 Una onda electromagnética enviada por cargas en oscilación en una antena, representada en un instante de tiempo y lejos de la antena, que se mueve en la dirección x positiva con velocidad c .

Puesto que las ondas electromagnéticas viajan con la misma velocidad que la luz en el vacío, los científicos concluyeron (correctamente) que **la luz es una onda electromagnética**.

Maxwell también probó la siguiente relación para ondas electromagnéticas:

$$\frac{E}{B} = c \quad [21.26]$$

que afirma que la razón de la magnitud del campo eléctrico a la magnitud del campo magnético es igual a la velocidad de la luz.

Las ondas electromagnéticas portan energía conforme viajan a través del espacio y esta energía se puede transferir a objetos colocados en sus trayectorias. La razón promedio a la que la energía pasa a través de un área perpendicular a la dirección de viaje de una onda o la potencia promedio por unidad de área, se llama **intensidad I** de la onda y está dada por

$$I = \frac{E_{\text{máx}} B_{\text{máx}}}{2\mu_0} \quad [21.27]$$

donde $E_{\text{máx}}$ y $B_{\text{máx}}$ son los valores *máximos* de E y B . La cantidad I es análoga a la intensidad de las ondas sonoras que se introdujo en el capítulo 14. A partir de la ecuación 21.26, se ve que $E_{\text{máx}} = cB_{\text{máx}} = B_{\text{máx}}/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$. Por lo tanto, la ecuación 21.27 también se puede expresar como

$$I = \frac{E_{\text{máx}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c}{2\mu_0} B_{\text{máx}}^2 \quad [21.28]$$

Observe que en estas expresiones se usa la potencia *promedio* por unidad de área. Un análisis detallado demostraría que la energía que porta una onda electromagnética se comparte equitativamente por los campos eléctrico y magnético.

Las ondas electromagnéticas tienen una intensidad promedio dada por la ecuación 21.28. Cuando las ondas golpean un área A de la superficie de un objeto para un tiempo dado Δt , energía $U = IA\Delta t$ se transfiere a la superficie. También se transfiere cantidad de movimiento. En consecuencia, cuando una onda electromagnética incide sobre una superficie, ejerce presión sobre ella. A continuación, suponemos que la onda electromagnética transporta una energía total U a una superficie en un tiempo Δt . Si la superficie absorbe toda la energía incidente U en este tiempo, Maxwell demostró que la cantidad de movimiento total \vec{p} que se entrega a esta superficie tiene una magnitud

$$p = \frac{U}{c} \quad (\text{absorción completa}) \quad [21.29]$$

Si la superficie es un reflector perfecto, entonces la cantidad de movimiento que se transfiere en un tiempo Δt para incidencia normal es el doble de la dada por la ecuación 21.29. Esto es análogo a una molécula de gas que rebota de la pared de un contenedor en una

Tip 21.2 ¿ E más fuerte que B ?

La relación $E = Bc$ hace que parezca que los campos eléctricos asociados con la luz sean mucho mayores que los campos magnéticos. Éste no es el caso: las unidades son diferentes, por lo que las cantidades no se pueden comparar directamente. Los dos campos contribuyen por igual a la energía de una onda de luz.

◀ La luz es una onda electromagnética y transporta energía y cantidad de movimiento

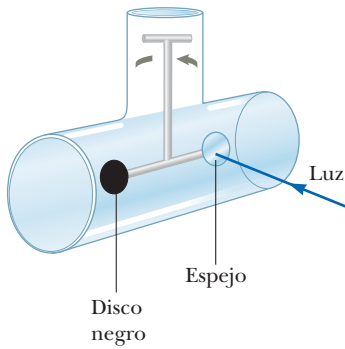


Figura 21.21 Un aparato para medir la presión de radiación de la luz. En la práctica, el sistema está contenido en un alto vacío.

colisión perfectamente elástica. Si la molécula inicialmente viaja en la dirección x positiva a la velocidad v y después de la colisión viaja en la dirección x con velocidad v , su cambio en cantidad de movimiento está dado por $\Delta p = mv - (-mv) = 2mv$. La luz que rebota de un reflector perfecto es un proceso similar, de modo que para reflexión completa,

$$p = \frac{2U}{c} \quad (\text{reflexión completa}) \quad [21.30]$$

Aunque las presiones de radiación son muy pequeñas (aproximadamente $5 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ para luz solar directa), se han medido con un dispositivo como el que se muestra en la figura 21.21. La luz golpea un espejo y un disco negro que se conectan mutuamente mediante una barra horizontal suspendida de una fina fibra. La luz que golpea el disco negro se absorbe por completo, de modo que *toda* la cantidad de movimiento de la luz se transfiere al disco. La luz que golpea el espejo de manera frontal se refleja totalmente; en consecuencia, la cantidad de movimiento que se transfiere al espejo es el doble de la que se transmite al disco. Como resultado, la barra horizontal que sostiene los discos gira contra las manecillas del reloj, visto desde arriba. La barra llega al equilibrio en cierto ángulo bajo la acción de los torques causados por la presión de radiación y el giro de la fibra. La presión de radiación se puede determinar al medir el ángulo al que ocurre el equilibrio. El aparato se debe colocar en un alto vacío para eliminar los efectos de corrientes de aire. Es interesante que experimentos similares demuestran que las ondas electromagnéticas también portan cantidad de movimiento angular.

En resumen, las ondas electromagnéticas que viajan a través del espacio libre tienen las siguientes propiedades:

Algunas propiedades de las ondas electromagnéticas ►

1. Las ondas electromagnéticas viajan con la velocidad de la luz.
2. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales porque los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda y uno a otro.
3. La razón del campo eléctrico al campo magnético en una onda electromagnética es igual a la velocidad de la luz.
4. Las ondas electromagnéticas portan tanto energía como cantidad de movimiento, que se pueden entregar a una superficie.

■ FÍSICA APLICADA 21.3 Polvo del Sistema Solar

En el espacio interplanetario del Sistema Solar, existe una gran cantidad de polvo. Aunque el polvo interplanetario en teoría puede tener varios tamaños, desde tamaño molecular hacia arriba, ¿por qué en el Sistema Solar hay tan pocas partículas de polvo menores que más o menos $0.2 \mu\text{m}$? *Sugerencia:* El Sistema Solar originalmente contenía partículas de polvo de todos los tamaños.

EXPLICACIÓN Las partículas de polvo en el Sistema Solar están sujetas a dos fuerzas: la fuerza gravitacional hacia el Sol y la fuerza de la presión de radiación, que se dirige ale-

jándose del Sol. La fuerza gravitacional es proporcional al cubo del radio de una partícula de polvo esférica porque es proporcional a la masa (ρV) de la partícula. La presión de radiación es proporcional al cuadrado del radio porque depende del área transversal de la partícula. Para partículas grandes, la fuerza gravitacional es mayor que la fuerza de la presión de radiación y la débil atracción hacia el Sol hace que tales partículas se muevan lentamente hacia él. Para partículas pequeñas, menores a aproximadamente $0.2 \mu\text{m}$, la fuerza más grande de la presión de radiación las barre del Sistema Solar. ■

■ Examen rápido

21.7 En un aparato como el de la figura 21.21, suponga que el disco negro se sustituye con uno con la mitad del radio. ¿Cuáles de los siguientes elementos son diferentes después de sustituir el disco? a) presión de radiación sobre el disco, b) fuerza de radiación sobre el disco, c) cantidad de movimiento de radiación entregada al disco en un intervalo de tiempo dado.

■ EJEMPLO 21.8 Un techo caliente de estaño (hogares con energía solar)

OBJETIVO Calcular algunas propiedades básicas de la luz y relacionélas con la radiación térmica.

PROBLEMA Suponga que el Sol entrega una potencia promedio por unidad de área de aproximadamente $1.00 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ a la superficie de la Tierra. **a)** Calcule la potencia total incidente sobre un techo de estaño plano de 8.00 m por 20.0 m . Suponga que la radiación incide de manera *normal* (perpendicular) al techo. **b)** El techo de estaño refleja algo de luz y convección, conducción y radiación transportan el resto de la energía térmica hasta que se establece cierta temperatura de equilibrio. Si el techo es un cuerpo negro perfecto y se deshace él mismo de la mitad de la radiación incidente a través de radiación térmica, ¿cuál es su temperatura de equilibrio? Suponga que la temperatura ambiente es 298 K .

GorillaAttack, 2010/Utilizada bajo licencia de Shutterstock.com



(Ejemplo 21.8) Una casa solar.

SOLUCIÓN

a) Calcule la potencia que se entrega al techo.

Multiplique la intensidad por el área para obtener la potencia:

$$P = IA = (1.00 \times 10^3 \text{ W/m}^2)(8.00 \text{ m} \times 20.0 \text{ m}) \\ = 1.60 \times 10^5 \text{ W}$$

b) Encuentre la temperatura de equilibrio del techo.

Sustituya en la ley de Stefan. Sólo debe sustituir la mitad de la potencia incidente y el doble del área del techo (cuentan tanto la parte superior como el lado inferior del techo).

$$P = \sigma eA(T^4 - T_0^4) \\ T^4 = T_0^4 + \frac{P}{\sigma eA} \\ = (298 \text{ K})^4 + \frac{(0.500)(1.60 \times 10^5 \text{ W/m}^2)}{(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1)(3.20 \times 10^2 \text{ m}^2)} \\ T = 333 \text{ K} = 6.0 \times 10^1 \text{ }^\circ\text{C}$$

COMENTARIOS Si la potencia incidente se pudiera convertir *toda* en potencia eléctrica, sería más que suficiente para la casa promedio. Por desgracia, la energía solar no se aprovecha fácilmente y los prospectos para conversión a gran escala no son tan brillantes como pudiera parecer a partir de este cálculo simple. Por ejemplo, la eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica es mucho menor que 100%; -20% es típico para celdas fotovoltaicas. Se han construido sistemas de techo que usan energía solar para elevar la temperatura del agua con eficiencias de alrededor del 50%. Sin embargo, se deben considerar otros problemas prácticos, como los días nublados, la posición geográfica y el almacenamiento de energía.

PREGUNTA 21.8 ¿El ángulo que forma el techo con respecto a la horizontal afecta la cantidad de potencia que absorbe el techo? Explique.

EJERCICIO 21.8 Un satélite esférico que orbita la Tierra se ilumina en un lado por el Sol, con 1340 W/m^2 de intensidad. Si el radio del satélite es 1.00 m , ¿qué potencia incide sobre él? *Nota:* El satélite efectivamente intercepta radiación sólo sobre una sección transversal, un área igual a la de un disco, πr^2 .

RESPUESTA $4.21 \times 10^3 \text{ W}$

■ EJEMPLO 21.9 Barcos de vela espaciales

OBJETIVO Relacionar la intensidad de la luz con su efecto mecánico sobre la materia.

PROBLEMA La película Mylar aluminizada es un material ligero, enormemente reflectivo, que se podría usar para elaborar velas para naves espaciales impulsadas mediante la luz del Sol. Suponga que una vela con un área de 1.00 km^2 orbita el Sol a una distancia de $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$. La vela tiene una masa de $5.00 \times 10^3 \text{ kg}$ y se sujeta a una carga de $2.00 \times 10^4 \text{ kg}$ de masa. **a)** Si la intensidad de la luz solar es $1.34 \times 10^3 \text{ W}$ y la

vela se orienta perpendicular a la luz incidente, ¿qué fuerza radial se ejerce sobre la vela? **b)** ¿Aproximadamente cuánto tardará en cambiar la velocidad radial de la vela por 1.00 km/s ? Suponga que la vela es perfectamente reflectiva. **c)** Suponga que la luz fue suministrada por un grande y poderoso láser, en lugar del Sol. (Estos sistemas se han propuesto.) Calcule los campos eléctricos y magnéticos pico de la luz láser.

(continúa)

ESTRATEGIA La ecuación 21.30 proporciona la cantidad de movimiento que se imparte cuando la luz golpea un objeto y se refleja totalmente. El cambio en esta cantidad de movimiento con el tiempo es una fuerza. Para el inciso b), use la segunda ley de Newton para obtener la aceleración. La ecuación cinemática de velocidad produce entonces el tiempo necesario para lograr el cambio deseado en la velocidad. El inciso c) se obtiene a partir de la ecuación 21.27 y $E = Bc$

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fuerza que se ejerce sobre la vela.

Escriba la ecuación 21.30 y sustituya $U = P\Delta t = IA\Delta t$ para la energía que se entrega a la vela:

Divida ambos lados por Δt y obtenga la fuerza $\Delta p/\Delta t$ que la luz ejerce sobre la vela:

$$\Delta p = \frac{2U}{c} = \frac{2P\Delta t}{c} = \frac{2IA\Delta t}{c}$$

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2IA}{c} = \frac{2(1340 \text{ W/m}^2)(1.00 \times 10^6 \text{ m}^2)}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 8.93 \text{ N}$$

b) Encuentre el tiempo que tarda en cambiar la velocidad radial en 1.00 km/s.

Sustituya la fuerza en la segunda ley de Newton y resuelva para la aceleración de la vela:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{8.93 \text{ N}}{2.50 \times 10^4 \text{ kg}} = 3.57 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$$

Aplique la ecuación cinemática de velocidad:

$$v = at + v_0$$

Resuelva para t :

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{1.00 \times 10^3 \text{ m/s}}{3.57 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2} = 2.80 \times 10^6 \text{ s}$$

c) Calcule los campos eléctricos y magnéticos pico, si la luz es suministrada por un láser.

Resuelva la ecuación 21.28 para $E_{\text{máx}}$:

$$I = \frac{E_{\text{máx}}^2}{2\mu_0 c} \rightarrow E_{\text{máx}} = \sqrt{2\mu_0 c I}$$

$$E_{\text{máx}} = \sqrt{2(4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2)(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(1.34 \times 10^3 \text{ W/m}^2)} = 1.01 \times 10^3 \text{ N/C}$$

Obtenga $B_{\text{máx}}$ utilizando $E_{\text{máx}} = B_{\text{máx}}c$:

$$B_{\text{máx}} = \frac{E_{\text{máx}}}{c} = \frac{1.01 \times 10^3 \text{ N/C}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3.37 \times 10^{-6} \text{ T}$$

COMENTARIOS La respuesta al inciso b) es un poco más de un mes. Aunque la aceleración es muy baja, no hay costos por combustible y dentro de pocos meses la velocidad puede cambiar lo suficiente para permitir que la nave espacial llegue a cualquier planeta en el Sistema Solar. Tal nave espacial puede ser útil para ciertos propósitos y son enormemente económicas, pero requieren una considerable cantidad de paciencia.

PREGUNTA 21.9 ¿En qué factor cambiará la fuerza que ejerce la luz del Sol cuando la nave espacial esté el doble de lejos del Sol? a) no cambia b) $\frac{1}{2}$ c) $\frac{1}{4}$ d) $\frac{1}{8}$

EJERCICIO 21.9 Un láser tiene una potencia de 22.0 W y un radio de haz de 0.500 mm. a) Encuentre la intensidad del láser. b) Suponga que flota en el espacio y apunta

el haz láser alejándose de usted. ¿Cuál sería su aceleración? Suponga que su masa total, incluido el equipo, es de 72.0 kg y que la fuerza se dirige a través de su centro de masa. *Sugerencia:* El cambio en cantidad de movimiento es el mismo que en el caso no reflectivo. c) Calcule su aceleración si ésta se debiera a la gravedad de una estación espacial de 1.00×10^6 kg de masa, si el centro de masa de la estación está a 100.0 m de distancia. d) Calcule los campos eléctricos y magnéticos pico del láser.

RESPUESTAS a) $2.80 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ b) $1.02 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ c) $6.67 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ d) $1.45 \times 10^5 \text{ N/C}$, $4.84 \times 10^{-4} \text{ T}$. Si planea usar su soplete láser como propulsor para regresar a la estación, ni se moleste, porque la fuerza de gravedad es más fuerte. Mejor haga que alguien le lance una soga.

21.12 El espectro de las ondas electromagnéticas

Todas las ondas electromagnéticas viajan en un vacío con la velocidad de la luz, c . Estas ondas transportan energía y cantidad de movimiento desde alguna fuente hasta un receptor. En 1887, Hertz generó y detectó con éxito las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia que predijo Maxwell. El mismo Maxwell reconocía como ondas electromagnéticas, tanto

la luz visible como la radiación infrarroja descubierta en 1880 por William Herschel. Ahora sabemos que existen otras formas de ondas electromagnéticas que se distinguen por sus frecuencias y longitudes de onda.

Puesto que todas las ondas electromagnéticas viajan a través del espacio libre con una velocidad c , su frecuencia f y longitud de onda λ se relacionan mediante la expresión importante

$$c = f\lambda \quad [21.31]$$

En la figura 21.22 se presentan los diversos tipos de ondas electromagnéticas. Observe el ancho y el rango de traslapamiento de frecuencias y longitudes de onda. Por ejemplo, una onda de radio AM con una frecuencia de 1.50 MHz (un valor típico) tiene una longitud de onda de

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.50 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 2.00 \times 10^2 \text{ m}$$

Las siguientes abreviaturas se usan con frecuencia para designar longitudes de onda y distancias cortas:

- 1 micrómetro (μm) = 10^{-6} m
- 1 nanómetro (nm) = 10^{-9} m
- 1 angstrom (\AA) = 10^{-10} m

Las longitudes de onda de la luz visible, por ejemplo, varían de 0.4 a 0.7 μm , o 400 a 700 nm, o 4000 a 7000 \AA .



Raymond A. Serway

Usar gafas para el Sol que carezcan de protección ultravioleta (UV) es peor para sus ojos que no usar gafas en absoluto. Las gafas sin protección absorben algo de luz visible, lo que hace que las pupilas se dilaten. Esto permite que más luz UV entre al ojo, lo que aumenta el daño al cristalino con el tiempo. Sin las gafas, las pupilas se contraen, lo que reduce tanto la radiación visible como la peligrosa radiación UV. Póngase en onda: use gafas con protección UV.

Examen rápido

- 21.8** ¿Cuáles de los siguientes enunciados son ciertos acerca de las ondas de luz?
- A mayor frecuencia, longitud de onda más larga.
 - A menor frecuencia, longitud de onda más larga.
 - La luz con mayor frecuencia viaja más rápido que la luz con frecuencia más baja.
 - A longitud de onda más corta, mayor frecuencia.
 - A menor frecuencia, longitud de onda más corta.

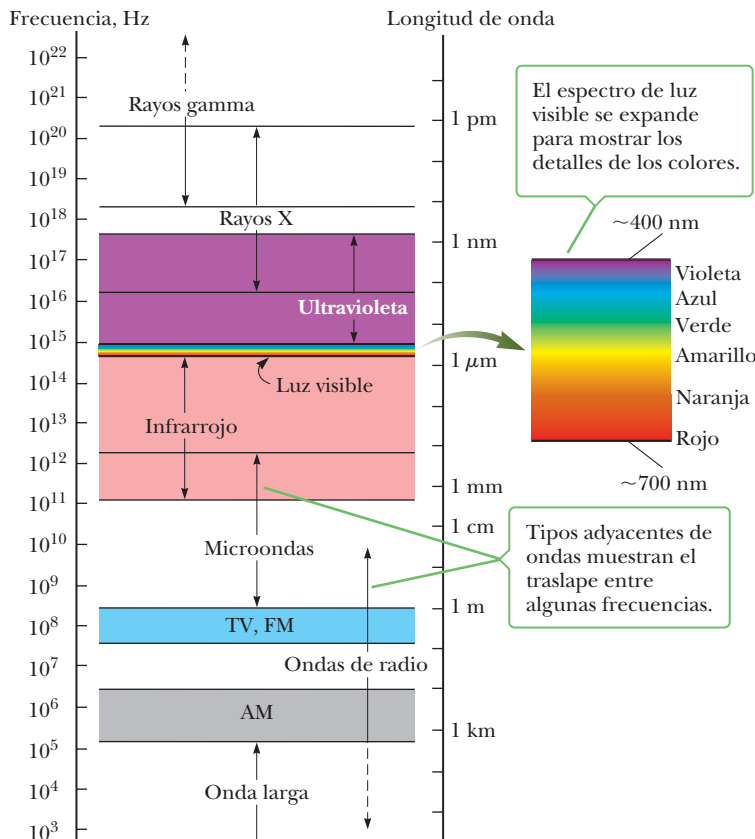


Figura 21.22 El espectro electromagnético.

A continuación se proporcionan breves descripciones de los tipos de onda, en orden de longitud de onda decreciente. No hay división precisa entre un tipo de onda electromagnética y el siguiente. Todas las formas de radiación electromagnética se producen mediante cargas aceleradas.

Las **ondas de radio**, que se analizaron en la sección 21.10, son el resultado de las cargas que aceleran a través de alambres de conducción. Desde luego, se usan en sistemas de comunicación de radio y televisión.

Las **microondas** (ondas de radio con longitud de onda corta) tienen longitudes de onda que varían entre más o menos 1 mm y 30 cm y se generan mediante dispositivos electrónicos. Sus longitudes de onda cortas las hacen muy adecuadas para los sistemas de radar que se usan en la navegación aérea y para el estudio de las propiedades atómicas y moleculares de la materia. Los hornos de microondas son una interesante aplicación doméstica de estas ondas. Se ha sugerido que la energía solar se podría utilizar al enviar haces de microondas hacia la Tierra desde un colector solar en el espacio.

Las **ondas infrarrojas** (en ocasiones llamadas de manera incorrecta “ondas de calor”), se producen mediante objetos calientes y moléculas, tienen longitudes de onda que varían de más o menos 1 mm a la longitud de onda más larga de la luz visible, 7×10^{-7} m. Se absorben con facilidad por la mayoría de los materiales. La energía infrarroja que absorbe una sustancia hace que se ponga más caliente porque la energía agita los átomos del objeto, lo que aumenta su movimiento vibratorio o traslacional. El resultado es un aumento en temperatura. La radiación infrarroja tiene muchas aplicaciones prácticas y científicas, incluidas terapia física, fotografía infrarroja y el estudio de las vibraciones de los átomos.

La **luz visible**, la forma más familiar de ondas electromagnéticas, se puede definir como la parte del espectro que detecta el ojo humano. La luz se produce mediante el reordenamiento de los electrones en átomos y moléculas. Las longitudes de onda de la luz visible se clasifican como colores que van del violeta ($\lambda \approx 4 \times 10^{-7}$ m) a rojo ($\lambda \approx 7 \times 10^{-7}$ m). La sensibilidad del ojo es una función de la longitud de onda y es mayor a una longitud de onda de aproximadamente 5.6×10^{-7} m (amarillo verdoso).

La **luz ultravioleta (UV)** abarca longitudes de onda que van de más o menos 4×10^{-7} m (400 nm) a 6×10^{-10} m (0.6 nm). El Sol es una importante fuente de luz ultravioleta (que es la principal causa del bronceado). La mayor parte de la luz ultravioleta que proviene del Sol la absorben los átomos en la atmósfera superior, o estratosfera, lo que es afortunado, porque la luz UV en grandes cantidades tiene efectos dañinos sobre los humanos. Un importante constituyente de la estratosfera es el ozono (O_3), que se produce a partir de reacciones de oxígeno con radiación ultravioleta. La capa de ozono resultante hace que la letal radiación ultravioleta de alta energía caliente la estratosfera.

Los **rayos X** son ondas electromagnéticas con longitudes de onda de más o menos 10^{-8} m (10 nm) a 10^{-13} m (10^{-4} nm). La fuente más común de rayos X es la aceleración de electrones de alta energía que bombardean un blanco metálico. Los rayos X se usan como herramienta diagnóstica en medicina y como tratamiento para ciertas formas de cáncer. Puesto que los rayos X penetran con facilidad y dañan o destruyen tejidos y organismos vivos, se debe tener cuidado para evitar exposición innecesaria y sobreexposición.

Los **rayos gamma**, ondas electromagnéticas emitidas por núcleos radiactivos, tienen longitudes de onda que varían de alrededor de 10^{-10} m a menos de 10^{-14} m. Son enormemente penetrantes y causan daño serio cuando la absorben los tejidos vivos. En concordancia, quienes trabajan cerca de tal radiación deben protegerse con prendas que contengan pesados materiales absorbentes, como capas de plomo.

Cuando los astrónomos observan el mismo objeto celeste con el uso de detectores sensibles a diferentes regiones del espectro electromagnético, se pueden apreciar sorprendentes variaciones en las características del objeto. La figura 21.23 muestra imágenes de la nebulosa del Cangrejo tomadas en tres rangos distintos de longitud de onda. La nebulosa del

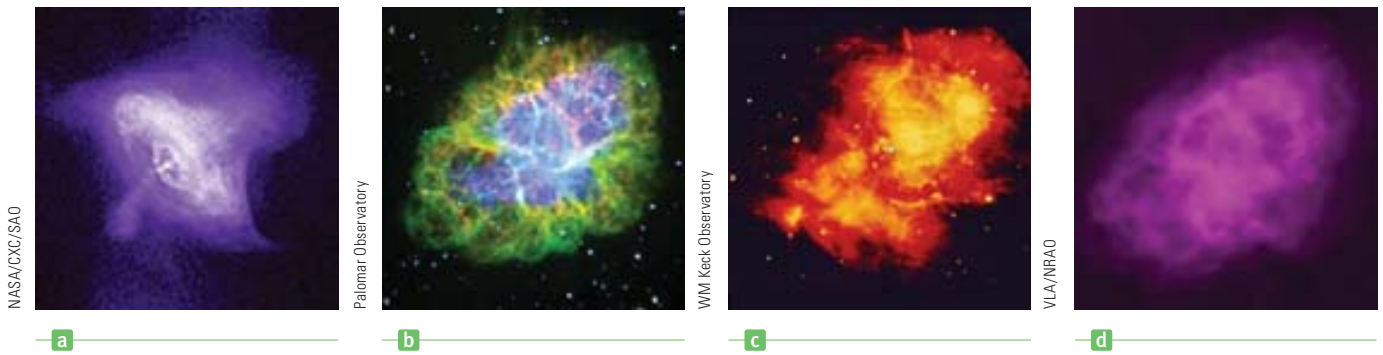


Figura 21.23 Observaciones en diferentes partes del espectro electromagnético muestran diferentes características de la nebulosa del Cangrejo. a) Imagen de rayos X. b) Imagen óptica. c) Luz visible polarizada. d) Imagen de radio.

Cangrejo es el remanente de una explosión supernova que se vio desde la Tierra en 1054 d. C. (Compare con la figura 8.31.)

■ FÍSICA APLICADA 21.4 Luz y tratamiento de heridas BIO

Un tema importante en la salud humana es el manejo de las heridas. Las heridas crónicas afectan de cinco millones hasta siete millones de personas en los Estados Unidos a un costo anual de más de veinte mil millones de dólares. La terapia con láser de bajo nivel ha demostrado facilitar la curación y el cierre de las heridas.

La luz infrarroja aumenta la generación de trifosfato de adenosina (ATP) en las mitocondrias y puede estimular la activación de genes y enzimas asociadas con la respiración celular. (Las moléculas de ATP proporcionan la energía para una variedad de funciones celulares importantes.) La luz infrarroja también puede aumentar la concentración de moléculas reactivas del oxígeno, lo que podría aumentar la comunicación entre el núcleo, el citosol y la mitocondria. Este mecanismo puede mejorar y acelerar el proceso de curación.

La luz verde del láser también puede ser utilizada para estimular los mecanismos de reparación del cuerpo por medio de un proceso diferente. Un tinte de color rosa, llamado “rosa de bengala,” se aplica a los tejidos, que se exponen a la luz del láser durante unos minutos. Cuando el colorante absorbe la luz, hace enlaces cruzados entre las moléculas de colágeno en el tejido. Las moléculas entrecruzadas promueven



Figura 21.24 Después de unir los lados de la herida con suturas profundas, el cierre en el lado izquierdo se logra con la tecnología de luz activada, mientras que el cierre lateral derecho se llevó a cabo con puntos de sutura. Esta foto, tomada al final de dos semanas, muestra que la sanidad ha mejorado con la activación de la luz.

el cierre de los tejidos y reducen o eliminan la formación de cicatriz en el tejido. La figura 21.24 muestra el contraste entre los tejidos que reciben el tratamiento normal y el tejido irradiado por rayos láser. La técnica también está siendo estudiada para su aplicación a los nervios periféricos dañados, los vasos sanguíneos y otros tejidos, tales como incisiones en la córnea durante una cirugía ocular. ■

■ FÍSICA APLICADA 21.5 El Sol y la evolución del ojo BIO

El centro de sensibilidad de sus ojos coincide con el centro de la distribución de longitud de onda del Sol. ¿Ésta es una coincidencia sorprendente?

EXPLICACIÓN Este hecho no es una coincidencia; más bien es el resultado de la evolución biológica. Los humanos evo-

lucionaron con visión más sensible a longitudes de onda que son más intensas desde el Sol. Si los habitantes de otro planeta llegaron alguna vez a la Tierra, sus ojos tendrían el centro de sensibilidad en longitudes de onda diferentes a la suya. Si su Sol fuese una enana roja, por ejemplo, los ojos de los extraterrestres serían más sensibles a la luz roja. ■

21.13 El efecto Doppler para ondas electromagnéticas

Como vimos en la sección 14.6, las ondas sonoras muestran el efecto Doppler cuando el observador, la fuente o ambos se mueven en relación con el medio de propagación. Recuerde que, en el efecto Doppler, la frecuencia observada de la onda es mayor o menor que la frecuencia emitida por la fuente de la onda.

También para las ondas electromagnéticas ocurre un efecto Doppler, pero difiere del efecto Doppler para ondas sonoras en dos formas. Primero, en el efecto Doppler para ondas sonoras, el movimiento en relación con el medio es más importante porque las ondas sonoras requieren un medio donde propagarse. En contraste, el medio de propagación no tiene un papel en el efecto Doppler para ondas electromagnéticas porque las ondas no requieren medio para propagarse. Segundo, la velocidad del sonido que aparece en la ecuación para el efecto Doppler para el sonido depende del marco de referencia en que se mide. En contraste, como vimos en el capítulo 26, la velocidad de las ondas electromagnéticas tiene el mismo valor en todos los sistemas coordenados que están o en reposo o en movimiento con velocidad constante uno con respecto al otro.

La ecuación que describe el efecto Doppler para ondas electromagnéticas está dada por la expresión aproximada

$$f_o \approx f_s \left(1 \pm \frac{u}{c} \right) \quad \text{si } u < c \quad [21.32]$$

donde f_o es la frecuencia observada, f_s es la frecuencia emitida por la fuente, u es la velocidad *relativa* del observador y la fuente, y c es la velocidad de la luz en un vacío. Observe que la ecuación 21.32 sólo es válida si u es mucho menor que c . Más aún, también se puede usar para el sonido en tanto la velocidad relativa de la fuente y el observador sea mucho menor que la velocidad del sonido. El signo positivo en la ecuación se debe usar cuando la fuente y el observador se muevan uno hacia otro, mientras que el signo negativo se debe usar cuando se muevan alejándose mutuamente. Por lo tanto, se anticipa un aumento en la frecuencia observada si la fuente y el observador se aproximan mutuamente y una disminución si la fuente y el observador se alejan uno del otro.

Los astrónomos han realizado importantes descubrimientos con el uso de observaciones Doppler sobre la luz que llega a la Tierra desde estrellas y galaxias distantes. Tales mediciones muestran que cuanto más distante está una galaxia de la Tierra, más de su luz se desplaza hacia el extremo rojo del espectro. Este *corrimiento hacia el rojo cosmológico* es una evidencia de que el Universo se expande. El estiramiento y la expansión del espacio, como una lámina de goma que se jala en todas direcciones, es consistente con la teoría de Einstein de la relatividad general. Una estrella o una galaxia dada, sin embargo, puede tener un movimiento peculiar acercándose o alejándose de la Tierra. Por ejemplo, mediciones de efecto Doppler más recientes hechas con el telescopio espacial Hubble muestran que una galaxia marcada como M87 gira, con un extremo que se mueve hacia la Vía Láctea y el otro que se aleja. Su velocidad de rotación medida se usó para identificar un hoyo negro supermasivo ubicado en su centro.

RESUMEN

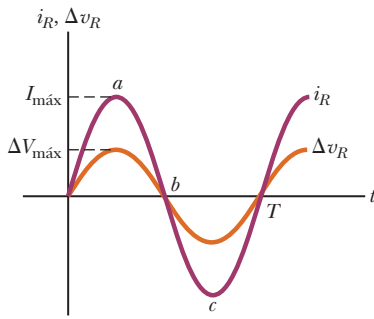
21.1 Resistores en un circuito CA

Si un circuito CA consiste de un generador y un resistor, la corriente en el circuito está en fase con el voltaje, lo que significa que la corriente y el voltaje alcanzan sus valores máximos al mismo tiempo.

En discusiones de voltajes y corrientes en circuitos CA, por lo general se usan **valores rms** de voltajes. Una razón es

que los amperímetros y voltímetros CA están diseñados para leer valores rms. Los valores rms de corrientes y voltajes (I_{rms} y ΔV_{rms}) se relacionan con los valores máximos de estas cantidades ($I_{\text{máx}}$ y $\Delta V_{\text{máx}}$) del modo siguiente:

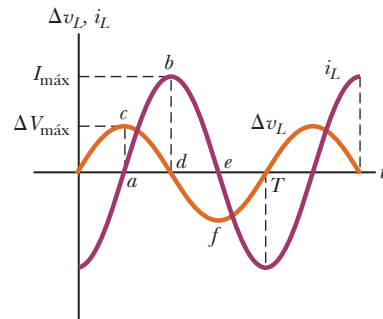
$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad \Delta V_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \quad [21.2, 21.3]$$



El voltaje a través de una resistencia y la corriente están en fase: alcanzan al mismo tiempo sus valores máximos, sus valores mínimos y sus valores cero.

El voltaje rms a través de un resistor se relaciona con la corriente rms en el resistor mediante la **ley de Ohm**:

$$\Delta V_{R,rms} = I_{rms}R \quad [21.4a]$$



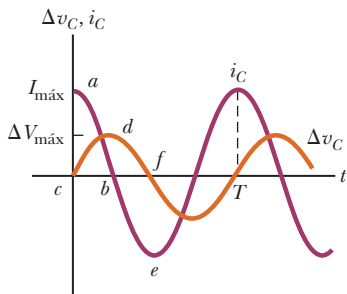
El voltaje a través de un inductor alcanza su valor máximo de 90° antes de que la corriente alcance su valor máximo, por lo que el voltaje “adelanta” la corriente.

El voltaje rms a través de una bobina se relaciona con la corriente rms en la bobina mediante

$$\Delta V_{L,rms} = I_{rms}X_L \quad [21.9]$$

21.2 Capacitores en un circuito CA

Si un circuito CA consiste de un generador y un capacitor, el voltaje se retrasa a la corriente por 90°. Esto significa que el voltaje alcanza su valor máximo un cuarto de periodo después que la corriente alcanza su valor máximo.



El voltaje a través de un capacitor alcanza su valor máximo de 90° después de que la corriente llega a su valor máximo, por lo que el voltaje “atrassa” la corriente.

El efecto de impedimento de un capacitor sobre la corriente en un circuito CA está dado por la **reactancia capacitiva** X_C , que se define como

$$X_C \equiv \frac{1}{2\pi fC} \quad [21.5]$$

donde f es la frecuencia de la fuente de voltaje CA.

El voltaje rms a través de un capacitor y la corriente rms en él, se relacionan mediante

$$\Delta V_{C,rms} = I_{rms}X_C \quad [21.6]$$

21.3 Inductores en un circuito CA

Si un circuito CA consiste de un generador y un inductor, el voltaje se adelanta a la corriente por 90°. Esto significa que el voltaje alcanza su valor máximo un cuarto de periodo antes que la corriente alcance su valor máximo.

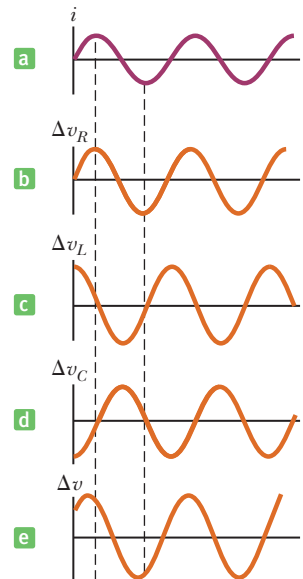
La impedancia efectiva de una bobina en un circuito CA se mide por una cantidad llamada **reactancia inductiva** X_L , que se define como

$$X_L \equiv 2\pi fL \quad [21.8]$$

21.4 El circuito RLC en serie

En un circuito RLC en serie, el voltaje máximo aplicado ΔV se relaciona con los voltajes máximos a través del resistor (ΔV_R), del capacitor (ΔV_C) y del inductor (ΔV_L) mediante

$$\Delta V_{m\acute{a}x} = \sqrt{\Delta V_R^2 + (\Delta V_L - \Delta V_C)^2} \quad [21.10]$$



La dependencia temporal de las diferencias de voltaje de los diferentes elementos de un circuito RLC en serie se muestran en estas gráficas. Observe que el Δv_R está en fase con la corriente, Δv_L adelanta la corriente y Δv_C atrassa la corriente.

Si un circuito CA contiene un resistor, un inductor y un capacitor conectados en serie, el límite que colocan sobre la corriente está dado por la **impedancia** Z del circuito, que se define como

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad [21.13]$$

La relación entre el voltaje máximo que se suministra a un circuito CA RLC en serie y la máxima corriente en el circuito, que es la misma en cada elemento, es

$$\Delta V_{m\acute{a}x} = I_{m\acute{a}x}Z \quad [21.14]$$

En un circuito CA *RLC* en serie, el voltaje rms aplicado y la corriente están fuera de fase. El **ángulo de fase** ϕ entre la corriente y el voltaje está dado por

$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad [21.15]$$

21.5 Potencia en un circuito CA

La **potencia promedio** que entrega la fuente de voltaje en un circuito CA *RLC* en serie es

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi \quad [21.17]$$

donde la constante $\cos \phi$ se denomina **factor de potencia**.

21.6 Resonancia en un circuito *RLC* en serie

En general, la corriente rms en un circuito *RLC* en serie se puede escribir

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad [21.18]$$

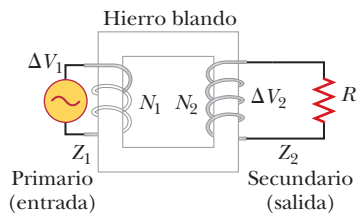
La corriente tiene su valor *máximo* cuando la impedancia tiene su valor *mínimo*, que corresponde a $X_L = X_C$ y $Z = R$. La frecuencia f_0 a la que esto ocurre se llama **frecuencia de resonancia** del circuito, dada por

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [21.19]$$

21.7 El transformador

Si el devanado primario de un transformador tiene N_1 espiras y el devanado secundario consiste de N_2 espiras y luego se aplica una entrada de voltaje CA ΔV_1 al primario, el voltaje inducido en el devanado secundario está dado por

$$\Delta V_2 = \frac{N_2}{N_1} \Delta V_1 \quad [21.22]$$



Un voltaje CA ΔV_1 se aplica a la bobina primaria, y el voltaje de salida ΔV_2 se observa a través de la resistencia de carga R .

Cuando N_2 es mayor que N_1 , ΔV_2 excede a ΔV_1 y al transformador se le conoce como *transformador de subida*. Cuando N_2 es menor que N_1 , lo que hace que ΔV_2 sea menor que ΔV_1 , se tiene un *transformador de bajada*. En un transformador ideal, la salida de potencia es igual a la entrada de potencia.

21.8–21.13 Ondas electromagnéticas y sus propiedades

James Clerk Maxwell predijo las **ondas electromagnéticas** y Heinrich Hertz las confirmó experimentalmente. Estas ondas se crean mediante cargas eléctricas en aceleración y tienen las siguientes propiedades:

1. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales porque los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas.
2. Las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz.
3. La razón del campo eléctrico al campo magnético en un punto dado en una onda electromagnética es igual a la velocidad de la luz:

$$\frac{E}{B} = c \quad [21.26]$$

4. Las ondas electromagnéticas portan energía conforme viajan a través del espacio. La potencia promedio por unidad de área es la intensidad I , dada por

$$I = \frac{E_{\text{máx}} B_{\text{máx}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{máx}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c}{2\mu_0} B_{\text{máx}}^2 \quad [21.27, 21.28]$$

donde $E_{\text{máx}}$ y $B_{\text{máx}}$ son los valores máximos de los campos eléctrico y magnético.

5. Las ondas electromagnéticas transportan cantidad de movimiento lineal y angular, así como energía. La cantidad de movimiento p que se entrega a incidencia normal en el tiempo Δt a un objeto que absorbe por completo la energía luminosa U está dada por

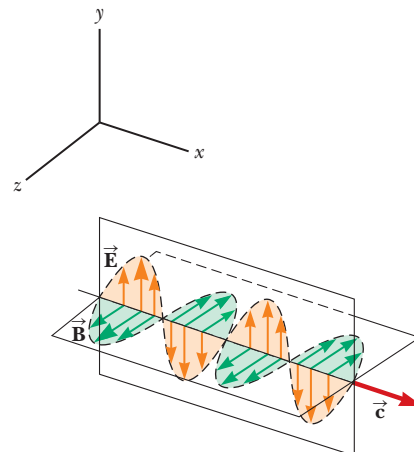
$$p = \frac{U}{c} \quad (\text{absorción completa}) \quad [21.29]$$

Si la superficie es un reflector perfecto, la cantidad de movimiento que se entrega en el tiempo Δt a incidencia normal es el doble que el dado por la ecuación 21.29:

$$p = \frac{2U}{c} \quad (\text{reflexión completa}) \quad [21.30]$$

6. La velocidad c , la frecuencia f y la longitud de onda λ de una onda electromagnética se relacionan mediante

$$c = f\lambda \quad [21.31]$$



Una onda electromagnética enviada por las cargas que oscilan en una antena, representadas en un instante de tiempo y lejos de la antena, moviéndose en la dirección x positiva con velocidad c .

El **espectro electromagnético** incluye ondas que abarcan un amplio rango de frecuencia y longitudes de onda. Estas ondas tienen varias aplicaciones y características, que dependen de sus frecuencias o longitudes de onda. La frecuencia de una onda dada se puede correr por la velocidad relativa de observador y fuente, con la frecuencia observada f_o dada por

$$f_o \approx f_s \left(1 \pm \frac{u}{c} \right) \quad \text{si } u < c \quad [21.32]$$

donde f_s es la frecuencia de la fuente, u es la velocidad *relativa* del observador y la fuente, y c es la velocidad de la luz en el vacío. El signo positivo se usa cuando la fuente y el observador se aproximan mutuamente, el signo negativo cuando se alejan uno de otro.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Considere la posibilidad de una onda electromagnética que viaja en la dirección y positiva. El campo magnético asociado con la onda en algún lugar y en algunos puntos al instante en la dirección x negativa se muestra en la figura POM21.1. ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico en esta posición y en este instante? a) la dirección x positiva b) la dirección y positiva c) la dirección z positiva d) la dirección z negativa e) la dirección y negativa

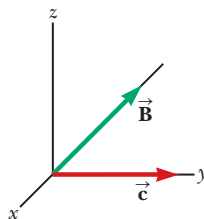


Figura POM21.1

2. Cuando un inductor particular se conecta a una fuente de voltaje que varía sinusoidalmente con amplitud constante y una frecuencia de 60.0 Hz, la corriente rms es 3.0 A. ¿Cuál es la corriente rms si la frecuencia de la fuente se duplica? a) 12 A b) 6.0 A c) 4.2 A d) 3.0 A e) 1.5 A
3. Un circuito RLC en serie contiene un resistor de 20Ω , un capacitor de $0.75 \mu\text{F}$ y un inductor de 120 mH. Si a través de esta combinación de elementos se aplica un voltaje de 120 V rms que varía sinusoidalmente, ¿cuál es la corriente rms en el circuito cuando opera a su frecuencia de resonancia? a) 2.4 A b) 6.0 A c) 10 A d) 17 A e) 8.2 A
4. Encuentre el voltaje a través de un inductor de $(1.0/2\pi)$ H cuando porta 2.0 A de corriente rms a 60.0 Hz. a) 160 V b) 140 V c) 120 V d) 95 V e) 85 V
5. ¿Cuál es el voltaje rms a través de un capacitor con capacitancia $(1.00/2\pi) \mu\text{F}$ que porta 1.00 mA de corriente rms CA a 60.0 Hz? a) 16.7 V b) 13.2 V c) 32.2 V d) 0.560 V e) 4.43 V
6. Un batería de 6.0 V se conecta a través de la bobina primaria de un transformador que tiene 50 espiras. Si la bobina secundaria del transformador tiene 100 espiras, ¿qué voltaje aparece a través del secundario? a) 24 V b) 12 V c) 6.0 V d) 3.0 V e) ninguno de éstos
7. Un horno de microondas típico opera a una frecuencia de 2.45 GHz. ¿Cuál es la longitud de onda asociada con las ondas electromagnéticas en el horno? a) 8.20 m b) 122 cm c) 1.20×10^8 m d) 8.20×10^{-9} m e) ninguna de las respuestas
8. Un inductor y un resistor se conectan en serie a través de un generador CA, como se muestra en la figura POM21.8.

Inmediatamente después de cerrar el interruptor, ¿cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) La corriente es $\Delta V/R$. b) El voltaje a través del inductor es cero. c) La corriente en el circuito es cero. d) El voltaje a través del resistor es ΔV . e) El voltaje a través del inductor es la mitad de su valor máximo.

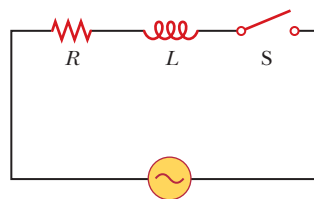


Figura POM21.8

9. Un capacitor y un resistor se conectan en serie a través de un generador CA, como se muestra en la figura POM21.9. Después de que se cierra el interruptor, ¿cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) El voltaje a través del capacitor se retrasa a la corriente por 90° . b) El voltaje a través del resistor está fuera de fase con la corriente. c) El voltaje a través del capacitor se adelanta a la corriente por 90° . d) La corriente disminuye conforme aumenta la frecuencia del generador, pero su voltaje pico permanece igual. e) Ninguno de éstos.

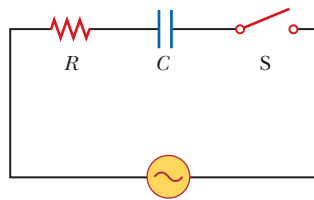


Figura POM21.9

10. Un resistor, un capacitor y un inductor se conectan en serie a través de un generador CA. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) Toda la potencia se pierde en el inductor. b) Toda la potencia se pierde en el capacitor. c) Toda la potencia se pierde en el resistor. d) La poten-

cia se pierde en los tres elementos. e) La potencia que entrega el generador no depende de la diferencia de fase entre el voltaje del generador y la corriente.

11. Un resistor, un capacitor y un inductor se conectan en serie a través de un generador CA. ¿Cuál de los siguientes enunciados es falso? a) El voltaje instantáneo a través del capacitor se retrasa a la corriente por 90° . b) El voltaje instantáneo a través del inductor se adelanta a la corriente por 90° . c) El voltaje instantáneo a través del resistor está en fase con la corriente. d) Los voltajes a través del resistor, capacitor e inductor no están en fase. e) El voltaje rms a través de la combinación de los tres elementos es igual a la suma algebraica de los voltajes rms a través de cada elemento por separado.
12. Si el voltaje a través de un elemento de circuito tiene su valor máximo cuando la corriente en el circuito es cero, ¿cuál de los siguientes enunciados *debe* ser cierto? a) El elemento de circuito es un resistor. b) El elemento de circuito es un capacitor. c) El elemento de circuito es un

inductor. d) La corriente y el voltaje están 90° fuera de fase. e) La corriente y el voltaje están 180° fuera de fase.

13. ¿Cuál es la impedancia de un circuito RLC en serie en resonancia? a) X_L b) X_C c) R d) $X_L - X_C$ e) 0
14. Un circuito RLC en serie contiene un resistor de 20.0Ω , un capacitor de $0.75 \mu\text{F}$ y un inductor de 120 mH . Si a través de esta combinación de elementos se aplica un voltaje rms de 120 V que varía sinusoidalmente con $f = 5.0 \times 10^2 \text{ Hz}$, ¿cuál es la corriente rms en el circuito? a) 2.3 A b) 6.0 A c) 10 A d) 17 A e) 4.8 A
15. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera con respecto a las ondas electromagnéticas que viajan a través del vacío? Más de una afirmación puede ser correcta. a) Todas las ondas tienen la misma longitud de onda. b) Todas las ondas tienen la misma frecuencia. c) Todas las ondas viajan a $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$. d) Los campos eléctricos y magnéticos asociados con las ondas son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de las ondas. e) La velocidad de las ondas depende de su frecuencia.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Antes del advenimiento de la televisión por cable y los platos satelitales, los dueños de las casas montaban una antena de televisión en el techo o usaban “orejas de conejo” sobre sus aparatos. (Véase la figura PC21.1.) Ciertas orientaciones de las antenas receptoras en un televisor tienen mejor recepción que otras. Más aún, la mejor orientación varía de estación a estación. Explique.



Figura PC21.1

2. a) ¿El ángulo de fase en un circuito en serie RLC depende de la frecuencia? b) ¿Cuál es el ángulo de fase en el circuito cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva?
3. Si la fuente fundamental de una onda sonora es un objeto que vibra, ¿cuál es la fuente fundamental de una onda electromagnética?
4. Las antenas receptoras de radio pueden tener forma de líneas o espiras conductoras. ¿Cuál debe ser la orientación

de cada una de estas antenas en relación con una antena de transmisión que es vertical?

5. En la transmisión de radio, una onda de radio sirve como onda portadora (*carrier*) y la señal sonora se superpone sobre la onda portadora. En la radio de amplitud modulada (AM), la amplitud de la onda portadora varía de acuerdo con la onda sonora. La marina estadounidense en ocasiones usa destellos de luz para enviar código Morse entre barcos vecinos, un proceso que tiene similitudes con la transmisión de radio. a) ¿Este proceso es AM o FM? b) ¿Cuál es la frecuencia portadora? c) ¿Cuál es la frecuencia de la señal? d) ¿Cuál es la antena de transmisión? e) ¿Cuál es la antena receptora?
6. Cuando la luz (u otra radiación electromagnética) viaja a través de una región dada, a) ¿qué es lo que oscila? b) ¿Qué es lo que se transporta?
7. En la navegación espacial, que es una alternativa propuesta para el transporte a otros planetas, una nave espacial porta una vela muy grande. La luz solar que golpea la vela ejerce una fuerza, lo que acelera la nave espacial. ¿La vela debe ser absorbente o reflejante para ser más efectiva?
8. ¿Qué hace una onda de radio con las cargas en la antena de recepción para proporcionar una señal a la radio del automóvil?
9. ¿Un alambre conectado a una batería emite una onda electromagnética?
10. Suponga que una criatura de otro planeta tiene ojos que son sensibles a la radiación infrarroja. Describa lo que vería

si mira alrededor de la habitación en que está usted ahora. Esto es: ¿qué sería brillante y qué sería oscuro?

11. ¿Por qué la fotografía infrarroja de una persona parecería diferente de una fotografía que se tome con luz visible?
12. Si una corriente de alta frecuencia pasa a través de un solenoide que contiene un núcleo metálico, el núcleo se calienta debido a inducción. Explique por qué la temperatura del material se eleva en esta situación.

13. ¿Cuál es la ventaja de transmitir potencia a altos voltajes?
14. ¿Por qué la suma de los voltajes máximos a través de cada uno de los elementos en un circuito RLC en serie por lo general es mayor que el máximo voltaje aplicado? ¿Esto no viola la regla del bucle de Kirchhoff?
15. Si la resistencia en un circuito RLC permanece igual, pero la capacitancia y la inductancia se duplican cada una, ¿cómo cambiará la frecuencia de resonancia?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- 1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- I.** denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C|C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

21.1 Resistores en un circuito CA

1. a) ¿Cuál es la resistencia de un foco que utiliza una potencia media de 75.0 W cuando se conecta a una fuente de alimentación de 60.0 Hz con un voltaje máximo de 170 V? b) ¿Cuál es la resistencia de un foco de 100 W?
2. **C|C** Cierta foco se clasifica a 60.0 W cuando opera a un voltaje rms de 120 V. a) ¿Cuál es el voltaje pico aplicado a través del foco? b) ¿Cuál es la resistencia del foco? c) ¿Un foco de 100 W tiene mayor o menor resistencia que uno de 60.0 W? Explique.
3. La corriente en el circuito de la figura P21.3 es igual a 60.0% del pico de corriente en $t = 7.00$ ms. ¿Cuál es la frecuencia más baja que la fuente da a esta corriente?

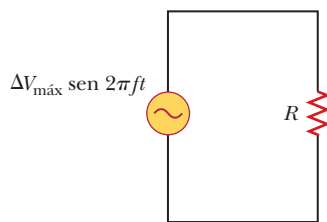


Figura P21.3

4. La figura P21.4 muestra tres lámparas conectadas a un voltaje de suministro casero (rms) de 120 V CA. Las lámparas 1 y 2 tienen focos de 150 W; la lámpara 3 tiene un foco de 100 W. Encuentre, a) la corriente rms y b) la resistencia de cada foco.

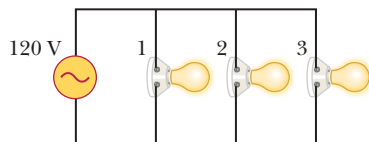


Figura P21.4

5. Un amplificador de audio, que se representa mediante la fuente CA y el resistor R en la figura P21.5, entrega voltajes alternos a frecuencias de audio a la bocina. Si la fuente pone un voltaje alterno de 15.0 V (rms), la resistencia R es 8.20Ω y la bocina es equivalente a una resistencia de 10.4Ω , ¿cuál es la potencia promedio en el tiempo que se entrega a las bocinas?

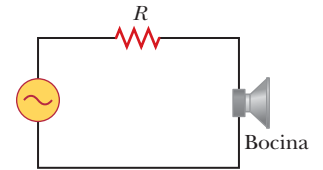


Figura P21.5

6. **PG** El voltaje de salida de un generador CA está dado por $\Delta v = (170 \text{ V}) \sin(60\pi t)$. El generador se conecta a través de un resistor de 20.0Ω . Por inspección, ¿cuáles son a) el voltaje máximo y b) la frecuencia? Encuentre c) el voltaje rms a través del resistor, d) la corriente rms en el resistor, e) la corriente máxima en el resistor, f) la potencia entregada al resistor y g) la corriente cuando $t = 0.0050$ s. h) ¿El argumento de la función seno estará en grados o radianes?

21.2 Capacitores en un circuito CA

7. a) ¿Para qué frecuencias un capacitor de $22.0 \mu\text{F}$ tiene una reactancia por debajo de 175Ω ? b) ¿Cuál es la reactancia de un condensador de $44.0 \mu\text{F}$ en este mismo rango de frecuencia?
8. ¿Cuál es la corriente máxima que se entrega a un circuito que contiene un capacitor de $2.20 \mu\text{F}$ cuando se conecta a través de a) un tomacorriente en Norteamérica que tiene $\Delta V_{\text{rms}} = 120 \text{ V}$ y $f = 60.0 \text{ Hz}$ y b) un tomacorriente en Europa que tiene $\Delta V_{\text{rms}} = 240 \text{ V}$ y $f = 50.0 \text{ Hz}$?
9. Cuando un capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ se conecta a un generador cuya salida rms es 30 V, se observa que la corriente en el circuito es 0.30 A. ¿Cuál es la frecuencia de la fuente?

10. **CIC** Un generador CA con una salida de voltaje rms de 36.0 V a una frecuencia de 60.0 Hz se conecta a través de un capacitor de 12.0 μF . Encuentre a) la reactancia capacitiva, b) la corriente rms y c) la corriente máxima en el circuito. d) ¿El capacitor tiene su carga máxima cuando la corriente toma su valor máximo? Explique.
11. **M** ¿Qué corriente máxima es entregada por una fuente de CA con $\Delta V_{\text{máx}} = 48.0 \text{ V}$ y $f = 90.0 \text{ Hz}$ cuando se conecta a través de un capacitor de 3.70 μF ?

12. Un generador entrega un voltaje CA de la forma $\Delta v = (98.0 \text{ V}) \sin(80\pi t)$ a un capacitor. La máxima corriente en el circuito es 0.500 A. Encuentre a) el voltaje rms del generador, b) la frecuencia del generador, c) la corriente rms, d) la reactancia y e) el valor de la capacitancia.

21.3 Inductores en un circuito CA

13. Un inductor tiene una reactancia de 54.0 Ω cuando se conecta a una fuente de 60.0 Hz. El inductor es removido y luego se conecta a una fuente de 50.0 Hz, que produce un voltaje rms de 100 V. ¿Cuál es la corriente máxima en el inductor?
14. Un generador CA tiene una salida de voltaje rms de 78.0 V a una frecuencia de 80.0 Hz. Si el generador se conecta a través de un inductor de 25.0 mH, encuentre a) la reactancia inductiva, b) la corriente rms y c) la corriente máxima en el circuito.

15. **M** En un circuito puramente inductivo de CA, como se muestra en la figura P21.15, $\Delta V_{\text{máx}} = 100 \text{ V}$. a) La corriente máxima es de 7.50 A a 50.0 Hz. Calcule la inductancia L . b) ¿A qué frecuencia angular ω la corriente de 2.50 A es máxima?

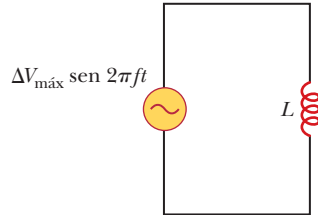


Figura P21.15

16. **PG** El voltaje de salida de un generador CA está dado por $\Delta v = (1.20 \times 10^2 \text{ V}) \sin(30\pi t)$. El generador se conecta a través de un inductor de 0.500 H. Encuentre a) la frecuencia del generador, b) el voltaje rms a través del inductor, c) la reactancia inductiva, d) la corriente rms en el inductor, e) la corriente máxima en el inductor y f) la potencia promedio entregada al inductor. g) Encuentre una expresión para la corriente instantánea. h) ¿En qué tiempo después de $t = 0$ la corriente instantánea alcanza por primera vez 1.00 A? (Use la función inversa de seno.)
17. Determine el flujo magnético máximo a través de un inductor conectado a un tomacorriente estándar ($\Delta V_{\text{rms}} = 120 \text{ V}$, $f = 60.0 \text{ Hz}$).

21.4 El circuito RLC en serie

18. Un voltaje sinusoidal $\Delta v = (80.0 \text{ V}) \sin(150t)$ se aplica a un circuito RLC en serie con $L = 80.0 \text{ mH}$, $C = 125.0 \mu\text{F}$ y $R = 40.0 \Omega$. a) ¿Cuál es la impedancia del circuito? b) ¿Cuál es la corriente máxima en el circuito?

19. Un capacitor de 40.0 μF se conecta a un resistor de 50.0 Ω y a un generador cuya salida rms es 30.0 V a 60.0 Hz. Encuentre a) la corriente rms en el circuito, b) la caída de voltaje rms a través del resistor, c) la caída de voltaje rms a través del capacitor y d) el ángulo de fase para el circuito.

20. **M** Un inductor ($L = 400 \text{ mH}$), un capacitor ($C = 4.43 \mu\text{F}$) y un resistor ($R = 500 \Omega$) se conectan en serie. Un generador CA de 50.0 Hz que se conecta en serie con estos elementos produce una corriente máxima de 250 mA en el circuito. a) Calcule el voltaje máximo requerido $\Delta V_{\text{máx}}$. b) Determine el ángulo de fase por el que la corriente se adelanta o retrasa al voltaje aplicado.

21. Un resistor ($R = 9.00 \times 10^2 \Omega$), un capacitor ($C = 0.250 \mu\text{F}$) y un inductor ($L = 2.50 \text{ H}$) se conectan en serie a través de una fuente CA de $2.40 \times 10^2 \text{ Hz}$ para el cual $\Delta V_{\text{máx}} = 1.40 \times 10^2 \text{ V}$. Calcule a) la impedancia del circuito, b) la corriente máxima que entrega la fuente y c) el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje. d) ¿La corriente se adelanta o retrasa al voltaje?

22. Un resistor de 50.0 Ω , un inductor de 0.100 H y un capacitor de 10.0 μF se conectan en serie a una fuente de 60.0 Hz. La corriente rms en el circuito es 2.75 A. Encuentre los voltajes rms a través de a) el resistor, b) el inductor, c) el capacitor y d) la combinación RLC. e) Bosqueje el diagrama de fasores para este circuito.

23. Un circuito RLC está formado por una resistencia de 150 Ω , un capacitor de 21.0 μF y un inductor de 460 mH conectado en serie con uno de 120 V y una fuente de alimentación de 60.0 Hz. a) ¿Cuál es el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje aplicado? b) ¿Cuál alcanza antes su máximo, la corriente o la tensión?

24. Una fuente CA que opera a 60 Hz con un voltaje máximo de 170 V se conecta en serie con un resistor ($R = 1.2 \text{ k}\Omega$) y un inductor ($L = 2.8 \text{ H}$). a) ¿Cuál es el valor máximo de la corriente en el circuito? b) ¿Cuáles son los valores máximos de la diferencia de potencial a través del resistor y el inductor? c) Cuando la corriente está en un máximo, ¿cuáles son las magnitudes de las diferencias de potencial a través del resistor, el inductor y la fuente CA? d) Cuando la corriente es cero, ¿cuáles son las magnitudes de la diferencia de potencial a través del resistor, el inductor y la fuente CA?

25. Una persona trabaja cerca del secundario de un transformador, como se muestra en la figura P21.25 (página 757). El voltaje primario es 120 V (rms) a 60.0 Hz. La capacitancia C_s , que es la capacitancia parásita entre la mano y el devanado secundario, es 20.0 pF. Suponiendo que la persona tiene una resistencia corporal a tierra de $R_b = 50.0 \text{ k}\Omega$, determine el voltaje rms a través del cuerpo. *Sugerencia:* Vuelva a dibujar el circuito con el secundario del transformador como una fuente CA simple.

26. **CIC** Un resistor de 60.0 Ω se conecta en serie con un capacitor de 30.0 μF y un generador que tiene un voltaje máximo de $1.20 \times 10^2 \text{ V}$ y opera a 60.0 Hz. Encuentre a) la reactancia capacitiva del circuito, b) la impedancia del

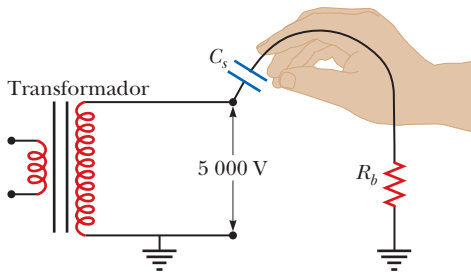


Figura P21.25

circuito y c) la corriente máxima en el circuito. d) ¿El voltaje se adelanta o retrasa a la corriente? e) ¿Cómo afectará la corriente poner un inductor en serie con el capacitor y el resistor existentes? Explique.

27. **PG** Un circuito de CA en serie contiene un resistor, un inductor de 150 mH, un capacitor de $5.00 \mu\text{F}$ y un generador con $\Delta V_{\text{máx}} = 240 \text{ V}$ operando a 50.0 Hz. La corriente máxima en el circuito es de 100 mA. Calcule a) la reactancia inductiva, b) la reactancia capacitiva, c) la impedancia, d) la resistencia en el circuito y e) el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje del generador.
28. ¿A qué frecuencia la reactancia inductiva de un inductor de $57.0 \mu\text{H}$ es igual a la reactancia capacitiva de un capacitor $57.0 \mu\text{F}$?
29. Una fuente CA con un voltaje máximo de 150 V y $f = 50.0 \text{ Hz}$ se conecta entre los puntos *a* y *b* en la figura P21.29. Calcule los voltajes rms entre los puntos a) *a* y *b*, b) *b* y *c*, c) *c* y *d* y d) *b* y *d*.

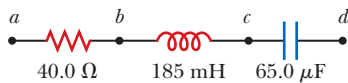


Figura P21.29

21.5 Potencia en un circuito CA

30. Una fuente CA que opera a 60 Hz, con un voltaje máximo de 170 V, se conecta en serie con un resistor ($R = 1.2 \text{ k}\Omega$) y un capacitor ($C = 2.5 \mu\text{F}$). a) ¿Cuál es el valor máximo de la corriente en el circuito? b) ¿Cuáles son los valores máximos de la diferencia de potencial a través del resistor y el capacitor? c) Cuando la corriente es cero, ¿cuáles son las magnitudes de la diferencia de potencial a través del resistor, el capacitor y la fuente CA? ¿Cuánta carga hay en el capacitor en este instante? d) Cuando la corriente está en un máximo, ¿cuáles son las magnitudes de las diferencias de potencial a través del resistor, el capacitor y la fuente CA? ¿Cuánta carga hay en el capacitor en este instante?

31. Un multímetro en un circuito *RL* registra una corriente rms de 0.500 A y un voltaje rms de 60 Hz, generador de 104 V. Un watímetro muestra que la potencia promedio que entrega al resistor es 10.0 W. Determine a) la impedancia en el circuito, b) la resistencia *R* y c) la inductancia *L*.
32. Un voltaje CA de la forma $\Delta v = (90.0 \text{ V}) \sin(350t)$ se aplica a un circuito *RLC* en serie. Si $R = 50.0 \Omega$, $C = 25.0 \mu\text{F}$ y $L = 0.200 \text{ H}$, encuentre a) la impedancia del circuito, b) la corriente rms en el circuito y c) la potencia promedio que se entrega al circuito.
33. Un voltaje CA de la forma $\Delta v = 100 \sin(1000t)$, donde Δv está en volts y *t* está en segundos, se aplica a un circuito *RLC* en serie. Suponga que la resistencia es de 400Ω , la capacitancia es de $5.00 \mu\text{F}$ y la inductancia es 0.500 H. Determine la potencia promedio que se entrega al circuito.
34. Un circuito *RLC* en serie tiene una resistencia de 22.0Ω y una impedancia de 80.0Ω . Si el voltaje rms que se aplica al circuito es de 160 V, ¿qué potencia promedio se entrega al circuito?
35. Un inductor y un resistor se conectan en serie. Cuando se conecta a una fuente de 90 V (rms) a 60 Hz, la caída de voltaje a través del resistor es de 50 V (rms) y la potencia que se entrega al circuito es 14 W. Encuentre a) el valor de la resistencia y b) el valor de la inductancia.
36. **CIC** Considere un circuito *RLC* en serie con $R = 25 \Omega$, $L = 6.0 \text{ mH}$ y $C = 25 \mu\text{F}$. El circuito se conecta a una fuente CA de 10 V (rms) a 600 Hz. a) ¿La suma de la caída de voltaje a través de *R*, *L* y *C* es igual a 10 V (rms)? b) ¿Cuál es mayor, la potencia que se entrega al resistor, al capacitor o al inductor? c) Encuentre la potencia promedio que se entrega al circuito.

21.6 Resonancia en un circuito RLC en serie

37. **M** Un circuito *RLC* se utiliza en una radio para sintonizar una emisora de radiodifusión en FM en $f = 99.7 \text{ MHz}$. La resistencia en el circuito es $R = 12.0 \Omega$ y la inductancia es $L = 1.40 \mu\text{H}$. ¿Qué capacitancia se debe utilizar?
38. La frecuencia de resonancia de un circuito *RLC* en serie es de 2.84 kHz y el valor de su capacitancia es de $6.50 \mu\text{F}$. ¿Cuál es el valor de la frecuencia de resonancia, cuando la capacitancia del circuito es de $9.80 \mu\text{F}$?
39. La banda AM se extiende desde aproximadamente 500 kHz hasta 1600 kHz. Si un inductor de $2.0 \mu\text{H}$ se usa en un circuito sintonizador para un radio, ¿cuáles son los extremos que debe alcanzar un capacitor para cubrir la banda completa de frecuencias?
40. Considere un circuito *RLC* en serie con $R = 15 \Omega$, $L = 200 \text{ mH}$, $C = 75 \mu\text{F}$ y un voltaje máximo de 150 V. a) ¿Cuál es la impedancia del circuito en resonancia? b) ¿Cuál es la frecuencia de resonancia del circuito? c) ¿Cuándo será mayor la corriente: en resonancia, a 10% bajo la frecuencia de resonancia o a 10% arriba de la frecuencia de resonancia? d) ¿Cuál es la corriente rms en el circuito a una frecuencia de 60 Hz?

41. Dos osciladores eléctricos se utilizan en un detector de metales heterodino para detectar objetos metálicos enterrados (véase figura P21.41). El detector utiliza dos osciladores eléctricos idénticos en forma de circuitos LC con frecuencias de resonancia de 725 kHz. Cuando las señales de los dos circuitos oscilantes se combinan, la frecuencia de sonido es cero, porque cada uno tiene la misma frecuencia de resonancia. Sin embargo, cuando la bobina de un circuito se encuentra con un objeto de metal enterrado, la inductancia de este circuito se incrementa en 1.000%, mientras que la de la segunda no ha cambiado. Determine la frecuencia de sonido que se detecta en esta situación.



Figura P21.41

42. Un circuito en serie contiene un inductor de 3.00 H, un capacitor de 3.00 μF y un resistor de 30.0 Ω conectados a una fuente de 120 V (rms) de frecuencia variable. Encuentre la potencia que se entrega al circuito cuando la frecuencia de la fuente es a) la frecuencia de resonancia, b) la mitad de la frecuencia de resonancia, c) un cuarto de la frecuencia de resonancia, d) dos veces la frecuencia de resonancia y e) cuatro veces la frecuencia de resonancia. A partir de sus cálculos, ¿puede extraer una conclusión acerca de la frecuencia a la que se entrega potencia máxima al circuito?

21.7 El transformador

43. La bobina primaria de un transformador tiene $N_1 = 250$ espiras y su bobina secundaria tiene $N_2 = 1500$ espiras. Si el voltaje de entrada a través de la bobina primaria es $\Delta v = (170 \text{ V}) \sin \omega t$, ¿qué voltaje rms se desarrolla a través de la bobina secundaria?

44. Un transformador de bajada se usa para recargar las baterías de dispositivos portátiles. La razón de espiras N_2/N_1 para un transformador particular que se usa en un reproductor de CD es 1:13. Cuando se usa con la energía doméstica de 120 V (rms), el transformador extrae una corriente rms de 250 mA. Encuentre a) el voltaje de salida rms del transformador y b) la potencia que se entrega al reproductor de CD.

45. Un generador de potencia CA produce 50 A (rms) a 3600 V. El voltaje se sube a 100 000 V mediante un transformador ideal, y la energía se transmite a través de una línea de transmisión de larga distancia que tiene una resistencia de 100 Ω . ¿Qué porcentaje de la potencia que entrega el generador se disipa como calor en la línea de transmisión?

46. Un transformador se usará para proporcionar potencia para una unidad de disco de computadora que necesita 6.0 V (rms) en lugar de los 120 V (rms) del tomacorriente de pared. El número de espiras en el primario es 400

y entrega 500 mA (la corriente secundaria) a un voltaje de salida de 6.0 V (rms). a) ¿El transformador debe tener más espiras en el secundario en comparación con el primario o menos espiras? b) Encuentre la corriente en el primario. c) Encuentre el número de espiras en el secundario.

47. Un transformador sobre un poste cerca de una fábrica baja el voltaje de 3600 V (rms) a 120 V (rms). El transformador entrega 1000 kW a la fábrica a 90% de eficiencia. Encuentre a) la potencia que entrega al primario, b) la corriente en el primario y c) la corriente en el secundario.

48. Una línea de transmisión que tiene una resistencia por unidad de longitud de $4.50 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$ se usará para transmitir 5.00 MW a través de 400 millas ($6.44 \times 10^5 \text{ m}$). El voltaje de salida del generador es 4.50 kV (rms). a) ¿Cuál es la pérdida en la línea si se usa un transformador para subir el voltaje a 500 kV (rms)? b) ¿Qué fracción de la potencia de entrada se pierde en la línea bajo estas circunstancias? c) ¿Qué dificultades se encontrarían al intentar transmitir los 5.00 MW al voltaje del generador de 4.50 kV (rms)?

21.10 Producción de ondas electromagnéticas mediante una antena

21.11 Propiedades de las ondas electromagnéticas

49. La marina estadounidense propuso hace mucho tiempo la construcción de sistemas de comunicación de frecuencia extremadamente baja (ondas ELF); tales ondas podrían penetrar los océanos para alcanzar submarinos distantes. Calcule la longitud de una antena de un cuarto de longitud de onda para un transmisor que genera ondas ELF de 75 Hz de frecuencia. ¿Cuán práctica es esta antena?

50. a) La distancia a Polaris, la Estrella del Norte, es aproximadamente $6.44 \times 10^{18} \text{ m}$. Si Polaris estallara hoy, ¿cuántos años transcurrirían para verla desaparecer? b) ¿Cuánto tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra? c) ¿Cuánto tarda una señal de microonda en viajar de la Tierra a la Luna y de vuelta? (La distancia de la Tierra a la Luna es $3.84 \times 10^5 \text{ km}$.)

51. **CIC** La Tierra refleja aproximadamente 38.0% de la luz solar incidente en sus nubes y la superficie. a) Teniendo en cuenta que la intensidad de la radiación solar en la parte superior de la atmósfera es de 1370 W/m^2 , encuentre la presión de la radiación en la Tierra, en pascales, en el lugar donde el Sol se encuentra justo encima. b) Indique cómo se compara esta cantidad con la presión atmosférica normal en la superficie de la Tierra, que es de 101 kPa.

52. Experimentadores en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología estadounidense realizaron mediciones precisas de la velocidad de la luz con el uso del hecho de que, en el vacío, la velocidad de las ondas electromagnéticas es $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, donde las constantes $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$ y $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$. ¿Qué valor (a cuatro cifras significativas) proporciona esta fórmula para la velocidad de la luz en el vacío?

- 53. BIO** La hemoglobina oxigenada se absorbe débilmente en el rojo (de ahí su color rojo) y fuertemente en el infrarrojo cercano, mientras que la hemoglobina desoxigenada tiene la absorción opuesta. Este hecho se usa en un “oxímetro de pulso” para medir la saturación de oxígeno en la sangre arterial. El dispositivo se pone en el extremo del dedo de una persona y tiene dos diodos emisores de luz, uno rojo (660 nm) y uno infrarrojo (940 nm), y una fotocelda que detecta la cantidad de luz transmitida a través del dedo en cada longitud de onda. a) Determine la frecuencia de cada una de estas fuentes de luz. b) Si 67% de la energía de la fuente roja se absorbe en la sangre, ¿en qué factor cambia la amplitud de la onda electromagnética? *Sugerencia:* La intensidad de la onda es igual a la potencia promedio por unidad de área según la ecuación 21.28.

- 54. BIO Operación del oxímetro de pulso (consulte el problema anterior).** La transmisión de energía luminosa conforme pasa a través de una solución de moléculas que absorben luz se describe mediante la ley Beer-Lambert

$$I = I_0 10^{-\epsilon CL} \quad \text{o} \quad \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = -\epsilon CL$$

que proporciona la disminución en intensidad I en términos de la distancia L que la luz recorre a través de un fluido con una concentración C de la molécula que absorbe luz. La cantidad ϵ se llama coeficiente de extinción y su valor depende de la frecuencia de la luz. (Tiene unidades de m^2/mol .) Suponga que el coeficiente de extinción para luz de 660 nm que pasa a través de una solución de hemoglobina oxigenada es idéntica al coeficiente para luz de 940 nm que pasa a través de hemoglobina desoxigenada. Suponga también que la luz de 940 nm tiene absorción cero ($\epsilon = 0$) en hemoglobina oxigenada y la luz de 660 nm tiene absorción cero en la hemoglobina desoxigenada. Si 33% de la energía de la fuente roja y 76% de la energía infrarroja se transmite a través de la sangre, ¿cuál es la fracción de hemoglobina que está oxigenada?

- 55.** El Sol entrega una potencia promedio de 1370 W/m^2 a la parte superior de la atmósfera de la Tierra. Encuentre las magnitudes de $\vec{E}_{\text{máx}}$ y $\vec{B}_{\text{máx}}$ para las ondas electromagnéticas en la parte superior de la atmósfera.
- 56. C1C** Un haz láser se usa para levitar un disco metálico contra la fuerza de gravedad de la Tierra. a) Deduzca una ecuación que proporcione la intensidad requerida de luz, I , en términos de la masa m del disco, la aceleración gravitacional g , la velocidad de la luz c y el área transversal del disco A . Suponga que el disco es perfectamente reflejante y que el haz se dirige perpendicular al disco. b) Si el disco tiene 5.00 g de masa y 4.00 cm de radio, encuentre la intensidad de luz necesaria. c) Proporcione dos razones por las que usar presión como propulsión no es práctico cerca de la superficie de la Tierra.

- 57.** Un horno de microondas se activa mediante un tubo de electrones llamado magnetrón, que genera ondas electromagnéticas de 2.45 GHz de frecuencia. Las microondas entran al horno y se reflejan en las paredes. El patrón de onda estacionaria que se produce en el horno puede

cocinar el alimento de manera desigual, con manchas calientes en el alimento y antinodos y manchas frías en los nodos, de modo que con frecuencia se usa una tornamesa para girar el alimento y distribuir la energía. Si un horno de microondas se usa con un plato para cocinar en una posición fija, los antinodos pueden aparecer como marcas de quemadura sobre los alimentos, como en las tiras de zanahoria o queso. La distancia de separación entre las quemaduras se mide en 6.00 cm. Calcule la velocidad de las microondas a partir de estos datos.

- 58.** Considere la posibilidad de una estrella brillante en nuestro cielo nocturno. Suponga que la distancia desde la Tierra es de 20.0 años luz (al) y su potencia es de $4.00 \times 10^{28} \text{ W}$, alrededor de 100 veces mayor que la del Sol. a) Encuentre la intensidad de la luz de las estrellas en la Tierra. b) Determine la potencia de la luz de las estrellas que la Tierra intercepta. Un año luz es la distancia recorrida por la luz en el vacío en un año.

21.12 El espectro de las ondas electromagnéticas

- 59.** ¿Cuáles son las longitudes de onda de las ondas electromagnéticas en el espacio libre que tienen frecuencias de a) $5.00 \times 10^{19} \text{ Hz}$ y b) $4.00 \times 10^9 \text{ Hz}$?
- 60. BIO** Una máquina diatérmica, que se usa en fisioterapia, genera radiación electromagnética que produce el efecto de “calor profundo” cuando se absorbe en el tejido. Una frecuencia asignada para diatermia es 27.33 MHz. ¿Cuál es la longitud de onda de la radiación?
- 61.** ¿Cuáles son los rangos de longitud de onda en a) la banda de radio AM (540–1600 kHz) y b) la banda de radio FM (88–108 MHz)?
- 62.** Un importante anuncio noticioso se transmite por ondas de radio a personas que están a 100 km de distancia, sentadas junto a sus radios, y mediante ondas sonoras a las personas que están sentadas en la sala de redacción, a 3.0 m del locutor. ¿Quién recibe primero la noticia? Explique. Considere que la velocidad del sonido en el aire es 343 m/s.
- 63.** Los espectros infrarrojos los usan los químicos para ayudarse a identificar una sustancia desconocida. Los átomos en una molécula que se enlazan juntos mediante un enlace particular vibran a una frecuencia predecible y el átomo absorbe fuertemente la luz a dicha frecuencia. En el caso del enlace doble $\text{C}=\text{O}$, por ejemplo, el átomo de oxígeno se enlaza al carbono mediante un enlace que tiene una constante de resorte efectiva de 2800 N/m. Suponiendo que el átomo de carbono permanece estacionario (está unido a los otros átomos en la molécula), determine la frecuencia de resonancia de este enlace y la longitud de onda de la luz que coincide con dicha frecuencia. Verifique que esta longitud de onda se encuentra en la región infrarroja del espectro. (La masa de un átomo de oxígeno es $2.66 \times 10^{-26} \text{ kg}$.)

21.13 El efecto Doppler para ondas electromagnéticas

- 64.** Una nave se aproxima a la estación espacial con una velocidad de $1.8 \times 10^5 \text{ m/s}$. La estación tiene un faro que emite luz verde con una frecuencia de $6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

- a) ¿Cuál es la frecuencia del faro que se observa en la nave espacial? b) ¿Cuál es el cambio en frecuencia? (Conserve cinco dígitos en estos cálculos.)
65. Mientras conduce a velocidad constante de 80 km/h, pasa junto a un auto que viaja a 120 km/h. Si la frecuencia de la luz que emiten las luces traseras del auto que pasa junto a usted es de 4.3×10^{14} Hz, ¿qué frecuencia observará? ¿Cuál es el cambio en frecuencia?
66. Un conductor que viaja con exceso de velocidad intenta explicar al policía que las luces de advertencia amarillas en el lado del camino le parecieron verdes debido al corrimiento Doppler. ¿Cuán rápido viajaba si la luz amarilla, de 580 nm de longitud de onda, se corrió al verde, con 560 nm de longitud de onda? *Nota:* Para velocidades menores que $0.03c$, la ecuación 21.32 conducirá a un valor para el cambio de frecuencia preciso a aproximadamente dos cifras significativas.

Problemas adicionales

67. Un rayo láser de 25.0 mW de diámetro 2.00 mm se refleja en la incidencia normal de un espejo que refleja perfectamente. Calcule la presión de radiación en el espejo.
68. La intensidad de la radiación solar en la parte superior de la atmósfera de la Tierra es 1370 W/m^2 . Suponiendo que 60% de la energía solar entrante llega a la superficie de la Tierra y suponiendo que usted absorbe 50% de la energía incidente, realice una estimación del orden de magnitud de la cantidad de energía solar que absorbe en un baño de Sol de 60 minutos.
69. Un resistor de 200Ω se conecta en serie con un capacitor de $5.0 \mu\text{F}$ y una línea rms de 120 V a 60 Hz. Si la energía eléctrica cuesta $\$0.080/\text{kWh}$, ¿cuánto cuesta dejar conectado este circuito durante 24 h?
70. **S** En un circuito en serie *RLC*, que incluye una fuente de corriente alterna opera a una frecuencia y voltaje fijos, la resistencia R es igual a la reactancia inductiva. Si la separación de las placas del capacitor de placas paralelas se reduce a la mitad de su valor original, la corriente en el circuito se duplica. Encuentre la reactancia capacitiva inicial en términos de R .
71. Como una forma de determinar la inductancia de una bobina que se usa en un proyecto de investigación, un estudiante primero conecta la bobina a una batería de 12.0 V y mide una corriente de 0.630 A. Luego el estudiante conecta la bobina a un generador de 24.0 V (rms) y 60.0 Hz y mide una corriente rms de 0.570 A. ¿Cuál es la inductancia?
72. a) ¿Qué capacitancia resonará con una espira de una vuelta de 400 pH de inductancia para producir una onda de radar de 3.0 cm de longitud de onda? b) Si el capacitor tiene placas paralelas cuadradas separadas por 1.0 mm de aire, ¿cuál debe ser la longitud de arista de las placas? c) ¿Cuál es la reactancia común de la espira y del capacitor en resonancia?
73. **M** Una antena de plato, con un diámetro de 20.0 m, recibe (a incidencia normal) una señal de radio desde

una fuente distante, como se muestra en la figura P21.73. La señal de radio es una onda sinusoidal continua con amplitud $E_{\text{máx}} = 0.20 \mu\text{V/m}$. Suponga que la antena absorbe toda la radiación que cae sobre el plato. a) ¿Cuál es la amplitud del campo magnético en esta onda? b) ¿Cuál es la intensidad de la radiación que recibe la antena? c) ¿Cuál es la potencia que recibe la antena?

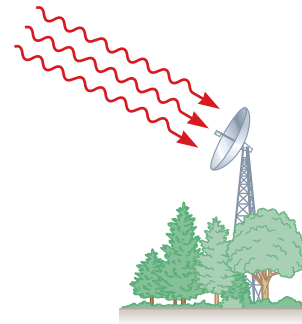


Figura P21.73

74. Un inductor particular tiene resistencia considerable. Cuando el inductor se conecta a una batería de 12 V, la corriente en el inductor es 3.0 A. Cuando se conecta a una fuente CA con una salida rms de 12 V y una frecuencia de 60 Hz, la corriente cae a 2.0 A. ¿Cuáles son a) la impedancia a 60 Hz y b) la inductancia del inductor?
75. Un posible medio para lograr vuelos espaciales es colocar una hoja perfectamente reflejante en la órbita de la Tierra y usar la luz del Sol para empujar esta vela solar. Suponga que tal vela, de $6.00 \times 10^4 \text{ m}^2$ de área y 6000 kg de masa, se coloca en órbita de cara al Sol. a) ¿Qué fuerza se ejerce sobre la vela? b) ¿Cuál es la aceleración de la vela? c) ¿Cuánto tarda esta vela en llegar a la Luna, a $3.84 \times 10^8 \text{ m}$ de distancia? Desprecia todos los efectos gravitacionales y suponga una intensidad solar de 1340 W/m^2 . *Sugerencia:* La presión de radiación mediante una onda reflejada está dada por 2 (potencia promedio por unidad de área)/ c .
76. **BIO C|C** La FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos) estadounidense limita la fuga de radiación de los hornos de microondas a no más de 5.0 mW/cm^2 a una distancia de 2.0 pulgadas. Un teléfono celular típico, que también transmite microondas, tiene una potencia de salida pico de aproximadamente 2.0 W. a) Aproximando el teléfono celular como una fuente puntual, calcule la intensidad de la radiación de un teléfono celular a una distancia de 2.0 pulgadas. ¿Cómo se compara la respuesta con la fuga máxima permisible de un horno de microondas? b) La distancia desde su oreja hasta su cerebro es de más o menos 2 pulgadas. ¿Cuál sería la intensidad de la radiación en su cerebro si usa un auricular Bluetooth y mantiene el teléfono en su bolsillo, a 1.0 m de distancia de su cerebro? La mayoría de los auriculares son los llamados dispositivos clase 2, con una potencia de salida máxima de 2.5 mW.



La luz se desvía (refracta) conforme pasa a través del agua y las diferentes longitudes de onda se separan en diferentes cantidades, un fenómeno llamado dispersión. Junto con la reflexión, estos fenómenos físicos conducen a la creación de un arcoiris cuando la luz pasa a través de pequeñas gotas de agua suspendidas.

Reflexión y refracción de la luz

22

La luz tiene una naturaleza dual. En algunos experimentos actúa como una partícula, mientras que en otros actúa como una onda. En este y los dos capítulos siguientes nos concentraremos en los aspectos de la luz que se entienden mejor a través del modelo ondulatorio. Primero estudiaremos la reflexión de la luz en la frontera entre dos medios y la refracción (desviación) de la luz mientras viaja de un medio hacia otro. Estas ideas las utilizamos para estudiar la refracción de la luz conforme pasa a través de lentes y la reflexión de la luz en superficies de espejos. Finalmente, describiremos cómo pueden usarse los lentes y espejos para ver objetos con telescopios y microscopios y cómo se usan los lentes en fotografía. La habilidad para manipular la luz mejoró enormemente la capacidad para investigar y comprender la naturaleza del Universo.

- 22.1** La naturaleza de la luz
- 22.2** Reflexión y refracción
- 22.3** La ley de refracción
- 22.4** Dispersión y prismas
- 22.5** El arco iris
- 22.6** Principio de Huygens
- 22.7** Reflexión interna total

22.1 La naturaleza de la luz

Hasta comienzos del siglo XIX, la luz se modelaba como una corriente de partículas emitidas por una fuente que estimulaba el sentido de la vista al entrar al ojo. El arquitecto jefe de la teoría corpuscular de la luz fue Newton. Con esta teoría, proporcionó explicaciones simples de algunos hechos experimentales conocidos concernientes a la naturaleza de la luz, a saber, las leyes de reflexión y refracción.

La mayoría de los científicos aceptó la teoría corpuscular de la luz de Newton. Sin embargo, durante la vida de Newton, se propuso otra teoría. En 1678, el físico y astrónomo holandés, Christian Huygens (1629-1695), demostró que una teoría ondulatoria de la luz también podía explicar las leyes de reflexión y refracción.

La teoría ondulatoria no recibió inmediata aceptación, por varias razones. Primero, todas las ondas conocidas en la época (sonoras, en el agua, etc.) viajaban a través de alguna



Christian Huygens
(1629-1695), Físico y astrónomo holandés

Huygens es mejor conocido por sus aportaciones a los campos de la óptica y la dinámica. Para Huygens, la luz era un movimiento vibratorio en el éter, que se dispersa hacia afuera y produce la sensación de luz cuando incide sobre el ojo. Sobre la base de esta teoría, dedujo las leyes de reflexión y refracción y explicó el fenómeno de doble refracción.

especie de medio, pero la luz proveniente del Sol podía viajar a la Tierra a través de espacio vacío. Más aún, se argumentó que si la luz fuese alguna forma de onda, se doblaría alrededor de los obstáculos; por lo tanto, se podría ver a la vuelta de las esquinas. Ahora se sabe que la luz de hecho se dobla alrededor de los bordes de los objetos. Este fenómeno, que se conoce como *difracción*, es difícil de observar porque las ondas de luz tienen longitudes de onda muy cortas. Aun cuando la evidencia experimental para la difracción de la luz la descubrió Francesco Grimaldi (1618-1663) alrededor de 1660, durante más de un siglo la mayoría de los científicos rechazaron la teoría ondulatoria y se adhirieron a la teoría corpuscular de Newton, probablemente debido a la gran reputación de Newton como científico.

La primera demostración clara de la naturaleza ondulatoria de la luz la proporcionó Thomas Young (1773-1829) en 1801, quien demostró que, bajo condiciones adecuadas, la luz muestra comportamiento de interferencia. Las ondas de luz emitidas por una sola fuente y que viajan a lo largo de dos trayectorias diferentes pueden llegar a algún punto y combinarse y cancelarse mutuamente mediante interferencia destructiva. Tal comportamiento no se podría explicar en aquella época mediante un modelo corpuscular porque los científicos no podían imaginar cómo dos o más partículas podrían juntarse y cancelarse unas a otras.

El desarrollo más importante en la teoría de la luz fue el trabajo de Maxwell, quien predijo en 1865 que la luz era una forma de onda electromagnética de alta frecuencia (capítulo 21). Su teoría también predijo que estas ondas debían tener una velocidad de 3×10^8 m/s, en concordancia con el valor medido.

Aunque la teoría clásica de electricidad y magnetismo explicaba la mayoría de las propiedades conocidas de la luz, algunos experimentos posteriores no podían explicarse mediante la suposición de que la luz era una onda. El experimento más sorprendente fue el *efecto fotoeléctrico* (que se examina con más detalle en el capítulo 27), descubierto por Hertz. El descubrió que las superficies metálicas limpias emiten cargas cuando se exponen a luz ultravioleta.

En 1905, Einstein publicó un ensayo que formuló la teoría de los cuantos (“partículas”) de luz y explicó el efecto fotoeléctrico. Llegó a la conclusión de que la luz está compuesta de corpúsculos, o cuantos de energía discontinuos. Estos corpúsculos o cuantos ahora se llaman *fotoes* para enfatizar su naturaleza parecida a partícula. De acuerdo con la teoría de Einstein, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética asociada con ella, o

Energía de un fotón ►

$$E = hf$$

[22.1]

donde $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J · s es la *constante de Planck*. Esta teoría conserva algunas características de las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz. Como lo veremos más adelante, el efecto fotoeléctrico es resultado de la transferencia de energía de un solo fotón a un electrón en el metal. Esto significa que el electrón interactúa con un fotón de luz como si el electrón fuese golpeado por una partícula. Con todo, el fotón tiene características parecidas a una onda, como lo implica el hecho de que se usa una frecuencia en su definición.

En vista de estos desarrollos, la luz se debe considerar como poseedora de una *naturaleza dual*. **En algunos experimentos la luz actúa como una onda y en otros actúa como partícula.** La teoría clásica de ondas electromagnéticas proporciona explicaciones adecuadas de la propagación de la luz y de los efectos de interferencia, mientras que el efecto fotoeléctrico y otros experimentos que involucran la interacción de luz con la materia se explican mejor al suponer que la luz es una partícula.

De modo que en el análisis final, ¿la luz es una onda o una partícula? La respuesta es ninguna y ambas: la luz tiene algunas propiedades físicas, algunas asociadas con ondas y otras con partículas.

22.2 Reflexión y refracción

Cuando la luz que viaja en un medio encuentra una frontera que conduce hacia un segundo medio, pueden ocurrir procesos de reflexión y refracción. En la **reflexión**, parte de la luz que encuentra el segundo medio rebota de dicho medio. En la **refracción**, la luz que

pasa hacia el segundo medio se desvía en un ángulo con respecto a la normal, a la frontera. A menudo, ambos procesos ocurren al mismo tiempo, con parte de la luz que se refleja y parte que se refracta. Para estudiar reflexión y refracción es necesaria una forma de pensar acerca de los haces de luz, y ésta se proporciona mediante la aproximación de rayos.

La aproximación de rayos en óptica geométrica

Una importante propiedad de la luz que se puede entender con base en la experiencia común es la siguiente: **la luz viaja en una trayectoria en línea recta en un medio homogéneo, hasta que encuentra una frontera entre dos materiales diferentes.** Cuando la luz golpea una frontera, se refleja de dicha frontera, pasa hacia el material en el otro lado de la frontera o hace ambas cosas parcialmente.

La observación anterior conduce al uso de lo que se llama **aproximación de rayos** para representar haces de luz. Como se muestra en la figura 22.1, un rayo de luz es una línea imaginaria dibujada a lo largo de la dirección de viaje del haz de luz. Por ejemplo, un haz de luz solar que pasa a través de una habitación oscura traza la trayectoria de un rayo de luz. También se usa el concepto de frentes de onda de luz. Un **frente de onda** es una superficie que pasa a través de los puntos de una onda que tiene la misma fase y amplitud. Por ejemplo, los frentes de onda en la figura 22.1 podrían ser superficies que pasan a través de las crestas de ondas. Los rayos, que corresponden a la dirección de movimiento de la onda, son líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda. Cuando los rayos de luz viajan en trayectorias paralelas, los frentes de onda son planos perpendiculares a los rayos.

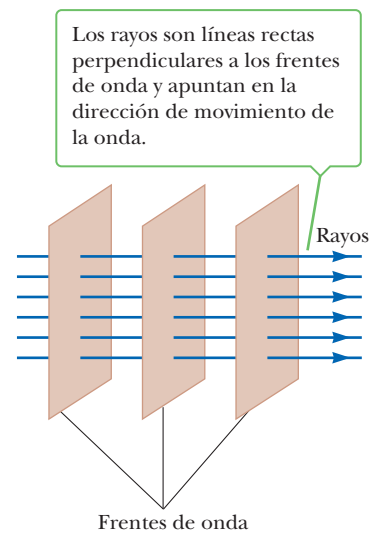


Figura 22.1 Una onda plana que viaja hacia la derecha.

Reflexión de la luz

Cuando un rayo de luz que viaja en un medio transparente encuentra una frontera que conduce hacia un segundo medio, parte del rayo incidente se refleja de regreso hacia el primer medio. La figura 22.2a muestra varios rayos de un haz de luz incidente sobre una superficie lisa reflejante parecida a un espejo. Los rayos reflejados son paralelos unos a otros, como se indica en la figura. La reflexión de la luz desde tal superficie lisa se llama **reflexión especular**. Por otra parte, si la superficie reflejante es rugosa, como en la figura 22.2b, la superficie refleja los rayos en varias direcciones. La reflexión de cualquier superficie rugosa se conoce como **reflexión difusa**. Una superficie se comporta como una superficie lisa en tanto sus variaciones sean pequeñas, comparadas con la longitud de onda de la luz incidente. Las figuras 22.2c y 22.2d son fotografías de reflexión especular y difusa de luz láser, respectivamente.

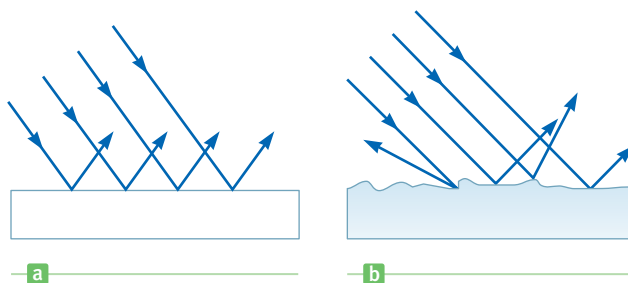
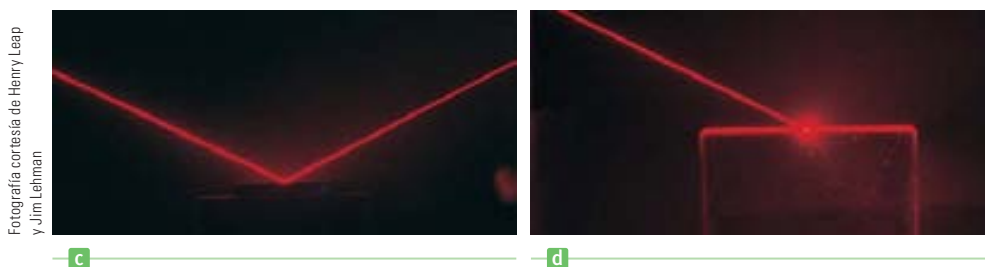


Figura 22.2 Representación esquemática de a) reflexión especular, donde los rayos reflejados son todos paralelos unos a otros y, b) reflexión difusa, donde los rayos reflejados viajan en direcciones aleatorias. (c, d) Fotografías de reflexión especular y difusa, hecha con luz láser.



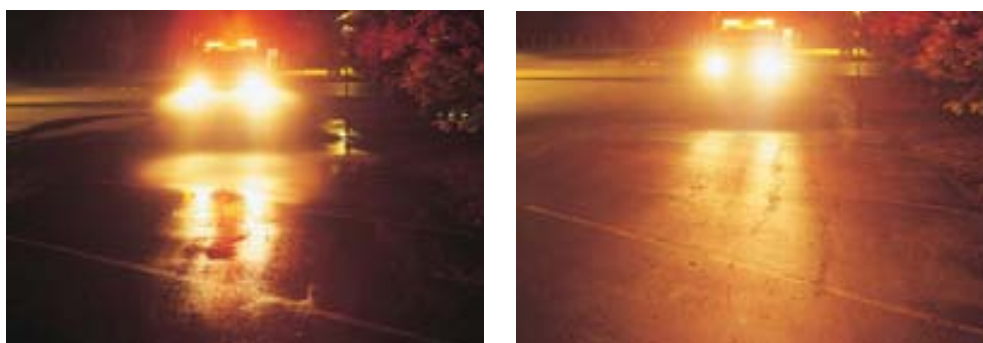
APLICACIÓN

Cómo ver el camino en una noche lluviosa

Como ejemplo, considere los dos tipos de reflexión desde una superficie del camino que un conductor puede observar mientras conduce de noche. Cuando el camino está seco, la luz proveniente de los vehículos que se acercan se dispersa del camino en diferentes direcciones (reflexión difusa) y el camino es claramente visible. En una noche lluviosa, cuando el camino está húmedo, las irregularidades del camino están llenas de agua. Esto significa que la luz se refleja recto hacia adelante y el conductor de un vehículo sólo ve lo que está directamente enfrente de él. La luz proveniente de un lado nunca llega al ojo del conductor. En este libro nos preocupamos sólo por la reflexión especular y usaremos el término *reflexión* para denotar la reflexión especular.

Examen rápido

22.1 ¿Cuál inciso de la figura 22.3, a) o b), muestra mejor la reflexión especular de la luz desde el camino?



© Charles D. Winters/Cengage Learning

a

b

Figura 22.3 (Examen rápido 22.1)

El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal se encuentran todos en el mismo plano, y $\theta_1 = \theta_1'$.

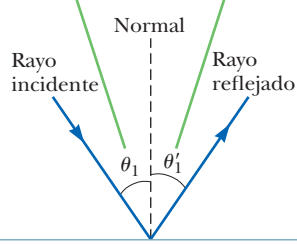


Figura activa 22.4

La onda bajo el modelo de reflexión.

BIO APLICACIÓN

Ojos rojos en fotografías con flash

Considere un rayo de luz que viaja en aire e incide a cierto ángulo sobre una superficie plana lisa, como en la figura activa 22.4. Los rayos incidente y reflejado forman ángulos θ_1 y θ_1' , respectivamente, **con una línea perpendicular a la superficie** en el punto donde el rayo incidente golpea la superficie. A esta línea se le llama *normal* a la superficie. Los experimentos demuestran que **el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia**:

$$\theta_1' = \theta_1$$

[22.2]

Tal vez haya observado un suceso común en las fotografías de personas: sus ojos parecen tener un brillo rojizo. Los “ojos rojos” ocurren cuando se usa un flash fotográfico y la unidad de flash está cerca del lente de la cámara. La luz proveniente del flash entra al ojo y se refleja de regreso a lo largo de su trayectoria original desde la retina. Este tipo de reflexión de regreso a lo largo de la dirección original se llama *retroreflexión*. Si la unidad de flash y el lente están juntos, la luz que se retrorefleja puede entrar al lente. La mayor parte de la luz que se refleja de la retina es roja debido a los vasos sanguíneos en la parte posterior del ojo, lo que produce el efecto de ojo rojo en la fotografía.

FÍSICA APLICADA 22.1 Los colores de las ondas de agua en el atardecer

Una persona, que ve hacia el oeste en la playa de un gran lago, observa el comienzo del atardecer. El agua es muy lisa, excepto por algunas áreas con pequeñas ondas. El observador nota que algunas áreas del agua son azules y algunas son rosas. ¿Por qué el agua parece ser de diferentes colores en distintas áreas?

EXPLICACIÓN Los diferentes colores surgen de reflexión especular y difusa. Las áreas lisas del agua reflejarán de manera especular la luz del oeste, que es la luz rosa del atardecer. Las áreas con pequeñas ondas reflejarán la luz de manera difusa, de modo que la luz de todas las partes del cielo se reflejará en los ojos del observador. Puesto que la mayor parte del cielo todavía es azul al comienzo del atardecer, estas áreas parecerán azules. ■

■ FÍSICA APLICADA 22.2 Imágenes dobles

Cuando usted está de pie afuera, bajo la luz del sol, cerca de una ventana de un solo cristal y mira hacia el interior oscuro de un edificio, ¿por qué con frecuencia ve dos imágenes de usted mismo, una superpuesta sobre la otra?

EXPLICACIÓN La reflexión ocurre siempre que hay una interfaz entre dos medios diferentes. Para el vidrio en

la ventana existen dos de tales superficies, la ventana que da frente al exterior y la ventana que da frente al interior. Cada una de estas interfaces resulta en una imagen. Observará que una imagen es ligeramente menor que la otra, porque la superficie reflejante está más alejada. ■

■ EJEMPLO 22.1 El rayo de luz que se refleja dos veces

OBJETIVO Calcular un ángulo resultante a partir de dos reflexiones.

PROBLEMA Dos espejos forman un ángulo de 120° uno con otro, como en la figura 22.5. Un rayo incide sobre el espejo M_1 a un ángulo de 65° con la normal. Encuentre el ángulo que forma el rayo con la normal a M_2 después de que se refleja de ambos espejos.

ESTRATEGIA Aplique la ley de reflexión dos veces. Proporcione al rayo incidente un ángulo θ_{inc} y encuentre el ángulo resultante final, β_{ref} .

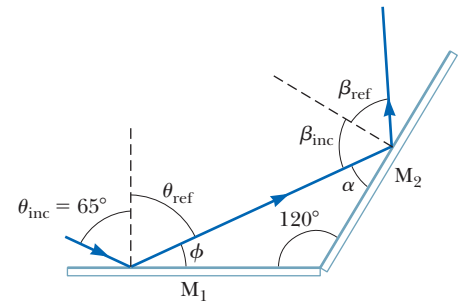


Figura 22.5 (Ejemplo 22.1) Los espejos M_1 y M_2 forman un ángulo de 120° uno con otro.

SOLUCIÓN

Aplique la ley de reflexión a M_1 para encontrar el ángulo de reflexión, θ_{ref} :

$$\theta_{\text{ref}} = \theta_{\text{inc}} = 65^\circ$$

Encuentre el ángulo ϕ que es el complemento del ángulo θ_{ref} :

$$\phi = 90^\circ - \theta_{\text{ref}} = 90^\circ - 65^\circ = 25^\circ$$

Encuentre el ángulo desconocido α en el triángulo de M_1 , M_2 y el rayo que viaja de M_1 a M_2 , y use el hecho de que los tres ángulos suman 180° :

$$180^\circ = 25^\circ + 120^\circ + \alpha \rightarrow \alpha = 35^\circ$$

El ángulo α es complementario al ángulo de incidencia, β_{inc} , para M_2 :

$$\alpha + \beta_{\text{inc}} = 90^\circ \rightarrow \beta_{\text{inc}} = 90^\circ - 35^\circ = 55^\circ$$

Aplique la ley de reflexión una segunda vez y obtenga β_{ref} :

$$\beta_{\text{ref}} = \beta_{\text{inc}} = 55^\circ$$

COMENTARIOS Note la fuerte relevancia en la geometría elemental y la trigonometría en estos problemas de reflexión.

PREGUNTA 22.1 En general, ¿cuál es la relación entre el ángulo incidente θ_{inc} y el ángulo reflejado final β_{ref} cuando el ángulo entre los espejos es 90.0° ? a) $\theta_{\text{inc}} + \beta_{\text{ref}} = 90.0^\circ$ b) $\theta_{\text{inc}} - \beta_{\text{ref}} = 90.0^\circ$ c) $\theta_{\text{inc}} + \beta_{\text{ref}} = 180^\circ$

EJERCICIO 22.1 Repita el problema si el ángulo de incidencia es 55° y el segundo espejo forma un ángulo de 100° con el primer espejo.

RESPUESTA 45°

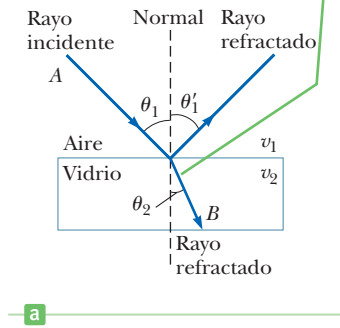
Refracción de la luz

Cuando un rayo de luz que viaja a través de un medio transparente encuentra una frontera que conduce a otro medio transparente, como en la figura activa 22.6a (página 766), parte del rayo se refleja y parte entra al segundo medio. El rayo que entra al segundo medio se desvía en la frontera y se dice que se *refracta*. El rayo incidente, el rayo reflejado, el rayo refractado y la normal en el punto de incidencia se encuentran todos en el mismo plano.

Figura activa 22.6

a) La onda bajo el modelo de refracción. b) La luz que incide sobre el bloque de lucita se refracta tanto cuando entra al bloque como cuando sale del bloque.

Todos los rayos y la normal yacen en el mismo plano y el rayo refractado está desviado hacia la normal ya que $v_2 < v_1$.



El **ángulo de refracción**, θ_2 , en la figura activa 22.6a depende de las propiedades de los dos medios y del ángulo de incidencia, mediante la relación

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \text{constante} \quad [22.3]$$

donde v_1 es la velocidad de la luz en el medio 1 y v_2 es la velocidad de la luz en el medio 2. Observe que el ángulo de refracción también se mide con respecto a la normal. En la sección 22.7 se deducen las leyes de reflexión y refracción con el uso del principio de Huygens.

Los experimentos demuestran que **la trayectoria de un rayo de luz a través de una superficie refractante es reversible**. Por ejemplo, el rayo en la figura activa 22.6a viaja del punto A al punto B. Si el rayo se origina en B, seguiría la misma trayectoria para llegar al punto A, pero el rayo reflejado estaría en el vidrio.

Examen rápido

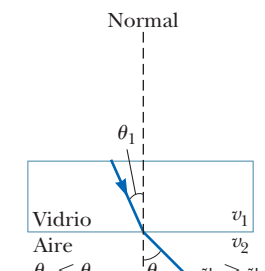
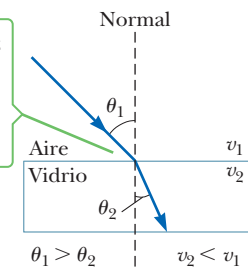
22.2 Si el haz 1 es el haz entrante en la figura activa 22.6b, ¿cuál de los otros cuatro haces se deben a reflexión? ¿Cuáles se deben a refracción?

Quando la luz se mueve de un material donde su velocidad es alta, hacia un material donde su velocidad es más baja, el ángulo de refracción θ_2 es menor que el ángulo de incidencia. Por lo tanto, el rayo refractado se desvía hacia la normal, como se muestra en la figura activa 22.7a. Si el rayo se mueve de un material donde viaja lentamente a un material donde viaja más rápidamente, θ_2 es mayor que θ_1 , de modo que el rayo se desvía alejándose de la normal, como se muestra en la figura activa 22.7b.

Figura activa 22.7

Refracción de la luz cuando a) el haz de luz se mueve de aire a vidrio y b) el haz se mueve de vidrio a aire.

Quando el haz de luz se mueve de aire a vidrio, su trayectoria se desvía hacia la normal.



Quando el haz de luz se mueve de vidrio a aire, su trayectoria se desvía hacia la normal.

22.3 La ley de refracción

Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro, se refracta porque la velocidad de la luz es diferente en los dos medios.¹ El **índice de refracción**, n , de un medio se define como la razón c/v :

$$n \equiv \frac{\text{velocidad de la luz en el vacío}}{\text{velocidad de la luz en un medio}} = \frac{c}{v} \quad [22.4]$$

A partir de esta definición, vemos que el índice de refracción es un número adimensional que es mayor o igual a 1 porque v siempre es menor que c . Más aún, n es igual a uno para el vacío. La tabla 22.1 menciona los índices de refracción para varias sustancias.

Conforme la luz viaja de un medio a otro, su frecuencia no cambia. Para ver por qué, considere la figura 22.8. Los frentes de onda pasan a un observador en el punto A en el medio 1 con cierta frecuencia e inciden sobre la frontera entre el medio 1 y el medio 2. La frecuencia a la que los frentes de onda pasan junto a un observador en el punto B en el medio 2 debe ser igual a la frecuencia a la que llegan al punto A. Si no es así, los frentes de onda se apilarían en la frontera, se destruirían o crearían en la frontera. Puesto que ninguno de estos eventos ocurre, la frecuencia debe permanecer igual conforme un rayo de luz pasa de un medio a otro.

En consecuencia, puesto que la relación $v = f\lambda$ debe ser válida en ambos medios y porque $f_1 = f_2 = f$, vemos que

$$v_1 = f\lambda_1 \text{ y } v_2 = f\lambda_2$$

Puesto que $v_1 \neq v_2$, tenemos que $\lambda_1 \neq \lambda_2$. Se puede obtener una relación entre el índice de refracción y la longitud de onda al dividir estas dos ecuaciones y usar la definición del índice de refracción dado por la ecuación 22.4:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad [22.5]$$

lo que produce

$$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2 \quad [22.6]$$

Tabla 22.1 Índices de refracción para varias sustancias, medidas con luz de longitud de onda en vacío $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$

Sustancia	Índice de refracción	Sustancia	Índice de refracción
Sólidos a 20°C		Líquidos a 20°C	
Diamante (C)	2.419	Benceno	1.501
Fluorita (CaF ₂)	1.434	Disulfuro de carbono	1.628
Cuarzo fundido (SiO ₂)	1.458	Tetracloruro de carbono	1.461
Vidrio, corona	1.52	Alcohol etílico	1.361
Vidrio	1.66	Glicerina	1.473
Hielo (H ₂ O) (a 0°C)	1.309	Agua	1.333
Poliestireno	1.49		
Cloruro de sodio (NaCl)	1.544	Gases a 0°C, 1 atm	
Zirconio	1.923	Aire	1.000 293
		Dióxido de carbono	1.000 45

Conforme la onda se mueve del medio 1 al medio 2, su longitud de onda cambia, pero su frecuencia permanece constante.

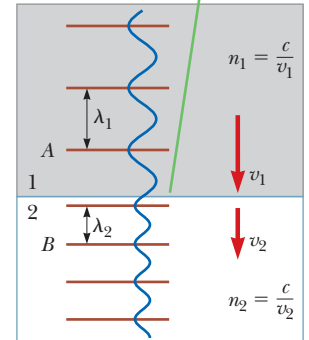


Figura 22.8 Una onda viaja del medio 1 al medio 2, en el que se mueve con una velocidad más baja.

Tip 22.1 Una relación inversa

El índice de refracción es *inversamente* proporcional a la velocidad de la onda. Por lo tanto, conforme la velocidad de la onda v disminuye, el índice de refracción, n , *aumenta*.

Tip 22.2 La frecuencia permanece igual

La *frecuencia* de una onda *no* cambia conforme la onda pasa de un medio a otro. Tanto la velocidad de onda como la longitud de onda *sí* cambian, pero la frecuencia permanece igual.

¹La velocidad de la luz varía entre los medios porque los retrasos de tiempo provocados por la absorción y la reemisión de luz conforme viaja de átomo a átomo dependen de la estructura electrónica particular de los átomos que constituyen cada material.

Sea el medio 1 el vacío, de modo que $n_1 = 1$. De la ecuación 22.6 se tiene que el índice de refracción de cualquier medio se puede expresar como la razón

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} \quad [22.7]$$

donde λ_0 es la longitud de onda de la luz en el vacío y λ_n es la longitud de onda en el medio que tiene índice de refracción n . La figura 22.9 es una representación esquemática de esta reducción en longitud de onda cuando la luz pasa de un vacío hacia un medio transparente.

Ahora está usted en posición de expresar la ecuación 22.3 en una forma alternativa. Si sustituye la ecuación 22.5 en la ecuación 22.3, obtiene

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad [22.8]$$

El descubrimiento experimental de esta relación usualmente se le acredita a Willebrørd Snell (1591-1626) y por lo tanto se conoce como **ley de refracción de Snell**.

Ley de refracción de Snell ▶

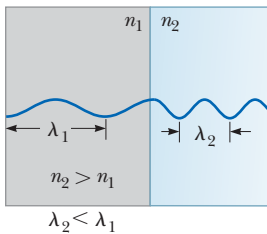


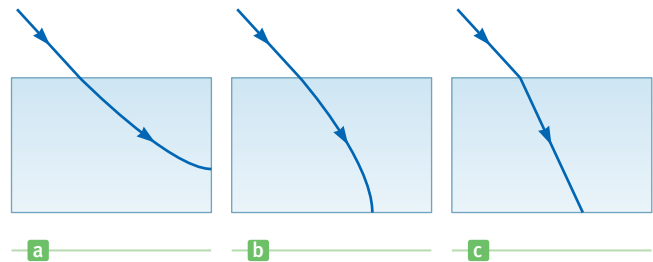
Figura 22.9 Diagrama esquemático de la *reducción* en longitud de onda cuando la luz viaja de un medio con un índice de refracción bajo, a uno con un índice de refracción más alto.

Examen rápido

22.3 Un material tiene un índice de refracción que aumenta de manera continua de la parte superior a la inferior. De las tres trayectorias que se muestran en la figura 22.10, ¿cuál trayectoria seguirá un rayo de luz conforme pasa a través del material?

22.4 Conforme la luz viaja de un vacío ($n = 1$) a un medio como el vidrio ($n > 1$), ¿cuál de las siguientes propiedades permanece igual, a) la longitud de onda, b) la velocidad de onda o c) la frecuencia?

Figura 22.10 (Examen rápido 22.3)



EJEMPLO 22.2 Ángulo de refracción para el vidrio

OBJETIVO Aplicar la ley de Snell.

PROBLEMA Un rayo de luz, con longitud de onda de 589 nm (producido por una lámpara de sodio), que viaja a través de aire, incide sobre una losa plana lisa de vidrio corona en un ángulo θ_1 de 30.0° con la normal, como se bosqueja en la figura 22.11. **a)** Determine el ángulo de refracción, θ_2 . **b)** ¿A qué ángulo θ_3 el rayo deja el vidrio, al entrar de nuevo en el aire? **c)** ¿De qué manera la respuesta para θ_3 cambia, si el rayo entra en el agua debajo de la losa en lugar del aire?

ESTRATEGIA Sustituya cantidades en la ley de Snell y resuelva para el ángulo de refracción desconocido.

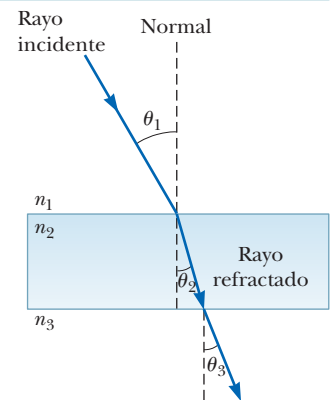


Figura 22.11 (Ejemplo 22.2) Refracción de luz por vidrio.

SOLUCIÓN

a) Determine el ángulo de refracción, θ_2 .

Resuelva la ley de Snell (ecuación 22.8) para $\text{sen } \theta_2$:

$$(1) \text{ sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{ sen } \theta_1$$

A partir de la tabla 22.1, encuentre $n_1 = 1.00$ para aire y $n_2 = 1.52$ para vidrio corona. Sustituya estos valores en la ecuación (1) y tome el seno inverso de ambos lados:

$$\begin{aligned}\text{sen } \theta_2 &= \left(\frac{1.00}{1.52}\right)(\text{sen } 30.0^\circ) = 0.329 \\ \theta_2 &= \text{sen}^{-1}(0.329) = 19.2^\circ\end{aligned}$$

b) ¿A qué ángulo θ_3 el rayo deja el vidrio, al entrar de nuevo en el aire?

Escriba la ecuación (1), sustituyendo θ_3 por θ_2 , θ_2 por θ_1 ,

$$(2) \quad \text{sen } \theta_3 = \frac{n_2}{n_3} \text{sen } \theta_2 = \frac{1.52}{1.00} \text{sen } (19.2^\circ) = 0.500$$

Tome el seno inverso de ambos lados para hallar θ_3 :

$$\theta_3 = \text{sen}^{-1}(0.500) = 30.0^\circ$$

c) ¿De qué manera la respuesta para θ_3 cambia, si el rayo entra en el agua debajo de la losa en lugar del aire?

Escriba la ecuación (2) y sustituya el valor para el índice de refracción del agua en n_3 :

$$\begin{aligned}\text{sen } \theta_3 &= \frac{n_2}{n_3} \text{sen } \theta_2 = \frac{1.52}{1.33} \text{sen } (19.2^\circ) = 0.376 \\ \theta_3 &= \text{sen}^{-1}(0.376) = 22.1^\circ\end{aligned}$$

COMENTARIOS Advierta que el rayo de luz se desvía hacia la normal cuando entra a un material de un índice de refracción más alto. Si el rayo que deja el material sigue la misma trayectoria a la inversa, se desviaría alejándose de la normal. Al pasar por una losa de material con superficies paralelas, por ejemplo del aire al vidrio y de regreso al aire, la dirección final del rayo es paralela a la dirección del rayo incidente. El único efecto en este caso es un desplazamiento lateral del rayo de luz.

PREGUNTA 22.2 Si el vidrio se sustituye con un material transparente con menor índice de refracción, ¿el ángulo de refracción θ_2 será a) menor, b) mayor o c) no cambiará?

EJERCICIO 22.2 Suponga que un rayo de luz en el aire ($n = 1.00$) entra en un cubo de material ($n = 2.50$) a un ángulo de 45.0° con respecto a la normal y luego sale de la parte inferior del cubo dentro del agua ($n = 1.33$). ¿A qué ángulo con la normal sale el rayo de la losa?

RESPUESTA 32.1°

■ EJEMPLO 22.3 Luz en cuarzo fundido

OBJETIVO Usar el índice de refracción para determinar el efecto de un medio sobre la velocidad y longitud de onda de la luz.

PROBLEMA Luz con 589 nm de longitud de onda en el vacío pasa a través de un trozo de cuarzo fundido con índice de refracción $n = 1.458$. a) Encuentre la velocidad de la luz en cuarzo fundido. b) ¿Cuál es la longitud de onda de esta luz en cuarzo fundido? c) ¿Cuál es la frecuencia de la luz en cuarzo fundido?

ESTRATEGIA Sustituya valores en las ecuaciones 22.4 y 22.7.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la velocidad de la luz en cuarzo fundido.

Obtenga la velocidad a partir de la ecuación 22.4:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.458} = 2.06 \times 10^8 \text{ m/s}$$

b) ¿Cuál es la longitud de onda de esta luz en cuarzo fundido?

Use la ecuación 22.7 para calcular la longitud de onda:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{589 \text{ nm}}{1.458} = 404 \text{ nm}$$

c) ¿Cuál es la frecuencia de la luz en cuarzo fundido?

La frecuencia en cuarzo es la misma que en vacío. Resuelva $c = f\lambda$ para la frecuencia:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{589 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5.09 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

COMENTARIOS Es interesante advertir que la velocidad de la luz en el vacío, 3.00×10^8 m/s, es un límite superior para la rapidez de los objetos materiales. En el tratamiento de la relatividad, en el capítulo 26, encontrará que este límite superior es consistente con observaciones experimentales. Sin embargo, es posible que una partícula que se mueve en un medio

(continúa)

tenga una velocidad que supere la velocidad de la luz en dicho medio. Por ejemplo, teóricamente es posible que una partícula viaje a través de cuarzo fundido con una velocidad mayor que 2.06×10^8 m/s, mas todavía debe tener una velocidad menor que 3.00×10^8 m/s.

PREGUNTA 22.3 Verdadero o Falso: Si luz con longitud de onda λ en vidrio pasa hacia agua con índice n_w , la nueva longitud de onda de la luz es λ/n_w .

EJERCICIO 22.3 Luz con longitud de onda de 589 nm pasa a través de cloruro de sodio cristalino. En este medio, determine a) la velocidad de la luz, b) la longitud de onda y, c) la frecuencia de la luz.

RESPUESTAS a) 1.94×10^8 m/s b) 381 nm c) 5.09×10^{14} Hz

EJEMPLO 22.4 Refracción de luz láser en un videodisco digital (DVD)

OBJETIVO Aplicar la ley de Snell junto con restricciones geométricas.

PROBLEMA Un DVD es una grabación en video que consiste en una pista espiral, de aproximadamente $1.0 \mu\text{m}$ de ancho, con información digital. (Véase la figura 22.12a.) La información digital consiste en una serie de depresiones (pits) que se “leen” mediante un rayo láser que se ajusta con precisión sobre una pista (*track*) en la capa de información. Si el ancho a del haz en la capa de información debe ser igual a $1.0 \mu\text{m}$ para distinguir pistas individuales y el ancho w del haz conforme entra al plástico es 0.700 mm , determine el ángulo θ_1 al que debe entrar al plástico el haz cónico. (Véase la figura 22.12b.) Suponga que el plástico tiene un grosor $t = 1.20 \text{ mm}$ y un índice de refracción $n = 1.55$. Observe que este sistema es relativamente inmune a pequeñas partículas de polvo que degradan la calidad del video, porque las partículas tendrían que ser tan grandes como 0.700 mm para oscurecer el haz en el punto donde entra al plástico.

ESTRATEGIA Utilice la trigonometría de triángulos rectángulos para determinar el ángulo θ_2 y luego aplique la ley de Snell para obtener el ángulo θ_1 .

SOLUCIÓN

A partir de la parte superior e inferior de la figura 22.12b, obtenga una ecuación que relacione w , b y a :

Resuelva esta ecuación para b y sustituya los valores dados:

Ahora use la función tangente para encontrar θ_2 :

Finalmente, use la ley de Snell para encontrar θ_1 :

$$w = 2b + a$$

$$b = \frac{w - a}{2} = \frac{700.0 \times 10^{-6} \text{ m} - 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}}{2} = 349.5 \mu\text{m}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{b}{t} = \frac{349.5 \mu\text{m}}{1.20 \times 10^3 \mu\text{m}} \rightarrow \theta_2 = 16.2^\circ$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2 \sin \theta_2}{n_1} = \frac{1.55 \sin 16.2^\circ}{1.00} = 0.432$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}(0.432) = 25.6^\circ$$

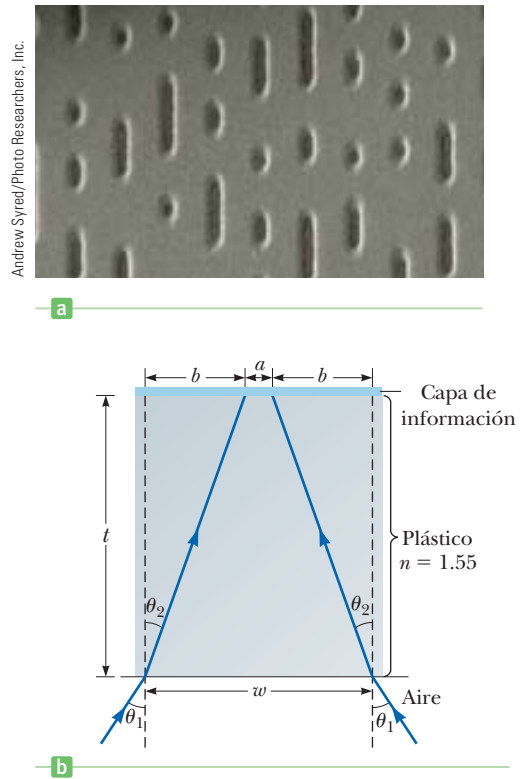


Figura 22.12 (Ejemplo 22.4) Un micrografo de la superficie de un DVD que muestra las pistas y depresiones a lo largo de cada pista. b) Sección transversal de un haz de láser cónico que se usa para leer un DVD.

COMENTARIOS A pesar de su aparente complejidad, el problema no es diferente al del ejemplo 22.2.

PREGUNTA 22.4 Suponga que el plástico se sustituye con un material con un mayor índice de refracción. ¿Cómo se afectaría el ancho del haz en la capa de información? a) Permanecería igual. b) Disminuiría. c) Aumentaría.

EJERCICIO 22.4 Suponga que quiere rediseñar el sistema para reducir el ancho inicial del haz de 0.700 0 mm a 0.600 0 mm, pero dejar el ángulo incidente θ_1 y todos los otros parámetros igual que antes, excepto el índice de refracción para el material plástico (n_2) y el ángulo θ_2 . ¿Qué índice de refracción tendría el plástico?

RESPUESTA 1.79

22.4 Dispersión y prismas

En la tabla 22.1 se presentaron valores para el índice de refracción de varios materiales. Sin embargo, si se realizan mediciones cuidadosas, se encuentra que el índice de refracción en algo más que vacío depende de la longitud de onda de la luz. La dependencia del índice de refracción de la longitud de onda se llama **dispersión**. La figura 22.13 es una representación gráfica de esta variación en el índice de refracción con la longitud de onda. Puesto que n es una función de la longitud de onda, la ley de Snell indica que **el ángulo de refracción que se forma cuando la luz entra a un material, depende de la longitud de onda de la luz**. Como se ve en la figura, por lo general el índice de refracción para un material disminuye con el aumento en longitud de onda. Esto significa que la luz violeta ($\lambda \cong 400$ nm) se refracta más que la luz roja ($\lambda \cong 650$ nm) cuando pasa de aire a un material.

Para comprender los efectos de dispersión sobre la luz, considere lo que sucede cuando la luz golpea un prisma, como en la figura 22.14a. Un rayo de luz de una sola longitud de onda, que incide sobre el prisma desde la izquierda, sale desviado alejándose de su dirección original de viaje en un ángulo δ , llamado **ángulo de desviación**. Ahora suponga que un haz de luz blanca (una combinación de todas las longitudes de onda visibles) incide sobre un prisma. Debido a la dispersión, los diferentes colores se refractan a través de diferentes ángulos de desviación como se muestra en la figura 22.14b y los rayos que salen de la segunda cara del prisma se dispersan en una serie de colores conocidos como **espectro visible**, como se muestra en la figura 22.15 en la página 772. Estos colores, en orden de longitud de onda decreciente, son rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta. La luz violeta se desvía más, la luz roja menos y los colores restantes en el espectro visible caen en medio de estos extremos.

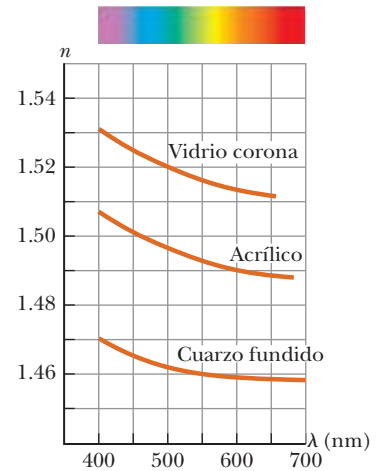


Figura 22.13 Variaciones del índice de refracción en el espectro visible con respecto a la longitud de onda en el vacío para tres materiales.

Tip 22.3 Dispersión

La luz de menor longitud de onda, como la luz violeta, se refracta más que la luz de longitudes de onda mayores, como la luz roja.

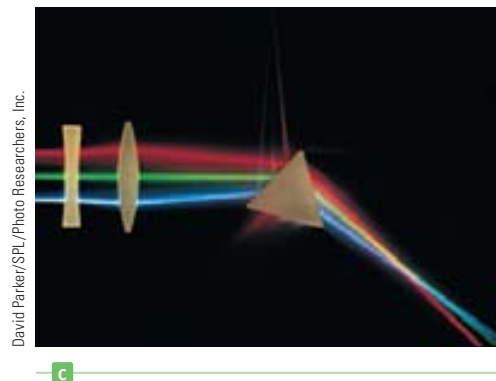
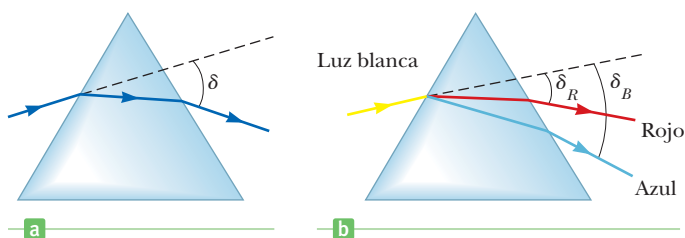
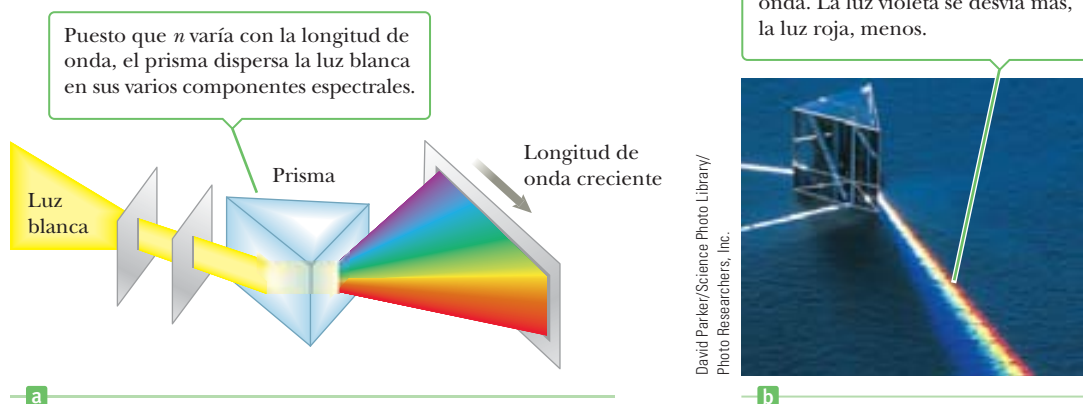


Figura 22.14 a) Un prisma refracta un rayo de luz y desvía la luz a través del ángulo δ . b) Cuando la luz incide sobre un prisma, la luz azul se desvía más que la luz roja. c) Luz de diferentes colores pasa a través de un prisma y dos lentes. Observe que, conforme la luz pasa a través del prisma, diferentes longitudes de onda se refractan en diferentes ángulos.

Figura 22.15 a) Dispersión de luz blanca mediante un prisma.
b) Luz blanca entra en un prisma de vidrio en la parte superior izquierda.



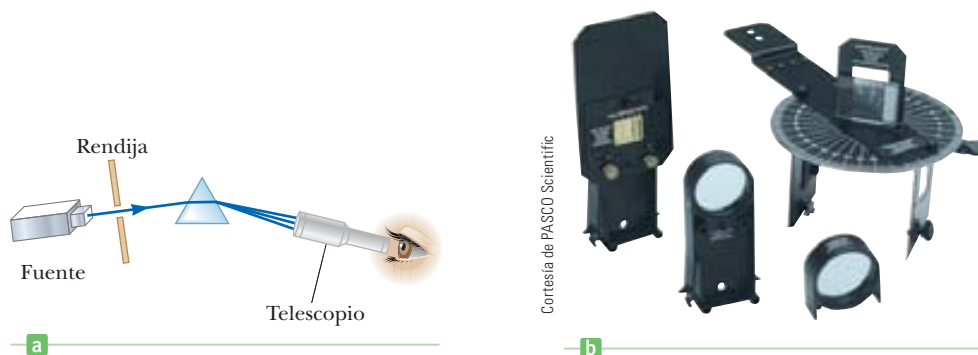
Los prismas se usan con frecuencia en un instrumento conocido como **espectrómetro de prisma**, cuyos elementos esenciales se muestran en la figura 22.16a. Este instrumento se usa comúnmente para estudiar las longitudes de onda emitidas por una fuente de luz, como una lámpara de vapor de sodio. La luz proveniente de la fuente se envía a través de una estrecha rendija ajustable y un lente para producir un haz paralelo o colimado. Entonces la luz pasa a través del prisma y se dispersa en un espectro. La luz refractada se observa a través de un telescopio. El experimentador ve diferentes imágenes coloridas de la rendija a través del ocular del telescopio. El telescopio se puede mover o el prisma se puede girar para ver las varias longitudes de onda, que tienen diferentes ángulos de desviación. La figura 22.16b muestra un tipo de espectrómetro de prisma que se usa en laboratorios de pregrado.

APLICACIÓN

Cómo identificar gases con un espectrómetro

Todos los gases calientes a baja presión emiten sus espectros característicos, de modo que un uso de un espectrómetro de prisma es la identificación de gases. Por ejemplo, el sodio emite sólo dos longitudes de onda en el espectro visible: dos líneas amarillas cercanamente espaciadas. (Las imágenes lineales brillantes de la rendija que se ven en un espectrómetro se llaman *líneas espectrales*.) Un gas que emite estos y sólo estos colores se puede identificar como sodio. Del mismo modo, el vapor de mercurio tiene su propio espectro característico, que consiste en cuatro longitudes de onda prominentes (líneas naranja, verde, azul y violeta) junto con algunas longitudes de onda de menor intensidad. Las longitudes de onda particulares emitidas por un gas sirven como “huellas digitales” de dicho gas. El análisis espectral, que es la medición de las longitudes de onda emitidas o absorbidas por una sustancia, es una poderosa herramienta general en muchas áreas científicas. Como ejemplo, químicos y biólogos usan espectroscopía infrarroja para identificar moléculas, los astrónomos usan espectroscopía de luz visible para identificar elementos en estrellas distantes y los geólogos usan análisis espectral para identificar minerales.

Figura 22.16 a) Diagrama de un espectrómetro de prisma. Los colores en el espectro se ven a través de un telescopio. b) Un espectrómetro de prisma con componentes intercambiables.



■ FÍSICA APLICADA 22.3 Dispersión

Cuando un haz de luz entra a un prisma de vidrio, que tiene lados no paralelos, el arcoíris de color que sale del prisma es un testimonio de la dispersión que ocurre en el vidrio. Suponga que un haz de luz entra a una losa de material con lados paralelos. Cuando el haz sale del otro lado y viaja en la misma dirección que el haz original, ¿existe alguna evidencia de dispersión?

EXPLICACIÓN Debido a dispersión, la luz en el extremo violeta del espectro muestra un mayor ángulo de refracción al entrar al vidrio que la luz en el extremo rojo. Todos los colores de la luz regresan a su dirección de propagación original conforme se refractan de vuelta hacia el aire. Como resultado, el haz saliente es blanco. Sin embargo, el corrimiento neto en la posición de la luz violeta a lo largo del borde de la losa es mayor que el corrimiento de la luz roja, de modo que un borde del haz saliente tiene un matiz azulado (parece azul en lugar de violeta porque el ojo no es muy sensible a la luz violeta), mientras que el otro borde tiene un matiz rojizo. Este efecto se indica en la figura 22.17. Los bordes coloridos del haz saliente de luz blanca son evidencia de dispersión. ■

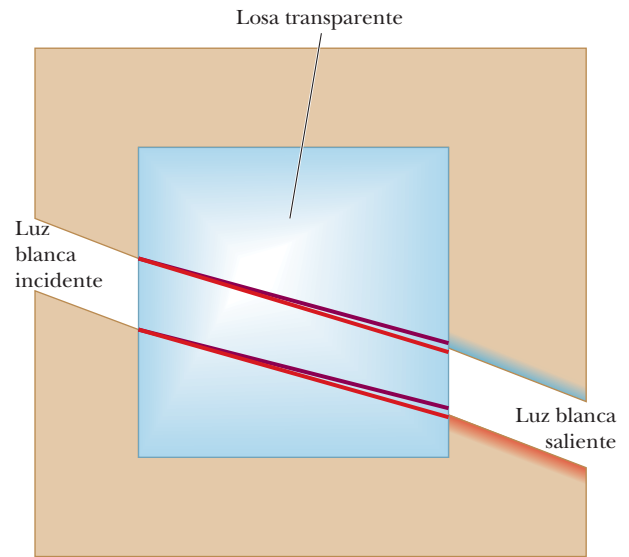


Figura 22.17 (Física aplicada 22.3)

■ EJEMPLO 22.5 Luz a través de un prisma

OBJETIVO Calcular las consecuencias de la dispersión.

PROBLEMA Un haz de luz incide sobre un prisma de cierto vidrio en un ángulo de $\theta_1 = 30.0^\circ$, como se muestra en la figura 22.18. Si el índice de refracción del vidrio para luz violeta es 1.80, encuentre **a)** θ_2 , el ángulo de refracción en la interfaz aire-vidrio, **b)** ϕ_2 , el ángulo de incidencia en la interfaz vidrio-aire y **c)** ϕ_1 , el ángulo de refracción cuando la luz violeta sale del prisma. **d)** ¿Cuál es el valor de Δy , la cantidad que se desplaza verticalmente la luz violeta?

ESTRATEGIA Este problema requiere la ley de Snell para encontrar los ángulos de refracción y algo de geometría y trigonometría elemental con base en la figura 22.18.

SOLUCIÓN

a) Encuentre θ_2 , el ángulo de refracción en la interfaz aire-vidrio.

Use la ley de Snell para encontrar el primer ángulo de refracción:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow (1.00) \sin 30.0 = (1.80) \sin \theta_2$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{0.500}{1.80}\right) = 16.1^\circ$$

b) Encuentre ϕ_2 , el ángulo de incidencia en la interfaz vidrio-aire.

Calcule el ángulo β :

$$\beta = 30.0^\circ - \theta_2 = 30.0^\circ - 16.1^\circ = 13.9^\circ$$

Calcule el ángulo α a partir del hecho de que la suma de los ángulos interiores de un triángulo es igual a 180° :

$$180^\circ = 13.9^\circ + 90^\circ + \alpha \rightarrow \alpha = 76.1^\circ$$

El ángulo incidente ϕ_2 en la interfaz vidrio-aire es complementario a α :

$$\phi_2 = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 76.1^\circ = 13.9^\circ$$

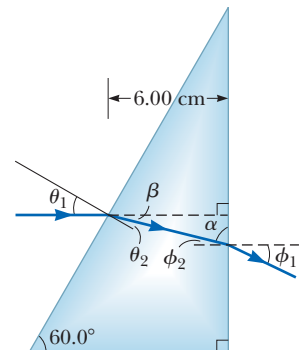


Figura 22.18 (Ejemplo 22.5)

(continúa)

c) Encuentre ϕ_1 , el ángulo de refracción cuando la luz violeta sale del prisma.

Aplique la ley de Snell:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \text{sen}^{-1} \left[\frac{n_2 \text{sen } \phi_2}{n_1} \right] \\ &= \text{sen}^{-1} [(1.80) \text{sen } 13.9^\circ] = 25.6^\circ \end{aligned}$$

d) ¿Cuál es el valor de Δy , la cantidad que se desplaza verticalmente la luz violeta?

Use la función tangente para encontrar el desplazamiento vertical:

$$\begin{aligned} \tan \beta &= \frac{\Delta y}{\Delta x} \rightarrow \Delta y = \Delta x \tan \beta \\ \Delta y &= (6.00 \text{ cm}) \tan (13.9^\circ) = 1.48 \text{ cm} \end{aligned}$$

COMENTARIOS El mismo cálculo para luz roja se deja como ejercicio. La luz violeta se desvía más y se desplaza más lejos por la cara del prisma. Observe que un teorema en geometría acerca de las líneas paralelas y los ángulos creados por una línea transversal produce inmediatamente $\phi_2 = \beta$, lo que habría ahorrado algo de cálculo. Sin embargo, en general, esta táctica puede no estar disponible.

PREGUNTA 22.5 Al pasar a través de un prisma, ¿la luz amarilla se desviará a través de un ángulo mayor o un ángulo menor que la luz violeta? a) La luz amarilla se desvía en un ángulo mayor. b) La luz amarilla se desvía en un ángulo menor. c) Los ángulos son los mismos.

EJERCICIO 22.5 Repita los incisos de la a) a la d) del ejemplo para luz roja que pasa a través del prisma, dado que el índice de refracción para luz roja es 1.72.

RESPUESTAS a) 16.9° b) 13.1° c) 22.9° d) 1.40 cm

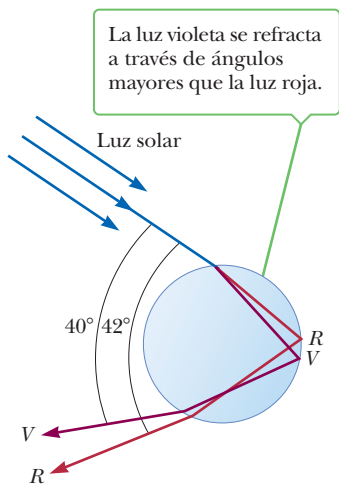


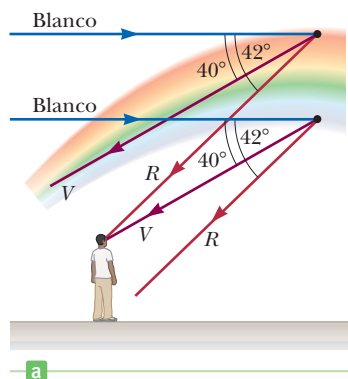
Figura activa 22.19 Refracción de la luz solar por una gota de lluvia esférica.

Figura 22.20 a) La formación de un arco iris vista por un observador de espaldas al Sol. b) Esta fotografía de un arco iris muestra un distinto arco iris secundario con los colores invertidos.

22.5 El arco iris

La dispersión de la luz en un espectro se demuestra más vívidamente en la naturaleza mediante la formación de un arco iris, que con frecuencia es visto por un observador colocado entre el Sol y una lluvia. Para entender cómo se forma un arco iris, considere la figura activa 22.19. Un rayo de luz que pasa por arriba golpea una gota de agua en la atmósfera y se refracta y refleja del modo siguiente: primero se refracta en la superficie frontal de la gota y la luz violeta se desvía más y la luz roja menos. En la superficie posterior de la gota, la luz se refleja y regresa a la superficie frontal, donde de nuevo experimenta refracción conforme se mueve del agua al aire. Los rayos salen de la gota de modo que el ángulo entre la luz blanca incidente y el rayo violeta de regreso es 40° y el ángulo entre la luz blanca y el rayo rojo de regreso es 42° . Esta pequeña diferencia angular entre los rayos de regreso hace que vea el arco como se explica en el siguiente párrafo.

Ahora considere a un observador que ve un arco iris, como en la figura 22.20a. Si observa una gota de lluvia en lo alto del cielo, la luz roja que regresa de la gota puede llegar al observador porque se desvía más, pero la luz violeta pasa sobre el observador porque se



desvía menos. Por lo tanto, el observador ve esta gota como roja. De igual modo, una gota baja en el cielo dirigiría la luz violeta hacia el observador y parecería ser violeta. (La luz roja de esta gota golpearía el suelo y no se vería.) Los colores restantes del espectro llegarían al observador desde las gotas de lluvia que yacen entre estas dos posiciones extremas. La figura 22.20b muestra un hermoso arco iris y un arco iris secundario con sus colores invertidos.

22.6 Principio de Huygens

Las leyes de reflexión y refracción se pueden deducir usando un método geométrico propuesto por Huygens en 1678. Huygens supuso que la luz es una forma de movimiento ondulatorio en lugar de una corriente de partículas. Él no tenía conocimiento de la naturaleza de la luz o de su carácter electromagnético. No obstante, su modelo ondulatorio simplificado es adecuado para comprender muchos aspectos prácticos de la propagación de la luz.

El principio de Huygens es una construcción geométrica para determinar en algún instante la posición de un nuevo frente de onda a partir del conocimiento del frente de onda que lo precedió. (Un frente de onda es una superficie que pasa a través de aquellos puntos de una onda que tienen la misma fase y amplitud. Por ejemplo, un frente de onda podría ser una superficie que pase a través de las crestas de ondas.) En la construcción de Huygens, **todos los puntos sobre un frente de onda dado se toman como fuentes puntuales para la producción de ondas secundarias esféricas, llamadas wavelets, que se propagan en la dirección hacia adelante con velocidades características de ondas en dicho medio. Después de transcurrido cierto tiempo, la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a las onditas.**

La figura 22.21 ilustra dos ejemplos simples de la construcción de Huygens. Primero, considera una onda plana que se mueve a través del espacio libre, como en la figura 22.21a. En $t = 0$, el frente de onda se indica mediante el plano marcado AA' . En la construcción de Huygens, cada punto sobre este frente de onda se considera una fuente puntual. Por claridad, sólo se muestran algunos puntos sobre AA' . Con estos puntos como fuentes para las wavelets, se dibujan circunferencias de radio $c \Delta t$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío y Δt es el periodo de propagación desde un frente de onda hasta el siguiente. La superficie que se dibuja tangente a estas wavelets es el plano BB' , que es paralelo a AA' . En forma similar, la figura 22.21b muestra la construcción de Huygens para una onda esférica saliente.

◀ Principio de Huygens

Principio de Huygens aplicado a reflexión y refracción

Las leyes de reflexión y refracción se establecieron previamente en el capítulo sin una demostración. Ahora se deducen estas leyes con el principio de Huygens. La figura 22.22a (página 776) ilustra la ley de reflexión. La línea AA' representa un frente de onda de la luz incidente. Conforme el rayo 3 viaja de A' a C , el rayo 1 se refleja de A y produce una wavelet esférica de radio AD . (Recuerde que el radio de una wavelet de Huygens es $v \Delta t$.)

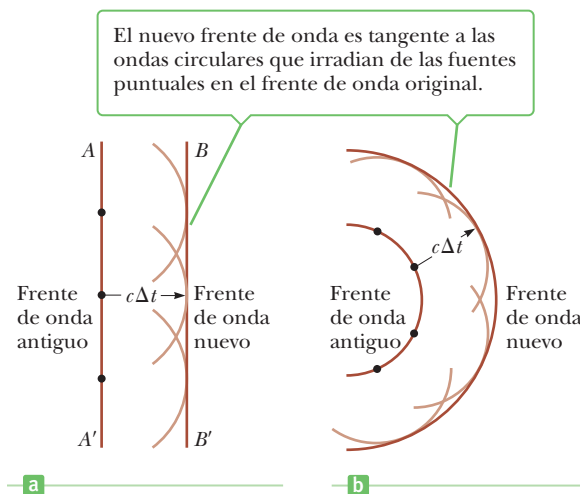
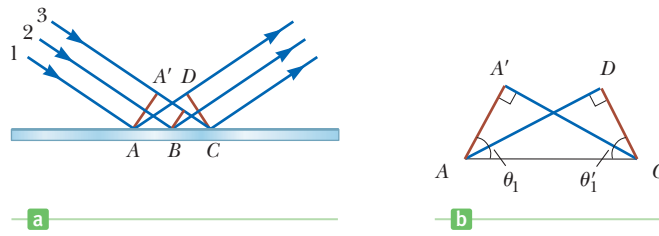


Figura 22.21 Construcción de Huygens para a) una onda plana que se propaga hacia la derecha y b) una onda esférica.

Figura 22.22 a) Construcción de Huygens para probar la ley de reflexión. b) El triángulo ADC es congruente con el triángulo $AA'C$.



Puesto que las dos wavelets que tienen radios $A'C$ y AD están en el mismo medio, tienen la misma velocidad v , de modo que $AD = A'C$. Mientras tanto, la wavelet esférica con centro en B se dispersó sólo la mitad que una con centro en A porque el rayo 2 golpea la superficie más tarde que el rayo 1.

A partir del principio de Huygens, se encuentra que el frente de onda reflejado es CD , una línea tangente a todas las wavelets esféricas salientes. El resto del análisis depende de geometría, como se resume en la figura 22.22b. Observe que los triángulos rectos ADC y $AA'C$ son congruentes porque tienen la misma hipotenusa, AC , y porque $AD = A'C$. A partir de la figura, se tiene

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{A'C}{AC} \quad \text{y} \quad \text{sen } \theta'_1 = \frac{AD}{AC}$$

Los lados derechos de ambas ecuaciones son iguales, así que $\text{sen } \theta = \text{sen } \theta'_1$, por lo que $\theta_1 = \theta'_1$, que es la ley de reflexión.

El principio de Huygens y la figura 22.23a se pueden usar para deducir la ley de refracción de Snell. En el intervalo de tiempo Δt , el rayo 1 se mueve de A a B , y el rayo 2 se mueve de A' a C . El radio de la wavelet esférica saliente con centro en A es igual a $v_2 \Delta t$. La distancia $A'C$ es igual a $v_1 \Delta t$. Consideraciones geométricas muestran que el ángulo $A'AC$ es igual a θ_1 y el ángulo ACB es igual a θ_2 . A partir de los triángulos $AA'C$ y ACB , tenemos que

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{v_1 \Delta t}{AC} \quad \text{y} \quad \text{sen } \theta_2 = \frac{v_2 \Delta t}{AC}$$

Si divide la primera ecuación entre la segunda, obtiene

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Sin embargo, a partir de la ecuación 22.4, sabemos que $v_1 = c/n_1$ y $v_2 = c/n_2$. Por lo tanto,

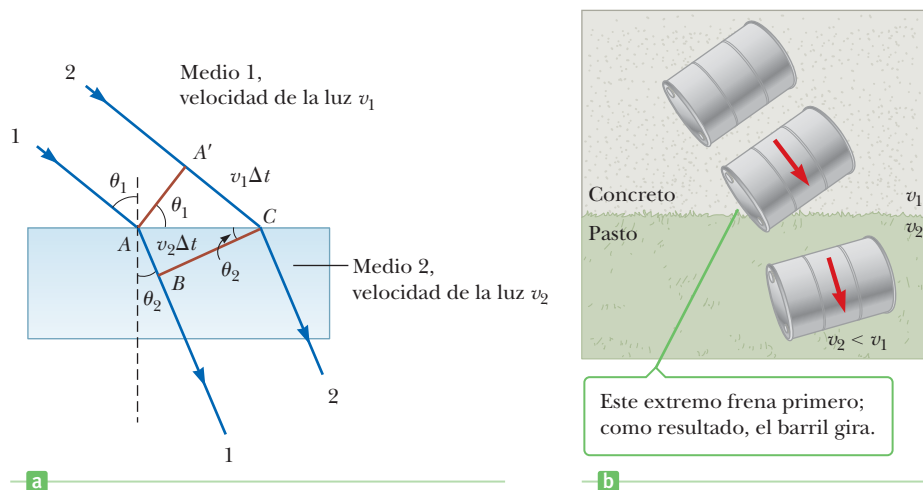
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

y tenemos que

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

que es la ley de refracción.

Figura 22.23 a) Construcción de Huygens para probar la ley de refracción. b) Vista superior de un barril que rueda de concreto que pasto.



Este extremo frena primero; como resultado, el barril gira.

En la figura 22.23b se muestra una analogía mecánica de la refracción. Cuando el extremo izquierdo del barril rodante llega al pasto, frena, mientras que el extremo derecho permanece sobre el concreto y se mueve con su velocidad original. Esta diferencia en velocidades hace que el barril pivotee y cambie la dirección de su movimiento.

22.7 Reflexión interna total

Un interesante efecto, llamado *reflexión interna total*, puede ocurrir cuando la luz encuentra la frontera entre un medio con un índice de refracción *mayor* y uno con un índice de refracción *menor*. Considere un haz de luz que viaja en el medio 1 y encuentra la frontera entre el medio 1 y el medio 2, donde n_1 es mayor que n_2 (figura activa 22.24). Las posibles direcciones del haz se indican mediante los rayos del 1 al 5. Observe que los rayos refractados se doblan alejándose de la normal porque n_1 es mayor que n_2 . En algún ángulo particular de incidencia θ_c , llamado **ángulo crítico**, el rayo de luz refractado se mueve paralelo a la frontera, de modo que $\theta_2 = 90^\circ$ (figura activa 22.24b). *Para ángulos de incidencia mayores que θ_c , el haz se refleja por completo en la frontera, como el rayo 5 en la figura activa 22.24a.* Este rayo se refleja como si hubiese golpeado una superficie perfectamente reflectante. Este y todos los rayos como él obedecen la ley de reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Es posible usar la ley de Snell para encontrar el ángulo crítico. Cuando $\theta_1 = \theta_c$ y $\theta_2 = 90^\circ$, la ley de Snell (ecuación 22.8) produce

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{para } n_1 > n_2$$

[22.9]

La ecuación 22.9 se puede usar sólo cuando n_1 es mayor que n_2 porque **la reflexión interna total sólo ocurre cuando la luz intenta moverse de un medio de mayor índice de refracción a un medio de menor índice de refracción**. Si n_1 fuese menor que n_2 , la ecuación 22.9 daría $\sin \theta_c > 1$, que es un resultado absurdo porque el seno de un ángulo nunca puede ser mayor que 1.

Cuando el medio 2 es aire, el ángulo crítico es pequeño para sustancias con índice de refracción grande, como el diamante, donde $n = 2.42$ y $\theta_c = 24.0^\circ$. En comparación, para



Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman

Esta fotografía muestra rayos de luz no paralelos que entran a un prisma de vidrio. Los dos rayos inferiores experimentan reflexión interna total en el lado más largo del prisma. Los tres rayos superiores se refractan en el lado más largo conforme salen del prisma.

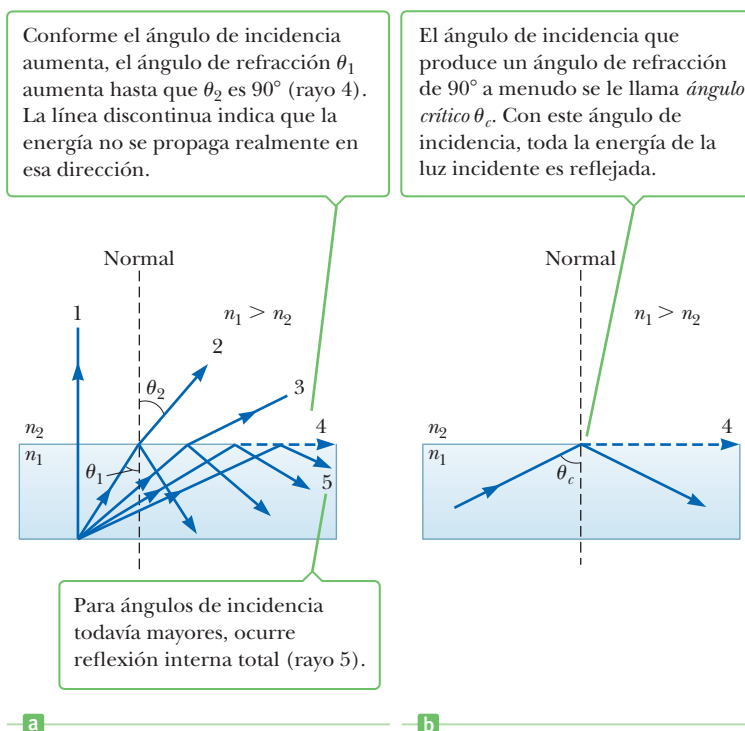
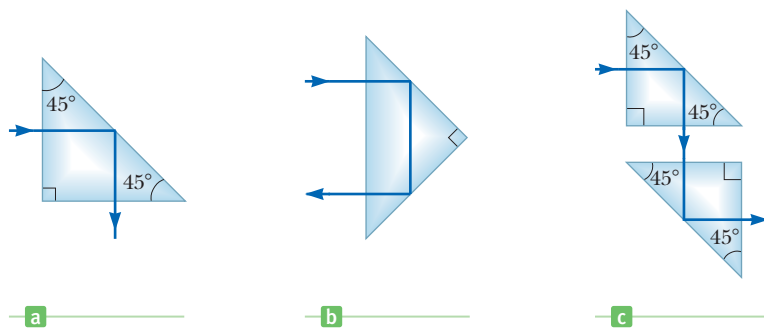


Figura activa 22.24

a) Rayos de un medio con índice de refracción n_1 viajan hacia un medio con índice de refracción n_2 , donde $n_1 > n_2$. b) El rayo 4 está señalado.

Figura 22.25 Reflexión interna en un prisma. a) El rayo se desvía 90° . b) La dirección del rayo se invierte. c) Dos prismas usados como periscopio.



vidrio corona, $n = 1.52$ y $\theta_c = 41.0^\circ$. Esta propiedad, combinada con el pulido de caras adecuado, hace que un diamante produzca chispas brillantes.

APLICACIÓN

Periscopios de submarinos

Un prisma y el fenómeno de reflexión interna total pueden alterar la dirección de viaje de un haz de luz. La figura 22.25 ilustra dos de tales posibilidades. En un caso el haz de luz se desvía 90.0° (figura 22.25a) y en el segundo caso la trayectoria del haz se invierte (figura 22.25b). Una aplicación común de la reflexión interna total es un periscopio submarino. En este dispositivo, dos prismas se ordenan como en la figura 22.25c, de modo que un haz de luz incidente sigue la trayectoria que se muestra y el usuario puede “ver a la vuelta de la esquina”.

■ FÍSICA APLICADA 22.4 Reflexión interna total y dispersión

Un haz de luz blanca incide sobre el borde curvo de un trozo de vidrio semicircular, como se muestra en la figura 22.26. La luz entra a la superficie curva a lo largo de la normal, de modo que no muestra refracción. Encuentra el lado recto del vidrio en el centro de curvatura del lado curvo y se refracta al aire. El haz incidente se mueve en sentido de las manecillas

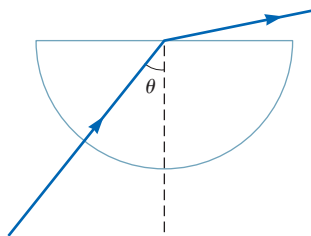


Figura 22.26 (Física aplicada 22.4)

del reloj (de modo que el ángulo θ aumenta) tal que el haz siempre entra a lo largo de la normal al lado curvo y encuentra el lado recto en el centro de curvatura del lado curvo. ¿Por qué el haz refractado se vuelve más rojo conforme se aproxima a una dirección paralela al lado recto?

EXPLICACIÓN Cuando el haz saliente se aproxima a la dirección paralela al lado recto, el ángulo incidente tiende al ángulo crítico para reflexión interna total. La dispersión ocurre conforme la luz sale del vidrio. El índice de refracción para la luz en el extremo violeta del espectro visible es mayor que en el extremo rojo, conforme el haz saliente se aproxima al lado recto, la luz violeta experimenta reflexión interna total, seguida por los otros colores. La luz roja es la última en experimentar reflexión interna total, así que, justo antes de que desaparezca la luz saliente, está compuesta de luz proveniente del extremo rojo del espectro visible. ■

■ EJEMPLO 22.6 Vista a ojo de pez

OBJETIVO Aplicar el concepto de reflexión interna total.

PROBLEMA a) Encuentre el ángulo crítico para una frontera agua-aire. b) Use el resultado del inciso a) para predecir lo que verá un pez (figura 22.27) si mira hacia arriba, a la superficie del agua, a ángulos de 40.0° , 48.6° y 60.0° .

ESTRATEGIA Después de encontrar el ángulo crítico por sustitución, úselo en la trayectoria de un rayo de luz que sea reversible: a un ángulo dado, a dondequiera que vaya un haz de luz también es de donde puede provenir un haz de luz, a lo largo de la misma trayectoria.

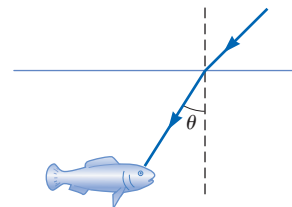


Figura 22.27 (Ejemplo 22.6) Un pez mira hacia arriba, hacia la superficie del agua.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el ángulo crítico para una frontera agua-aire.

Sustituya en la ecuación 22.9 para encontrar el ángulo crítico:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.00}{1.333} = 0.750$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}(0.750) = 48.6^\circ$$

b) Prediga qué verá un pez si mira hacia arriba a la superficie del agua a ángulos de 40.0° , 48.6° y 60.0° .

A un ángulo de 40.0° , un haz de luz desde abajo del agua se refractará en la superficie y entrará al aire sobre ella. Dado que la trayectoria de un rayo de luz es reversible (la ley de Snell funciona tanto de ida como de vuelta), la luz desde arriba puede seguir la misma trayectoria y el pez la puede percibir. A un ángulo de 48.6° , el ángulo crítico para el agua, la luz proveniente de abajo del agua se dobla de modo que viaja a lo

largo de la superficie. De modo que la luz que sigue la misma trayectoria en reversa puede llegar al pez sólo si pasa rozando la superficie del agua antes de refractarse hacia el ojo del pez. A ángulos mayores que el ángulo crítico de 48.6° , un haz de luz que se dispare hacia la superficie se reflejará por completo hacia el fondo del estanque. Al invertir la trayectoria, el pez ve un reflejo de algún objeto en el fondo.

PREGUNTA 22.6 Si el agua se sustituye con un fluido transparente con un mayor índice de refracción, ¿el ángulo crítico de la frontera fluido-aire es a) mayor, b) menor o, c) el mismo que para el agua?

EJERCICIO 22.6 Suponga que una capa de aceite, con $n = 1.50$, recubre la superficie del agua. ¿Cuál es el ángulo crítico para la reflexión interna total para luz que viaja en la capa de aceite y encuentra la frontera aceite-agua?

RESPUESTA 62.7°

Fibras ópticas

Otra interesante aplicación de la reflexión interna total es el uso de barras de vidrio sólido o plástico transparente como “tuberías” de luz de un lugar a otro. Como se indica en la figura 22.28, la luz está confinada a viajar dentro de las barras, incluso alrededor de curvas suaves, como resultado de sucesivos reflejos internos. Tal tubería de luz puede ser bastante flexible si se usan fibras delgadas en lugar de barras gruesas. Si se utiliza un haz de fibras paralelas para construir una línea de transmisión óptica, las imágenes se pueden transferir de un punto a otro.

En estas fibras se pierde muy poca luz como resultado de los reflejos en los lados. Cualquier pérdida de intensidad se debe en esencia a reflejos desde los dos extremos y la absorción mediante el material de la fibra. Los dispositivos de fibra óptica son particularmente útiles para ver imágenes producidas en lugares inaccesibles. Los médicos con frecuencia usan cables de fibra óptica para auxiliarse en el diagnóstico y corrección de ciertos problemas médicos sin la intrusión de cirugía mayor. Por ejemplo, un cable de fibra óptica se puede introducir a través del esófago y hacia el estómago para observar úlceras. En esta aplicación el cable consiste en dos líneas de fibra óptica: una para transmitir un haz de luz hacia el estómago para iluminación y el otro para permitir que la luz se transmita afuera del estómago. La imagen resultante, en algunos casos, la puede ver directamente el médico, pero con más frecuencia se despliega en un monitor de televisión o se guarda en formato digital. En forma similar, los cables de fibra óptica se pueden usar para examinar el colon o para ayudar a los médicos a realizar cirugía sin necesidad de grandes incisiones.

El campo de las fibras ópticas revolucionó toda la industria de las comunicaciones. En Estados Unidos se han instalado miles de millones de kilómetros de fibra óptica para transmitir tráfico en Internet de alta velocidad, señales de radio y televisión, y llamadas de teléfonos. Las fibras pueden portar volúmenes mucho más altos de llamadas telefónicas y otras formas de comunicación que los alambres eléctricos, debido a la mayor frecuencia de luz infrarroja que usan para transmitir la información en las fibras ópticas. Las fibras ópticas también son preferibles a los alambres de cobre porque son aislantes y no recogen campos eléctricos y magnéticos parásitos o “ruido” electrónico.

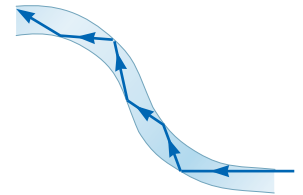


Figura 22.28 Luz que viaja en una barra transparente curva mediante múltiples reflejos internos.

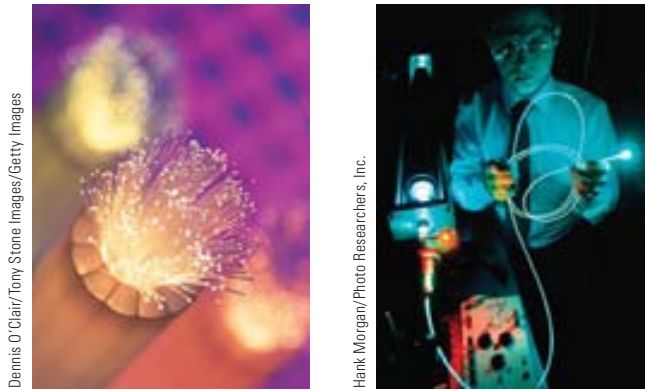
BIO APLICACIÓN

Fibras ópticas en diagnóstico médico y cirugía

APLICACIÓN

Fibras ópticas en telecomunicaciones

(Izquierda) Hebras de fibras ópticas de vidrio que se usan para transmitir señales de voz, video y datos en redes de telecomunicación.
 (Derecha) Haz de fibras ópticas iluminadas mediante un láser.



Dennis O'Clair/Tony Stone Images/Getty Images

Hank Morgan/Photo Researchers, Inc.

■ FÍSICA APLICADA 22.5 Diseño de una fibra óptica

Una fibra óptica consta de un núcleo transparente rodeado por un revestimiento, que es un material con un índice de refracción más bajo que el núcleo (figura 22.29). Un cono de ángulos, llamado cono de aceptación, está a la entrada de la fibra. La luz que entra a ángulos dentro de este cono se

transmitirá a través de la fibra, mientras que la luz que entra al núcleo desde ángulos fuera del cono no se transmitirá. La figura muestra un rayo de luz que entra a la fibra justo dentro del cono de aceptación y experimenta reflexión interna total en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento. Si tecnológicamente es difícil producir luz de modo que entre a la fibra desde un pequeño rango de ángulos, ¿cómo podría usted ajustar los índices de refracción del núcleo y el revestimiento para aumentar el tamaño del cono de aceptación? ¿Diseñaría los índices para que estuvieran más separados o más juntos?

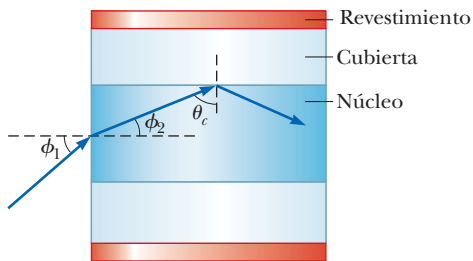


Figura 22.29 (Física aplicada 22.5)

EXPLICACIÓN El cono de aceptación se volvería más grande si el ángulo crítico (θ_c en la figura) se pudiera hacer más pequeño. Este ajuste se puede realizar al hacer que el índice de refracción del material de revestimiento sea menor, de modo que los índices de refracción del núcleo y el material de revestimiento estén más separados. ■

■ RESUMEN

22.1 La naturaleza de la luz

La luz tiene una naturaleza dual. En algunos experimentos actúa como una onda, en otros como partícula, llamada fotón por Einstein. La energía de un fotón es proporcional a su frecuencia,

$$E = hf \quad [22.1]$$

donde $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ es la *constante de Planck*.

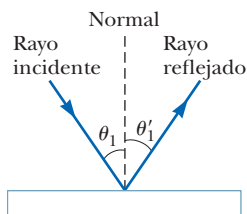
La luz que pasa hacia un medio transparente se desvía en la frontera y se dice que se *refracta*. El ángulo de refracción es el ángulo que el rayo forma con respecto a una línea perpendicular a la superficie después de que entra al nuevo medio.

22.2 Reflexión y refracción

En la reflexión de la luz de una superficie lisa plana, el ángulo de incidencia, θ_1 , con respecto a una línea perpendicular a la superficie es igual al ángulo de reflexión, θ_1' :

$$\theta_1' = \theta_1 \quad [22.2]$$

▮ Onda bajo el modelo de reflexión. ▮

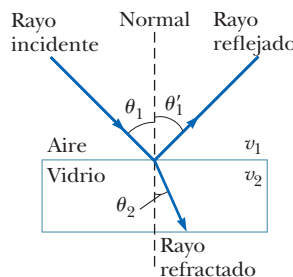


22.3 La ley de refracción

El **índice de refracción** de un material, n , se define como

$$n = \frac{c}{v} \quad [22.4]$$

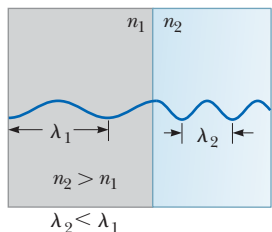
▮ Onda bajo el modelo de refracción. ▮



donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el material. El índice de refracción de un material también es

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} \quad [22.7]$$

donde λ_0 es la longitud de onda de la luz en el vacío y λ_n es su longitud de onda en el material.



Al entrar en un material con un mayor índice de refracción, la longitud de onda de la luz se reduce.

La ley de refracción, o ley de Snell, afirma que

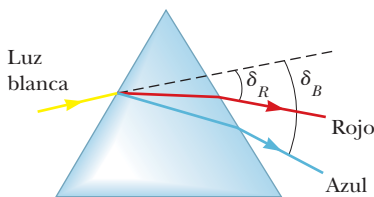
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad [22.8]$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción en los dos medios. El rayo incidente, el rayo reflejado, el rayo refractado y la normal a la superficie se encuentran todos en el mismo plano.

22.4 Dispersión y prismas

22.5 El arco iris

El índice de refracción de un material depende de la longitud de onda de la luz incidente, un efecto llamado *dispersión*. La luz en el extremo violeta del espectro muestra un mayor ángulo de refracción al entrar en vidrio que la luz en el extremo rojo. Los arco iris son consecuencia de la dispersión.



Debido a la dispersión, la luz azul se inclina más que la luz roja.

22.6 Principio de Huygens

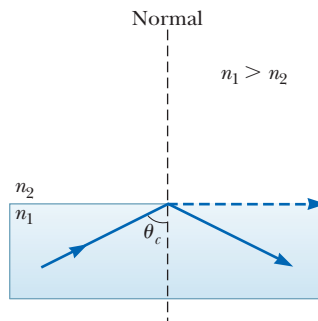
El **principio de Huygens** afirma que todos los puntos sobre un frente de onda son fuentes puntuales para la producción de ondas secundarias esféricas llamadas wavelets. Éstas se propagan hacia adelante con una velocidad característica de ondas en un medio particular. Después de transcurrido cierto tiempo, la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a las wavelets. Este principio se puede usar para deducir las leyes de reflexión y refracción.

22.7 Reflexión interna total

Cuando la luz se propaga en un medio con índice de refracción n_1 e incide sobre la frontera de un material con un índice de refracción n_2 , $n_1 > n_2$, entonces la reflexión interna total puede ocurrir si el ángulo de incidencia es igual o mayor que el **ángulo crítico** θ_c dado por

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2) \quad [22.9]$$

La reflexión interna total se usa en las fibras ópticas que portan datos a alta velocidad alrededor del mundo.



Un rayo se somete a la reflexión interna en ángulo igual o mayor que el ángulo crítico.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una fuente de luz monocromática emite una longitud de onda de 495 nm en aire. Cuando pasa a través de un líquido, la longitud de onda se reduce a 434 nm. ¿Cuál es el índice de refracción del líquido? a) 1.26 b) 1.49 c) 1.14 d) 1.33 e) 2.03
- En un contenedor de vidrio corona ($n = 1.52$) se vierte disulfuro de carbono ($n = 1.63$). ¿Cuál es el ángulo crítico para reflexión interna de un rayo en el líquido cuando incide sobre la superficie líquido-vidrio? a) 89.2° b) 68.8° c) 21.7° d) 1.07° e) 43.0°
- ¿Cuántos fotones de 800 nm se requieren para tener la misma energía total que cuatro fotones de 200 nm? a) 1 b) 2 c) 4 d) 8 e) 16
- Un rayo de luz viaja a través de dos placas paralelas con diferentes índices de refracción como en la figura POM22.4.

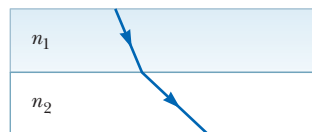


Figura POM22.4

Los rayos que se muestran son sólo los rayos refractados. ¿Cuál de las siguientes opciones es verdadera con respecto al tamaño relativo de los índices de refracción? a) $n_1 \geq n_2$ b) $n_1 \leq n_2$ c) $n_1 = n_2$ d) $n_1 > n__2$ e) $n_1 < n_2$

5. La luz que viaja en un medio con índice de refracción n_1 incide sobre otro medio que tiene un índice de refracción n_2 . ¿Bajo cuáles de las siguientes condiciones puede ocurrir reflexión total en la interfaz de los dos medios? a) Los índices de refracción tienen la relación $n_2 > n_1$ b) Los índices de refracción tienen la relación $n_1 > n_2$ c) La luz viaja más lento en el segundo medio que en el primero. d) El ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico. e) El ángulo de incidencia debe ser igual al ángulo de refracción.
6. La luz puede viajar de aire a agua o de agua a aire, con algunas trayectorias posibles, como se muestra en la figura POM22.6. ¿Cuál trayectoria es más probable que siga la luz? a) A b) B c) C d) D e) E

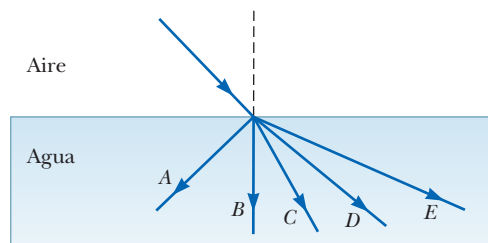


Figura POM22.6

7. El índice de refracción del agua es aproximadamente $4/3$. ¿Qué sucede con la luz cuando viaja de aire a agua? a) Su velocidad aumenta a $4c/3$ y su frecuencia disminuye. b)

Su velocidad disminuye a $3c/4$ y su longitud de onda disminuye por un factor de $4/3$. c) Su velocidad disminuye a $3c/4$ y su longitud de onda aumenta por un factor de $4/3$. d) Su velocidad y frecuencia permanecen iguales. e) Su velocidad disminuye a $3c/4$ y su frecuencia aumenta.

8. ¿Cuál color de luz se desvía más cuando entra a vidrio corona desde aire a cierto ángulo positivo θ con respecto a la normal? a) violeta b) azul c) verde d) amarillo e) rojo.
9. Un rayo de luz que contiene longitudes de onda azul y roja incide en un ángulo sobre una losa de vidrio. ¿Cuál de los bosquejos en la figura POM22.9 representa el resultado más probable? a) A b) B c) C d) D e) ninguno de éstos.

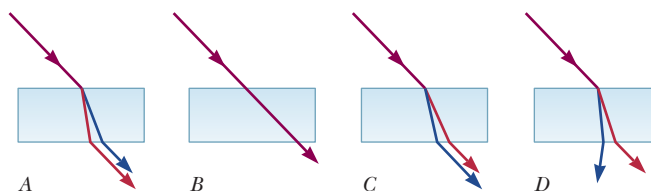


Figura POM22.9

10. Un rayo de luz viaja del vacío hacia una losa de material con índice de refracción n_1 y ángulo incidente θ . Posteriormente pasa hacia una segunda losa de material con índice de refracción n_2 antes de pasar de nuevo al vacío. Las superficies de los diferentes materiales son todas paralelas unas con otras. Conforme la luz sale de la segunda losa, ¿qué puedes decir acerca del ángulo final ϕ que la luz forma con la normal? a) $\phi > \theta$ b) $\phi < \theta$ c) $\phi = \theta$ d) El ángulo depende de las magnitudes de n_1 y n_2 . e) El ángulo depende de las longitudes de onda de la luz.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. ¿Por qué el arco de un arco iris aparece con rojo en la parte superior y violeta en la inferior?
2. Un rayo de luz se mueve de un material que tiene un índice de refracción alto a un material con un índice de refracción más bajo. a) ¿El rayo se desvía hacia la normal o se aleja de ella? b) Si la longitud es 600 nm en el material con el índice de refracción alto, ¿es mayor, menor o el mismo en el material con el índice de refracción más bajo? c) ¿Cómo cambia la frecuencia conforme la luz se mueve entre los dos materiales? ¿Aumenta, disminuye o permanece igual?
3. Un rayo de luz viaja a través de tres bloques paralelos con diferentes índices de refracción como en la figura PC22.3. Los rayos que se muestran son sólo los rayos refractados. Ordene los materiales de acuerdo con el tamaño de sus índices de refracción, de mayor a menor.

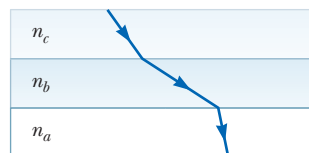


Figura PC22.3

4. ¿Bajo qué condiciones se forma un espejismo? En un día caliente, ¿qué observa cuando mira el espejismo de un charco de agua en la carretera?
5. Explique por qué un diamante pierde la mayor parte de su brillo cuando se sumerge en disulfuro de carbono.
6. Un tipo de espejismo llamado *pingo* se observa con frecuencia en Alaska. Los pingos ocurren cuando la luz de una pequeña colina pasa hacia un observador mediante

una trayectoria que toma la luz sobre un cuerpo de agua más caliente que el aire. Lo que se ve es la colina y una imagen invertida directamente bajo ella. Explique cómo se forman estos espejismos.

7. En los materiales dispersivos, el ángulo de refracción para un rayo de luz depende de la longitud de onda de la luz. ¿El ángulo de reflexión de la superficie del material depende de la longitud de onda? ¿Por qué sí o por qué no?
8. El nivel de agua en un vidrio claro incoloro puede observarse fácilmente a simple vista. El nivel de helio líquido en un contenedor de vidrio claro es extremadamente difícil ver a simple vista. Explique. *Sugerencia:* El índice de refracción del helio líquido está cerca del perteneciente al aire.
9. Suponga que se le dice que sólo dos colores de luz (X y Y) se envían a través de un prisma de vidrio y que X se dobla más que Y . ¿Cuál color viaja más lentamente en el prisma?
10. ¿Es posible tener reflexión interna total para luz incidente de aire a agua? Explique.
11. La Figura PC22.11 muestra un lápiz parcialmente sumergido en un vaso de agua. ¿Por qué el lápiz parece doblado?



Figura PC22.11

12. Haga este sencillo experimento por su cuenta. Tome dos tazas opacas, coloque una moneda en el fondo de cada taza cerca del borde, y llene una taza con agua. A continuación, vea las tazas desde un lado en algún ángulo de modo que la moneda en el agua sea apenas visible, como se muestra a la izquierda en la figura PC22.12. Tenga en cuenta que la moneda en aire no es visible, como se muestra a la derecha en la figura PC22.12. Explique esta observación.



Figura PC22.12

13. ¿Por qué los astrónomos que observan galaxias distantes hablan acerca de mirar hacia atrás en el tiempo?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

22.1 La naturaleza de la luz

1. Durante el alunizaje del Apolo XI, sobre la superficie de la Luna se erigió un panel retrorreflector. La velocidad de la luz se puede encontrar al medir el tiempo que tarda un haz láser en viajar desde la Tierra, reflejarse en el panel y regresar a la Tierra. Si este intervalo es de 2.51 s, ¿cuál es la velocidad medida de la luz? Considere que la distancia de centro a centro entre la Tierra y la Luna es de 3.84×10^8 m.

Suponga que la Luna está directamente arriba y no se desprecian los tamaños de la Tierra y la Luna.

2. CIC a) ¿Cuál es la energía en joules de un fotón de rayos X con 1.00×10^{-10} m de longitud de onda? b) Convierta la energía a electrón-volts. c) Si se desean rayos X más penetrantes, ¿la longitud de onda debe aumentar o disminuir? d) ¿La frecuencia debe aumentar o disminuir?

3. **M** Encuentre la energía de a) un fotón que tiene una frecuencia de 5.00×10^{17} Hz y b) un fotón que tiene una longitud de onda de 3.00×10^2 nm. Expresé sus respuestas en unidades de electrón-volts y observe que $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$.
4. **C/C** a) Calcule la longitud de onda de luz en vacío que tiene una frecuencia de 5.45×10^{14} Hz. b) ¿Cuál es su longitud de onda en benceno? c) Calcule la energía de un fotón de tal luz en el vacío. Expresé su respuesta en electrón-volts. d) ¿La energía del fotón cambia cuando entra al benceno? Explique.
5. Encuentre la velocidad de la luz en a) agua, b) vidrio corona y c) diamante.
6. **S** a) Encuentre una expresión simbólica para la longitud de onda λ de un fotón en términos de su energía E , constante de Planck h y la velocidad de la luz c . b) ¿Qué dice la ecuación acerca de las longitudes de onda de fotones de mayor energía?
7. Un rayo de luz viaja del aire a otro medio y forma un ángulo de $\theta_1 = 45.0^\circ$ con la normal, como en la figura P22.7. Encuentre el ángulo de refracción θ_2 si el segundo medio es a) cuarzo, b) disulfuro de carbono y c) agua.

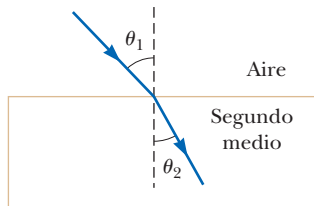


Figura P22.7

22.2 Reflexión y refracción

22.3 La ley de refracción

8. Los dos espejos en la figura P22.8 se encuentran en ángulo recto. El haz de luz en el plano vertical P golpea el espejo 1 como se muestra. a) Determine la distancia que recorre el haz de luz reflejado antes de golpear el espejo 2. b) ¿En qué dirección viaja el haz de luz después de reflejarse en el espejo 2?
9. Un buzo bajo el agua ve el Sol en un ángulo aparente de 45.0° desde la vertical. ¿Cuál es la dirección real del Sol?
10. Dos espejos planos forman un ángulo recto entre sí como se muestra en la vista lateral en la figura P22.10. Un rayo de luz incide sobre el espejo 1 en ángulo θ con la vertical. Utilizando la ley de la reflexión y la geometría, demuestre que después de que el rayo se refleja en ambos espejos, el rayo saliente se refleja paralelo al rayo incidente.

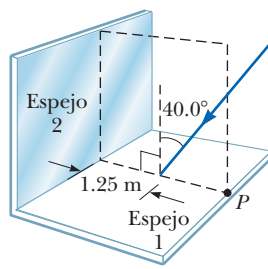


Figura P22.8

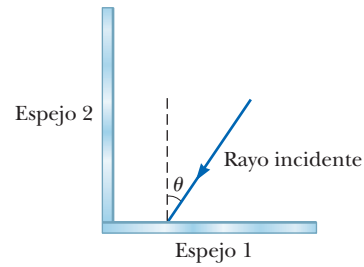


Figura P22.10

11. Un haz láser incide en un ángulo de 30.0° con la vertical en una solución de jarabe de maíz en agua. Si el haz se refracta a 19.24° con la vertical, a) ¿cuál es el índice de refracción de la solución de jarabe? Suponga que la luz es roja, con longitud de onda de 632.8 nm en el vacío. Encuentre su b) longitud de onda, c) frecuencia y d) velocidad en la solución.
12. Luz que contiene longitudes de onda de 400 , 500 y 650 nm incide desde el aire sobre un bloque de vidrio corona a un ángulo de 25.0° . a) ¿Todos los colores se refractan igual o un color se dobla más que los otros? b) Calcule el ángulo de refracción en cada caso para verificar su respuesta.
13. Un rayo de luz incide sobre la superficie de un bloque de hielo claro a un ángulo de 40.0° con la normal. Parte de la luz se refleja y parte se refracta. Encuentre el ángulo entre la luz reflejada y refractada.
14. Dos espejos planos forman un ángulo $\theta_1 = 50.0^\circ$ entre sí como se muestra en la vista lateral en la figura P22.14. Si un rayo horizontal incide en el espejo 1, ¿con qué ángulo θ_2 el rayo saliente se refleja en la superficie del espejo 2?
15. La luz que emite un láser helio-neón tiene una longitud de onda de 632.8 nm en aire. Conforme la luz viaja de aire a circonio, determine su a) velocidad, b) longitud de onda y c) frecuencia, todo en el circonio.

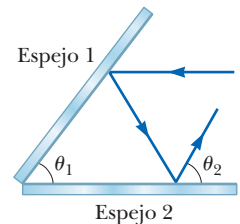


Figura P22.14

16. La figura P22.16 muestra un rayo de luz que viaja en una losa de vidrio corona rodeada por aire. El rayo incide sobre superficie recta en un ángulo de 55° con la normal y luego se refleja en los puntos A , B y C . a) ¿En cuál de estos puntos parte del rayo entra al aire? b) Si la losa de cristal está rodeada de disulfuro de carbono, ¿en qué punto parte del rayo entra en el disulfuro de carbono?
17. ¿Cuántas veces el haz incidente que se muestra en la figura P22.17 se reflejará en cada uno de los espejos paralelos?

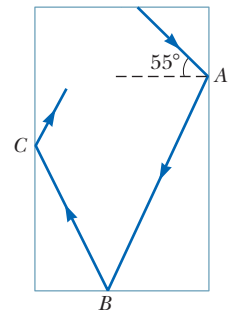


Figura P22.16

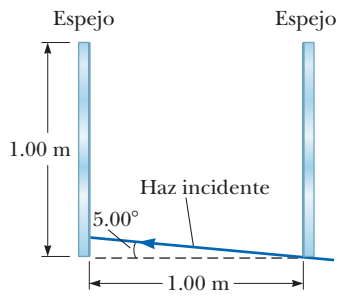


Figura P22.17

18. **CIC** Un rayo de luz golpea un bloque plano de vidrio ($n = 1.50$), de 2.00 cm de grosor, en un ángulo de 30.0° con respecto a la normal (figura P22.18). a) Encuentre el ángulo de refracción en la superficie superior. b) Encuentre el ángulo de incidencia en la superficie inferior y el ángulo refractado. c) Encuentre la distancia lateral d por el que se corre el haz de luz. d) Calcule la velocidad de la luz en el vidrio y e) el tiempo requerido para que la luz pase a través del bloque de vidrio. f) ¿El ángulo de incidencia afecta el tiempo de viaje a través del bloque? Explique.

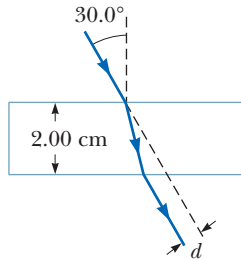


Figura P22.18

19. **M** El haz de luz que se muestra en la figura P22.19 forma un ángulo de 20.0° con la línea normal NN' en el aceite de linaza. Determine los ángulos θ y θ' . (El índice de refracción para el aceite de linaza es 1.48.)

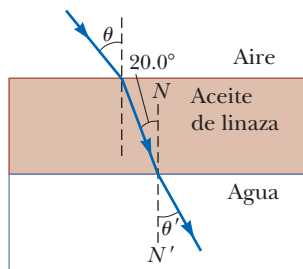


Figura P22.19

20. Un haz láser incide sobre un prisma de $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ perpendicular a una de sus caras, como se muestra en la figura P22.20. El haz transmitido que sale por la hipotenusa del prisma forma un ángulo $\theta = 15^\circ$ con la dirección del haz incidente. Encuentre el índice de refracción del prisma.

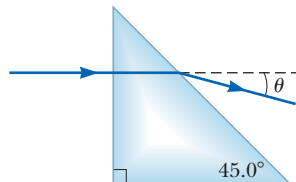


Figura P22.20

21. Un bloque de vidrio corona se sumerge en agua como en la figura P22.21. Un rayo de luz incide sobre la cara superior con un ángulo de $\theta_1 = 42.0^\circ$ con la normal y sale del bloque en el punto P . a) Encuentre la distancia y vertical

desde la parte superior del bloque de P . b) Halle el ángulo de refracción θ_2 del rayo de luz al salir del bloque en P .

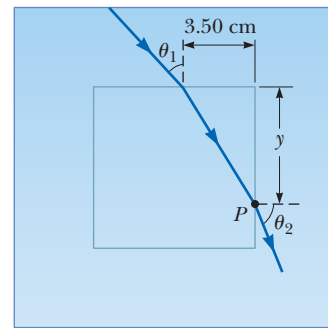


Figura P22.21

22. **BIO** Un estrecho haz de ondas ultrasónicas se refleja del tumor hepático en la figura P22.22. Si la velocidad de la onda es 10.0% menor en el hígado que en el medio circundante, determine la profundidad del tumor.

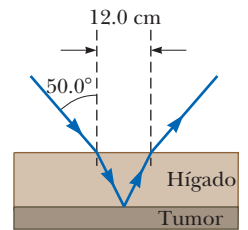


Figura P22.22

23. **S** Una persona que mira hacia un contenedor vacío puede ver el extremo lejano del fondo del contenedor, como se muestra en la figura P22.23a. La altura del contenedor es h y su ancho es d . Cuando el contenedor está completamente lleno con un fluido con índice de refracción n , la persona puede ver una moneda en medio del fondo del contenedor, como se muestra en la figura P22.23b. a) Demuestre que la razón h/d está dada por

$$\frac{h}{d} = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{4 - n^2}}$$

b) Suponiendo que el contenedor tiene un ancho de 8.0 cm y está lleno con agua, use la expresión anterior para encontrar la altura del contenedor.

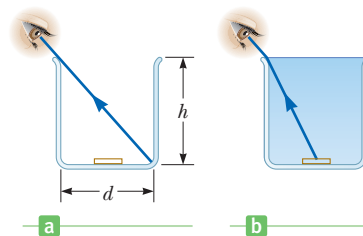


Figura P22.23

24. **PG** Un submarino está a 3.00×10^2 m horizontalmente desde la playa y 1.00×10^2 m bajo la superficie del agua. Un haz láser se envía desde el edificio de modo que el haz golpea la superficie del agua a 2.10×10^2 m de la playa. Sobre la playa hay un edificio y el haz láser golpea un blanco en la parte superior del edificio. El objetivo es

encontrar la altura del blanco sobre el nivel del mar.
 a) Dibuje un diagrama de la situación e identifique los dos triángulos que son importantes para encontrar la solución. b) Encuentre el ángulo de incidencia del haz que golpea la interfaz agua-aire. c) Encuentre el ángulo de refracción. d) ¿Qué ángulo forma el haz refractado con respecto a la horizontal? e) Encuentre la altura del blanco sobre el nivel del mar.

25. **S** Un haz de luz se refleja y refracta en la superficie entre aire y vidrio, como se muestra en la figura P22.25. Si el índice de refracción del vidrio es n_g , encuentre el ángulo de incidencia θ_1 , en el aire que resultaría en el rayo reflejado y el rayo refractado mutuamente perpendiculares. *Sugerencia:* Recuerde la identidad $\sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta$.

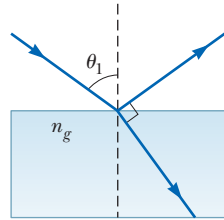


Figura P22.25

26. La figura P22.26 muestra un rayo de luz incidente en una serie de losas con distinto índice de refracción, donde $n_1 < n_2 < n_3 < n_4$. Observe que la trayectoria del rayo cada vez se inclina hacia la normal. Si la variación en n fuera continua, la trayectoria formarí una curva suave. Use esta idea y un diagrama de rayos para explicar por qué se puede ver el Sol al atardecer después de haber caído por debajo del horizonte.

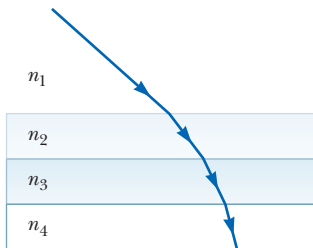


Figura P22.26 Problemas 26 y 39

27. **M** Un tanque cilíndrico opaco, con la parte superior abierta, tiene un diámetro de 3.00 m y está completamente lleno con agua. Cuando el Sol de la tarde llega en un ángulo de 28.0° sobre el horizonte, la luz solar deja de iluminar el fondo del tanque. ¿Cuán profundo es el tanque?

22.4 Dispersión y prismas

28. Cierta tipo de vidrio tiene un índice de refracción de 1.650 para luz azul de 430 nm de longitud de onda y un índice de 1.615 para luz roja de 680 nm de longitud de onda. Si un haz que contiene estos dos colores incide en un ángulo de 30.00° sobre un trozo de este vidrio, ¿cuál es el ángulo entre los dos haces dentro del vidrio?

29. El índice de refracción para luz roja en agua es 1.331 y el de la luz azul es 1.340. Si un rayo de luz blanca entra al agua en un ángulo de incidencia de 83.00° , ¿cuáles son los ángulos de refracción submarinos para los componentes a) azul y b) rojo de la luz?
30. El índice de refracción para vidrio corona es 1.512 a una longitud de onda de 660 nm (rojo), mientras que su índice

de refracción es 1.530 a una longitud de onda de 410 nm (violeta). Si ambas longitudes de onda inciden sobre una losa de vidrio corona al mismo ángulo de incidencia, 60.0° , ¿cuál es el ángulo de refracción para cada longitud de onda?

31. Un haz de luz que contiene longitudes de onda roja y violeta incide sobre una losa de cuarzo a un ángulo de incidencia de 50.00° . El índice de refracción del cuarzo es 1.455 a 660 nm (luz roja) y su índice de refracción es 1.468 a 410 nm (luz violeta). Encuentre la dispersión de la losa, que se define como la diferencia en los ángulos de refracción para las dos longitudes de onda.

32. El índice de refracción para luz violeta en vidrio de sílice es 1.66, y el de la luz roja es 1.62. ¿Cuál es la dispersión angular de la luz visible que pasa a través de un prisma equilátero con ángulo vértice de 60.0° , si el ángulo de incidencia es 50.0° ? (Véase la figura P22.32.)

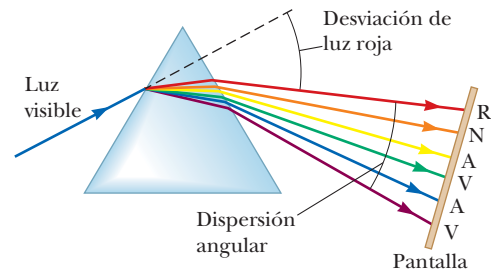


Figura P22.32

33. **M** Un rayo de luz golpea el punto medio de una cara de un prisma de vidrio ($n = 1.5$) equiangular ($60^\circ - 60^\circ - 60^\circ$) en un ángulo de incidencia de 30° . a) Trace la trayectoria del rayo de luz a través del vidrio y encuentre los ángulos de incidencia y refracción en cada superficie. b) Si una pequeña fracción de luz también se refleja en cada superficie, ¿cuáles son los ángulos de reflexión en la superficie?

22.7 Reflexión interna total

34. Para luz con longitud de onda de 589 nm, calcule los ángulos críticos para las siguientes sustancias cuando las rodea aire: a) cuarzo fundido, b) poliestireno, c) cloruro de sodio.

35. Repita el problema 34, pero esta vez suponga que el cuarzo, el poliestireno y el cloruro de sodio están rodeados con agua.

36. **M** Un haz de luz incide desde aire sobre la superficie de un líquido. Si el ángulo de incidencia es 30.0° y el ángulo de refracción es 22.0° , encuentre el ángulo crítico para el líquido cuando está rodeado por aire.

37. Una tubería plástica ligera tiene un índice de refracción de 1.53. Para reflexión interna total, ¿cuál es el ángulo de incidencia mínimo, si la tubería está en a) aire y b) agua?

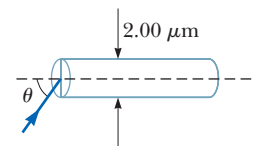


Figura P22.38

38. Determine el ángulo máximo θ para el cual los rayos de luz incidentes en el extremo de la tubería

de luz en la figura P22.38 están sujetos a reflexión interna total a lo largo de las paredes de la tubería. Suponga que la tubería de luz tiene un índice de refracción de 1.36 y el medio exterior es aire.

39. Un rayo de luz incide de manera normal a la cara larga (la hipotenusa) de un prisma $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ rodeado por aire, como se muestra en la figura 22.26b. Calcule el índice de refracción mínimo del prisma para el que el rayo se reflejará internamente de manera total en cada uno de los dos lados que forman el ángulo recto.

40. **CIC** Un haz de luz láser con longitud de onda de 612 nm se dirige a través de una losa de vidrio que tiene índice de refracción 1.78. a) ¿Para qué ángulo incidente mínimo un rayo de luz experimentaría reflexión interna total? b) Si una capa de agua se coloca sobre el vidrio, ¿cuál es el ángulo de incidencia mínimo sobre la interfaz vidrio-agua que resultará en reflexión interna total en la interfaz agua-aire? c) ¿El grosor de la capa de agua o vidrio afecta el resultado? d) ¿El índice de refracción de la capa que interviene afecta el resultado?

41. Una habitación contiene aire en la que la velocidad del sonido es 343 m/s. Las paredes de la habitación están hechas de concreto, en la cual la velocidad del sonido es 1850 m/s. a) Encuentre el ángulo crítico para la reflexión interna total del sonido en la frontera concreto-aire. b) ¿En cuál medio debe viajar el sonido para experimentar reflexión interna total? c) “Un muro de concreto desnudo es un espejo enormemente eficiente para el sonido”. Proporcione evidencia a favor o en contra de este enunciado.

42. **PG CIC** Considere un rayo de luz que viaja entre el aire y un diamante cortado en la forma mostrada en la figura P22.42. a) Encuentre el ángulo crítico para la reflexión interna total de la luz en el diamante incidente en la interfaz entre el diamante y el aire exterior. b) Considere que el rayo de luz incide normalmente en la parte superior de la superficie del diamante como se muestra en la figura P22.42. Demuestre que la luz que viaja hacia el punto P en el diamante se refleja totalmente. c) Si el diamante se sumerge en agua, encuentre el ángulo crítico en la interfase agua-diamante. d) Cuando el diamante se sumerge en agua, ¿el rayo de luz que entra en la parte superior de la superficie de la figura P22.42 se somete a la reflexión total interna en P ? Explique. e) Si el rayo de luz que entra en el diamante permanece en posición vertical como se muestra en la figura P22.42, ¿de qué manera el diamante en el agua puede girar sobre un eje perpendicular a la página a través de O , de modo que la luz salga del diamante, en P ? f) ¿A qué ángulo de rotación del diamante en el inciso e) saldrá primero la luz en el punto P ?

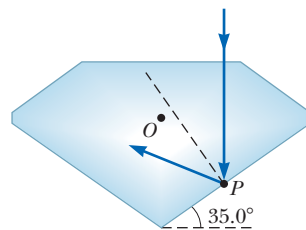


Figura P22.42

43. El haz de luz en la figura P22.43 golpea la superficie 2 en el ángulo crítico. Determine el ángulo de incidencia, θ_1 .

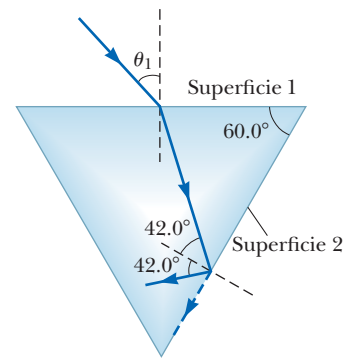


Figura P22.43

44. Un ladrón de joyas oculta un diamante al colocarlo en el fondo de una alberca pública. Coloca una balsa circular sobre la superficie del agua directamente arriba y con centro sobre el diamante, como se muestra en la figura P22.44. Si la superficie del agua está quieta y la alberca tiene 2.00 m de profundidad, encuentre el diámetro mínimo de la balsa que evitaría la visualización del diamante.

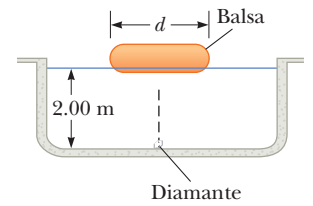


Figura P22.44

Problemas adicionales

45. Una capa de hielo, que tiene lados paralelos, flota sobre agua. Si sobre la superficie superior del hielo incide luz con un ángulo de incidencia de 30.0° , ¿cuál es el ángulo de refracción en el agua?
46. **CIC** Un rayo de luz incide con un ángulo de 30.0° sobre una losa plana de vidrio rodeada por agua. a) Encuentre el ángulo de refracción. b) Suponga que el índice de refracción del medio circundante se puede ajustar, pero el ángulo de incidencia de la luz permanece igual. Conforme el índice de refracción del medio se aproxima al del vidrio, ¿qué sucede con el ángulo de refracción? c) ¿Qué sucede con el ángulo de refracción cuando el índice de refracción del medio excede al del vidrio?
47. Cuando un hombre se encuentra cerca del borde de una zanja de drenaje vacía de una profundidad de 2.80 m, apenas puede ver el límite entre la pared de enfrente y la

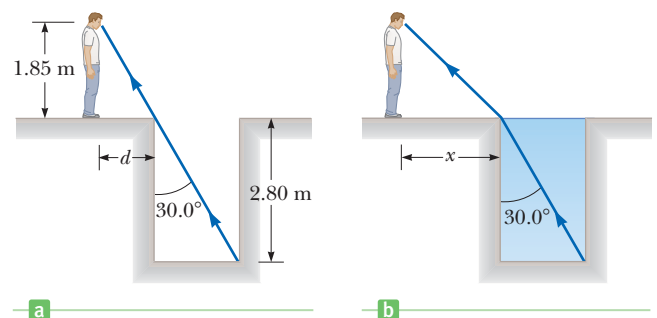


Figura P22.47

parte inferior de la zanja como en la figura P22.47a. La distancia desde sus ojos a la tierra es de 1.85 m. a) ¿Cuál es la distancia horizontal d desde el hombre hasta el borde de la zanja de drenaje? b) Después de que la zanja de drenaje es llenada con agua como en la figura P22.47b, ¿cuál es la distancia máxima x del borde a la que el hombre permanece y continúa viendo el mismo límite?

48. Un rayo de luz, con longitud de onda de 589 nm, incide con un ángulo θ sobre la superficie superior de un bloque de poliestireno rodeado por aire, como se muestra en la figura P22.48. a) Encuentre el valor máximo de θ para el cual el rayo refractado experimentará reflexión interna total en la cara vertical izquierda del bloque. b) Repita el cálculo para el caso en el cual el bloque de poliestireno se sumerja en agua. c) ¿Qué ocurre si el bloque se sumerge en disulfuro de carbono?

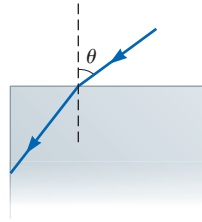


Figura P22.48

49. Como se muestra en la figura P22.49, un rayo de luz incide normal a una cara de un bloque $30^\circ-60^\circ-90^\circ$ de vidrio denso (un prisma) que está sumergido en agua. a) Determine el ángulo de salida θ_3 del rayo. b) Una sustancia se disuelve en el agua para aumentar el índice de refracción n_2 . ¿A qué valor de n_2 la reflexión interna total cesa en el punto P ?

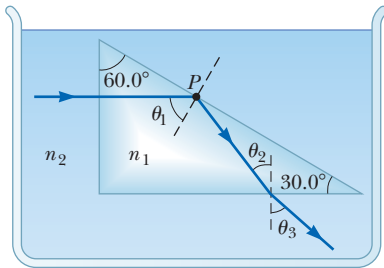


Figura P22.49

50. Un estrecho haz de luz incide desde aire en una superficie de vidrio con índice de refracción 1.56. Encuentre el ángulo de incidencia para el cual el correspondiente ángulo de refracción sea la mitad del ángulo de incidencia. *Sugerencia:* Puede usar la identidad trigonométrica $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$.

51. En la figura P22.51 se muestra una técnica para medir el ángulo de un prisma. Un haz de luz paralelo se dirige

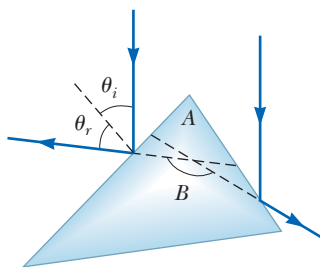


Figura P22.51

hacia el vértice del prisma, de modo que el haz se refleje desde sus caras opuestas del prisma. Demuestre que la separación angular de los dos haces reflejados está dada por $B = 2A$.

52. Una fibra óptica, con índice de refracción n y diámetro d está rodeada con aire. Hacia la fibra se envía luz a lo largo de su eje, como se muestra en la figura P22.52. a) Encuentre el menor radio exterior R permitido para un doblez en la fibra, si no escapa luz. b) ¿El resultado del inciso a) predice comportamiento razonable conforme d tiende a cero? ¿Conforme n aumenta? ¿Conforme n tiende a la unidad? c) Evalúe R , suponiendo que el diámetro de la fibra es $100 \mu\text{m}$ y su índice de refracción es 1.40.

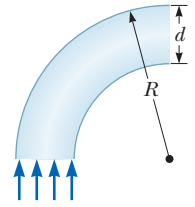


Figura P22.52

53. Un trozo de alambre se dobla hasta un ángulo θ . El alambre doblado se sumerge parcialmente en benceno (índice de refracción = 1.50) de modo que, para una persona que mira a lo largo de la parte seca, el alambre parece ser recto y forma un ángulo de 30.0° con la horizontal. Determine el valor de θ .

54. Un rayo de luz que viaja en aire, incide sobre una cara de un prisma de ángulo recto con índice de refracción $n = 1.50$, como se muestra en la figura P22.54 y el rayo sigue la trayectoria que se muestra en la figura. Suponiendo que $\theta = 60.0^\circ$ y la base del prisma tiene espejo, determine el ángulo ϕ que forma el rayo saliente con la normal a la cara derecha del prisma.

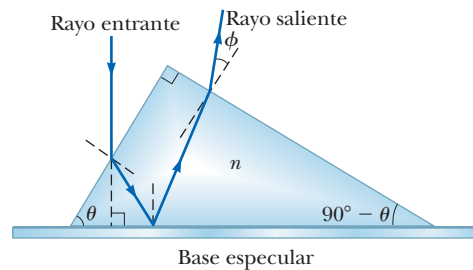


Figura P22.54

55. Un cilindro transparente, de radio $R = 2.00 \text{ m}$, tiene una superficie especular sobre su mitad derecha, como se muestra en la figura P22.55. Un rayo de luz que viaja en aire incide sobre el lado izquierdo del cilindro. El rayo de luz incidente y el rayo de luz saliente son paralelos y $d = 2.00 \text{ m}$. Determine el índice de refracción del material.

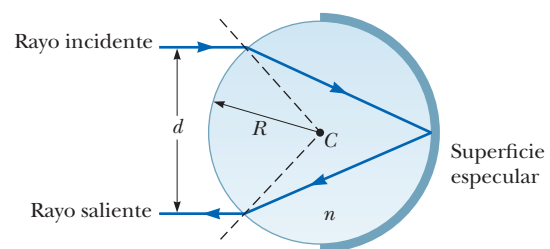


Figura P22.55

56. Un haz láser golpea un extremo de una losa de material, como en la figura P22.56. El índice de refracción de la losa es 1.48. Determine el número de reflexiones internas del haz antes de salir del extremo opuesto de la losa.

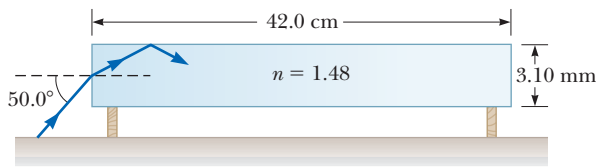


Figura P22.56

57. Un rayo de luz entra a un bloque rectangular de plástico a un ángulo $\theta_1 = 45.0^\circ$ y sale a un ángulo $\theta_2 = 76.0^\circ$, como se muestra en la figura P22.57. a) Determine el índice de refracción del plástico. b) Si el rayo de luz entra al plástico en un punto $L = 50.0$ cm del borde inferior, ¿cuánto tarda el rayo de luz en viajar a través del plástico?

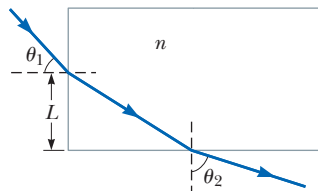


Figura P22.57

58. Unos estudiantes permiten que un estrecho haz de luz láser golpee una superficie de agua. Se organizan para medir el ángulo de refracción para ángulos de incidencia seleccionados y registran los datos que se muestran en la siguiente tabla:

Ángulo de incidencia (grados)	Ángulo de refracción (grados)
10.0	7.5
20.0	15.1
30.0	22.3
40.0	28.7
50.0	35.2
60.0	40.3
70.0	45.3
80.0	47.7

Use los datos para verificar la ley de refracción de Snell al graficar el seno del ángulo de incidencia frente al seno del ángulo de refracción. A partir de la gráfica resultante, deduzca el índice de refracción del agua.

59. La figura P22.59 muestra la trayectoria de un haz de luz a través de varias capas con diferentes índices de refracción. a) Si $\theta_1 = 30.0^\circ$, ¿cuál es el ángulo θ_2 del haz saliente? b) ¿Cuál debe ser el ángulo incidente θ_1 para tener reflexión interna total en la superficie entre el medio con $n = 1.20$ y el medio con $n = 1.00$?

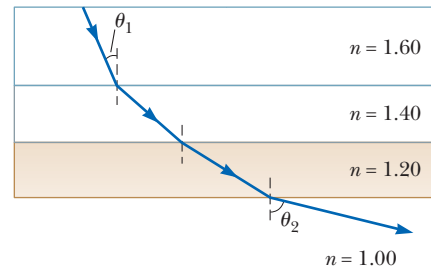


Figura P22.59

60. Tres hojas de plástico tienen índices de refracción desconocidos. La hoja 1 se coloca sobre la hoja 2 y un haz láser se dirige hacia las hojas desde arriba, de modo que golpea la interfaz a un ángulo de 26.5° con la normal. El haz refractado en la hoja 2 forma un ángulo de 31.7° con la normal. El experimento se repite con la hoja 3 sobre la hoja 2 y, con el mismo ángulo de incidencia, el haz refractado forma un ángulo de 36.7° con la normal. Si el experimento se repite de nuevo con la hoja 1 sobre la hoja 3, ¿cuál es el ángulo de refracción esperado en la hoja 3? Suponga el mismo ángulo de incidencia.

61. Un pedazo grueso de lucita ($n = 1.50$) tiene la forma de un cuarto de círculo de radio $R = 12.0$ cm como se muestra en la vista lateral de la figura P22.61. Un rayo de luz viaja en el aire paralelo a la base de la lucita, es incidente a una distancia $h = 6.00$ cm por encima de la base y emerge de la lucita en un ángulo θ con la horizontal. Determinar el valor de θ .

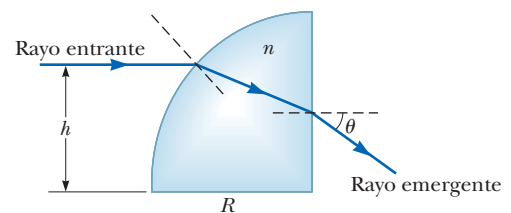


Figura P22.61

Los espejos deformantes distorsionan las imágenes, porque las superficies curvas esencialmente cambian el ángulo de incidencia de los rayos entrantes, un cambio que varía en función de la forma del espejo en un lugar determinado. En todos los casos, sin embargo, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.



Gail Mooney/Masterfile Corporation

23

Espejos y lentes

- 23.1 Espejos planos
- 23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos
- 23.3 Espejos convexos y convenciones de signo
- 23.4 Imágenes formadas por refracción
- 23.5 Refracción atmosférica
- 23.6 Lentes delgadas
- 23.7 Aberraciones de lentes y espejos

El desarrollo de la tecnología de espejos y lentes condujo a una revolución en el progreso de la ciencia. Estos dispositivos, relativamente simples de construir a partir de materiales baratos, llevaron a microscopios y telescopios, lo que extendió la visión humana y abrió nuevas rutas al conocimiento, desde microbios hasta planetas distantes.

Este capítulo cubre la formación de imágenes cuando ondas de luz planas y esféricas caen sobre superficies planas y esféricas. Las imágenes se pueden formar mediante reflexiones desde los espejos o por refracción a través de lentes. En nuestro estudio de los espejos y lentes, todavía supondremos que la luz viaja en líneas rectas (la aproximación de rayos) ignorando la difracción.

23.1 Espejos planos

Comenzaremos por examinar el espejo plano. Considere una fuente puntual de luz colocada en O en la figura 23.1, a una distancia p enfrente de un espejo plano. La distancia p se llama **distancia del objeto**. Los rayos de luz dejan la fuente y se reflejan del espejo. Después de la reflexión, los rayos divergen (se dispersan), pero para el observador parecen provenir desde un punto I detrás del espejo. El punto I se llama **imagen** del objeto en O . Sin importar el sistema bajo estudio, **las imágenes se forman en el punto donde los rayos de luz realmente se intersecan o donde parecerían originarse**. Puesto que los rayos en la figura parecen originarse en I , que está a una distancia q detrás del espejo, esta es la ubicación de la imagen. La distancia q se llama **distancia de la imagen**.

Las imágenes se clasifican como reales o virtuales. En la formación de una *imagen real* la luz en realidad pasa a través del punto de imagen. Para una *imagen virtual*, la luz no pasa a través del punto de la imagen, sino que parece provenir (divergir) desde ahí. La imagen

que se forma por la imagen plana en la figura 23.1 es una imagen virtual. De hecho, las imágenes que se ven en un espejo plano siempre son virtuales (para objetos reales). Las imágenes reales se pueden desplegar sobre una pantalla (como en una película), pero las imágenes virtuales no pueden hacerlo.

Ahora examinaremos algunas de las propiedades de las imágenes formadas por los espejos planos con el uso de simples técnicas geométricas. Para descubrir dónde se forma una imagen, es necesario seguir al menos dos rayos de luz conforme se reflejan del espejo, como en la figura activa 23.2. Uno de estos rayos parte de P , sigue la trayectoria horizontal PQ hasta el espejo y se refleja de vuelta sobre sí mismo. El segundo rayo sigue la trayectoria oblicua PR y se refleja como se muestra. Un observador a la izquierda del espejo trazaría los dos rayos reflejados de vuelta al punto desde el cual parecen originarse: el punto P' . Una continuación de este proceso para puntos distintos de P sobre el objeto resultaría en una imagen virtual (que se dibuja como una flecha amarilla) a la derecha del espejo. Puesto que los triángulos PQR y $P'QR$ son idénticos, $PQ = P'Q$. Por lo tanto, concluimos que **la imagen formada por un objeto colocado frente a un espejo plano está tan atrás del espejo como el objeto que está frente al espejo**. La geometría también muestra que la altura del objeto h es igual a la altura de la imagen h' . La **amplificación lateral M** se define como

$$M \equiv \frac{\text{altura de la imagen}}{\text{altura del objeto}} = \frac{h'}{h} \quad [23.1]$$

La ecuación 23.1 es una definición general de la amplificación lateral de cualquier tipo de espejo. Para un espejo plano, $M = 1$ porque $h' = h$.

En resumen, la imagen formada por un espejo plano tiene las siguientes propiedades:

1. La imagen está tan atrás del espejo como el objeto que está al frente.
2. La imagen no tiene aumento, es virtual y derecha. (Por *derecha* se entiende que, si la flecha del objeto apunta hacia arriba, como en la figura activa 23.2, la flecha de la imagen está igual. Lo opuesto de una imagen derecha es una imagen invertida.)

Finalmente, observe que un espejo plano produce una imagen que tiene una inversión *aparente* izquierda-derecha. Puede ver esta inversión si se para frente a un espejo y eleva la mano derecha. La imagen en el espejo eleva la mano izquierda. Del mismo modo, su cabello parece partirse en el lado opuesto y un lunar en su mejilla derecha parece estar en la mejilla izquierda de la imagen.

Examen rápido

23.1 En la vista superior de la figura 23.3, la imagen de la piedra vista por el observador 1 está en C . ¿Dónde ve la imagen el observador 2: en A , en B , en C , en D , en E o en ninguno?

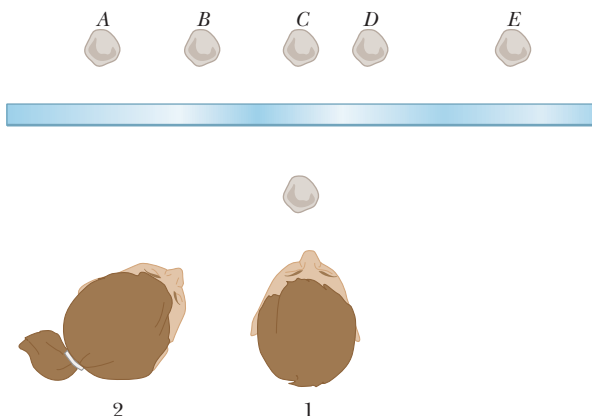


Figura 23.3 (Examen rápido 23.1)

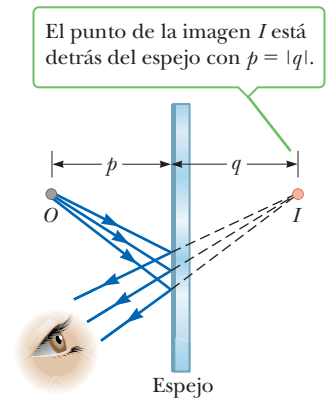


Figura 23.1 Imagen formada por reflexión desde un espejo plano. La imagen en el punto I es virtual. En la sección 23.3, se verá que q debe ser tomada como negativa para las imágenes virtuales: la distancia del objeto p , por lo tanto, es igual al valor absoluto de la distancia de la imagen q .

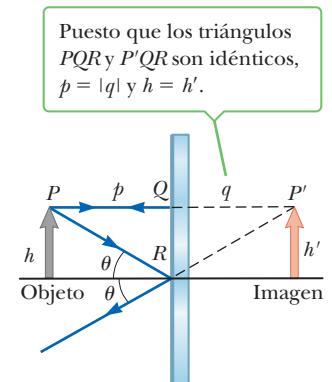


Figura activa 23.2 Construcción geométrica para localizar la imagen de un objeto colocado frente a un espejo plano.

Tip 23.1 Amplificación ≠ ampliación

Observe que la palabra *amplificación* como se usa en óptica, no siempre significa *ampliación* porque la imagen podría ser menor que el objeto.

EJEMPLO 23.1 "Espejito, espejito en la pared"

OBJETIVO Aplicar las propiedades de un espejo plano.

PROBLEMA Un hombre de 1.80 m de alto se para frente a un espejo y ve todo su cuerpo, ni más ni menos. Si sus ojos están a 0.14 m de la parte superior de su cabeza, ¿cuál es la altura mínima del espejo?

ESTRATEGIA La figura 23.4 muestra dos rayos de luz, uno desde los pies del hombre y el otro desde la parte superior de su cabeza, que se reflejan del espejo y entran a su ojo. El rayo desde sus pies golpea justo la parte inferior del espejo, de modo que si el espejo fuese más largo, sería demasiado largo y si fuese más corto, el rayo no se reflejaría. El ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales, marcados como θ . Esto significa que los dos triángulos, ABD y CBD , son idénticos porque son triángulos rectángulos con un lado común (DB) y dos ángulos idénticos θ . Use este hecho clave y el pequeño triángulo isósceles FEC para resolver el problema.

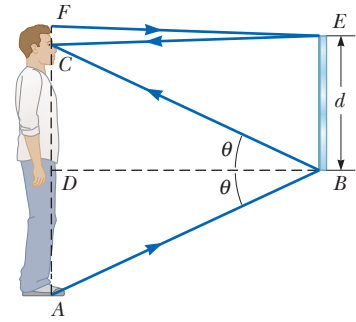


Figura 23.4 (Ejemplo 23.1)

SOLUCIÓN

Necesita encontrar BE , que es igual a d . Relacione esta longitud con las longitudes en el cuerpo del hombre:

$$(1) \quad BE = DC + \frac{1}{2}CF$$

Necesita las longitudes DC y CF . Iguale la suma de los lados opuestos a los ángulos idénticos θ , con AC :

$$(2) \quad AD + DC = AC = (1.80 - 0.14) = 1.66 \text{ m}$$

$AD = DC$, así que sustituya en la ecuación (2) y resuelva para DC :

$$AD + DC = 2DC = 1.66 \text{ m} \rightarrow DC = 0.83 \text{ m}$$

CF está dado como 0.14 m. Sustituya este valor y DC en la ecuación (1):

$$BE = d = DC + \frac{1}{2}CF = 0.83 \text{ m} + \frac{1}{2}(0.14 \text{ m}) = \mathbf{0.90 \text{ m}}$$

COMENTARIOS El espejo debe ser exactamente igual a la mitad de la altura del hombre para que él sólo vea su altura completa y nada más o menos. Observe que la respuesta no depende de su distancia desde el espejo.

PREGUNTA 23.1 ¿Un hombre más alto podría ver su altura completa en el mismo espejo?

EJERCICIO 23.1 ¿Cuán grande debe ser el espejo si quiere ver solamente el tercio superior de su cuerpo?

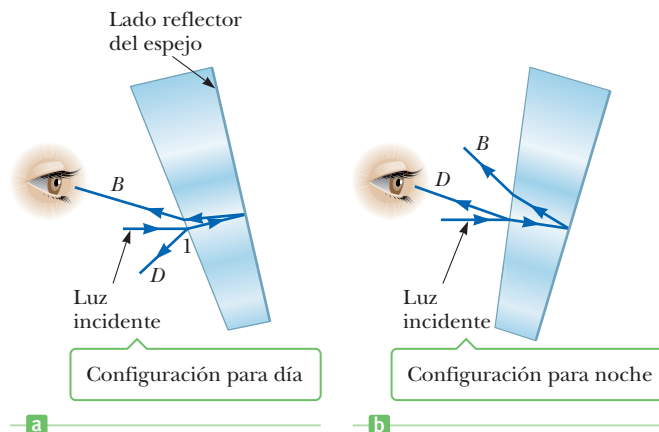
RESPUESTA 0.30 m

APLICACIÓN

Configuraciones de día y de noche para espejos retrovisores

La mayoría de los espejos retrovisores en los automóviles tienen una configuración para día y otra para noche. La configuración para noche disminuye enormemente la intensidad de la imagen de modo que las luces de los automóviles que vienen detrás no cieguen al conductor. Para entender cómo funciona tal espejo, considere la figura 23.5. El espejo es una cuña de vidrio con un recubrimiento metálico reflector en el lado posterior. Cuando el espejo está en la configuración de día, como en la figura 23.5a, la luz proveniente de un objeto detrás del auto golpea el espejo en el punto 1. La mayor parte de la

Figura 23.5 Vistas transversales de un espejo retrovisor. a) Con la configuración para día, la superficie plateada posterior del espejo refleja un rayo brillante B en los ojos del conductor. b) Con la configuración para noche, el vidrio de la superficie frontal no plateada del espejo refleja un rayo más apagado D en los ojos del conductor.



luz entra a la cuña, se refracta y refleja de la parte posterior del espejo para regresar a la superficie frontal, donde se refracta de nuevo conforme vuelve a entrar al aire como rayo B (por *brillante*). Además, una pequeña porción de la luz se refleja en la superficie frontal, como se indica mediante el rayo D (por *débil*). Esta luz débil reflejada es responsable de la imagen que se observa cuando el espejo está en la configuración para noche, como en la figura 23.5b. Ahora la cuña gira de modo que la trayectoria que sigue la luz brillante (rayo B) no se dirige al ojo. En vez de ello, la luz débil que se refleja de la superficie frontal viaja hacia el ojo y el brillo de los faros que vienen detrás no se vuelve peligrosa.

FÍSICA APLICADA 23.1 Truco de ilusionista

El profesor en la caja que se muestra en la figura 23.6 parece equilibrarse sobre sus dedos con ambos pies elevados del suelo. Él puede mantener esta posición durante mucho tiempo y parece desafiar la gravedad. ¿Cómo supone que se crea esta ilusión?

EXPLICACIÓN Este truco es un ejemplo de ilusión óptica, utilizada por los magos, y que usa un espejo. La caja sobre la que se para el profesor es un marco cúbico abierto que contiene un espejo vertical plano a través de un plano diagonal. El profesor se coloca dentro de la caja de modo que una pierna está frente al espejo y la otra pierna detrás de él, fuera de la vista. Cuando eleva la pierna frontal, el reflejo de dicha pierna se eleva también, lo que hace parecer que los dos pies están por encima del suelo, lo que crea la ilusión de que flota en el aire. De hecho, él se sostiene con la pierna detrás del espejo, que permanece en contacto con el suelo. ■



Figura 23.6 (Física aplicada 23.1)

23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos

Un **espejo esférico**, como su nombre implica, tiene la forma de un segmento de esfera. La figura 23.7 muestra un espejo esférico con una superficie cóncava interior plateada; este tipo de espejo se llama **espejo cóncavo**. El espejo tiene radio de curvatura R y su centro de curvatura está en el punto C . El punto V es el centro del segmento esférico y una línea que se dibuja de C a V se llama **eje principal** del espejo.

Ahora considere una fuente puntual de luz colocada en el punto O en la figura 23.7b, sobre el eje principal y fuera del punto C . Se muestran muchos rayos divergentes que se originan en O . Después de reflejarse del espejo, estos rayos convergen para reunirse en I , que se llama **punto de imagen**. Luego los rayos continúan y divergen de I como si ahí hubiera un objeto. Como resultado, se forma una imagen real. **Siempre que la luz reflejada pase a través de un punto, la imagen que se forma ahí es real.**

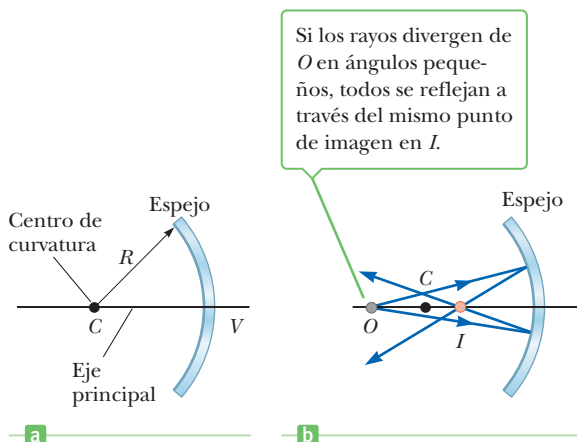


Figura 23.7 a) Espejo cóncavo de radio R . El centro de curvatura, C , se ubica sobre el eje principal. b) Un objeto puntual colocado en O frente a un espejo esférico cóncavo de radio R , donde O es cualquier punto sobre el eje principal cuya distancia al espejo es mayor que R desde la superficie del espejo, forma una imagen real en I .

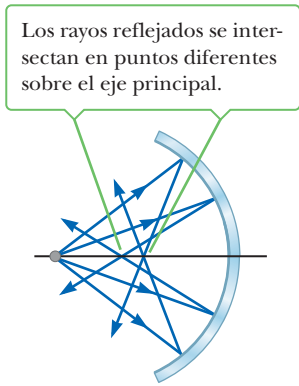


Figura 23.8 Un espejo esférico cóncavo inhibe la aberración esférica cuando los rayos de luz forman grandes ángulos con el eje principal.

Con frecuencia suponemos que todos los rayos que divergen del objeto forman ángulos pequeños con el eje principal. Tales rayos se reflejan a través del punto de imagen, como en la figura 23.7b. Los rayos que forman un ángulo grande con el eje principal, como en la figura 23.8, convergen en otros puntos sobre el eje principal, lo que produce una imagen borrosa. Este efecto, llamado **aberración esférica**, se presenta en cierta medida con cualquier espejo esférico y lo analizaremos en la sección 23.7.

Puede usar la geometría que se muestra en la figura 23.9 para calcular la distancia de la imagen q a partir de la distancia del objeto p y el radio de curvatura R . Por convención, estas distancias se miden desde el punto V . La figura muestra dos rayos de luz que salen de la punta del objeto. Un rayo pasa a través del centro de curvatura, C , del espejo y golpea el objeto de manera frontal (perpendicular a la superficie del espejo) y se refleja de vuelta sobre él mismo. El segundo rayo golpea el espejo en el punto V y se refleja como se muestra y obedece la ley de reflexión. La imagen de la punta de la flecha está en el punto donde los dos rayos se intersectan. A partir del triángulo más grande en la figura 23.9, vemos que $\tan \theta = h/p$; el triángulo amarillo proporciona $\tan \theta = -h'/q$. El signo negativo se introdujo para satisfacer la convención de que h' es negativa cuando la imagen está invertida con respecto al objeto, como lo está aquí. A partir de la ecuación 23.1 y estos resultados, encontramos que la amplificación del espejo es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad [23.2]$$

A partir de otros dos triángulos en la figura, obtenemos

$$\tan \alpha = \frac{h}{p - R} \quad \text{y} \quad \tan \alpha = -\frac{h'}{R - q}$$

de los cuales encontramos que

$$\frac{h'}{h} = -\frac{R - q}{p - R} \quad [23.3]$$

Si comparamos la ecuación 23.2 con la ecuación 23.3, vemos que

$$\frac{R - q}{p - R} = \frac{q}{p}$$

El álgebra simple reduce esta ecuación a

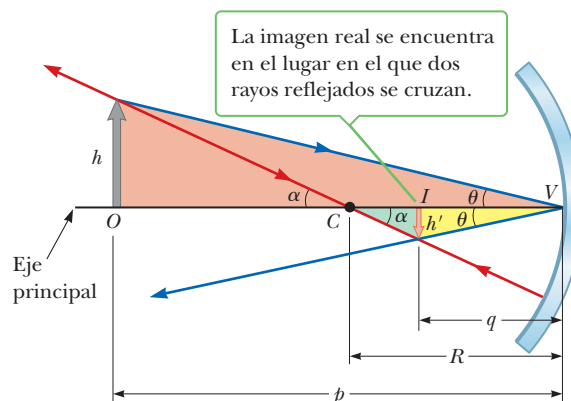
Ecuación del espejo ►

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \quad [23.4]$$

Esta ecuación se llama **ecuación del espejo**.

Si el objeto está muy lejos del espejo, si la distancia del objeto p es lo suficientemente grande en comparación con R , que se puede decir que p tiende al infinito, entonces $1/p \approx 0$ y a partir de la ecuación 23.4 vemos que $q \approx R/2$. En otras palabras, cuando el objeto está

Figura 23.9 La imagen formada por un espejo esférico cóncavo, donde el objeto en O yace afuera del centro de curvatura, C .



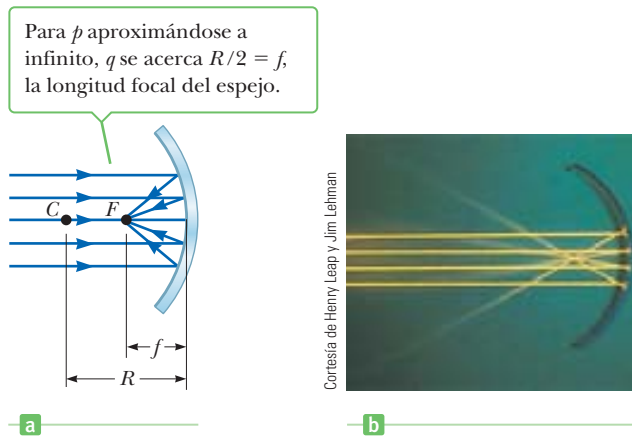


Figura 23.10 a) Rayos de luz provenientes de un objeto distante ($p \rightarrow \infty$) se reflejan de un espejo cóncavo a través del punto focal F . b) Fotografía de la reflexión de rayos paralelos de un espejo cóncavo.

muy lejos del espejo, **el punto de imagen está a la mitad entre el centro de curvatura y el centro del espejo**, como en la figura 23.10a. Los rayos entrantes en esencia son paralelos en dicha figura porque la fuente se supuso muy lejana del espejo. En este caso especial, al punto de imagen se le llama **punto focal F** y la distancia de la imagen **longitud focal f** , donde

$$f = \frac{R}{2} \quad [23.5] \quad \leftarrow \text{Longitud focal}$$

Por lo tanto, la ecuación del espejo se puede expresar en términos de la longitud focal:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad [23.6]$$

Observe que los rayos de los objetos en el infinito siempre están enfocados en el punto focal.

23.3 Espejos convexos y convenciones de signo

La figura 23.11 muestra la formación de una imagen mediante un **espejo convexo**, que está plateado de modo que la luz se refleja desde la superficie exterior convexa. En ocasiones se llama **espejo divergente** porque los rayos provenientes de cualquier punto sobre el objeto divergen después de una reflexión, como si se considerara que provienen desde algún punto detrás del espejo. La imagen en la figura 23.11 es virtual en vez de real porque yace detrás del espejo en el punto donde parecerían originarse los rayos reflejados. En general, la imagen formada por un espejo convexo es derecha, virtual y menor que el objeto.

En el texto no se deducirán ecuaciones para espejos esféricos convexos. Si se hiciera, encontraríamos que las ecuaciones desarrolladas para espejos cóncavos se pueden usar

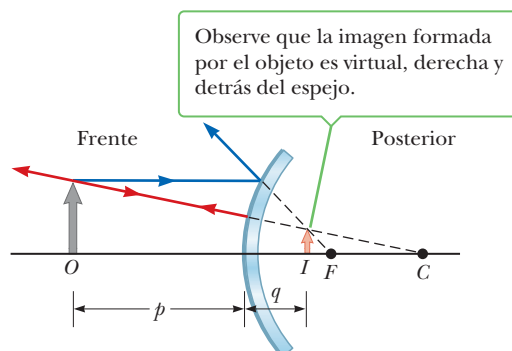


Figura 23.11 Formación de una imagen mediante un espejo esférico convexo.

Tip 23.2 Punto focal \neq punto de enfoque

El punto focal *no* es el punto en el que los rayos de luz se enfocan para formar una imagen. El punto focal de un espejo se determina únicamente por su curvatura, que no depende de la ubicación de cualquier objeto.

Tabla 23.1 Convenciones de signo para espejos

Cantidad	Símbolo	Enfrente	Atrás	Imagen derecha	Imagen invertida
Ubicación de objeto	p	+	-		
Ubicación de imagen	q	+	-		
Longitud focal	f	+	-		
Altura de imagen	h'			+	-
Amplificación	M			+	-

Tip 23.3 Positivo es donde está la luz

Las cantidades p , q y f son positivas cuando se encuentran del lado en donde la luz está frente al espejo, como se indica en la figura 23.12.

con espejos convexos si se aplican convenciones de signo particulares. A la región donde se mueven los rayos de luz se le llama *lado frontal* del espejo y al otro lado, donde se forman las imágenes virtuales, *lado posterior*. Por ejemplo, en las figuras 23.9 y 23.11, el lado a la izquierda del espejo es el lado frontal y el lado a la derecha es el lado posterior. La figura 23.12 es útil para comprender las reglas para distancias de objeto y de imagen, y la tabla 23.1 resume las convenciones de signo para todas las cantidades necesarias. Observe que, cuando las cantidades p , q y f (y R) se ubican donde está la luz, frente al espejo, son positivas, mientras que cuando se ubican detrás del espejo (donde no está la luz), son negativas.

Diagramas de rayos para espejos

Las posiciones y tamaños de las imágenes formadas por espejos se pueden determinar convenientemente al construir *diagramas de rayos* similares a los que usted ha utilizado. Este tipo de construcción gráfica expresa la naturaleza global de la imagen y se puede usar para comprobar parámetros calculados a partir del espejo y las ecuaciones de amplificación. La elaboración de un diagrama de rayos requiere conocer la posición del objeto y la ubicación del centro de curvatura. Para ubicar la imagen, se construyen tres rayos, en lugar de sólo los dos que se construyeron hasta el momento, como se muestra mediante los ejemplos en la figura activa 23.13. Los tres rayos parten del mismo punto del objeto; para estos ejemplos, se eligió la punta de la flecha. Para los espejos cóncavos en las figuras activas 23.13a y b, los rayos se dibujan del modo siguiente:

1. El rayo 1 se dibuja paralelo al eje principal y se refleja de vuelta a través del punto focal F .
2. El rayo 2 se dibuja a través del punto focal y se refleja paralelo al eje principal.
3. El rayo 3 se dibuja a través del centro de curvatura, C , y se refleja de vuelta sobre sí mismo.

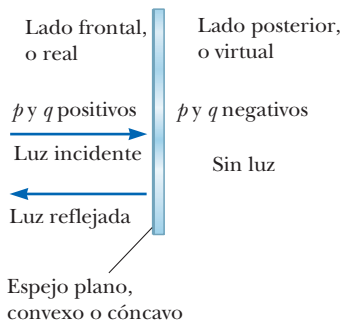
Observe que los rayos en realidad van en todas direcciones desde el objeto; elegimos seguir los que se mueven en una dirección que simplifica el dibujo.

La intersección de cualesquiera *dos* de estos rayos en un punto ubica la imagen. El tercer rayo sirve como comprobación de la construcción. El punto de imagen que se obtiene de esta forma siempre debe concordar con el valor de q calculado a partir de la fórmula del espejo.

En el caso de un espejo cóncavo, observe lo que ocurre conforme el objeto se acerca más al espejo. La imagen real invertida en la figura 23.13a se mueve hacia la izquierda conforme el objeto se aproxima al punto focal. Cuando el objeto está en el punto focal, la imagen está infinitamente lejos a la izquierda. Sin embargo, cuando el objeto yace entre el punto focal y la superficie del espejo, como en la figura 23.13b, la imagen es virtual y derecha.

Con el espejo convexo que se muestra en la figura activa 23.13c, la imagen de un objeto real siempre es virtual y derecha. Conforme aumenta la distancia del objeto, la imagen virtual se encoge y tiende al punto focal conforme p tiende a infinito. Construya un diagrama de rayos para verificar estos enunciados.

Las características de formación de la imagen de los espejos curvos obviamente determinan sus usos. Por ejemplo, suponga que quiere diseñar un espejo que ayudará a las

**Figura 23.12** Diagrama que describe los signos de p y q para espejos convexo y cóncavo.

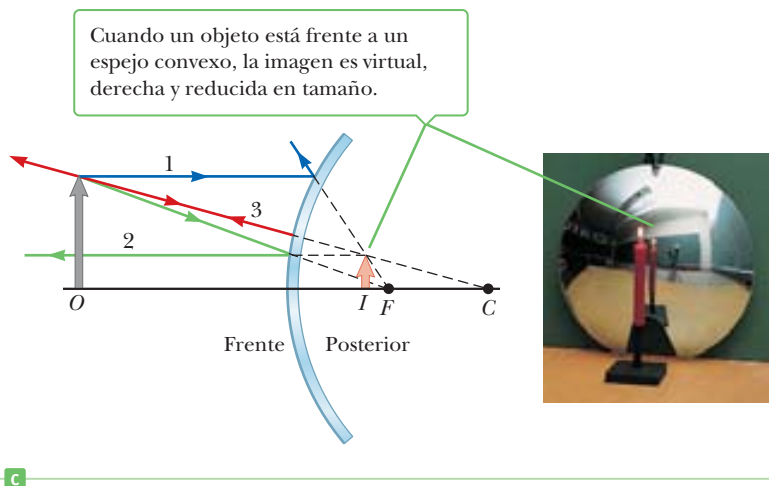
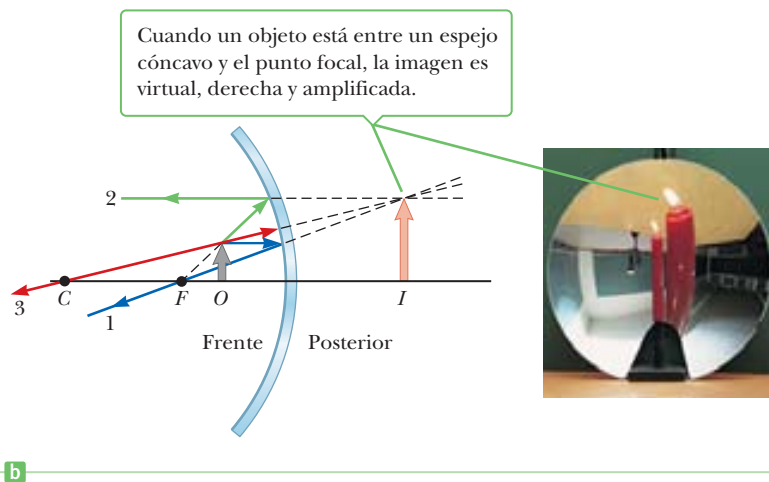
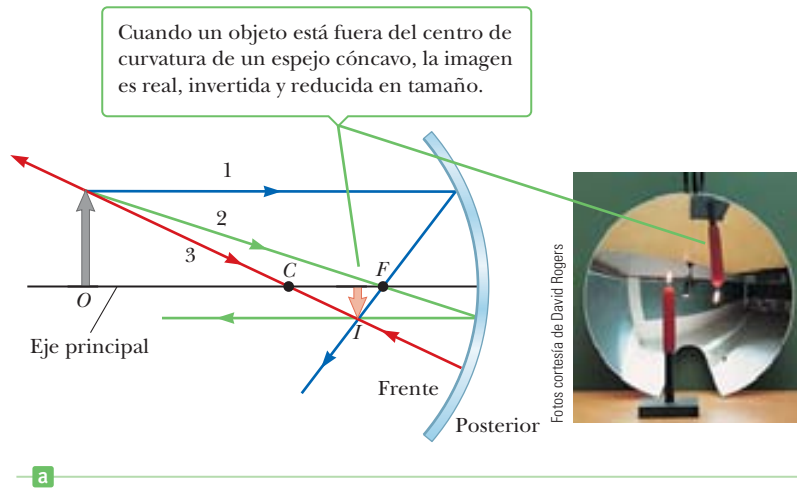


Figura activa 23.13 Diagramas de rayos para espejos esféricos y fotografías correspondientes de las imágenes de las velas.

personas a rasurarse o aplicarse cosméticos. Para esto, necesita un espejo cóncavo que pone al usuario dentro del punto focal, como el espejo en la figura activa 23.13b. Con dicho espejo, la imagen es derecha y enormemente agrandada. En contraste, suponga que el propósito principal de un espejo es observar un gran campo de visión. En ese caso necesita un espejo convexo, como el de la figura activa 23.13c. El tamaño reducido de la imagen significa que en el espejo se percibe un campo visual bastante grande. Los espejos como éste con frecuencia se colocan en las tiendas para ayudar a los empleados a descubrir a los ladrones. Un segundo uso de tales espejos es un espejo lateral en un auto (figura

Figura 23.14 Un espejo lateral convexo en un vehículo produce una imagen derecha que es menor que el objeto. La imagen más pequeña significa que el objeto está más cerca que su distancia aparente como se observa en el espejo.



© Junebug Clark 1988/Photo Researchers, Inc.

23.14). Este tipo de espejo por lo general se coloca en el lado del pasajero del auto y lleva la advertencia “Los objetos están más cerca de lo que parecen”. Sin tal advertencia, una conductora puede pensar que mira un espejo plano, que no altera el tamaño de la imagen. Se podría engañar al creer que un camión está lejos porque parece pequeño, cuando en realidad es uno grande muy cerca detrás de ella, pero reducido en tamaño debido a las características de formación de imagen del espejo convexo.

■ FÍSICA APLICADA 23.2 Cóncavo frente a convexo

Una imagen virtual puede estar en cualquier parte detrás de un espejo cóncavo. ¿Por qué hay una distancia máxima a la cual la imagen puede existir detrás de un espejo *convexo*?

EXPLICACIÓN Considere primero el espejo cóncavo e imagine dos rayos de luz diferentes que salen de un pequeño objeto y golpean el espejo. Si el objeto está en el punto focal, los rayos de luz que se reflejan del espejo serán paralelos al eje del espejo. Se pueden interpretar como que forman una imagen virtual infinitamente alejada detrás del espejo. Conforme el objeto se acerca más al espejo, los rayos reflejados divergirán a través de ángulos cada vez más grandes, lo que resultará en que sus extensiones converjan cada vez más

cerca en la parte posterior del espejo. Cuando el objeto se lleve recto al espejo, la imagen está justo detrás del espejo. Cuando el objeto está mucho más cerca del espejo que la longitud focal, los espejos actúan como un espejo plano y la imagen está justo tan lejos detrás del espejo, como el objeto está enfrente de él. Por lo tanto, la imagen puede estar en cualquier parte, desde infinitamente lejos hasta justo en la superficie del espejo. Para el espejo convexo, un objeto en el infinito produce una imagen virtual en el punto focal. Conforme el objeto se acerca más, los rayos reflejados divergen de manera más clara y la imagen se acerca más al espejo. Como resultado, la imagen virtual se restringe a la región entre el espejo y el punto focal. ■

■ FÍSICA APLICADA 23.3 Ondas reversibles

Los grandes camiones con frecuencia tienen un letrero en la parte posterior que dice “Si usted no puede ver mi espejo, yo no puedo verlo a usted”. Explique esto.

EXPLICACIÓN Las compañías camioneras utilizan el principio de reversibilidad de los rayos de luz. Para que en el

espejo del conductor se forme una imagen de usted, debe haber una ruta para que los rayos de luz lleguen al espejo, lo que permite al conductor ver su imagen. Si usted no puede ver el espejo, esta ruta no existe. ■

■ EJEMPLO 23.2 Imágenes formadas por un espejo cóncavo

OBJETIVO Calcular propiedades de un espejo cóncavo.

PROBLEMA Suponga que cierto espejo esférico cóncavo tiene una longitud focal de 10.0 cm. **a)** Ubique la imagen y encuentre la amplificación para una distancia de objeto de 25.0 cm. Determine si la imagen es real o virtual, invertida o derecha, más grande o más pequeña. Realice lo mismo para distancias de objeto de **b)** 10.0 cm y **c)** 5.00 cm.

ESTRATEGIA Para cada inciso, sustituya en las ecuaciones de espejo y amplificación. El inciso b) involucra un proceso límite porque las respuestas tienden al infinito.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la posición de la imagen para una distancia de objeto de 25.0 cm. Calcule la amplificación y describa la imagen.

Use la ecuación del espejo para encontrar la distancia de la imagen:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Sustituya y resuelva para q . De acuerdo con la tabla 23.1, p y f son positivos.

$$\frac{1}{25.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$q = 16.7 \text{ cm}$$

Puesto que q es positiva, la imagen está enfrente del espejo y es real. La amplificación se encuentra al sustituir en la ecuación 23.2:

$$M = -\frac{q}{p} = -\frac{16.7 \text{ cm}}{25.0 \text{ cm}} = -0.668$$

La imagen es menor que el objeto porque $|M| < 1$, y es invertida porque M es negativa. (Véase la figura 23.13a.)

b) Ubique la distancia de la imagen cuando la distancia del objeto es 10.0 cm. Calcule la amplificación y describa la imagen.

El objeto está en el punto focal. Sustituya $p = 10.0 \text{ cm}$ y $f = 10.0 \text{ cm}$ en la ecuación del espejo:

$$\frac{1}{10.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$\frac{1}{q} = 0 \rightarrow q \rightarrow \infty$$

Puesto que $M = -q/p$, la amplificación tiende al infinito.

c) Ubique la distancia de la imagen cuando la distancia del objeto es 5.00 cm. Calcule la amplificación y describa la imagen.

Una vez más, sustituya en la ecuación del espejo:

$$\frac{1}{5.00 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{5.00 \text{ cm}} = -\frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$q = -10.0 \text{ cm}$$

La imagen es virtual (detrás del espejo) porque q es negativa. Use la ecuación 23.2 para calcular la amplificación:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-10.0 \text{ cm}}{5.00 \text{ cm}}\right) = 2.00$$

La imagen es más grande (aumentada por un factor de 2) porque $|M| > 1$, y derecha porque M es positiva. (Véase la figura 23.13b.)

COMENTARIOS Observe las características de una imagen formada por un espejo esférico cóncavo. Cuando el objeto está fuera del punto focal, la imagen es invertida y real; en el punto focal, la imagen se forma en el infinito; dentro del punto focal, la imagen es derecha y virtual.

PREGUNTA 23.2 ¿A qué ubicación se aproxima la imagen conforme el objeto se aleja arbitrariamente del espejo? a) infinito b) el punto focal c) el radio de curvatura del espejo d) el mismo espejo

EJERCICIO 23.2 Si la distancia del objeto es 20.0 cm, encuentre la distancia de la imagen y la amplificación del espejo.

RESPUESTA $q = 20.0 \text{ cm}$, $M = -1.00$

EJEMPLO 23.3 Imágenes formadas por un espejo convexo**OBJETIVO** Calcular propiedades de un espejo convexo.**PROBLEMA** Un objeto de 3.00 cm de alto se coloca a 20.0 cm de un espejo convexo con una longitud focal de 8.00 cm de magnitud. Encuentre **a)** la posición de la imagen, **b)** la amplificación del espejo y **c)** la altura de la imagen.**ESTRATEGIA** Este problema de nuevo sólo requiere sustitución en las ecuaciones del espejo y de amplificación. Multiplicar la altura del objeto por la amplificación produce la altura de la imagen.**SOLUCIÓN****a)** Encuentre la posición de la imagen.

Puesto que el espejo es convexo, su longitud focal es negativa. Sustituya en la ecuación del espejo:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{20.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-8.00 \text{ cm}}$$

Resuelva para q :

$$q = -5.71 \text{ cm}$$

b) Encuentre la amplificación del espejo.

Sustituya en la ecuación 23.2:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-5.71 \text{ cm}}{20.0 \text{ cm}}\right) = 0.286$$

c) Encuentre la altura de la imagen:

Multiplique la altura del objeto por la amplificación:

$$h' = hM = (3.00 \text{ cm})(0.286) = 0.858 \text{ cm}$$

COMENTARIOS El valor negativo de q indica que la imagen es virtual, o que está detrás del espejo, como en la figura 23.13c. La imagen es derecha porque M es positiva.**PREGUNTA 23.3** Verdadero o Falso: Un espejo convexo puede producir sólo imágenes virtuales.**EJERCICIO 23.3** Suponga que el objeto se mueve de modo que está a 4.00 cm del mismo espejo. Repita los incisos a) al c).**RESPUESTAS** a) -2.67 cm b) 0.668 c) 2.00 cm ; la imagen es derecha y virtual.**EJEMPLO 23.4** La cara en el espejo**OBJETIVO** Encontrar una longitud focal a partir de una amplificación y una distancia de objeto.**PROBLEMA** Cuando una mujer se para con el rostro a 40.0 cm de un espejo cosmético, la imagen derecha es el doble de larga que su rostro. ¿Cuál es la longitud focal del espejo?**ESTRATEGIA** Para encontrar f en este ejemplo, primero debemos encontrar q , la distancia de la imagen. Puesto que el problema afirma que la imagen es derecha, la amplificación debe ser positiva (en este caso, $M = +2$) y dado que $M = -q/p$, se puede determinar q .**SOLUCIÓN**Obtenga q a partir de la ecuación de amplificación:

$$M = -\frac{q}{p} = 2$$

$$q = -2p = -2(40.0 \text{ cm}) = -80.0 \text{ cm}$$

Puesto que q es negativa, la imagen está en el lado opuesto del espejo y por lo tanto es virtual. Sustituya q y p en la ecuación del espejo y resuelva para f :

$$\frac{1}{40.0 \text{ cm}} - \frac{1}{80.0 \text{ cm}} = \frac{1}{f}$$

$$f = 80.0 \text{ cm}$$

COMENTARIOS El signo positivo para la longitud total dice que el espejo es cóncavo, un hecho que ya se sabía porque el espejo aumentó el objeto. (Un espejo convexo produciría una imagen más pequeña.)

PREGUNTA 23.4 Si el espejo se acerca a su rostro, ¿qué ocurre con la imagen? a) Se invierte y es más pequeña. b) Permanece derecha y se vuelve más pequeña. c) Se invierte y se vuelve más grande. d) Permanece derecha y se vuelve más grande.

EJERCICIO 23.4 Suponga que un espejo esférico en un parque de diversiones hace que usted parezca un tercio de su estatura normal. Si está a 1.20 m del espejo, encuentre su longitud focal. ¿El espejo es cóncavo o convexo?

RESPUESTAS -0.600 m, convexo

23.4 Imágenes formadas por refracción

En esta sección describimos cómo se forman las imágenes por refracción en una superficie esférica. Considere dos medios transparentes con índices de refracción n_1 y n_2 , donde la frontera entre los dos es una superficie esférica de radio R (figura 23.15). Suponga que el medio a la derecha tiene un mayor índice de refracción que el de la izquierda: $n_2 > n_1$. Este sería el caso para luz que entra a un trozo curvo de vidrio desde el aire o para luz que entra al agua en una pecera desde el aire. Los rayos que se originan en la ubicación del objeto O se refractan en la superficie esférica y luego convergen al punto de imagen I . Puede comenzar con la ley de refracción de Snell y usar técnicas geométricas simples para demostrar que la distancia del objeto, la distancia de la imagen y el radio de curvatura se relacionan mediante la ecuación

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad [23.7]$$

Más aún, la amplificación de una superficie refractante es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} \quad [23.8]$$

Como con los espejos, se sostienen ciertas convenciones de signos, dependiendo de las circunstancias. Observe primero que las imágenes reales se forman mediante refracción en el lado de la superficie *opuesta* al lado desde el cual proviene la luz, en contraste con los espejos, donde las imágenes reales se forman en el *mismo* lado de la superficie reflectora. Esto tiene sentido porque la luz se refleja de los espejos, de modo que cualquier imagen real debe formarse en el mismo lado de donde viene la luz. Con un medio transparente, los rayos pasan a través y naturalmente forman imágenes reales en el lado opuesto. El lado de la superficie donde se originan los rayos de luz se define como lado frontal. El otro lado se llama lado posterior. Debido a la diferencia en posición de las imágenes reales, las convenciones de signo de refracción para q y R son las opuestas a las de la reflexión. Por ejemplo, p , q y R son todas positivas en la figura 23.15. Las convenciones de signo para superficies refractoras esféricas se resumen en la tabla 23.2.

Los rayos que forman ángulos pequeños con el eje principal divergen de un objeto puntual en O y pasan a través del punto de imagen I .

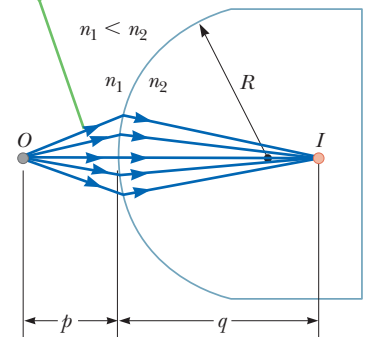


Figura 23.15 Imagen formada por refracción en una superficie esférica.

Tabla 23.2 Convenciones de signo para superficies refractoras

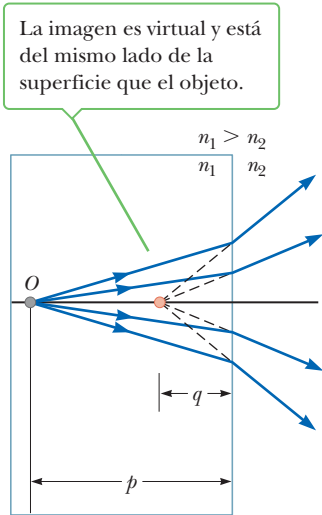
Cantidad	Símbolo	Enfrente	Atrás	Imagen derecha	Imagen invertida
Ubicación de objeto	p	+	-		
Ubicación de imagen	q	-	+		
Radio	R	-	+		
Altura de imagen	h'			+	-

FÍSICA APLICADA 23.4 **Visión submarina** BIO

¿Por qué una persona con visión normal ve una imagen borrosa si abre los ojos bajo el agua sin usar goggles o máscara de buceo?

EXPLICACIÓN El ojo presenta una superficie refractora esférica. Éste normalmente funciona de modo que la luz que entra desde el aire se refracta para formar una imagen en la retina ubicada en la parte posterior del globo ocular. La diferencia en el índice de refracción entre el agua y el ojo es

menor que la diferencia en el índice de refracción entre aire y ojo. En consecuencia, la luz que entra al ojo desde el agua no experimenta tanta refracción como la luz que entra desde el aire y la imagen se forma detrás de la retina. Una máscara de buceo o goggles para nadar no tienen acción óptica propia; simplemente son piezas planas de vidrio o plástico en una montura de caucho. Sin embargo, sí proporcionan una región de aire adyacente a los ojos, de modo que se establece la relación de refracción correcta y las imágenes estarán en foco. ■



La imagen es virtual y está del mismo lado de la superficie que el objeto.

Superficies refractantes planas

Si la superficie refractante es plana, entonces R tiende a infinito y la ecuación 23.7 se reduce a

$$\frac{n_1}{p} = -\frac{n_2}{q}$$

$$q = -\frac{n_2}{n_1} p \quad [23.9]$$

A partir de la ecuación 23.9 vemos que el signo de q es opuesto al de p . En consecuencia, **la imagen que se forma mediante una superficie refractante plana está en el mismo lado de la superficie que el objeto**. Este enunciado se ilustra en la figura activa 23.16 para la situación donde n_1 es mayor que n_2 , donde se forma una imagen virtual entre el objeto y la superficie. Observe que el rayo refractado se dobla *alejándose* de la normal en este caso, porque $n_1 > n_2$.

Figura activa 23.16 La imagen que se forma mediante una superficie refractora.

Examen rápido

23.2 Una persona que pesca con arpón desde un bote ve un pez ubicado a 3 m del bote a una profundidad aparente de 1 m. Para arponear al pez, ¿la persona debe apuntar a) hacia la imagen del pez, b) arriba de o c) abajo de la imagen del pez?

23.3 Verdadero o Falso: a) La imagen de un objeto colocado enfrente de un espejo cóncavo siempre es derecha. b) La altura de la imagen de un objeto colocado enfrente de un espejo cóncavo debe ser menor que o igual a la altura del objeto. c) La imagen de un objeto colocado enfrente de un espejo convexo siempre es derecha y menor que el objeto.

EJEMPLO 23.5 **Un vistazo a la bola de cristal**

OBJETIVO Calcular las propiedades de una imagen creada por una lente esférica.

PROBLEMA Una moneda de 2.00 cm de diámetro está incrustada en una bola de vidrio sólida de 30.0 cm de radio (figura 23.17). El índice de refracción de la bola es 1.50 y la moneda está a 20.0 cm de la superficie. Encuentre la posición de la imagen de la moneda y la altura de la imagen de la moneda.

ESTRATEGIA Puesto que los rayos se mueven desde un medio de alto índice de refracción (la bola de vidrio) hasta un medio de menor índice de refracción (aire), los rayos que se originan en la moneda se refractan alejándose de la normal en la superficie y divergen hacia afuera. La imagen se forma en el vidrio y es virtual. Sustituya en las ecuaciones 23.7 y 23.8 para la posición de la imagen y la amplificación, respectivamente.

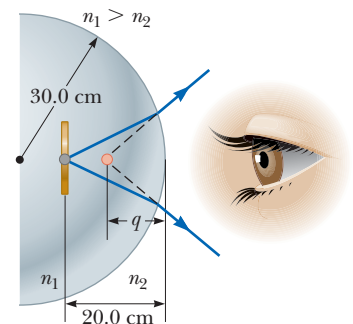


Figura 23.17 (Ejemplo 23.5) Una moneda incrustada en una bola de vidrio forma una imagen virtual entre la moneda y la superficie del vidrio.

La imagen se forma en el vidrio y es virtual. Sustituya en las ecuaciones 23.7 y 23.8 para la posición de la imagen y la amplificación, respectivamente.

SOLUCIÓN

Aplique la ecuación 23.7 y considere $n_1 = 1.50$, $n_2 = 1.00$, $p = 20.0$ cm y $R = -30.0$ cm:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$\frac{1.50}{20.0 \text{ cm}} + \frac{1.00}{q} = \frac{1.00 - 1.50}{-30.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q :

$$q = -17.1 \text{ cm}$$

Para encontrar la altura de la imagen, use la ecuación 23.8 para la amplificación:

$$M = -\frac{n_1 q}{n_2 p} = -\frac{1.50(-17.1 \text{ cm})}{1.00(20.0 \text{ cm})} = \frac{h'}{h}$$

$$h' = 1.28h = (1.28)(2.00 \text{ cm}) = 2.56 \text{ cm}$$

COMENTARIOS El signo negativo en q indica que la imagen está en el mismo medio que el objeto (el lado de luz incidente), en concordancia con el diagrama de rayos y por lo tanto debe ser virtual. El valor positivo de M significa que la imagen es derecha.

PREGUNTA 23.5 ¿Cómo se afectaría la respuesta final si la bola y el observador estuvieran sumergidos en agua? a) Sería menor. b) Sería mayor. c) No habría cambio.

EJERCICIO 23.5 Una moneda está incrustada a 20.0 cm de la superficie de una bola similar de sustancia transparente que tiene 30.0 cm de radio y composición desconocida. Si la imagen de la moneda es virtual y se ubica a 15.0 cm de la superficie, encuentre a) el índice de refracción de la sustancia y b) la amplificación.

RESPUESTAS a) 2.00 b) 1.50

EJEMPLO 23.6 El que se escapó

OBJETIVO Calcular las propiedades de una imagen creada por una superficie refractora plana.

PROBLEMA Un pequeño pez nada a una profundidad d bajo la superficie de un estanque (figura 23.18). a) ¿Cuál es la *profundidad aparente* del pez, visto directamente desde arriba? b) Si el pez mide 12 cm de largo, ¿cuán larga es su imagen?

ESTRATEGIA En este ejemplo, la superficie refractora es plana, de modo que R tiende al infinito. Por lo tanto, se puede usar la ecuación 23.9 para determinar la ubicación de la imagen, que es la ubicación aparente del pez.

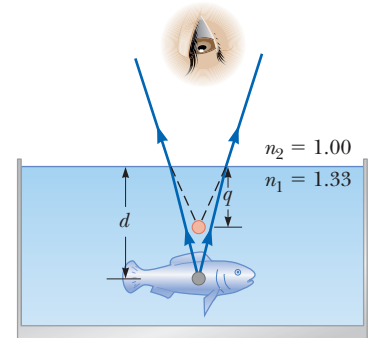


Figura 23.18 (Ejemplo 23.6) La profundidad aparente q a la que se encuentra el pez es menor que la profundidad verdadera d .

SOLUCIÓN

a) Encuentre la profundidad aparente del pez.

Sustituya $n_1 = 1.33$ para agua y $p = d$ en la ecuación 23.9:

$$q = -\frac{n_2}{n_1} p = -\frac{1}{1.33} d = -0.752d$$

b) ¿Cuál es el tamaño de la imagen del pez?

Use la ecuación 23.9 para eliminar q de la ecuación 23.8, la ecuación de amplificación:

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} = -\frac{n_1 \left(-\frac{n_2}{n_1} p\right)}{n_2 p} = 1$$

$$h' = h = 12 \text{ cm}$$

COMENTARIOS De nuevo, dado que q es negativa, la imagen es virtual, como se indica en la figura 23.18. La profundidad aparente es tres cuartos la profundidad real. Por ejemplo, si $d = 4.0$ m, entonces $q = -3.0$ m.

PREGUNTA 23.6 Suponga que un experimento similar se realiza con un objeto sumergido en aceite ($n = 1.5$) a la misma distancia por abajo de la superficie. ¿Cómo se compara la profundidad aparente del objeto, con su profundidad aparente cuando se sumerge en agua? a) La profundidad aparente no cambia. b) La profundidad aparente es mayor. c) La profundidad aparente es menor.

(continúa)

EJERCICIO 23.6 Un pescador con arpón estima que una trucha está a 1.5 m por abajo de la superficie del agua. ¿Cuál es la profundidad real a la que se encuentra al pez?

RESPUESTA 2.0 m

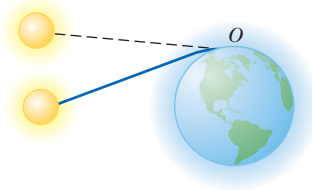
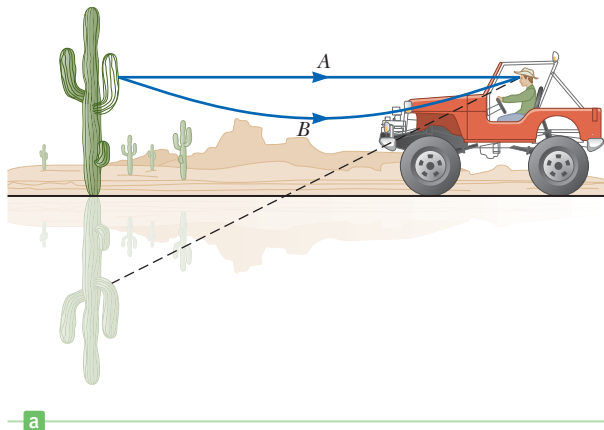


Figura 23.19 Puesto que la luz se refracta en la atmósfera de la Tierra, un observador en O ve el Sol aun cuando caiga por abajo del horizonte.

23.5 Refracción atmosférica

Las imágenes que se forman mediante refracción en la atmósfera conducen a algunos fenómenos interesantes. Uno de tales fenómenos que ocurre diariamente es la visibilidad del Sol en el crepúsculo aun cuando pase por abajo del horizonte. La figura 23.19 muestra por qué ocurre. Los rayos de luz provenientes del Sol golpean la atmósfera de la Tierra (representada mediante el área sombreada alrededor del planeta) y se doblan conforme pasan hacia un medio que tiene un índice de refracción diferente del que tiene el espacio casi vacío en el que viajan. El doblamiento en esta situación difiere un poco del doblamiento que se consideró anteriormente en el que es gradual y continuo conforme la luz se mueve a través de la atmósfera hacia un observador en el punto O . Esto es porque la luz se mueve a través de capas de aire que tienen un índice de refracción que cambia de manera continua. Cuando los rayos llegan al observador, el ojo los sigue de vuelta a lo largo de la dirección desde donde parecieran provenir (que se indica mediante la trayectoria de rayas en la figura). El resultado final es que el Sol parece estar arriba del horizonte incluso después de que cayó bajo él.

El **espejismo** es otro fenómeno de la naturaleza producido por refracción en la atmósfera. Un espejismo se puede observar cuando el suelo está tan caliente que el aire directamente arriba de él está más caliente que el aire en alturas superiores. El desierto es una región donde prevalecen tales circunstancias, pero los espejismos también se ven en las autopistas calientes durante el verano. Las capas de aire a diferentes alturas sobre la Tierra tienen diferentes densidades y diferentes índices de refracción. El efecto que pueden tener estas diferencias se muestra en la figura 23.20a. El observador ve el cielo y un árbol en dos formas distintas. Un grupo de rayos de luz llega al observador mediante la trayectoria en línea recta y el ojo traza estos rayos de vuelta para ver el árbol en la forma normal. Además, un segundo grupo de rayos viaja a lo largo de la trayectoria curva B . Estos rayos se dirigen hacia el suelo y luego se doblan como resultado de refracción. Como consecuencia, el observador también ve una imagen invertida del árbol y el fondo del cielo conforme traza los rayos de vuelta hacia el punto de donde parecen originarse.



John M. Duray IV, Fundamental Photographs, NYC

Figura 23.20 a) Un espejismo se produce por el doblamiento de los rayos de luz en la atmósfera cuando existen grandes diferencias de temperatura entre el suelo y el aire. b) Observe el reflejo de los autos en esta fotografía de un espejismo. El camino parece como si estuviera inundado, pero en realidad está seco.

Puesto que se ven una imagen derecha y una invertida cuando la imagen de un árbol se observa en un charco de agua reflejante, el observador de manera inconsciente apela a sus experiencias pasadas y concluye que el cielo se refleja en el charco de agua enfrente del árbol.

23.6 Lentes delgadas

Una **lente delgada** típica consiste en un trozo de vidrio o plástico, tallado de modo que cada una de sus dos superficies refractantes es un segmento de una esfera o un plano. Las lentes se usan comúnmente para formar imágenes mediante refracción en instrumentos ópticos como cámaras, telescopios y microscopios. La ecuación que relaciona las distancias de objeto e imagen para una lente es virtualmente idéntica a la ecuación del espejo que se dedujo con anterioridad y el método que se usó para deducirla también es similar.

La figura 23.21 muestra algunas formas de lentes representativas. Observe que estas lentes se colocaron en dos grupos. Las de la figura 23.21a son más gruesas en el centro que en el borde y las de la figura 23.21b son más delgadas en el centro que en el borde. Las lentes del primer grupo son ejemplos de **lentes convergentes** y las del segundo grupo son **lentes divergentes**. La razón para estos nombres pronto será evidente.

Como se hizo para los espejos, es conveniente definir un punto llamado **punto focal** para una lente. Por ejemplo, en la figura 23.22a, un grupo de rayos paralelos al eje pasa a través del punto focal F después de convergir por la lente. La distancia desde el punto focal hasta la lente se llama **longitud focal f** . **La longitud focal es la distancia de la imagen que corresponde a una distancia de objeto infinita.** Recuerde que se considera que las lentes son muy delgadas. Como resultado, no hay diferencia si se considera que la longitud focal es la distancia desde el punto focal a la superficie de la lente o la distancia desde el punto focal al centro de la lente, porque la diferencia entre estas dos longitudes es despreciable. Una lente delgada tiene *dos* puntos focales, como se ilustra en la figura 23.22, uno en cada lado de la lente. Un punto focal corresponde a los rayos paralelos que viajan desde la izquierda y el otro corresponde a rayos paralelos que viajan desde la derecha.

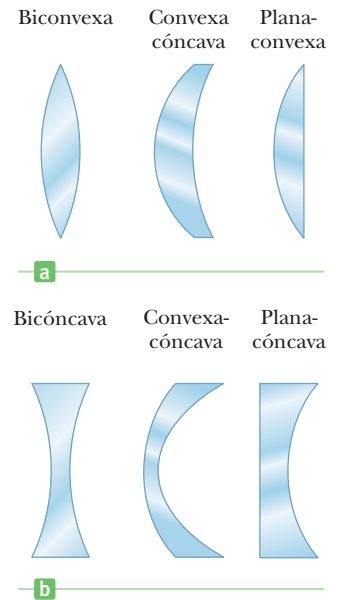
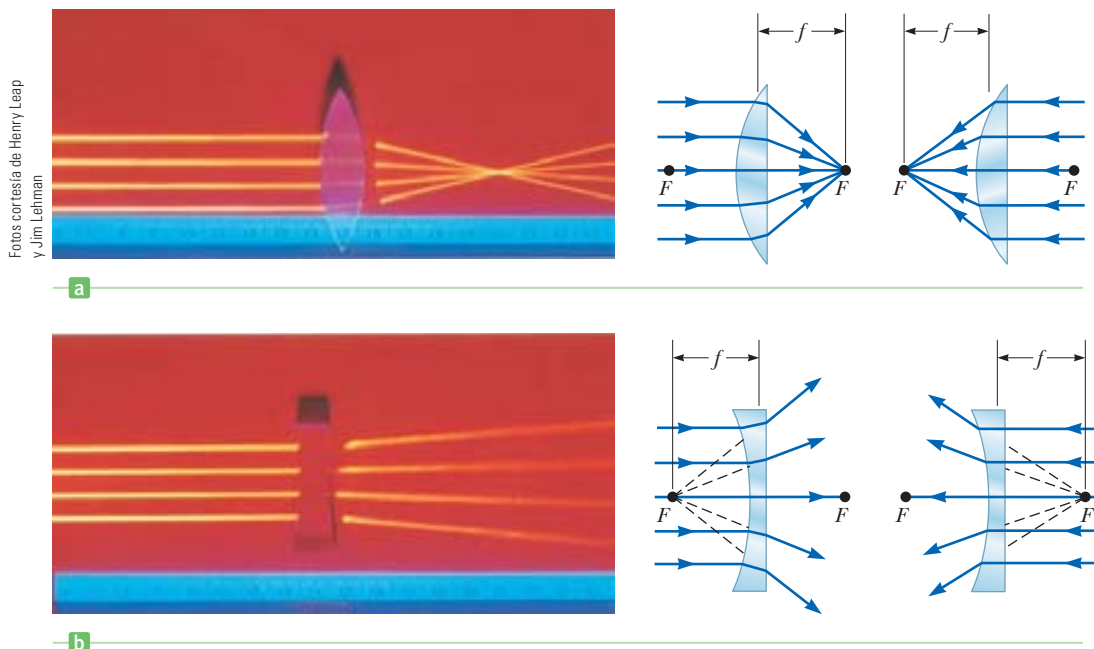


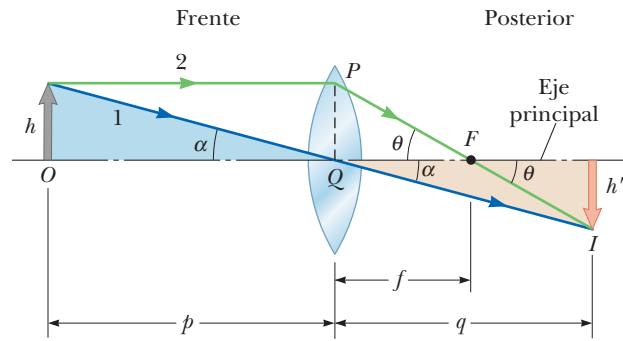
Figura 23.21 Varias formas de lentes. a) Las lentes convergentes tienen longitudes focales positivas y son más gruesas en medio. b) Las lentes divergentes tienen longitudes focales negativas y son más gruesas en los bordes.



Fotos cortesía de Henry Leap y Jim Lehman

Figura 23.22 (Izquierda) Fotografías de los efectos de lentes convergentes y divergentes sobre rayos paralelos. (Derecha) Puntos focales de lentes a) biconvexa y b) bicóncava.

Figura 23.23 Construcción geométrica para desarrollar la ecuación de lente delgada.



Los rayos paralelos al eje divergen después de pasar a través de una lente de forma bicóncava, como se muestra en la figura 23.22b. En este caso, el punto focal se define como el punto donde los rayos divergentes parecen originarse, marcado F en la figura. Las figuras 23.22a y 23.22b indican por qué a estas lentes se les aplican los nombres *convergente* y *divergente*.

Ahora considere un rayo de luz que pasa a través del centro de una lente. Tal rayo se marca rayo 1 en la figura 23.23. Para una lente delgada, un rayo que pasa a través del centro no se desvía. El rayo 2 en la misma figura es paralelo al eje principal de la lente (el eje horizontal que pasa a través de O) y como resultado pasa a través del punto focal F después de la refracción. Los rayos 1 y 2 se intersectan en el punto que es la punta de la flecha imagen.

Observe primero que la tangente del ángulo α se puede encontrar al usar los triángulos sombreados azul y oro en la figura 23.23:

$$\tan \alpha = \frac{h}{p} \quad \text{o} \quad \tan \alpha = -\frac{h'}{q}$$

A partir de este resultado encontramos que

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \tag{23.10}$$

La ecuación para amplificación mediante una lente es la misma que la ecuación para amplificación mediante un espejo. Observe también de la figura 23.23 que

$$\tan \theta = \frac{PQ}{f} \quad \text{o} \quad \tan \theta = -\frac{h'}{q-f}$$

Sin embargo, la altura PQ que se usó en la primera de estas ecuaciones es la misma que h , la altura del objeto. Por lo tanto,

$$\frac{h}{f} = -\frac{h'}{q-f}$$

$$\frac{h'}{h} = -\frac{q-f}{f}$$

Al usar la última ecuación en combinación con la ecuación 23.10 se obtiene

$$\frac{q}{p} = \frac{q-f}{f}$$

que se reduce a

Ecuación de lente delgada ▶
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \tag{23.11}$$

Esta ecuación, llamada **ecuación de lente delgada**, se puede usar con lentes convergentes y divergentes si se adhiere a un conjunto de convenciones de signo. La figura 23.24 es útil para

Tabla 23.3 Convenciones de signos para lentes delgadas

Cantidad	Símbolo	Enfrente	Atrás	Convergente	Divergente
Ubicación de objeto	p	+	-		
Ubicación de imagen	q	-	+		
Radios de lente	R_1, R_2	-	+		
Longitud focal	f			+	-

obtener los signos de p y q , y la tabla 23.3 proporciona las convenciones de signo completas para lentes. Observe que **una lente convergente tiene una longitud focal positiva** bajo esta convención y **una lente divergente tiene una longitud focal negativa**. Por lo tanto, a menudo a estas lentes se les dan los nombres de *positiva* y *negativa*.

La longitud focal para una lente en aire se relaciona con las curvaturas de sus superficies frontal y posterior y al índice de refracción n del material de la lente mediante

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad [23.12]$$

donde R_1 es el radio de curvatura de la superficie frontal de la lente y R_2 es el radio de curvatura de la superficie posterior. (Como con los espejos, el lado de donde se aproxima la luz se denomina arbitrariamente *frente* de la lente.) La tabla 23.3 proporciona las convenciones de signos para R_1 y R_2 . La ecuación 23.12, llamada **ecuación del fabricante de lentes**, permite calcular la longitud focal a partir de las propiedades conocidas de la lente.

Diagramas de rayos para lentes delgadas

Los diagramas de lentes son esenciales para comprender la formación de imagen global mediante una lente delgada o un sistema de lentes. También debe ayudar a clarificar las convenciones de signos ya analizadas. La figura activa 23.25 ilustra este método para tres situaciones de una sola lente. Para ubicar la imagen formada por una lente convergente (figuras activas 23.25a y b), los siguientes tres rayos se dibujan desde la parte superior del objeto:

1. El primer rayo se dibuja paralelo al eje principal. Después de refractarse por la lente, este rayo pasa a través (o parece provenir desde) uno de los puntos focales.
2. El segundo rayo se dibuja a través del centro de la lente. Este rayo continúa en una línea recta.
3. El tercer rayo se dibuja a través del otro punto focal y sale de la lente paralelo al eje principal.



Figura 23.24 Diagrama para obtener los signos de p y q para una lente delgada o una superficie refractante.

◀ Ecuación del fabricante de lentes

Tip 23.4 De nuevo donde la luz está es positivo

Para las lentes, p y q son positivos, donde la luz está, el objeto o la imagen es real. De objetos reales, la luz se origina con el objeto delante de la lente, por lo que p es positivo, como se indica en la figura 23.24. Si la imagen se forma en la parte trasera de la lente, q es positivo allí también.

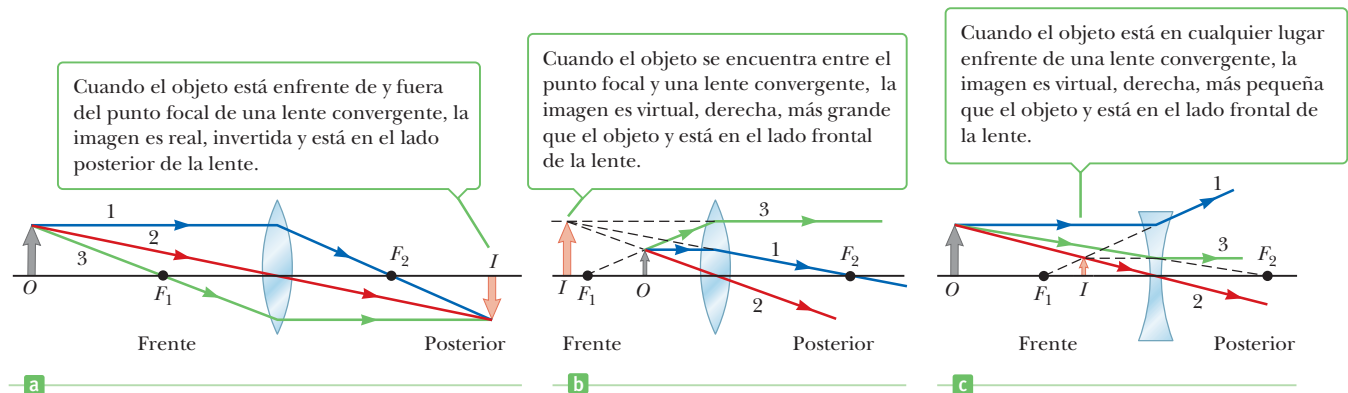


Figura activa 23.25 Diagramas de rayos para ubicar la imagen de un objeto formado por una lente delgada.

Tip 23.5 Sólo se eligen algunos rayos

Aunque los diagramas de rayos en la figura 23.25 sólo muestran tres rayos que salen de un objeto, entre el objeto y su imagen se puede dibujar un número infinito de rayos.

Una construcción similar se usa para ubicar la imagen formada por una lente divergente, como se muestra en la figura activa 23.25c. El punto de intersección de *cualesquiera dos* de los rayos en estos diagramas se puede usar para ubicar la imagen. El tercer rayo sirve como comprobación en la construcción.

Para la lente convergente en la figura activa 23.25a, donde el objeto está *fuera* del punto focal frontal ($p > f$), el diagrama de rayos muestra que la imagen es real e invertida. Cuando el objeto real está *dentro* del punto focal ($p < f$), como en la figura activa 23.25b, la imagen es virtual y derecha. Para la lente divergente de la figura activa 23.25c, la imagen es virtual y derecha.

Examen rápido

23.4 Una bolsa plástica clara para sándwich llena con agua puede actuar como una lente convergente burda en aire. Si la bolsa está llena con aire y se coloca bajo agua, ¿la lente efectiva es a) convergente o b) divergente?

23.5 En la figura activa 23.25a, la flecha azul se sustituye con una que es mucho más alta que la lente. ¿Cuántos rayos desde el objeto golpearán la lente?

23.6 Un objeto se coloca a la izquierda de una lente convergente. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero y cuál es falso? a) La imagen siempre está a la derecha de la lente. b) La imagen puede ser derecha o invertida. c) La imagen siempre es menor o del mismo tamaño que el objeto.

Su éxito al trabajar con problemas de lentes o espejos se determinará principalmente por si comete errores de signo cuando sustituya en las ecuaciones de lentes o espejos. La única forma de garantizar que no comete errores de signo es convertirse en un experto en el uso de las convenciones de signos. La mejor forma de hacerlo es resolver muchos problemas por cuenta propia y construir diagramas de rayos de comprobación. Observar a su instructor o leer los problemas de ejemplo no sustituye a la práctica.

FÍSICA APLICADA 23.5 Máscaras de visión y buceo

Las máscaras de buceo a menudo tienen lentes construidas en el vidrio de la careta para los buzos que no tienen visión perfecta. Esta lente permite al individuo bucear sin la necesidad de gafas porque la careta realiza la refracción necesaria para producir visión clara. Las gafas normales tienen lentes que son curvos en ambas superficies, frontal y posterior. Las lentes en la careta de una máscara de buceo con frecuencia tienen superficies curvas sólo en el interior del vidrio. ¿Por qué es aconsejable este diseño?

SOLUCIÓN La razón principal para curvar sólo la superficie interior de la lente en la careta de una máscara de buceo es

permitir al buzo ver con claridad mientras está bajo el agua y en el aire. Si hubiese superficies curvas tanto en el frente como en la parte posterior de la lente de buceo, habría dos refracciones. La lente se podría diseñar de modo que estas dos refracciones produzcan visión clara mientras el buzo está en el aire. Sin embargo, cuando el buzo estuviera bajo el agua, la refracción entre el agua y el vidrio en la primera interfaz diferiría porque el índice de refracción del agua es diferente de la del aire. En consecuencia, la visión del buzo no sería clara bajo el agua. ■

EJEMPLO 23.7 Imágenes formadas por una lente convergente

OBJETIVO Calcular cantidades geométricas asociadas con una lente convergente.

PROBLEMA Una lente convergente, con longitud focal de 10.0 cm, forma imágenes de un objeto situado a varias distancias.
a) Si el objeto se coloca a 30.0 cm de la lente, ubique la imagen, establezca si es real o virtual y encuentre su amplificación.
b) Repita el problema cuando el objeto esté a 10.0 cm y **c)** de nuevo cuando el objeto esté a 5.00 cm de la lente.

ESTRATEGIA Los tres problemas sólo requieren sustitución en la ecuación de lentes delgadas y la ecuación de amplificación asociada, ecuaciones 23.10 y 23.11, respectivamente. Debe seguir las convenciones de la tabla 23.3.

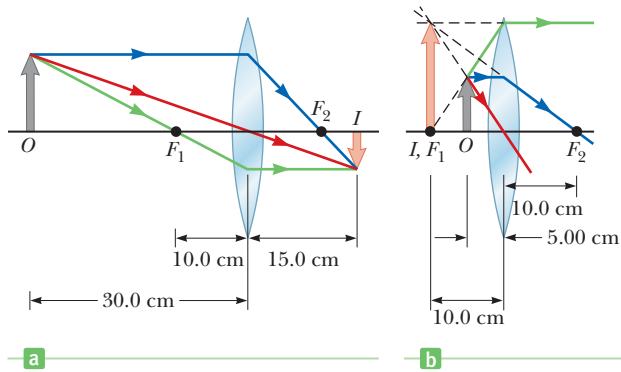


Figura 23.26 (Ejemplo 23.7)

SOLUCIÓN

a) Encuentre la distancia de la imagen y describa la imagen cuando el objeto se coloca a 30.0 cm.

En la figura 23.26a se muestra el diagrama de rayos. Sustituya valores en la ecuación de lentes delgadas para ubicar la imagen:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{30.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q , la distancia de la imagen. Es positiva, así que la imagen es real y está en el lado lejano de la lente:

$$q = +15.0 \text{ cm}$$

La amplificación de la lente se obtiene de la ecuación 23.10. M es negativa y menor que 1 en valor absoluto, así que la imagen es invertida y menor que el objeto:

$$M = -\frac{q}{p} = -\frac{15.0 \text{ cm}}{30.0 \text{ cm}} = -0.500$$

b) Repita el problema, cuando el objeto se coloca a 10.0 cm.

Ubique la imagen al sustituir en la ecuación de lente delgada:

$$\frac{1}{10.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} \rightarrow \frac{1}{q} = 0$$

Esta ecuación se satisface sólo en el límite cuando q tiende a infinito igual que cuando M lo hace también.

$$q \rightarrow \infty$$

c) Repita el problema cuando el objeto se coloca a 5.00 cm de la lente.

Observe el diagrama de rayos que se muestra en la figura 23.26b. Sustituya en la ecuación de lente delgada para ubicar la imagen:

$$\frac{1}{5.00 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q , que es negativa, lo que significa que está en el mismo lado que el objeto y es virtual:

$$q = -10.0 \text{ cm}$$

Sustituya los valores de p y q en la ecuación de amplificación. M es positivo y mayor que 1, así que la imagen es derecha y duplica el tamaño del objeto:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-10.0 \text{ cm}}{5.00 \text{ cm}}\right) = +2.00$$

COMENTARIOS La habilidad de una lente para amplificar objetos condujo a la invención de gafas para lectura, microscopios y telescopios.

PREGUNTA 23.7 Si la lente se usa para formar una imagen del Sol sobre una pantalla, ¿cuán lejos de la lente debe colocarse la pantalla?

EJERCICIO 23.7 Suponga que la imagen de un objeto está derecha y aumentada 1.75 veces cuando el objeto se coloca a 15.0 cm de una lente. Encuentre la ubicación de la imagen y la longitud focal de la lente.

RESPUESTAS a) -26.3 cm (virtual, en el mismo lado que el objeto) b) 34.9 cm

■ EJEMPLO 23.8 El caso de una lente divergente

OBJETIVO Calcular cantidades geométricas asociadas con una lente divergente.

PROBLEMA Repita el problema del ejemplo 23.7 para una lente *divergente* con 10.0 cm de longitud focal.

ESTRATEGIA Una vez más, la sustitución en la ecuación de lente delgada y la ecuación de amplificación asociada, junto con las convenciones de la tabla 23.3, resuelven las diversas partes. La única diferencia es la longitud focal negativa.

SOLUCIÓN

a) Ubique la imagen y su amplificación si el objeto está a 30.0 cm.

El diagrama de rayos está dado en la figura 23.27a. Aplique la ecuación de lente delgada con $p = 30.0$ cm para ubicar la imagen:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{30.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = -\frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q , que es negativa y, por lo tanto, virtual:

$$q = -7.50 \text{ cm}$$

Sustituya en la ecuación 23.10 para obtener la amplificación. Dado que M es positiva y tiene valor absoluto menor que 1, la imagen es derecha y menor que el objeto:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-7.50 \text{ cm}}{30.0 \text{ cm}}\right) = +0.250$$

b) Localice la imagen y determine su amplificación si el objeto está a 10.0 cm de la lente.

Aplique la ecuación de lente delgada y considere $p = 10.0$ cm:

$$\frac{1}{10.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = -\frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q (una vez más, el resultado es negativo, de modo que la imagen es virtual):

$$q = -5.00 \text{ cm}$$

Calcule la amplificación. Puesto que M es positiva y tiene valor absoluto menor que 1, la imagen es derecha y menor que el objeto:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-5.00 \text{ cm}}{10.0 \text{ cm}}\right) = +0.500$$

c) Localice la imagen y encuentre su amplificación cuando el objeto está en 5.00 cm.

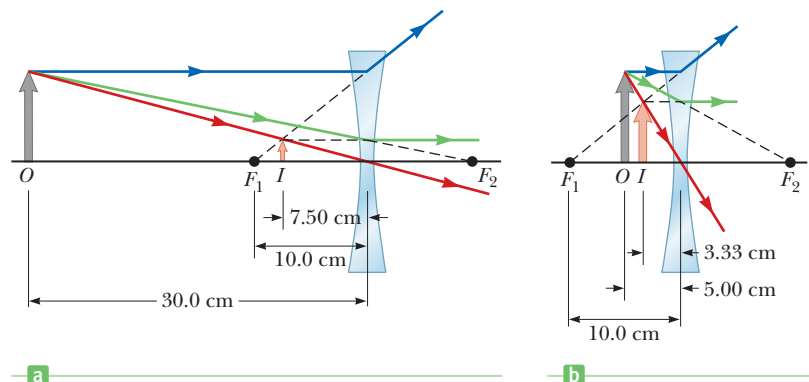
El diagrama de rayos se proporciona en la figura 23.27b. Sustituya $p = 5.00$ cm en la ecuación de lente delgada para ubicar la imagen:

$$\frac{1}{5.00 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = -\frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q . La respuesta es negativa, así que una vez más la imagen es virtual:

$$q = -3.33 \text{ cm}$$

Figura 23.27 (Ejemplo 23.8)



Calcule la amplificación. Puesto que M es positiva y menor que 1, la imagen es derecha y menor que el objeto:

$$M = -\left(\frac{-3.33 \text{ cm}}{5.00 \text{ cm}}\right) = +0.666$$

COMENTARIOS Advierta que, en cada caso, la imagen es virtual, por ende está en el mismo lado de la lente que el objeto. Más aún, la imagen es menor que el objeto. Para una lente divergente y un objeto real, éste *siempre* es el caso, como se puede demostrar matemáticamente.

PREGUNTA 23.8 ¿Una lente divergente se puede usar como lente de aumento? Explique.

EJERCICIO 23.8 Repita el cálculo y encuentre la posición de la imagen y la amplificación si el objeto está a 20.0 cm de la lente.

RESPUESTAS $q = -6.67 \text{ cm}$, $M = 0.334$

Combinaciones de lentes delgadas

Muchos dispositivos ópticos útiles requieren dos lentes. Manipular problemas que involucren dos lentes no es muy diferente de lidiar con un problema de una sola lente dos veces. Primero, la imagen producida por la primera lente se calcula como si la segunda lente no estuviera presente. Entonces la luz se aproxima a la segunda lente *como si* hubiese llegado de la imagen formada por la primera lente. En consecuencia, **la imagen formada por la primera lente se trata como el objeto para la segunda lente**. La imagen formada por la segunda lente es la imagen final del sistema. Si la imagen formada por la primera lente se encuentra en el lado posterior de la segunda lente, la imagen se trata como un objeto virtual para la segunda lente, de modo que p es negativa. El mismo procedimiento se puede extender a un sistema de tres o más lentes. La amplificación global de un sistema de lentes delgadas es el *producto* de las amplificaciones de las lentes separadas. También es posible combinar lentes delgadas y espejos como se muestra en el ejemplo 23.10

■ EJEMPLO 23.9 Dos lentes en fila

OBJETIVO Calcular cantidades geométricas para un par de lentes sucesivos.

PROBLEMA Dos lentes convergentes se colocan separadas 20.0 cm, como se muestra en la figura 23.28a (página 812), con un objeto a 30.0 cm enfrente de la lente 1 a la izquierda. **a)** Si la lente 1 tiene una longitud focal de 10.0 cm, ubique la imagen formada por esta lente y determine su amplificación. **b)** Si la lente 2 a la derecha tiene una longitud focal de 20.0 cm, localice la imagen final formada y encuentre la amplificación total del sistema.

ESTRATEGIA Aplique la ecuación de lente delgada a cada lente. La imagen formada por la lente 1 se trata como el objeto para la lente 2. Además, use el hecho de que la amplificación total del sistema es el producto de las amplificaciones producidas por las lentes separadas.

SOLUCIÓN

a) Ubique la imagen y determine la amplificación de la lente 1.

Observe el diagrama de rayos, figura 23.28b. Aplique la ecuación de lente delgada a la lente 1:

$$\frac{1}{30.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q , que es positiva y por lo tanto a la derecha de la primera lente:

$$q = +15.0 \text{ cm}$$

Calcule la amplificación de la lente 1:

$$M_1 = -\frac{q}{p} = -\frac{15.0 \text{ cm}}{30.0 \text{ cm}} = -0.500$$

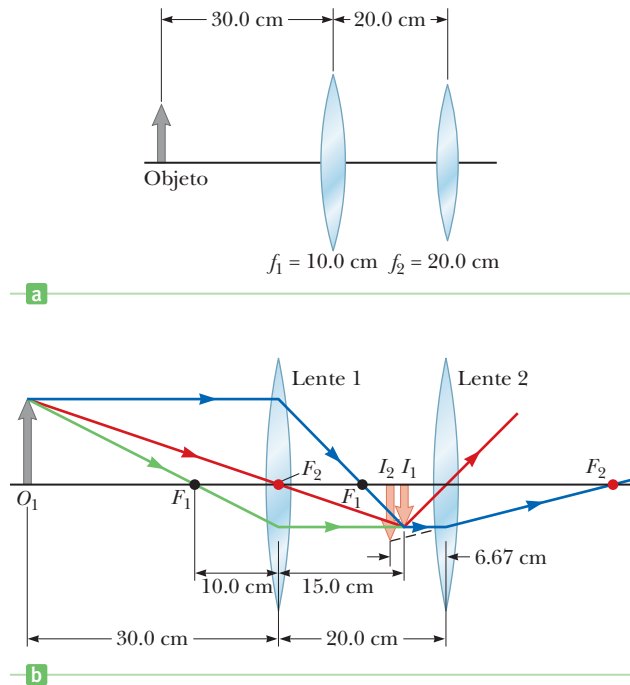
b) Ubique la imagen final y encuentre la amplificación total.

La imagen formada por la lente 1 se convierte en el objeto para la lente 2. Calcule la distancia del objeto para la lente 2:

$$p = 20.0 \text{ cm} - 15.0 \text{ cm} = 5.00 \text{ cm}$$

(continúa)

Figura 23.28 (Ejemplo 23.9)



Una vez más aplique la ecuación de lente delgada a la lente 2 para ubicar la imagen final:

$$\frac{1}{5.00 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{20.0 \text{ cm}}$$

$$q = -6.67 \text{ cm}$$

Calcule la amplificación de la lente 2:

$$M_2 = -\frac{q}{p} = -\frac{(-6.67 \text{ cm})}{5.00 \text{ cm}} = +1.33$$

Multiplique las dos amplificaciones para obtener la amplificación global del sistema:

$$M = M_1 M_2 = (-0.500)(1.33) = -0.665$$

COMENTARIOS El signo negativo para M indica que la imagen final está invertida y es menor que el objeto porque el valor absoluto de M es menor que 1. Puesto que q es negativa, la imagen final es virtual.

PREGUNTA 23.9 Si la lente 2 se mueve de modo que está a 40 cm de distancia de la lente 1, ¿la imagen final sería derecha o invertida?

EJERCICIO 23.9 Si las dos lentes en la figura 23.28 están separadas 10.0 cm, ubique la imagen final y encuentre la amplificación del sistema. *Sugerencia:* ¡El objeto para la segunda lente es virtual!

RESPUESTAS 4.00 cm detrás de la segunda lente, $M = -0.400$

EJEMPLO 23.10 Lente delgada y un espejo cóncavo

OBJETIVO Resolver un problema que involucra tanto una lente y un espejo.

PROBLEMA Un objeto se coloca 20.0 cm a la derecha de un espejo cóncavo con distancia focal 12.0 cm y 30.0 cm a la izquierda de una lente convergente con distancia focal de 10.0 cm, como en la figura 23.29. Localizar **a)** la imagen formada por la lente sola, **b)** la imagen creada por el espejo solo, y **c)** la imagen creada tanto por el espejo y la lente. **d)** El espejo se mueve de modo que es de 6.00 cm de distancia del objeto. Localice la imagen formada por el espejo y la lente.

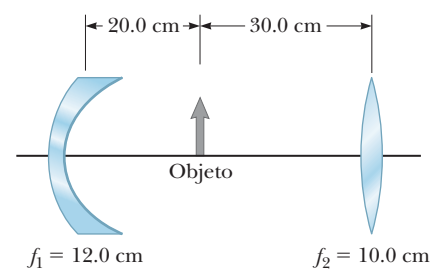


Figura 23.29 (Ejemplo 23.10)

ESTRATEGIA El inciso a) es una sencilla aplicación de la ecuación de la lente delgada, la ecuación 23.11. El inciso b) se puede calcular de la ecuación 23.6. Utilizando la imagen formada por el espejo como el objeto de la lente, encuentre la ubicación de la imagen solicitada en el inciso c), para la luz que se refleja primero en el espejo antes de pasar a través de la lente.

SOLUCIÓN

a) Localice sólo la imagen formada por la lente.

Aplique la ecuación 23.11:

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2}$$

Sustituya valores y resuelva para la posición q_2 de la imagen:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{30.0 \text{ cm}} = \frac{1}{15.0 \text{ cm}}$$

$$q_2 = 15.0 \text{ cm}$$

b) Localice la imagen creada sólo por el espejo.

Aplique la ecuación 23.6:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1}$$

Sustituya valores para f_1 y p_1 , ambos positivos y resuelva para q_1 :

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{12.0 \text{ cm}} - \frac{1}{20.0 \text{ cm}} = \frac{1}{30.0 \text{ cm}}$$

$$q_1 = 30.0 \text{ cm}$$

c) Localice la imagen formada por el espejo y la lente.

Aplique la ecuación 23.11 para la imagen hallada en el inciso b), la cual se vuelve un objeto real para la lente, considerando que la imagen se forma a 20.0 cm de la lente:

$$\frac{1}{q_{2f}} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_{2f}} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{20.0 \text{ cm}} = \frac{1}{20.0 \text{ cm}}$$

$$q_{2f} = 20.0 \text{ cm}$$

d) El espejo se mueve a 6.00 cm hacia la izquierda del objeto. Localice la imagen formada por el espejo y la lente.

El objeto está ahora más cerca del espejo. Encuentre la nueva posición de la imagen creada por el espejo:

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{12.0 \text{ cm}} - \frac{1}{6.0 \text{ cm}} = -\frac{1}{12.0 \text{ cm}}$$

$$q_1 = -12.0 \text{ cm}$$

La imagen creada por el espejo es virtual y por lo tanto, detrás del espejo. Sin embargo, ésta actúa igual que un objeto real para la lente. Aplique la ecuación 23.11 con $p_2 = 30.0 \text{ cm} + 18.0 \text{ cm} = 48.0 \text{ cm}$:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{48.0 \text{ cm}} = \frac{19}{2.40 \times 10^2 \text{ cm}}$$

$$q_2 = 12.6 \text{ cm}$$

OBSERVACIONES Hay dos imágenes finales creadas a la derecha de la lente, como se esperaba. A medida que el espejo se mueve más cerca del objeto, la imagen final, debida al espejo y a la lente se mueve más cerca de ésta. La imagen del inciso a) se invierte, sin embargo, la imagen del inciso c) pasa a través de dos inversiones, por lo tanto está en posición vertical. La imagen virtual en el espejo del inciso d) está en posición vertical, por lo que la imagen de la lente está invertida.

PREGUNTA 23.10 ¿Es posible tener un objeto virtual de un espejo? Explicar con un ejemplo.

EJERCICIO 23.10 El mismo espejo y lentes se vuelven a colocar de manera que el espejo es 24.0 cm a la izquierda de la lente y el objeto es de 20.0 cm a la derecha de la lente. Busque la imagen de a) de la lente solo, b) la primera imagen formada por el espejo y c) la imagen final, la segunda formada por la lente.

RESPUESTAS a) 20.0 cm a la izquierda de la lente b) 6.00 cm detrás del espejo c) 15.0 cm a la derecha de la lente

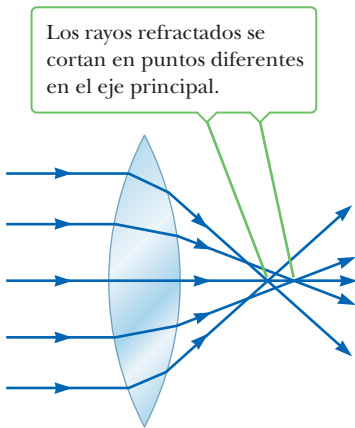


Figura 23.30 Aberración esférica producida por una lente convergente. ¿Una lente divergente produce aberración esférica?

23.7 Aberraciones de lentes y espejos

Uno de los problemas básicos de los sistemas que contienen espejos y lentes es la calidad imperfecta de las imágenes, que principalmente es resultado de defectos en la forma. La teoría simple de espejos y lentes supone que los rayos forman pequeños ángulos con el eje principal y que todos los rayos que llegan a la lente o espejo desde una fuente puntual se enfocan en un solo punto, lo que produce una imagen clara. Esto no siempre es cierto en el mundo real. Donde no se sostienen las aproximaciones utilizadas en esta teoría, se forman imágenes imperfectas.

Si uno quiere analizar la formación de imágenes con precisión, es necesario trazar cada rayo y usar la ley de Snell en cada superficie refractante. Este procedimiento muestra que no hay una sola imagen puntual; en vez de ello, la imagen es borrosa. Las desviaciones de las imágenes reales (imperfectas) del ideal predicho por la teoría simple se llaman **aberraciones**. Dos tipos comunes de aberraciones son la aberración esférica y la aberración cromática.

Aberración esférica

La aberración esférica resulta del hecho de que los puntos focales de los rayos de luz que pasan lejos del eje principal de una lente (o espejo) esférica son diferentes de los puntos focales de los rayos con la misma longitud de onda que pasan cerca del eje. La figura 23.30 ilustra la aberración esférica para rayos paralelos que pasan a través de una lente convergente. Los rayos cerca de la parte media de la lente forman imagen más lejos de la lente que los rayos en los bordes. En consecuencia, no hay una sola longitud focal para una lente esférica.

La mayoría de las cámaras están equipadas con una apertura ajustable para controlar la intensidad de la luz y, cuando es posible, reducir la aberración esférica. (Una apertura es una abertura que controla la cantidad de luz que se transmite a través de la lente.) Conforme se reduce el tamaño de la apertura, se producen imágenes más nítidas porque sólo la porción central de la lente se expone a la luz incidente cuando la apertura es muy pequeña. Sin embargo, al mismo tiempo, menos luz forma imágenes progresivamente. Para compensar esta pérdida, se usa un tiempo de exposición más largo. Un ejemplo de los resultados obtenidos con pequeñas aperturas es la imagen clara que produce una cámara de orificio, con un tamaño de apertura de aproximadamente 0.1 mm.

En el caso de los espejos que se utilizan para objetos muy distantes, uno puede eliminar, o al menos minimizar, la aberración esférica al emplear una superficie parabólica en lugar de esférica. Sin embargo, las superficies parabólicas no se usan en muchas aplicaciones, porque su fabricación es muy costosa con óptica de alta calidad. Los rayos de luz paralelos que inciden sobre tal superficie se enfocan en un punto común. Las superficies reflejantes parabólicas se usan en un gran número de telescopios astronómicos para mejorar la calidad de la imagen. También se usan en linternas, en las que un haz de luz casi paralelo se produce a partir de una pequeña lámpara colocada en el foco de la superficie reflejante.

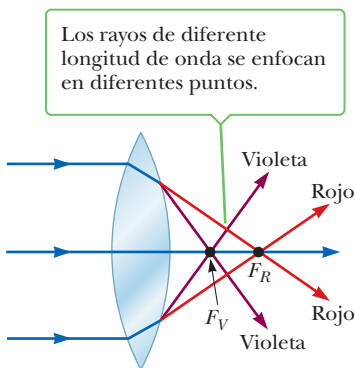


Figura 23.31 Aberración cromática producida por una lente convergente.

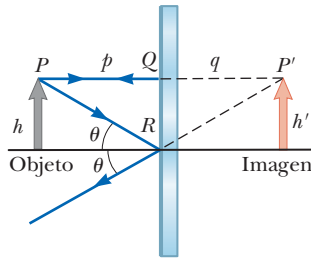
Aberración cromática

Diferentes longitudes de onda refractadas por una lente se enfocan en diferentes puntos, lo que da lugar a aberración cromática. En el capítulo 22 describimos cómo el índice de refracción de un material varía con la longitud de onda. Cuando pasa luz blanca a través de una lente, por ejemplo, los rayos de luz violeta se refractan más que los rayos de luz roja (véase la figura 23.31), de modo que la longitud focal para luz roja es mayor que para luz violeta. Otras longitudes de onda (que no se muestran en la figura) tendrían puntos focales intermedios. La aberración cromática para una lente divergente es opuesta a la de una lente convergente. La aberración cromática se puede reducir enormemente mediante una combinación de lentes convergentes y divergentes.

RESUMEN

23.1 Espejos planos

Las imágenes se forman donde los rayos de luz se intersecan o donde parecen originarse. Cuando la luz se interseca o pasa a través de un punto de imagen se forma una **imagen real**. En una **imagen virtual** la luz no pasa a través del punto de imagen, sino que parece divergir de él.



Una construcción geométrica para buscar la imagen de un objeto colocado delante de un espejo plano. Debido a que los triángulos PQR y P'QR son idénticos, $p = |q|$ y $h = h'$.

La imagen formada por un espejo plano tiene las siguientes propiedades: **1.** La imagen está tan lejos detrás del espejo como está en frente de él. **2.** La imagen no tiene aumento, es virtual y derecha.

23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos

23.3 Espejos convexos y convenciones de signo

La **amplificación M** de un espejo esférico se define como la razón de la **altura de la imagen h'** a la **altura del objeto h**, que es el negativo de la razón de la distancia de la imagen q a la distancia del objeto p :

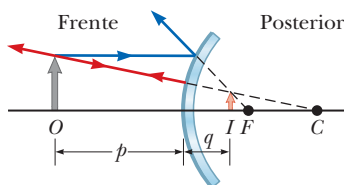
$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad [23.2]$$

La **distancia del objeto** y la **distancia de la imagen** para un espejo esférico de radio R se relacionan mediante la **ecuación del espejo**:

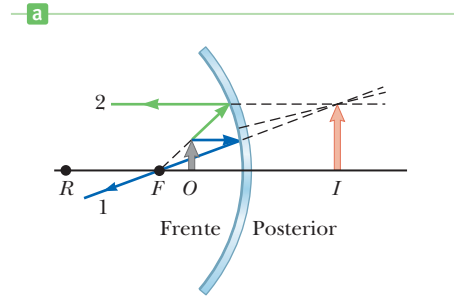
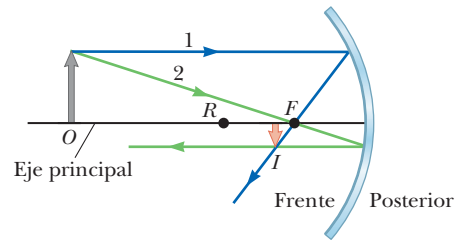
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad [23.6]$$

donde $f = R/2$ es la **longitud focal** del espejo.

Las ecuaciones 23.2 y 23.6 se sostienen para espejos cóncavos y convexos, sujetos a las convenciones de signo dadas en la tabla 23.1.



La imagen de un espejo convexo es virtual, derecha y detrás del espejo.

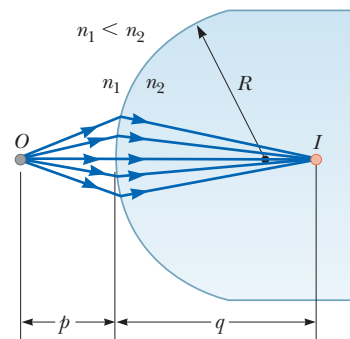


a) La imagen de un espejo cóncavo es real e invertida cuando el objeto está fuera del punto focal, es decir, $p > f$. La imagen es más grande que el objeto cuando $f < p < R$, y más pequeña que el objeto cuando $p > R$. b) La imagen de un espejo cóncavo es virtual, derecha y más grande que el objeto cuando $p < f$.

23.4 Imágenes formadas por refracción

Una imagen se puede formar mediante refracción en una superficie esférica de radio R . Las distancias del objeto y de la imagen para refracción de tal superficie se relacionan mediante

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad [23.7]$$



Una imagen que se forma por la refracción en una superficie esférica. Los rayos que forman ángulos pequeños con el eje principal divergen de un punto en el objeto O y pasa por el punto imagen I .

La **amplificación de una superficie refractante** es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} \quad [23.8]$$

donde el objeto se ubica en el medio con índice de refracción n_1 y la imagen se forma en el medio con índice de refracción n_2 . Las ecuaciones 23.7 y 23.8 están sujetas a las convenciones de signo de la tabla 23.2.

23.6 Lentes delgadas

La **amplificación de una lente delgada** es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad [23.10]$$

Las distancias del objeto y de la imagen de una lente delgada se relacionan mediante la **ecuación de lente delgada**:

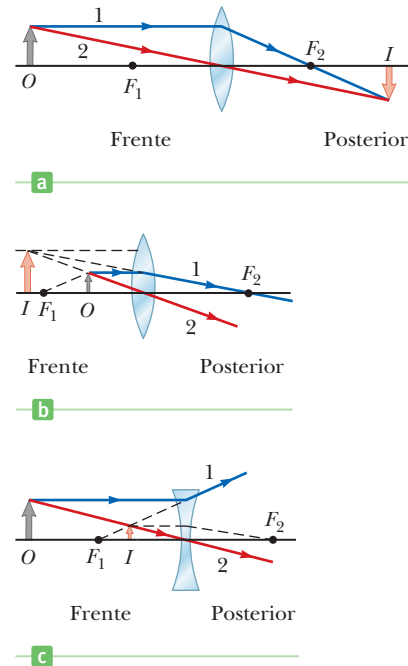
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad [23.11]$$

Las ecuaciones 23.10 y 23.11 están sujetas a las convenciones de signos de la tabla 23.3.

23.7 Aberraciones de lentes y espejos

Las **aberraciones** son responsables de la formación de imágenes imperfectas por lentes y espejos. La **aberración esférica** es consecuencia de que los puntos focales de los rayos de luz lejos del eje principal de una lente o espejo esférico son diferentes de los puntos focales de los rayos que pasan a través del centro. La **aberración cromática** surge porque los rayos de luz

de diferentes longitudes de onda se enfocan en diferentes puntos cuando se refractan mediante una lente.



Diagramas de rayos para localizar la imagen de un objeto. a) El objeto se encuentra fuera del punto focal de una lente convergente. b) El objeto está dentro del punto focal de una lente convergente. c) El objeto se encuentra fuera del punto focal de una lente divergente.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Cuando la imagen de un objeto real se forma mediante un espejo plano, ¿cuál de los siguientes enunciados siempre es cierto? a) La imagen es mayor que el objeto. b) La imagen tiene el mismo tamaño que el objeto. c) La imagen es virtual. d) La imagen es más pequeña que el objeto. e) La imagen es derecha.
2. Si la cara de José está a 30.0 cm por delante de un espejo cóncavo de afeitarse crea una imagen vertical 1.50 veces mayor que el objeto, ¿cuál es la longitud focal del espejo? a) 12.0 cm b) 20.0 cm c) 70.0 cm d) 90.0 cm e) ninguna de las respuestas.
3. Una lente delgada convergente tiene una longitud focal de 8.00 cm. Si una imagen invertida real se ubica a 12.0 cm a la derecha de la lente, ¿dónde se ubica el objeto? a) 12.0 cm a la izquierda de la lente b) 24.0 cm a la derecha de la lente c) 24.0 cm a la izquierda de la lente d) 18.0 cm a la derecha de la lente e) 18.0 cm a la izquierda de la lente.
4. Una lente convergente tiene un objeto virtual ubicado a una distancia finita. ¿Cuál de las siguientes expresiones debe ser cierta? a) La imagen es virtual. b) La imagen es real. c) $p < 0$ d) $p > 0$ e) $f > q$
5. Un objeto se coloca a 16.0 cm de un espejo convexo con una longitud focal de 6.00 cm de magnitud. ¿Cuál es la ubicación de la imagen? a) 9.60 cm enfrente del espejo b) 4.36 cm enfrente del espejo c) 9.60 cm detrás del espejo d) 4.36 cm detrás del espejo e) 10.0 cm enfrente del espejo.
6. Un objeto real está a 10.0 cm a la izquierda de una delgada lente convergente que tiene una longitud focal de 16.0 cm de magnitud. ¿Cuál es la ubicación de la imagen? a) 6.15 cm a la derecha de la lente b) 6.15 cm a la izquierda de la lente c) 26.7 cm a la derecha de la lente d) 26.7 cm a la izquierda de la lente e) 6.00 cm a la derecha de la lente
7. Cuando la imagen de un objeto real se forma mediante un espejo cóncavo, ¿cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) La imagen siempre es real. b) La imagen siempre es virtual. c) Si la distancia del objeto es menor que la longitud focal, la imagen es real. d) Si la distancia del objeto es mayor que la longitud focal, la imagen es real. e) Si $q < 0$, la imagen es virtual.
8. Un objeto se ubica a 50 cm de una lente convergente que tiene una longitud focal de 15 cm. ¿Cuál de los siguientes

- es cierto en cuanto a la imagen formada por la lente?
- Es virtual, derecha y más grande que el objeto.
 - Es virtual, invertida y más pequeña que el objeto.
 - Es real, invertida y más pequeña que el objeto.
 - Es real, invertida y más grande que el objeto.
 - Es real, derecha y más grande que el objeto.
- Un espejo convexo forma la imagen de un objeto real. ¿Cuál de los siguientes enunciados siempre es cierto?
 - La imagen es real y derecha.
 - La imagen es virtual y más grande que el objeto.
 - La imagen es virtual y derecha.
 - La imagen es más grande que el objeto.
 - La imagen es virtual e invertida.
 - Para un objeto real, ¿la imagen formada por una lente divergente siempre es a) virtual e invertida, b) virtual y derecha, c) real y derecha, d) real e invertida o e) real y ampliada?
 - Una persona desde un barco de pesca con arpón ve un pez inmóvil a pocos metros en una dirección alrededor de 30° por debajo de la horizontal. Para arponear al pez, y suponiendo que el arpón no cambia de dirección al en-

trar en el agua, la persona podría a) ¿apuntar por encima de donde él ve el pez? b) ¿apuntar por debajo del pez, o c) ¿apuntar precisamente al pez?

- Un objeto, representado por una flecha de color gris, se coloca delante de un espejo plano. ¿Cuál de los diagramas de la figura POM23.12 describe mejor la imagen, representada por la flecha de color rosa?

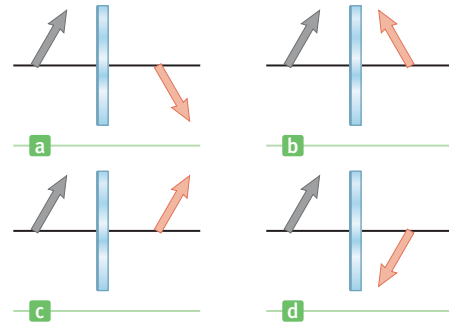


Figura POM23.12

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Coloque una fotografía suya en un espejo de baño. Párese a varios centímetros de distancia del espejo. ¿Puede enfocar sus ojos *tanto* en la fotografía pegada al espejo *como* en su imagen en el espejo *al mismo tiempo*? ¿Dónde está la imagen de usted mismo?
- ¿Por qué un torrente claro siempre parece menos profundo de lo que en realidad es?
- Un espejo plano crea una imagen virtual de su cara. Suponga que el espejo plano se combina con otro elemento óptico. ¿El espejo puede formar una imagen real en tal combinación?
- Explique por qué un espejo no puede dar lugar a aberración cromática.
- Un espejismo común se forma cuando el aire en forma gradual se vuelve más frío conforme aumenta la altura sobre el suelo. ¿Qué puede ocurrir si el aire gradualmente se vuelve más caliente conforme aumenta la altura? A menudo esto ocurre sobre cuerpos de agua o suelo cubierto con nieve; el efecto se llama *espejismo emergente (looming)*.
- Una imagen virtual con frecuencia se describe como una imagen a través de la cual los rayos de luz en realidad no viajan, como lo hacen para una imagen real. ¿Una imagen virtual se puede fotografiar?
- Suponga que quiere usar una lente convergente para proyectar la imagen de dos árboles sobre una pantalla. Un árbol está a una distancia x de la lente; el otro está a $2x$, como en la figura PC23.7. Ajuste la pantalla de modo que el árbol cercano esté en foco. Si ahora quiere que el árbol lejano esté en foco, ¿usted acerca o aleja la pantalla de la lente?

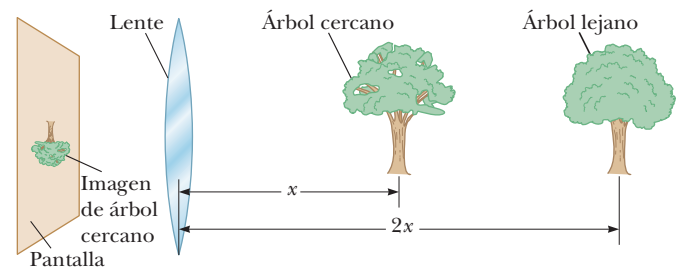


Figura PC23.7

- Las lentes que se usan en las gafas, ya sean convergentes o divergentes, siempre se diseñan de tal modo que la parte media de la lente se curve alejándose del ojo. ¿Por qué?
- En una novela de Julio Verne, a un trozo de hielo se le da forma de lente de aumento para enfocar la luz solar y prender fuego. ¿Esto es posible?
- Si se coloca un cilindro de vidrio sólido o plástico claro sobre las palabras LEAD OXIDE (óxido de plomo) y se ve de lado, como se muestra en la figura PC23.10, la palabra LEAD parece invertida, pero la palabra OXIDE no. Explique.



Figura PC23.10

- ¿Se puede hacer una lente convergente que diverja la luz si se coloca en un líquido? ¿Y qué hay de un espejo convergente?
- La luz de un objeto pasa a través de una lente y forma una imagen visible sobre una pantalla. Si la pantalla se retira, ¿podría ver la imagen a) si permanece en su posición actual y b) si pudiera mirar la lente a lo largo de su eje, más allá de la posición original de la pantalla?
- ¿Por qué la longitud focal de un espejo no depende del material del espejo cuando la longitud focal de una lente sí depende del material de la lente?
- La imagen invertida de un objeto se observa sobre una pantalla desde el lado que da frente a una lente convergente. Entonces se introduce una tarjeta opaca que cubre sólo la mitad superior de la lente. ¿Qué sucede con la imagen sobre la pantalla? a) Desaparecería la mitad de la imagen. b) Aparecería la imagen completa y permanecería invariable. c) Desaparecería la mitad de la imagen y sería más débil. d) Aparecería toda la imagen, pero sería más débil.
- ¿Por qué algunos vehículos de emergencia tienen escrita la palabra **AIDAJU8MA** en el frente?

PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, **2.** denota problema intermedio,
- denota problema de alto reto
- 1.** denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- I.** denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

23.1 Espejos planos

- a) ¿El espejo de su baño lo muestra a usted más viejo o más joven de su edad real? b) Calcule una estimación del orden de magnitud para la diferencia de edad, con base en datos que especifique.
- C/C** Dos espejos planos están uno frente al otro, separados 3.00 m y una mujer está de pie entre ellos. La mujer está frente a uno de los espejos a una distancia de 1.0 m, con la palma de la mano izquierda frente al espejo más cercano. a) ¿Cuál es la posición aparente de la imagen más cercana de su mano izquierda, medida desde la superficie del espejo frente a ella b) Muestra la palma de la mano o la parte trasera de la mano? c) ¿Cuál es la posición de la siguiente imagen? d) ¿Muestra la palma de su mano o la parte trasera de su mano? e) ¿Cuál es la posición de la tercera imagen más cercana? f) ¿Muestra la palma de la mano o la parte trasera de la mano?. g) ¿Cuáles de las imágenes son reales y cuáles son virtuales?
- Una persona camina en una habitación que tiene, en paredes opuestas, dos espejos planos que producen múltiples imágenes. Encuentre las distancias desde la persona hasta las primeras tres imágenes vistas en el espejo de la izquierda cuando la persona está a 5.00 pies del espejo en la pared izquierda y 10.0 pies del espejo en la pared derecha.
- En el altílo del coro de una iglesia, dos paredes están separadas 5.30 m. Los cantantes se paran contra la pared norte. La organista está frente a la pared sur, y se sienta separada 0.800 m de ella. Para que pueda ver al coro, sobre la pared sur se monta un espejo plano de 0.600 m de ancho, recto enfrente de la organista. ¿Qué ancho de la pared norte puede ver? *Sugerencia:* Dibuje un diagrama de vista superior para justificar su respuesta.

- Un periscopio (figura P23.5) es útil para ver objetos que no se pueden ver directamente. Puede ser utilizado en los submarinos y para ver los partidos de golf o desfiles detrás de una multitud de personas. Supongamos que el objeto p_1 está a una distancia desde el espejo superior y los centros de los dos espejos planos están separados por una distancia h . a) ¿Cuál es la distancia de la imagen final en el espejo inferior? b) ¿La imagen final es real o virtual? c) ¿Está en posición vertical o invertida? d) ¿Cuál es su aumento? e) ¿Aparece invertida de izquierda a derecha?

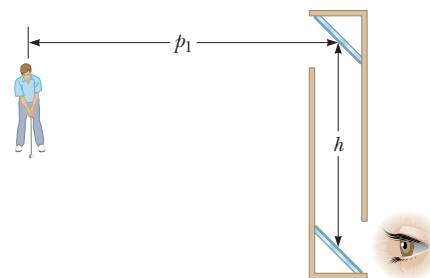


Figura P23.5

23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos

23.3 Espejos convexos y convenciones de signo

En los siguientes problemas no se proporcionan signos algebraicos. Se deja que usted determine el signo correcto a usar con cada cantidad, con base en un análisis del problema y las convenciones de signos de la tabla 23.1.

- Un dentista usa un espejo para examinar un diente que está 1.00 cm enfrente del espejo. La imagen del diente se

- forma 10.0 cm detrás del espejo. Determine a) el radio de curvatura del espejo y b) la amplificación de la imagen.
- Un espejo esférico convexo, cuya distancia focal tiene una magnitud de 15.0 cm, forma una imagen 10.0 cm detrás del espejo. a) ¿Dónde debe colocarse el objeto? b) ¿Cuál es la amplificación del espejo?
 - BIO** Para ajustar un lente de contacto al ojo de un paciente, se puede usar un *queratómetro* para medir la curvatura de la córnea, la superficie frontal del ojo. Este instrumento coloca un objeto iluminado de tamaño conocido a una distancia conocida p de la córnea, que luego refleja parte de la luz del objeto y forma una imagen del mismo. La amplificación M de la imagen se mide con el uso de un pequeño telescopio de visualización que permite una comparación de la imagen formada por la córnea con una segunda imagen calibrada proyectada en el campo de visión mediante un arreglo de prismas. Determine el radio de curvatura de la córnea cuando $p = 30.0$ cm y $M = 0.0130$.
 - Una imagen virtual es formada 20.0 cm a partir de un espejo cóncavo que tiene un radio de curvatura de 40.0 cm. a) Encuentre la posición del objeto. b) ¿Cuál es la amplificación del espejo?
 - C/C** Mientras observa su imagen en un espejo cosmético, Dina nota que su rostro está enormemente amplificado cuando ella se acerca al espejo, pero conforme se aleja del espejo, su imagen primero se vuelve borrosa, luego desaparece cuando está aproximadamente a 30 cm del espejo y luego se invierte cuando está más allá de 30 cm. Con base en estas observaciones, ¿qué puede concluir acerca de las propiedades del espejo?
 - Un objeto de 2.00 cm de altura se coloca a 3.00 cm enfrente de un espejo cóncavo. Si la imagen tiene 5.00 cm de alto y es virtual, ¿cuál es la longitud focal del espejo?
 - Un dedicado entusiasta de los autos deportivos pule las superficies interior y exterior de un tapacubos que es una sección de una esfera. Cuando se mira en un lado del tapacubos, ve una imagen de su rostro 30.0 cm atrás de él. Luego voltea el tapacubos y mantiene la misma distancia de su rostro. Ahora ve una imagen de su rostro 10.0 cm atrás del tapacubos. a) ¿Cuán lejos está su rostro del tapacubos? b) ¿Cuál es el radio de curvatura del tapacubos?
 - Un espejo de maquillaje curvo se diseña de modo que una persona a 25 cm enfrente de él ve una imagen derecha aumentada por un factor de dos. ¿Cuál es el radio de curvatura del espejo?
 - Un espejo cóncavo tiene una distancia focal de 30.0 cm. a) ¿Cuál es su radio de curvatura? Localizar y describir las propiedades de la imagen cuando la distancia del objeto es b) 100 cm y c) 10.0 cm.
 - M** Un hombre de pie a 1.52 m enfrente de un espejo para rasurar produce una imagen invertida de 18.0 cm enfrente de él. ¿Cuán cerca del espejo debe pararse si quiere formar una imagen derecha de su barbilla que sea el doble del tamaño real de la barbilla?
 - Un espejo convexo tiene una longitud focal de 8.0 cm de magnitud. a) Si la imagen es virtual, ¿cuál es la ubicación del objeto para la cual la magnitud de la distancia de la imagen sea un tercio de la magnitud de la distancia del objeto? b) Encuentre la amplificación de la imagen y establezca si es derecha o invertida.
 - M** En la intersección de los pasillos del hospital, un espejo esférico convexo es montado en lo alto de una pared para ayudar a las personas a evitar las colisiones. La magnitud de la radio del espejo de curvatura es 0.550 m. a) Localice la imagen de un paciente ubicada a 10.0 m del espejo. b) Indique si la imagen está derecha o invertida. c) Determine el tamaño de la imagen.
 - C/C** Un espejo cóncavo tiene un radio de curvatura de 24.0 cm. a) Determine la posición del objeto para la cual la imagen resultante sea derecha y 3.00 el tamaño del objeto. b) Dibuje un diagrama de rayos para determinar la posición de la imagen. c) ¿La imagen es real o virtual?
 - C/C** Un espejo esférico se usará para formar una imagen, cinco veces el alto de un objeto, sobre una pantalla colocada a 5.0 m del espejo. a) Describa el tipo de espejo requerido. b) ¿Dónde se debe colocar el espejo en relación con el objeto?
 - C/C** Una bola se suelta desde el reposo 3.00 m directamente arriba del vértice de un espejo cóncavo que tiene un radio de 1.00 m y yace en un plano horizontal. a) Describa el movimiento de la imagen de la bola en el espejo. b) ¿En qué tiempo coinciden la bola y su imagen?

23.4 Imágenes formadas por refracción

- Un bloque cúbico de hielo de 50.0 cm de arista se coloca en un piso a nivel sobre una mancha de polvo. Ubique la imagen de la mancha, cuando se ve directamente desde arriba, si el índice de refracción del hielo es 1.309.
- Un pez de colores nada dentro de un recipiente de agua esférico con un índice de refracción $n = 1.333$. Supongamos que el pez de colores está $p = 10.0$ cm de la pared de un recipiente de radio $|R| = 15.0$ cm, como en la figura P23.22. Haga caso omiso de la refracción de la luz causada por la pared del recipiente, determine la distancia aparente de los peces de colores de la pared de acuerdo con un observador fuera del recipiente.

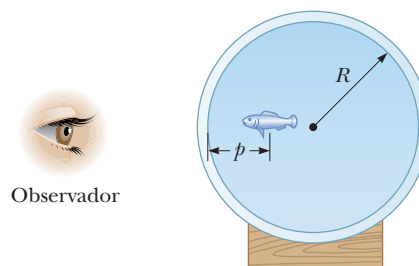


Figura P23.22

- Un pisapapeles está hecho de un hemisferio sólido de vidrio con índice de refracción 1.50. El radio de la sección

transversal circular es de 4.0 cm. El hemisferio se coloca sobre su superficie plana, con el centro directamente sobre una línea de 2.5 mm de largo dibujada sobre una hoja de papel. ¿Qué longitud de la línea ve alguien que observa verticalmente hacia abajo sobre el hemisferio?

24. La parte superior de una alberca está a nivel del suelo. Si la alberca tiene 2.00 m de profundidad, ¿cuán lejos bajo el nivel del suelo parece ubicarse el fondo de la alberca cuando a) la alberca está completamente llena con agua y b) la alberca está llena a la mitad con agua?
25. Se observa que una esfera transparente de composición desconocida forma una imagen del Sol sobre su superficie opuesta al Sol. ¿Cuál es el índice refractivo del material de la esfera?
26. Una placa de vidrio ($n = 1.66$) descansa en el fondo del tanque de un acuario. La placa tiene 8.00 cm de grosor (dimensión vertical) y está cubierta con agua ($n = 1.33$) a una profundidad de 12.0 cm. Calcule el grosor aparente de la placa vista desde arriba del agua. (Suponga incidencia casi normal de los rayos de luz.)
27. **CIC** Una medusa flota en un acuario lleno con agua 1.00 m detrás de un panel plano de vidrio de 6.00 cm de grosor y con 1.50 de índice de refracción. a) ¿Dónde se ubica la imagen de la medusa? b) Repita el problema cuando el vidrio es tan delgado que su grosor se puede despreciar. c) ¿Cómo afecta el grosor del vidrio la respuesta al inciso a)?
28. **S** La figura P23.28 muestra una superficie curva que separa un material con índice de refracción n_1 de un material con índice de n_2 . La superficie forma una imagen I del objeto O . El rayo que se muestra en rojo pasa a través de la superficie a lo largo de una línea radial. Sus ángulos de incidencia y refracción son cero, por lo que su dirección no cambia en la superficie. Para el rayo que se muestra en azul, la dirección cambia de acuerdo con $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Para los rayos paraxiales, asumimos θ_1 y θ_2 son pequeños, por lo que se puede escribir $n_1 \tan \theta_1 = n_2 \tan \theta_2$. El aumento se define como $M = h'/h$. Demuestre que el aumento viene dado por $M = -n_1 q/n_2 p$.

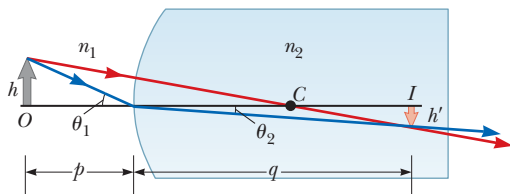


Figura P23.28

23.6 Lentes delgadas

29. **BIO** Un lente de contacto está hecho de plástico con un índice de refracción de 1.50. El lente tiene un radio de curvatura exterior de +2.00 cm y un radio de curvatura interior de +2.50 cm. ¿Cuál es la longitud focal de la lente?

30. Un objeto se coloca 50.0 cm de una pantalla. a) ¿Dónde debe colocarse una lente convergente de distancia focal 10.0 cm para formar una imagen en la pantalla? b) Determine la ampliación de la lente.
31. Una lente convergente tiene una longitud focal de 10.0 cm. Ubique las imágenes para distancias de objeto de a) 20.0 cm, b) 10.0 cm y c) 5.00 cm, si existen. Para cada caso, establezca si la imagen es real o virtual, derecha o invertida y encuentre la ampliación.
32. Un objeto se coloca 20.0 cm de un espejo esférico cóncavo tiene una distancia focal de magnitud 40.0 cm. a) Utilice papel cuadriculado para la construcción precisa de un diagrama de rayos para esta situación. b) A partir de su diagrama de rayos, determine la ubicación de la imagen. c) ¿Cuál es el tamaño de la imagen? d) Revise sus respuestas a los incisos b) y c) utilizando la ecuación del espejo.
33. Una lente divergente tiene una longitud focal de 20.0 cm. Ubique las imágenes para distancias de objeto de a) 40.0 cm, b) 20.0 cm y c) 10.0 cm. Para cada caso, establezca si la imagen es real o virtual y derecha o invertida y encuentre la ampliación.
34. **CIC** Una lente divergente tiene una longitud focal de 20.0 cm. Use papel gráfico para construir diagramas de rayos precisos para distancias de objeto de a) 40.0 cm y b) 10.0 cm. En cada caso determine la ubicación de la imagen a partir del diagrama y la ampliación de la imagen y establezca si la imagen es derecha o invertida. c) Estime la magnitud de incertidumbre en la ubicación de los puntos en la gráfica. ¿Sus respuestas y la incertidumbre son consistentes con las respuestas algebraicas que encontró en el problema 33?
35. Una diapositiva fotográfica transparente se coloca enfrente de una lente convergente con una longitud focal de 2.44 cm. La lente forma una imagen de la diapositiva a 12.9 cm de ella. ¿Cuán lejos está la lente de la diapositiva si la imagen es a) real, b) virtual?
36. La imagen de la moneda en la figura P23.36 tiene el doble de diámetro de la moneda cuando la lente está a 2.84 cm de ella. Determine la longitud focal de la lente.



Figura P23.36

37. Cierta proyector LCD contiene una sola lente delgada. Un objeto de 24.0 mm de alto se proyectará de modo que su imagen llene una pantalla de 1.80 m de alto. La

distancia objeto a pantalla es de 3.00 m. a) Determine la longitud focal de la lente de proyección. b) ¿Cuán lejos del objeto debe colocarse la lente del proyector para formar la imagen sobre la pantalla?

38. **M** Un objeto se encuentra 20.0 cm a la izquierda de una lente divergente que tiene una longitud focal $f = -32.0$ cm. Determine a) la ubicación y b) la ampliación de la imagen. c) Construya un diagrama de rayos para este arreglo.
39. Una lente convergente se coloca 30.0 cm a la derecha de una lente divergente con 10.0 cm de longitud focal. Un haz de luz paralela entra a la lente divergente desde la izquierda y el haz de nuevo es paralelo cuando sale de la lente convergente. Calcule la longitud focal de la lente convergente.
40. **C C S** a) Use la ecuación de lente delgada para deducir una expresión para q en términos de f y p . b) Pruebe que, para un objeto real y una lente divergente, la imagen siempre debe ser virtual. *Sugerencia:* Considere $f = -|f|$ y demuestre que q debe ser menor que cero bajo las condiciones dadas. c) Para un objeto real y lente convergente, ¿qué desigualdad que involucra a p y f debe sostenerse si la imagen debe ser real?
41. Dos lentes convergentes, cada una con longitud focal de 15.0 cm, se colocan separadas 40.0 cm, y un objeto se coloca a 30.0 cm enfrente de la primera lente. ¿Dónde se forma la imagen final y cuál es la ampliación del sistema?
42. El objeto O_1 está 15.0 cm a la izquierda de una lente convergente con una longitud focal de 10.0 cm. Una segunda lente se ubica 10.0 cm a la derecha de la primera lente y se observa que forma una imagen final en la posición del objeto original O_1 . a) ¿Cuál es la longitud focal de la segunda lente? b) ¿Cuál es la ampliación global del sistema? c) ¿Cuál es la naturaleza (es decir, real o virtual, derecha o invertida) de la imagen final?
43. **M** Un objeto de 1.00 cm de alto se coloca 4.00 cm a la izquierda de una lente convergente con longitud focal de 8.00 cm. Una lente divergente con longitud focal de -16.00 cm está 6.00 cm a la derecha de la lente convergente. Encuentre la posición y altura de la imagen final. ¿La imagen es invertida o derecha? ¿Real o virtual?
44. Dos lentes convergentes, que tienen longitudes focales de $f_1 = 10.0$ y $f_2 = 20.0$ cm, se colocan separadas $d = 50.0$ cm, como se muestra en la figura P23.44. La imagen final

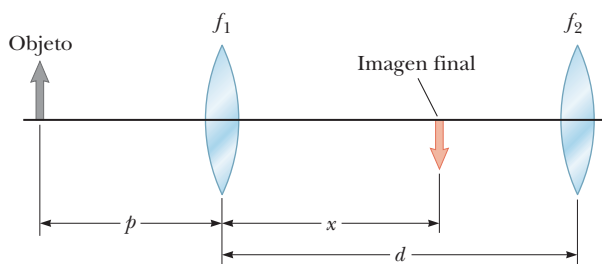


Figura P23.44

se ubicará entre las lentes, en la posición que se indica. a) ¿Cuán lejos de la primera lente se debe colocar el objeto? b) ¿Cuál es la ampliación global del sistema? c) ¿La imagen final es derecha o invertida?

45. La lente L_1 en la figura P23.45 tiene una longitud focal de 15.0 cm y se ubica a una distancia fija enfrente del plano de la película de una cámara. La lente L_2 tiene una longitud focal de 13.0 cm y su distancia d desde el plano de la película puede variar desde 5.00 hasta 10.0 cm. Determine el rango de distancias para las cuales los objetos se pueden enfocar sobre la película.
46. **PG** Un objeto se coloca a 15.0 cm de una primera lente convergente con longitud focal de 10.0 cm. Una segunda lente convergente, con longitud focal de 5.00 cm, se coloca 10.0 cm a la derecha de la primera lente convergente. a) Encuentre la posición q_1 de la imagen formada por la primera lente convergente. b) ¿Cuán lejos de la segunda lente está la imagen de la primera lente? c) ¿Cuál es el valor de p_2 , la posición del objeto para la segunda lente? d) Encuentre la posición q_2 de la imagen formada por la segunda lente. e) Calcule la ampliación de la primera lente. f) Calcule la ampliación de la segunda lente. g) ¿Cuál es la ampliación total para el sistema? h) ¿La imagen final es real o virtual? ¿Está derecha o invertida (comparada con el objeto original para el sistema de lentes)?

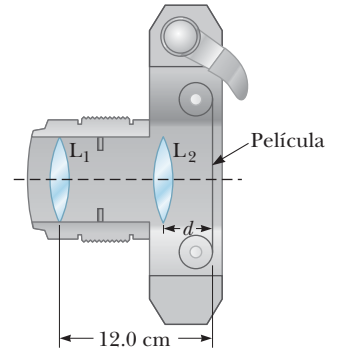


Figura P23.45

Problemas adicionales

47. Un objeto colocado a 10.0 cm de un espejo esférico cóncavo produce una imagen real a 8.00 cm del espejo. Si el objeto se mueve hacia una nueva posición a 20.0 cm del espejo, ¿cuál es la posición de la imagen? ¿La imagen final es real o virtual?
48. **S** La distancia de un objeto real desde una lente convergente es cinco veces la longitud focal. a) Determine la ubicación de la imagen q en términos de la longitud focal f . b) Encuentre la ampliación de la imagen. c) ¿La imagen es real o virtual? ¿Es derecha o invertida? ¿La imagen está en el mismo lado de la lente que el objeto o en el lado opuesto?
49. Las magnitudes de los radios de curvatura son 32.5 cm y 42.5 cm para las dos caras de una lente bicóncava. El vidrio tiene un índice de refracción de 1.53 para la luz violeta y 1.51 para la luz roja. Para un objeto muy lejano, encuentre a) la imagen formada por la luz violeta y b) la imagen formada por la luz roja.
50. Una lente divergente ($n = 1.50$) tiene la forma que se muestra en la figura 23.25c. El radio de la primera superficie es 15.0 cm y la de la segunda superficie es 10.0 cm. a) Encuentre la longitud focal de la lente. Determine las

posiciones de la imagen para distancias de objeto de b) infinito, c) $3|f|$, d) $|f|$ y e) $|f|/2$.

- 51.** La lente y el espejo en la figura P23.51 están separadas por 1.00 m y tienen longitudes focales de +80.0 cm y -50.0 cm, respectivamente. Si un objeto se coloca 1.00 m a la izquierda de la lente, ¿dónde se ubicará la imagen final? Establezca si la imagen es derecha o invertida y determine la amplificación global.

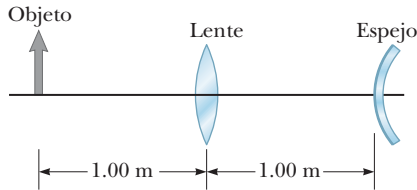


Figura P23.51

- 52.** El objeto en la figura P23.52 está a medio camino entre la lente y el espejo el cual está a una distancia $d = 25.0$ cm. El radio de curvatura del espejo es 20.0 cm y la lente tiene una longitud focal de -16.7 cm.
- Considerando sólo la luz que sale del objeto y viaja primero hacia el espejo, ubique la imagen final formada por este sistema.
 - ¿La imagen es real o virtual?
 - ¿Está derecha o invertida?
 - ¿Cuál es la amplificación global de la imagen?

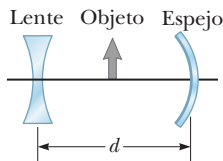


Figura P23.52

- 53.** Un haz paralelo de luz entra a un hemisferio de vidrio perpendicular a la cara plana, como se muestra en la figura P23.53. El radio del hemisferio es $R = 6.00$ cm y el índice de refracción es $n = 1.56$. Determine el punto donde el haz se enfoca. (Suponga rayos paraxiales; esto es, suponga que todos los rayos se ubican cerca del eje principal.)

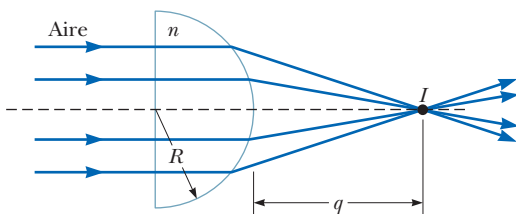


Figura P23.53

- 54.** Dos rayos que viajan en paralelo al eje principal golpean una gran lente plano-convexa que tiene un índice de refracción de 1.60 (figura P23.54). Si la cara convexa es esférica, un rayo cerca de la orilla no pasa por el punto focal (se produce la aberración esférica). Suponga que esta cara tiene un radio de curvatura de $R = 20.0$ cm y los dos rayos se encuentran a distancias $h_1 = 0.500$ cm y $h_2 = 12.0$ cm desde el eje principal. Determine el diferencial Δx en las posiciones donde cruza el eje principal.

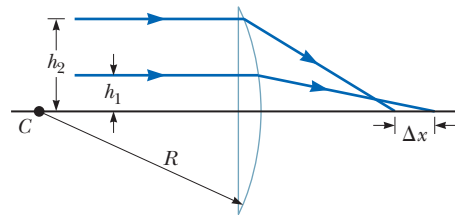


Figura P23.54

- 55.** Para resolver este problema, use el hecho de que la imagen formada por la primera superficie se convierte en el objeto para la segunda superficie. La figura P23.55 muestra una pieza de vidrio con índice de refracción $n = 1.50$. Los extremos son hemisferios con radios de $R_1 = 2.00$ cm y $R_2 = 4.00$ cm y los centros de los extremos hemisféricos están separados por una distancia de $d = 8.00$ cm. Un objeto puntual está en aire, a una distancia $p = 1.00$ cm del extremo izquierdo del vidrio.
- Ubique la imagen del objeto debida a refracción en las dos superficies esféricas.
 - ¿La imagen es real o virtual?

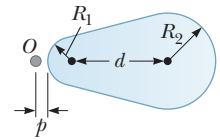


Figura P23.55

- 56.** **S** Considere dos lentes delgadas, una con longitud focal f_1 y la otra con longitud focal f_2 , colocadas en contacto mutuo, como se muestra en la figura P23.56. Aplique la ecuación de lentes delgadas a cada una de estas lentes y combine los resultados para demostrar que esta combinación de lentes se comporta como una lente delgada que tiene una longitud focal f dada por $1/f = 1/f_1 + 1/f_2$. Suponga que el grosor de la lente se puede despreciar en comparación con las otras distancias involucradas.

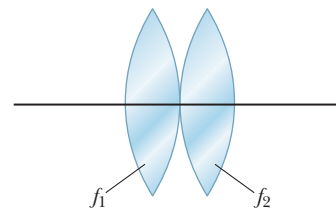


Figura P23.56

- 57.** Un objeto de 2.00 cm de alto se coloca 40.0 cm a la izquierda de una lente convergente que tiene una longitud focal de 30.0 cm. Una lente divergente que tiene una longitud focal de -20.0 cm se coloca 110 cm a la derecha de la lente convergente.
- Determine la posición final y la amplificación de la imagen final.
 - ¿La imagen es derecha o invertida?
 - Repita los incisos a) y b) para el caso donde la segunda lente es una lente convergente que tiene una longitud focal de +20.0 cm.

- 58.** Una ilusión de "fresa flotante" se puede producir mediante dos espejos parabólicos, cada uno con una longitud focal de 7.5 cm, enfrentados mutuamente de modo que sus centros están separados 7.5 cm (figura P23.58). Si una fresa se coloca en el espejo inferior, la imagen de

la fresa se forma en la pequeña apertura en el centro del espejo superior. Demuestre que la imagen final se forma en dicha ubicación y describa sus características. *Nota:* Un haz de linterna que brille sobre estas imágenes tiene un efecto muy sorprendente: incluso en un ángulo oblicuo, ¡el haz de luz entrante aparentemente se refleja de las imágenes de la fresa! ¿Entiende usted por qué?

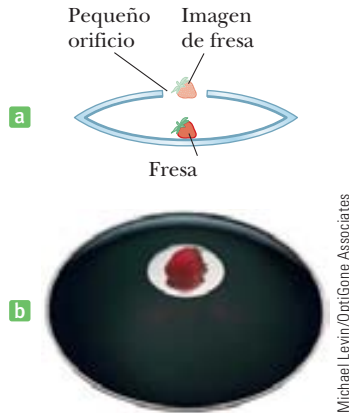


Figura P23.58

Michael Levin/OptiGone Associates

59. La figura P23.59 muestra una lente convergente con radios $R_1 = 9.00$ cm y $R_2 = -11.00$ cm, frente a un espejo esférico cóncavo de radio $R = 8.00$ cm. También se muestran los puntos focales (F_1 y F_2) para la lente delgada y el centro de curvatura (C) del espejo. a) Si los puntos focales F_1 y F_2 están a 5.00 cm del vértice de la lente delgada, ¿cuál es el índice de refracción de la lente? b) Si la lente y el espejo están separados 20.0 cm y un objeto se coloca 8.00 cm a la izquierda de la lente, ¿cuál es la posición de la imagen final y su amplificación vista por el ojo en la figura? c) ¿La imagen final está invertida o derecha? Explique.

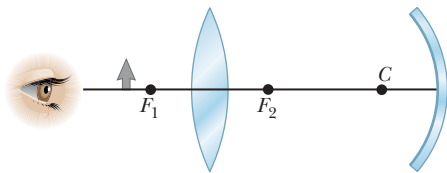


Figura P23.59

60. **S** Encuentre las distancias de objeto (en términos de f) para una lente delgada convergente con longitud focal F si a) la imagen es real y la distancia de la imagen es cuatro veces la longitud focal y b) la imagen es virtual y la distancia de la imagen es tres veces la longitud focal. c) Calcule la amplificación de la lente para los casos a) y b).
61. La ecuación del fabricante de lentes para una lente con índice n_1 sumergido en un medio con índice n_2 toma la forma

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Una lente divergente delgada de vidrio (índice = 1.50), con $R_1 = -3.00$ m y $R_2 = -6.00$ m, está rodeada con aire. Una flecha se coloca 10.0 m a la izquierda de la lente. a) Determine la posición de la imagen. Repita el inciso a) con la flecha y la lente sumergidos en b) agua (índice = 1.33) c) un medio con un índice de refracción de 2.00. d) ¿Cómo puede una lente que es divergente en aire, cambiar a una lente convergente?

62. Un observador a la derecha de la combinación espejo-lente que se muestra en la figura P23.62 ve dos imágenes reales que son del mismo tamaño y están en la misma ubicación. Una imagen es derecha y la otra invertida. Ambas imágenes son 1.50 veces más grandes que el objeto. La lente tiene una longitud focal de 10.0 cm. La lente y el espejo están separados por 40.0 cm. Determine la longitud focal del espejo. (No suponga que la figura se dibuja a escala.)

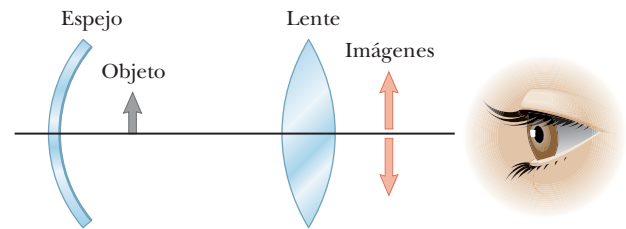


Figura P23.62

63. La ecuación del fabricante de lentes se aplica a una lente sumergida en un líquido si n en la ecuación se sustituye por n_1/n_2 . Aquí n_1 se refiere al índice de refracción del material de la lente y n_2 es el del medio que rodea a la lente. a) Cierta lente tiene longitud focal de 79.0 cm en aire y un índice de refracción de 1.55. Encuentre su longitud focal en agua. b) Cierta lente tiene longitud focal de 79.0 cm en agua. Encuentre su longitud focal en aire.
64. Un cierto adorno del árbol de Navidad es una esfera de plata con un diámetro de 8.50 cm. a) Si el tamaño de una imagen creada por el reflejo en el ornamento es tres cuartas partes la magnitud real del objeto reflejado, determine la ubicación del objeto. b) Utilice un diagrama de rayos para determinar si la imagen es vertical o invertida.
65. **M** Una esfera de vidrio ($n = 1.50$) con un radio de 15.0 cm tiene una pequeña burbuja de aire 5.00 cm por encima de su centro. La esfera es vista hacia abajo a lo largo del radio extendido que contiene la burbuja. ¿Cuál es la profundidad aparente de la burbuja debajo de la superficie de la esfera?
66. Un objeto 10.0 cm de altura se coloca en la marca de cero de una cinta de medir. Un espejo esférico situado en algún punto de la cinta crea una imagen del objeto que está en posición vertical, a 4.00 cm de altura, y situado en la marca de 42.0 cm de la cinta de medir. a) ¿El espejo es convexo o cóncavo? b) ¿Dónde está el espejo? c) ¿Cuál es la longitud focal del espejo?

Los colores en muchas de las plumas de los colibríes no se deben a pigmentos. La *iridiscencia* que forma los brillantes colores que con frecuencia aparecen en la garganta y vientre de esta ave se debe a un efecto de interferencia causado por estructuras en las plumas. Los colores varían con el ángulo de visión.

RO-MA/Index Stock Imagery



24

Óptica ondulatoria

- 24.1 Condiciones para interferencia
- 24.2 Experimento de doble rendija de Young
- 24.3 Cambio de fase debido a reflexión
- 24.4 Interferencia en películas delgadas
- 24.5 Uso de interferencia para leer CD y DVD
- 24.6 Difracción
- 24.7 Difracción de una sola rendija
- 24.8 La rejilla de difracción
- 24.9 Polarización de ondas de luz

Los colores giran en una pompa de jabón mientras están a la deriva en el aire en un día de verano y vívidos arco iris se reflejan desde la suciedad de las películas de aceite en los charcos de una sucia calle de la ciudad. Los turistas de las playas, cubiertos con delgadas capas de aceite, usan sus gafas para el Sol recubiertas que absorben la mitad de la luz entrante. En los laboratorios, los científicos determinan la composición precisa de los materiales al analizar la luz que emiten cuando se calientan y en observatorios alrededor del mundo, los telescopios recopilan luz de galaxias distantes, filtran longitudes de onda individuales en bandas y de este modo determinan la velocidad de expansión del Universo.

Comprender cómo se forman estos arco iris y cómo ciertos instrumentos científicos pueden determinar las longitudes de onda es el dominio de la óptica ondulatoria. La luz se puede ver como partícula o como onda. La óptica geométrica, el tema del capítulo anterior, depende de la naturaleza corpuscular de la luz. La óptica ondulatoria depende de la naturaleza ondulatoria de la luz. Los tres temas principales que examinaremos en este capítulo son interferencia, difracción y polarización. Estos fenómenos no se pueden explicar de manera adecuada con la óptica de rayos, pero se pueden entender si la luz es vista como una onda.

24.1 Condiciones para interferencia

En el estudio de la interferencia de ondas mecánicas del capítulo 13, encontramos que dos ondas podían sumarse constructiva o destructivamente. En la interferencia constructiva la amplitud de la onda resultante es mayor que la de cualquiera de las ondas individuales, mientras que en la interferencia destructiva, la amplitud resultante es menor que la de cualquiera onda individual. Las ondas de luz también interfieren unas con otras. Es fundamental

saber que toda la interferencia asociada con las ondas de luz surge cuando se combinan los campos electromagnéticos que constituyen las ondas individuales.

Los efectos de interferencia en las ondas de luz no son fáciles de observar debido a las cortas longitudes de onda involucradas (aproximadamente 4×10^{-7} m a más o menos 7×10^{-7} m). Sin embargo, las dos condiciones siguientes facilitan la observación de interferencia entre dos fuentes de luz:

1. Las fuentes son **coherentes**, lo cual significa que las ondas que emiten deben mantener una fase constante una con respecto a la otra.
2. Las ondas tienen longitudes de onda idénticas.

◀ Condiciones para interferencia

Para crear interferencia se necesitan dos fuentes (que producen dos ondas viajeras). Para producir un patrón de interferencia estable, las ondas individuales deben mantener una fase constante una con otra. Cuando esta situación prevalece, se dice que las fuentes son coherentes. Las ondas sonoras emitidas por dos bocinas lado a lado, activadas por un solo amplificador pueden producir interferencia porque las dos bocinas responden al amplificador en la misma forma al mismo tiempo: están en fase.

Sin embargo, si dos fuentes de luz se colocan lado a lado, no se observan efectos de interferencia porque las ondas de luz provenientes de una fuente se emiten de manera independiente de las ondas de la otra fuente; por lo tanto, las emisiones de las dos fuentes no mantienen una relación de fase constante mutua durante el tiempo de observación. Una fuente de luz ordinaria experimenta cambios aleatorios aproximadamente una vez cada 10^{-8} s. En consecuencia, las condiciones para interferencia constructiva, interferencia destructiva y estados intermedios tienen duraciones en el orden de 10^{-8} s. El resultado es que no se observan efectos de interferencia porque el ojo no puede seguir tales cambios a corto plazo. Se dice que las fuentes de luz ordinarias son **incoherentes**.

Un antiguo método para producir dos fuentes de luz coherentes es pasar luz de una fuente con una sola longitud de onda (monocromática) a través de una estrecha rendija y luego permitir que la luz caiga sobre una pantalla que contiene otras dos rendijas estrechas. La primera rendija se necesita para crear un solo frente de onda que ilumine ambas rendijas de manera coherente. La luz que sale de las dos rendijas es coherente porque una sola fuente produce el haz de luz original y las rendijas sólo sirven para separar el haz original en dos partes. Cualquier cambio aleatorio en la luz emitida por la fuente ocurrirá en los dos haces separados al mismo tiempo, y se pueden observar efectos de interferencia.

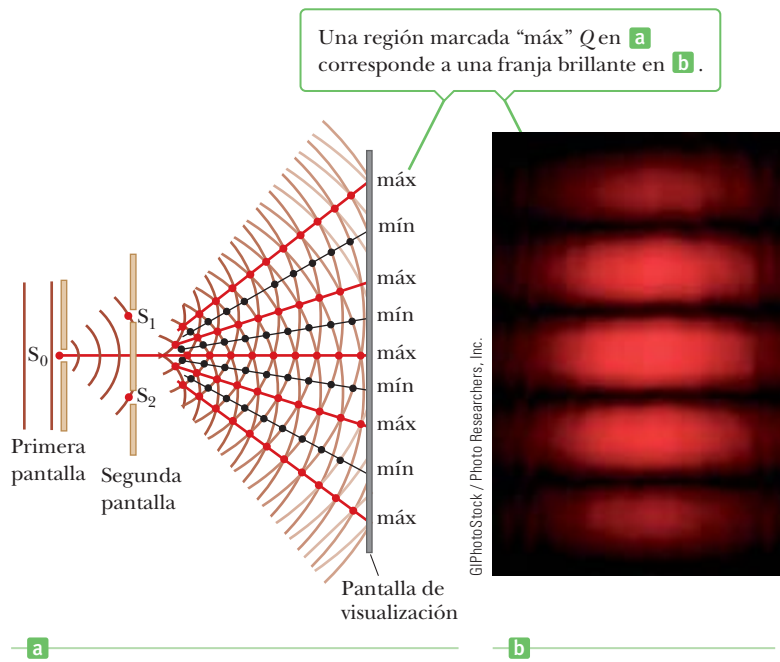
En la actualidad es mucho más común usar un láser como fuente coherente para demostrar interferencia. Un láser produce un intenso haz monocromático coherente sobre un ancho de varios milímetros. Por lo tanto, el láser puede usarse para iluminar múltiples rendijas de forma directa y los efectos de interferencia se pueden observar con facilidad en una habitación iluminada por completo. Los principios de operación de un láser se explican en el capítulo 28.

24.2 Experimento de doble rendija de Young

Thomas Young fue el primero en demostrar la interferencia en las ondas de luz a partir de dos fuentes en 1801. La figura activa 24.1a (página 826) es un diagrama esquemático del aparato que usó en este experimento. (En sus experimentos originales, Young usó orificios de alfiler en lugar de rendijas.) La luz incide sobre una pantalla que contiene una estrecha rendija S_0 . Las ondas de luz que salen de esta rendija llegan a una segunda pantalla que contiene dos estrechas rendijas paralelas S_1 y S_2 . Estas rendijas sirven como un par de fuentes de luz coherente porque las ondas que salen de ellas se originaron del mismo frente de onda y por lo tanto siempre están en fase. La luz proveniente de las dos rendijas produce un patrón visible sobre la pantalla C que consiste en una serie de bandas paralelas brillantes y oscuras llamadas **franja** (figura activa 24.1b). Cuando la luz proveniente de las rendijas S_1 y S_2 llega a un punto sobre la pantalla de modo que ocurre interferencia constructiva en dicha posición, aparece una franja brillante. Cuando la luz proveniente de las dos rendijas se combina de manera destructiva en cualquier posición sobre la pantalla,

Figura activa 24.1

a) Diagrama de experimento de doble rendija de Young. Las rendijas estrechas actúan como fuentes de ondas. Las rendijas S_1 y S_2 se comportan como fuentes coherentes que producen un patrón de interferencia sobre la pantalla C. (El dibujo no está a escala.) b) El patrón de franjas que se forma sobre la pantalla C podría parecerse a éste.



Richard Megna, Fundamental Photographs, NYC

Figura 24.2 Un patrón de interferencia que involucra ondas de agua se produce mediante dos fuentes vibratorias en la superficie del agua. El patrón es análogo al que se observa en el experimento de doble rendija de Young. Observe las regiones de interferencia constructiva y destructiva.

resulta una franja oscura. La figura 24.2 es una fotografía de un patrón de interferencia producido por dos fuentes vibratorias coherentes en un tanque de agua.

La figura 24.3 es un diagrama esquemático de algunas de las formas en las que las dos ondas pueden combinarse en la pantalla C de la figura 24.1. En la figura 24.3a dos ondas, que salen de las dos rendijas en fase, golpean la pantalla en el punto central P . Puesto que estas ondas recorren iguales distancias, llegan en fase a P y como resultado ahí ocurre interferencia constructiva y se observa una franja brillante. En la figura 24.3b las dos ondas de luz de nuevo parten en fase, pero la onda superior tiene que recorrer una longitud de onda mayor para llegar al punto Q sobre la pantalla. Puesto que la onda superior cae abajo de la onda inferior por exactamente una longitud de onda, las dos ondas todavía llegan en fase a Q de modo que en dicha ubicación aparece una segunda franja brillante. Ahora considere el punto R , a la mitad entre P y Q , en la figura 24.3c. En R , la onda superior cae media longitud de onda detrás de la onda inferior. Esto significa que el valle de la onda inferior se traslapa con la cresta de la onda superior, lo que da lugar a interferencia destructiva. Como resultado, en R se puede observar una franja oscura.

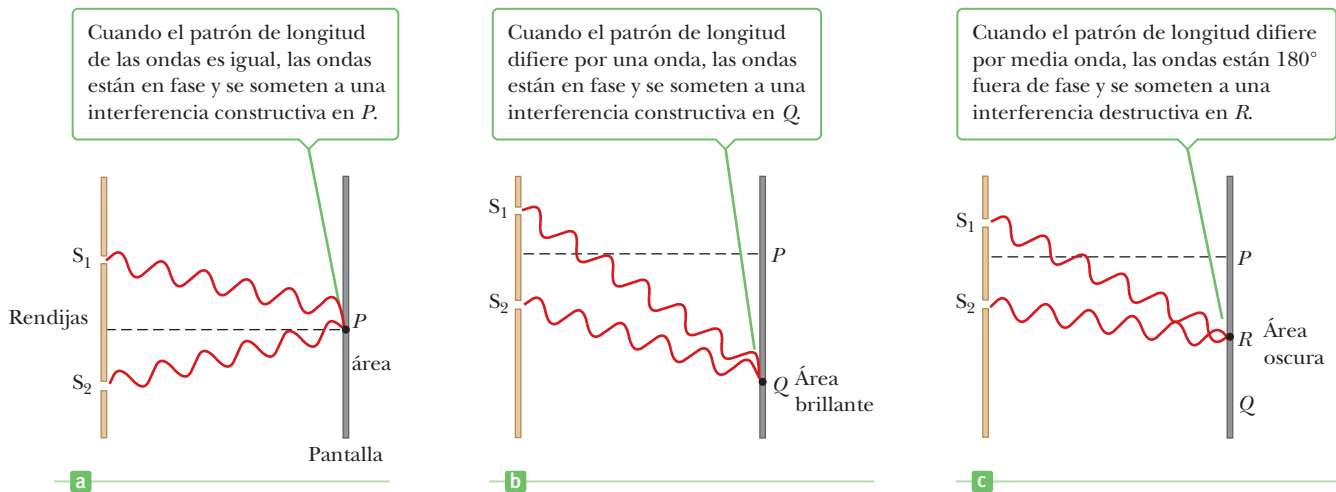


Figura 24.3 Ondas que dejan las rendijas y se combinan en varios puntos en la pantalla de visualización. (Estas figuras no se dibujan a escala.)

Con ayuda de la figura 24.4 se puede describir de manera cuantitativa el experimento de Young. Considere el punto P sobre la pantalla de visualización; la pantalla se coloca a una distancia perpendicular L desde la pantalla que contiene las rendijas S_1 y S_2 , que están separadas una distancia d , y r_1 y r_2 son las distancias que recorren las ondas secundarias desde la rendija hasta la pantalla. Suponga que las ondas que salen de S_1 y S_2 tienen la misma frecuencia constante, tienen la misma amplitud y parten en fase. La intensidad de luz sobre la pantalla en P es resultado de la luz de ambas rendijas. Sin embargo, una onda de la rendija inferior recorre más distancia que una onda de la rendija superior por la cantidad $d \sen \theta$. Esta distancia se llama **diferencia de trayectoria** δ (delta minúscula), donde

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sen \theta \quad [24.1]$$

◀ Diferencia de trayectoria

La ecuación 24.1 supone que las dos ondas viajan en líneas paralelas, lo que es aproximadamente cierto porque L es mucho mayor que d . Como ya se anotó, el valor de esta diferencia de trayectoria determina si las dos ondas están en fase cuando llegan a P . Si la diferencia de trayectoria es cero o algún múltiplo entero de longitud de onda, las dos ondas están en fase en P y resulta interferencia constructiva. Por lo tanto, la condición para franjas brillantes o **interferencia constructiva** en P es

$$\delta = d \sen \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.2]$$

◀ Condición para interferencia constructiva (dos rendijas)

El número m se llama **número de orden**. La franja brillante central en $\theta_{\text{brillante}} = 0$ ($m = 0$) se llama *máximo de orden cero*. El primer máximo en cualquier lado, donde $m = \pm 1$, se llama *máximo de primer orden* y así por el estilo.

Cuando δ es un múltiplo par de $\lambda/2$, las dos ondas que llegan a P están 180° fuera de fase y dan lugar a interferencia destructiva. Por lo tanto, la condición para franjas oscuras o **interferencia destructiva** en P es

$$\delta = d \sen \theta_{\text{oscura}} = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.3]$$

◀ Condición para interferencia destructiva (dos rendijas)

Si $m = 0$ en esta ecuación, la diferencia de trayectoria es $\delta = \lambda/2$, que es la condición para la ubicación de la primera franja oscura en cualquier lado del máximo central (brillante). Del mismo modo, si $m = 1$, la diferencia de trayectoria es $\delta = 3\lambda/2$, que es la condición para la segunda franja oscura en cada lado, etcétera.

Es útil obtener expresiones para las posiciones de las franjas brillantes y oscuras, medidas verticalmente desde O hasta P . Además del supuesto de que $L \gg d$, se considera $d \gg \lambda$. Estos supuestos pueden ser válidos porque, en la práctica, L con frecuencia está en el orden de 1 m, d es una fracción de milímetro y λ es una fracción de un micrómetro de luz visible. Bajo estas condiciones, θ es pequeño, así que se puede usar la aproximación $\sen \theta \cong \tan \theta$. Entonces, a partir del triángulo OPQ en la figura 24.4, vemos que

$$y = L \tan \theta \approx L \sen \theta \quad [24.4]$$

Tip 24.1 Aproximación de ángulo pequeño: ¡el tamaño importa!

La aproximación de ángulo pequeño $\sen \theta \cong \tan \theta$ es cierta a una precisión de tres dígitos sólo para ángulos menores de aproximadamente 4° .

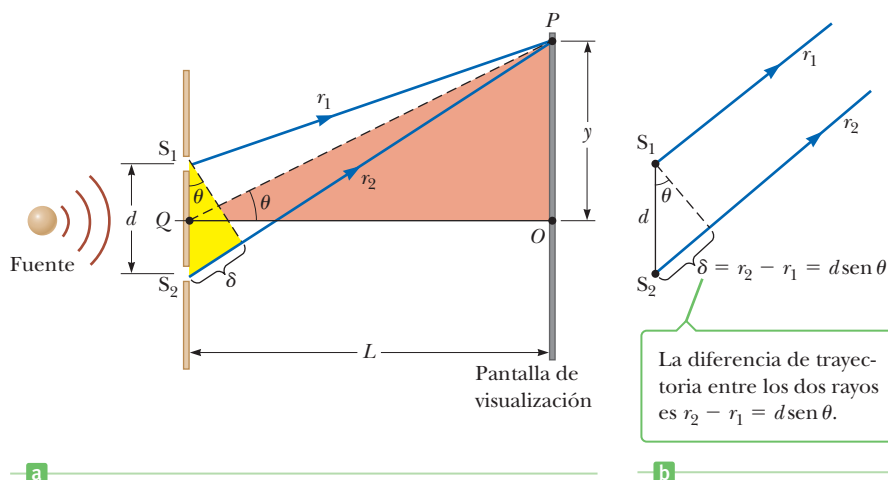


Figura 24.4 Construcción geométrica que describe el experimento de doble rendija de Young. (Esta figura no se dibuja a escala.)

La diferencia de trayectoria entre los dos rayos es $r_2 - r_1 = d \sen \theta$.



En esta fotografía aérea de olas en el océano se pueden ver reflexión, interferencia y difracción.

Al resolver la ecuación 24.2 para $\sin \theta$ y sustituir el resultado en la ecuación 24.4, encontramos que las posiciones para las *franja brillante*, medidas desde O , son

$$y_{\text{brillante}} = \frac{\lambda L}{d} m \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.5]$$

Al usar las ecuaciones 24.3 y 24.4, encontramos que las *franja oscura* se ubican en

$$y_{\text{oscura}} = \frac{\lambda L}{d} \left(m + \frac{1}{2}\right) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.6]$$

Como lo mostraremos en el ejemplo 24.1, el experimento de doble rendija de Young proporciona un método para medir la longitud de onda de la luz. De hecho, Young usó esta técnica para hacer justo eso. Además, su experimento dio al modelo ondulatorio de la luz una mayor cantidad de credibilidad. Era inconcebible que partículas de luz que pasaban a través de las rendijas se pudieran cancelar de manera mutua en una forma que explicaría las franjas oscuras.

■ FÍSICA APLICADA 24.1 Un humeante experimento de Young

Considere un experimento de doble rendija en el que un haz láser pasa a través de un par de rendijas cercanamente espaciadas y un claro patrón de interferencia se despliega sobre una pantalla distante. Ahora suponga que coloca partículas de humo entre la doble rendija y la pantalla. Con la presencia de las partículas de humo, ¿podrá ver los efectos de interferencia en el espacio entre las rendijas y la pantalla, o sólo verá los efectos sobre la pantalla?

EXPLICACIÓN Verá el patrón de interferencia tanto en la pantalla como en el área llena con humo entre las rendijas y la pantalla. Habrá líneas brillantes que se dirigen hacia las áreas brillantes sobre la pantalla y líneas oscuras que se dirigen hacia las áreas oscuras sobre la pantalla. Esto es porque las ecuaciones 24.5 y 24.6 dependen de la distancia a la pantalla, L , que puede tomar cualquier valor. ■

■ FÍSICA APLICADA 24.2 Interferencia de señal de televisión

Suponga que mira televisión por medio de una antena en lugar de un sistema por cable. Si un avión vuela cerca de su ubicación, quizá note imágenes fantasma que tiemblan en la pantalla del televisor. ¿Qué puede causar este fenómeno?

EXPLICACIÓN La antena de su televisor recibe dos señales: la señal directa desde la antena de transmisiones y una señal

que se refleja de la superficie del avión. Conforme el avión cambia de posición, existen algunos momentos en los que estas dos señales están en fase y otros momentos cuando están fuera de fase. Como resultado, variará la intensidad de la señal combinada que recibe la antena. El temblor de las imágenes fantasma de la imagen es la evidencia de esta variación. ■

■ Examen rápido

24.1 En un patrón de interferencia de doble rendija que se proyecta sobre una pantalla, ¿las franjas están equitativamente espaciadas sobre la pantalla a) en todas partes, b) sólo para ángulos grandes o c) sólo para ángulos pequeños?

24.2 Si la distancia entre las rendijas se duplica en el experimento de Young, ¿qué sucede con el ancho del máximo central? a) El ancho se duplica. b) El ancho no cambia. c) El ancho se reduce a la mitad.

24.3 Un experimento de doble rendija de Young se realiza con tres diferentes colores de luz: rojo, verde y azul. Clasifique los colores por la distancia entre franjas brillantes adyacentes, de menor a mayor. a) rojo, verde, azul; b) verde, azul, rojo; y c) azul, verde, rojo.

■ EJEMPLO 24.1 Medición de la longitud de onda de una fuente de luz

OBJETIVO Demuestre cómo se puede usar el experimento de Young para medir la longitud de onda de luz coherente.

PROBLEMA Una pantalla está separada 1.20 m de una fuente de doble rendija. La distancia entre las dos rendijas es de 0.030 0 mm. La franja brillante de segundo orden ($m = 2$) se mide en 4.50 cm desde la línea central. Determine **a)** la longitud de onda de la luz y **b)** la distancia entre franjas brillantes.

ESTRATEGIA La ecuación 24.5 relaciona las posiciones de las franjas brillantes con las otras variables, incluida la longitud de onda de la luz. Sustituya en esta ecuación y resuelva para λ . Al tomar la diferencia entre y_{m+1} y y_m se obtiene una expresión general para la distancia entre franjas brillantes.

SOLUCIÓN

a) Determine la longitud de onda de la luz.

Resuelva la ecuación 24.5 para la longitud de onda y sustituya los valores $m = 2$, $y_2 = 4.50 \times 10^{-2} \text{ m}$, $L = 1.20 \text{ m}$ y $d = 3.00 \times 10^{-5} \text{ m}$:

$$\lambda = \frac{y_2 d}{mL} = \frac{(4.50 \times 10^{-2} \text{ m})(3.00 \times 10^{-5} \text{ m})}{2(1.20 \text{ m})} = 5.63 \times 10^{-7} \text{ m} = \mathbf{563 \text{ nm}}$$

b) Determine la distancia entre franjas brillantes adyacentes.

Use la ecuación 24.5 para encontrar la distancia entre *cualquier* franja brillante adyacente (aquí, las caracterizadas mediante m y $m + 1$):

$$\Delta y = y_{m+1} - y_m = \frac{\lambda L}{d} (m + 1) - \frac{\lambda L}{d} m = \frac{\lambda L}{d} = \frac{(5.63 \times 10^{-7} \text{ m})(1.20 \text{ m})}{3.00 \times 10^{-5} \text{ m}} = \mathbf{2.25 \text{ cm}}$$

COMENTARIOS Este cálculo depende de que el ángulo θ sea pequeño, porque se usó de manera implícita la aproximación de ángulo pequeño. La medición de la posición de las franjas brillantes produce la longitud de onda de la luz, que a su vez es una firma de los procesos atómicos, como se analizará en los capítulos acerca de física moderna. En consecuencia, este tipo de medición ayuda a abrir el mundo del átomo.

PREGUNTA 24.1 Verdadero o Falso: Una rendija más grande crea una separación más grande entre las franjas de interferencia.

EJERCICIO 24.1 Suponga que el mismo experimento se realiza con una fuente de luz diferente. Si el máximo de primer orden se encuentra en 1.85 cm desde la línea central, ¿cuál es la longitud de onda de la luz?

RESPUESTA 463 nm

24.3 Cambio de fase debido a reflexión

El método de Young para producir dos fuentes de luz coherentes involucra iluminar un par de rendijas con una sola fuente. Otro arreglo simple, aunque ingenioso, para producir un patrón de interferencia con una sola fuente de luz se conoce como *espejo de Lloyd*. Una fuente puntual de luz se coloca en el punto S cerca de un espejo, como se ilustra en la figura 24.5. Las ondas de luz pueden llegar al punto de vista P o mediante la ruta directa SP o por la trayectoria que involucra reflexión del espejo. El rayo reflejado se puede tratar como un rayo que se origina en la fuente S' detrás del espejo. La fuente S' , que es la imagen de S , se puede considerar una fuente virtual.

En puntos alejados de la fuente, se observa un patrón de interferencia debido a ondas desde S y S' , tal como para dos fuentes coherentes reales. Sin embargo, las posiciones de las franjas oscuras y brillantes se *invierten* en relación con el patrón que se obtiene de dos fuentes coherentes reales (experimento de Young). Esto se debe a que las fuentes coherentes S y S' difieren en fase por 180° , un cambio de fase producto de la reflexión.

Para ilustrar el punto todavía más, considere P' , como el punto donde el espejo interseca la pantalla. Este punto es equidistante de S y S' . Si la diferencia de trayectoria sola fuese responsable de las diferencias de fase, en P' se observaría una franja brillante (porque la diferencia de trayectoria es cero para este punto), que corresponde a la franja central del patrón de interferencia de dos rendijas. En vez de ello, se observa una franja *oscura* en P , de lo cual concluimos que se debe producir un cambio de fase de 180° por reflexión del espejo. En general, **una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de 180° en la reflexión desde un medio que tenga un índice de refracción más alto que el del medio donde viaja la onda.**

Es posible extraer una analogía entre las ondas de luz reflejadas y las reflexiones de una onda transversal sobre una cuerda estirada cuando la onda encuentra una frontera, como en la figura 24.6. El pulso reflejado sobre una cuerda experimenta un cambio de

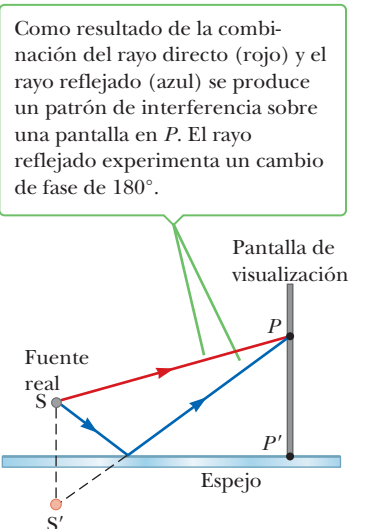


Figura 24.5 Espejo de Lloyd.

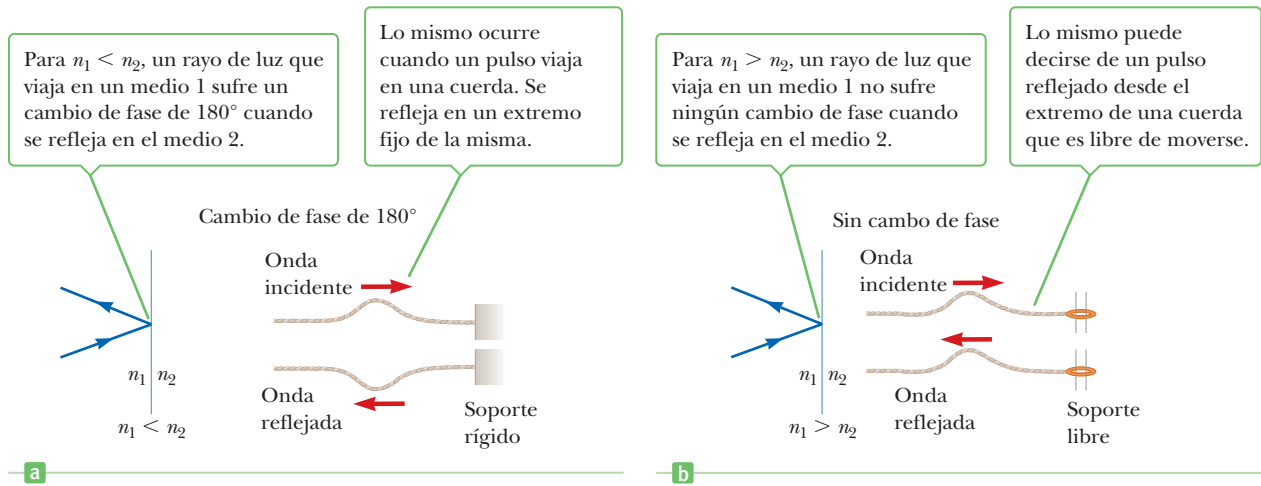


Figura 24.6 Comparaciones de las reflexiones de las ondas de luz y las ondas en las cuerdas.

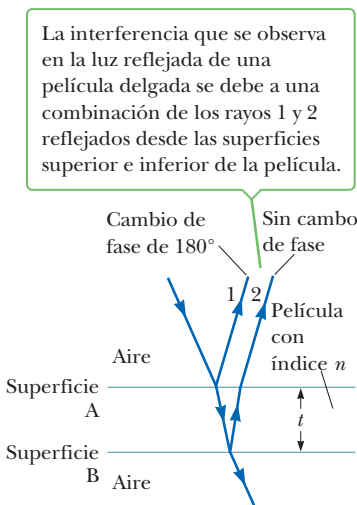


Figura 24.7 Luz que pasa a través de una película delgada.

fase de 180° cuando se refleja de la frontera de una cuerda más densa o de una barrera rígida y no experimenta cambio de fase cuando se refleja de la frontera de una cuerda menos densa. De igual modo, una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de 180° cuando se refleja de la frontera de un medio con índice de refracción mayor que el del medio donde viaja. No hay cambio de fase cuando la onda se refleja de una frontera que conduce a un medio de menor índice de refracción. La onda transmitida que cruza la frontera tampoco experimenta cambio de fase.

24.4 Interferencia en películas delgadas

Los efectos de interferencia comúnmente se observan en películas delgadas, como la delgada superficie de una pompa de jabón o capas delgadas de aceite sobre agua. Los variados colores que se observan cuando luz blanca incoherente incide sobre tales películas resultan de la interferencia de las ondas reflejadas de las dos superficies de la película.

Considere una película de grosor uniforme t e índice de refracción n , como en la figura 24.7. Suponga que los rayos de luz que viajan en aire son casi normales a las dos superficies de la película. Para determinar si los rayos reflejados interfieren constructiva o destructivamente, observe primero los siguientes hechos:

1. Una onda electromagnética que viaja desde un medio con índice de refracción n_1 hacia un medio con índice de refracción n_2 experimenta un cambio de fase de 180° en la reflexión cuando $n_2 > n_1$. No hay cambio de fase en la onda reflejada si $n_2 < n_1$.
2. La longitud de onda de la luz λ_n en un medio con índice de refracción n es

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad [24.7]$$

donde λ es la longitud de onda de la luz en el vacío.

Aplique estas reglas a la película de la figura 24.7. De acuerdo con la primera regla, el rayo 1, que se refleja de la superficie superior A, experimenta un cambio de fase de 180° con respecto a la onda incidente. El rayo 2, que se refleja de la superficie inferior B, no experimenta cambio de fase con respecto a la onda incidente. Por lo tanto, el rayo 1 está 180° fuera de fase con respecto al rayo 2, que es equivalente a una diferencia de trayectoria de $\lambda_n/2$. Sin embargo, también se debe considerar que el rayo 2 recorre una distancia adicional de $2t$ antes de que las ondas se recombinen en el aire sobre la superficie. Por ejemplo,



Los colores observados en las pompas de jabón en agua se deben a interferencia entre los rayos de luz reflejados de las superficies frontal y posterior de la delgada película de jabón que constituye la burbuja. El color depende del grosor de la película, que varía de negro donde la película es más delgada, a magenta donde es más gruesa.

si $2t = \lambda_n/2$, los rayos 1 y 2 se recombinan en fase y resulta interferencia constructiva. En general, la condición para *interferencia constructiva* en película delgada es

$$2t = (m + \frac{1}{2})\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad [24.8]$$

Esta condición toma en consideración dos factores: 1) la diferencia en longitud de trayectoria para los dos rayos (el término $m\lambda_n$) y 2) el cambio de fase de 180° en la reflexión (el término $\lambda_n/2$). Puesto que $\lambda_n = \lambda/n$, la ecuación 24.8 se puede escribir en la forma

$$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad [24.9]$$

Si la distancia adicional $2t$ recorrida por el rayo 2 es un múltiplo de λ_n , las dos ondas se combinan fuera de fase y el resultado es interferencia destructiva. La ecuación general para *interferencia destructiva* en película delgada es

$$2nt = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad [24.10]$$

Las ecuaciones 24.9 y 24.10 para interferencia constructiva y destructiva son válidas cuando sólo hay una inversión de fase. Esto ocurrirá cuando los medios arriba y abajo de la película delgada tienen ambos índices de refracción mayores que la película o cuando ambos tienen índices de refracción menores que la película. La figura 24.7 es un ejemplo: el aire ($n = 1$) que está tanto arriba como abajo de la película tiene un índice de refracción menor que el de la película. Como resultado, hay una inversión de fase en la reflexión de la capa superior de la película, mas no del fondo y aplican las ecuaciones 24.9 y 24.10. **Si la película se coloca entre dos medios diferentes, uno de menor índice refractivo que la película y uno de mayor índice refractivo, las ecuaciones 24.9 y 24.10 se invierten: la ecuación 24.9 se usa para interferencia destructiva y la ecuación 24.10 para interferencia constructiva.** En este caso existe un cambio de fase de 180° tanto para el rayo 1 que se refleja de la superficie A como para el rayo 2 que se refleja de la superficie B, como en la figura 24.9 del ejemplo 24.3 o no hay cambio de fase para algún rayo, que sería el caso si el rayo incidente proviene de abajo de la película. Por lo tanto, el cambio neto en fase relativa debido a las reflexiones es *cero*.



Una película delgada de aceite sobre agua muestra interferencia, lo que se evidencia mediante el patrón de colores cuando luz blanca incide sobre la película. Las variaciones en el grosor de la película producen el patrón de color que interseca. La navaja de rasurar proporciona una idea del tamaño de las bandas coloridas.

Examen rápido

24.4 Suponga que el experimento de Young se realiza en aire y entonces, en un segundo experimento, el aparato se sumerge en agua. ¿En qué forma cambia la distancia entre franjas brillantes? a) Se separan más. b) Se acercan más. c) No cambian.

Tip 24.2 Los dos trucos de las películas delgadas
Asegúrese de incluir *ambos* efectos, longitud de trayectoria y cambio de fase, cuando analice un patrón de interferencia de una película delgada.

Anillos de Newton

Otro método para observar interferencia en ondas de luz es colocar una lente plano-convexa encima de una superficie de vidrio plana, como en la figura 24.8a. Con este arreglo, la película de aire entre las superficies de vidrio varía en grosor desde cero en el punto de

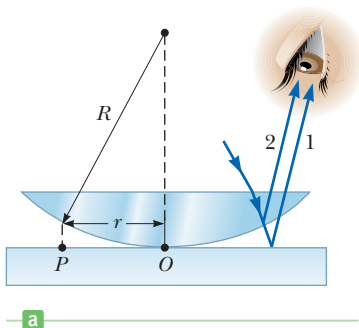


Figura 24.8 a) La combinación de rayos reflejados de la placa de vidrio y la superficie curva de la lente da lugar a un patrón de interferencia conocido como anillos de Newton. b) Fotografía de anillos de Newton. c) Este patrón de interferencia asimétrico indica imperfecciones en la lente.

contacto, hasta cierto valor t en P . Si el radio de curvatura R de la lente es mucho mayor que la distancia r y el sistema se ve desde arriba con luz de longitud de onda λ , se observa un patrón de anillos claros y oscuros (figura 24.8b). Estas franjas circulares, descubiertas por Newton, se llaman **anillos de Newton**. La interferencia se debe a la combinación del rayo 1, reflejado de la placa, con el rayo 2, reflejado desde la superficie inferior de la lente. El rayo 1 experimenta un cambio de fase de 180° en la reflexión porque se refleja desde una frontera que conduce hacia un medio de mayor índice de refracción, mientras que el rayo 2 no experimenta cambio de fase porque se refleja de un medio con menor índice de refracción. Por lo tanto, las condiciones para interferencia constructiva y destructiva se proporcionan en las ecuaciones 24.9 y 24.10, respectivamente, con $n = 1$ porque la “película” es aire. El punto de contacto O es oscuro, como se ve en la figura 24.8b, porque no hay diferencia de trayectoria y el cambio de fase total se debe sólo al cambio de fase de 180° en la reflexión. Al aplicar la geometría que se muestra en la figura 24.8a, podemos obtener expresiones para los radios de las bandas brillante y oscura en términos del radio de curvatura R y longitud de onda en el vacío λ . Por ejemplo, los anillos oscuros tienen radios de $r \approx \sqrt{m\lambda R/n}$.

APLICACIÓN

Comprobación de imperfecciones en lentes ópticas

Un uso importante de los anillos de Newton es la prueba de lentes ópticas. Un patrón circular como el de la figura 24.8b se logra sólo cuando la lente se esmerila en una curvatura perfectamente esférica. Las variaciones de tal simetría pueden producir un patrón como el de la figura 24.8c. Estas variaciones proporcionan un indicio de cómo se deben volver a esmerilar las lentes y pulir para remover imperfecciones.

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Interferencia de película delgada

Los siguientes pasos se recomiendan para abordar los problemas de interferencia de película delgada:

1. Identifique la película delgada que causa la interferencia y los índices de refracción en la película y en el medio en cualquier lado de ella.
2. Determine el número de inversiones de fase: cero, uno o dos.
3. Consulte la siguiente tabla, que contiene las ecuaciones 24.9 y 24.10, y seleccione la columna correcta para el problema en cuestión:

Ecuación ($m = 0, 1, \dots$)	Inversión de fase 1	Inversiones de fase 0 o 2
$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$ [24.9]	Constructiva	Destructiva
$2nt = m\lambda$ [24.10]	Destructiva	Constructiva

4. Sustituya valores en las ecuaciones adecuadas, como se seleccionaron en el paso anterior.

EJEMPLO 24.2 Interferencia en una película jabonosa

OBJETIVO Estudie los efectos de interferencia constructiva en una película delgada.

PROBLEMA a) Calcule el grosor mínimo de una película de pompa de jabón ($n = 1.33$) que resultará en interferencia constructiva en la luz reflejada, si la película se ilumina con luz de 602 nm de longitud de onda en espacio libre. b) Vuelva a calcular el grosor mínimo para interferencia constructiva cuando la película de la pompa de jabón esté en la parte superior de una placa de vidrio con $n = 1.50$.

ESTRATEGIA En el inciso a) sólo hay una inversión, así que la condición para interferencia constructiva es $2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$. El grosor de película mínimo para interferencia constructiva corresponde a $m = 0$ en esta ecuación. El inciso b) involucra dos inversiones, de modo que se requiere $2nt = m\lambda$.

SOLUCIÓN

a) Calcule el grosor mínimo de la película de pompa de jabón que resultará en interferencia constructiva.

Resuelva $2nt = \lambda/2$ para el grosor t y sustituya:

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{602 \text{ nm}}{4(1.33)} = 113 \text{ nm}$$

b) Encuentre el grosor mínimo de la pompa de jabón cuando la película esté en la parte superior de una placa de vidrio con $n = 1.50$.

Escriba la condición para interferencia constructiva, cuando tienen lugar dos inversiones: $2nt = m\lambda$

Resuelva para t y sustituya:

$$t = \frac{m\lambda}{2n} = \frac{1 \cdot (602 \text{ nm})}{2(1.33)} = 226 \text{ nm}$$

COMENTARIOS Los colores que giran en una pompa de jabón resultan del grosor de la capa de jabón que varía de un lugar a otro.

PREGUNTA 24.2 Una película jabonosa parece roja en un área y violeta en otra área cercana. ¿En cuál área la película jabonosa es más gruesa?

EJERCICIO 24.2 ¿Qué otros grosores de película en el inciso a) producirán interferencia constructiva?

RESPUESTAS 339 nm, 566 nm, 792 nm, etcétera

EJEMPLO 24.3 Recubrimientos no reflectivos para celdas solares y lentes ópticos

OBJETIVO Estudie los efectos de interferencia destructiva en una película delgada cuando hay dos inversiones.

PROBLEMA Los semiconductores como el silicio se usan para fabricar celdas solares, dispositivos que generan energía eléctrica cuando se exponen a luz solar. Las celdas solares con frecuencia se recubren con una película delgada transparente, como monóxido de silicio (SiO ; $n = 1.45$), para minimizar las pérdidas reflectivas (figura 24.9). Una celda solar de silicio ($n = 3.50$) se recubre con una delgada película de monóxido de silicio con este propósito. Suponiendo incidencia normal, determine el grosor mínimo de la película que producirá la menor reflexión a una longitud de onda de 552 nm.

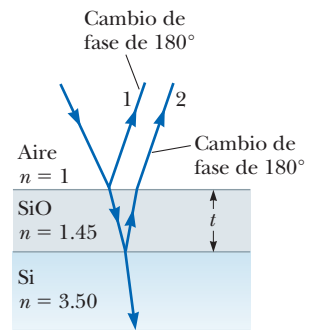


Figura 24.9 (Ejemplo 24.3) Las pérdidas reflectivas de una celda solar de silicio se minimizan al recubrirlas con una película delgada de monóxido de silicio (SiO).

ESTRATEGIA La reflexión es menor cuando los rayos 1 y 2 en la figura 24.9 satisfacen la condición para interferencia destructiva. Observe que *ambos* rayos experimentan cambios de fase de 180° en la reflexión. La condición para una reflexión *mínima* es por lo tanto $2nt = \lambda/2$.

SOLUCIÓN

Resuelva $2nt = \lambda/2$ para t , el grosor requerido:

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{552 \text{ nm}}{4(1.45)} = 95.2 \text{ nm}$$

COMENTARIOS Por lo general, tales recubrimientos reducen la pérdida reflectiva de 30% (sin recubrimiento) a 10% (con recubrimiento) y por lo tanto aumenta la eficiencia de la celda porque más luz está disponible para crear portadores de carga en la celda. En realidad, el recubrimiento nunca es perfectamente no reflectivo, porque el grosor requerido depende de la longitud de onda y la luz incidente cubre un amplio rango de longitudes de onda.

PREGUNTA 24.3 Para minimizar la reflexión de una longitud de onda menor, ¿el grosor del recubrimiento debe ser más grueso o más delgado?

EJERCICIO 24.3 Las lentes de vidrio que se usan en cámaras y otros instrumentos ópticos por lo general están recubiertas con una o más películas transparentes, como fluoruro de magnesio (MgF_2), para reducir o eliminar reflexión indeseada. Carl Zeiss desarrolló este método; su primer recubrimiento fue de 1.00×10^2 nm de grueso, sobre vidrio. Al usar $n = 1.38$ para MgF_2 , ¿qué longitud de onda visible se eliminaría mediante interferencia destructiva en la luz reflejada?

RESPUESTA 552 nm

EJEMPLO 24.4 Interferencia en una película con forma de cuña

OBJETIVO Calcule los efectos de interferencia cuando la película tiene grosor variable.

PROBLEMA Un par de placas de vidrio de 10.0 cm de largo y con $n = 1.52$ se separan en un extremo mediante un cabello, que forma una cuña triangular de aire, como se ilustra en la figura 24.10. Cuando luz coherente de un láser helio-neón con 633 nm de longitud de onda incide sobre la película desde arriba, se observan 15.0 franjas oscuras por centímetro. ¿Cuán grueso es el cabello?

ESTRATEGIA El patrón de interferencia se crea mediante la película delgada de aire que tiene grosor variable. El patrón es una serie de bandas paralelas alternadas brillantes y oscuras. Una banda oscura corresponde a interferencia destructiva y hay una inversión de fase, de modo que se debe usar $2nt = m\lambda$. También puede usar los triángulos semejantes en la figura 24.10 para obtener la relación $t/x = D/L$. Puede encontrar el grosor para cualquier m y si la posición x también se puede encontrar, esta última ecuación proporciona el diámetro del cabello, D .

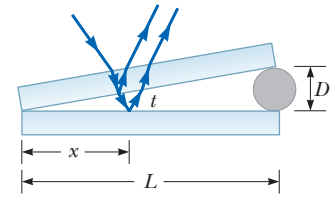


Figura 24.10 (Ejemplo 24.4) Las bandas de interferencia en luz reflejada se pueden observar al iluminar una película con forma de cuña con luz monocromática. Las áreas oscuras en el patrón de interferencia corresponden a posiciones de interferencia destructiva.

SOLUCIÓN

Resuelva la ecuación de interferencia destructiva para el grosor de la película, t , con $n = 1$ para aire:

$$t = \frac{m\lambda}{2}$$

Si d es la distancia desde una banda oscura a la siguiente, entonces la coordenada x de la m -ésima banda es un múltiplo de d :

$$x = md$$

Mediante análisis dimensional, d es justo el inverso del número de bandas por centímetro:

$$d = \left(15.0 \frac{\text{bandas}}{\text{cm}}\right)^{-1} = 6.67 \times 10^{-2} \frac{\text{cm}}{\text{banda}}$$

Ahora use triángulos semejantes y sustituya toda la información:

$$\frac{t}{x} = \frac{m\lambda/2}{md} = \frac{\lambda}{2d} = \frac{D}{L}$$

Resuelva para D y sustituya valores dados:

$$D = \frac{\lambda L}{2d} = \frac{(633 \times 10^{-9} \text{ m})(0.100 \text{ m})}{2(6.67 \times 10^{-4} \text{ m})} = 4.75 \times 10^{-5} \text{ m}$$

COMENTARIOS Algunos pueden preocuparse por la interferencia provocada por la luz que rebota de la parte superior e inferior de, por decir, la placa de vidrio superior. Sin embargo, es improbable que el grosor de la placa sea la mitad de un múltiplo entero de la longitud de onda del láser helio-neón (para algún valor muy grande de m). Además, en contraste con la cuña de aire, el grosor del vidrio no varía.

PREGUNTA 24.4 Si la cuña de aire está llena con agua, ¿cómo se afecta la distancia entre bandas oscuras? Explique.

EJERCICIO 24.4 La cuña de aire se sustituye con agua, con $n = 1.33$. Encuentre la distancia entre bandas oscuras cuando la luz del láser helio-neón golpea las placas de vidrio.

RESPUESTA $5.02 \times 10^{-4} \text{ m}$

FÍSICA APLICADA 24.3 Espejos perfectos

Cuando la luz golpea un espejo metálico, los electrones en los metales se mueven en respuesta a los campos electromagnéticos, que absorben parte de la energía de la luz. Para muchas aplicaciones, como la dirección de la luz láser de alta intensidad, la reducción en la intensidad no es deseable. Un espejo dieléctrico, por el contrario, está hecho de vidrio o de plástico y no conduce la electricidad. Para mejorar la reflexión, capas delgadas de materiales dieléctricos diferentes se apilan en la superficie del vidrio. Si el espesor y constante dieléctrica son elegidos de forma correcta, la luz reflejada por una capa se combina de manera constructiva con la luz reflejada por la capa inferior, aumentando la reflectancia del espejo. Espejos casi perfectos se pueden construir usando varias capas de dieléctrico. Los espejos pueden ser diseñados

para reflejar una determinada longitud de onda o un rango de longitudes de onda.

Espejos dieléctricos, desarrollados en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés) en 1998, tiene un enorme número de aplicaciones. Uno de los más importantes es la fibra OmniGuide, un tubo hueco del tamaño de un espagueti que puede guiar la luz sin una pérdida significativa de la intensidad. (Las fibras ópticas ordinarias tienden a calentarse.) Estas fibras tienen un máximo de cuarenta capas concéntricas de plástico y de vidrio y son muy flexibles. Utilizando una fibra OmniGuide, una intensa luz láser puede ser guiada de forma segura en el cuerpo humano durante una cirugía para extirpar tumores y otros tejidos enfermos sin dañar el tejido sano circundante. ■

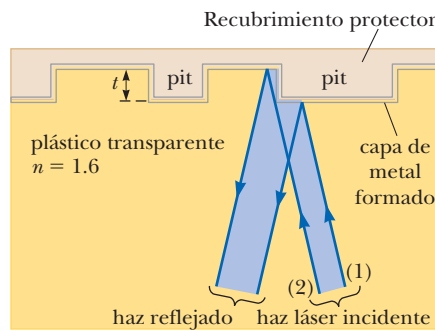
24.5 Uso de interferencia para leer CD y DVD

Los discos compactos (CD) y videodiscos digitales (DVD) revolucionaron las industrias de la computación y el entretenimiento al proporcionar acceso rápido; almacenamiento de alta densidad de texto, gráficos y películas; y grabaciones de sonido de alta calidad. Los datos en estos videodiscos se almacenan de manera digital como una sucesión de ceros y unos, y estos ceros y unos se leen mediante la luz láser que se refleja del disco. Las reflexiones intensas (interferencia constructiva) del disco se eligen para representar ceros y las reflexiones débiles (interferencia destructiva) representan unos.

Para ver con más detalle cómo la interferencia de película delgada juega un papel crucial en la lectura de un CD, considere la figura 24.11. Esta figura muestra una fotomicrografía de varias pistas de un CD que consisten en una secuencia de pits (depresiones, cuando se ven desde la parte superior o lado de etiqueta del disco) de longitud variable formados en una capa de información de metal reflector. La vista transversal de un CD, como se muestra en la figura 24.12, revela que los pits aparecen como protuberancias al haz láser, que brilla en la capa metálica a través de un recubrimiento plástico claro desde abajo.

Conforme el disco gira, el haz láser se refleja en la secuencia de protuberancias y áreas inferiores hacia un fotodetector, que convierte la intensidad de luz reflejada fluctuante en una cadena eléctrica de ceros y unos. Para hacer las fluctuaciones de luz más pronunciadas y fáciles de detectar, la profundidad del pit t se iguala a un cuarto de una longitud de onda de la luz láser en el plástico. Cuando el haz golpea el borde de una protuberancia que se eleva o cae, parte del haz se refleja desde la parte superior de la protuberancia y parte desde el área adyacente inferior, lo que asegura interferencia destructiva y muy baja intensidad cuando los haces reflejados se combinan en el detector. Los bordes de la protuberancia se leen como unos y las partes superiores planas de la protuberancia y terrenos planos intermedios se leen como ceros.

En el ejemplo 24.5, con el uso de un láser infrarrojo de 780 nm de longitud de onda, se calcula la profundidad del pit para un CD estándar. El DVD usa láseres con longitud de onda más corta, de 635 nm y la separación de pistas, profundidad de pit y longitud mínima de pit, son más pequeñas. Estas diferencias permiten a un DVD almacenar cerca de 30 veces más información que un CD.



APLICACIÓN

La física de CD y DVD

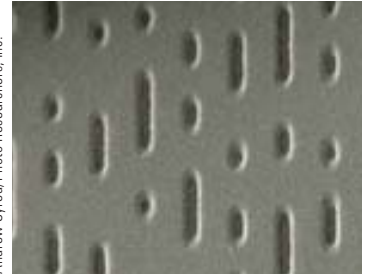


Figura 24.11 Fotomicrografía de pistas adyacentes sobre un disco compacto (CD). La información codificada en estos pits y áreas suaves se lee mediante un haz láser.

Figura 24.12 Sección transversal de un CD que muestra pits metálicos de profundidad t y un haz láser que detecta el borde de un pit.

■ EJEMPLO 24.5 Profundidad de pit en un CD

OBJETIVO Aplique principios de interferencia a un CD.

PROBLEMA Encuentre la profundidad de pit en un CD que tiene una capa plástica transparente con índice de refracción de 1.60 y está diseñado para usar en un reproductor de CD que usa un láser con una longitud de onda de 7.80×10^2 nm en aire.

ESTRATEGIA (Véase la figura 24.12.) Los rayos 1 y 2 se reflejan ambos de la capa metálica, que actúa como un espejo, de modo que no hay diferencia de fase debida a reflexión entre dichos rayos. Sin embargo, sí existe la diferencia de fase usual causada por la distancia adicional $2t$ que recorre el rayo 2. La longitud de onda es λ/n , donde n es el índice de refracción en la sustancia.

(continúa)

SOLUCIÓN

Use la condición adecuada para interferencia destructiva en una película delgada:

$$2t = \frac{\lambda}{2n}$$

Resuelva para el grosor t y sustituya:

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{7.80 \times 10^2 \text{ nm}}{(4)(1.60)} = 1.22 \times 10^2 \text{ nm}$$

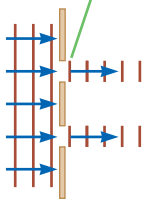
COMENTARIOS Diferentes sistemas de CD tienen diferentes tolerancias a los rayones. Cualquier cosa que cambie las propiedades reflectoras del disco puede afectar la legibilidad del disco.

PREGUNTA 24.5 Verdadero o Falso: Dados dos plásticos con diferentes índices de refracción, el material con el índice de refracción más grande tendrá una mayor profundidad de pit.

EJERCICIO 24.5 Repita el ejemplo para un láser con longitud de onda de 635 nm.

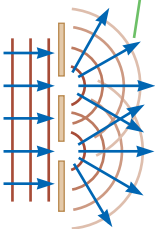
RESPUESTA 99.2 nm

La luz que pasa a través de rendijas estrechas *no* se comporta de esta manera.



a

La luz que pasa a través de rendijas estrechas se *difracta*.



b

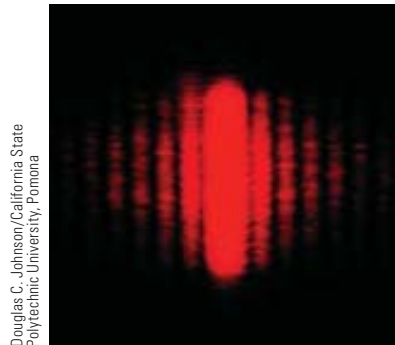
Figura 24.13 a) Si la luz no se dispersara después de pasar a través de las rendijas, no ocurriría interferencia. b) La luz proveniente de las dos rendijas se traslapa conforme se dispersa y llena las regiones sombreadas esperadas con luz y produce franjas de interferencia.

24.6 Difracción

Suponga que un haz de luz incide sobre dos rendijas, como en el experimento de doble rendija de Young. Si la luz realmente viaja en trayectorias en línea recta después de pasar a través de las rendijas, como en la figura 24.13a, las ondas no se traslaparían y no se vería patrón de interferencia. En vez de ello, el principio de Huygens requiere que las ondas se dispersen de las rendijas, como se muestra en la figura 24.13b. En otras palabras, la luz se dobla desde una trayectoria en línea recta y entra a la región que de otro modo sería sombreada. Esta dispersión de la luz desde su línea de viaje inicial se llama **difracción**.

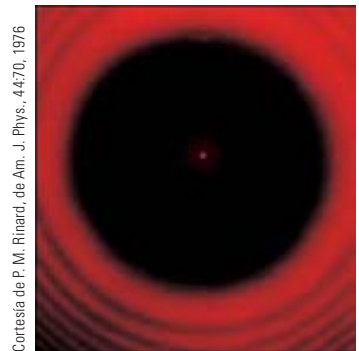
En general, la difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de una pequeña abertura, alrededor de obstáculos o mediante bordes agudos. Por ejemplo, cuando una sola rendija estrecha se coloca entre una fuente de luz distante (o un haz láser) y una pantalla, la luz produce un patrón de difracción como el de la figura 24.14. El patrón consiste en una amplia banda central intensa flanqueada por una serie de bandas secundarias más estrechas y menos intensas (llamados **máximos secundarios**) y una serie de bandas oscuras, o **mínimos**. Este fenómeno no se puede explicar dentro del marco de la óptica geométrica, que dice que los rayos de luz que viajan en línea recta deben proyectar una imagen clara de la rendija sobre la pantalla.

La figura 24.15 muestra el patrón de difracción y sombra de una moneda. El patrón consiste en la sombra, una mancha brillante en su centro y una serie de bandas de



Douglas C. Johnson/California State Polytechnic University, Pomona

Figura 24.14 Patrón de difracción que aparece sobre una pantalla cuando la luz pasa a través de una estrecha rendija vertical. El patrón consiste en una amplia banda central y una serie de bandas laterales menos intensas y más estrechas.



Cortesía de P. M. Rinard, de Am. J. Phys., 44:70, 1976

Figura 24.15 Patrón de difracción de una moneda colocada a medio camino entre la pantalla y la fuente. Observe el punto brillante en el centro.

luz circulares brillantes y oscuras cerca de la sombra. La mancha brillante en el centro (llamada la *mancha brillante de Fresnel*) se explica mediante la teoría ondulatoria de la luz de Augustin Fresnel, que predice interferencia constructiva en este punto para ciertas ubicaciones de la moneda. Desde el punto de vista de la óptica geométrica, no habría mancha brillante alguna: la moneda ocultaría por completo el centro del patrón.

Un tipo de difracción, llamada **difracción de Fraunhofer**, ocurre cuando los rayos salen del objeto difractante en direcciones paralelas. La difracción de Fraunhofer se puede lograr en experimentos o al colocar la pantalla de observación lejos de la rendija o con el uso de una lente convergente para enfocar los rayos paralelos sobre una pantalla cercana, como en la figura activa 24.16a. A lo largo del eje, en $\theta = 0$, se observa una franja brillante, con franjas oscuras y brillantes alternas en cada lado de la franja brillante central. La figura activa 24.16b es una fotografía de un patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija.

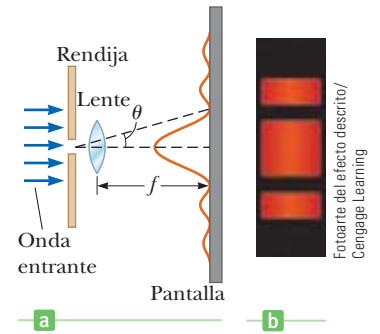


Figura activa 24.16 a) Patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija. Los rayos paralelos se llevan a foco sobre la pantalla con una lente convergente. El patrón consiste en una región brillante central flanqueada por máximos mucho más débiles. (Este dibujo no está a escala.) b) Fotografía de un patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija.

24.7 Difracción de una sola rendija

Hasta ahora supusimos que las rendijas que tienen ancho despreciable, actúan como fuentes lineales de luz. En esta sección determinaremos cómo sus anchos distintos de cero son la base para comprender la naturaleza del patrón de difracción de Fraunhofer producido por una sola rendija.

A partir de este problema se pueden deducir algunas características importantes al examinar las ondas provenientes desde varias porciones de la rendija, como se muestra en la figura 24.17. De acuerdo con el principio de Huygens, **cada porción de la rendija actúa como una fuente de ondas. Por lo tanto, la luz proveniente de una porción de la rendija puede interferir con la luz proveniente de otra porción** y la intensidad resultante sobre la pantalla depende de la dirección θ .

Para analizar el patrón de difracción, es conveniente dividir la rendija en mitades, como en la figura 24.17. Todas las ondas que se originan en la rendija están en fase. Considere las ondas 1 y 3, que se originan en el fondo y el centro de la rendija, respectivamente. La onda 1 viaja más que la onda 3 por una cantidad igual a la diferencia de trayectoria $(a/2) \sin \theta$, donde a es el ancho de la rendija. De igual modo la diferencia de trayectoria entre las ondas 3 y 5 es $(a/2) \sin \theta$. Si esta diferencia de trayectoria es exactamente la mitad de una longitud de onda (que corresponde a una diferencia de fase de 180°), las dos ondas se cancelan de manera mutua y resulta interferencia destructiva. Esto es cierto, de hecho, para cualesquiera dos ondas que se originan en puntos separados por medio ancho de rendija porque la diferencia entre dos de tales puntos es 180° . Por lo tanto, las ondas provenientes de la mitad superior de la rendija interfieren *destructivamente* con las ondas provenientes de la mitad inferior de la rendija cuando

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

o bien

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

Si la rendija se divide en cuatro partes en lugar de dos y se usa un razonamiento similar, se encuentra que la pantalla también es oscura cuando

$$\sin \theta = \frac{2\lambda}{a}$$

Al continuar de esta forma, puede dividir la rendija en seis partes y demostrar que la oscuridad ocurre sobre la pantalla cuando

$$\sin \theta = \frac{3\lambda}{a}$$

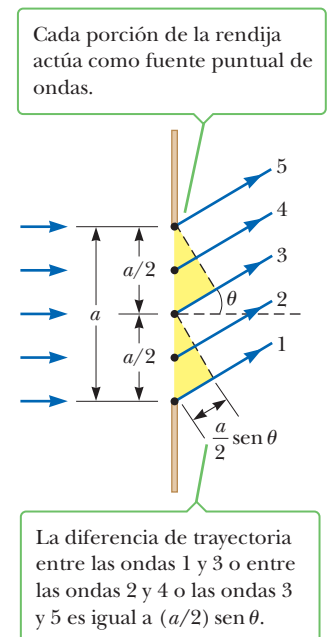
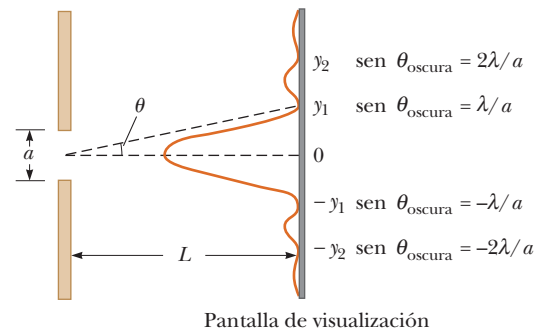


Figura 24.17 Difracción de luz mediante una rendija estrecha de ancho a . (Este dibujo no está a escala y se supone que las ondas convergen en un punto distante.)

Figura 24.18 Posiciones de los mínimos para el patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija de ancho a . (Este dibujo no está a escala.)



Por lo tanto, la condición general para **interferencia destructiva** para una sola rendija de ancho a es

$$\text{sen } \theta_{\text{oscuro}} = m \frac{\lambda}{a} \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad [24.11]$$

La ecuación 24.11 proporciona los valores de θ para los cuales el patrón de difracción tiene intensidad cero, donde se forma una franja oscura. Sin embargo, la ecuación no dice nada acerca de la variación en intensidad a lo largo de la pantalla. Las características generales de la distribución de intensidad a lo largo de la pantalla se muestran en la figura 24.18. Una amplia franja brillante central está flanqueada por franjas brillantes mucho más débiles que alternan con franjas oscuras. Las diversas franjas oscuras (puntos de intensidad cero) ocurren en los valores de θ que satisfacen la ecuación 24.11. Los puntos de interferencia constructiva yacen aproximadamente a la mitad entre las franjas oscuras. Observe que la franja brillante central es el doble de ancha que los máximos más débiles que tienen $m > 1$.

Tip 24.3 Lo mismo, pero diferente

Aunque las ecuaciones 24.2 y 24.11 tienen la misma forma, tienen diferentes significados. La ecuación 24.2 describe las regiones brillantes en un patrón de interferencia de dos rendijas, mientras que la ecuación 24.11 describe las regiones oscuras en un patrón de interferencia de una sola rendija

Examen rápido

24.5 En un experimento de difracción de una sola rendija, conforme el ancho de la rendija se hace más pequeño, ¿el ancho del máximo central del patrón de difracción a) se vuelve más pequeño, b) se vuelve más grande o c) permanece igual?

■ FÍSICA APLICADA 24.4 Difracción de ondas sonoras

Si la puerta de un salón de clase se abre una pequeña cantidad, puede escuchar los sonidos provenientes del corredor, aunque no pueda ver lo que ocurre. ¿Cómo se puede explicar esta diferencia?

EXPLICACIÓN El espacio entre la puerta ligeramente abierta y la pared actúa como una sola rendija para ondas.

Las ondas sonoras tienen longitudes de onda más grandes que el ancho de la rendija, así que el sonido se difracta mediante la abertura y el máximo central se dispersa a través de la habitación. Las longitudes de onda de la luz son mucho menores que el ancho de la rendija, así que virtualmente no hay difracción para la luz. Usted debe tener una línea de visión directa para detectar las ondas de luz. ■

■ EJEMPLO 24.6 Experimento de una sola rendija

OBJETIVO Encuentre las posiciones de las franjas oscuras en difracción de una sola rendija.

PROBLEMA Luz con longitud de onda de 5.80×10^2 nm incide sobre una rendija de 0.300 mm de ancho. La pantalla de observación se coloca a 2.00 m de la rendija. Determine las posiciones de las primeras franjas oscuras y el ancho de la franja brillante central.

ESTRATEGIA Este problema requiere sustitución en la ecuación 24.11 para determinar los senos de los ángulos de las primeras franjas oscuras. Entonces las posiciones se pueden encontrar con la función tangente porque, para ángulos pequeños, $\text{sen } \theta \approx \tan \theta$. La extensión del máximo central se define mediante estas dos franjas oscuras.

SOLUCIÓN

Las primeras franjas oscuras que flanquean la franja brillante central corresponden a $m = \pm 1$ en la ecuación 24.11:

$$\text{sen } \theta = \pm \frac{\lambda}{a} = \pm \frac{5.80 \times 10^{-7} \text{ m}}{0.300 \times 10^{-3} \text{ m}} = \pm 1.93 \times 10^{-3}$$

Use el triángulo en la figura 24.18 para relacionar la posición de la franja con la función tangente:

$$\tan \theta = \frac{y_1}{L}$$

Puesto que θ es muy pequeña, puede usar la aproximación $\sin \theta \approx \tan \theta$ y luego resolver para y_1 :

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \frac{y_1}{L}$$

$$y_1 \approx L \sin \theta = (2.00 \text{ m})(\pm 1.93 \times 10^{-3}) = \pm 3.86 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Calcule la distancia entre los máximos positivo y negativo de primer orden, que es el ancho w del máximo central:

$$w = +3.86 \times 10^{-3} \text{ m} - (-3.86 \times 10^{-3} \text{ m}) = 7.72 \times 10^{-3} \text{ m}$$

COMENTARIOS Note que este valor de w es mucho mayor que el ancho de la rendija. Sin embargo, conforme el ancho de la rendija *aumenta*, el patrón de difracción *se estrecha*, lo que corresponde a valores más pequeños de θ . De hecho, para valores grandes de a , los máximos y mínimos están tan cercanamente espaciados que el único patrón observable es una gran área brillante central que recuerda la imagen geométrica de la rendija. Puesto que el ancho de la imagen geométrica aumenta conforme el ancho de la rendija aumenta, la imagen más estrecha ocurre cuando los anchos geométrico y de difracción son iguales.

PREGUNTA 24.6 Suponga que todo el aparato se sumerge en agua. Si la misma longitud de onda de luz (en aire) incide sobre la rendija sumergida en agua, ¿el máximo central resultante es mayor o menor? Explique.

EJERCICIO 24.6 Determine el ancho de la franja brillante de primer orden en el ejemplo, cuando el aparato está en aire.

RESPUESTA 3.86 mm

24.8 La rejilla de difracción

La rejilla de difracción, un útil dispositivo para analizar fuentes de luz, consiste en un gran número de rendijas paralelas igualmente espaciadas. Una rejilla se puede elaborar al rayar líneas paralelas sobre una placa de vidrio con una técnica de fabricación de precisión. Los paneles claros entre rayas actúan como rendijas. Una rejilla típica contiene muchos miles de líneas por centímetro. Por ejemplo, una rejilla pautada con 5000 líneas/cm tiene un espaciamiento de rendija d igual al recíproco de dicho número; por lo tanto, $d = (1/5000) \text{ cm} = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}$.

La figura activa 24.19 es un diagrama esquemático de una sección de una rejilla de difracción plana. Una onda plana incide desde la izquierda, normal al plano de la rejilla.

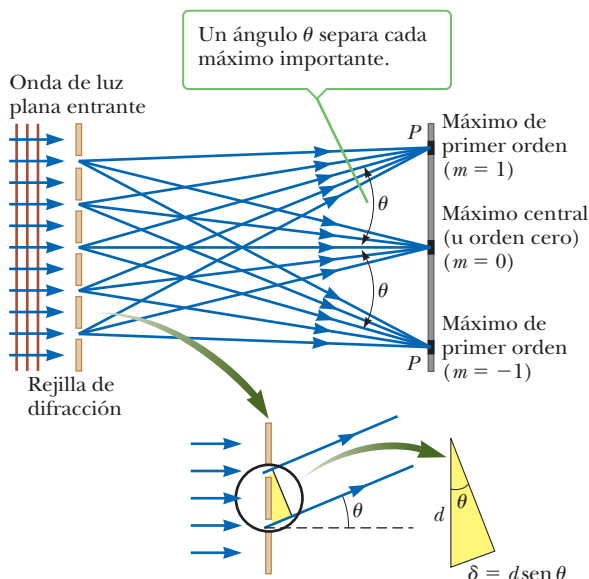


Figura activa 24.19 Vista lateral de una rejilla de difracción. La separación de rendijas es d y la diferencia de trayectoria entre rendijas adyacentes es $d \sin \theta$.

La intensidad del patrón sobre la pantalla es resultado de los efectos combinados de interferencia y difracción. Cada rendija causa difracción y los haces difractados a su vez interfieren unos con otros para producir el patrón. Más aún, cada rendija actúa como una fuente de ondas y todas las ondas parten en fase en las rendijas. Sin embargo, para alguna dirección arbitraria θ medida desde la horizontal, las ondas deben recorrer *diferentes* longitudes de trayectoria antes de llegar a un punto particular P sobre la pantalla. En la figura 24.19, observe que la diferencia de trayectoria entre ondas desde cualesquiera dos rendijas adyacentes es $d \sin \theta$. Si esta diferencia de trayectoria es igual a una longitud de onda o cierto múltiplo entero de una longitud de onda, las ondas de todas las rendijas estarán en fase en P y en dicho punto se observará una línea brillante. Por lo tanto, la condición para **máximos** en el patrón de interferencia en el ángulo θ es

$$d \sin \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.12]$$

Condición para máximos en el patrón de interferencia de una rejilla de difracción

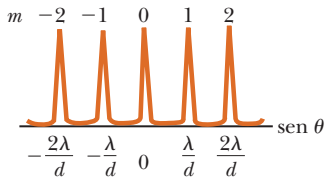


Figura activa 24.20 Intensidad contra $\sin \theta$ para la rejilla de difracción. Se muestran los máximos principales de orden cero, primero y segundo.

La luz que sale de una rendija a un ángulo distinto a aquel para un máximo interfiere casi por completo de manera destructiva con la luz proveniente de alguna otra rendija en la rejilla. Todos esos pares resultarán en poca o ninguna transmisión en dicha dirección, como se ilustra en la figura 24.20.

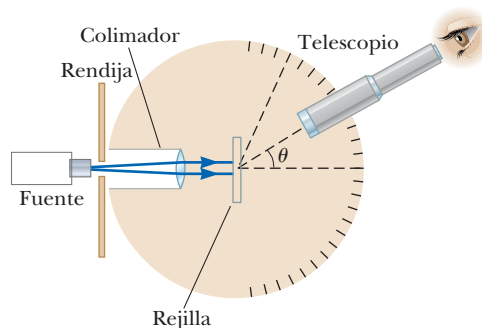
La ecuación 24.12 se puede usar para calcular la longitud de onda a partir del espaciamiento de la rejilla y el ángulo de desviación, θ . El entero m es el **número de orden** del patrón de difracción. Si la radiación incidente contiene muchas longitudes de onda, cada longitud de onda se desvía a través de un ángulo específico, que se puede encontrar a partir de la ecuación 24.12. Todas las longitudes de onda se enfocan en $\theta = 0$, que corresponden a $m = 0$. Este punto se llama *máximo de orden cero*. El *máximo de primer orden*, que corresponde a $m = 1$, se observa a un ángulo que satisface la relación $\sin \theta = \lambda/d$; el *máximo de segundo orden*, que corresponde a $m = 2$, se observa a un ángulo mayor θ , etc. La figura activa 24.20 es un bosquejo de la distribución de intensidad para algunos de los órdenes producidos por una rejilla de difracción. Observe lo agudo del máximo principal y el amplio rango de áreas oscuras, un patrón en contraste directo con las amplias franjas brillantes características del patrón de interferencia de dos rendijas.

En la figura activa 24.21 se muestra un arreglo simple que se puede usar para medir los ángulos en un patrón de difracción. Esta configuración es una forma de espectrómetro de rejilla de difracción. La luz a analizar pasa a través de una rendija y se forma un haz paralelo mediante una lente. Luego la luz golpea la rejilla a un ángulo de 90° . Para ver la imagen de la rendija se usa un telescopio. La longitud de onda se puede determinar al medir los ángulos en los que aparecen las imágenes de la rendija para los diversos órdenes.

Examen rápido

24.6 Si luz láser se refleja de un disco fonográfico o un disco compacto, aparece un patrón de difracción. El patrón surge porque ambos dispositivos contienen pistas paralelas de información que actúan como rejilla de difracción por reflexión. ¿Cuál dispositivo, disco o compacto, resulta en máximos de difracción que están más separados?

Figura activa 24.21 Diagrama de un espectrómetro de rejilla de difracción. El haz colimado incidente sobre la rejilla se difracta en los diversos órdenes en los ángulos θ que satisfacen la ecuación $d \sin \theta = m\lambda$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$



■ FÍSICA APLICADA 24.5 Prisma frente a rejilla

Cuando luz blanca entra a través de una abertura en una caja opaca y sale a través de una abertura en el otro lado de la misma, sobre la pared aparece un espectro de colores. A partir de esta observación, ¿cómo podría usted determinar si la caja contiene un prisma o una rejilla de difracción?

EXPLICACIÓN La determinación se podría hacer al observar el orden de los colores en el espectro, en relación con la dirección del haz original de luz blanca. Para un prisma, en el que la separación de la luz es resultado de dispersión,

la luz violeta se refractará más que la luz roja. Por ende, el orden del espectro de un prisma será desde rojo, más cerca a la dirección original, hacia violeta. Para una rejilla de difracción, el ángulo de difracción aumenta con la longitud de onda, de modo que el espectro proveniente de la rejilla de difracción tendrá colores en el orden desde violeta, más cerca a la dirección original, hacia rojo. Más aún, la rejilla de difracción producirá *dos* espectros de primer orden en cualquier lado de la rejilla, mientras que el prisma sólo producirá un espectro. ■

■ FÍSICA APLICADA 24.6 Arco iris desde un disco compacto

La luz blanca reflejada desde la superficie de un CD tiene una apariencia multicolor, como se muestra en la figura 24.22. La observación depende de la orientación del disco en relación

con el ojo y la posición de la fuente de luz. Explique cómo funciona esto.

EXPLICACIÓN La superficie de un CD tiene una pista en espiral (con un espaciamiento cercano a $1 \mu\text{m}$) que actúa como rejilla de reflexión. La luz que se dispersa mediante estas pistas paralelas cercanamente espaciadas depende tanto de la longitud de onda como de la dirección de la luz incidente. Cualquier sección del disco sirve como rejilla de difracción para luz blanca, que envía haces de interferencia constructiva para diferentes colores en diversas direcciones. Los distintos colores que se ven cuando observa una sección del disco cambian conforme la fuente de luz, el disco o usted se mueven para cambiar los ángulos de incidencia o difracción. ■



Figura 24.22 (Física aplicada 24.6) Los discos compactos actúan como rejillas de difracción cuando se observan bajo luz blanca.

Uso de una rejilla de difracción en rastreo en un CD

Si un reproductor de CD debe reproducir el sonido con fidelidad, el haz láser debe seguir la pista espiral de información a la perfección. Sin embargo, en ocasiones el haz láser puede salirse de la pista y, sin un procedimiento de retroalimentación para permitir que el reproductor sepa lo que ocurre, la fidelidad de la música se puede reducir en gran cantidad.

La figura 24.23 muestra cómo se usa una rejilla de difracción en un método de tres haces para mantener el haz en pista. El máximo central del patrón de difracción lee la información sobre la pista del CD y los dos máximos de primer orden dirigen el haz. La rejilla se diseña de modo que los máximos de primer orden caen sobre las superficies lisas en cualquier lado de la pista de información. Estos dos rayos reflejados tienen sus propios

APLICACIÓN

Rastreo de información en un CD

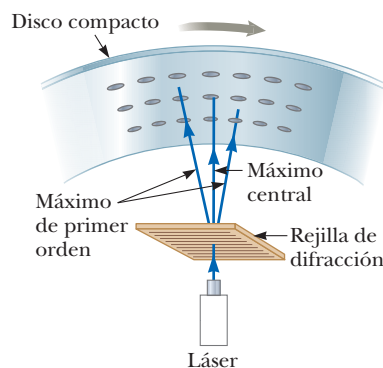


Figura 24.23 El haz láser en un reproductor de CD puede seguir la pista espiral con el uso de tres haces producidos con una rejilla de difracción.

detectores y dado que ambos haces se reflejan en superficies lisas, deben tener la misma intensidad cuando se detectan. Sin embargo, si el haz central sale de la pista, uno de los haces de dirección comenzará a golpear protuberancias en la pista de información y la cantidad de luz reflejada disminuirá. Entonces esta información se usa mediante circuitos electrónicos para dirigir el haz principal de vuelta a la ubicación deseada.

■ EJEMPLO 24.7 Una rejilla de difracción

OBJETIVO Calcule máximos principales de diferente orden para una rejilla de difracción.

PROBLEMA Luz monocromática de un láser helio-neón ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) incide de manera normal sobre una rejilla de difracción que contiene 6.00×10^3 líneas/cm. Encuentre los ángulos en los cuales uno observaría el máximo de primer orden, el máximo de segundo orden, etcétera.

ESTRATEGIA Encuentre la separación de las rendijas al invertir el número de líneas por centímetro, luego sustituya en la ecuación 24.12.

SOLUCIÓN

Invierta el número de líneas por centímetro para obtener la separación de las rendijas:

$$d = \frac{1}{6.00 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}} = 1.67 \times 10^{-4} \text{ cm} = 1.67 \times 10^3 \text{ nm}$$

Sustituya $m = 1$ en la ecuación 24.12 para encontrar el seno del ángulo correspondiente al máximo de primer orden:

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{\lambda}{d} = \frac{632.8 \text{ nm}}{1.67 \times 10^3 \text{ nm}} = 0.379$$

Tome el seno inverso del resultado anterior para encontrar θ_1 :

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} 0.379 = 22.3^\circ$$

Repita el cálculo para $m = 2$:

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{2\lambda}{d} = \frac{2(632.8 \text{ nm})}{1.67 \times 10^3 \text{ nm}} = 0.758$$

$$\theta_2 = 49.3^\circ$$

Repita el cálculo para $m = 3$:

$$\text{sen } \theta_3 = \frac{3\lambda}{d} = \frac{3(632.8 \text{ nm})}{1.67 \times 10^3 \text{ nm}} = 1.14$$

Puesto que $\text{sen } \theta$ no puede exceder 1, no hay solución para θ_3 .

COMENTARIOS El cálculo anterior demuestra que sólo puede haber un número finito de máximos principales. En este caso sólo se observarían máximos de orden cero, primero y segundo.

PREGUNTA 24.7 ¿Una rejilla de difracción con más líneas tiene una separación menor o mayor entre máximos principales adyacentes?

EJERCICIO 24.7 Suponga que en lugar de luz monocromática se usa luz con longitud de onda de $7.80 \times 10^2 \text{ nm}$ y que la rejilla de difracción tiene 3.30×10^3 líneas por centímetro. Encuentre los ángulos de todos los máximos principales.

RESPUESTAS $0^\circ, 14.9^\circ, 31.0^\circ, 50.6^\circ$

24.9 Polarización de ondas de luz

En el capítulo 21 describimos la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas. La figura 24.24 muestra que los vectores de campo eléctrico y magnético asociados con una onda electromagnética están en ángulos rectos entre sí y también con la dirección de propagación de la onda. El fenómeno de polarización, descrito en esta sección, es firme evidencia de la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas.

Un haz de luz ordinario consiste en un gran número de ondas electromagnéticas emitidas por los átomos o moléculas de la fuente de luz. Las cargas vibratorias asociadas con

los átomos actúan como pequeñas antenas. Cada átomo produce una onda con su propia orientación de \vec{E} , como en la figura 24.24, que corresponde a la dirección de vibración atómica. Sin embargo, dado que todas las direcciones de vibración son posibles, la onda electromagnética resultante es una superposición de ondas producidas por las fuentes atómicas individuales. El resultado es una onda de luz **no polarizada**, representada de manera esquemática en la figura 24.25a. La dirección de propagación de la onda que se muestra en la figura es perpendicular a la página. Observe que *todas* las direcciones del vector de campo eléctrico son de igual forma probables y yacen en un plano (como el plano de esta página) perpendicular a la dirección de propagación.

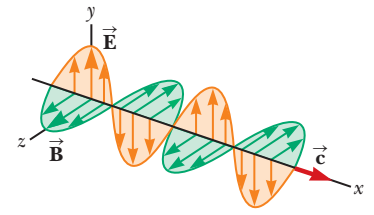


Figura 24.24 Diagrama esquemático de una onda electromagnética polarizada que se propaga en la dirección x . El vector de campo eléctrico \vec{E} vibra en el plano xy , mientras que el vector de campo magnético \vec{B} vibra en el plano xz .

Se dice que una onda está **linealmente polarizada** si el campo eléctrico resultante \vec{E} vibra en la misma dirección *en todo momento* en un punto particular, como en la figura 24.25b. (A veces tal onda se describe como *polarizada plana* o sólo *polarizada*.) La onda en la figura 24.24 es un ejemplo de una onda que está linealmente polarizada en la dirección y . Conforme la onda se propaga en la dirección x , \vec{E} siempre está en la dirección y . El plano que forma \vec{E} y la dirección de propagación se llama *plano de polarización* de la onda. En la figura 24.24 el plano de polarización es el plano xy .

Es posible obtener un haz linealmente polarizado a partir de un haz no polarizado al remover todas las ondas del haz excepto aquellas con vectores de campo eléctrico que oscilan en un solo plano. Ahora analizaremos tres procesos para hacer esto: 1) absorción selectiva, 2) reflexión y 3) dispersión.

Polarización mediante absorción selectiva

La técnica más común para polarizar luz es usar un material que transmita ondas que tengan vectores de campo eléctrico que vibren en un plano paralelo a cierta dirección y absorban dichas ondas con vectores de campo eléctrico que vibren en direcciones perpendiculares a dicha dirección.

En 1932, E. H. Land descubrió un material, que llamó **Polaroid**, que polariza luz a través de absorción selectiva mediante moléculas orientadas. Este material se fabrica en hojas delgadas de hidrocarburos de cadena larga, que se estiran durante la fabricación de modo que las moléculas se alinean. Después de que una hoja se sumerge en una solución que contiene yodo, las moléculas se convierten en buenos conductores eléctricos. Sin embargo, la conducción tiene lugar principalmente a lo largo de las cadenas de hidrocarburos, porque los electrones de valencia de las moléculas se pueden mover con facilidad sólo a lo largo de dichas cadenas. (Recuerde que los electrones de valencia son electrones “libres” que se pueden mover de forma fácil a través del conductor.) Como resultado, las moléculas fácilmente *absorben* luz que tiene un vector de campo eléctrico paralelo a sus longitudes y *transmiten* luz con un vector de campo eléctrico perpendicular a sus longitudes. Es común referirse a la dirección perpendicular a las cadenas moleculares como el **eje de transmisión**. En un polarizador ideal, se absorbe toda la luz con \vec{E} perpendicular al eje de transmisión.

Los materiales polarizadores reducen la intensidad de la luz que pasa a través de ellos. En la figura activa 24.26 un haz de luz no polarizada incide sobre la primera hoja polarizadora,

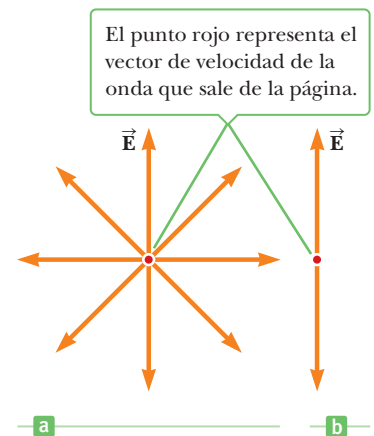


Figura 24.25 a) Un haz de luz no polarizado visto a lo largo de la dirección de propagación (perpendicular a la página). El vector de campo eléctrico puede vibrar en cualquier dirección con igual probabilidad. b) Un haz de luz linealmente polarizado con el vector de campo eléctrico que vibra en la dirección vertical.

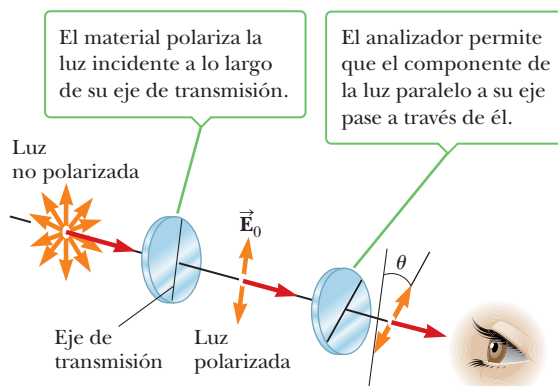
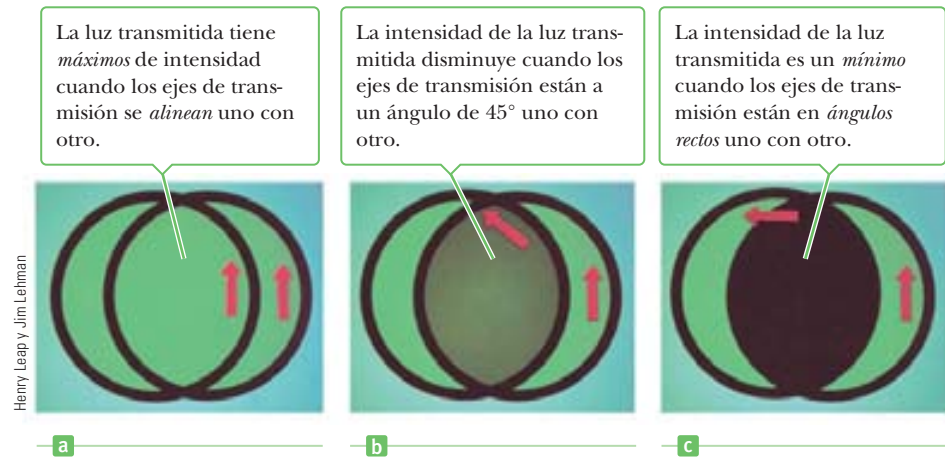


Figura activa 24.26 Dos hojas polarizadoras cuyos ejes de transmisión forman un ángulo θ entre sí. Sólo se transmite una fracción de la luz polarizada que incide sobre el analizador.

Figura 24.27 La intensidad de la luz transmitida a través de dos polarizadores depende de las orientaciones relativas de sus ejes de transmisión.



llamada **polarizador**; el eje de transmisión es como se indica. La luz que pasa a través de esta hoja se polariza verticalmente y el vector de campo eléctrico transmitido es \vec{E}_0 . Una segunda hoja polarizadora, llamada **analizador**, intercepta este haz con su eje de transmisión a un ángulo de θ con el eje del polarizador. El componente de \vec{E}_0 que es perpendicular al eje del analizador se absorbe por completo. Al componente de \vec{E}_0 que es paralelo al eje del analizador, $E_0 \cos \theta$, se le permite pasar a través del analizador. Puesto que la intensidad del haz transmitido varía como el *cuadrado* de su amplitud E , se concluye que la intensidad del haz (polarizado) transmitido a través del analizador varía como

Ley de Malus ►

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad [24.13]$$

donde I_0 es la intensidad de la onda polarizada incidente sobre el analizador. Esta expresión, conocida como **ley de Malus**, se aplica a cualesquiera dos materiales polarizadores que tienen ejes de transmisión a un ángulo θ uno con otro. Observe de la ecuación 24.13 que la intensidad transmitida es un máximo cuando los ejes de transmisión son paralelos ($\theta = 0$ o 180°) y es un mínimo (absorción completa por el analizador) cuando los ejes de transmisión son mutuamente perpendiculares. Esta variación en intensidad transmitida a través de un par de hojas polarizadoras se ilustra en la figura 24.27.

Cuando luz no polarizada con intensidad I_0 se envía a través de un solo polarizador ideal, la luz linealmente polarizada que se transmite tiene intensidad $I_0/2$. Este hecho se sigue de la ley de Malus, porque el valor promedio de $\cos^2 \theta$ es un medio.

■ FÍSICA APLICADA 24.7 Microondas de polarización

Un polarizador para microondas se puede fabricar como una rejilla de alambres metálicos paralelos separados por cerca de 1 cm. ¿El vector de campo eléctrico para las microondas transmitidas a través de este polarizador es paralelo o perpendicular a los alambres metálicos?

EXPLICACIÓN Los vectores de campo eléctrico paralelos a los alambres metálicos hacen que los electrones en el metal

oscilen paralelos al alambre. Por ende, la energía de las ondas con estos vectores de campo eléctrico se transfiere al metal al acelerar los electrones y eventualmente se transforma en energía interna a través de la resistencia del metal. Las ondas con vectores de campo eléctrico perpendiculares a los alambres metálicos no pueden acelerar electrones y pasan a través de los alambres. En consecuencia, la polarización del campo eléctrico es perpendicular a los alambres metálicos. ■

■ EJEMPLO 24.8 Polarizador

OBJETIVO Comprenda cómo los materiales polarizadores afectan la intensidad de la luz.

PROBLEMA Luz no polarizada incide sobre tres polarizadores. El primer polarizador tiene un eje de transmisión vertical, el segundo tiene un eje de transmisión rotado 30.0° con respecto al primero y el tercero tiene un eje de transmisión rotado 75.0° en relación con el primero. Si la intensidad de luz inicial del haz es I_0 , calcule la intensidad de la luz después de que el haz pasa a través de **a**) el segundo polarizador y **b**) el tercer polarizador.

ESTRATEGIA Después de que el haz pasa a través del primer polarizador, se polariza y su intensidad se corta a la mitad. Entonces se puede aplicar la ley de Malus al segundo y tercer polarizadores. El ángulo que se usa en la ley de Malus debe ser en relación con el eje de transmisión inmediatamente anterior.

SOLUCIÓN

a) Calcule la intensidad del haz después de que pasa a través del segundo polarizador.

La intensidad incidente es $I_b/2$. Aplique la ley de Malus al segundo polarizador:

$$I_2 = I_0 \cos^2 \theta = \frac{I_b}{2} \cos^2 (30.0^\circ) = \frac{I_b}{2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 = \frac{3}{8} I_b$$

b) Calcule la intensidad del haz después de que pasa a través del tercer polarizador.

La intensidad incidente ahora es $3I_b/8$. Aplique la ley de Malus al tercer polarizador:

$$I_3 = I_2 \cos^2 \theta = \frac{3}{8} I_b \cos^2 (45.0^\circ) = \frac{3}{8} I_b \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = \frac{3}{16} I_b$$

COMENTARIOS Observe que el ángulo que se usó en el inciso b) no fue 75.0° , sino $75.0^\circ - 30.0^\circ = 45.0^\circ$. El ángulo siempre es con respecto al eje de transmisión del polarizador anterior, porque el material polarizador determina físicamente qué dirección pueden tener los campos eléctricos transmitidos.

PREGUNTA 24.8 ¿A qué ángulo, en relación con el polarizador anterior, se debe colocar un polarizador adicional de modo que bloquee por completo la luz?

EJERCICIO 24.8 Los polarizadores se rotan de modo que el segundo polarizador tiene un eje de transmisión de 40.0° con respecto al primer polarizador y el tercer polarizador tiene un ángulo de 90.0° con respecto al primero. Si I_b es la intensidad de la luz no polarizada original, ¿cuál es la intensidad del haz después de que pasa a través de a) el segundo polarizador y b) el tercer polarizador? c) ¿Cuál es la intensidad transmitida final si se quita el segundo polarizador?

RESPUESTAS a) $0.293I_b$ b) $0.121I_b$ c) 0

Polarización por reflexión

Cuando un haz de luz no polarizada se refleja en una superficie, la luz reflejada es por completo polarizada, parcialmente polarizada o no polarizada, dependiendo del ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia es 0° o 90° (un ángulo normal o que pasa rozando), el haz reflejado es no polarizado. Sin embargo, para ángulos de incidencia entre 0° y 90° , la luz reflejada es polarizada en cierta medida. Para un ángulo de incidencia particular, el haz reflejado es totalmente polarizado.

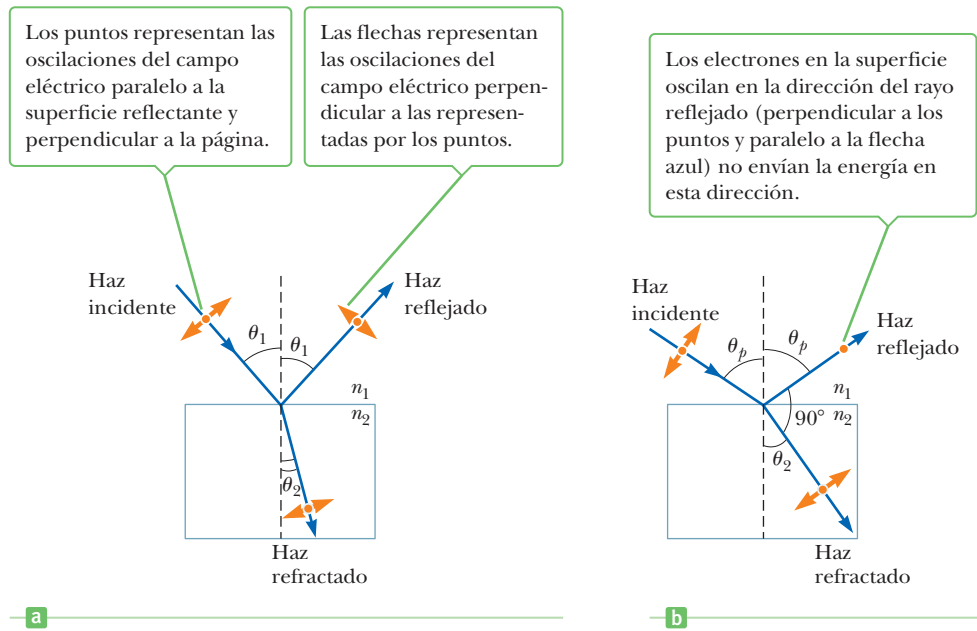
Suponga que un haz de luz no polarizado incide sobre una superficie, como en la figura 24.28a en la página 846. El haz se puede describir mediante dos componentes de campo eléctrico, uno paralelo a la superficie (representado mediante puntos) y el otro perpendicular al primer componente y a la dirección de propagación (representados mediante flechas anaranjadas). Se encuentra que el componente paralelo se refleja con más intensidad que los otros componentes y el resultado es un haz parcialmente polarizado. Además, el haz refractado también es parcialmente polarizado.

Ahora suponga que el ángulo de incidencia, θ_1 , varía hasta que el ángulo entre los haces reflejado y refractado es 90° (figura 24.28b). A este ángulo de incidencia particular, llamado **ángulo de polarización** θ_p , el haz reflejado es completamente polarizado, con su vector de campo eléctrico paralelo a la superficie, mientras que el haz refractado es parcialmente polarizado.

Una expresión que relaciona el ángulo de polarización con el índice de refracción de la superficie reflejante se puede obtener al usar la figura 24.28b. A partir de esta figura, vemos que, al ángulo de polarización, $\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ$, de modo que $\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$. Al usar la ley de Snell y tomar $n_1 = n_{\text{aire}} = 1.00$ y $n_2 = n$ produce

$$n = \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\text{sen } \theta_p}{\text{sen } \theta_2}$$

Figura 24.28 a) Cuando luz no polarizada incide sobre una superficie reflejante, los haces reflejado y refractado son parcialmente polarizados. b) El haz reflejado es completamente polarizado cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización θ_p , lo que satisface la ecuación $n = \tan \theta_p$.



Puesto que $\text{sen } \theta_2 = \text{sen } (90^\circ - \theta_p) = \text{cos } \theta_p$, la expresión para n se puede escribir

Ley de Brewster ►

$$n = \frac{\text{sen } \theta_p}{\text{cos } \theta_p} = \tan \theta_p$$

[24.14]

La ecuación 24.14 se llama **ley de Brewster** y el ángulo de polarización θ_p a veces se llama **ángulo de Brewster** en honor a su descubridor, sir David Brewster (1781-1868). Por ejemplo, el ángulo de Brewster para vidrio corona (donde $n = 1.52$) tiene el valor $\theta_p = \tan^{-1}(1.52) = 56.7^\circ$. Puesto que n varía con la longitud de onda para una sustancia dada, el ángulo de Brewster también es una función de la longitud de onda.

APLICACIÓN

Lentes polarizados

La polarización por reflexión es un fenómeno común. La luz solar que se refleja del agua, vidrio o nieve es parcialmente polarizada. Si la superficie es horizontal, el vector de campo eléctrico de la luz reflejada tiene un fuerte componente horizontal. Las gafas para Sol hechas de material polarizador reducen el destello, que es la luz reflejada. Los ejes de transmisión de las lentes se orientan de manera vertical para absorber al fuerte campo horizontal de la luz reflejada. Puesto que la luz reflejada es principalmente polarizada, la mayor parte del destello se puede eliminar sin remover una cantidad considerable de la luz normal.

Polarización por dispersión

Cuando la luz incide sobre un sistema de partículas, como un gas, los electrones en el medio pueden absorber y volver a radiar parte de la luz. La absorción y re-radiación de la luz por el medio, llamada **dispersión**, es lo que hace que se polarice la luz solar que llega a un observador en la Tierra directa sobre su cabeza. Puede observar este efecto al mirar directamente hacia arriba a través de un par de gafas para el Sol hechas de vidrio polarizado. Menos luz pasa a través de ciertas orientaciones de las lentes que de otras.

La figura 24.29 ilustra cómo se polariza la luz solar. El lado izquierdo de la figura muestra un haz incidente no polarizado de luz solar a punto de golpear una molécula de aire. Cuando el haz golpea la molécula de aire, pone a vibrar los electrones de las moléculas. Estas cargas en vibración actúan como las de una antena, excepto que vibran en un patrón complicado. La parte horizontal del vector de campo eléctrico en la onda incidente hace que las cargas vibren en forma horizontal y la parte vertical del vector simultáneamente las hace vibrar verticalmente. Como resultado de su movimiento horizontal, los electrones emiten una onda horizontalmente polarizada y, como resultado de su movimiento vertical, se emite una onda verticalmente polarizada paralela a la Tierra.

La luz dispersada viaja perpendicular a la luz incidente y está polarizada en un plano, porque las vibraciones verticales de las cargas en la molécula de aire no envían la luz en esta dirección.

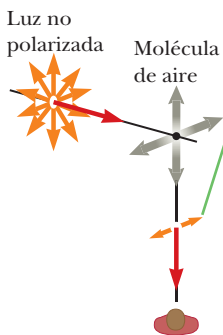


Figura 24.29 Dispersión de luz solar no polarizada por las moléculas de aire.

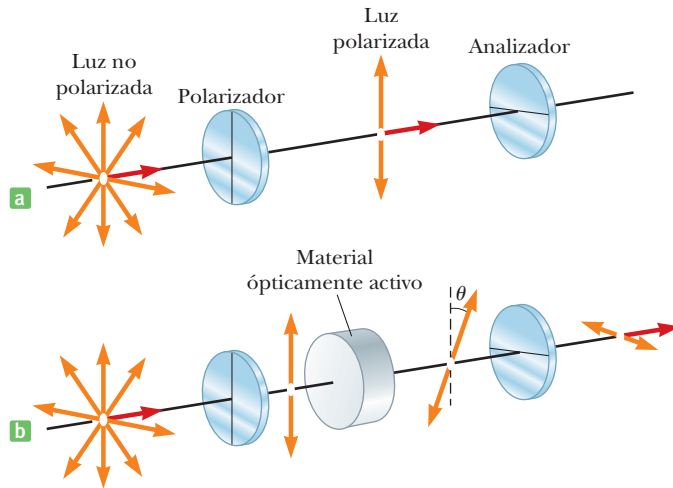


Figura 24.30 a) Cuando se usan polarizadores cruzados, nada de la luz polarizada puede pasar a través del analizador. b) Un material ópticamente activo rota la dirección de polarización a través del ángulo θ , lo que permite que algo de la luz polarizada pase a través del analizador.

Los científicos descubrieron que las abejas y las palomas mensajeras usan la polarización de la luz solar como auxiliar de navegación.

Actividad óptica

Muchas aplicaciones prácticas importantes de la luz polarizada involucran el uso de ciertos materiales que despliegan la propiedad de **actividad óptica**. Se dice que una sustancia es ópticamente activa si rota el plano de polarización de luz transmitida. Suponga que luz no polarizada incide sobre un polarizador desde la izquierda, como en la figura 24.30a. La luz transmitida se polariza en forma vertical, como se muestra. Si entonces esta luz incide sobre un analizador con su eje perpendicular al del polarizador, no sale luz de él. Si un material ópticamente activo se coloca entre el polarizador y el analizador, como en la figura 24.30b, el material hace que la dirección del haz polarizado gire a través del ángulo θ . Como resultado, algo de luz puede pasar a través del analizador. El ángulo a través del cual el material hace girar la luz se puede encontrar al rotar el polarizador hasta que la luz de nuevo se extingue. Esto determina que el ángulo de rotación depende de la longitud de la muestra y, si la sustancia es una solución, de la concentración. Un material ópticamente activo es una solución de azúcar común, dextrosa. Un método estándar para determinar la concentración de una solución de azúcar es medir la rotación que produce una longitud fija de la solución.

La actividad óptica ocurre en un material debido a una asimetría en la forma de sus moléculas constituyentes. Por ejemplo, algunas proteínas son ópticamente activas debido a sus formas espirales. Otros materiales, como vidrio y plástico, se vuelven ópticamente activos cuando se colocan bajo tensión. Si luz polarizada pasa a través de un trozo de plástico sin tensión y luego a través de un analizador con un eje perpendicular al del polarizador, nada de la luz polarizada se transmite. Sin embargo, si el plástico se coloca bajo tensión, las regiones de mayor tensión producen los mayores ángulos de rotación de luz polarizada y en la luz transmitida se observa una serie de bandas claras y oscuras. Los ingenieros por lo regular utilizan esta propiedad en el diseño de estructuras que van desde puentes hasta pequeñas herramientas. Se construye un modelo de plástico y se analiza bajo diferentes condiciones de carga para determinar las posiciones de debilidad potencial y falla bajo tensión. Si el diseño es pobre, los patrones de bandas claras y oscuras indicarán los puntos de mayor debilidad y el diseño se puede corregir a una etapa temprana. La figura 24.31 muestra ejemplos de patrones de tensión en plástico.

Pantallas de cristal líquido (LCD)

Un efecto similar a la rotación del plano de polarización se usa para crear las familiares pantallas en las calculadoras de bolsillo, relojes de muñeca, computadoras portátiles y artículos similares. Las propiedades de una sustancia única llamada cristal líquido hacen posibles

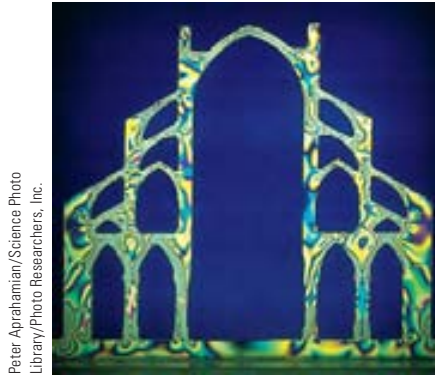
APLICACIÓN

Cómo encontrar las concentraciones de soluciones mediante su actividad óptica.

APLICACIÓN

Pantallas de cristal líquido

Figura 24.31 Un modelo de plástico de una estructura de arco bajo condiciones de carga observado entre polarizadores perpendiculares. Estos patrones son útiles en el diseño óptico de los componentes arquitectónicos.

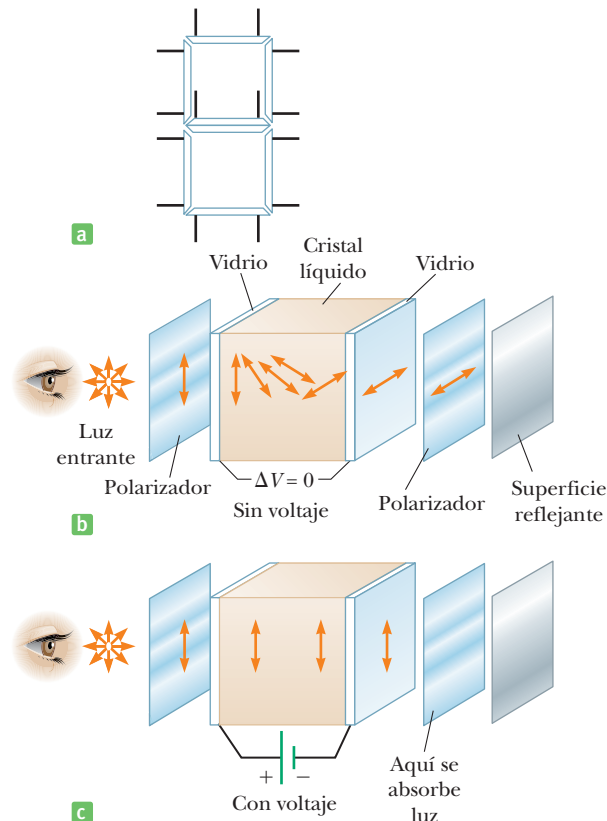


estas pantallas (llamadas LCD, por las siglas en inglés de *liquid crystal displays*). Como implica su nombre, un **crystal líquido** es una sustancia con propiedades intermedias entre las de un sólido cristalino y las de un líquido; esto es, las moléculas de la sustancia están más ordenadas que en un líquido, pero menos ordenadas que en un sólido cristalino puro. Las fuerzas que mantienen las moléculas juntas en tal estado son apenas lo suficientemente intensas como para permitir a la sustancia mantener una forma definida, de modo que es razonable llamarla sólido. Sin embargo, pequeñas entradas de energía mecánica o eléctrica pueden perturbar estos enlaces débiles y hacer que la sustancia fluya, rote o gire.

Para ver cómo se pueden usar los cristales líquidos para crear una pantalla, considere la figura 24.32a. El cristal líquido se coloca entre dos placas de vidrio en el patrón que se muestra y se forman contactos eléctricos, que se indican mediante líneas delgadas. Cuando se aplica un voltaje a través de cualquier segmento en la pantalla, dicho segmento se vuelve oscuro. De esta forma cualquier número entre 0 y 9 se puede formar por el patrón, dependiendo de los voltajes aplicados a los siete segmentos.

Para ver por qué un segmento se puede cambiar de oscuro a brillante por la aplicación de un voltaje, considere la figura 24.32b, que muestra la construcción básica de una

Figura 24.32 a) Patrón de segmento brillante de una pantalla de cristal líquido. b) Rotación de un haz de luz polarizado por un cristal líquido cuando el voltaje aplicado es cero. c) Las moléculas del cristal líquido se alinean con el campo eléctrico cuando se aplica un voltaje.



porción de la pantalla. El cristal líquido se coloca entre dos sustratos de vidrio que se empaquetan entre dos piezas de material Polaroid con sus ejes de transmisión perpendiculares. Una superficie reflejante se coloca detrás de una pieza de Polaroid. Primero considere lo que ocurre cuando la luz cae sobre este paquete y no se aplican voltajes al cristal líquido, como se muestra en la figura 24.32b. La luz entrante se polariza en el polarizador de la izquierda y luego cae sobre el cristal líquido. Conforme la luz pasa a través del cristal, su plano de polarización gira 90°, lo que le permite pasar a través del polarizador a la derecha. Se refleja de la superficie reflejante y vuelve a trazar su trayectoria a través del cristal. Por ende, un observador a la izquierda del cristal ve el segmento como brillante. Cuando se aplica un voltaje, como en la figura 24.32c, las moléculas de cristal líquido no rotan el plano de polarización de la luz. En este caso la luz se absorbe en el polarizador de la derecha y nada se refleja de vuelta al observador a la izquierda del cristal. Como resultado, el observador ve este segmento como negro. Cambiar el voltaje aplicado al cristal en el patrón preciso en tiempos precisos puede hacer que el patrón marque los segundos en un reloj, despliegue una letra en una pantalla de computadora, y otras situaciones similares.

RESUMEN

24.1 Condiciones para interferencia

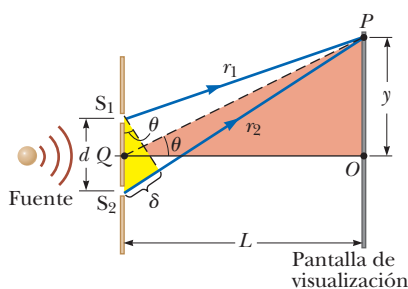
La **interferencia** ocurre cuando dos o más ondas de luz se traslapan en un punto dado. Un patrón de interferencia sostenido se observa si 1) las fuentes son coherentes (esto es, mantienen una relación de fase constante mutua), 2) las fuentes tienen longitudes de onda idénticas y 3) es aplicable el principio de superposición.

24.2 Experimento de doble rendija de Young

En el **experimento de doble rendija de Young** dos rendijas separadas por la distancia d se iluminan mediante una fuente de luz de una sola longitud de onda. Sobre una pantalla a una distancia L de las rendijas se observa un patrón de interferencia que consiste en franjas brillantes y oscuras. La condición para **franjas brillantes** (interferencia constructiva) es

$$d \sin \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.2]$$

El número m se llama **número de orden** de la franja.



Construcción geométrica que describe el experimento de doble rejilla de Young. (La figura no está dibujada a escala.)

La condición para **franjas oscuras** (interferencia destructiva) es

$$d \sin \theta_{\text{oscura}} = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.3]$$

La posición y_m de las franjas brillantes sobre la pantalla se pueden determinar al usar la relación $\sin \theta \approx \tan \theta = y_m/L$, que es cierta para ángulos pequeños. Esta relación se puede sustituir en las ecuaciones 24.2 y 24.3, lo que produce la ubicación de las franjas brillantes:

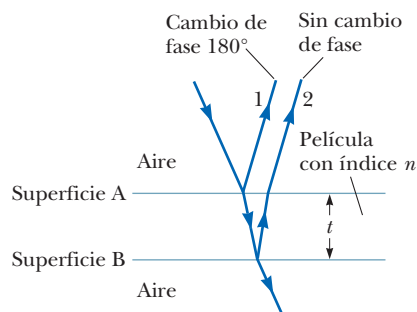
$$y_{\text{brillante}} = \frac{\lambda L}{d} m \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.5]$$

Una expresión similar se puede deducir para las franjas oscuras. Esta ecuación se puede usar o para ubicar los máximos o para determinar la longitud de onda de la luz al medir y_m .

24.3 Cambio de fase debido a reflexión

24.4 Interferencia en películas delgadas

Una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de 180° en su reflexión desde un medio con un índice de refracción mayor que el del medio donde la onda viaja. No hay cambio cuando la onda, que viaja en un medio con mayor índice de refracción, se refleja desde un medio con un índice de refracción menor.



La interferencia en la luz reflejada por una fina película se debe a una combinación de los rayos 1 y 2, que se refleja en las superficies superior e inferior de la película.

La longitud de onda λ_n de la luz en un medio con índice de refracción n es

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad [24.7]$$

donde λ es la longitud de onda de la luz en el espacio libre. La luz que encuentra una película delgada de grosor t se reflejará de las partes superior e inferior de la película y cada rayo experimentará un posible cambio de fase como se describió con anterioridad. Los dos rayos se recombinan y

se observarán franjas brillantes y oscuras, con las condiciones de interferencia dadas por la siguiente tabla:

Ecuación ($m = 0, 1, \dots$)	Inversión de fase 1	Inversiones de fase 0 y 2
$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$ [24.9]	Constructiva	Destructiva
$2nt = m\lambda$ [24.10]	Destructiva	Constructiva

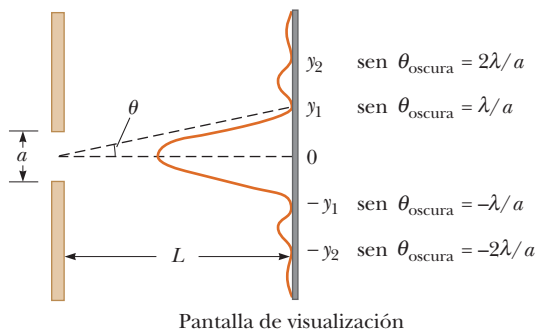
24.6 Difracción

24.7 Difracción de una sola rendija

La difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de pequeñas aberturas, alrededor de obstáculos o por bordes agudos. El **patrón de difracción** que se produce mediante una sola rendija sobre una pantalla distante consiste en un máximo brillante central flanqueado por franjas menos brillantes que alternan con regiones oscuras. Los ángulos θ a los que el patrón de difracción tiene intensidad cero (regiones de interferencia destructiva) se describen mediante

$$\text{sen } \theta_{\text{oscura}} = m \frac{\lambda}{a} \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad [24.11]$$

donde λ es la longitud de onda de la luz que incide sobre la rendija y a es el ancho de la rendija.



Posiciones de los mínimos para el patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija de ancho a . (Este dibujo no está a escala.)

24.8 La rejilla de difracción

Una **rejilla de difracción** consiste en muchas rendijas idénticas igualmente espaciadas. La condición para **intensidad máxima** en el patrón de interferencia de una rejilla de difracción es

$$d \text{ sen } \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.12]$$

donde d es el espaciamiento entre rendijas adyacentes y m es el número de orden del patrón de difracción. Una rejilla de difracción se puede fabricar al poner un gran número de rayas igualmente espaciadas sobre una placa de vidrio. El número de tales líneas por centímetro es el inverso del espaciamiento d .

24.9 Polarización de ondas de luz

La luz no polarizada se puede polarizar mediante absorción selectiva, reflexión o dispersión. Un material puede polarizar luz si transmite ondas que tengan vectores de campo eléctrico que vibran en un plano paralelo a cierta dirección y absorben ondas con vectores de campo eléctrico que vibran en direcciones perpendiculares a dicha dirección. Cuando luz no polarizada pasa a través de una hoja polarizadora, su intensidad se reduce a la mitad y la luz se polariza. Cuando esta luz pasa a través de una segunda hoja polarizadora con eje de transmisión en un ángulo θ con respecto al eje de transmisión de la primera hoja, la intensidad transmitida está dada por

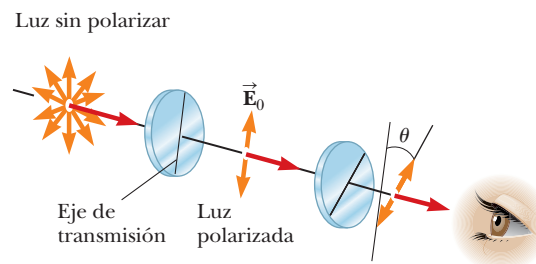
$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad [24.13]$$

donde I_0 es la intensidad de la luz después de pasar a través de la primera hoja polarizadora.

En general, la luz que se refleja de un material amorfo, como el vidrio, se polariza en forma parcial. La luz que se refleja está completamente polarizada, con su campo eléctrico paralelo a la superficie, cuando el ángulo de incidencia produce un ángulo de 90° entre los haces reflejado y refractado. Este ángulo de incidencia, llamado **ángulo de polarización** θ_p , satisface la **ley de Brewster**, dada por

$$n = \tan \theta_p \quad [24.14]$$

donde n es el índice de refracción del medio reflejante.



Dos hojas de polarización, con ejes de transmisión en ángulo θ , transmiten sólo una fracción de la luz incidente.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una delgada película de aceite ($n = 1.25$) flota sobre agua ($n = 1.33$). ¿Cuál es el mínimo grosor distinto de cero del aceite en la región que refleja fuertemente luz verde ($\lambda = 530 \text{ nm}$)? a) 500 nm b) 313 nm c) 404 nm d) 212 nm e) 285 nm
- Un haz de luz monocromática que tiene una longitud de onda de $5.0 \times 10^2 \text{ nm}$ ilumina una doble rendija que tiene una separación de rendijas de $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}$. ¿Cuál es el ángulo de la franja brillante de segundo orden? a) 0.050 rad b) 0.025 rad c) 0.10 rad d) 0.25 rad e) 0.010 rad

3. Un patrón de difracción de Fraunhofer se produce sobre una pantalla ubicada a 1.00 m de una sola rendija. Si se usa una fuente de luz de 5.00×10^{-7} m y la distancia desde el centro de la franja brillante central a la primera franja oscura es 5.00×10^{-3} m, ¿cuál es el ancho de la rendija? a) 0.0100 mm b) 0.100 mm c) 0.200 mm d) 1.00 mm e) 0.005 00 mm
4. Si luz plano-polarizada se envía a través de dos polarizadores, el primer polarizador a 45° con el plano original de polarización y el segundo polarizador a 90° con el plano original de polarización, ¿qué fracción de la intensidad polarizada original pasa a través del último polarizador? a) 0 b) 0.25 c) 0.50 d) 0.125 e) 0.10
5. Una onda de luz monocromática plana incide sobre una doble rendija como se ilustra en la figura 24.4. Conforme la separación de la rendija disminuye, ¿qué sucede con la separación entre las franjas de interferencia sobre la pantalla? a) Disminuye. b) Aumenta. c) Permanece igual. d) Puede aumentar o disminuir, dependiendo de la longitud de onda de la luz. e) Se requiere más información.
6. Una onda de luz monocromática plana incide sobre una doble rendija como se ilustra en la figura 24.4. Si la pantalla de visualización se aleja de la doble rendija, ¿qué sucede con la separación entre las franjas de interferencia sobre la pantalla? a) Aumenta. b) Disminuye. c) Permanece igual. d) Puede aumentar o disminuir, dependiendo de la longitud de onda de la luz. e) Se requiere más información.
7. En un experimento, luz con longitud de onda λ_1 pasa a través de una sola rendija y forma un patrón de interferencia sobre una pantalla. En un segundo experimento, luz con longitud de onda λ_2 pasa a través de la misma rendija y forma otro patrón de interferencia sobre la pantalla. Si $\lambda_2 > \lambda_1$, ¿cuál es la separación entre líneas brillantes en los dos experimentos? a) Es la misma para ambos experimentos. b) Es mayor en el primer experimento. c) Es mayor en el segundo experimento. d) Depende de la intensidad de la luz. e) Se requiere más información.
8. ¿Qué le sucede a la luz cuando se refleja en una superficie brillante en un día soleado? a) Experimenta refracción. b) Se polariza por completo. c) Es no polarizada. d) Tiende a ser parcialmente polarizada. e) Se requiere más información.
9. ¿Qué provocan los brillantes patrones coloridos que a veces se ven sobre las calles mojadas cubiertas con una capa de aceite? Elija la mejor respuesta. a) difracción y polarización b) interferencia y desviación c) polarización y reflexión d) refracción y difracción e) reflexión e interferencia.
10. Considere una onda que pasa a través de una sola rendija. ¿Qué sucede con el ancho del máximo central de su patrón de difracción conforme la rendija se hace la mitad de ancho? a) Se vuelve un cuarto de ancho. b) Se vuelve la mitad de ancho. c) Su ancho no cambia. d) Se vuelve el doble de ancho. e) Se vuelve cuatro veces más ancho.
11. Una película de aceite sobre un charco en un estacionamiento muestra una variedad de colores brillantes en parches arremolinados. ¿Qué puede decir sobre el espesor de la capa de aceite? a) Es mucho menor que la longitud de onda de la luz visible. b) Es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz visible. c) Es mucho mayor que la longitud de onda de la luz visible. d) Puede ser que haya alguna relación con la longitud de onda de la luz visible.
12. Cuando se recibe una radiografía de tórax en un hospital, los rayos X pasan a través de un conjunto de nervios paralelos en el pecho. ¿Sus costillas actúan como una rejilla de difracción de rayos X? a) Sí. Producen haces difractados que se pueden observar por separado. b) No para una extensión mensurable. Las costillas están demasiado separadas. c) En esencia no. Las costillas están muy juntas. d) En esencia no. Las costillas son muy pocas en número. e) Por supuesto que no. No pueden difractar los rayos X.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Su automóvil tiene dos faros. ¿Qué tipo de patrón de interferencia espera ver a partir de ellos? ¿Por qué?
2. Si sostiene su mano a la longitud de brazo, fácilmente puede bloquear la luz solar directa de sus ojos. ¿Por qué no puedes bloquear el sonido a sus oídos de esta forma?
3. Considere una franja oscura en un patrón de interferencia al cual casi no llega energía luminosa. La luz proveniente de ambas rendijas llega a este punto, pero las ondas se cancelan. ¿A dónde va la energía?
4. Si el experimento de doble rendija de Young se realiza bajo agua, ¿cómo se afectaría el patrón de interferencia observado?
5. En un accidente de laboratorio, se derramaron dos líquidos en agua, ninguno de los cuales se mezcla con el agua. Ambos forman películas delgadas sobre la superficie del agua. Conforme las películas se dispersan y se vuelven muy delgadas, observe que una película se vuelve brillante y la otra negra en luz reflejada. ¿Por qué puede ser esto?
6. Si en el experimento de doble rendija de Young se usa luz blanca en lugar de luz monocromática, ¿cómo cambia el patrón de interferencia?
7. Una lente con radio de curvatura exterior R e índice de refracción n descansa sobre una placa de vidrio plana, y la combinación se ilumina desde arriba con luz blanca.

- ¿En el centro de la lente hay una mancha oscura o una mancha clara? ¿Qué significa si los anillos observados no son circulares?
- Con frecuencia, las huellas digitales que quedan sobre un trozo de vidrio, como el panel de una ventana, muestran espectros coloridos como los de una rejilla de difracción. ¿Por qué?
 - En la experiencia cotidiana, ¿por qué se polarizan las ondas de radio, mientras que la luz no se polariza?
 - Suponga que luz blanca reflejada se usa para observar un delgado recubrimiento transparente sobre vidrio conforme el material de recubrimiento se deposita gradualmente mediante evaporación en un vacío. Describa algunos cambios de color que puedan ocurrir durante el proceso de acumulación del grosor del recubrimiento.
 - ¿Sería posible colocar un recubrimiento no reflector sobre un avión para cancelar ondas de radar con 3 cm de longitud de onda?
 - Ciertas gafas para el Sol usan un material polarizador para reducir la intensidad de la luz reflejada de superficies brillantes, como el agua o el cofre de un automóvil.

¿Qué orientación del eje de transmisión debe tener el material para ser más eficaz?

- ¿Por qué es mucho más fácil realizar experimentos de interferencia con un láser que con una fuente de luz ordinaria?
- Una película jabonosa se mantiene de forma vertical en aire y se ve en luz reflejada como en la figura PC24.14. Explique por qué la película parece ser oscura en la parte superior.



Figura PC24.14

PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, **2.** denota problema intermedio,
- denota problema de alto reto
- 1.** denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

24.2 Experimento de doble rendija de Young

- Un haz láser incide sobre dos rendijas con una separación de 0.200 mm, y una pantalla se coloca a 5.00 m de las rendijas. Si las franjas de interferencia brillante sobre la pantalla están separadas 1.58 cm, ¿cuál es la longitud de onda de la luz láser?
- En un experimento de doble rendija de Young, un conjunto de rendijas paralelas, con una separación de 0.100 mm, se ilumina con luz que tiene una longitud de onda de 589 nm, y el patrón de interferencia se observa sobre una pantalla a 4.00 m de las rendijas. a) ¿Cuál es la diferencia en longitudes de trayectoria de cada una de las rendijas a la ubicación de una tercera franja brillante de tercer orden sobre la pantalla? b) ¿Cuál es la diferencia en longitudes de trayectoria desde las dos rendijas hasta la ubicación de la tercera franja oscura sobre la pantalla, lejos del centro del patrón?
- Un par de estrechas rendijas paralelas, separadas 0.250 mm, se ilumina mediante el componente verde de una lámpara de vapor de mercurio ($\lambda = 546.1$ nm). El patrón de interferencia se observa sobre una pantalla a 1.20 m del plano de las rendijas paralelas. Calcule la distancia
 - desde el máximo central hasta la primera región brillante a cualquier lado del máximo central y b) entre la primera y segunda bandas oscuras en el patrón de interferencia.
- Luz de 620 nm de longitud de onda cae en una doble rendija y la primera franja brillante del patrón de interferencia se ve en un ángulo de 15.0° a partir del máximo central. Busque la separación entre las rendijas.
- En una ubicación donde la velocidad del sonido es 354 m/s, una onda sonora de 2 000 Hz incide sobre dos rendijas separadas 30.0 cm. a) ¿A qué ángulo se ubica el primer máximo? b) Si la onda sonora se sustituye con microondas de 3.00 cm, el primer máximo? c) Si la separación de las rendijas es $1.00 \mu\text{m}$, ¿qué frecuencia de luz produce el mismo ángulo de primer máximo?
- Dos rendijas separadas 0.058 0 mm y ubicadas a 1.50 m de una pantalla. a) Si la luz amarilla de longitud de onda de 588 nm incide en la doble rendija, ¿cuál es la separación entre los máximos de orden cero y primer orden en la pantalla? b) Si la luz azul de longitud de onda 412 nm incide en la doble rendija, ¿cuál es la separación entre los máximos de segundo orden y de cuarto orden?

7. **M** Dos antenas de radio separadas $d = 300$ m, como se muestra en la figura P24.7, transmiten de forma simultánea señales idénticas de la misma longitud de onda. Un automóvil viaja hacia el norte, a lo largo de una línea recta en la posición $x = 1000$ m desde el punto central entre las antenas y su radio recibe las señales. a) Si el coche está en la posición del segundo máximo después del punto O cuando éste ha recorrido una distancia de $y = 400$ m hacia el norte, ¿cuál es la longitud de onda de las señales? b) ¿Cuánto más lejos debe viajar el coche desde esta posición para encontrar el mínimo siguiente en la recepción? *Sugerencia:* No utilice la aproximación de ángulo pequeño en este problema.

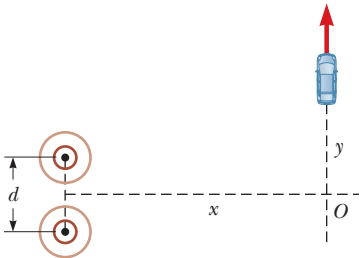


Figura P24.7

8. Luz con 6.0×10^2 nm de longitud de onda cae sobre una doble rendija, y la primera franja brillante del patrón de interferencia se observa que forma un ángulo de 12° con la horizontal. Encuentre la separación entre las rendijas.
9. Luz monocromática incide sobre una pantalla de 1.75 m a partir de dos rendijas separadas por 2.10 mm. Las franjas brillantes de primer y segundo orden están separadas por 0.552 mm. ¿Cuál es la longitud de onda de la luz?
10. Un par de rendijas, separadas 0.150 mm, se ilumina con luz que tiene una longitud de onda $\lambda = 643$ nm. Sobre una pantalla a 140 cm de las rendijas se observa un patrón de interferencia. Considere un punto sobre la pantalla ubicado en $y = 1.80$ cm del máximo central de este patrón. a) ¿Cuál es la diferencia de trayectoria δ para las dos rendijas en la posición y ? b) Expresé esta diferencia de trayectoria en términos de la longitud de onda. c) ¿La interferencia corresponderá a un máximo, un mínimo o una condición intermedia?
11. Una bodega a la orilla de un río tiene dos puertas abiertas, como en la figura P24.11. Su interior está recubierto con un

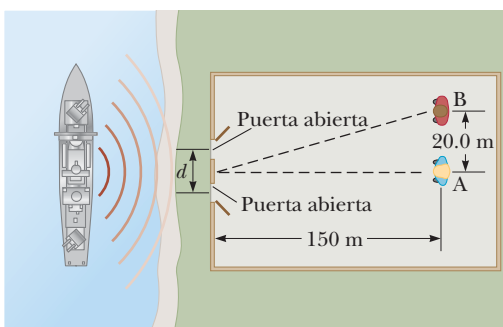


Figura P24.11

material que absorbe sonido. Un bote sobre el río suena su sirena. Para la persona A, el sonido es fuerte y claro. Para la persona B, el sonido apenas es audible. La longitud de onda principal de las ondas sonoras es 3.00 m. Suponiendo que la persona B está en la posición del primer mínimo, determine la distancia entre las puertas, de centro a centro.

12. **C/C** Un estudiante monta un experimento de doble rendija con luz monocromática que tiene longitud de onda λ . La distancia entre las rendijas es igual a 25λ . a) Encuentre los ángulos a los cuales ocurren los máximos $m = 1, 2$ y 3 sobre la pantalla de visualización. b) ¿A qué ángulos ocurren las primeras tres franjas oscuras? c) ¿Por qué las respuestas están tan equitativamente espaciadas? ¿El espaciamiento es equitativo para todos los órdenes? Explique.
13. Ondas de radio de una estrella, con longitud de onda de 250 m, llegan a un radiotelescopio mediante dos trayectorias separadas, como se muestra en la figura P24.13. La primera es una trayectoria directa hasta el receptor, que se sitúa sobre el borde de un risco junto al océano. La segunda es mediante reflexión del agua. El primer mínimo de interferencia destructiva ocurre cuando la estrella está 25.0° arriba del horizonte. Encuentre la altura del risco. (Suponga que no hay cambio de fase en la reflexión.)

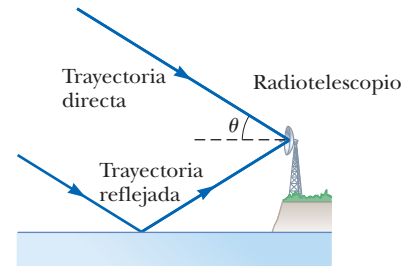


Figura P24.13

14. **PG** Luz monocromática con longitud de onda λ incide sobre un par de rendijas separadas por 2.40×10^{-4} m y forma un patrón de interferencia sobre una pantalla colocada a 1.80 m de distancia de las rendijas. La franja brillante de primer orden es 4.52 mm desde el centro del máximo central. a) Dibuje una imagen y marque el ángulo θ y las patas del triángulo recto asociado con la franja brillante de primer orden. b) Calcule la tangente del ángulo θ asociado con la franja brillante de primer orden. c) Encuentre el ángulo que corresponde a la franja brillante de primer orden y calcule el seno de dicho ángulo. ¿El seno y la tangente del ángulo son comparables en valor? ¿Su respuesta siempre es verdadera? d) Calcule la longitud de onda de la luz. e) Calcule el ángulo de la franja brillante de quinto orden. f) Encuentre su posición sobre la pantalla.
15. Ondas provenientes de una estación tienen una longitud de onda de 300 m. Las ondas viajan por dos rutas hasta un receptor casero a 20.0 km del transmisor. Una ruta es una trayectoria directa y la segunda es mediante reflexión de una montaña directamente detrás del receptor. ¿Cuál es la distancia mínima desde la montaña hasta el receptor que produce interferencia destructiva en el receptor? (Suponga que no ocurren cambios de fase en la reflexión de la montaña.)

24.3 Cambio de fase debido a reflexión**24.4 Interferencia en películas delgadas**

16. **C/C** Una pompa de jabón ($n = 1.33$), que tiene un grosor de pared de 120 nm, flota en aire. a) ¿Cuál es la longitud de onda de la luz visible que se refleja con más fuerza? b) Explique cómo una burbuja de diferente grosor también podría reflejar intensamente luz con esta misma longitud de onda. c) Encuentre los dos grosores de película más pequeños, mayores que el proporcionado, que pueden producir luz de esta misma longitud de onda que se refleja fuertemente.
17. Una capa delgada de yoduro de metileno líquido ($n = 1.756$) se empareda entre dos placas paralelas planas de vidrio ($n = 1.50$). ¿Cuál es el grosor mínimo de la capa líquida, si luz con $\lambda = 6.00 \times 10^2$ nm en aire, que incide de manera normal, se debe reflejar con fuerza?
18. **S** Una película delgada de aceite ($n = 1.25$) se ubica sobre pavimento liso húmedo. Cuando se ve desde una dirección perpendicular al pavimento, la película refleja con más intensidad luz roja a 640 nm y no refleja luz verde a 512 nm. a) ¿Cuál es el grosor mínimo de la película de aceite? b) Sea m_1 el orden de interferencia constructiva y m_2 el orden de la interferencia destructiva. Obtenga una relación entre m_1 y m_2 que sea consistente con los datos.
19. Una fina capa de vidrio ($n = 1.52$) de espesor de $0.420 \mu\text{m}$ es visto bajo la luz blanca en incidencia casi normal. ¿Qué longitud de onda de la luz *visible* es más fuertemente reflejada en la película cuando está rodeada por aire?
20. Un aceite transparente, con índice de refracción 1.29, se derrama sobre la superficie del agua (índice de refracción 1.33), lo que produce un máximo de reflexión con luz anaranjada que incide de manera normal (longitud de onda 600 nm en aire). Suponiendo que el máximo ocurre en el primer orden, determine el grosor de la resbaladiza superficie de aceite.
21. **M** Un posible medio para hacer que un avión sea invisible para el radar, es recubrirlo con un polímero anti-reflector. Si las ondas de radar tienen una longitud de onda de 3.00 cm y el índice de refracción del polímero es $n = 1.50$, ¿cuán grueso haría el recubrimiento?
22. **C/C** Una película de aceite ($n = 1.45$) que flota sobre agua se ilumina mediante luz blanca a incidencia normal. La película tiene 2.80×10^2 nm de grosor. Encuentre a) la longitud de onda y el color de la luz en el espectro visible que se refleja con más intensidad y b) la longitud de onda y el color de la luz en el espectro visible que se transmite con más intensidad. Explique su razonamiento.
23. **C/C** Los astrónomos observan la cromósfera del Sol con un filtro que pasa la línea espectral del hidrógeno rojo de 656.3 nm de longitud de onda, llamada línea H_α . El filtro consiste en un dieléctrico transparente de grosor d que se mantiene entre dos placas de vidrio parcialmente aluminizadas. El filtro se mantiene a una temperatura constante. a) Encuentre el valor mínimo de d que pro-

ducirá máxima transmisión de luz H_α perpendicular si el dieléctrico tiene un índice de refracción de 1.378. b) Si la temperatura del filtro aumenta arriba del valor normal al aumentar su grosor, ¿qué sucede con la longitud de onda transmitida? c) El dieléctrico también pasará ¿cuál longitud de onda visible cercana? Una de las placas de vidrio tiene color rojo para absorber esta luz.

24. Dos placas planas ópticamente rectangulares ($n = 1.52$) están en contacto a lo largo de un extremo y están separadas a lo largo del otro extremo mediante un espaciador de $2.00 \mu\text{m}$ de grueso (figura P24.24). La placa superior es iluminada con luz monocromática de 546.1 nm de longitud de onda. Calcule el número de bandas paralelas oscuras que cruzan la placa superior (incluida la banda oscura a grosor cero a lo largo del borde de contacto entre las placas).

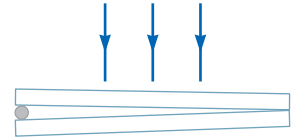


Figura P24.24
(Problemas 24 y 25)

25. Una investigadora encuentra una fibra en la escena del crimen que desea utilizar como evidencia en contra de un sospechoso. Le da la fibra a un técnico para poner a prueba las propiedades de la misma. Para medir el diámetro de la fibra, el técnico la coloca entre dos placas de vidrio plano en sus extremos como en la figura P24.24. Cuando las placas, de la longitud 14.0 cm, se iluminan desde arriba con luz de longitud de onda de 650 nm, ella observa interferencia en bandas brillantes separadas por 0.580 mm. ¿Cuál es el diámetro de la fibra?
26. Una lente plano-convexa, con radio de curvatura $R = 3.0$ m, está en contacto con una placa plana de vidrio. Una fuente de luz y el ojo del observador están ambos cerca de la normal, como se muestra en la figura 24.8a. El radio del 50o. anillo de Newton brillante se encuentra en 9.8 mm. ¿Cuál es la longitud de onda de la luz producida por la fuente?
27. Una lente plano-convexa descansa con su lado curvo sobre una superficie de vidrio plana y se ilumina desde arriba mediante luz con longitud de onda de 500 nm. (Vea la figura 24.8.) Una mancha oscura se observa en el centro, que rodea 19 anillos oscuros concéntricos (con anillos brillantes en medio). ¿Cuánto más gruesa es la cuña de aire en la posición del 19o. anillo oscuro que en el centro?
28. Los recubrimientos no reflejantes sobre las lentes de las cámaras reducen la pérdida de luz en las superficies de los sistemas multilentes y evitan reflexiones internas que pueden estropear la imagen. Encuentre el grosor mínimo de una capa de fluoruro de magnesio ($n = 1.38$) sobre vidrio flint ($n = 1.66$) que causará interferencia destructiva de luz reflejada con longitud de onda de 550 nm cerca del medio del espectro visible.
29. Una fina capa de glicerina ($n = 1.473$) de 524 nm de espesor con aire en ambos lados se ilumina con luz blanca en incidencia casi normal. ¿Qué longitudes de onda se reflejan fuertemente en el rango de 300 nm a 700 nm?

30. **CIC** Una lente de vidrio ($n_g = 1.52$) está cubierta con una fina capa de MgF_2 ($n_s = 1.38$) de espesor t . La luz visible incide de forma normal en la lente cubierta como en la figura P24.30. a) ¿Para qué valor mínimo de t la luz reflejada de la longitud de onda de 540 nm (en aire) se pierde? b) ¿Existen otros valores de t que reduzcan al mínimo la luz reflejada en esta longitud de onda? Explique.

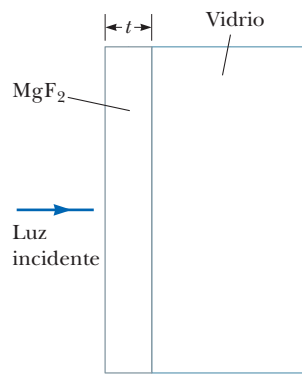


Figura P24.30

24.7 Difracción de una sola rendija

31. Luz con 5.40×10^2 nm de longitud de onda pasa a través de una rendija de 0.200 mm de ancho. a) Encuentre el ancho del máximo central sobre una pantalla ubicada a 1.50 m de la rendija. b) Determine el ancho de la franja brillante de primer orden.
32. Luz con 600 nm de longitud de onda cae sobre una rendija de 0.40 mm de ancho y forma un patrón de difracción sobre una pantalla a 1.5 m de distancia. a) Encuentre la posición de la primera banda oscura a cada lado del máximo central. b) Encuentre el ancho del máximo central.
33. **M** Luz con 587.5 nm de longitud de onda ilumina una rendija de 0.75 mm de ancho. a) ¿A qué distancia de la rendija se debe colocar una pantalla si el primer mínimo en el patrón de difracción debe estar a 0.85 mm del máximo central? b) Calcule el ancho del máximo central.
34. Microondas con 5.00 cm de longitud de onda entran a una larga y estrecha ventana en un edificio que de otro modo en esencia es opaco a las ondas entrantes. Si la ventana tiene 36.0 cm de ancho, ¿cuál es la distancia desde el máximo central al mínimo de primer orden a lo largo de una pared de 6.50 m desde la ventana?
35. Un haz de luz monocromática se difracta mediante una rendija de 0.600 mm de ancho. El patrón de difracción se forma sobre una ventana a 1.30 m más allá de la rendija. El ancho del máximo central es 2.00 mm. Calcule la longitud de onda de la luz.
36. Una pantalla se coloca a 50.0 cm de una sola rendija, que se ilumina con luz de 680 nm de longitud de onda. Si la distancia entre el primero y tercer mínimos en el patrón de difracción es 3.00 mm, ¿cuál es el ancho de la rendija?
37. Una rendija de 0.50 mm de ancho se ilumina con luz de 500 nm de longitud de onda y una pantalla se coloca a 120 cm enfrente de la rendija. Encuentre los anchos del primero y segundo máximos a cada lado del máximo central.
38. La franja oscura de segundo orden en un patrón de difracción de rendija es de 1.40 mm desde el centro del máximo central. Suponiendo que la pantalla está a 85.0 cm de

una rendija de 0.800 mm de anchura y asumiendo luz monocromática incidente, calcule la longitud de onda de la luz incidente.

24.8 La rejilla de difracción

39. Tres líneas espectrales discretas ocurren a ángulos de 10.1° , 13.7° y 14.8° , respectivamente, en el espectro de primer orden de un espectrómetro de rejilla de difracción. a) Si la rejilla tiene 3660 rendijas/cm, ¿cuáles son las longitudes de onda de la luz? b) ¿A qué ángulos se encuentran estas líneas en los espectros de segundo orden?
40. Intensa luz blanca incide sobre una rejilla de difracción que tiene 600 líneas/mm. a) ¿Cuál es el orden más alto en el que el espectro visible completo se puede ver con esta rejilla? b) ¿Cuál es la separación angular entre el borde violeta (400 nm) y el borde rojo (700 nm) del espectro de primer orden producido por la rejilla?
41. **M** El espectro del hidrógeno tiene una línea roja a 656 nm y una línea violeta a 434 nm. ¿Qué separación angular entre estas dos líneas espectrales se obtiene con una rejilla de difracción que tiene 4500 líneas/cm?
42. Considere un arreglo de alambres paralelos con una separación uniforme de 1.30 cm entre los centros. En el aire a 20.0°C , el ultrasonido con una frecuencia de 37.2 kHz de una fuente distante incidente es perpendicular al arreglo. (Tome la velocidad del sonido igual a 343 m/s.) a) Encuentre el número de direcciones en el otro lado del arreglo en los que hay un máximo de intensidad. b) Halle el ángulo de cada una de estas direcciones respecto a la dirección del haz incidente.
43. Un láser helio-neón ($\lambda = 632.8$ nm) se usa para calibrar una rejilla de difracción. Si el máximo de primer orden ocurre a 20.5° , ¿cuál es el espaciamiento entre surcos adyacentes en la rejilla?
44. Luz blanca se dispersa en sus componentes espectrales mediante una rejilla de difracción. Si la rejilla tiene 2000 líneas por centímetro, ¿a qué ángulo la luz roja con 640 nm de longitud de onda aparece en el espectro de primer orden?
45. Luz de un láser de argón golpea una rejilla de difracción que tiene 5310 surcos por centímetro. Los máximos central y principal de primer orden están separados 0.488 m sobre una pared a 1.72 m de la rejilla. Determine la longitud de onda de la luz láser.
46. **S** Considere luz roja de 700 nm y violeta de 400 nm como los extremos del espectro visible y considere el espectro continuo de luz blanca formado por una rejilla de difracción con un espaciamiento de d metros entre líneas adyacentes. Demuestre que el intervalo $\theta_{v2} \leq \theta \leq \theta_{r2}$ del espectro continuo en segundo orden debe traslapar el intervalo $\theta_{v3} \leq \theta \leq \theta_{r3}$ del espectro de tercer orden. *Nota:* θ_{v2} es el ángulo de la luz violeta en segundo orden y θ_{r2} es el ángulo formado por la luz roja en segundo orden.
47. Luz solar incide sobre una rejilla de difracción que tiene 2750 líneas/cm. El espectro de segundo orden sobre el

rango visible (400-700 nm) estará limitado a 1.75 cm a lo largo de una pantalla que está a una distancia L de la rejilla. ¿Cuál es el valor requerido de L ?

48. **PG** Una rejilla de difracción tiene 4.200×10^3 rendijas por centímetro. La pantalla está a 2.000 m de la rejilla. En los incisos de la a) a la e), redondee cada resultado a cuatro dígitos y use los valores redondeados para cálculos posteriores. a) Calcule el valor de d , la distancia entre rendijas adyacentes. Expresé la respuesta en metros. b) Calcule el ángulo del máximo de segundo orden formado por la longitud de onda de 589.0 nm del sodio. c) Encuentre la posición del máximo secundario sobre la pantalla. d) Repita los incisos b) y c) para el máximo de segundo orden de la longitud de onda de 589.6 nm del sodio y encuentre el ángulo y la posición sobre la pantalla. e) ¿Cuál es la distancia entre los dos máximos secundarios sobre la pantalla? f) Ahora encuentre la distancia entre los dos máximos secundarios sin redondeo y acarree todos los dígitos en la memoria de una calculadora. ¿Cuántas cifras significativas están en concordancia? ¿Qué puede concluir acerca del redondeo y el uso de respuestas intermedias en este caso?
49. Luz de longitud de onda de 500 nm incide en forma normal sobre una rejilla de difracción. Si el máximo de tercer orden del patrón de difracción se observa a 32.0° , a) ¿cuál es el número de resolución por centímetro de la rejilla? b) Determine el número total de máximos primarios que se pueden observar en esta situación.
50. Luz que contiene dos longitudes de onda diferentes pasa a través de una rejilla de difracción con 1200 rendijas/cm. En una pantalla a 15.0 cm de la rejilla, el máximo de tercer orden de la longitud de onda más corta cae a la mitad entre el máximo central y el máximo de primer lado para la longitud de onda más larga. Si los máximos vecinos de la longitud de onda más larga están separados 8.44 mm sobre la pantalla, ¿cuáles son las longitudes de onda en la luz? *Sugerencia:* Use la aproximación de ángulo pequeño.

24.9 Polarización de ondas de luz

51. El ángulo de incidencia de un haz de luz en aire sobre una superficie reflectora varía en forma continua. Se descubre que el rayo reflejado está completamente polarizado cuando el ángulo de incidencia es 48.0° . a) ¿Cuál es el índice de refracción del material reflejante? b) Si parte de la luz incidente (a un ángulo de 48.0°) pasa al material bajo la superficie, ¿cuál es el ángulo de refracción?
52. Luz no polarizada pasa a través de dos hojas Polaroid. El eje de transmisión del analizador forma un ángulo de 35.0° con el eje del polarizador. a) ¿Qué fracción de la luz no polarizada original se transmite a través del analizador? b) ¿Qué fracción de la luz original se absorbe en el analizador?
53. El índice de refracción de una placa de vidrio es 1.52. ¿Cuál es el ángulo de Brewster cuando la placa está a) en aire y b) en agua? (Véase el problema 57.)

54. ¿A qué ángulo sobre el horizonte está el Sol, si la luz que proviene de él está por completo polarizada al reflejarse en el agua?
55. Un haz de luz incide sobre un trozo de cuarzo fundido ($n = 1.458$) al ángulo de Brewster. Encuentre a) el valor del ángulo de Brewster y b) el ángulo de refracción para el rayo transmitido.
56. El ángulo crítico para reflexión interna total para zafiro rodeado por aire es 34.4° . Calcule el ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire.
57. La ecuación 24.14 supone que la luz incidente está en aire. Si la luz incide desde un medio con índice n_1 sobre un medio con índice n_2 , siga el procedimiento utilizado para deducir la ecuación 24.14 para demostrar que $\theta_p = n_2/n_1$.
58. Luz plano-polarizada incide sobre un solo disco polarizador, con la dirección de E_0 paralela a la dirección del eje de transmisión. ¿A través de qué ángulo debe girar el disco para que la intensidad en el haz transmitido se reduzca por un factor de a) 2.00, b) 4.00 y c) 6.00?
59. **M** Tres placas polarizadoras, cuyos planos son paralelos, se centran sobre un eje común. Las direcciones de los ejes de transmisión en relación con la dirección vertical común se muestran en la figura P24.59. Un haz de luz linealmente polarizado, con plano de polarización paralelo a la dirección de referencia vertical, incide desde la izquierda sobre el primer disco, con intensidad $I_i = 10.0$ unidades (arbitrarias). Calcule la intensidad transmitida I_f cuando $\theta_1 = 20.0^\circ$, $\theta_2 = 40.0^\circ$ y $\theta_3 = 60.0^\circ$. *Sugerencia:* Use varias veces la ley de Malus.

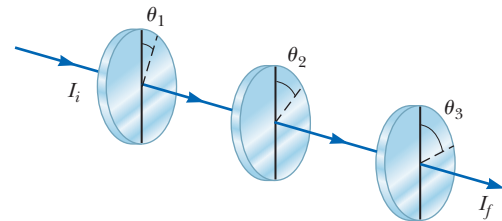


Figura P24.59 (Problemas 59 y 70)

60. Luz con intensidad I_0 y polarizada paralela al eje de transmisión de un polarizador, incide sobre un analizador. a) Si el eje de transmisión del analizador forma un ángulo de 45° con el eje del polarizador, ¿cuál es la intensidad de la luz transmitida? b) ¿Cuál debe ser el ángulo entre los ejes de transmisión para hacer $I/I_0 = 1/3$?
61. **BIO** Luz con longitud de onda en vacío de 546.1 nm cae en forma perpendicular sobre un espécimen biológico que tiene $1.000 \mu\text{m}$ de grueso. La luz se divide en dos haces polarizados en ángulos rectos, para los cuales los índices de refracción son 1.320 y 1.333, respectivamente. a) Calcule la longitud de onda de cada componente de la luz mientras recorre el espécimen. b) Calcule la

diferencia de fase entre los dos haces cuando salen del espécimen.

Problemas adicionales

62. Luz de un láser helio-neón ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) incide sobre una sola rendija. ¿Cuál es el máximo ancho de la rendija para la cual no se observan mínimos de difracción?
63. **C/C** Luz láser con longitud de onda de 632.8 nm se dirige a través de una rendija o dos rendijas y se le permite caer sobre una pantalla 2.60 m más allá. La figura P24.63 muestra el patrón sobre la pantalla, con una regla en centímetros bajo ella. ¿La luz pasa a través de una rendija o de dos rendijas? Explique cómo puede decirlo. Si la respuesta es una rendija, encuentre su ancho. Si la respuesta es dos rendijas, encuentre la distancia entre sus centros.

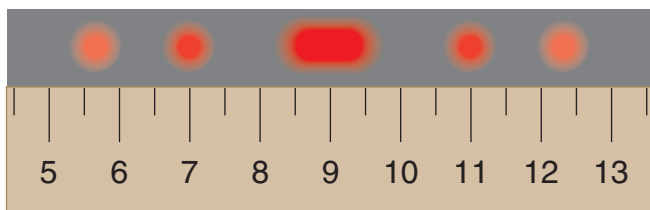


Figura P24.63

64. **S** En un experimento de interferencia de Young, las dos rendijas están separadas 0.150 mm y la luz incidente incluye dos longitudes de onda: $\lambda_1 = 540 \text{ nm}$ (verde) y $\lambda_2 = 450 \text{ nm}$ (azul). Los patrones de interferencia de traslapamiento se observan sobre una pantalla a 1.40 m de las rendijas. a) Encuentre una relación entre los órdenes de m_1 y m_2 que determinan dónde una franja brillante de la luz verde coincide con una franja brillante de la luz azul. (El orden m_1 se asocia con λ_1 , y m_2 se asocia con λ_2 .) b) Encuentre los valores mínimos de m_1 y m_2 tales que el traslapamiento de las franjas brillantes ocurrirá y encuentre la posición del traslape sobre la pantalla.
65. Luz con 546 nm de longitud de onda (la intensa línea verde desde una fuente de mercurio) produce un patrón de interferencia de Young donde el segundo mínimo desde el máximo central está a lo largo de una dirección que forma un ángulo de 18.0 min de arco con el eje a través del máximo central. ¿Cuál es la distancia entre las rendijas paralelas?
66. Dos bocinas se colocan separadas 35.0 cm . Un solo oscilador hace que las bocinas vibren en fase a una frecuencia de 2.00 kHz . ¿A qué ángulos, medidos desde el bisector perpendicular de la línea que une a las bocinas, un observador distante escucharía máxima intensidad de sonido? ¿Mínima intensidad de sonido? (Considere que la velocidad del sonido es 340 m/s .)
67. Efectos de interferencia se producen en el punto P sobre una pantalla como resultado de rayos directos desde una fuente de 500 nm y los rayos reflejados de un espejo, como se muestra en la figura P24.67. Si la fuente está

$L = 100 \text{ m}$ a la izquierda de la pantalla y $h = 1.00 \text{ cm}$ arriba del espejo, encuentre la distancia y (en milímetros) a la primera banda oscura arriba del espejo.

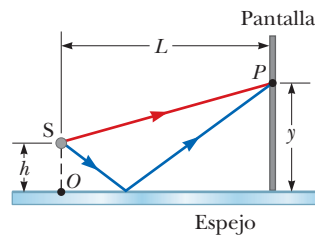


Figura P24.67

68. **BIO** Muchas células son transparentes e incoloras. Las estructuras de gran interés en biología y medicina prácticamente pueden ser invisibles a los microscopios ordinarios. Un *microscopio de interferencia* revela una diferencia en índice refractivo para indicar el tamaño y la forma de las estructuras celulares. La idea se ejemplifica en el siguiente problema: una cuña de aire se forma entre dos placas de vidrio en contacto a lo largo de un borde y ligeramente separada en el borde opuesto. Cuando las placas se iluminan con luz monocromática desde arriba, la luz reflejada tiene 85 franjas oscuras. Calcule el número de franjas oscuras que aparecen si el agua ($n = 1.33$) sustituye al aire entre las placas.
69. La figura P24.69 muestra un transmisor de ondas de radio y un receptor, ambos con $h = 50.0 \text{ m}$ arriba del suelo y separados $d = 600 \text{ m}$. El receptor puede recibir señales directas desde el transmisor e indirectamente de señales que rebotan del suelo. Si el suelo está a nivel entre el transmisor y el receptor, y en la reflexión ocurre un corrimiento de fase de $\lambda/2$, determine las longitudes de onda más largas que interfieren a) constructiva y b) destructivamente.

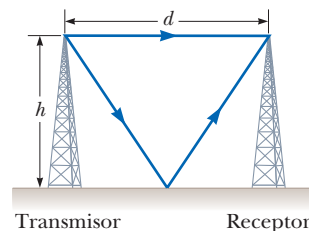


Figura P24.69

70. Tres polarizadores, centrados sobre un eje común y con sus planos mutuamente paralelos, tienen ejes de transmisión orientados a ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 de la vertical, como se muestra en la figura P24.59. Luz con intensidad I_i polarizada con su plano de polarización orientado verticalmente, incide desde la izquierda sobre el primer polarizador. ¿Cuál es la razón I_f/I_i de la intensidad final transmitida, a la intensidad incidente si a) $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$ y $\theta_3 = 0^\circ$, b) $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ y $\theta_3 = 90^\circ$?

71. La antena de transmisión de un submarino está 5.00 m arriba del agua cuando la nave sale a la superficie. El capitán quiere transmitir un mensaje a un receptor sobre un risco de 90.0 m de alto a la orilla del océano. Si la señal debe ser por completo polarizada por reflexión de la superficie del océano, ¿cuán lejos debe estar la nave de la playa?

72. S Una lente plano-convexa (plana en un lado, convexa en el otro), con índice de refracción n , descansa con su lado curvo (radio de curvatura R) sobre una superficie de vidrio plana con el mismo índice de refracción, con una película de índice $n_{\text{película}}$ entre ellas. La lente se ilumina desde arriba con luz de longitud de onda λ . Demuestre que los anillos de Newton oscuros que aparecen tienen radios de

$$r \approx \sqrt{m\lambda R / n_{\text{película}}}$$

donde m es un entero.

73. Un patrón de difracción se produce sobre una pantalla a 140 cm de una sola rendija, con el uso de luz monocromática con longitud de onda de 500 nm. La distancia desde el centro del máximo central hasta el máximo de primer orden es 3.00 mm. Calcule el ancho de la rendija. *Sugerencia:* Suponga que el máximo de primer orden está a la mitad entre los mínimos de primero y segundo órdenes.

74. Una pieza plana de vidrio se sostiene en forma horizontal sobre el extremo plano de una barra metálica de 10.0 cm de largo que tiene su extremo inferior rígidamente fijo. La delgada película de aire entre la barra y el vidrio se observa que es brillante cuando se ilumina con luz de 500 nm de longitud de onda. Conforme la temperatura aumenta lentamente en 25.0 °C, la película cambia de brillante a oscura y de vuelta a brillante 200 veces. ¿Cuál es el coeficiente de expansión lineal del metal?



Los telescopios gemelos Keck, en la cima del volcán Mauna Kea en Hawaii, son los telescopios ópticos e infrarrojos más grandes del mundo. Cada uno tiene un espejo primario de 10 m de diámetro que comprende 36 segmentos hexagonales que funcionan en conjunto como una sola pieza de vidrio reflector. Lejos de las luces de la ciudad, sobre un volcán dormido en el aire seco y no contaminado, los telescopios tienen una ubicación ideal para sondear los misterios del Universo.

Instrumentos ópticos

25

Cada vez que se pone un par de gafas o lentes de contacto, toma una fotografía, mira al cielo a través de un telescopio, etc., usa dispositivos hechos con lentes, espejos y otros componentes ópticos. En este capítulo examinaremos cómo funcionan los instrumentos ópticos. Para la mayor parte, el análisis involucra las leyes de reflexión y refracción y los procedimientos de la óptica geométrica. Sin embargo, para explicar ciertos fenómenos, debemos usar la naturaleza ondulatoria de la luz.

25.1 La cámara

La cámara fotográfica de una sola lente es un instrumento óptico simple que tiene las características que se muestran en la figura 25.1 en la página 860. Consiste en una caja opaca, una lente convergente que produce una imagen real y una película fotográfica detrás de la lente para recibir la imagen. Las cámaras digitales difieren en que la imagen se forma sobre un dispositivo de carga acoplada (CCD) o un sensor semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) en lugar de una película. Los sensores de imagen CCD y CMOS convierten la imagen en forma digital, que luego se puede almacenar en la memoria de la cámara.

El enfoque de una cámara se logra al variar la distancia entre la lente y la película, con un fuelle ajustable en las cámaras antiguas y otros mecanismos en los modelos contemporáneos. Para un enfoque adecuado, que conduce a imágenes definidas, la distancia lente a película depende de la distancia del objeto así como de la longitud focal de la lente. El obturador, que se ubica detrás de la lente, es un dispositivo mecánico que se abre durante intervalos seleccionados. Con este arreglo, los objetos en movimiento se pueden fotografiar con el uso de tiempos de exposición cortos y las escenas oscuras (con bajos niveles de luz) con el uso de tiempos de exposición largos. Si este ajuste no fuese posible, sería

25.1 La cámara

25.2 El ojo

25.3 El amplificador simple

25.4 El microscopio compuesto

25.5 El telescopio

25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares

25.7 El interferómetro Michelson

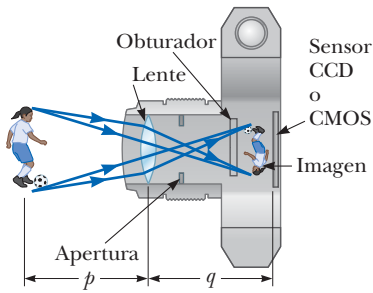


Figura 25.1 Vista transversal de una cámara digital simple. El sensor de imagen CCD o CMOS es el componente sensible a la luz de la cámara. En una cámara no digital la luz de la lente cae sobre película fotográfica. En realidad, $p \gg q$.

imposible tomar fotografías que detengan la acción. Un vehículo que se mueve rápidamente, por ejemplo, podría avanzar lo suficiente, mientras el obturador está abierto, para producir una imagen borrosa. Otra causa principal de imágenes borrosas es el movimiento de la cámara mientras el obturador está abierto. Para evitar tal movimiento, debe montar la cámara en un trípode o usar tiempos de exposición cortos. La velocidad típica de obturador (esto es, tiempos de exposición) son $1/30$ s, $1/60$ s, $1/125$ s y $1/250$ s. Los objetos estacionarios con frecuencia se toman con una velocidad de obturador de $1/60$ s.

La mayoría de las cámaras también tienen una apertura de diámetro ajustable para mayor control de la intensidad de la luz que llega a la película. Cuando se usa una apertura de diámetro pequeño, sólo la luz de la porción central de la lente llega a la película, de modo que se reduce la aberración esférica.

La intensidad I de la luz que llega a la película es proporcional al área de la lente. Puesto que esta área a su vez es proporcional al cuadrado del diámetro de la lente D , la intensidad también es proporcional a D^2 . La intensidad de la luz es una medida de la tasa a la cual la película recibe energía por unidad de área de la imagen. Puesto que el área de la imagen es proporcional a q^2 en la figura 25.1 y $q \approx f$ (cuando $p \gg f$, de modo que p se puede aproximar como infinito), concluimos que la intensidad también es proporcional a $1/f^2$. Por lo tanto, $I \propto D^2/f^2$. La brillantez de la imagen formada sobre la película depende de la intensidad de la luz, así que a final de cuentas se ve que depende, tanto de la longitud focal f como del diámetro D de la lente. La razón f/D se llama **número f** (o razón focal) de una lente:

$$\text{número } f \equiv \frac{f}{D} \quad [25.1]$$

El número f con frecuencia proporciona una descripción de la “velocidad” de la lente. Una lente con un número f bajo, es una lente “rápida”. Las lentes extremadamente rápidas, que tienen un número f tan bajo, aproximadamente 1.2, son costosas debido a la dificultad de mantener aberraciones aceptablemente pequeñas con rayos que pasan a través de una gran área de la lente. Las lentes de las cámaras con frecuencia se marcan con un rango de números f , como 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8 y 11. Cualquiera de estas configuraciones se puede seleccionar al ajustar la apertura, lo que cambia el valor de D . Aumentar la configuración de un número f al siguiente valor más alto (por ejemplo, de 2.8 a 4) reduce el área de la apertura por un factor de 2. La configuración de número f más bajo en una cámara corresponde a una apertura muy abierta y el uso de la máxima área posible de la lente.

Las cámaras simples por lo general tienen una longitud focal fija y tamaño de apertura fijo, con un número f aproximado de 11. Este valor alto del número f permite una gran **profundidad de campo**, lo que significa que los objetos a un amplio rango de distancias de la lente forman imágenes razonablemente claras en la película. En otras palabras, la cámara no tiene que enfocarse. La mayoría de las cámaras con números f variables se ajustan de manera automática.

25.2 El ojo BIO

Como una cámara, un ojo normal enfoca luz y produce una imagen clara. Sin embargo, el mecanismo mediante el cual el ojo controla la cantidad de luz admitida y se ajusta para producir imágenes correctamente enfocadas es incluso mucho más complejo, intrincado y eficaz que el de las cámaras más sofisticadas. En todos los aspectos el ojo es una maravilla fisiológica.

La figura 25.2a muestra las partes esenciales del ojo. La luz que entra al ojo pasa a través de una estructura transparente llamada *córnea*, detrás de la cual hay un líquido claro (el *humor acuoso*), una abertura variable (la *pupila*, que es una abertura en el *iris*) y el *crystalino*. La mayor parte de la refracción ocurre en la superficie exterior del ojo, donde la córnea está cubierta con una película de lágrimas. En el cristalino ocurre relativamente poca refracción porque el humor acuoso, en contacto con el cristalino, tiene un índice de refracción promedio cercano al del cristalino. El iris, que es la porción colorida del ojo, es un diafragma muscular que controla el tamaño de la pupila. El iris regula la cantidad de luz que entra al ojo al dilatar la pupila en condiciones de baja iluminación y contrae la

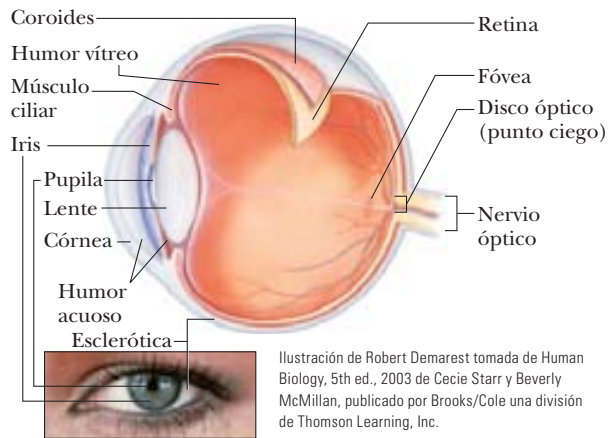


Ilustración de Robert Demarest tomada de Human Biology, 5th ed., 2003 de Cecie Starr y Beverly McMillan, publicado por Brooks/Cole una división de Thomson Learning, Inc.



Jean Claude Revy—ISM/Phototake

Figura 25.2 a) Partes esenciales del ojo. ¿Puedes relacionar las partes esenciales del ojo con las de la cámara simple en la figura 25.1? b) Acercamiento fotográfico de la córnea humana.

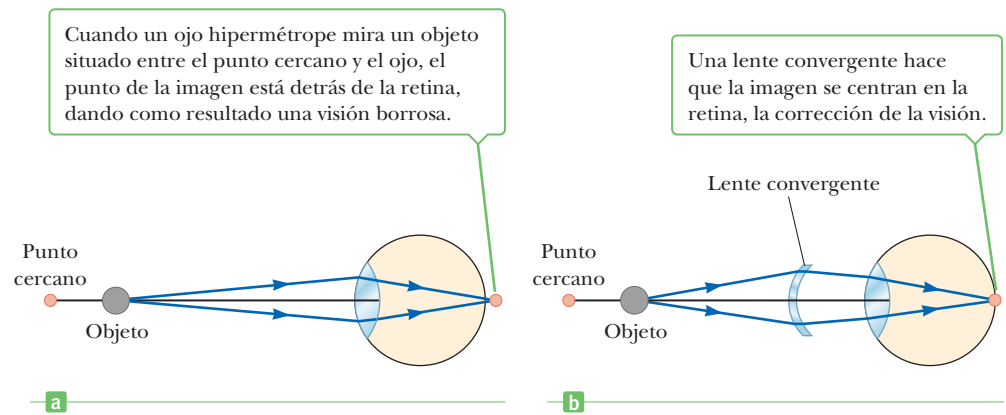
pupila bajo condiciones de luz brillante. El rango de números f del ojo va de aproximadamente 2.8 hasta 16.

El sistema córnea-cristalino enfoca la luz en la superficie posterior del ojo, la *retina*, que consiste en millones de receptores sensibles llamados *bastones* y *conos*. Cuando se estimulan con luz, estas estructuras envían impulsos al cerebro vía el nervio óptico y los convierte en la visión consciente del mundo. El proceso por el cual el cerebro realiza esta conversión todavía no se comprende bien y es tema de mucha especulación e investigación. A diferencia de la película en una cámara, los conos y bastones ajustan químicamente su sensibilidad de acuerdo con las condiciones de iluminación dominante. Este ajuste, que tarda cerca de 15 minutos, es responsable de la experiencia de “acostumbrarse a la oscuridad” en lugares como las salas cinematográficas. El control de apertura del iris, que tarda menos de 1 segundo, ayuda a proteger la retina de sobrecarga en el proceso de ajuste.

El ojo enfoca un objeto al variar la forma del cristalino maleable a través de un sorprendente proceso llamado **acomodación**. Un importante componente en la acomodación es el *músculo ciliar*, que se sitúa en un círculo alrededor del borde del cristalino. Delgados filamentos, llamados *zónulas*, van desde este músculo hasta el borde del cristalino. Cuando el ojo se enfoca en un objeto distante, el músculo ciliar se relaja, lo que tensa las zónulas que unen el músculo ciliar al borde del cristalino. La fuerza de las zónulas hace que el cristalino se aplane, lo que aumenta su longitud focal. Para un objeto distante en el infinito, la longitud focal del ojo es igual a la distancia fija entre cristalino y retina, aproximadamente 1.7 cm. El ojo se enfoca en los objetos cercanos al tensar el músculo ciliar, lo que relaja las zónulas. Esta acción permite que el cristalino se abombe un poco y su longitud focal disminuye, lo que resulta en que la imagen se enfoca en la retina. Todos estos ajustes del cristalino son tan suaves que uno ni siquiera percibe el cambio. En este aspecto, incluso la cámara electrónica más fina es un juguete en comparación con el ojo.

Existe un límite para la acomodación porque los objetos que están muy cerca del ojo producen imágenes borrosas. El **punto cercano** es la distancia más próxima para la cual el cristalino se puede acomodar para enfocar la luz en la retina. Esta distancia por lo regular aumenta con la edad y tiene un valor promedio de 25 cm. Por lo general, a los 10 años de edad el punto cercano del ojo es de aproximadamente 18 cm. Éste aumenta alrededor de 25 cm a los 20 años de edad, a 50 cm a los 40 y a 500 cm o más a los 60. El **punto lejano** del ojo representa la distancia más alejada para la cual el cristalino del ojo relajado puede enfocar luz sobre la retina. Una persona con visión normal puede ver objetos muy distantes, como la Luna y por lo tanto tiene un punto lejano en el infinito.

Figura 25.3 a) Un ojo hipermetrope sin corregir. b) Un ojo hipermetrope se puede corregir con una lente convergente. (Suponiendo que el objeto es muy pequeño en estas figuras.)



Condiciones del ojo

Cuando el ojo sufre una falta de concordancia entre el poder de enfoque del sistema cristalino-córnea y la longitud del ojo, de modo que los rayos de luz llegan a la retina antes de convergir para formar una imagen, como en la figura 25.3a, la condición se conoce como **hipermetropía** (o *hiperopia*). Una persona hipermetrope puede ver con claridad objetos lejanos, pero no los objetos cercanos. Aunque el punto cercano de un ojo normal es de aproximadamente 25 cm, el punto cercano de una persona hipermetrope está mucho más lejos que eso. El ojo de una persona hipermetrope intenta enfocar por acomodación, al acortar su longitud focal. La acomodación funciona para objetos distantes, pero, debido a que la longitud focal del ojo hipermetrope es más larga que la normal, la luz de los objetos cercanos no se puede llevar a un foco definido antes de llegar a la retina, lo que causa una imagen borrosa. La condición se puede corregir al colocar una lente convergente frente al ojo, como en la figura 25.3b. La lente refracta los rayos entrantes más hacia el eje principal antes de entrar al ojo, lo que les permite convergir y enfocarse en la retina.

La **miopía** es otra condición de falta de concordancia en la cual una persona puede enfocar los objetos cercanos, pero no los objetos lejanos. En el caso de *miopía axial*, la miopía es producto de un cristalino muy alejado de la retina. También es posible tener *miopía refractiva*, en la cual el sistema cristalino-córnea es muy poderoso para la longitud normal del ojo. El punto lejano del ojo miope no está en el infinito y puede estar a menos de 1 metro. La máxima longitud focal del ojo miope es insuficiente para producir una imagen clara en la retina y los rayos de un objeto distante convergen a un foco enfrente de la retina. Luego continúan a través de dicho punto, divergen antes de que finalmente lleguen a la retina y producen una imagen borrosa (figura 25.4a).

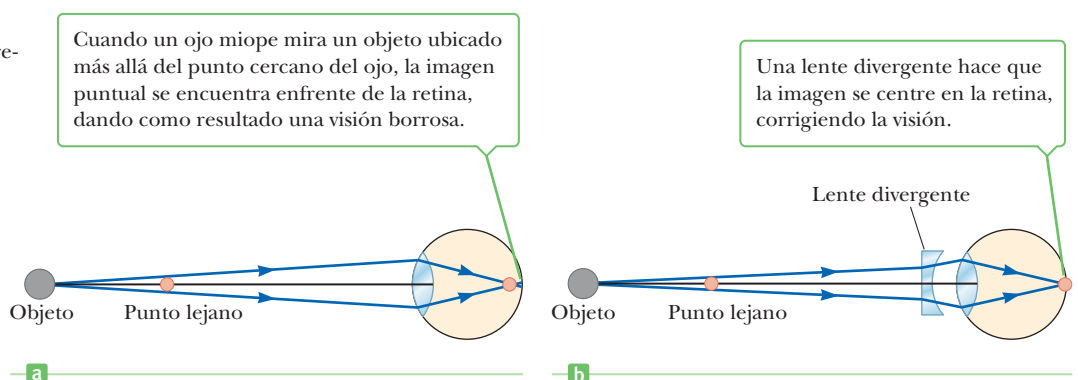
La miopía se puede corregir con una lente divergente, como se muestra en la figura 25.4b. La lente refracta los rayos alejándose del eje principal antes de que entren al ojo, lo que les permite enfocarse sobre la retina.

Al comenzar la edad madura, la mayoría de las personas pierden parte de su habilidad de acomodación, conforme los músculos ciliares se debilitan y el cristalino se endurece.

BIO APLICACIÓN

Uso de lentes ópticas para corregir defectos

Figura 25.4 a) Un ojo miope sin corregir b) Un ojo miope corregido con una lente divergente. (Se supone que el objeto es muy pequeño en estas figuras.)



A diferencia de la hipermetropía, que es una falta de concordancia del poder de enfoque y la longitud del ojo, la **presbicia** (literalmente “vista cansada”) se debe a una reducción en la capacidad de acomodación. La córnea y el cristalino ya no pueden enfocar los objetos cercanos en la retina. Los síntomas son los mismos que los de la hipermetropía y la condición puede corregirse con lentes convergentes.

En el defecto ocular llamado **astigmatismo**, la luz proveniente de una fuente puntual produce una imagen lineal sobre la retina. Esta condición surge cuando la córnea o el cristalino (o ambos) no son perfectamente simétricos. El astigmatismo se puede corregir con lentes que tienen diferentes curvaturas en dos direcciones mutuamente perpendiculares.

Los optometristas y oftalmólogos por lo general prescriben lentes medidos en **dioptrías**:

El **poder** P de un lente en dioptrías es igual al inverso de la longitud focal en metros:
 $P = 1/f$.

Por ejemplo, una lente convergente con una longitud focal de +20 cm tiene un poder de +5.0 dioptrías y una lente divergente con una longitud focal de -40 cm tiene un poder de -2.5 dioptrías. (Aunque el símbolo P es el mismo que para la potencia mecánica, no hay relación entre los dos conceptos.)

La posición de la lente en relación con el ojo causa diferencias en poder, pero por lo general representan menos de un cuarto de dioptría, lo que no es perceptible para la mayoría de los pacientes. Como resultado, los practicantes de optometría tratan con incrementos de un cuarto de dioptría. Despreciar la distancia ojo-lente es equivalente a hacer el cálculo para un lente de contacto, que descansa directamente sobre el ojo.

■ EJEMPLO 25.1 Prescripción de una lente correctiva para un paciente hipermetrope BIO

OBJETIVO Aplique óptica geométrica para corregir la hipermetropía.

PROBLEMA El punto cercano del ojo de un paciente es 50.0 cm. **a)** ¿Qué longitud focal debe tener una lente correctiva para permitir al ojo ver con claridad un objeto a 25.0 cm de distancia? Desprecie la distancia ojo-lente. **b)** ¿Cuál es la potencia de esta lente? **c)** Repita el problema y considere que, para gafas típicas, la lente correctiva está a 2.00 cm frente al ojo.

ESTRATEGIA Este problema requiere sustitución en la ecuación de lentes delgadas (ecuación 23.11) y luego usar la definición de poder de lente en términos de dioptrías. El objeto está a 25.0 cm, pero la lente debe formar una imagen en el punto cercano del paciente, 50.0 cm, el punto más cercano donde el ojo del paciente puede ver con claridad. En el inciso c) se debe restar 2.00 cm tanto de la distancia del objeto como de la distancia de la imagen para explicar la posición de la lente.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la longitud focal de la lente correctiva y desprecie su distancia desde el ojo.

Aplique la ecuación de lente delgada:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Sustituya $p = 25.0$ cm y $q = -50.0$ cm (esta última es negativa porque la imagen debe ser virtual) en el mismo lado de la lente que el objeto:

$$\frac{1}{25.0 \text{ cm}} + \frac{1}{-50.0 \text{ cm}} = \frac{1}{f}$$

Resuelva para f . La longitud focal es negativa, lo que corresponde a una lente convergente.

$$f = 50.0 \text{ cm}$$

b) ¿Cuál es el poder de esta lente?

El poder es el recíproco de la longitud focal en metros:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.500 \text{ m}} = +2.00 \text{ dioptrías}$$

c) Repita el problema y observe que la lente correctiva en realidad está a 2.00 cm enfrente del ojo.

Sustituya los valores corregidos de p y q en la ecuación de lente delgada:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{23.0 \text{ cm}} + \frac{1}{(-48.0 \text{ cm})} = \frac{1}{f}$$

$$f = 44.2 \text{ cm}$$

(continúa)

Calcule la potencia:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.442 \text{ m}} = + 2.26 \text{ dioptrías}$$

COMENTARIOS Advierta que el cálculo en el inciso c), que no desprecia la distancia ojo-lente, resulta en una diferencia de 0.26 dioptrías.

PREGUNTA 25.1 Verdadero o Falso: Mientras mayor sea la distancia a un punto cercano, mayor será el poder de la lente correctiva requerida.

EJERCICIO 25.1 Suponga que una lente se coloca en un dispositivo que determina su poder como 2.75 dioptrías. Encuentre a) la longitud focal de la lente y b) la distancia mínima a la que un paciente podrá enfocar un objeto, si el punto cercano del paciente es 60.0 cm. Desprecie la distancia ojo-lente.

RESPUESTAS a) 36.4 cm b) 22.7 cm

■ EJEMPLO 25.2 Una lente correctiva para miopía

OBJETIVO Aplique óptica geométrica para corregir miopía.

PROBLEMA Un paciente miope particular no puede ver objetos claramente cuando están más allá de 25 cm (el punto lejano del ojo). **a)** ¿Qué longitud focal deben tener los lentes de contacto prescritos para corregir este problema? **b)** Encuentre el poder de la lente, en dioptrías. Desprecie la distancia entre el ojo y la lente correctiva.

ESTRATEGIA El propósito de la lente en este ejemplo es tomar objetos en el infinito y crear una imagen de ellos en el punto lejano del paciente. Aplique la ecuación de lente delgada.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la longitud focal de la lente correctiva.

Aplique la ecuación de lente delgada para un objeto en el infinito e imagen a 25.0 cm:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{(-25.0 \text{ cm})} = \frac{1}{f}$$

$$f = -25.0 \text{ cm}$$

b) Encuentre el poder de la lente en dioptrías.

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-0.250 \text{ m}} = -4.00 \text{ dioptrías}$$

COMENTARIOS La longitud focal es negativa, consistente en una lente divergente. Observe que el poder también es negativo y tiene el mismo valor numérico que la suma del lado izquierdo de la ecuación de lente delgada.

PREGUNTA 25.2 Verdadero o Falso: Mientras más corta sea la distancia al punto lejano de un paciente, más negativo será el poder de la lente correctiva requerida.

EJERCICIO 25.2 a) ¿Qué poder de lente prescribiría a un paciente con un punto lejano de 35.0 cm? Desprecie la distancia ojo-lente. b) Repita, pero suponiendo una distancia ojo-lente correctivo de 2.00 cm.

RESPUESTAS a) -2.86 dioptrías b) -3.03 dioptrías

■ FÍSICA APLICADA 25.1 Visión del hombre invisible

Una clásica historia de ciencia ficción, *El hombre invisible*, de H. G. Wells, habla de un hombre que se volvió invisible al cambiar el índice de refracción de su cuerpo al del aire. Estudiantes que saben cómo funciona el ojo critican esta historia; afirman que el hombre invisible no podría ver. Sobre la base de su conocimiento del ojo, ¿el hombre invisible podría ver?

EXPLICACIÓN No podría ver. Para que el ojo vea un objeto, la luz entrante debe refractarse en la córnea y el cristalino para formar una imagen sobre la retina. Si la córnea y el cristalino tienen el mismo índice de refracción que el aire, la refracción no puede ocurrir y no se formaría una imagen. ■

■ Examen rápido

25.1 Dos excursionistas quieren encender una fogata durante el día. Un excursionista es miope y otro es hipermetrope. ¿Las gafas de quién se deben usar para enfocar los rayos del Sol sobre algo de papel para encender el fuego? a) los de cualquier excursionista b) los del excursionista miope c) los del excursionista hipermetrope.

25.3 El amplificador simple

El **amplificador simple** es uno de los instrumentos ópticos más básicos porque consiste solamente en una única lente convergente. Como el nombre implica, este dispositivo se utiliza para aumentar el tamaño aparente de un objeto. Suponga que un objeto se ve a cierta distancia p del ojo, como en la figura 25.5. El tamaño de la imagen formada en la retina depende del ángulo θ que subtende el objeto en el ojo. Conforme el objeto se acerca más al ojo, θ aumenta y se observa una imagen más grande. Sin embargo, un ojo normal no puede enfocar un objeto más cerca que aproximadamente 25 cm, el punto cercano (figura 25.6a). (¡Inténtelo!) Por lo tanto, θ es un máximo en el punto cercano.

Para mayor aumento en el tamaño angular aparente de un objeto, se puede colocar una lente convergente frente al ojo con el objeto colocado en el punto O , justo dentro del punto focal de la lente, como en la figura 25.6b. En esta posición, la lente forma una imagen virtual, derecha y alargada, como se muestra. La **amplificación angular** m se define como la razón del ángulo subtendido por un pequeño objeto cuando se usa la lente (ángulo θ en la figura 25.6b), al ángulo subtendido por el objeto colocado en el punto cercano sin uso de lente (ángulo θ_0 en la figura 25.6a):

$$m \equiv \frac{\theta}{\theta_0} \quad [25.2]$$

Para el caso donde la lente se sostiene cerca del ojo, la amplificación angular es un máximo cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo, que corresponde a $q = -25$ cm (véase la figura 25.6b). La distancia del objeto que corresponde a esta distancia de la imagen se puede calcular a partir de la ecuación de lente delgada:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{-25 \text{ cm}} = \frac{1}{f} \quad [25.3]$$

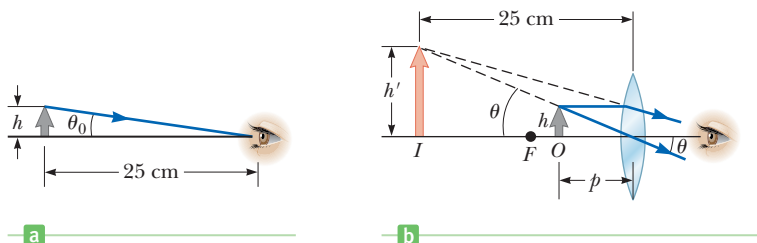
$$p = \frac{25f}{25 + f}$$

Aquí, f es la longitud focal del amplificador en centímetros. De las figuras 25.6a y 25.6b, la aproximación de ángulo pequeño produce

$$\tan \theta_0 \approx \theta_0 \approx \frac{h}{25} \quad \text{y} \quad \tan \theta \approx \theta \approx \frac{h'}{p} \quad [25.4]$$

En consecuencia, la ecuación 25.2 se convierte en

$$m_{\text{máx}} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h'/p}{h/25} = \frac{25}{p} = \frac{25}{25f/(25 + f)}$$



El tamaño de la imagen formada sobre la retina depende del ángulo θ subtendido en el ojo.

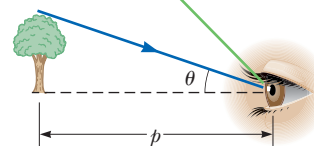


Figura 25.5 Un observador mira un objeto a una distancia p .

◀ Amplificación angular con el objeto en el punto cercano

Figura 25.6 a) Un objeto colocado en el punto cercano ($p = 25$ cm) subtende un ángulo de $\theta_0 \approx h/25$ en el ojo. b) Un objeto colocado cerca del punto focal de una lente convergente produce una imagen ampliada, que subtende un ángulo de $\theta \approx h'/25$ en el ojo. Observe que en esta situación $q = -25$ cm.

de modo que

$$m_{\text{máx}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad [25.5]$$

La máxima amplificación angular dada por la ecuación 25.5 es la razón del tamaño angular visto con la lente al tamaño angular visto sin la lente, con el objeto en el punto cercano del ojo. Aunque el ojo normal puede enfocar una imagen formada en cualquier parte entre el punto cercano y el infinito, está más relajado cuando la imagen está en el infinito (sección 25.2). Para que la imagen formada por la lente de aumento aparezca en el infinito, el objeto se debe colocar en el punto focal de la lente, de modo que $p = f$. En este caso, la ecuación 25.4 se convierte en

$$\theta_0 \approx \frac{h}{25} \quad \text{y} \quad \theta \approx \frac{h}{f}$$

y la amplificación angular es

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad [25.6]$$

Con una sola lente, es posible lograr amplificaciones angulares de hasta aproximadamente 4 sin serias aberraciones. Amplificaciones de hasta 20 se pueden lograr con el uso de una o dos lentes para corregir aberraciones.

■ EJEMPLO 25.3 Amplificación de una lente

OBJETIVO Calcule amplificaciones de una lente cuando la imagen está en el punto cercano y cuando está en el infinito.

PROBLEMA a) ¿Cuál es la máxima amplificación angular de una lente con una longitud focal de 10.0 cm? b) ¿Cuál es la amplificación angular de esta lente cuando el ojo está relajado? Suponga una distancia ojo-lente de cero.

ESTRATEGIA La máxima amplificación angular ocurre cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo. Bajo estas circunstancias, la ecuación 25.5 proporciona la máxima amplificación angular. En el inciso b) el ojo se relaja sólo si la imagen está en el infinito, de modo que se aplica la ecuación 25.6.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la máxima amplificación angular de la lente.

Sustituya en la ecuación 25.5:

$$m_{\text{máx}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{10.0 \text{ cm}} = 3.5$$

b) Encuentre la amplificación de la lente cuando el ojo está relajado.

Cuando el ojo está relajado, la imagen está en el infinito, así que sustituya en la ecuación 25.6:

$$m = \frac{25 \text{ cm}}{f} = \frac{25 \text{ cm}}{10.0 \text{ cm}} = 2.5$$

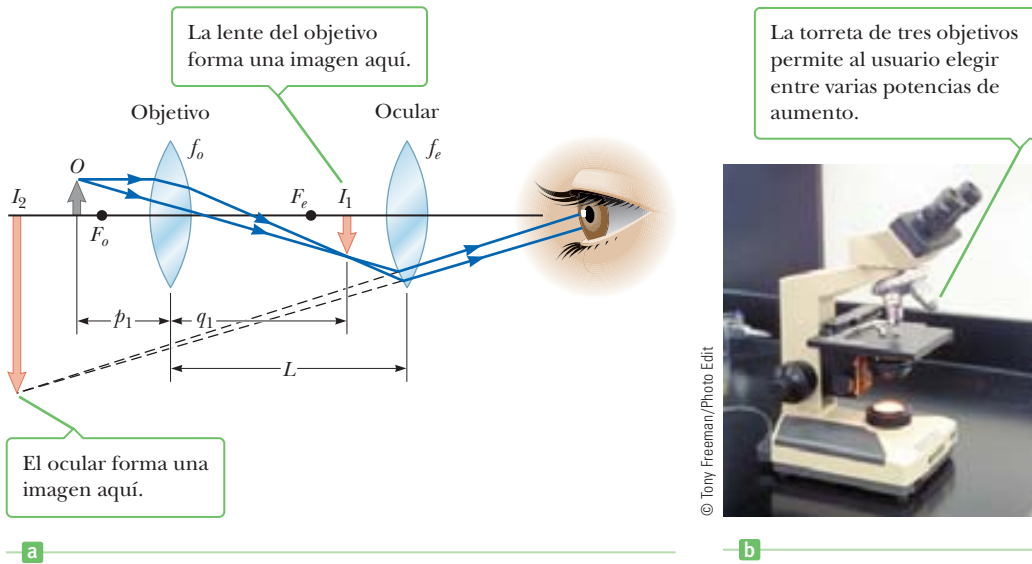
PREGUNTA 25.3 Para mayor amplificación, ¿debe seleccionar una lente con longitud focal más grande o más pequeña?

EJERCICIO 25.3 ¿Cuál longitud focal será necesaria si la lente debe tener una amplificación angular máxima de 4.0?

RESPUESTA 8.3 cm

25.4 El microscopio compuesto

Un amplificador simple proporciona sólo asistencia limitada con la inspección de los detalles mínimos de un objeto. Se puede lograr mayor amplificación al combinar dos lentes en un dispositivo llamado microscopio compuesto, del cual se muestra un diagrama esquemático en la figura 25.7a. El instrumento consiste en dos lentes: una lente objetivo con una longitud focal muy corta f_o (donde $f_o < 1 \text{ cm}$) y una lente ocular con una longitud focal f_e


Figura activa 25.7

a) Diagrama de un microscopio compuesto, que consiste en un objetivo y un ocular. b) Un microscopio compuesto. La torre de tres objetivos permite al usuario cambiar a varias potencias de ampliación diferentes. Las combinaciones de oculares con diferentes longitudes focales y diferentes objetivos pueden producir un amplio rango de ampliaciones.

de algunos centímetros. Las dos lentes están separadas por la distancia L , que es mucho mayor que f_o o f_e .

El enfoque básico que se usa para analizar las propiedades de formación de imagen de un microscopio es el de dos lentes en fila: la imagen formada por la primera se convierte en el objeto de la segunda. El objeto O colocado justo fuera de la longitud focal del objetivo forma una imagen real invertida en I_1 que está en o justo dentro del punto focal del ocular. Esta imagen está mucho más ampliada. (Por claridad, la ampliación de I_1 no se muestra en la figura activa 25.7a.) El ocular, que sirve como un amplificador simple, usa la imagen en I_1 como su objeto y produce una imagen en I_2 . La imagen que ve el ojo en I_2 es virtual, invertida y mucho muy ampliada.

La ampliación lateral M_1 de la primera imagen es $-q_1/p_1$. Observe que q_1 es aproximadamente igual a L porque el objeto se coloca cerca del punto focal del objetivo, lo que asegura que la imagen formada estará lejos del mismo. Más aún, puesto que el objeto está muy cerca del punto focal del objetivo, $p_1 \approx f_o$. Por lo tanto, la ampliación lateral del objetivo es

$$M_1 = -\frac{q_1}{p_1} \approx -\frac{L}{f_o}$$

A partir de la ecuación 25.6, la ampliación angular del ocular para un objeto (que corresponde a la imagen en I_1) colocado en el punto focal es

$$m_e = \frac{25 \text{ cm}}{f_e}$$

La ampliación global del microscopio compuesto se define como el producto de las ampliaciones lateral y angular:

$$m = M_1 m_e = -\frac{L}{f_o} \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right)$$

[25.7] ◀ Amplificación de un microscopio

El signo negativo indica que la imagen está invertida respecto al objeto.

El microscopio extendió la visión en el antes desconocido reino de objetos increíblemente pequeños y las capacidades de este instrumento crecen de manera constante con técnicas mejoradas en el pulido de precisión de lentes. Una pregunta natural es si existe algún límite a cuán poderoso podría ser un microscopio. Por ejemplo, ¿se podría hacer un

microscopio lo suficientemente poderoso como para poder ver un átomo? La respuesta a esta pregunta es no, en tanto se use luz visible para iluminar el objeto. Para verlo, el objeto bajo un microscopio al menos debe ser tan grande como una longitud de onda de luz. Un átomo es muchas veces menor que la longitud de onda de la luz visible, así que sus misterios se deben probar vía otras técnicas.

La dependencia de la longitud de onda de las habilidades de “visualización” de una onda se puede ilustrar mediante el establecimiento de ondas de agua en una bañera de la siguiente forma. Imagine que agita una mano en el agua hasta que en la superficie se mueven ondas con una longitud de aproximadamente 6 pulgadas. Si coloca un pequeño objeto, como un palillo, en la ruta de las ondas, descubrirá que las ondas no se perturban de manera considerable por el palillo, sino que continúan a lo largo de su trayectoria. Ahora suponga que coloca un objeto más grande, como un barco de juguete, en la trayectoria de las ondas. En este caso las ondas se perturban de manera considerable por el objeto. El palillo era mucho más pequeño que la longitud de onda y, como resultado, las ondas no lo “vieron”. Sin embargo, el barco de juguete tiene aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda y por lo tanto crea una perturbación. Las ondas de luz se comportan de esta forma general. La habilidad de un microscopio óptico para ver un objeto depende del tamaño del objeto en relación con la longitud de onda de la luz que se usa para observarlo. En consecuencia, nunca será posible observar átomos o moléculas con tal microscopio porque sus dimensiones son muy pequeñas (≈ 0.1 nm) en relación con la longitud de onda de la luz (≈ 500 nm).

■ EJEMPLO 25.4 Amplificaciones de microscopio

OBJETIVO Comprenda los factores críticos involucrados en la determinación del poder de amplificación de un microscopio.

PROBLEMA Cierta microscopio tiene dos objetivos intercambiables. Uno tiene una longitud focal de 2.0 cm y el otro tiene una longitud focal de 0.20 cm. También están disponibles dos oculares con longitudes focales de 2.5 cm y 5.0 cm. Si la longitud del microscopio es de 18 cm, calcule las amplificaciones para las siguientes combinaciones: el objetivo de 2.0 cm y el ocular de 5.0 cm, el objetivo de 2.0 cm y el ocular de 2.5 cm, y el objetivo de 0.20 cm y el ocular de 5.0 cm.

ESTRATEGIA La solución consiste en sustituir en la ecuación 25.7 para tres diferentes combinaciones de lentes.

SOLUCIÓN

Aplique la ecuación 25.7 y combine el objetivo de 2.0 cm con el ocular de 5.0 cm:

$$m = -\frac{L}{f_o} \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right) = -\frac{18 \text{ cm}}{2.0 \text{ cm}} \left(\frac{25 \text{ cm}}{5.0 \text{ cm}} \right) = -45$$

Combine el objetivo de 2.0 cm con el ocular de 2.5 cm:

$$m = -\frac{18 \text{ cm}}{2.0 \text{ cm}} \left(\frac{25 \text{ cm}}{2.5 \text{ cm}} \right) = -9.0 \times 10^1$$

Combine el objetivo de 0.20 cm con el ocular de 5.0 cm:

$$m = -\frac{18 \text{ cm}}{0.20 \text{ cm}} \left(\frac{25 \text{ cm}}{5.0 \text{ cm}} \right) = -450$$

COMENTARIOS Es posible lograr amplificaciones mucho mayores, pero la resolución comienza a fallar, lo que resulta en imágenes borrosas que no transmiten detalle alguno. (Véase la sección 25.6 para una mayor discusión de este punto.)

PREGUNTA 25.4 Verdadero o Falso: Una longitud focal más corta para ocular u objetivo resultará en mayor amplificación.

EJERCICIO 25.4 Combine el objetivo de 0.20 cm con el ocular de 2.5 cm y encuentre la amplificación.

RESPUESTA -9.0×10^2

25.5 El telescopio

Existen dos tipos fundamentalmente diferentes de telescopio, ambos diseñados para ayudar a ver objetos distantes como los planetas en el Sistema Solar: 1) el **telescopio refractor**, que usa una combinación de lentes para formar una imagen, y 2) el **telescopio reflector**, que

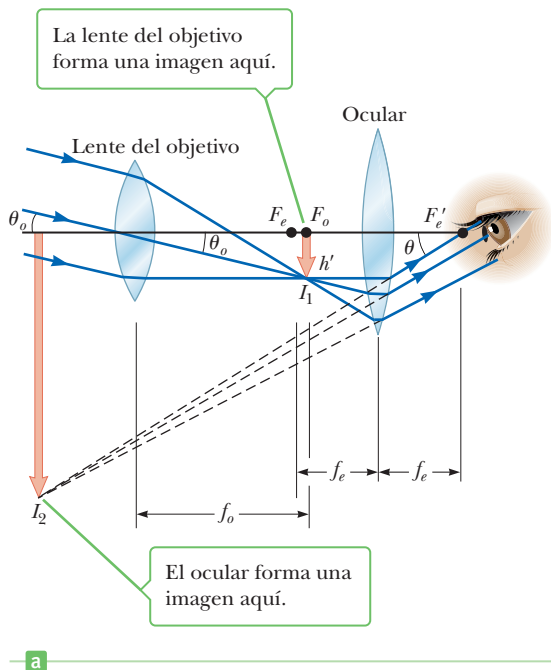


Figura activa 25.8

a) Diagrama de telescopio refractor, con el objeto en el infinito.
 b) Telescopio refractor.

usa un espejo curvo y una lente para formar una imagen. Una vez más, es posible analizar el telescopio al considerarlo como un sistema de dos elementos ópticos en hilera. Como antes, la técnica básica seguida es que la imagen formada por el primer elemento se convierte en el objeto para el segundo.

En el telescopio refractor se ordenan dos lentes de modo que el objetivo forma una imagen real invertida del objeto distante muy cerca del punto focal del ocular (figura activa 25.8a). Más aún, la imagen en I_1 se forma en el punto focal del objetivo porque el objeto en esencia está en el infinito. Por lo tanto, las dos lentes están separadas por la distancia $f_o + f_e$ que corresponde a la longitud del tubo del telescopio. Finalmente, en I_2 , el ocular forma una imagen ampliada de la imagen en I_1 .

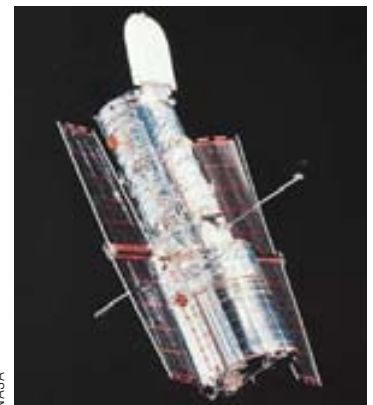
La amplificación angular del telescopio está dada por θ/θ_0 , donde θ_0 es el ángulo subtendido por el objeto en el objetivo y θ es el ángulo subtendido por la imagen final. A partir de los triángulos en la figura 25.8a, y para ángulos pequeños, se tiene

$$\theta \approx \frac{h'}{f_e} \quad \text{y} \quad \theta_0 \approx \frac{h'}{f_o}$$

Por lo tanto, la amplificación angular del telescopio se puede expresar como

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h'/f_e}{h'/f_o} = \frac{f_o}{f_e}$$

[25.8]



El telescopio espacial Hubble permite ver tanto más allá en el espacio como más atrás en el tiempo que nunca antes.

◀ Amplificación angular de un telescopio

Esta ecuación dice que la amplificación angular de un telescopio es igual a la razón de la longitud focal del objetivo a la longitud focal del ocular. Una vez más, la amplificación angular es la razón del tamaño angular visto con el telescopio al tamaño angular visto con el ojo sin ayuda.

En algunas aplicaciones (por ejemplo, la observación de objetos relativamente cercanos como el Sol, la Luna o los planetas) la amplificación angular es importante. Sin embargo, las estrellas están tan alejadas que siempre aparecen como pequeños puntos de luz sin importar cuánta amplificación angular se use. Los grandes telescopios de investigación utilizados para estudiar objetos muy distantes deben tener grandes diámetros para recoger tanta luz como sea posible. Es difícil y costoso fabricar lentes tan grandes para telescopios refractores. Además, el peso de las lentes grandes conduce a pandeo, que es otra fuente de aberración.

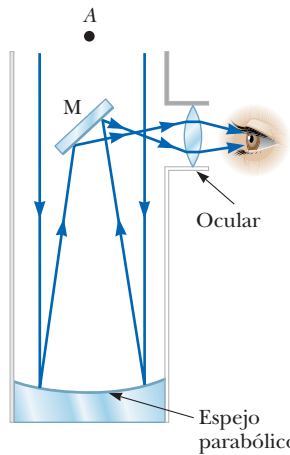


Figura 25.9 Telescopio reflector con un foco newtoniano.

Figura 25.10 El telescopio Hale en el observatorio de Monte Palomar. Justo antes de tomar el elevador al alojamiento del foco principal, a un observador que lo visita por primera vez siempre se le dice: “¡Buena vista! Y, si se cae, intente evadir el espejo”.



Cortesía de Palomar Observatory/ California Institute of Technology

Estos problemas se pueden superar en parte al sustituir el objetivo con un espejo reflector cóncavo, que usualmente tiene forma parabólica para evitar aberración esférica. La figura 25.9 muestra el diseño de un telescopio reflector típico. Los rayos de luz entrantes pasan por el barril del telescopio y se reflejan mediante un espejo parabólico en la base. Estos rayos convergen hacia el punto *A* en la figura, donde se formaría una imagen sobre una placa fotográfica u otro detector. Sin embargo, antes de que se forme esta imagen, un pequeño espejo plano en *M* refleja la luz hacia una abertura en el lado del tubo que pasa hacia un ocular. Se dice que este diseño tiene un *foco newtoniano*, en honor a su desarrollador. Observe que, en el telescopio reflector, la luz nunca pasa a través de vidrio (excepto por el pequeño ocular). Como resultado, virtualmente se eliminan los problemas asociados con la aberración cromática.

Los telescopios ópticos más grandes en el mundo son los dos reflectores Keck de 10 m de diámetro, en Mauna Kea, Hawaii. El telescopio reflector de un solo espejo más grande en Estados Unidos es el instrumento de 5 m de diámetro en Monte Palomar, en California. (Véase la figura 25.10.) En contraste, el telescopio refractor más grande del mundo, en el Observatorio Yerkes, en Williams Bay, Wisconsin, tiene un diámetro de sólo 1 m.

EJEMPLO 25.5 Poder del Hubble

OBJETIVO Comprenda la amplificación en telescopios.

PROBLEMA El telescopio espacial Hubble tiene 13.2 m de largo, pero un espejo secundario que aumenta su longitud focal efectiva a 57.8 m. (Véase la figura 25.11.) El telescopio no tiene un ocular porque varios instrumentos, no un ojo humano, registran la luz recopilada. Sin embargo, puede producir imágenes varios miles de veces más grandes de lo que aparecen con el ojo humano sin ayuda. ¿Qué longitud focal de ocular, usado en el sistema de espejos del Hubble, produciría una amplificación de 8.00×10^3 ?

ESTRATEGIA La ecuación 25.8 para amplificación de telescopio se puede resolver para la longitud focal del ocular. La ecuación para encontrar la amplificación angular de un reflector es la misma que para un refractor.

SOLUCIÓN

Resuelva para f_e en la ecuación 25.8 y sustituya valores:

$$m = \frac{f_o}{f_e} \rightarrow f_e = \frac{f_o}{m} = \frac{57.8 \text{ m}}{8.00 \times 10^3} = 7.23 \times 10^{-3} \text{ m}$$

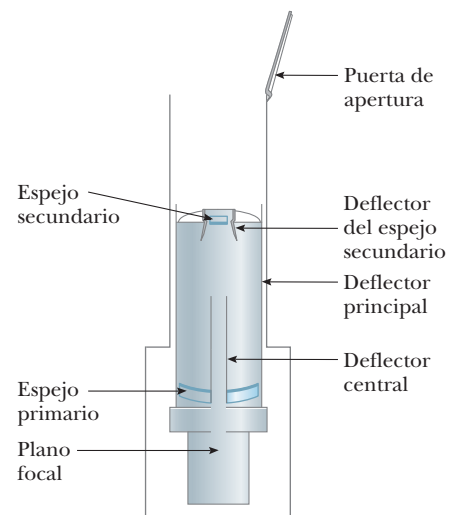


Figura 25.11 Esquema del telescopio espacial Hubble.

COMENTARIOS El poder de recolección de luz de un telescopio y la longitud de la línea base sobre la cual se recopila luz son, de hecho, más importantes que la amplificación de un telescopio, porque estos dos factores contribuyen a la resolución de la imagen. Una imagen de alta resolución siempre se puede amplificar de modo que sus detalles se puedan examinar. Sin embargo, una imagen de baja resolución con frecuencia es borrosa cuando se amplifica. (Véase la sección 25.6.)

PREGUNTA 25.5 ¿Es posible lograr mayor amplificación de un telescopio al aumentar la longitud focal del espejo? ¿Qué efecto tendrá sobre la amplificación el aumento de la longitud focal del ocular?

EJERCICIO 25.5 El telescopio Hale en Monte Palomar tiene una longitud focal de 16.8 m. Encuentre la amplificación del telescopio en conjunto con un ocular que tenga una longitud focal de 5.00 mm.

RESPUESTA 3.36×10^3

25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares

La capacidad de un sistema óptico como el ojo, un microscopio o un telescopio para distinguir entre objetos cercanamente espaciados está limitada debido a la naturaleza ondulatoria de la luz. Para entender esta dificultad, considere la figura 25.12, que muestra dos fuentes de luz lejos de una estrecha rendija de ancho a . Las fuentes se pueden considerar como dos fuentes puntuales S_1 y S_2 que *no* son coherentes. Por ejemplo, podrían ser dos estrellas distantes. Si no ocurre difracción, se observarían dos manchas brillantes distantes (o imágenes) sobre la pantalla a la derecha en la figura. Sin embargo, debido a la difracción, cada fuente forma una imagen como una región central brillante flanqueada por anillos brillantes y oscuros más débiles. Lo que se observa en la pantalla es la suma de dos patrones de difracción, uno de S_1 y el otro de S_2 .

Si las dos fuentes están separadas de modo que sus máximos centrales no se traslapan, como en la figura 25.12a, sus imágenes se pueden distinguir y se dice que están *resueltas*. Sin embargo, si las fuentes están juntas, como en la figura 25.12b, los dos máximos centrales pueden traslaparse y las imágenes *no se resuelven*. Para decidir si dos imágenes están resueltas, con frecuencia se aplica la siguiente condición a sus patrones de difracción:

Cuando el máximo central de una imagen cae sobre el primer mínimo de otra imagen, se dice que las imágenes están apenas resueltas. Esta condición límite de resolución se conoce como **criterio de Rayleigh**.

◀ Criterio de Rayleigh

La figura 25.13 (página 872) muestra patrones de difracción en tres situaciones. Las imágenes apenas están resueltas cuando su separación angular satisface el criterio de Rayleigh (figura 25.13a). Como los objetos se aproximan entre sí, sus imágenes están apenas resueltas

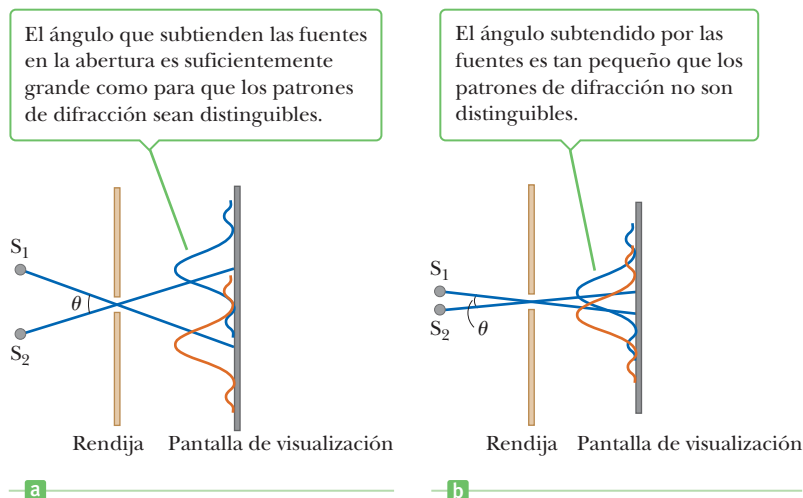


Figura 25.12 Dos fuentes puntuales alejadas de una estrecha rendija producen cada una un patrón de difracción. a) Las fuentes están separadas por un ángulo grande. b) Las fuentes están separadas por un ángulo pequeño. (Observe que los ángulos están enormemente exagerados. El dibujo no está a escala.)

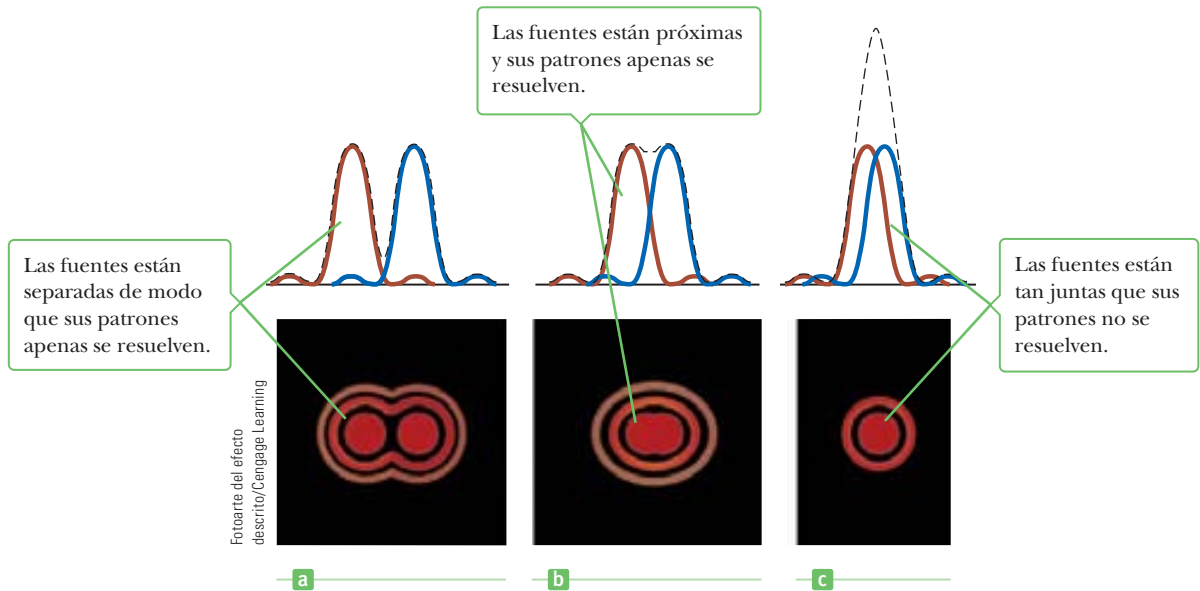


Figura 25.13 Patrones de difracción de dos fuentes puntuales (curvas sólidas) y el patrón resultante (curva punteada) para tres separaciones angulares de las fuentes.

(figura 25.13b). Finalmente, cuando las fuentes están muy cercanas, sus imágenes no están resueltas (figura 25.13c).

A partir del criterio de Rayleigh, se puede determinar la mínima separación angular $\theta_{\text{mín}}$ subtendida por la fuente en la rendija, de modo que las imágenes estarán apenas resueltas. En el capítulo 24 descubrimos que el primer mínimo en un patrón de difracción de una sola rendija ocurre en el ángulo que satisface la relación

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{a}$$

donde a es el ancho de la rendija. De acuerdo con el criterio de Rayleigh, esta expresión proporciona la separación angular más pequeña para la cual las dos imágenes se pueden resolver. Puesto que $\lambda \ll a$ en la mayoría de las situaciones, $\text{sen } \theta$ es pequeño y se puede usar la aproximación $\text{sen } \theta \approx \theta$. Por lo tanto, el ángulo de resolución límite para una rendija de ancho a es

$$\theta_{\text{mín}} \approx \frac{\lambda}{a} \tag{25.9}$$

Ángulo de resolución límite ▶
para una rendija

donde $\theta_{\text{mín}}$ está en radianes. Por lo tanto, el ángulo subtendido por las dos fuentes en la rendija deben ser *mayores* que λ/a si las imágenes se deben resolver.

Muchos sistemas ópticos usan aberturas circulares en vez de rendijas. El patrón de difracción de una abertura circular (figura 25.14) consiste en una región brillante circular rodeada por anillos progresivamente más débiles. Los análisis muestran que el ángulo de resolución límite de la abertura circular es

$$\theta_{\text{mín}} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \tag{25.10}$$

donde D es el diámetro de la abertura. Observe que la ecuación 25.10 es similar a la ecuación 25.9, excepto por el factor 1.22, que surge de un complejo análisis matemático de difracción de una abertura circular.

Examen rápido

25.2 Suponga que observa una estrella binaria con un telescopio y tiene dificultad para resolver las dos estrellas. ¿Qué color de filtro le ayudará a resolver las estrellas?
a) azul b) rojo c) ninguno porque los filtros de color no tienen efecto sobre la resolución.

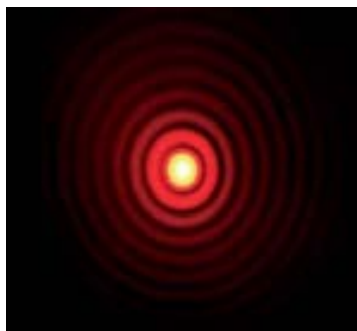


Figura 25.14 El patrón de difracción de una abertura circular consiste en un disco brillante central rodeado por anillos brillantes y oscuros concéntricos.

■ FÍSICA APLICADA 25.2 Ojos de gato BIO

Los ojos de los gatos tienen pupilas verticales en luz débil. De noche, ¿qué resolverían con más éxito los gatos: los faros de un auto distante o las luces separadas verticalmente en el mástil de un bote distante, que tienen la misma separación que los faros del automóvil?

EXPLICACIÓN El ancho de rendija eficaz en la dirección vertical del ojo de un gato es mayor que el de la dirección horizontal. Por ende, tiene más poder de resolución para luces separadas en la dirección vertical y sería más eficaz al resolver las luces del mástil en el bote. ■

■ EJEMPLO 25.6 Resolución de un microscopio

OBJETIVO Estudie las limitaciones en la resolución de un microscopio.

PROBLEMA Para ver un objeto bajo un microscopio se usa luz de sodio con longitud de onda de 589 nm. La abertura del objetivo tiene un diámetro de 0.90 cm. **a)** Encuentre el ángulo de resolución límite para este microscopio. **b)** Con luz visible de cualquier longitud de onda que desee, encuentre el límite máximo de resolución para este microscopio. **c)** Ahora es agua, con índice de refracción 1.33, lo que llena el espacio entre el objeto y el objetivo. ¿Qué efecto tendría el agua sobre el poder de resolución del microscopio, si se usa luz de 589 nm?

ESTRATEGIA Los incisos a) y b) requieren sustitución en la ecuación 25.10. Puesto que la longitud de onda aparece en el numerador, luz violeta, con la longitud de onda visible más corta, da la máxima resolución. En el inciso c) la única diferencia es que la longitud de onda cambia a λ/n , donde n es el índice de refracción del agua.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el ángulo de resolución límite para este microscopio.

Sustituya en la ecuación 25.10 para obtener el ángulo de resolución límite.

$$\begin{aligned}\theta_{\min} &= 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \left(\frac{589 \times 10^{-9} \text{ m}}{0.90 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) \\ &= 8.0 \times 10^{-5} \text{ rad}\end{aligned}$$

b) Calcule el límite de resolución máximo del microscopio.

Para obtener la máxima resolución, sustituya la longitud de onda visible más corta disponible, que es luz violeta, con longitud de onda $4.0 \times 10^2 \text{ nm}$:

$$\begin{aligned}\theta_{\min} &= 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \left(\frac{4.0 \times 10^{-7} \text{ m}}{0.90 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) \\ &= 5.4 \times 10^{-5} \text{ rad}\end{aligned}$$

c) ¿Qué efecto tiene sobre la resolución el agua entre el objeto y el objetivo, con luz de 589 nm?

Calcule la longitud de onda de la luz de sodio en el agua:

$$\lambda_w = \frac{\lambda_a}{n} = \frac{589 \text{ nm}}{1.33} = 443 \text{ nm}$$

Sustituya esta longitud de onda en la ecuación 25.10 para obtener la resolución:

$$\theta_{\min} = 1.22 \left(\frac{443 \times 10^{-9} \text{ m}}{0.90 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) = 6.0 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

COMENTARIOS En cada caso, cualesquiera dos puntos sobre el objeto que subtendan un ángulo menor que el ángulo limitante θ_{\min} en el objetivo no pueden distinguirse en la imagen. En consecuencia, es posible ver una célula pero entonces no pueden verse con claridad estructuras más pequeñas dentro de ella. Obtener un aumento en la resolución es la motivación detrás de colocar una gota de aceite sobre el portaobjetos para ciertas lentes objetivos.

PREGUNTA 25.6 ¿Tener dos ojos en lugar de uno mejora la habilidad humana para resolver objetos distantes? En general, ¿ojos más espaciados aumentan el poder de resolución visual? Explique.

EJERCICIO 25.6 Suponga que es aceite, con $n = 1.50$, lo que llena el espacio entre el objeto y el objetivo para este microscopio. Calcule el ángulo limitante θ_{\min} para luz de sodio con longitud de onda de 589 nm en aire.

RESPUESTA $5.3 \times 10^{-5} \text{ rad}$

EJEMPLO 25.7 Resolución de cráteres en la Luna**OBJETIVO** Calcule la resolución de un telescopio.**PROBLEMA** El telescopio espacial Hubble tiene un apertura de 2.40 m de diámetro. **a)** ¿Cuál es su ángulo de resolución limitante a una longitud de onda de 6.00×10^2 nm? **b)** ¿Cuál es el cráter más pequeño que se podría resolver en la Luna? (La distancia Tierra-Luna es 3.84×10^8 m.)**ESTRATEGIA** Después de sustituir en la ecuación 25.10 para encontrar el ángulo limitante, use $s = r\theta$ para calcular el tamaño mínimo de cráter que se puede resolver.**SOLUCIÓN****a)** ¿Cuál es el ángulo de resolución limitante a una longitud de onda de 6.00×10^2 nm?Sustituya $D = 2.40$ m y $\lambda = 6.00 \times 10^{-7}$ m en la ecuación 25.10:

$$\begin{aligned}\theta_{\min} &= 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \left(\frac{6.00 \times 10^{-7} \text{ m}}{2.40 \text{ m}} \right) \\ &= 3.05 \times 10^{-7} \text{ rad}\end{aligned}$$

b) ¿Cuál es el cráter lunar más pequeño que puede resolver el telescopio espacial Hubble?

Los dos lados opuestos del cráter deben subtender el ángulo mínimo. Use la fórmula de longitud de arco:

$$s = r\theta = (3.84 \times 10^8 \text{ m})(3.05 \times 10^{-7} \text{ rad}) = 117 \text{ m}$$

COMENTARIOS La distancia es tan grande y el ángulo tan pequeño que está justificado usar la longitud de arco de un círculo porque el arco circular está muy cerca de una línea recta. El telescopio espacial Hubble produce muchos gigabytes de datos todos los días desde que comenzó su operación.**PREGUNTA 25.7** ¿La resolución de un telescopio es mejor en el extremo rojo del espectro visible o en el extremo violeta?**EJERCICIO 25.7** El telescopio Hale en Monte Palomar tiene un diámetro de 5.08 m (200 pulg). **a)** Encuentre el ángulo de resolución limitante para una longitud de onda de 6.00×10^2 nm. **b)** Calcule el diámetro de cráter más pequeño que puede resolver el telescopio en la Luna. **c)** Las respuestas parecen mejores que lo que puede lograr el Hubble. ¿Por qué las respuestas no concuerdan?**RESPUESTAS** **a)** 1.44×10^{-7} rad **b)** 55.3 m **c)** Aunque los números son mejores que los del Hubble, el telescopio Hale se enfrenta con los efectos de la turbulencia atmosférica, de modo que el telescopio espacial más pequeño en realidad obtiene resultados mucho mejores.

Es interesante comparar la resolución del telescopio Hale con la de un gran radiotelescopio, como el sistema en Arecibo, Puerto Rico, que tiene un diámetro de 1 000 pies (305 m). Este telescopio detecta ondas de radio a una longitud de onda de 0.75 m. El ángulo mínimo de resolución correspondiente se puede calcular como 3.0×10^{-3} rad (10 min 19 s de arco), que es más de 10 000 veces mayor que el ángulo mínimo calculado para el telescopio Hale.

Con tal resolución relativamente pobre, ¿por qué se considera a Arecibo un valioso instrumento astronómico? A diferencia de sus contrapartes ópticas, Arecibo puede ver a través de nubes de polvo. El centro de la galaxia Vía Láctea es oscuro por tales nubes de polvo, que absorben y dispersan la luz visible. Las ondas de radio fácilmente penetran las nubes, de modo que los radiotelescopios permiten observaciones directas del núcleo galáctico.

Poder de resolución de la rejilla de difracción

La rejilla de difracción que estudió en el capítulo 24 es más útil para realizar mediciones precisas de longitud de onda. Como el prisma, se puede usar para dispersar un espectro en sus componentes. De los dos dispositivos, la rejilla es más adecuada para distinguir entre dos longitudes de onda cercanamente espaciadas. Decimos que el espectrómetro de rejilla

tiene una mayor *resolución* que el espectrómetro de prisma. Si λ_1 y λ_2 son dos longitudes de onda casi iguales entre las que el espectrómetro apenas puede distinguir, el **poder de resolución** de la rejilla se define como

$$R \equiv \frac{\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad [25.11]$$

donde $\lambda \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$ y $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. A partir de esta ecuación, es claro que una rejilla con un poder de resolución alto puede distinguir pequeñas diferencias en longitud de onda. Más aún, si N líneas de la rejilla se iluminan, se puede demostrar que el poder de resolución en la difracción de m -ésimo orden está dado por

$$R = Nm \quad [25.12] \quad \leftarrow \text{Poder de resolución de una rejilla}$$

De este modo, el poder de resolución R aumenta con el número de orden m y es grande para una rejilla con un mayor número de rendijas iluminadas. Observe que, para $m = 0$, $R = 0$, lo cual significa que *todas las longitudes de onda son indistinguibles* para el máximo de orden cero. (Todas las longitudes caen en el mismo punto sobre la pantalla.) Sin embargo, considere el patrón de difracción de segundo orden de una rejilla que tiene 5 000 rayados iluminados por la fuente de luz. El poder de resolución de tal rejilla en segundo orden es $R = 5\,000 \times 2 = 10\,000$. Por lo tanto, la *mínima* separación de longitud de onda entre dos líneas espectrales que apenas se pueden resolver, suponiendo una longitud de onda media de 600 nm, se calcula a partir de la ecuación 25.12 como $\Delta\lambda = \lambda/R = 6 \times 10^{-2}$ nm. Para el máximo principal de tercer orden, $R = 15\,000$ y $\Delta\lambda = 4 \times 10^{-2}$ nm, etcétera.

■ EJEMPLO 25.8 Luz de átomos de sodio

OBJETIVO Encuentre el poder de resolución necesario para distinguir líneas espectrales.

PROBLEMA Dos líneas brillantes en el espectro de sodio tienen longitudes de onda de 589.00 nm y 589.59 nm, respectivamente. a) ¿Cuál debe ser el poder de resolución de una rejilla para distinguir estas longitudes de onda? b) Para resolver estas líneas en el espectro de segundo orden, ¿cuántas líneas de la rejilla se deben iluminar?

ESTRATEGIA Este problema requiere poco más que sustituir en la ecuación 25.11 y 25.12.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuál debe ser el poder de resolución de una rejilla para poder distinguir las longitudes de onda dadas?

Sustituya en la ecuación 25.11 para encontrar R :

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{589.00 \text{ nm}}{589.59 \text{ nm} - 589.00 \text{ nm}} = \frac{589 \text{ nm}}{0.59 \text{ nm}} = 1.0 \times 10^3$$

b) Para resolver estas líneas en el espectro de segundo orden, ¿cuántas líneas de la rejilla se deben iluminar?

Resuelva la ecuación 25.12 para N y sustituya:

$$N = \frac{R}{m} = \frac{1.0 \times 10^3}{2} = 5.0 \times 10^2 \text{ líneas}$$

COMENTARIOS La capacidad para resolver líneas espectrales es particularmente importante en física atómica experimental.

PREGUNTA 25.8 Verdadero o Falso: Si dos rejillas de difracción son idénticas, excepto por el número de líneas, la rejilla con mayor número de líneas tiene el mayor poder de resolución.

EJERCICIO 25.8 Debido a un fenómeno llamado espín electrónico, cuando las líneas de un espectro se examinan a alta resolución, encontramos que cada línea en realidad son dos líneas cercanamente espaciadas llamadas doblete. Un ejemplo es el doblete en el espectro de hidrógeno, que tiene longitudes de onda de 656.272 nm y 656.285 nm. a) ¿Cuál debe ser el poder de resolución de una rejilla, de modo que se puedan distinguir estas longitudes de onda? b) ¿Cuántas líneas de la rejilla se deben iluminar para resolver estas líneas en el espectro de tercer orden?

RESPUESTAS a) 5.0×10^4 b) 1.7×10^4 líneas

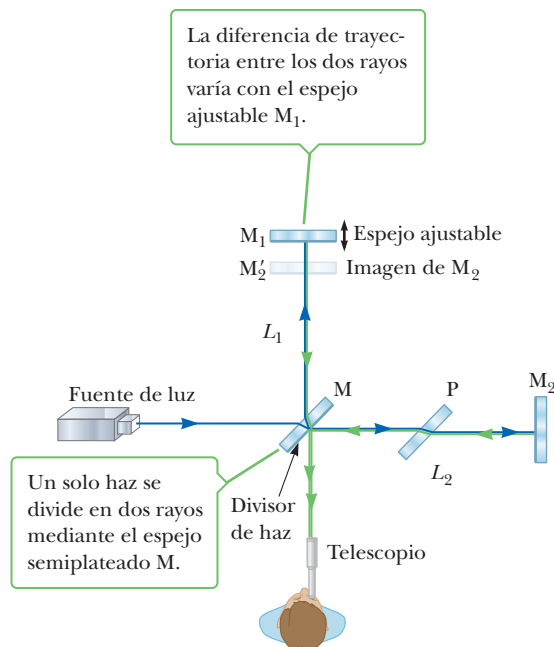
25.7 El interferómetro Michelson

El interferómetro Michelson es un instrumento óptico que tiene gran importancia científica. Inventado por el físico estadounidense A. A. Michelson (1852-1931), es un ingenioso dispositivo que divide un haz de luz en dos partes y luego las recombina para formar un patrón de interferencia. El interferómetro se utiliza para realizar mediciones de longitud precisas.

La figura activa 25.15 es un diagrama esquemático de un interferómetro. Una fuente monocromática proporciona un haz de luz que se divide en dos rayos mediante un espejo semiplatedado M inclinado a un ángulo de 45° en relación con el haz incidente. Un rayo se refleja en forma vertical hacia arriba, hacia el espejo M_1 y el otro rayo se transmite en forma horizontal a través del espejo M hacia el espejo M_2 . Por lo tanto, los dos rayos recorren rutas separadas, L_1 y L_2 . Después de reflejarse de los espejos M_1 y M_2 , los dos rayos eventualmente se recombinan para producir un patrón de interferencia, que se puede ver a través de un telescopio. La placa de vidrio P , igual en grosor al espejo M , se coloca en la trayectoria del rayo horizontal para asegurar que los dos rayos recorren la misma distancia a través del vidrio.

El patrón de interferencia para los dos rayos se determina mediante la diferencia en las longitudes de sus trayectorias. Cuando los dos rayos se ven como se muestra, la imagen de M_2 está en M'_2 , paralela a M_1 . Por lo tanto, el espacio entre M'_2 y M_1 forma el equivalente de una película de aire paralela. El grosor eficaz de la película de aire varía con el uso de un tornillo con rosca fina para mover el espejo M_1 en la dirección indicada por las flechas en la figura 25.15. Si uno de los espejos se inclina ligeramente respecto al otro, la delgada película entre los dos adquiere forma de cuña y se establece un patrón de interferencia que consiste en franjas paralelas, como se describe en el ejemplo 24.4. Ahora suponga que enfoca una de las líneas oscuras con el retículo de un telescopio. Conforme el espejo M_1 se mueve para alargar la trayectoria L_1 , el grosor de la cuña aumenta. Cuando el grosor aumenta por $\lambda/4$, la interferencia destructiva que inicialmente produjo la franja oscura cambia a interferencia constructiva y ahora se observa una franja brillante en la posición del retículo. El término *corrimiento de franja* se usa para describir el cambio en una franja de oscura a clara o de clara a oscura. Cada vez que M_1 se mueve una distancia $\lambda/4$ se forman franjas claras y oscuras sucesivas. La longitud de onda de la luz se puede medir al contar

Figura activa 25.15
Diagrama del interferómetro Michelson.



el número de corrimientos de franja para un desplazamiento medido de M_1 . Por el contrario, si la longitud de onda se conoce con precisión (como con un haz láser), se puede determinar el desplazamiento del espejo hasta dentro de una fracción de la longitud de onda. Puesto que el interferómetro puede medir desplazamientos con precisión, con frecuencia se usa para realizar mediciones enormemente precisas de las dimensiones de componentes mecánicos.

Si los espejos están muy bien alineados, en lugar de inclinados uno respecto del otro, la diferencia de trayectoria difiere ligeramente para diferentes ángulos de visión. Este arreglo resulta en un patrón de interferencia que recuerda los anillos de Newton. El patrón se puede usar en una forma similar a la de los espejos inclinados. Un observador pone atención a la mancha central en el patrón de interferencia. Por ejemplo, suponga que la mancha inicialmente es oscura, lo cual indica que ocurre interferencia destructiva. Si M_1 ahora se mueve a una distancia de $\lambda/4$, esta mancha central cambia a una región clara, que corresponde a un corrimiento de franja.

RESUMEN

25.1 La cámara

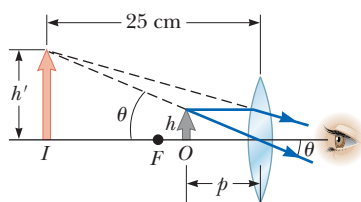
El poder de concentración de luz de una lente con longitud focal f y diámetro D se determina mediante el **número f** , definido como

$$\text{número } f \equiv \frac{f}{D} \quad [25.1]$$

Mientras menor sea el número f de una lente, más brillante será la imagen formada.

25.2 El ojo

La **hiperopia** (hipermetropía) es un defecto del ojo que ocurre cuando el globo ocular es muy corto o cuando el músculo ciliar no puede cambiar la forma del cristalino lo suficiente como para formar una imagen enfocada de manera adecuada. La **miopía** ocurre cuando el ojo es más largo que lo normal o cuando la máxima longitud focal del cristalino es insuficiente para producir una imagen enfocada con claridad sobre la retina.



Un objeto colocado cerca del punto focal de una lente convergente produce una imagen ampliada, que abarca un ángulo de $\theta \approx h'/25$ en el ojo. Tenga en cuenta que en esta situación $q = -25$ cm.

El **poder** de una lente en **dioptrías** es el inverso de la longitud focal en metros.

25.3 El amplificador simple

La **amplificación angular de una lente** se define como

$$m \equiv \frac{\theta}{\theta_0} \quad [25.2]$$

donde θ es el ángulo subtendido por un objeto en el ojo con una lente en uso y θ_0 es el ángulo subtendido por el objeto cuando se coloca en el punto cercano del ojo y no se usa lente. La **máxima amplificación angular de una lente** es

$$m_{\text{máx}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad [25.5]$$

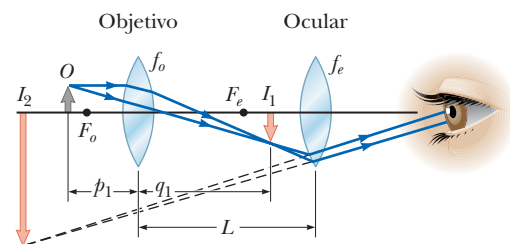
Cuando el ojo está relajado, la amplificación angular es

$$m = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad [25.6]$$

25.4 El microscopio compuesto

La **amplificación global de un microscopio compuesto** de longitud L es el producto de la amplificación producida por el objetivo, con longitud focal f_o , y la amplificación producida por el ocular, con longitud focal f_e :

$$m = -\frac{L}{f_o} \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right) \quad [25.7]$$



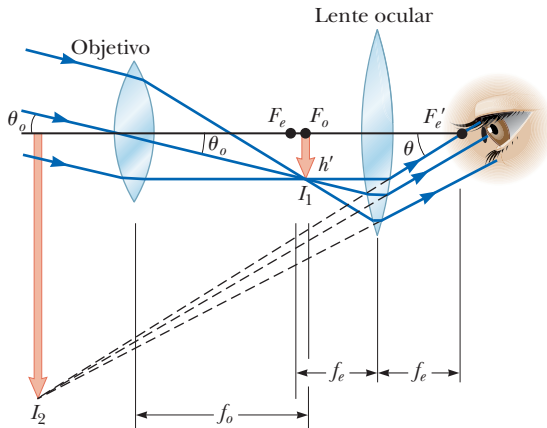
Un diagrama de rayos para un microscopio compuesto, que consiste en un objetivo y un ocular o lente ocular.

25.5 El telescopio

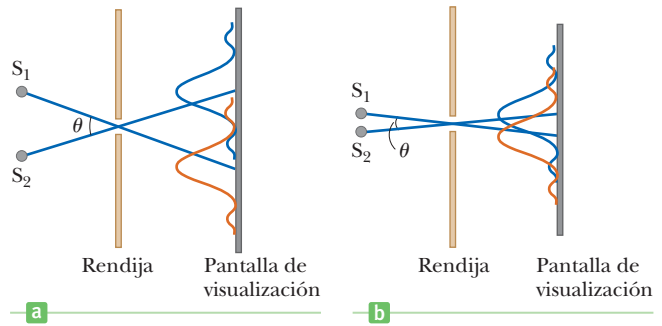
La **amplificación angular de un telescopio** es

$$m = \frac{f_o}{f_e} \quad [25.8]$$

donde f_o es la longitud focal del objetivo y f_e es la longitud focal del ocular.



Un diagrama de rayos para un telescopio de refracción, con el objeto en el infinito.



Dos fuentes puntuales lejos de una estrecha rendija producen cada una un patrón de difracción. a) Las fuentes están separadas por un ángulo grande. b) Las fuentes están separadas por un ángulo pequeño.

El ángulo de resolución limitante de una **abertura circular** es

$$\theta_{\text{mín}} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad [25.10]$$

donde D es el diámetro de la abertura.

Si λ_1 y λ_2 son dos longitudes de onda casi iguales entre las cuales un espectrómetro de rejilla apenas puede distinguir, el **poder de resolución** R de la rejilla se define como

$$R \equiv \frac{\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad [25.11]$$

donde $\lambda \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$ y $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. El **poder de resolución** de una rejilla de difracción en el m -ésimo orden es

$$R = Nm \quad [25.12]$$

donde N es el número de líneas iluminadas en la rejilla.

25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares

Se dice que dos imágenes están **apenas resueltas** cuando el máximo central del patrón de difracción para una imagen cae sobre el primer mínimo de la otra imagen. Esta condición limitante de la resolución se conoce como **criterio de Rayleigh**. El ángulo de resolución limitante para una **rendija** de ancho a es

$$\theta_{\text{mín}} \approx \frac{\lambda}{a} \quad [25.9]$$

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Si el diámetro de apertura de una cámara aumenta por un factor de 3, ¿cómo se afecta la intensidad de la luz que golpea la película? a) Aumenta por un factor de 3. b) Disminuye por un factor de 3. c) Aumenta por un factor de 9. d) Disminuye por un factor de 9. e) Aumentar la apertura no afecta la intensidad.
- Una lente tiene una longitud focal de 25 cm. ¿Cuál es el poder de la lente? a) 2.0 dioptrías b) 4.0 dioptrías c) 6.0 dioptrías d) 8.0 dioptrías e) ninguno de éstos.
- ¿Por qué es ventajoso usar un objetivo de gran diámetro en un telescopio? a) Difracta la luz de manera más eficaz que el objetivo de diámetro más pequeño. b) Aumenta su amplificación. c) Aumenta su resolución. d) Permite ver más objetos en el campo de visión. e) Refleja longitudes de onda indeseadas.
- BIO** Si los ojos de una mujer son más largos de lo normal, ¿cómo se afecta su visión y cómo se puede corregir? a) La mujer es hipermetrope y su visión se puede corregir con una lente divergente. b) La mujer es miope y su visión se puede corregir con una lente divergente. c) La mujer es hipermetrope y su visión se puede corregir con una lente convergente. d) La mujer es miope y su visión se puede corregir con una lente convergente. e) La visión de la mujer no se puede corregir.
- BIO** Si un hombre tiene ojos que son más cortos de lo normal, ¿cómo se afecta su visión y cómo se puede corregir? a) El hombre es hipermetrope y su visión se puede corregir con una lente divergente. b) El hombre es miope y su visión se puede corregir con una lente divergente. c) El hombre es hipermetrope y su visión se puede corregir

- con una lente convergente. d) El hombre es miope y su visión se puede corregir con una lente convergente. e) La visión del hombre no se puede corregir.
- BIO** El punto cercano del ojo de un individuo dado es 55 cm. ¿De qué longitud focal se deben prescribir lentes correctivos para que un objeto se vea con claridad cuando se coloca a 25 cm enfrente del ojo? a) -25 cm b) 17 cm c) 46 cm d) 32 cm e) 54 cm.
 - Un telescopio se puede usar como cámara si la película se coloca en la posición de la imagen del objetivo (o espejo); de modo que el objetivo se convierte en la lente de la cámara. Si la lente objetivo, con longitud focal de 2.00 m, de un telescopio se usa para fotografiar la imagen de dos estrellas que están separadas 20.0 mm sobre la película, ¿cuál es la separación angular de las dos estrellas? a) 0.010° b) 0.10° c) 0.286° d) 0.573° e) 0.353° .
 - Un microscopio compuesto tiene lentes objetivo y ocular con longitudes focales de 0.80 cm y 4.0 cm, respectivamente. Si la longitud del microscopio es 15 cm, ¿cuál es la amplificación aproximada del microscopio? a) 3.2 b) 6.3 c) 48 d) 120 e) 160.
 - Una rejilla de difracción debe distinguir longitudes de onda que están separadas 0.1 nm en la banda visible. ¿Qué poder de resolución mínimo debe tener la rejilla? a) 3000 b) 4000 c) 5000 d) 6000 e) 7000.
 - Estime el tamaño de apertura requerido para que un telescopio resuelva dos estrellas que están a 200 años luz (a-l) de la Tierra y orbitan dentro de 10^{-5} a-l una de otra. a) 10 cm b) 1 m c) 10 m d) 50 m e) 100 m.
 - A lo lejos, observe las luces de un automóvil, pero se distinguen como el faro de una motocicleta. Supongamos que las luces del automóvil ahora cambian de luz de cruce (bajas) a luces de carretera (altas) por lo que la intensidad de la luz que recibe se vuelve tres veces mayor. Por otra parte, desprecie cualquier cambio en las pupilas de sus ojos. Entonces, ¿qué le sucede a su capacidad para resolver las dos fuentes de luz? a) Se incrementa en un factor de 9. b) Se incrementa en un factor de 3. c) Sigue siendo el mismo. d) Se vuelve buena en un tercio. e) Se vuelve buena en un noveno.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una lente se usa para examinar un objeto a través de una habitación. ¿La lente probablemente se está usando como un amplificador simple?
- Un rayo láser incide con un ángulo pequeño en una regla horizontal de calculista mecánico que tiene una escala finamente calibrada. Las resoluciones grabadas en la escala dan lugar a un patrón de difracción en una pantalla vertical. Discuta cómo se puede utilizar esta técnica para obtener una medida de la longitud de onda de la luz láser.
- BIO** El nervio óptico y el cerebro invierten la imagen formada sobre la retina. ¿Por qué no vemos todo de cabeza?
- Suponga que observa el patrón de interferencia formado por un interferómetro Michelson en un laboratorio y un colega bromista sostiene un cerillo encendido en la trayectoria de la luz de uno de los brazos del interferómetro. ¿Este cerillo tendrá algún efecto sobre el patrón de interferencia?
- Si quiere examinar el detalle fino de un objeto con una lupa de +20.0 dioptrías de poder, ¿dónde debe colocar el objeto de modo que observe una imagen ampliada del mismo?
- BIO** Compare y contraste el ojo y una cámara. ¿Qué partes de la cámara corresponden al iris, la retina y la córnea del ojo?
- Si quiere usar una lente convergente para encender fuego a un trozo de papel, ¿por qué la fuente de luz debe estar más lejos de la lente que su punto focal?
- Los telescopios grandes por lo general reflejan en lugar de refractar. Mencione algunas razones para esta elección.
- Explique por qué teóricamente es imposible ver un objeto tan pequeño como un átomo, sin importar la calidad del microscopio de luz que se utilice.
- ¿Qué es más importante en el uso de una unidad de flash de cámara, la intensidad de la luz (la energía por unidad de área por unidad de tiempo), o el producto de la intensidad y el tiempo del flash, suponiendo que el tiempo es menor que la velocidad de obturación?
- BIO** Un paciente tiene un punto cercano de 1.25 m. ¿Es miope o hipermetrope? ¿La lente correctiva debe ser convergente o divergente?
- Una lente con cierta potencia se usa como amplificador simple. Si la potencia de la lente se duplica, ¿la amplificación angular aumenta o disminuye?
- El láser produce un haz de unos pocos milímetros de ancho, con una intensidad uniforme en toda su anchura. Un cabello se estira verticalmente en la parte delantera del láser para cruzar el haz. a) ¿Cuál es el patrón de difracción que produce en una pantalla distante relacionada con la de una rendija vertical de igual anchura en el cabello? b) ¿Cómo puede determinar el ancho del cabello a partir de las mediciones de su patrón de difracción?
- BIO** Durante una cirugía ocular LASIK (queratomileusis *in situ* asistida por láser), la forma de la córnea se modifica al vaporizar parte de su material. Si la cirugía se realiza para corregir la miopía, ¿qué forma debe darse a la córnea?

PROBLEMAS

ENHANCED **WebAssign** Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
 - 3. denota problema de alto reto
1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

25.1 La cámara

1. Una lente tiene una longitud focal de 28 cm y un diámetro de 4.0 cm. ¿Cuál es el número f de la lente?
2. Cierta cámara tiene números f que varían de 1.2 a 22. Si la longitud focal de la lente es 55 mm, ¿cuál es el rango de diámetros de apertura para la cámara?
3. La imagen fotográfica de un edificio mide 0.092 0 m de alto. La imagen fue hecha con una lente con longitud focal de 52.0 mm. Si la lente estaba a 100 m del edificio cuando se tomó la fotografía, determine la altura del edificio.
4. El área de imagen de una típica diapositiva de 35 mm es de 23.5 por 35.0 mm. Si la lente de una cámara tiene una longitud focal de 55.0 mm y forma una imagen de la constelación Orión, que abarca 20° , ¿la imagen completa encajará en una diapositiva de 35 mm?
5. Una cámara se usa con la exposición correcta en un número $f/4$ y una velocidad de obturador de $1/15$ s. Además de los números f que figuran en la sección 25.1, esta cámara tiene números $f/1, f/1.4, f/2$. Para fotografiar un sujeto en movimiento rápido, la velocidad de obturación se cambia a $1/125$ s. Encuentre el nuevo número f de ajuste necesario en esta cámara para mantener una exposición satisfactoria.
6. a) Use argumentos conceptuales para demostrar que la intensidad de la luz (energía por unidad de área por unidad de tiempo) que llega a la película en una cámara es proporcional al cuadrado del recíproco del número f como

$$I \propto \frac{1}{(f/D)^2}$$

- b) El tiempo de exposición correcto para una cámara establecida a $f/1.8$ es $(1/500)$ s. Calcule el tiempo de exposición correcto si el número f cambia a $f/4$ bajo las mismas condiciones de iluminación. *Nota:* “ $f/4$ ” en una cámara significa “un número f de 4”.
7. Cierta tipo de película requiere un tiempo de exposición de 0.010 s con una configuración de lente $f/11$. Otro tipo de película requiere el doble de energía luminosa para producir el mismo nivel de exposición. ¿Qué número f necesita el segundo tipo de película con el tiempo de exposición 0.010 s?
8. La lente de cierta cámara tiene una longitud focal de 175 mm. Su posición se puede ajustar para producir imágenes cuando la lente está entre 180 y 210 mm del plano de la película. ¿Sobre cuál rango de distancias de objeto es útil la lente?

25.2 El ojo

9. BIO El punto cercano del ojo de una persona es 60.0 cm. Para ver objetos con claridad a una distancia de 25.0 cm, ¿cuál debe ser la longitud focal y la potencia de la lente correctiva apropiada? (Desprecie la distancia de la lente al ojo.)
10. BIO PG Un paciente no puede ver objetos más cercanos de 40.0 cm y quiere ver con claridad objetos que estén a 20.0 cm de su ojo. a) ¿El paciente es miope o hipermetrope? b) Si la distancia ojo-lente es 2.00 cm, ¿cuál es la mínima distancia de objeto p desde la lente? c) ¿Qué posición de imagen respecto a la lente permitirá al paciente ver el objeto? d) ¿La imagen es real o virtual? e) ¿La distancia de imagen q es positiva o negativa? f) Calcule la longitud focal requerida. g) Encuentre la potencia de la lente en dioptrías. h) Si se debe prescribir una lente de contacto, encuentre p, q y f , y el poder de la lente.
11. BIO M Los límites de acomodación para los ojos del *Miope* Nick son 18.0 y 80.0 cm. Cuando usa sus gafas, puede ver objetos lejanos claramente. ¿A qué distancia mínima puede ver objetos con claridad?
12. BIO El punto cercano de cierto niño es 10.0 cm; su punto lejano (con ojos relajados) es 125 cm. El cristalino de cada ojo está a 2.00 cm de la retina. a) ¿Entre cuáles límites, medidos en dioptrías, varía la potencia de esta combinación cristalino-córnea? b) Calcule la potencia de las gafas que debe usar el niño para visión a distancia relajada. ¿La lente es convergente o divergente?
13. BIO Un individuo es miope; su punto cercano es 13.0 cm y su punto lejano es 50.0 cm. a) ¿Qué poder de lente necesita para corregir su miopía? b) Cuando usa las lentes, ¿cuál es el punto cercano de esta persona?
14. BIO C/C Un paciente tiene un punto cercano de 45.0 cm y punto lejano de 85.0 cm. a) ¿Una sola lente puede corregir la visión del paciente? Explique las opciones del paciente. b) Calcule la potencia de lente necesaria para corregir el punto cercano de modo que el paciente pueda ver objetos a 25.0 cm de distancia. Desprecie la distancia ojo-lente. c) Calcule la potencia de la lente necesaria para corregir el punto lejano del paciente y de nuevo desprecie la distancia ojo-lente.
15. BIO Un cristalino artificial se implanta en el ojo de una persona para sustituir un cristalino enfermo. La distancia entre el cristalino artificial y la retina es 2.80 cm. En

ausencia del cristalino, la imagen de un objeto distante (formada por refracción en la córnea) cae 5.33 cm detrás de la retina. El cristalino se diseña para poner la imagen del objeto distante en la retina. ¿Cuál es el poder del cristalino implantado? *Sugerencia:* Considere la imagen formada por la córnea como un objeto virtual.

16. **BIO** Una persona debe usar bifocales. Ella puede ver muy bien cuando el objeto está entre 30 cm y 1.5 m del ojo. a) Las porciones superiores de los bifocales (figura P25.16) se deben diseñar para permitirle ver objetos distantes con claridad. ¿Qué poder deben tener? b) Las porciones inferiores de los bifocales deben permitirle ver objetos cómodamente a 25 cm. ¿Qué poder deben tener?

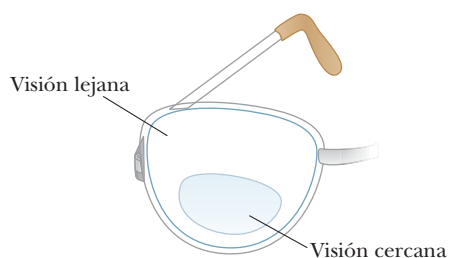


Figura P25.16

17. **BIO** Una mujer miope no puede ver objetos con claridad más allá de 40.0 cm (su punto lejano). Si no tiene astigmatismo y se prescriben lentes de contacto, ¿qué poder y tipo de lente se requieren para corregir su visión?
18. **BIO C/C** Una persona ve con claridad al usar gafas que tienen una potencia de -4.00 dioptrías cuando las lentes están 2.00 cm enfrente de los ojos. a) ¿Cuál es la longitud focal de la lente? b) ¿La persona es miope o hipermetrope? c) Si la persona quiere cambiar a lentes de contacto colocados directamente sobre los ojos, ¿qué poder de lente debe prescribirse?

25.3 El amplificador simple

19. Un coleccionista de estampillas usa una lente con longitud focal de 7.5 cm como un amplificador simple (lupa). La imagen virtual se produce en el punto cercano normal (25 cm). a) ¿Cuán lejos de la lente debe colocarse la estampilla? b) ¿Cuál es la amplificación angular esperada?
20. Una lente que tiene una longitud focal de 5.00 cm se utiliza como una lupa. a) Para obtener la ampliación máxima y una imagen que pueda ser vista claramente por un ojo normal, ¿dónde se debe colocar el objeto? b) ¿Cuál es el aumento angular?
21. Un estudiante de biología usa un amplificador simple (lupa) para examinar las características estructurales del ala de un insecto. El ala se sostiene 3.50 cm enfrente de la lente y la imagen se forma a 25.0 cm del ojo. a) ¿Cuál es la longitud focal de la lente? b) ¿Qué amplificación angular se logra?

22. Una lente de joyero, con longitud focal de 5.0 cm se usa como lupa. Con la lente sostenida cerca del ojo, determine a) la amplificación angular cuando el objeto está en el punto focal de la lente y b) la amplificación angular cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo (25 cm). c) ¿Cuál es la distancia del objeto que produce la máxima amplificación?
23. Una hoja de longitud h se coloca a 71.0 cm enfrente de una lente convergente con una longitud focal de 39.0 cm. Un observador ve la imagen de la hoja desde una posición 1.26 m detrás de la lente, como se muestra en la figura P25.23. a) ¿Cuál es la magnitud de la amplificación lateral (la razón del tamaño de la imagen al tamaño del objeto) producida por la lente? b) ¿Qué amplificación angular se logra al ver la imagen de la hoja en lugar de ver la hoja directamente?

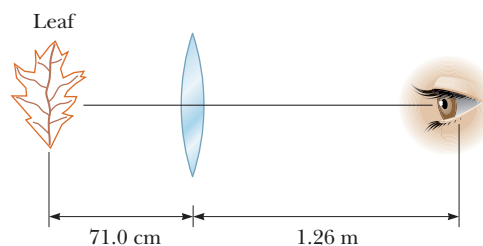


Figura P25.23

24. a) ¿Cuál es la amplificación angular máxima de unas gafas con una longitud focal de 18.0 cm cuando se utilizan como una lupa? b) ¿Cuál es la amplificación de esta lente cuando el ojo se relaja?

25.4 El microscopio compuesto

25.5 El telescopio

25. La amplificación global deseada de un microscopio compuesto es $140\times$. El objetivo solo produce una amplificación lateral de $12\times$. Determine la longitud focal requerida del ocular.
26. La distancia entre el ocular y el objetivo en cierto microscopio compuesto es 20.0 cm. La longitud focal del objetivo es 0.500 cm y la del ocular es 1.70 cm. Encuentre la amplificación global del microscopio.
27. Encuentre la ampliación de un telescopio que usa un objetivo de 2.75 dioptrías y un ocular de 35.0 dioptrías.
28. **BIO** Un microscopio tiene un objetivo con una longitud focal de 16.22 mm y un ocular con una longitud focal de 9.50 mm. Con la longitud del barril establecida en 29.0 cm, el diámetro de la imagen de un eritrocito subtendiendo un ángulo de 1.43 mrad con el ojo. Si la distancia de la imagen final es 29.0 cm desde el ocular, ¿cuál es el diámetro real del eritrocito? *Sugerencia:* Para resolver esta cuestión, vuelva a los fundamentos y use la ecuación de la lente delgada.
29. Un cierto telescopio tiene un espejo objetivo con un diámetro de apertura de 200 mm y una longitud focal de 2000 mm. Se captura la imagen de una nebulosa sobre

- una película fotográfica en su foco primario con un tiempo de exposición de 1.50 min. Para producir la misma energía luminosa por unidad de área en la película, ¿cuál es el tiempo de exposición necesario para fotografiar la misma nebulosa con un telescopio más pequeño que tiene un objetivo con un diámetro de 60.0 mm y una longitud focal de 900 mm?
30. **S** a) Encuentre una ecuación para la longitud L de un telescopio refractor en términos de la longitud focal del objetivo f_o y la amplificación m . b) Una perilla ajusta el ocular adelante y atrás. Suponga que el telescopio está en foco con un ocular que da una amplificación de 50.0. ¿A qué distancia se debe ajustar el ocular cuando éste se sustituye, con una amplificación resultante de 1.00×10^2 ? ¿El ocular se debe ajustar hacia atrás o hacia adelante? Suponga que el objetivo tiene una longitud focal de 2.00 m.
31. Suponga que un telescopio astronómico está siendo diseñado para tener un aumento angular de 34.0. Si la distancia focal de la lente del objetivo que se utiliza es 86.0 cm, halle a) la longitud focal requerida del ocular y b) la distancia entre las dos lentes para vista relajada. *Sugerencia:* Para un ojo relajado, la imagen formada por la lente del objetivo está en el punto focal del ocular.
32. Cierta telescopio tiene un objetivo con longitud focal de 1 500 cm. Si la Luna se usa como objeto, una imagen de 1.0 cm de largo formada por el objetivo corresponde ¿a qué distancia, en millas, en la Luna? Suponga 3.8×10^8 m para la distancia Tierra-Luna.
33. **S** Los astrónomos con frecuencia toman fotografías con el objetivo o espejo de un telescopio solo, sin un ocular. a) Demuestre que el tamaño de la imagen h' para un telescopio que se usa de esta forma está dada por $h' = fh/(f - p)$, donde h es el tamaño del objeto, f la longitud focal del objetivo y p la distancia del objeto. b) Simplifique la expresión en el inciso a) si la distancia del objeto es mucho mayor que la longitud focal del objetivo. c) La “envergadura” de la Estación Espacial Internacional es 108.6 m, el ancho global de su configuración de panel solar. Encuentre el ancho de la imagen formada por el objetivo de un telescopio con longitud focal de 4.00 m, cuando orbita a una altitud de 407 km.
34. **BIO** Un viejo marino naufraga en una isla desierta, pero logra salvar sus gafas. La lente para un ojo tiene una potencia de +1.20 dioptrías y la otra lente una potencia de +9.00 dioptrías. a) ¿Cuál es el poder de amplificación del telescopio que puede construir con estas lentes? b) ¿Cuán separadas están las lentes cuando el telescopio se ajusta para mínima fatiga visual?
35. **M** Una persona decide usar un viejo par de gafas para fabricar algunos instrumentos ópticos. Élla sabe que el punto cercano en su ojo izquierdo es 50.0 cm y el punto cercano en su ojo derecho es 100 cm. a) ¿Cuál es la máxima amplificación angular que puede producir en un telescopio? b) Si coloca las lentes separadas 10.0 cm, ¿cuál es la máxima amplificación global que puede producir en un microscopio? *Sugerencia:* Regrese a los fundamentos y use la ecuación de lente delgada para resolver el inciso b).
36. **CIC** Galileo diseñó un telescopio terrestre simple que produce una imagen derecha. Consiste en un objetivo convergente y un ocular divergente en lados opuestos del tubo del telescopio. Para objetos distantes, la longitud del tubo es la longitud focal del objetivo menos el valor absoluto de la longitud focal del ocular. a) ¿El usuario del telescopio ve una imagen real o virtual? b) ¿Dónde está la imagen final? c) Si un telescopio se debe construir con un tubo de 10.0 cm de longitud y una amplificación de 3.00, ¿cuáles son las longitudes focales del objetivo y el ocular?

25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares

37. Una lente convergente con un diámetro de 30.0 cm forma una imagen de un satélite que pasa justo por encima de ella. El satélite tiene dos luces verdes (longitud de onda de 500 nm) separadas 1.00 m. Si las luces apenas se pueden resolver de acuerdo con el criterio de Rayleigh, ¿cuál es la altitud del satélite?
38. Mientras vuela a una altura de 9.50 km, observa por la ventana varios objetos en el suelo. Si su capacidad de distinguir dos objetos sólo está limitada por la difracción, encuentre la menor distancia entre dos objetos en el suelo que se distinguen. Suponga que su pupila tiene un diámetro de 4.0 mm y tomar de $\lambda = 575$ nm.
39. **M** Para aumentar el poder de resolución de un microscopio, el objeto y el objetivo se sumergen en aceite ($n = 1.5$). Si el ángulo de resolución limitante sin el aceite es $0.60 \mu\text{rad}$, ¿cuál es el ángulo de resolución limitante con el aceite? *Sugerencia:* El aceite cambia la longitud de onda de la luz.
40. **BIO** a) Calcule el ángulo de resolución limitante para el ojo, suponiendo un diámetro de pupila de 2.00 mm, una longitud de onda de 500 nm *en aire* y un índice de refracción para el ojo de 1.33. b) ¿Cuál es la máxima distancia desde el ojo a la cual se pueden resolver dos puntos separados 1.00 cm?
41. Un vehículo con faros separados por 2.00 m se aproxima a un observador que sostiene un detector infrarrojo sensible a la radiación con longitud de onda de 885 nm. ¿Qué diámetro de apertura se requiere en el detector si los dos faros se deben resolver a una distancia de 10.0 km?
42. Dos estrellas situadas a 23 años luz de la Tierra apenas se resuelven utilizando un telescopio reflector con un espejo de 68 cm de diámetro. Suponiendo que $\lambda = 575$ nm y que la resolución está limitada sólo por la difracción, encuentre la distancia entre las estrellas.
43. Suponga que un telescopio de 5.00 m de diámetro se construye en la Luna, donde la ausencia de distorsión atmosférica permitiría excelente visualización. Si las observaciones se realizan usando luz de 500 nm, ¿qué separación mínima entre dos objetos apenas se podría resolver en Marte a máximo acercamiento (cuando Marte está a 8.0×10^7 km de la Luna)?

44. Un satélite espía orbita la Tierra a una altitud de 200 km y realiza topografía con una cámara telescópica especial de alta resolución que tiene un diámetro de lente de 35 cm. Si la resolución angular de esta cámara está limitada por difracción, estime la separación de dos pequeños objetos sobre la superficie de la Tierra que apenas se resuelvan en luz amarilla-verde ($\lambda = 550 \text{ nm}$).

45. Una rejilla de 15.0 cm de largo tiene 6000 rendijas por centímetro. ¿Con esta rejilla se podrían separar dos líneas con longitudes de onda de 600.000 nm y 600.003 nm? Explique.

46. La línea H_α en hidrógeno tiene una longitud de onda de 656.20 nm. Esta línea difiere en longitud de onda de la correspondiente línea espectral en deuterio (el pesado isótopo estable del hidrógeno) por 0.18 nm. a) Determine el número mínimo de líneas que debe tener una rejilla para resolver estas dos longitudes de onda en el primer orden. b) Repita el inciso a) para el segundo orden.

25.7 El interferómetro Michelson

47. Luz con longitud de onda de 550 nm se usa para calibrar un interferómetro Michelson. Con el uso de un tornillo micrométrico, la plataforma sobre la cual se monta un espejo se mueve 0.180 mm. ¿Cuántos corrimientos de franja se cuentan?

48. **CC** Luz monocromática se envía a un interferómetro Michelson. El espejo móvil se desplaza 0.382 mm, lo que hace que la mancha central en el patrón del interferómetro cambie de brillante a oscuro y de vuelta a brillante $N = 1\,700$ veces. a) Determine la longitud de onda de la luz. ¿De qué color es? b) Si se usa luz roja monocromática y el espejo se mueve la misma distancia, ¿ N debe ser más grande o más pequeño? Explique.

49. **BIO** Un interferómetro se usa para medir la longitud de una bacteria. La longitud de onda de la luz utilizada es 650 nm. Conforme un brazo del interferómetro se mueve de un extremo de la célula al otro, se cuentan 310 corrimientos de franja. ¿Cuán larga es la bacteria?

50. El espejo M_1 en la figura activa 25.15 se desplaza una distancia ΔL . Durante este desplazamiento, se cuentan 250 corrimientos de franja. La luz que se usa tiene una longitud de onda de 632.8 nm. Calcule el desplazamiento ΔL .

51. Una delgada hoja de material transparente tiene un índice de refracción de 1.40 y 15.0 μm de grueso. Cuando se inserta en la trayectoria de luz a lo largo del brazo de un interferómetro, ¿cuántos corrimientos de franja ocurren en el patrón? Suponga que la longitud de onda (en el vacío) de la luz utilizada es 600 nm. *Sugerencia:* La longitud de onda cambiará dentro del material.

52. **M** El interferómetro Michelson se puede usar para medir el índice de refracción de un gas al sustituir un tubo transparente evacuado en la trayectoria de luz a lo largo de un brazo del dispositivo. Corrimientos de franja ocurren conforme el gas se agrega lentamente al tubo. Suponga que se usa luz de 600 nm, que el tubo tiene 5.00 cm de largo y que ocurren 160 corrimientos de franja conforme la

presión del gas en el tubo aumenta a presión atmosférica. ¿Cuál es el índice de refracción del gas? *Sugerencia:* Los corrimientos de franja ocurren porque la longitud de onda de la luz cambia dentro del tubo lleno con gas.

Problemas adicionales

53. El telescopio refractor Yerkes tiene un objetivo de 1.00 m de diámetro, con longitud focal de 20.0 m. Suponga que se usa con un ocular de 2.50 cm de longitud focal. a) Determine la amplificación del planeta Marte como se ve a través del telescopio. b) Los casquetes polares marcianos que se observan, ¿están derechos o de cabeza?

54. Estime el ángulo mínimo subtendido en el ojo de un halcón que vuela a una altura de 50 m necesario para reconocer un ratón en el suelo.

55. La norma estadounidense de imagen de la televisión analógica (no HDTV), también conocida como NTSC, se compone de aproximadamente 485 líneas horizontales visibles de intensidad variable de luz. Suponga que su capacidad para resolver las líneas está limitada sólo por el criterio de Rayleigh, las pupilas de sus ojos tienen 5.00 mm de diámetro y la longitud de onda media de la luz procedente de la pantalla es de 550 nm. Calcule la razón de la distancia mínima de la visión de la dimensión vertical de la imagen de tal manera que usted no sea capaz de resolver las líneas.

56. **BIO** Una persona con un ojo miope tiene puntos cercano y lejano de 16 cm y 25 cm, respectivamente. a) Suponiendo que una lente se coloca a 2.0 cm del ojo, ¿qué poder debe tener la lente para corregir esta condición? b) Suponga que lentes de contacto colocados sobre la córnea se usan para corregir la visión de la persona. ¿Cuál es el poder requerido de la lente en este caso y cuál es el nuevo punto cercano? *Sugerencia:* La lente de contacto y la lente de gafas requieren poderes ligeramente distintos porque están a diferentes distancias del ojo.

57. **BIO** El punto cercano de un ojo es 75.0 cm. a) ¿Cuál debe ser la potencia de una lente correctiva que se prescribe para permitir al ojo ver un objeto muy bien a 25.0 cm? b) Si, al usar la lente correctiva, la persona puede ver un objeto claramente a 26.0 cm pero no a 25.0 cm, ¿en cuántas dioptrías el pulido de la lente pierde la prescripción?

58. **BIO** Si un globo ocular típico mide 2.00 cm de largo y tiene una abertura de pupila que puede abarcar desde aproximadamente 2.00 hasta 6.00 mm, ¿cuáles son a) la longitud focal del ojo cuando se enfoca sobre objetos a 1.00 m de distancia, b) el menor número f del ojo cuando se enfoca sobre objetos a 1.00 m de distancia, y c) el mayor número f del ojo cuando se enfoca sobre objetos a 1.00 m de distancia?

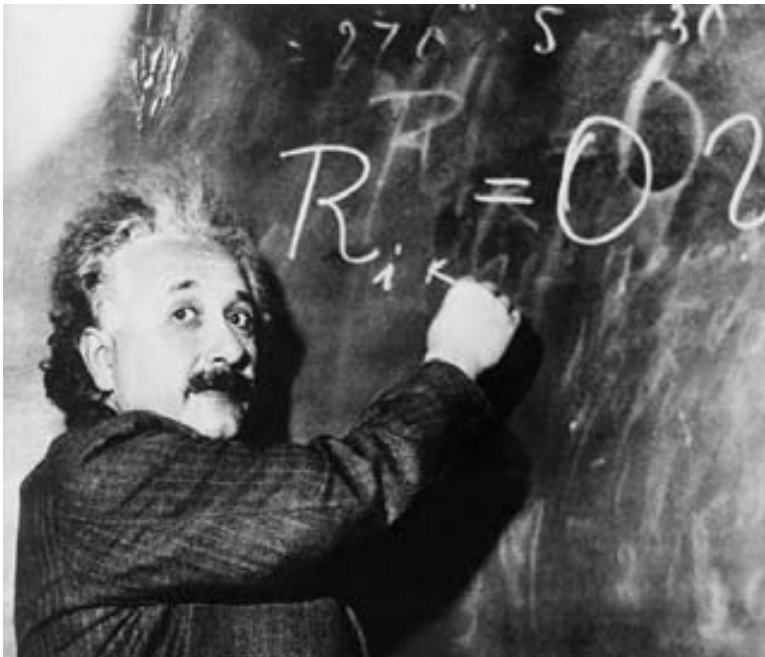
59. **BIO M** Un cristalino deteriorado por cataratas en un ojo se puede remover quirúrgicamente y sustituir con un cristalino artificial. La longitud focal requerida por el nuevo cristalino se determina mediante la distancia cristalino-retina, que se mide con un dispositivo parecido a un sonar y por el requisito de que el implante proporcione distancia de visión correcta. a) Si la distancia desde el

cristalino hasta la retina es 22.4 mm, calcule la potencia del cristalino implantado en dioptrías. b) Dado que no hay acomodación y que el implante permite distancia de visión correcta, se debe usar una lente correctiva para trabajo cercano o lectura. Suponga una distancia de lectura de 33.0 cm y calcule la potencia de la lente en las gafas de lectura.

60. **BIO** Si el humor acuoso del ojo tiene un índice de refracción de 1.34 y la distancia desde el vértice de la córnea a la retina es 2.00 cm, ¿cuál es el radio de curvatura de la córnea para el cual los objetos distantes se enfocarían sobre la retina? (Por simplicidad, suponga que toda la refracción ocurre en el humor acuoso.)
61. Un boy scout enciende una fogata al usar una lente de sus gafas para enfocar luz solar sobre hojarasca a 5.0 cm

de la lente. El boy scout tiene un punto cercano de 15 cm. Cuando la lente se usa como amplificador simple, a) ¿cuál es la máxima amplificación que se puede lograr y b) cuál es la amplificación cuando el ojo está relajado? *Precaución:* Las ecuaciones deducidas en el texto para un amplificador simple suponen un ojo “normal”.

62. Un telescopio de laboratorio (astronómico) se usa para ver una regla que está a 300 cm del objetivo, que tiene una longitud focal de 20.0 cm; el ocular tiene una longitud focal de 2.00 cm. Calcule la amplificación angular cuando el telescopio se ajusta para mínima fatiga visual. *Nota:* El objeto no está en el infinito, así que la expresión simple $m = f_o/f_e$ no es suficientemente precisa para este problema. Además, suponga ángulos pequeños, de modo que $\tan \theta \approx \theta$.



© Bettmann/Corbis

Albert Einstein revolucionó la física moderna. Explicó el movimiento aleatorio de los granos de polen, lo que probó la existencia de los átomos y el efecto fotoeléctrico, que demostró que la luz era tanto una partícula como una onda. Con Satyendra Nath Bose predijo una nueva forma de materia, el condensado Bose-Einstein, que sólo recientemente se descubrió en el laboratorio. Su teoría de la relatividad especial aclaró los fundamentos de espacio y tiempo, y estableció una relación clave entre masa y energía. Su teoría de gravitación, la relatividad general, condujo a una comprensión más profunda del movimiento planetario, la estructura y evolución de las estrellas, y la expansión del Universo. La ecuación en esta fotografía, traducida libremente, señala que la curvatura promedio del espacio-tiempo es cero en el espacio vacío.

Relatividad

26

La mayor parte de sus experiencias y observaciones cotidianas tienen que ver con objetos que se mueven con velocidades mucho menores que la velocidad de la luz. La mecánica newtoniana se formuló para describir el movimiento de tales objetos y su formalismo es bastante exitoso para describir un amplio rango de fenómenos que ocurren a bajas velocidades. Sin embargo, fracasa cuando se aplica a partículas que tienen velocidades que se aproximan a la de la luz.

Experimentalmente, por ejemplo, es posible acelerar un electrón a una velocidad de $0.99c$ (donde c es la velocidad de la luz) con el uso de una diferencia de potencial de muchos millones de volts. De acuerdo con la mecánica newtoniana, si la diferencia de potencial aumenta por un factor de 4, la energía cinética del electrón es cuatro veces mayor y su velocidad debe duplicarse a $1.98c$. Sin embargo, los experimentos demuestran que la velocidad del electrón, así como la velocidad de cualquiera otra partícula que tenga masa, siempre permanece *menor* que la velocidad de la luz, sin importar el tamaño del voltaje acelerador.

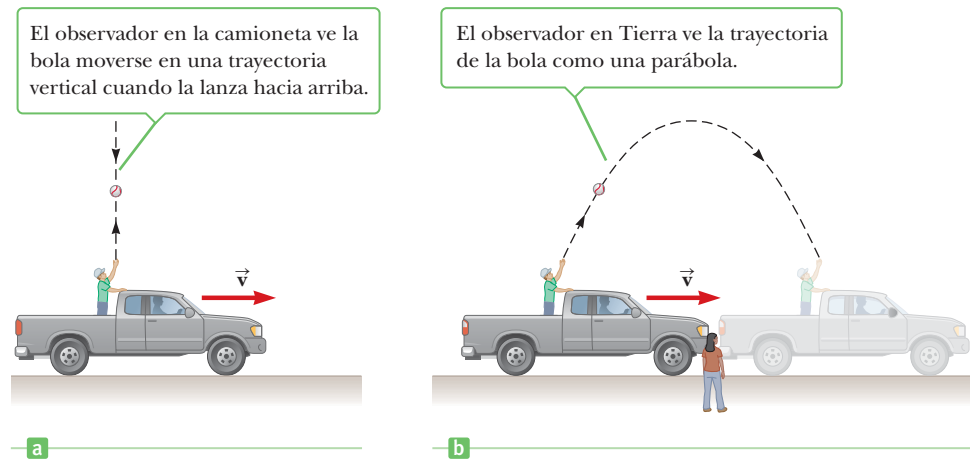
La existencia de un límite de velocidad universal tiene consecuencias de largo alcance. Significa que los conceptos usuales de fuerza, cantidad de movimiento y energía ya no se aplican para objetos que se mueven rápidamente. Una consecuencia menos obvia es que los observadores que se mueven con diferentes velocidades medirán diferentes tiempos y desplazamientos entre los mismos dos eventos. Relacionar las mediciones realizadas por diferentes observadores es el tema de la relatividad.

- 26.1 Relatividad galileana
- 26.2 La velocidad de la luz
- 26.3 Principio de relatividad de Einstein
- 26.4 Consecuencias de la relatividad especial
- 26.5 Cantidad de movimiento relativista
- 26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial
- 26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía
- 26.8 Relatividad general

26.1 Relatividad galileana

Para describir un evento físico, es necesario elegir un *marco de referencia*. Por ejemplo, cuando usted realiza un experimento en un laboratorio, selecciona un sistema de coordenadas o marco de referencia, que está en reposo con respecto al laboratorio. Suponga que, por ejemplo, elige realizar un experimento en la parte de atrás o batea de una camioneta que

Figura 26.1 Dos observadores miran la trayectoria de una bola lanzada y obtienen resultados diferentes.



se mueve con velocidad constante \vec{v} . A continuación, puede seleccionar un marco de referencia en movimiento que está en reposo con respecto a la camioneta. Si descubre que la primera ley de Newton es válida en su marco de referencia, ¿el observador en reposo con respecto a la Tierra estará de acuerdo con usted?

De acuerdo con el principio de relatividad galileana, **las leyes de la mecánica deben ser las mismas en todos los marcos de referencia inerciales**. Los marcos de referencia inerciales son aquellos marcos de referencia en los cuales las leyes de Newton son válidas. En estos marcos, los objetos se mueven en líneas rectas con velocidad constante, a menos que sobre ellos actúe una fuerza neta distinta de cero, de ahí el nombre “marco inercial”, porque los objetos que se observan en estos marcos obedecen a la primera ley de Newton: la ley de la inercia. Para la situación descrita en el párrafo anterior, el sistema coordenado del laboratorio y el sistema coordenado del auto en movimiento son ambos marcos de referencia inerciales. En consecuencia, si se descubre que las leyes de la mecánica son ciertas en el laboratorio, entonces la persona en el auto también debe observar las mismas leyes.

Considere una camioneta en movimiento, que se mueve con una velocidad constante, como en la figura 26.1a. Si un pasajero en la camioneta lanza una bola con trayectoria recta ascendente en el aire, el pasajero observa que la bola se mueve en una trayectoria vertical. El movimiento de la bola es precisamente el mismo que si la bola se lanzara mientras está en reposo sobre la Tierra. La ley de gravedad y las ecuaciones de movimiento bajo aceleración constante se obedecen ya sea que la camioneta esté en reposo o en movimiento uniforme.

Ahora considere el mismo experimento cuando lo ve otro observador en reposo sobre la Tierra. Este observador estacionario ve la trayectoria de la bola en el avión como una parábola, como en la figura 26.1b. Más aún, de acuerdo con este observador, la bola tiene una velocidad hacia la derecha igual a la velocidad del avión. Aunque los dos observadores no están de acuerdo en la forma de la trayectoria de la bola, ambos concuerdan en que el movimiento de la bola obedece a la ley de gravedad y a las leyes de movimiento de Newton, e incluso concuerdan en cuánto tiempo la bola está en el aire. Establecemos la siguiente conclusión importante: **no existe un marco de referencia privilegiado para describir las leyes de la mecánica**.

26.2 La velocidad de la luz

Es natural preguntar si el concepto de relatividad galileana en mecánica también se aplica a experimentos en electricidad, magnetismo, óptica y otras áreas. Los experimentos indican que la respuesta es no. Más aún, suponiendo que las leyes de electricidad y magnetismo son las mismas en todos los marcos inerciales, inmediatamente surge una paradoja en cuanto a la velocidad de la luz. De acuerdo con la teoría electromagnética, la velocidad de la luz siempre tiene el valor fijo de 2.99792458×10^8 m/s en vacío. Sin embargo, de acuerdo con la relatividad galileana, la velocidad del pulso relativo al observador estacionario S afuera del vagón en la figura 26.2 debe ser $c + v$. Por lo tanto, la relatividad galileana es inconsistente con la bien probada teoría de electromagnetismo de Maxwell.

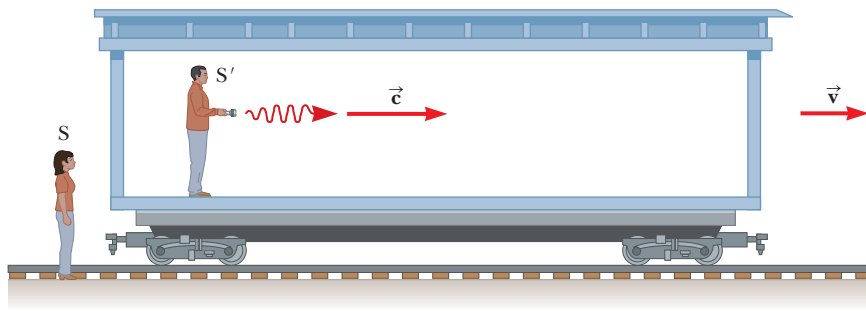


Figura 26.2 Una persona envía un pulso de luz en un vagón en movimiento. De acuerdo con la relatividad galileana, la velocidad del pulso debe ser $\vec{c} + \vec{v}$ en relación con un observador estacionario.

La teoría electromagnética predice que las ondas de luz deben propagarse a través del vacío con una velocidad igual a la velocidad de la luz. No obstante, la teoría no requiere la presencia de un medio para la propagación de la onda. Esto contrasta con otros tipos de ondas, como las olas y las ondas sonoras, que sí requieren un medio para sostener las perturbaciones. En el siglo XIX, los físicos creían que las ondas electromagnéticas también requerían un medio para propagarse. Propusieron que tal medio existía y le dieron el nombre de **éter luminífero**. Se supuso que el éter estaba presente en todas partes, incluso en el espacio vacío y que las ondas de luz se veían como oscilaciones del éter. Más aún, el éter no debería tener masa, por ser un medio rígido sin efecto sobre el movimiento de planetas u otros objetos. Estos conceptos de hecho son extraños. Además, se descubrió que las problemáticas leyes de la electricidad y el magnetismo deberían tomar sus formas más simples en un marco de referencia especial en *reposo* con respecto al éter. Este marco se llamó *marco absoluto*. Las leyes de la electricidad y el magnetismo serían válidas en este marco absoluto, pero tendrían que modificarse en cualquier marco de referencia que se moviera con respecto al marco absoluto.

Como resultado de la importancia dada al éter y al marco absoluto, se volvió de considerable interés para la física probar mediante experimentos que existían. Puesto que se consideraba probable que la Tierra estuviera en movimiento a través del éter, desde la visión de un experimentador en la Tierra, habría un “viento de éter” que soplara a través del laboratorio. Un método directo para detectar el viento de éter usaría un aparato fijo en la Tierra para medir la influencia del viento sobre la velocidad de la luz. Si v es la velocidad del éter en relación con la Tierra, entonces la velocidad de la luz debería tener su valor máximo, $c + v$, cuando se propaga a favor del viento, como se muestra en la figura 26.3a. Del mismo modo, la velocidad de la luz debe tener su valor mínimo, $c - v$, cuando se propaga contra el viento, como en la figura 26.3b y un valor intermedio, $(c^2 - v^2)^{1/2}$, en la dirección perpendicular al viento de éter, como en la figura 26.3c. Si el Sol se supone en reposo en el éter, entonces la velocidad del viento de éter sería igual a la velocidad orbital de la Tierra alrededor del Sol, que tiene una magnitud de aproximadamente 3×10^4 m/s. Puesto que $c = 3 \times 10^8$ m/s, debe ser posible detectar un cambio en la velocidad de alrededor de una parte en 10^4 para mediciones en la dirección en contra o a favor del viento.

El experimento Michelson-Morley

El más famoso experimento diseñado para detectar estos pequeños cambios en la velocidad de la luz lo realizó por primera vez, en 1881, Albert A. Michelson (1852-1931) y más tarde fue repetido bajo varias condiciones por parte de Michelson y Edward W. Morley (1838-1923). El experimento se diseñó para determinar la velocidad de la Tierra en relación con el éter hipotético. La herramienta experimental utilizada fue el interferómetro Michelson, que se muestra en la figura 26.4 (página 888). El brazo 2 está alineado a lo largo de la dirección de movimiento de la Tierra a través del espacio. El movimiento de la Tierra a través del éter con velocidad v es equivalente al éter que fluye por la Tierra en la dirección opuesta con velocidad v . Este viento de éter que sopla en la dirección opuesta a la dirección de movimiento de la Tierra debe hacer que la velocidad de la luz medida en el marco de la Tierra sea $c - v$ conforme la luz se aproxima al espejo M_2 y $c + v$ después de reflejarse, donde c es la velocidad de la luz en el marco del éter.

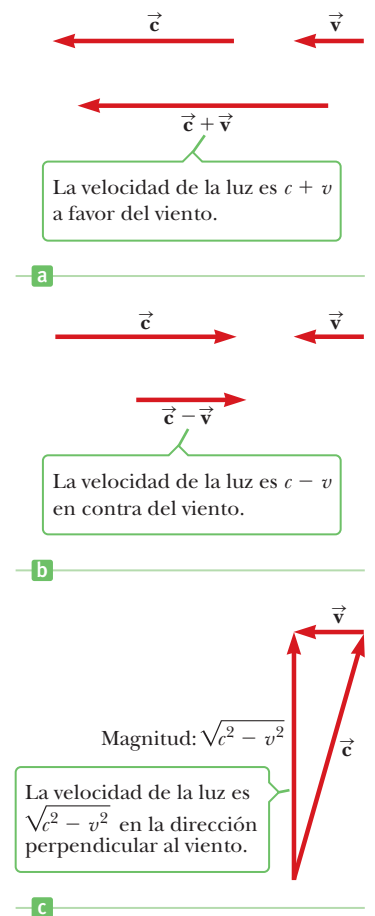
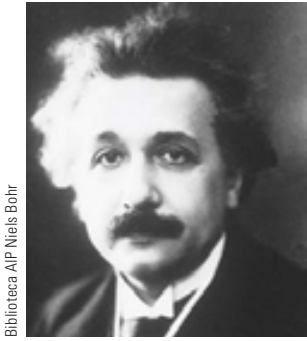


Figura 26.3 Si la velocidad del viento de éter en relación con la Tierra es v y c es la velocidad de la luz en relación con el éter, la velocidad de la luz en relación con la Tierra es a) $c + v$ en la dirección a favor del viento, b) $c - v$ en la dirección contra el viento y c) $\sqrt{c^2 - v^2}$ en la dirección perpendicular al viento. El experimento de Michelson-Morley, sin embargo, refutó la hipótesis del viento de éter, que lleva al postulado de Einstein de que la velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor independientemente del movimiento del observador inercial.



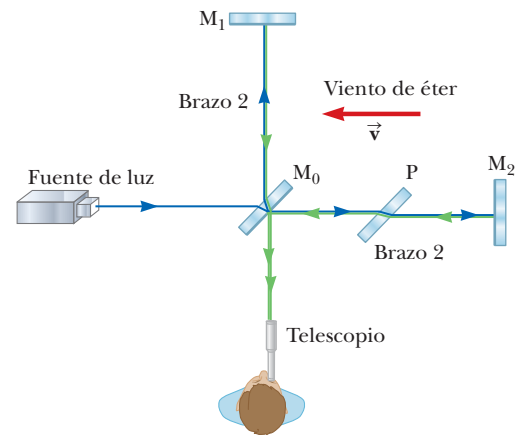
Albert Einstein
Físico germano-estadounidense
(1879-1955)

Uno de los más grandes físicos de todos los tiempos, Einstein nació en Ulm, Alemania. En 1905, a la edad de 26 años, publicó cuatro ensayos científicos que revolucionaron la física. Dos de estos ensayos introdujeron la teoría de la relatividad especial, considerada por muchos como su obra más importante. En 1916, en una excitante carrera con el matemático David Hilbert, Einstein publicó su teoría de la gravedad, llamada teoría de la relatividad general. La predicción más espectacular de esta teoría es el grado al cual la luz se desvía mediante un campo gravitacional. Las mediciones realizadas por astrónomos en estrellas brillantes en la vecindad del Sol eclipsado en 1919 confirmaron la predicción de Einstein y como resultado se convirtió en una celebridad mundial. Einstein estuvo profundamente consternado por el desarrollo de la mecánica cuántica en los años 1920, a pesar de su propio papel como revolucionario científico. En particular, nunca pudo aceptar la visión probabilística de los eventos en la naturaleza, que es una característica central de la teoría cuántica. Las últimas décadas de su vida las dedicó sin éxito a la búsqueda de una teoría unificada que combinaría gravitación y electromagnetismo.

Postulados de la relatividad ►

Figura activa 26.4

De acuerdo con la teoría del viento de éter, la velocidad de la luz debe ser $c - v$ conforme el haz se aproxima al espejo M_2 y $c + v$ después de la reflexión.



Los dos haces reflejados de M_1 y M_2 se recombinan y se forma un patrón de interferencia que consiste en franjas oscuras y brillantes alternadas. El patrón de interferencia se observó mientras el interferómetro giraba a través de un ángulo de 90° . Esta rotación supuestamente cambiaría la velocidad del viento de éter a lo largo de la dirección del brazo 1. El efecto de tal rotación haría que el patrón de franjas se corriera ligera, pero mensurablemente, ¡mas las mediciones fallaron para demostrar cualquier cambio en el patrón de interferencia! Aun cuando el experimento Michelson-Morley se repitió en diferentes épocas del año cuando el viento de éter se espera que cambie de dirección, los resultados siempre fueron los mismos: **jamás se observó un corrimiento de franjas de la magnitud requerida.**

Los resultados negativos del experimento Michelson-Morley no sólo contradicen la hipótesis del éter, sino también demostraron que era imposible medir la velocidad absoluta de la Tierra con respecto al marco del éter. Sin embargo, como veremos en la siguiente sección, Einstein sugirió un postulado en la teoría de la relatividad especial que otorga una interpretación muy diferente a estos resultados negativos. En años posteriores, cuando se sabía más acerca de la naturaleza de la luz, se descartó la idea de un éter que permea todo el espacio. **Ahora la luz se entiende como una onda electromagnética que no requiere medio para su propagación.**

26.3 Principio de relatividad de Einstein

En 1905 Albert Einstein propuso una teoría que explicaba el resultado del experimento Michelson-Morley y alteraba por completo las nociones de espacio y tiempo. Basó su teoría de la relatividad especial en dos postulados:

- 1. El principio de relatividad:** todas las leyes de la física son las mismas en todos los marcos inerciales.
- 2. La constante de la velocidad de la luz:** la velocidad de la luz en un vacío tiene el mismo valor, $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s, en todos los marcos de referencia inerciales, sin importar la velocidad del observador o la velocidad de la fuente que emite la luz.

El primer postulado afirma que *todas* las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia que se mueven con velocidad constante uno en relación con otro. Este postulado es una generalización radical del principio de relatividad galileano, que sólo se refiere a las leyes de la mecánica. Desde un punto de vista experimental, el principio de relatividad de Einstein significa que *cualquier* tipo de experimento (mecánico, térmico, óptico o eléctrico) realizado en un laboratorio en reposo, debe dar el mismo resultado cuando se realiza en un laboratorio que se mueve con velocidad constante y rebasa al primero. Por lo tanto, no existe marco de referencia inercial privilegiado y es imposible detectar movimiento absoluto.

Aunque el postulado 2 fue una brillante comprensión teórica por parte de Einstein en 1905, desde entonces ha sido confirmado experimentalmente en muchas formas. Acaso la demostración más directa involucra medir la velocidad de los fotones emitidos por partículas que viajan a 99.99% de la velocidad de la luz. La velocidad medida del fotón en este caso concuerda a cinco cifras significativas con la velocidad de la luz en el vacío.

El resultado nulo del experimento Michelson-Morley se puede comprender fácilmente dentro del marco conceptual de la teoría de Einstein. De acuerdo con su principio de relatividad, las premisas del experimento Michelson-Morley fueron incorrectas. En el proceso de intentar explicar los resultados esperados, se afirmó que, cuando la luz viajaba contra el viento de éter, su velocidad era $c - v$. Sin embargo, si el estado de movimiento del observador o la fuente no influye sobre el valor que se encuentra para la velocidad de la luz, el valor medido siempre debe ser c . Del mismo modo, la luz hace el viaje de regreso después de la reflexión en el espejo, con una velocidad de c , no una velocidad de $c + v$. Por ende, el movimiento de la Tierra no influye en el patrón de franjas observado en el experimento Michelson-Morley, y se debe esperar un resultado nulo.

Si se acepta la teoría de la relatividad de Einstein, se debe concluir que el movimiento relativo uniforme no es importante cuando se mide la velocidad de la luz. Al mismo tiempo, se tienen que ajustar las nociones de sentido común del espacio y el tiempo y estar preparado para algunas consecuencias más bien extrañas.

Examen rápido

26.1 Verdadero o Falso: Si usted viajara en una nave espacial con una velocidad de $c/2$ relativa a la Tierra y dispara un haz de luz en la dirección del movimiento de la nave espacial, la luz del láser viajaría a una velocidad de $3c/2$ relativa a la Tierra.

26.4 Consecuencias de la relatividad especial

Casi todos quienes se han instruido con ciencia incluso superficialmente están conscientes de algunas de las sorprendentes predicciones que surgen debido al enfoque de Einstein del movimiento relativo. Conforme usted examine algunas de las consecuencias de la relatividad en esta sección, encontrará que están en conflicto con algunas de las nociones básicas de espacio y tiempo. La discusión se restringe a los conceptos de longitud, tiempo y simultaneidad, que son muy diferentes en mecánica relativista de lo que lo son en la mecánica newtoniana. Por ejemplo, en la mecánica relativista la distancia entre dos puntos y el tiempo entre dos eventos depende del marco de referencia donde se midan. **En la mecánica relativista no hay una cosa tal como longitud o tiempo absolutos. Más aún, los eventos en diferentes ubicaciones, que se observan ocurren simultáneamente en un marco, no se observan como simultáneos en otro marco que se mueve de manera uniforme y pasa al primero.**

◀ Las mediciones de longitud y tiempo dependen del marco de referencia

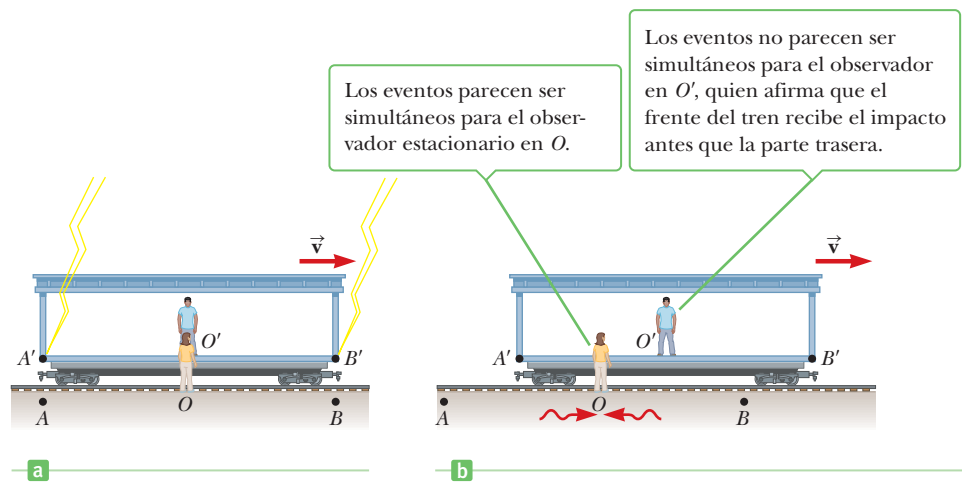
Simultaneidad y la relatividad del tiempo

Una premisa básica de la mecánica newtoniana es que existe una escala de tiempo universal que es la misma para todos los observadores. Newton y sus seguidores simplemente toman la simultaneidad como un hecho. En su teoría de la relatividad especial, Einstein abandonó dicho supuesto.

Einstein diseñó el siguiente experimento mental para ilustrar este punto. Un vagón se mueve con velocidad uniforme y dos relámpagos impactan sus extremos, como en la figura 26.5a (página 890) y dejan marcas en el vagón y el suelo. Las marcas en el vagón se etiquetan A' y B' , y las del suelo se etiquetan A y B . Un observador en O' que se mueve con el vagón está a la mitad entre A' y B' , y un observador en el suelo en O está a la mitad entre A y B . Los eventos registrados por los observadores son el golpe al vagón por los dos relámpagos.

Las señales de luz que registran el instante cuando ocurre el impacto de los dos rayos llegan al observador O al mismo tiempo, como se indica en la figura 26.5b. Este observador se da cuenta de que las señales viajaron con la misma velocidad sobre iguales distancias y, por lo tanto, concluye correctamente que los eventos en A y B ocurrieron simultáneamente.

Figura 26.5 a) Dos relámpagos impactan los extremos de un vagón en movimiento. b) La señal luminosa que viaja hacia la izquierda ya ha pasado O' , pero la señal viajando hacia la derecha todavía no ha alcanzado O' .



Ahora considere los mismos eventos vistos por el observador O' . Para cuando las señales llegan al observador O , el observador O' se movió como se indica en la figura 26.5b. Por ende, la señal de B' ya pasó a O' , pero la señal de A' todavía no llega a O' . En otras palabras, O' ve la señal de B' antes de ver la señal de A' . De acuerdo con Einstein, *los dos observadores deben encontrar que la luz viaja con la misma velocidad*. Por lo tanto, el observador O' concluye que el relámpago golpea el frente del vagón antes de golpear la parte trasera.

Este experimento mental demuestra claramente que los dos eventos que parecen ser simultáneos al observador O no parecen ser simultáneos al observador O' . En otras palabras,

Tip 26.1 ¿Quién tiene razón?

¿Cuál persona tiene la razón en cuanto a la simultaneidad de los dos eventos? Ambas están en lo correcto porque el principio de relatividad afirma que no existe un marco de referencia privilegiado. Aunque los dos observadores pueden llegar a diferentes conclusiones, ambas están en lo correcto en su marco de referencia propio. Cualquier marco de referencia que se mueva de manera uniforme se puede usar para describir eventos y hacer física.

Dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia en general no son simultáneos en un segundo marco que se mueve en relación con el primero. La simultaneidad depende del estado de movimiento del observador y, por ende, no es un concepto absoluto.

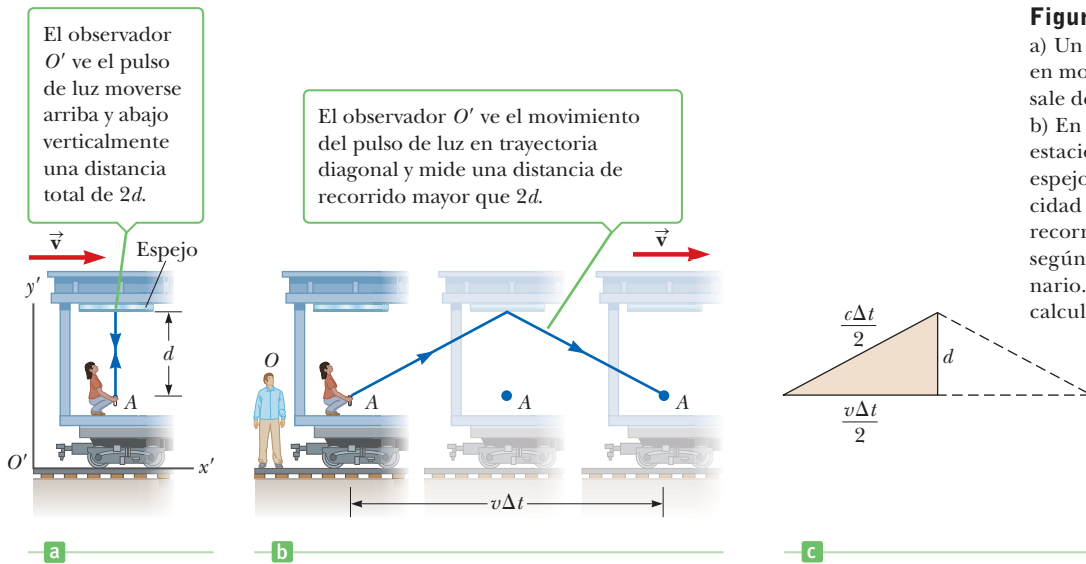
En este punto, usted debe preguntarse cuál observador está en lo correcto en cuanto a los dos eventos. La respuesta es que *ambos* están en lo correcto porque el principio de relatividad afirma que **no hay un marco de referencia inercial privilegiado**. Aunque los dos observadores llegan a diferentes conclusiones, ambos están en lo correcto en sus propios marcos de referencia porque el concepto de simultaneidad no es absoluto. De hecho, éste es el punto central de la relatividad: cualquier marco de referencia inercial se puede usar para describir eventos y hacer física.

Dilatación del tiempo

Es posible ilustrar que observadores en diferentes marcos inerciales pueden medir diferentes intervalos entre un par de eventos al considerar un vehículo que se mueve hacia la derecha con una velocidad v , como en la figura activa 26.6a. Un espejo se fija al techo del vehículo y un observador O' en reposo en este sistema sostiene un láser a una distancia d abajo del espejo. En algún instante, el láser emite una luz dirigida hacia el espejo (evento 1) y cierto tiempo después, luego de reflejarse en el espejo, el pulso llega de vuelta al láser (evento 2). El observador O' porta un reloj y lo usa para medir el tiempo Δt_p entre esos dos eventos, que él ve que ocurren en el mismo lugar. (El subíndice p significa *propio*, como verá dentro de un momento.) Puesto que el pulso de luz tiene una velocidad c , el tiempo que tarda en viajar del punto A al espejo y de vuelta al punto A es

$$\Delta t_p = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{velocidad}} = \frac{2d}{c} \quad [26.1]$$

El tiempo Δt_p medido por O' requiere un solo reloj ubicado en el mismo lugar que el láser en este marco.



Ahora considere el mismo conjunto de eventos como los ve O en un segundo marco, como se muestra en la figura activa 26.6b. De acuerdo con este observador, el espejo y el láser se mueven hacia la derecha con una velocidad v y, como resultado, la secuencia de eventos parece diferente. Para cuando la luz del láser llega al espejo, el espejo se movió hacia la derecha una distancia $v\Delta t/2$, donde Δt es el tiempo que tarda el pulso de luz en viajar desde el punto A hasta el espejo y de vuelta al punto A , según mide O . En otras palabras, O concluye que, debido al movimiento del vehículo, si la luz golpea el espejo, debe salir del láser a un ángulo con respecto a la dirección vertical. Al comparar las figuras activas 26.6a y 26.6b, se ve que la luz debe recorrer más en b) que en a). (Observe que ningún observador “sabe” que se mueve. Cada uno está en reposo en su propio marco inercial.)

De acuerdo con el segundo postulado de la teoría de la relatividad especial, ambos observadores deben medir c para la velocidad de la luz. Puesto que la luz viaja más lejos en el marco de O , tenemos que el tiempo Δt medido por O es mayor que el intervalo Δt_p medido por O' . Para obtener una relación entre estos dos tiempos, es conveniente examinar el triángulo rectángulo que se muestra en la figura activa 26.6c. El teorema de Pitágoras da

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + d^2$$

Al resolver para Δt se obtiene

$$\Delta t = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Puesto que $\Delta t_p = 2d/c$, este resultado se puede expresar como

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \Delta t_p$$

[26.2] ◀ Dilatación del tiempo

donde

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad [26.3]$$

Puesto que γ siempre es mayor que 1, la ecuación 26.2 indica que **el intervalo Δt entre dos eventos medidos por un observador que se mueve con respecto a un reloj¹ es mayor que**

¹En realidad, la figura 26.6 muestra el reloj en movimiento, y no al observador, pero esto es equivalente al observador O en movimiento hacia la izquierda con velocidad \vec{v} con respecto al reloj.

el intervalo Δt_p entre los mismos dos eventos medidos por un observador en reposo con respecto al reloj. En consecuencia, $\Delta t > \Delta t_p$ y el tiempo propio se expande o dilata por el factor γ . Por lo tanto, este efecto se conoce como **dilatación del tiempo**.

Por ejemplo, suponga que el observador en reposo con respecto al reloj mide el tiempo requerido para que el destello de luz salga del láser y regrese. Suponga que el tiempo medido en este marco de referencia, Δt_p , es 1 s. (Esto requeriría un vehículo muy alto.) Ahora encuentre el intervalo medido por el observador O que se mueve con respecto al mismo reloj. Si el observador O viaja a la mitad de la velocidad de la luz ($v = 0.500c$), entonces $\gamma = 1.15$ y, de acuerdo con la ecuación 26.2, $\Delta t = \gamma \Delta t_p = 1.15(1.00 \text{ s}) = 1.15 \text{ s}$. Por lo tanto, cuando el observador O' afirma que ha transcurrido 1.00 s, el observador O afirma que transcurrió 1.15 s. El observador O considera que el reloj de O' lee un valor muy bajo para el tiempo transcurrido entre los dos eventos y dice que el reloj de O' “corre lento”. A partir de este fenómeno, se puede concluir lo siguiente:

Un reloj en movimiento corre ►
más lentamente que un reloj
idéntico estacionario

Un reloj que pasa junto a un observador con velocidad v funciona más lentamente que un reloj idéntico en reposo con respecto al observador por un factor de γ^{-1} .

El intervalo Δt_p en las ecuaciones 26.1 y 26.2 se llama **tiempo propio**. En general, **el tiempo propio es el intervalo entre dos eventos según mide un observador quien ve que los eventos ocurren en la misma posición**.

Aunque es posible que ya se haya dado cuenta, es importante manifestar que la relatividad es una democracia científica: la visión de O' de que O es quien en realidad se mueve con velocidad v hacia la izquierda y que el reloj de O funciona más lentamente, es tan válida como la visión de O . El principio de relatividad requiere que las visiones de los dos observadores en movimiento relativo uniforme es igualmente válido y capaz de comprobarse experimentalmente.

Se ha visto que los relojes en movimiento corren más lentamente por un factor de γ^{-1} . Esto es cierto para relojes mecánicos ordinarios así como para el reloj de luz recién descrito. De hecho, estos resultados se pueden generalizar al afirmar que todos los procesos físicos, incluidos los químicos y biológicos, disminuyen su velocidad en relación con un reloj cuando dichos procesos ocurren en un marco que se mueve con respecto al reloj. Por ejemplo, el latido cardíaco de un astronauta que se mueve a través del espacio mantendría su ritmo con un reloj dentro de la nave espacial. Tanto el reloj como el latido cardíaco del astronauta correrían más lentos en relación con un reloj asentado sobre la Tierra (aunque el astronauta no tendría sensación de vivir más lentamente en la nave espacial).

La dilatación del tiempo es un fenómeno muy real que se ha verificado mediante varios experimentos que involucran el tictac de los relojes naturales. Un ejemplo interesante de dilatación del tiempo involucra la observación de *muones*, partículas elementales inestables que son muy similares a electrones y tienen la misma carga, pero 207 veces su masa. Los muones pueden producirse mediante la colisión de radiación cósmica con átomos en la parte superior de la atmósfera. Estas partículas tienen vidas de $2.2 \mu\text{s}$ cuando se miden en un marco de referencia en reposo con respecto a ellos. Si considera $2.2 \mu\text{s}$ como la vida promedio de un muón y supone que su velocidad es cercana a la de la luz, descubre que estas partículas pueden viajar solamente alrededor de 600 m antes de decaer (figura 26.7a). En consecuencia, nunca podrían llegar a la Tierra desde la atmósfera superior donde se producen. Sin embargo, los experimentos muestran que un gran número de muones *sí* llegan a la Tierra y el fenómeno de dilatación del tiempo explica cómo. En relación con un observador en la Tierra, los muones tienen una vida igual a $\gamma\tau_p$, donde $\tau_p = 2.2 \mu\text{s}$ es la vida en un marco de referencia que viaja con los muones. Por ejemplo, para $v = 0.99c$, $\gamma \approx 7.1$ y $\gamma\tau_p \approx 16 \mu\text{s}$. Por lo tanto, la distancia promedio que recorren los muones, medida por un observador en la Tierra, es $\gamma v\tau_p \approx 4800 \text{ m}$, como se indica en la figura 26.7b. En consecuencia, los muones pueden llegar a la superficie de la Tierra.

En 1976 se realizaron experimentos con muones en el laboratorio del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra. En un gran anillo de almacenamiento se inyectaron muones, que alcanzaron velocidades de aproximadamente $0.9994c$. Los electrones producidos por los muones en decaimiento se detectaron en contadores alrededor del anillo, lo que permitió a los científicos medir la razón de decaimiento y, por ende, la vida de los muones. La vida de los muones en movimiento se midió en aproximadamente 30 veces

Tip 26.2 Tiempo propio

Usted debe ser capaz de identificar correctamente al observador que mide el tiempo propio. El tiempo propio entre dos eventos es el tiempo medido por un observador para quien los dos eventos tienen lugar en la misma posición.

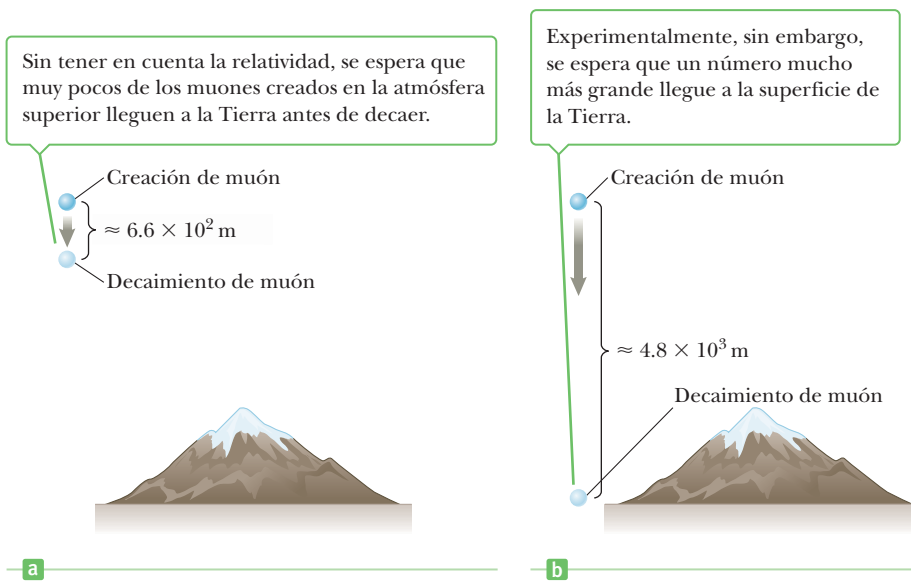


Figura 26.7 a) Un muón creado en la atmósfera superior que se mueve a $0.99c$ en relación con un observador en Tierra recorrería sólo 660 m, en promedio, antes de decaer después de 2.2×10^{-6} s. b) Debido a la dilatación del tiempo, la vida observada es mayor, de modo que tal muón recorre una distancia de aproximadamente 4.80×10^3 m, en promedio, antes de decaer. En consecuencia, se observa que muchos más muones de lo esperado alcanzan la superficie de la Tierra. Desde el punto de vista de los muones, por el contrario, su vida es de sólo 2.2×10^{-6} s en promedio, pero la distancia entre ellos y la Tierra se contrae, haciendo posible otra vez, que más de ellos lleguen a la superficie antes de decaer.

las de los muones estacionarios hasta dentro de dos partes en mil, en concordancia con la predicción de la relatividad.

Examen rápido

26.2 Suponga que usted es un astronauta a quien se le paga de acuerdo con el tiempo que pasa viajando en el espacio. Realiza un largo viaje con una velocidad cercana a la de la luz. Al regresar a la Tierra, le preguntan cómo quiere que se le pague: de acuerdo con el tiempo transcurrido en un reloj en la Tierra o de acuerdo con el reloj de su nave. Para maximizar su cheque, ¿cuál elegiría? a) el reloj de la Tierra b) el reloj de la nave c) cualquier reloj porque no hay diferencia.

EJEMPLO 26.1 Periodos de péndulo

OBJETIVO Aplicar el concepto de dilatación del tiempo.

PROBLEMA El periodo de un péndulo se mide en 3.00 s en el marco inercial del péndulo en la superficie de la Tierra. ¿Cuál es el periodo medido por un observador que se mueve con una velocidad de $0.950c$ con respecto al péndulo?

ESTRATEGIA Aquí se proporciona el periodo del reloj medido por un observador en el marco en reposo del reloj, de modo que es un tiempo propio Δt_p . Quiere saber cuánto tiempo transcurre según mide un observador en un marco en movimiento relativo al reloj, que es Δt . Al sustituir en la ecuación 26.2 resuelva el problema.

SOLUCIÓN

Sustituya el tiempo propio y la velocidad relativa en la ecuación 26.2:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{3.00 \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(0.950c)^2}{c^2}}} = 9.61 \text{ s}$$

COMENTARIOS El observador en movimiento considera al péndulo como en movimiento y los relojes en movimiento se observa que corren más lentamente: mientras el péndulo oscila una vez en 3 s para un observador en el marco en reposo del reloj, tarda casi 10 s en oscilar una vez de acuerdo con el observador en movimiento.

PREGUNTA 26.1 Suponga que un sistema masa-resorte, con el mismo periodo que el péndulo, se coloca en la nave espacial del observador. Cuando la nave viaja con una velocidad de $0.95c$ relativa a un observador en la Tierra, ¿cuál es el periodo del péndulo medido por el observador en la Tierra?

EJERCICIO 26.1 ¿Cuál es el periodo del péndulo medido por un tercer observador que se mueve a $0.900c$?

RESPUESTA 6.88 s

En problemas como el del ejemplo 26.1 surgen confusiones porque el movimiento es relativo: desde el punto de vista de alguien en el marco de referencia en reposo del péndulo, el péndulo está quieto (excepto, desde luego, por el movimiento de balanceo), mientras que para alguien en un marco que se mueve con respecto al péndulo, el péndulo es el que realiza el movimiento. Para mantenerlo directo, siempre enfóquese en el observador que realiza la medición y pregúntese si el reloj a medir se mueve con respecto a dicho observador. Si la respuesta es no, entonces el observador está en el marco en reposo del reloj y mide el tiempo propio del reloj. Si la respuesta es sí, entonces el tiempo medido por el observador estará dilatado, o será mayor que el tiempo propio del reloj. Esta confusión de perspectivas conduce a la famosa “paradoja de los gemelos”.

Paradoja de los gemelos

Una intrigante consecuencia de la dilatación del tiempo es la llamada paradoja de los gemelos (figura 26.8). Considere un experimento que involucra un conjunto de gemelos llamados Acelerino y Valento. Cuando tienen 20 años de edad, Acelerino, el más aventurero de los dos, se embarca en un viaje épico al Planeta X, ubicado a 20 años luz de la Tierra. Más aún, su nave espacial es capaz de llegar a una velocidad de $0.95c$ relativa al marco inercial de su hermano gemelo en casa. Después de llegar al Planeta X, Acelerino se siente nostálgico e inmediatamente regresa a la Tierra con la misma velocidad de $0.95c$. Al llegar, Acelerino está consternado al descubrir que Valento envejeció $2D/v = 2(20 \text{ a-l}) / (0.95 \text{ al/año}) = 42$ años y ahora tiene 62 años de edad. Acelerino, por otra parte, envejeció sólo 13 años.

Algunos equivocadamente consideran que *ésta* es la paradoja; que los gemelos puedan envejecer a diferentes razones y terminen después de un periodo de tiempo con edades muy diferentes. Aunque contrario al sentido común, ésta no es la paradoja en absoluto. La paradoja es que, desde el punto de vista de Acelerino, *él* estuvo en reposo mientras Valento (en la Tierra) se alejaba *de él* a $0.95c$ y regresó más tarde. De modo que el reloj de Valento se movía en relación con Acelerino y, en consecuencia, corría lento en comparación con el reloj de Acelerino. La conclusión: Acelerino, no Valento, ¡debe ser el más viejo de los gemelos!

Para resolver esta aparente paradoja, considere un tercer observador que se mueve con una velocidad constante de $0.5c$ en relación con Valento. Para el tercer observador, Valento nunca cambia de marco inercial: su velocidad relativa al tercer observador siempre es la misma. Sin embargo, el tercer observador nota que Acelerino acelera durante su viaje y *en el proceso cambia de marco de referencia*. Desde la perspectiva del tercer observador, es claro que hay algo muy diferente acerca del movimiento de Valento cuando se compara con el de Acelerino. Los roles que juegan Valento y Acelerino no son simétricos, así que no es de sorprender que el tiempo fluya de manera diferente para cada uno. Más aún, puesto que Acelerino acelera, él está en un marco de referencia no inercial y técnicamente está afuera de las fronteras de la relatividad especial (aunque en relatividad hay métodos para lidiar

Figura 26.8 La paradoja de los gemelos. Acelerino hace un viaje al Planeta X a 20 años luz de distancia y vuelve a la Tierra.



con movimiento acelerado). Sólo Valento, quien está en un solo marco inercial, puede aplicar la fórmula simple de dilatación del tiempo al viaje de Acelerino. Valento descubre que, en lugar de envejecer 42 años, Acelerino sólo envejece $(1 - v^2/c^2)^{1/2}(42 \text{ años}) = 13 \text{ años}$. De estos 13 años, Acelerino emplea 6.5 años en viajar al Planeta X y 6.5 años en regresar, para un tiempo de viaje total de 13 años, en concordancia con la afirmación anterior.

■ **Examen rápido**

26.3 Verdadero o Falso: Las personas que viajan cerca de la velocidad de la luz en relación con la Tierra medirían sus vidas y las encontrarían, en promedio, más largas que la vida humana promedio medida en la Tierra.

Contracción de la longitud

La distancia medida entre dos puntos depende del marco de referencia del observador. La **longitud propia** L_p de un objeto es **la longitud del objeto según mide un observador en reposo relativo con el objeto**. La longitud de un objeto medida en un marco de referencia que se mueve con respecto al objeto siempre es menor que la longitud propia. Este efecto se conoce como **contracción de la longitud**.

Para entender cuantitativamente la contracción de la longitud, considere una nave espacial que viaja con una velocidad v de una estrella a otra según la ven dos observadores, uno en la Tierra y el otro en la nave espacial. El observador en reposo en la Tierra (y también supuesto en reposo con respecto a las dos estrellas) mide la distancia entre las estrellas como L_p . De acuerdo con este observador, el tiempo que tarda la nave espacial en completar el viaje es $\Delta t = L_p/v$. Debido a la dilatación del tiempo, el viajero espacial, que usa el reloj de su nave, mide un tiempo de viaje más pequeño: $\Delta t_p = \Delta t/\gamma$. El viajero espacial afirma estar en reposo y ve la estrella de destino moverse hacia la nave espacial con velocidad v . Puesto que el viajero espacial llega a la estrella en el tiempo Δt_p , concluye que la distancia L entre las estrellas es más corta que L_p . La distancia medida por el viajero espacial es

$$L = v \Delta t_p = v \frac{\Delta t}{\gamma}$$

Dado que $L_p = v \Delta t$, se sigue que

$$L = \frac{L_p}{\gamma} = L_p \sqrt{1 - v^2/c^2} \tag{26.4}$$

De acuerdo con este resultado, que se ilustra en la figura activa 26.9, si un observador en reposo con respecto a un objeto mide su longitud en L_p , un observador que se mueve con una velocidad v relativa al objeto descubrirá que es más corta que su longitud propia por el factor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Observe que **la contracción de la longitud tiene lugar sólo a lo largo de la dirección de movimiento**.

Los efectos de dilatación del tiempo y contracción de la longitud tienen interesantes aplicaciones para futuros viajes espaciales a estrellas distantes. Para llegar a la estrella en una fracción de una vida humana, el viaje se debe realizar a muy altas velocidades. De acuerdo con un observador en la Tierra, el tiempo para que una nave espacial llegue a la estrella de destino estará dilatado en comparación con el tiempo medido por los viajeros. Como se discutió en el tratamiento de la paradoja de los gemelos, los viajeros serán más jóvenes que sus gemelos cuando regresen a la Tierra. Por lo tanto, para cuando los viajeros lleguen a la estrella, habrán envejecido algún número de años, mientras que sus compañeros en la Tierra envejecerán un mayor número de años y la razón exacta depende de la velocidad de la nave espacial. En una nave espacial con una velocidad de $0.94c$, esta razón es aproximadamente 3:1.

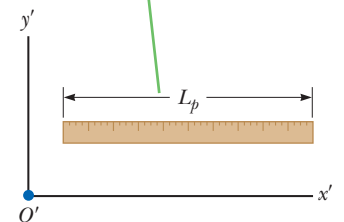
■ **Examen rápido**

26.4 Usted empaqueta para un viaje hacia otra estrella y en su recorrido viajará con una velocidad de $0.99c$. ¿Puede dormir en un gabinete más pequeño que lo usual, porque será más corto cuando se acueste? Explique su respuesta.

Tip 26.3 La longitud propia

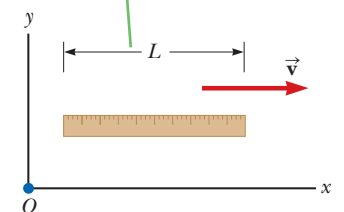
Usted debe ser capaz de identificar correctamente al observador que mide la longitud propia. La longitud propia entre dos puntos en el espacio es la longitud medida por un observador en reposo con respecto a la longitud. Con mucha frecuencia, el tiempo propio y la longitud propia no se miden por el mismo observador.

La regla según la ve un observador O' en reposo con respecto a ésta mide una longitud de un metro.



a

La regla vista por un observador O que se mueve con una velocidad v con respecto a ésta. La regla en movimiento siempre se mide más corta de lo que es en su propio marco en reposo por un factor de $\sqrt{1 - v^2/c^2}$.



b

Figura activa 26.9 La longitud de la regla es medida por dos observadores.

■ Examen rápido

26.5 Observe un cohete que se mueve alejándose de usted. **i)** Comparada con su longitud cuando está en reposo en el suelo, ¿su longitud la medirá como a) más corta, b) más larga o c) la misma? Comparado con el paso del tiempo medido por el reloj de su muñeca, ¿el paso del tiempo en el reloj del cohete es d) más rápido, e) más lento o f) el mismo? **ii)** Responda las preguntas si el cohete da la vuelta y regresa hacia usted.

■ EJEMPLO 26.2 Una rápida caída en picada

OBJETIVO Aplicar el concepto de contracción de la longitud a cierta distancia.

PROBLEMA **a)** Un observador sobre la Tierra ve una nave espacial a una altura de 4350 km que se mueve de manera descendente hacia la Tierra con una velocidad de $0.970c$. ¿Cuál es la distancia desde la nave espacial hasta la Tierra, según mide el capitán de la nave espacial? **b)** Después de disparar sus cohetes, el capitán mide la altura de su nave como 267 km, mientras que el observador sobre la Tierra la mide en 625 km. ¿Cuál es la velocidad de la nave espacial en este instante?

ESTRATEGIA Para el capitán, la Tierra se acerca rápidamente hacia su nave a $0.970c$; por lo tanto, la distancia entre su nave y la Tierra se contrae. La sustitución en la ecuación 26.9 produce la respuesta. En el inciso b) use la misma ecuación, sustituya las distancias y resuelva para la velocidad.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la distancia desde la nave hasta la Tierra, según la mide el capitán.

Sustituya en la ecuación 26.4, lo que produce la altura medida por el capitán en la nave:

$$\begin{aligned} L &= L_p \sqrt{1 - v^2/c^2} = (4350 \text{ km}) \sqrt{1 - (0.970c)^2/c^2} \\ &= 1.06 \times 10^3 \text{ km} \end{aligned}$$

b) ¿Cuál es la velocidad posterior de la nave espacial si el observador en la Tierra mide la distancia de la nave a la Tierra como 625 km y el capitán la mide como 267 km?

Aplique la ecuación de contracción de la longitud:

$$L = L_p \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Eleve al cuadrado ambos lados de esta ecuación y resuelva para v :

$$\begin{aligned} L^2 &= L_p^2 (1 - v^2/c^2) \quad \rightarrow \quad 1 - v^2/c^2 = \left(\frac{L}{L_p}\right)^2 \\ v &= c \sqrt{1 - (L/L_p)^2} = c \sqrt{1 - (267 \text{ km}/625 \text{ km})^2} \\ v &= 0.904c \end{aligned}$$

COMENTARIOS La longitud propia siempre es la longitud medida por un observador en reposo con respecto a dicha longitud.

PREGUNTA 26.2 A medida que una nave espacial se aproxima a un observador casi a la velocidad de la luz, el capitán dirige un haz de luz amarilla al observador. ¿Qué reportaría el observador al ver la luz? a) Su longitud de onda se correría hacia el infrarrojo del espectro. b) Su longitud de onda correspondería a luz amarilla. c) Su longitud de onda se correría hacia el ultravioleta del espectro.

EJERCICIO 26.2 Suponga que el observador en la nave mide la distancia desde la Tierra como 50.0 km, mientras que el observador en la Tierra mide la distancia como 125 km. ¿A qué velocidad se aproxima la nave a la Tierra?

RESPUESTA $0.917c$.

La contracción de la longitud sólo ocurre en la dirección de movimiento del observador. Ninguna contracción ocurre perpendicular a dicha dirección. Por ejemplo, una nave espacial en reposo relativo con un observador puede tener la forma de un triángulo equilátero, pero si pasa al observador a velocidad relativista en una dirección paralela a su base, la base se acortará, mientras que la altura permanece igual. Por lo tanto, el observador reportará que la nave tiene la forma de un triángulo isósceles. Un observador que viaja con la nave todavía la observará como equilátera.

26.5 Cantidad de movimiento relativista

Describir adecuadamente el movimiento de partículas dentro del marco conceptual de la relatividad especial requiere generalizar las leyes de movimiento de Newton y las definiciones de cantidad de movimiento y energía. Estas definiciones generalizadas se reducen a las definiciones clásicas (no relativistas) cuando v es mucho menor que c .

Primero, recuerde que la conservación de cantidad de movimiento afirma que, cuando dos objetos chocan, la cantidad de movimiento total del sistema permanece constante, suponiendo que los objetos están aislados y sólo reaccionan uno con el otro. Sin embargo, cuando tales colisiones se analizan desde marcos inerciales en movimiento rápido, se descubre que la cantidad de movimiento no se conserva si se usa la definición clásica de cantidad de movimiento, $p = mv$. Para tener conservación de cantidad de movimiento en todos los marcos inerciales, incluso aquellos que se muevan con una fracción considerable de c , la definición de cantidad de movimiento se debe modificar para leer

$$p \equiv \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma mv$$

[26.5]

◀ Cantidad de movimiento relativista

donde v es la velocidad de la partícula y m es su masa medida por un observador en reposo con respecto a la partícula. Observe que, cuando v es mucho menor que c , el denominador de la ecuación 26.5 tiende a 1, de modo que p tiende a mv . Por lo tanto, la ecuación relativista para la cantidad de movimiento se reduce a la expresión clásica cuando v es pequeña en comparación con c .

■ EJEMPLO 26.3 Cantidad de movimiento relativista de un electrón

OBJETIVO Contrastar las definiciones clásica y relativista de la cantidad de movimiento.

PROBLEMA Un electrón, que tiene una masa de 9.11×10^{-31} kg, se mueve con una velocidad de $0.750c$. Encuentre la cantidad de movimiento clásica (no relativista) y compárela con su contraparte relativista p_{rel} .

ESTRATEGIA Sustituya en la definición clásica para obtener la cantidad de movimiento clásica y luego multiplique por el factor gamma para obtener la versión relativista.

SOLUCIÓN

Primero, calcule la cantidad de movimiento clásica (no relativista) con $v = 0.750c$:

$$\begin{aligned} p &= mv = (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.750 \times 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) \\ &= 2.05 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

Multiplique este resultado por γ para obtener la cantidad de movimiento relativista:

$$\begin{aligned} p_{\text{rel}} &= \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2.05 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{\sqrt{1 - (0.750c/c)^2}} \\ &= 3.10 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

COMENTARIOS El resultado relativista (correcto) es 50% mayor que el resultado clásico. En cálculos posteriores no se hará distinción de notación entre la cantidad de movimiento clásica y la relativista. Para problemas que involucren velocidades relativas de $0.2c$, la respuesta que usa la expresión clásica está aproximadamente 2% abajo de la respuesta correcta.

PREGUNTA 26.3 Una partícula con cantidad de movimiento inicial p_i duplica su velocidad. ¿Cómo se compara su cantidad de movimiento final p_f con su cantidad de movimiento inicial? a) $p_f > 2p_i$ b) $p_f = 2p_i$ c) $p_f < 2p_i$

EJERCICIO 26.3 Repita el cálculo para un protón que viaja a $0.600c$.

RESPUESTAS $p = 3.01 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, $p_{\text{rel}} = 3.76 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial

En la relatividad galileana, si un hombre en una nave espacial que viaja a una velocidad v ilumina hacia adelante con un rayo láser, el haz de luz se esperaría que viajara a una velocidad $c + v$ con respecto a un observador en la Tierra. El resultado nulo del experimento de Michelson-Morley, sin embargo, indica que la luz del láser seguirá viajando a la velocidad c con respecto a que un mismo observador, a pesar de los aumentos de frecuencia de la luz. (Cuando se aumenta la frecuencia de la luz, se dice que la luz “cambió a azul”. Cuando la frecuencia disminuye, se dice que la luz se “cambió a rojo”.) Evidentemente, alguna fórmula nueva debe ser deducida para permitir la comparación de las velocidades por observadores que se mueven a altas velocidades relativistas.

El procedimiento es muy similar al utilizado en el capítulo 3 para la velocidad relativa no relativista. Aquí, un observador en una nave espacial será etiquetado como B y T el observador en la Tierra, con B moviéndose en la dirección x positiva a velocidad v_{BT} con respecto al observador T en la Tierra. El objetivo es encontrar la relación entre sus mediciones independientes de un objeto A. Dada v_{AT} , la velocidad de A de acuerdo con el observador T, ¿cuál es la velocidad v_{AB} de A, con respecto al observador B? De acuerdo con la relatividad galileana, la respuesta deducida en el capítulo 3 es

Velocidad relativa en la relatividad galileana ▶

$$v_{AB} = v_{AT} - v_{BT} \quad [26.6]$$

Para velocidades aproximadas a 10% o más de la velocidad de la luz, la expresión que relaciona correctamente las velocidades relativas es²

Velocidad relativa en la relatividad especial ▶

$$v_{AB} = \frac{v_{AT} - v_{BT}}{1 - \frac{v_{AT}v_{BT}}{c^2}} \quad [26.7]$$

Observe que cuando v_{AT} o v_{BT} es mucho menor que c , esta expresión concuerda con la relación galileana (no relativista), como debe ser. La ecuación 26.7 es útil para determinar la velocidad medida por B, en el marco de referencia en movimiento cuando se conoce la velocidad medida por el observador T en el marco de reposo. Por otro lado, cuando la velocidad en cuestión es medida por el observador B y la tarea es encontrar la velocidad medida por el observador T, la ecuación 26.7 debe ser resuelta de forma algebraica para v_{AT} . La expresión resultante es

Suma relativista de velocidades ▶

$$v_{AT} = \frac{v_{AB} + v_{BT}}{1 + \frac{v_{AB}v_{BT}}{c^2}} \quad [26.8]$$

Haciendo caso omiso de la expresión en el denominador, la ecuación 26.8 tiene la forma esperada: si el observador B se está moviendo con respecto al observador T a una velocidad v_{BT} y dispara un proyectil con velocidad v_{AB} relativa a sí mismo, entonces, sumar v_{AB} y v_{BT} debe dar la velocidad v_{AT} del proyectil, como la midió el observador en la Tierra. La relatividad especial aporta el denominador de la ecuación 26.8, una ecuación que a menudo se llama suma relativista de velocidades.

Mediante la ecuación 26.8 puede calcularse la velocidad de un objeto proyectado hacia adelante desde un vehículo en movimiento, medida por un observador en la Tierra. Suponga, por ejemplo, que el observador B se mueve a v_{BT} con respecto al observador en la Tierra y dirige el haz de un láser en el frente de su nave espacial que se mueve rápidamente. Aquí v_{AB} es la velocidad de la luz relativa al observador B en la nave espacial. La velocidad de la luz v_{AT} , medida por el observador en la Tierra es, por lo tanto,

² La deducción de la ecuación 26.7 requiere el uso de las transformaciones de Lorentz y no se presentarán en este libro de texto.

$$v_{AT} = \frac{v_{AB} + v_{BT}}{1 + \frac{v_{AB}v_{BT}}{c^2}} = \frac{c + v_{BT}}{1 + \frac{cv_{BT}}{c^2}} = \frac{c \left(1 + \frac{v_{BT}}{c}\right)}{1 + \frac{v_{BT}}{c}} = c$$

Este cálculo muestra que la transformación de la velocidad es coherente con el resultado experimental demostrando que la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores.

■ EJEMPLO 26.4 ¡Se necesita con urgencia una corrección del curso!

OBJETIVO Aplicar el concepto de velocidad relativa de la relatividad.

PROBLEMA Suponga que la nave espacial de Alicia viaja a $0.600c$ en el sentido positivo del eje x , medido por un observador en la Tierra cercano al reposo, mientras que Roberto viaja en su propio vehículo directamente hacia Alicia en la dirección x negativa a velocidad $-0.800c$ relativa al mismo observador en la Tierra. ¿Cuál es la velocidad de Alicia de acuerdo con Roberto?

ESTRATEGIA La nave espacial de Alicia es el objeto de interés que tanto el observador en la Tierra y Roberto están siguiendo. Nos dan las mediciones de la velocidad del observador en la Tierra y se desea encontrar la medición de Roberto. Utilice la ecuación de la velocidad relativa de la relatividad, la ecuación 26.7, con v_{AT} correspondiente a la medición de la velocidad de Alicia hecha por Roberto y v_{AB} la medición de la velocidad de Alicia de acuerdo con el observador en la Tierra. Tenga en cuenta que la velocidad del marco de referencia de Roberto está en la dirección x negativa, por lo que $v_{BT} < 0$.

SOLUCIÓN

Escriba la ecuación 26.7:

$$v_{AB} = \frac{v_{AT} - v_{BT}}{1 - \frac{v_{AT}v_{BT}}{c^2}}$$

Sustituya valores:

$$v_{AB} = \frac{0.600c - (-0.800c)}{1 - \frac{(0.600c)(-0.800c)}{c^2}} = \frac{1.400c}{1 - (-0.480)} = 0.946c$$

COMENTARIOS Observe que se tuvo cuidado de utilizar los signos correctos. El sentido común nos podría llevar a creer que Roberto mediría la velocidad de Alicia como $1.40c$, pero como el cálculo muestra, Roberto mide la velocidad de Alicia como menor que la de la luz.

PREGUNTA 26.4 ¿Cuál es la velocidad de Roberto de acuerdo con Alicia?

EJERCICIO 26.4 Suponga que otro observador, Raymundo, informa que la velocidad de Alicia es sólo $0.400c$. ¿Cuál es la velocidad de Raymundo de acuerdo con el observador en la Tierra?

RESPUESTA $0.263c$

26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía

Ya vimos que la definición de cantidad de movimiento requiere la generalización para hacerla compatible con el principio de relatividad. Del mismo modo, la definición de energía cinética requiere una modificación en la mecánica relativista. Einstein encontró que la expresión correcta para la **energía cinética** de un objeto es

$$EC = \gamma mc^2 - mc^2 \quad [26.9] \quad \leftarrow \text{Energía cinética}$$

El término constante mc^2 en la ecuación 26.9, que es independiente de la velocidad del objeto, se llama **energía en reposo** del objeto, E_R :

$$E_R = mc^2 \quad [26.10] \quad \leftarrow \text{Energía en reposo}$$

El término γmc^2 en la ecuación 26.9 depende de la velocidad del objeto y es la suma de las energías cinética y en reposo. El término γmc^2 se define como la **energía total** E , de modo que

$$\text{Energía total} = \text{energía cinética} + \text{energía en reposo}$$

o, con la ecuación 26.9,

$$E = EC + mc^2 = \gamma mc^2 \quad [26.11]$$

Puesto que $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, la energía total E también se puede expresar como

Energía total ▶

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad [26.12]$$

Ésta es la famosa ecuación de equivalencia masa-energía de Einstein.³

La relación $E = \gamma mc^2 = EC + mc^2$ muestra el sorprendente resultado de que **una partícula estacionaria con energía cinética cero tiene una energía proporcional a su masa**. Más aún, una pequeña masa corresponde a una enorme cantidad de energía porque la constante de proporcionalidad entre masa y energía es grande: $c^2 = 9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$. La ecuación $E_R = mc^2$, como primero sugirió Einstein, indirectamente implica que la masa de una partícula puede convertirse por completo en energía y que esa energía es pura, por ejemplo energía electromagnética, se puede convertir a partículas que tengan masa. De hecho éste es el caso, como se demostró en el laboratorio muchas veces en interacciones que involucran materia y antimateria.

A gran escala, las plantas de energía nuclear producen energía por la fisión de uranio, que involucra la conversión en energía de una pequeña cantidad de masa del uranio. El Sol, también, convierte masa en energía y continuamente pierde masa al emanar una tremenda cantidad de energía electromagnética en todas direcciones.

Es extremadamente interesante que, aunque se habló acerca de la interconversión de masa y energía para partículas, la expresión $E = mc^2$ es universal y se aplica a todos los objetos, procesos y sistemas: un objeto caliente tiene ligeramente más masa y es ligeramente más difícil de acelerar que un objeto idéntico frío porque tiene más energía térmica y un resorte estirado tiene más energía potencial elástica y más masa que un resorte idéntico no estirado. Sin embargo, un punto clave es que estos cambios en masa en ocasiones son mucho muy pequeños para medir. La mejor apuesta para medir cambios de masa está en las transformaciones nucleares, donde una fracción mensurable de la masa se convierte en energía.

■ Examen rápido

26.6 Verdadero o Falso: Puesto que la velocidad de una partícula no puede exceder la velocidad de la luz, hay un límite superior a su cantidad de movimiento y energía cinética.

Energía y cantidad de movimiento relativista

Con frecuencia se mide la cantidad de movimiento o la energía de una partícula, en lugar de su velocidad, de modo que es útil encontrar una expresión que relacione la energía total E con la cantidad de movimiento relativista p . Esto se puede hacer al usar la expresión $E = \gamma mc^2$ y $p = \gamma mv$. Al elevar al cuadrado estas ecuaciones y restar, se puede eliminar v . El resultado, después de algo de álgebra, es

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2 \quad [26.13]$$

Cuando la partícula está en reposo, $p = 0$, de modo que $E = E_R = mc^2$. En este caso especial, la energía total es igual a la energía en reposo. Para el caso de partículas que tienen masa cero, como los fotones (partículas de luz sin masa ni carga), se hace $m = 0$ en la ecuación 26.10 y se encuentra que

$$E = pc \quad [26.14]$$

Esta ecuación es una expresión exacta que relaciona la energía y cantidad de movimiento para los fotones, que siempre viajan a la velocidad de la luz.

³Aunque esta expresión no parece exactamente como la famosa ecuación $E = mc^2$, suele ser común escribir $m = \gamma m_0$ (el mismo Einstein lo escribió de esta forma), donde m es la masa efectiva de un objeto que se mueve con velocidad v y m_0 es la masa de dicho objeto medida por un observador en reposo con respecto al objeto. Entonces $E = \gamma mc^2$ se convierte en la conocida $E = m_0 c^2$. En la actualidad está pasado de moda usar $m = \gamma m_0$.

Al tratar con partículas subatómicas, es conveniente expresar su energía en electrón-volts (eV) porque las partículas reciben energía cuando se aceleran a través de la diferencia de potencial electrostático. El factor de conversión es

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Por ejemplo, la masa de un electrón es $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$. En consecuencia, la energía en reposo del electrón es

$$m_e c^2 = (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 8.20 \times 10^{-14} \text{ J}$$

Al convertir a eV se tiene

$$m_e c^2 = (8.20 \times 10^{-14} \text{ J})(1 \text{ eV}/1.60 \times 10^{-19} \text{ J}) = 0.511 \text{ MeV}$$

donde $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$. Puesto que frecuentemente se usa la expresión $E = \gamma m c^2$ en física nuclear y puesto que m por lo general está en unidades de masa atómica, u, es útil tener el factor de conversión $1 \text{ u} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$. Usar este factor facilita, por ejemplo, encontrar la energía en reposo en MeV del núcleo de un átomo de uranio con una masa de $235.043\,924 \text{ u}$:

$$E_R = m c^2 = (235.043\,924 \text{ u})(931.494 \text{ MeV}/\text{u} \cdot c^2)(c^2) = 2.189\,42 \times 10^5 \text{ MeV}$$

Examen rápido

26.7 Un fotón se refleja desde un espejo. Verdadero o Falso: a) Puesto que un fotón tiene masa cero, no ejerce fuerza sobre el espejo. b) Aunque el fotón tiene energía, no puede transferir energía alguna a la superficie porque tiene masa cero. c) El fotón lleva cantidad de movimiento y, cuando se refleja del espejo, experimenta un cambio en cantidad de movimiento y ejerce una fuerza sobre el espejo. d) Aunque el fotón lleva cantidad de movimiento, su cambio en cantidad de movimiento es cero cuando se refleja del espejo, de modo que no puede ejercer una fuerza sobre el espejo.

EJEMPLO 26.5 Un electrón rápido

OBJETIVO Calcular una energía total y una energía cinética relativista.

PROBLEMA Un electrón se mueve con una velocidad $v = 0.850c$. Encuentre su energía total y energía cinética en mega-electrón-volts (MeV) y compare la última con la energía cinética clásica ($10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$).

ESTRATEGIA Sustituya en la ecuación 26.12 para obtener la energía total y reste la energía de la masa en reposo para obtener la energía cinética.

SOLUCIÓN

Sustituya valores en la ecuación 26.12 para obtener la energía total:

$$\begin{aligned} E &= \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{\sqrt{1 - (0.850c/c)^2}} \\ &= 1.56 \times 10^{-13} \text{ J} = (1.56 \times 10^{-13} \text{ J}) \left(\frac{1.00 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \\ &= \mathbf{0.975 \text{ MeV}} \end{aligned}$$

La energía cinética se obtiene al restar la energía en reposo de la energía total:

$$EC = E - m_e c^2 = 0.975 \text{ MeV} - 0.511 \text{ MeV} = \mathbf{0.464 \text{ MeV}}$$

Calcule la energía cinética clásica:

$$\begin{aligned} EC_{\text{clásica}} &= \frac{1}{2} m_e v^2 \\ &= \frac{1}{2} (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.850 \times 3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 2.96 \times 10^{-14} \text{ J} = 0.185 \text{ MeV} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Advierta la gran discrepancia entre la energía cinética relativista y la energía cinética clásica.

(continúa)

PREGUNTA 26.5 De acuerdo con un observador, la velocidad v de una partícula con energía cinética EC_i aumenta a $2v$. ¿Cómo se compara la energía cinética final EC_f con la energía cinética inicial? a) $EC_f > 4EC_i$ b) $EC_f = 4EC_i$ c) $EC_f < 4EC_i$

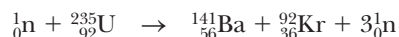
EJERCICIO 26.5 Calcule la energía total y la energía cinética en MeV de un protón que viaja a $0.600c$. (La energía en reposo de un protón es aproximadamente 938 MeV.)

RESPUESTAS $E = 1.17 \times 10^3$ MeV, $EC = 2.3 \times 10^2$ MeV

■ EJEMPLO 26.6 Conversión de masa a energía cinética en la fisión de uranio

OBJETIVO Comprender la producción de energía de fuentes nucleares.

PROBLEMA La fisión o división del uranio la descubrió Lise Meitner en 1938, quien interpretó exitosamente algunos resultados experimentales curiosos descubiertos por Otto Hahn como debidos a la fisión. (Hahn recibió el Premio Nobel.) La fisión de ${}^{235}_{92}\text{U}$ comienza con la absorción de un neutrón de movimiento lento que produce un núcleo inestable de ${}^{236}\text{U}$. El núcleo ${}^{236}\text{U}$ decae rápidamente en dos fragmentos pesados que se mueven a alta velocidad, así como muchos neutrones. La mayor parte de la energía cinética liberada en tal fisión se libera mediante dos fragmentos grandes. **a)** Para el proceso de fisión típico,



calcule la energía cinética en MeV que se libera mediante los fragmentos de fisión y desprecie la energía cinética de los reactantes. **b)** ¿Qué porcentaje de la energía inicial se convierte en energía cinética? Las masas atómicas involucradas, dadas en unidades de masa atómica, son

$$\begin{aligned} {}_0^1\text{n} &= 1.008665 \text{ u} & {}_{92}^{235}\text{U} &= 235.043923 \text{ u} \\ {}_{56}^{141}\text{Ba} &= 140.903496 \text{ u} & {}_{36}^{92}\text{Kr} &= 91.907936 \text{ u} \end{aligned}$$

ESTRATEGIA Este problema es una aplicación de la conservación de energía relativista. Escriba la ley de conservación como una suma de energía cinética y energía en reposo, y resuelva para la energía cinética final.

SOLUCIÓN

a) Calcule la energía cinética final para el proceso dado.

Aplice la ecuación de conservación de energía relativista y suponga $EC_{\text{inicial}} = 0$:

Resuelva para EC_{final} y sustituya, convierta a MeV en el último paso:

$$\begin{aligned} (EC + mc^2)_{\text{inicial}} &= (EC + mc^2)_{\text{final}} \\ 0 + m_{\text{n}}c^2 + m_{\text{U}}c^2 &= m_{\text{Ba}}c^2 + m_{\text{Kr}}c^2 + 3m_{\text{n}}c^2 + EC_{\text{final}} \\ EC_{\text{final}} &= [(m_{\text{n}} + m_{\text{U}}) - (m_{\text{Ba}} + m_{\text{Kr}} + 3m_{\text{n}})]c^2 \\ EC_{\text{final}} &= (1.008665 \text{ u} + 235.043923 \text{ u})c^2 \\ &\quad - [140.903496 \text{ u} + 91.907936 \text{ u} + 3(1.008665 \text{ u})]c^2 \\ &= (0.215161 \text{ u})(931.494 \text{ MeV/u} \cdot c^2)(c^2) \\ &= \mathbf{200.421 \text{ MeV}} \end{aligned}$$

b) ¿Qué porcentaje de la energía inicial se convierte en energía cinética?

Calcule la energía total, que es la energía inicial:

$$\begin{aligned} E_{\text{inicial}} &= 0 + m_{\text{n}}c^2 + m_{\text{U}}c^2 \\ &= (1.008665 \text{ u} + 235.043923 \text{ u})c^2 \\ &= (236.05259 \text{ u})(931.494 \text{ MeV/u} \cdot c^2)(c^2) \\ &= 2.19882 \times 10^5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

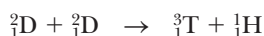
Divida la energía cinética entre la energía total y multiplique por 100%:

$$\frac{200.421 \text{ MeV}}{2.19882 \times 10^5 \text{ MeV}} \times 100\% = \mathbf{9.115 \times 10^{-2}\%}$$

COMENTARIOS Este cálculo demuestra que las reacciones nucleares liberan sólo aproximadamente un décimo de 1% de la energía en reposo de las partículas constituyentes. Algunas reacciones de fusión resultan en una producción porcentual muchas veces mayor.

PREGUNTA 26.6 ¿Por qué tan poca masa se convierte en otras formas de energía?

EJERCICIO 26.6 En una reacción de fusión, elementos ligeros se combinan para formar un elemento más pesado. El deuterio, que también se llama hidrógeno pesado, tiene un neutrón adicional en su núcleo. Dos de estas partículas se pueden fusionar en una forma más pesada de hidrógeno, llamada tritio, más un átomo de hidrógeno ordinario. La reacción es



a) Calcule la energía liberada en la forma de energía cinética, suponiendo por simplicidad que la energía cinética inicial es cero. b) ¿Qué porcentaje de la masa en reposo se convierte en energía? Las masas atómicas involucradas son

$${}^2_1\text{D} = 2.014102 \text{ u} \quad {}^3_1\text{T} = 3.016049 \text{ u} \quad {}^1_1\text{H} = 1.007825 \text{ u}$$

RESPUESTAS a) 4.03337 MeV b) 0.1075%

26.8 Relatividad general

La relatividad especial relaciona observaciones de observadores inerciales. Einstein vislumbró una teoría más general que abordaría sistemas acelerados. Su búsqueda estuvo motivada en parte por el siguiente hecho curioso: la masa determina la inercia de un objeto y también la fuerza del campo gravitacional. La masa involucrada en la inercia se llama masa inercial, m_i , mientras que la masa responsable por el campo gravitacional se llama masa gravitacional, m_g . Estas masas aparecen en la ley de gravitación y en la segunda ley de movimiento de Newton:

$$\text{Propiedad gravitacional} \quad F_g = G \frac{m_g m'_g}{r^2}$$

$$\text{Propiedad inercial} \quad F_i = m_i a$$

El valor para la constante gravitacional G se eligió para hacer las magnitudes de m_g y m_i numéricamente iguales. Sin embargo, sin importar cómo se elija G , la estricta proporcionalidad de m_g y m_i se estableció de manera experimental a un grado extremadamente alto: pocas partes en 10^{12} . Parece que la masa gravitacional y la masa inercial de hecho pueden ser exactamente iguales: $m_i = m_g$.

En la visión de Einstein, la notable coincidencia de que m_g y m_i fuesen exactamente iguales era evidencia de una íntima conexión entre los dos conceptos. Él puntualizó que ningún experimento mecánico (como liberar una masa) podría distinguir entre las dos situaciones que se ilustran en las figuras 26.10a y 26.10b. En cada caso una masa liberada por el observador experimenta una aceleración descendente de g en relación con el suelo.

Einstein llevó esta idea más allá y propuso que *ningún* experimento, mecánico o de otro tipo, podría distinguir entre los dos casos. Esta extensión para incluir todos los fenómenos

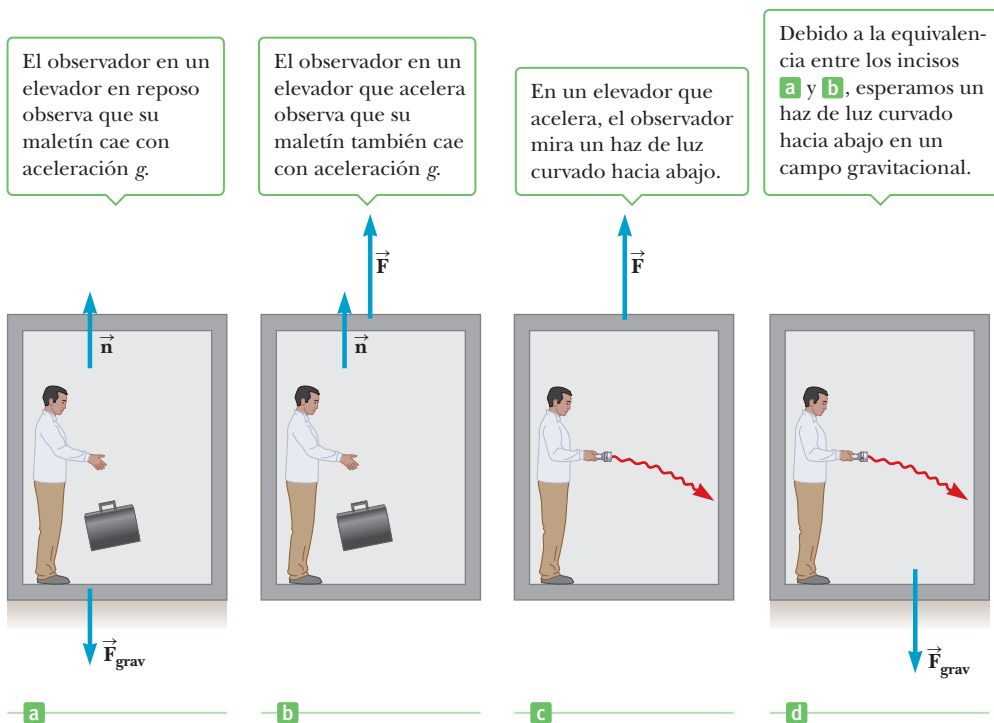


Figura 26.10 a) El observador en el cubículo está en reposo en un campo gravitacional uniforme \vec{g} . Él experimenta una fuerza normal \vec{n} . b) Ahora el observador está en una región donde la gravedad es despreciable, pero una fuerza externa \vec{F} actúa sobre el marco de referencia, lo que produce una aceleración con magnitud g . De nuevo, el hombre experimenta una fuerza normal \vec{n} que lo acelera junto con el cubículo. De acuerdo con Einstein, los marcos de referencia en a) y b) son equivalentes en todos los aspectos. Ningún experimento local podría distinguir entre ellos. c) El observador enciende su linterna de bolsillo. Debido a la aceleración del cubículo, el haz parecería doblarse hacia el suelo, como lo haría una bola lanzada. d) Dada la equivalencia de los marcos, el mismo fenómeno se observaría en presencia de un campo de gravedad.

(no sólo los mecánicos) tiene interesantes consecuencias. Por ejemplo, suponga que un haz de luz se envía horizontalmente a través de la caja, como en la figura 26.10c. La trayectoria del haz de luz se dobla hacia abajo conforme el elevador acelera hacia arriba para encontrarlo. Einstein propuso que el haz de luz también debería doblarse hacia abajo mediante un campo gravitacional (figura 26.10d).

Los dos postulados de la **relatividad general** de Einstein son los siguientes:

1. Todas las leyes de la naturaleza tienen la misma forma para observadores en cualquier marco de referencia, acelerado o no.
2. En la vecindad de cualquier punto dado, un campo gravitacional es equivalente a un marco de referencia acelerado sin un campo gravitacional. (Éste es el *principio de equivalencia*.)

El segundo postulado implica que la masa gravitacional y la masa inercial son completamente equivalentes, no sólo proporcionales. Lo que se creía eran dos tipos diferentes de masa en realidad son idénticas.

Un efecto interesante predicho por la relatividad general es que las escalas de tiempo son alteradas por la gravedad. Un reloj en presencia de gravedad corre más lentamente que uno en el que la gravedad es despreciable. Como consecuencia, la luz emitida de los átomos en un intenso campo de gravedad, como el del Sol, se observa que tienen una frecuencia más baja que la misma luz emitida por los átomos en el laboratorio. Este corrimiento gravitacional se detectó en las líneas espectrales emitidas por los átomos en estrellas masivas. También se verificó en la Tierra al comparar las frecuencias de los rayos gamma emitidos de núcleos separados verticalmente por aproximadamente 20 m.

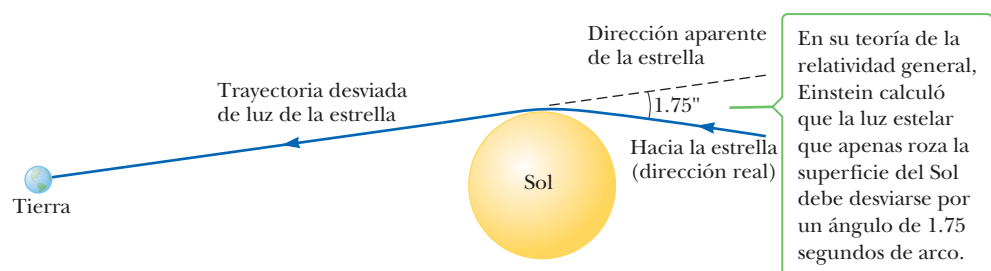
El segundo postulado sugiere que un campo gravitacional se puede “transformar” en cualquier punto si se elige un marco de referencia acelerado adecuado: uno que cae libremente. Einstein desarrolló un ingenioso método para describir la aceleración necesaria para hacer “desaparecer” el campo gravitacional. Él especificó cierta cantidad, la *curvatura del espacio-tiempo*, que describe el efecto gravitacional en todo punto. De hecho, la curvatura del espacio-tiempo sustituye por completo la teoría gravitacional de Newton. De acuerdo con Einstein, no hay una cosa tal como una fuerza gravitacional. En vez de ello, la presencia de una masa causa una curvatura del espacio-tiempo en la vecindad de la masa. Los planetas que giran alrededor del Sol siguen el contorno natural del espacio-tiempo, en forma muy parecida a canicas que ruedan dentro de un tazón. La ecuación fundamental de la relatividad general se puede establecer burdamente como una proporción del modo siguiente:

$$\text{Curvatura promedio de espacio-tiempo} \propto \text{densidad de energía}$$

Einstein buscó una nueva teoría de la gravedad en gran parte debido a una discrepancia en la órbita de Mercurio como se calcula a partir de la segunda ley de Newton. El máximo acercamiento de Mercurio al Sol, llamado perihelio, cambia lentamente de posición con el tiempo. La teoría de Newton explica todo, menos 43 segundos de arco por siglo; la relatividad general de Einstein explicaba la discrepancia.

La prueba más espectacular de la relatividad general llegó poco después del fin de la Primera Guerra Mundial. La teoría de Einstein predecía que una estrella desviaría un rayo de luz en cierta cantidad precisa. Sir Arthur Eddington montó una expedición a África y, durante un eclipse solar, confirmó que la luz estelar se desvía al pasar el Sol en una cantidad que coincidía con la predicción de la relatividad general (figura 26.11). Cuando este descubrimiento se anunció, Einstein se convirtió en celebridad internacional.

Figura 26.11 Desviación de luz estelar que pasa cerca del Sol. Debido a este efecto, el Sol y otros objetos remotos pueden actuar como *lentes gravitacionales*.



La relatividad general también predice que una gran estrella puede agotar su combustible nuclear y colapsar a un volumen muy pequeño, y convertirse en un **hoyo negro**. Aquí la curvatura del espacio-tiempo es tan extrema que toda la materia y la luz dentro de cierto radio quedan atrapadas. Este radio, llamado *radio de Schwarzschild* u *horizonte de eventos*, tiene aproximadamente 3 km para un hoyo negro con la masa del Sol. En el centro del hoyo negro puede merodear una *singularidad*, un punto de densidad infinita y curvatura donde el espacio-tiempo llega a un fin.

Existe fuerte evidencia para la existencia de un hoyo negro que tiene una masa de millones de soles en el centro de la galaxia.

■ FÍSICA APLICADA 26.1 Relojes más rápidos en una "ciudad de una milla de alto"

Los relojes atómicos son extremadamente precisos; de hecho, un error de 1 s en 3 millones de años es típico. Este error se puede describir como aproximadamente una parte en 10^{14} . Por otra parte, el reloj atómico en Boulder, Colorado, con frecuencia es 15 ns más rápido que el reloj atómico en Washington, D. C., después de sólo un día. Este error es aproximadamente una parte en 6×10^{12} , que es más o menos 17 veces mayor que el error típico. Si los relojes atómicos son tan precisos, ¿por qué un reloj en Boulder no permanece sincronizado con uno en Washington, D. C.?

EXPLICACIÓN De acuerdo con la teoría de la relatividad general, el paso del tiempo depende de la gravedad: los relojes corren más lentamente en fuertes campos gravitacionales. Washington, D. C., está a una elevación muy cercana a nivel del mar, mientras que Boulder está aproximadamente una milla más arriba en altitud, de modo que el campo gravitacional en Boulder es más débil que en Washington, D. C. Como resultado, un reloj atómico corre más rápidamente en Boulder que en Washington, D. C. (Este efecto se comprobó mediante experimentos.) ■

■ RESUMEN

26.3 Principio de relatividad de Einstein

Los dos postulados básicos de la **teoría de la relatividad especial** son los siguientes:

1. Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales.
2. La velocidad de la luz es la misma para todos los observadores inerciales, independientemente de su movimiento o del movimiento de la fuente de luz.

26.4 Consecuencias de la relatividad especial

Algunas de las consecuencias de la teoría de la relatividad especial son las siguientes:

1. Los relojes en movimiento relativo a un observador dilatan, un fenómeno conocido como **dilatación del tiempo**. La relación entre intervalos en los sistemas en movimiento y en reposo es

$$\Delta t = \gamma \Delta t_p \quad [26.2]$$

donde Δt es el tiempo medido en el sistema en movimiento relativo con respecto al reloj,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad [26.3]$$

y Δt_p es el intervalo propio medido en el sistema que se mueve con el reloj.

2. La longitud de un objeto en movimiento se *contrae* en la dirección de movimiento. La ecuación para la **contracción de la longitud** es

$$L = L_p \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad [26.4]$$

donde L es la longitud medida por un observador en movimiento en relación con el objeto y L_p es la longitud

propia medida por un observador para quien el objeto está en reposo.

3. Los eventos que son simultáneos para un observador no son simultáneos para otro observador en movimiento relativo con el primero.

26.5 Cantidad de movimiento relativista

La expresión relativista para la **cantidad de movimiento** de una partícula que se mueve con velocidad v es

$$p \equiv \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma mv \quad [26.5]$$

26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial

Cuando los observadores T y B están en movimiento relativo, medirán velocidades diferentes para un tercer objeto. Esas medidas están relacionadas por

$$v_{AB} = \frac{v_{AT} - v_{BT}}{1 - \frac{v_{AT}v_{BT}}{c^2}} \quad [26.7]$$

A bajas velocidades relativas en comparación con la de la luz, esta expresión está de acuerdo con la forma galileana, la ecuación 26.6. La ecuación 26.7 se puede invertir para obtener la ecuación de la suma de velocidades relativistas:

$$v_{AT} = \frac{v_{AB} + v_{BT}}{1 + \frac{v_{AB}v_{BT}}{c^2}} \quad [26.8]$$

La ecuación 26.8 nos da la respuesta intuitiva de acuerdo con la experiencia cotidiana, cuando $v \ll c$ (es decir, $v_{AT} = v_{AB} + v_{BT}$).

26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía

La expresión relativista para la **energía cinética** de un objeto es

$$EC = \gamma mc^2 - mc^2 \quad [26.9]$$

donde mc^2 es la **energía en reposo** del objeto, E_R .

La **energía total** de una partícula es

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad [26.12]$$

Ésta es la famosa ecuación de equivalencia masa-energía de Einstein que resulta cuando $v = 0$.

La cantidad de movimiento relativista se relaciona con la energía total a través de la ecuación

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2 \quad [26.13]$$

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- ¿Cuál de los siguientes enunciados son postulados fundamentales de la teoría de la relatividad especial? a) La luz se mueve a través de una sustancia llamada éter. b) La velocidad de la luz depende del marco de referencia inercial en el cual se mide. c) Las leyes de la física dependen del marco de referencia inercial en el cual se usan. d) Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales. e) La velocidad de la luz es independiente del marco de referencia inercial en el cual se mide.
- Una nave espacial se mueve a un cuarto la velocidad de la luz en relación con la Tierra en una dirección perpendicular a la línea de visión de un observador en reposo con respecto a la Tierra. Si la nave espacial tiene una longitud L cuando está en reposo, ¿cuál enunciado es cierto en cuanto a la longitud L' de la nave en movimiento, según mide el observador? a) $L' > L$ b) $L' > L$ c) $L' = L$ d) $L' \ll L$ e) $L' \gg L$
- Los faros de un automóvil se aproximan y un observador en el suelo mide la velocidad del haz de luz como $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. Conforme el conductor se dirige por la autopista con una velocidad v alejándose del observador en el suelo, ¿cuál de los siguientes enunciados son ciertos acerca de la velocidad medida del haz de luz? a) El observador en el suelo mide la velocidad de la luz como $c + v$. b) El conductor mide la velocidad de la luz como c . c) El observador en el suelo mide la velocidad de la luz como c . d) El conductor mide la velocidad de la luz como ligeramente menor que c . e) El observador en el suelo mide la velocidad de la luz como ligeramente menor que c .
- Un astronauta viaja en un cohete en el espacio exterior en línea recta con una velocidad constante de $0.5c$. ¿Cuál de los siguientes efectos experimentaría? a) Se sentiría más pesado. b) Tendría dificultades para respirar. c) Su ritmo cardíaco cambiaría. d) Algunas de sus dimensiones se acortarían. e) Ninguno de estos efectos ocurriría.
- Un péndulo en una nave espacial, que viaja por el espacio con una velocidad de $0.9c$ en relación con la Tierra, tiene un periodo P según mide un astronauta en la nave espacial. ¿Qué es cierto acerca del periodo T según mide un observador en Tierra? a) $P > T$ b) $P = T$ c) $P < T$ d) $P < T$ o $P > T$ dependiendo de la dirección de movimiento de la nave espacial e) Ninguno de éstos
- Un cubo medido en reposo tiene volumen V . Entonces un observador pasa el cubo paralelo a uno de sus lados a $0.98c$, de modo que $\gamma \approx 5$. ¿Cuál es el volumen del cubo medido por el observador en movimiento? a) $V/125$ b) $V/25$ c) $V/5$ d) V e) $5V$
- Suponga que un fotón, un protón y un electrón tienen todos la misma energía total E . Clasifique sus cantidades de movimiento de menor a mayor. a) fotón, electrón, protón b) protón, fotón, electrón c) electrón, fotón, protón d) electrón, protón, fotón e) protón, electrón, fotón
- Dos relojes idénticos se colocan uno al lado del otro y se sincronizan. Uno se queda en la Tierra. El otro es puesto en órbita alrededor de la Tierra moviéndose rápidamente hacia el este. Medido por un observador en la Tierra, ¿el reloj en órbita a) marcha más rápido que el reloj que está en la Tierra, b) marcha al mismo ritmo o c) marcha más lento?
- Un sistema masa-resorte que se mueve con movimiento armónico simple tiene un periodo T cuando lo mide un observador en tierra. Si luego el mismo sistema se coloca en un marco de referencia inercial que se mueve junto al observador en tierra con una velocidad de $0.50c$, ¿por qué factor se multiplicaría T para dar el periodo del sistema medido por el observador en tierra? a) 0.50 b) 0.87 c) 1.00 d) 1.15 e) 1.35
- Una nave espacial se aleja más allá de la Tierra con una velocidad constante. Un observador en la Tierra detecta que el tictac de un reloj en la nave espacial tiene una tercera parte de la velocidad de un reloj idéntico en la Tierra. ¿Cuál es la velocidad del tictac del reloj con sede en la Tierra medida por un observador en la nave espacial? a) Es más de tres veces más rápido que el de su reloj. b) Es tres veces más rápido que su reloj. c) Funciona a la misma velocidad que su reloj. d) Funciona a un tercio de la velocidad de su reloj. e) Es menos de un tercio de la velocidad de su reloj.
- Un objeto astronómico distante (un cuásar) se está alejando de nosotros a la mitad de la velocidad de la luz. ¿Cuál es la velocidad de la luz que recibimos de este cuásar? a) mayor que c b) c c) entre $c/2$ y c d) $c/2$ e) entre 0 y $c/2$

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una nave espacial con la forma de una esfera de diámetro D se mueve junto a un observador en la Tierra con una velocidad de $0.50c$. ¿Qué forma mide el observador para la nave espacial conforme pasa junto a él?
- ¿En cuáles dos mediciones siempre estarán de acuerdo dos observadores en movimiento relativo?
- La velocidad de la luz en el agua es 2.30×10^8 m/s. Suponga que un electrón se mueve a través de agua a 2.50×10^8 m/s. ¿La velocidad de esta partícula viola el principio de relatividad?
- Con respecto a los marcos de referencia, ¿cómo difiere la relatividad general de la relatividad especial?
- Dé un argumento físico que muestre que es imposible acelerar un objeto de masa m a la velocidad de la luz, incluso con una fuerza constante que actúa sobre él.
- Se dice que Einstein, en sus años de adolescencia, planteó la pregunta: “¿Qué vería en un espejo si lo llevo en mis manos y corro con una velocidad cercana a la de la luz?” ¿Cómo respondería esta pregunta?
- Mencione algunas formas en que su vida cotidiana cambiaría si la velocidad de la luz fuese sólo de 50 m/s.
- Dos relojes idénticamente contruidos se sincronizan. Uno se pone en órbita alrededor de la Tierra y el otro permanece en la Tierra. ¿Cuál reloj corre más lentamente? Cuando el reloj en movimiento regresa a la Tierra, ¿los dos relojes todavía estarán sincronizados? Analice desde el punto de vista tanto de la relatividad especial como de la relatividad general.
- Los fotones de luz tienen masa cero. ¿Cómo es posible que tengan cantidad de movimiento?
- Imagine un astronauta en un viaje a Sirio, que se encuentra a 8 años luz de la Tierra. Al llegar a Sirio, el astronauta encuentra que el viaje duró 6 años. Si el viaje se hizo con una velocidad constante de $0.8c$, ¿cómo se puede reconciliar la distancia de 8 años luz con la duración de 6 años?
- Explique por qué, al definir la longitud de una barra, es necesario precisar que las posiciones de los extremos de la barra se van a medir al mismo tiempo.

PROBLEMAS

ENHANCED

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

26.4 Consecuencias de la relatividad especial

- Si los astronautas pudieran viajar a $v = 0.950c$, usted en la Tierra diría que tarda $(4.20/0.950) = 4.42$ años en llegar a Alfa Centauri, a 4.20 años luz de distancia. Los astronautas están en desacuerdo. a) ¿Cuánto tiempo pasa en los relojes de los astronautas? b) ¿Cuál es la distancia a Alfa Centauri según miden los astronautas?
- C/C** Una regla que se mueve a $0.900c$ en relación con la Tierra se aproxima a un observador en reposo con respecto a la Tierra. a) ¿Cuál es la longitud de la regla, de acuerdo con el observador? b) Cualitativamente, ¿cómo cambiaría la respuesta si el observador se moviera en relación con la Tierra en la dirección opuesta?
- La longitud de una nave espacial en movimiento es 28.0 m de acuerdo con un astronauta en la nave espacial. Si la nave es contraída por 15.0 cm, según un observador en la Tierra, ¿cuál es la velocidad de la nave espacial?
- BIO** Un astronauta en reposo sobre la Tierra tiene un ritmo cardíaco de 70 latidos/min. Cuando el astronauta viaja en una nave espacial a $0.90c$, ¿cuál será este ritmo medido por a) un observador también en la nave y b) un observador en reposo en Tierra?
- M** La vida promedio de un mesón pi en su propio marco de referencia (es decir, el tiempo de vida propio) es 2.6×10^{-8} s. Si el mesón se mueve con una velocidad de $0.98c$, ¿cuál es a) su vida media medida por un observador en la Tierra y b) la distancia promedio que recorre antes de decaer, según mide un observador en Tierra? c) ¿Qué distancia recorrería si la dilatación del tiempo no ocurriera?
- BIO** Un astronauta viaja en un vehículo espacial que tiene una velocidad de $0.500c$ en relación con la Tierra. El astronauta mide su pulso en 75.0 por minuto. Señales generadas por el pulso del astronauta se radian a la Tierra cuando el vehículo se mueve de manera perpendicular a una línea que conecta el vehículo con un observador en Tierra. ¿Qué pulso mide el observador en la Tierra? ¿Cuál debería ser el pulso si la velocidad del vehículo espacial aumenta a $0.990c$?
- PG** Un muón que se forma alto en la atmósfera de la Tierra viaja hacia ella con una velocidad $v = 0.990c$ por

una distancia de 4.60 km según mide un observador en reposo con respecto a la Tierra. Luego decae en un electrón, un neutrino y un antineutrino. a) ¿Cuánto sobrevive el muón de acuerdo con un observador en reposo sobre la Tierra? b) Calcule el factor gamma asociado con el muón. c) ¿Cuánto tiempo transcurre de acuerdo con un observador que viaja con el muón? d) ¿Qué distancia recorre el muón de acuerdo con un observador que viaja con el muón? e) Un tercer observador que viaja hacia el muón a $c/2$ mide la vida de la partícula. De acuerdo con este observador, ¿la vida del muón es más corta o más larga que la vida medida por el observador en reposo con respecto a la Tierra? Explique.

8. Una sonda de espacio profundo se mueve alejándose de la Tierra con una velocidad de $0.80c$. Una antena en la sonda requiere 3.0 s, en tiempo sonda, para rotar a través de 1.0 rev. ¿Cuánto tiempo se requiere para 1.0 rev de acuerdo con un observador en la Tierra?
9. La longitud propia de una nave espacial es tres veces la de la otra. Las dos naves espaciales viajan en la misma dirección y, mientras ambas pasan sobre su cabeza, un observador en la Tierra mide que las dos naves espaciales tienen la misma longitud. Si la nave espacial más lenta tiene una velocidad de $0.350c$ con respecto a la Tierra, determine la velocidad de la nave espacial más rápida.
10. Un automóvil que viaja a 35.0 m/s tiene 26.0 minutos para recorrer una distancia determinada de acuerdo con el reloj del conductor en el coche. ¿Cuánto dura el viaje de acuerdo con un observador en reposo en la Tierra? *Sugerencia:* La siguiente aproximación es útil: $[1 - x]^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2}x$ para $x \ll 1$.

11. Un supertren con 100 m de longitud propia viaja con una velocidad de $0.95c$ mientras pasa a través de un túnel que tiene longitud propia de 50 m. Visto por un observador al lado de la pista, ¿el tren alguna vez está completamente adentro del túnel? Si es así, ¿durante cuánto tiempo?

12. Una caja es cúbica, con lados de longitudes propias $L_1 = L_2 = L_3$, como se muestra en la figura P26.12, cuando se ve en su propio marco en reposo. Si este bloque se mueve paralelo a uno de sus vértices con una velocidad de $0.80c$ junto a un observador, a) ¿qué forma parece tener para este observador? b) ¿Cuál es la longitud de cada lado según mide el observador?

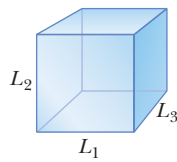


Figura P26.12

26.5 Cantidad de movimiento relativista

13. **CIC** Un electrón tiene una cantidad de movimiento con una magnitud tres veces la magnitud de su cantidad de movimiento clásica. a) Determine la velocidad del electrón. b) ¿Cómo cambiaría su resultado si la partícula fuera un protón?
14. **CIC** a) Calcule la cantidad de movimiento clásica de un protón que viaja a $0.990c$, desprece efectos relativistas. b) Repita el cálculo mientras incluye efectos relativistas. c) ¿Tiene sentido despreciar la relatividad a tales velocidades?
15. Una partícula inestable en reposo se rompe en dos fragmentos de *masas distintas*. La masa del fragmento más ligero es igual a 2.50×10^{-28} kg y la del fragmento más pesado es 1.67×10^{-27} kg. Si el fragmento más ligero tiene una

velocidad de $0.893c$ después del rompimiento, ¿cuál es la velocidad del fragmento más pesado?

26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial

16. Una nave espacial R se mueve hacia la derecha a una velocidad de $0.70c$ con respecto a la Tierra. Una segunda nave espacial, L , se mueve hacia la izquierda a la misma velocidad con respecto a la Tierra. ¿Cuál es la velocidad de L con respecto a R ?
17. Un electrón se mueve a la derecha con una velocidad de $0.90c$ relativa al marco del laboratorio. Un protón se mueve a la izquierda a una velocidad de $0.70c$ relativa al electrón. Encuentre la velocidad de los protones en relación con el marco del laboratorio.
18. Una nave espacial viaja a $0.750c$ relativa a la Tierra. Si la nave dispara un pequeño cohete en la dirección de avance, ¿con qué velocidad (en relación con la nave) debe ser disparado para viajar a $0.950c$ en relación a la Tierra?
19. Una nave espacial A se aleja de la Tierra a una velocidad de $0.800c$ (figura P26.19). La nave espacial B la persigue a una velocidad de $0.900c$ relativa a la Tierra. Observadores en la Tierra ven que B adelanta a A a una velocidad relativa de $0.100c$. ¿Con qué velocidad está superando B a A visto por la tripulación de la nave B ?

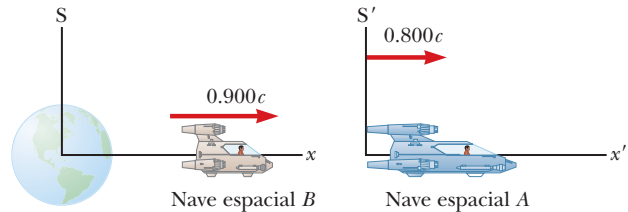


Figura P26.19

20. Un pulsar es un objeto estelar que emite luz en ráfagas cortas. Suponga que un pulsar con una velocidad de $0.950c$ se acerca a la Tierra y un cohete con una velocidad de $0.995c$ se dirige hacia el pulsar. (Ambas velocidades se miden en el marco de referencia de la Tierra.) Si el pulsar emite 10.0 pulsos por segundo en su propio marco de referencia, a qué velocidad son emitidos los impulsos en el marco de referencia del cohete?
21. **M** Un cohete se mueve a una velocidad de $0.92c$ a la derecha con respecto a un observador estacionario A . Un observador B que se mueve con respecto al observador A se encuentra con que el cohete se mueve con una velocidad de $0.95c$ hacia la izquierda. ¿Cuál es la velocidad del observador B en relación con el observador A ? (*Sugerencia:* Considere la velocidad del observador B en el marco de referencia del cohete.)

26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía

22. Un protón se mueve con una velocidad de $0.950c$. Calcule a) su energía en reposo, b) su energía total y c) su energía cinética.
23. Protones en un acelerador en el Laboratorio Nacional Fermi cerca de Chicago son acelerados a una energía total que es 400 veces su energía en reposo. a) ¿Cuál es la velocidad de los protones en términos de c ? b) ¿Cuál es su energía cinética en MeV?

24. **S** Un protón en un acelerador grande tiene una energía cinética de 175 GeV. a) Compare esta energía cinética con la energía en reposo del protón y encuentre una expresión aproximada para la energía cinética del protón. b) Determine la velocidad del protón.
25. ¿Qué velocidad debe lograr una partícula antes de que su energía cinética duplique el valor predicho por la expresión no relativista $EC = \frac{1}{2}mv^2$?
26. Determine la energía requerida para acelerar un electrón desde a) $0.500c$ hasta $0.900c$ y b) desde $0.900c$ hasta $0.990c$.
27. Una nave espacial de masa 2.40×10^6 kg se acelera a una velocidad de $0.700c$. a) ¿Qué cantidad mínima de energía requiere esta aceleración del combustible de la nave, suponiendo una eficiencia perfecta? b) ¿Cuánto combustible se necesita para proporcionar esta energía si toda la energía del combustible en reposo podría ser transformada en energía cinética de la nave espacial?
28. Una partícula inestable con una masa igual a 3.34×10^{-27} kg inicialmente está en reposo. La partícula decae en dos fragmentos que vuelan con velocidades de $0.987c$ y $-0.868c$, respectivamente. Encuentre las masas de los fragmentos. *Sugerencia:* Conserve tanto masa-energía como cantidad de movimiento.
29. **CIC** A partir de las definiciones de la energía y la cantidad de movimiento relativistas, demuestre que $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ (ecuación 26.10).
30. **PG** Considere la reacción ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{148}_{57}\text{La} + {}^{87}_{35}\text{Br} + {}^1_0\text{n}$
 a) Escriba la ecuación de conservación de energía relativista simbólicamente en términos de la energía en reposo y la energía cinética e iguale la energía total inicial con la energía total final. b) Con valores del apéndice B, encuentre la masa total de las partículas iniciales. c) Con los valores dados abajo, encuentre la masa total de las partículas después de que ocurre la reacción. d) Reste la masa de partícula final de la masa de partícula inicial. e) Convierta la respuesta al inciso d) a MeV y obtenga la energía cinética de las partículas hijas, desprece la energía cinética de los reactantes. *Nota:* Lantano-148 tiene masa atómica 147.932236 u; bromo-87 tiene masa atómica 86.9207119 u.

Problemas adicionales

31. Considere electrones acelerados a una energía total de 20.0 GeV en el Acelerador Lineal Stanford de 3.00 km de largo. a) ¿Cuál es el factor γ para los electrones? b) ¿Cuán largo parece el acelerador a los electrones? Masa energía del electrón: 0.511 MeV.
32. Un electrón tiene una velocidad de $0.750c$. a) Encuentre la velocidad de un protón que tiene la misma energía cinética que el electrón. b) Encuentre la velocidad de un protón que tenga la misma cantidad de movimiento que el electrón.
33. La energía en reposo de un electrón es 0.511 MeV. La energía en reposo de un protón es 938 MeV. Suponga que ambas partículas tienen energías cinéticas de 2.00 MeV. Encuentre la velocidad de a) el electrón y b) el protón. c) ¿En cuánto supera la velocidad del electrón la del protón? *Nota:* Realice los cálculos en MeV; no convierta las energías a joules. La respuesta es sensible a redondeo.

34. **CIC** Un resorte con constante de fuerza k se comprime una distancia x desde su longitud de equilibrio. a) ¿La masa del resorte cambia cuando el resorte se comprime? Explique. b) Encuentre una expresión para el cambio en masa del resorte en términos de k , x y c . b) ¿Cuál es el cambio en masa si la constante de fuerza es 2.0×10^2 N/m y $x = 15$ cm?
35. Una estrella está a 5.00 años luz de la Tierra. ¿A qué velocidad debe desplazarse una nave espacial en su viaje a la estrella de tal manera que la distancia Tierra-estrella medida en el marco de la nave es de 2.00 años luz?
36. Un electrón tiene una energía total igual a cinco veces su energía en reposo. a) ¿Cuál es su cantidad de movimiento? b) Repita para un protón.
37. **M** Un astronauta quiere visitar la galaxia Andrómeda, al realizar un viaje de ida que tardará 30.0 años en el marco de referencia de la nave espacial. Suponga que la galaxia está a 2.00 millones de años luz de distancia y que su velocidad es constante. a) ¿Cuán rápido debe viajar en relación con la Tierra? b) ¿Cuál será la energía cinética de su nave espacial, que tiene 1.00×10^6 kg de masa? c) ¿Cuál es el costo de esta energía si se compra a un precio típico de consumidor para energía eléctrica, de 13.0 centavos por kWh? La siguiente aproximación resultará útil:

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} \approx 1 - \frac{x}{2} \quad \text{para } x \ll 1$$

38. Un reloj de alarma se programa para sonar a las 10 h. En $t = 0$, el reloj se coloca en una nave espacial que se mueve con una velocidad de $0.75c$ (relativa a la Tierra). ¿Qué distancia, determinada por un observador en la Tierra, recorre la nave antes de que suene la alarma del reloj?
39. Osvaldo y Diana se encuentran en reposo en el sistema S' , que se mueve con una velocidad de $0.600c$ con respecto al sistema S . Ellos juegan un juego de captura, mientras que Eduardo, en reposo en el sistema S , observa la acción (figura P26.39). Osvaldo lanza la pelota a Diana con una velocidad de $0.800c$ (según Osvaldo) y su separación (medida en S') es igual a 1.80×10^{12} m. a) De acuerdo con Diana, ¿a qué velocidad se mueve la pelota? b) De acuerdo con Diana, ¿qué tiempo se requiere para que la pelota esté a su alcance? De acuerdo con Eduardo, c) ¿qué distancia separa a Osvaldo y Diana y d) ¿qué velocidad tiene la pelota en movimiento?

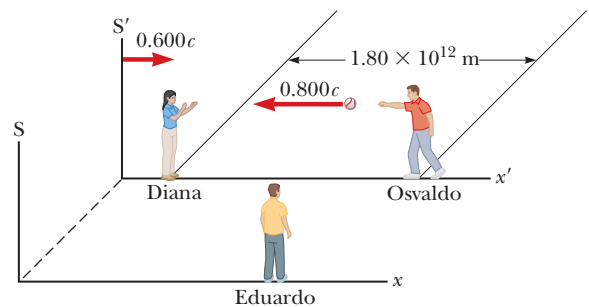


Figura P26.39

40. Un observador se mueve en una nave espacial hacia un espejo a velocidad v con respecto al marco de referencia marcado por S en la figura P26.40. El espejo es estacionario con respecto a S. Un haz de luz emitido por la nave espacial viaja hacia el espejo y se refleja de vuelta a la nave. Ésta se encuentra a una distancia d del espejo (según lo medido por los observadores en S) en el momento en que el haz de luz sale de la nave espacial. ¿Cuál es el tiempo total de viaje del pulso medido por los observadores en a) el sistema S y b) la nave espacial?

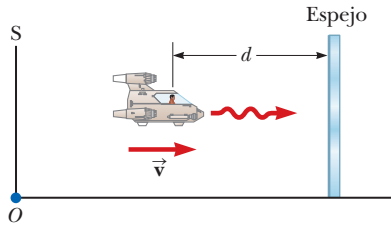


Figura P26.40

41. Una nave espacial, con longitud propia de 300 m, tarda $0.75 \mu\text{s}$ en pasar junto a un observador en la Tierra. Determine la velocidad de esta nave espacial medida por el observador en la Tierra.
42. Los rayos cósmicos de mayor energía son los protones que tienen energía cinética del orden de 10^{13} MeV. a) Desde el punto de vista del protón, ¿cuántos kilómetros tiene de diámetro la galaxia? b) ¿Cuánto tardaría un protón de esta energía en viajar a través de la Vía Láctea, que tiene un diámetro $\sim 10^5$ años luz, medido en el marco del protón?
43. **M** La expresión no relativista para la cantidad de movimiento de una partícula, $p = mv$, se puede usar si $v \ll c$. ¿Para qué velocidad el uso de esta fórmula da un error en la cantidad de movimiento de a) 1.00% y b) 10.0%?
44. a) Demuestre que una diferencia de potencial de 1.02×10^6 V sería suficiente para dar a un electrón una velocidad igual al doble de la velocidad de la luz si la mecánica newtoniana permanece válida a altas velocidades. b) ¿Qué velocidad realmente adquiriría un electrón al caer a través de una diferencia de potencial igual a 1.02×10^6 V?
45. El muón es una partícula inestable que espontáneamente decae en un electrón y dos neutrinos. En un marco de referencia en el cual el muón es estacionario, si el número de muones en $t = 0$ es N_0 , el número en el tiempo t está dado por $N = N_0 e^{-t/\tau}$, donde τ es el tiempo de vida medio, igual a $2.2 \mu\text{s}$. Suponga que los muones se mueven a una velocidad de $0.95c$ y que hay 5.0×10^4 muones en $t = 0$. a) ¿Cuál es el tiempo de vida observado de los muones? ¿Cuántos muones permanecen después de recorrer una distancia de 3.0 km?

46. Imagine que todo el Sol colapsa a una esfera de radio R_g tal que el trabajo requerido para remover una pequeña masa m de la superficie sería igual a su energía en reposo mc^2 . Este radio se llama *radio gravitacional* para el Sol. Encuentre R_g . (Se cree que el destino final de las estrellas masivas es colapsar más allá de sus radios gravitacionales en hoyos negros.)

47. Los gemelos idénticos Acelerino y Valento se unen a una migración desde la Tierra hasta el Planeta X, que está a 20.0 años luz de distancia en un marco de referencia donde ambos planetas están en reposo. Los gemelos, de la misma edad, parten al mismo tiempo en diferentes naves espaciales. La nave de Acelerino viaja de manera estacionaria a $0.950c$ y la de Valento a $0.750c$. Calcule la diferencia de edad entre los gemelos después de que la nave espacial de Valento aterriza en el Planeta X. ¿Cuál gemelo es más viejo?

48. **M** Una sonda espacial interestelar se lanza desde la Tierra. Después de un breve periodo de aceleración, se mueve con una velocidad constante, 70.0% de la velocidad de la luz. Sus baterías de potencia nuclear suministran la energía para mantener activo continuamente su transmisor de datos. Las baterías tienen una vida de 15.0 años, medida en un marco en reposo. a) ¿Cuánto duran las baterías en la sonda espacial, según mide el control de misión en la Tierra? b) ¿Cuán lejos está la sonda de la Tierra cuando sus baterías fallan, según mide el control de misión? c) ¿Cuán lejos está la sonda de la Tierra, según miden sus odómetros de viaje internos, cuando sus baterías fallan? d) ¿Durante cuánto tiempo total, después del lanzamiento, el control de misión recibe datos de la sonda? Observe que las ondas de radio viajan con la velocidad de la luz y llenan el espacio entre la sonda y la Tierra en el tiempo cuando fallan las baterías.

49. Un observador que se mueve con una velocidad de $0.995c$ relativa a una barra (figura P26.49) mide su longitud en 2.00 m y ve su longitud orientada a 30.0° con respecto a su dirección de movimiento. a) ¿Cuál es la longitud propia de la barra? b) ¿Cuál es el ángulo de orientación en un marco de referencia que se mueve con la barra?

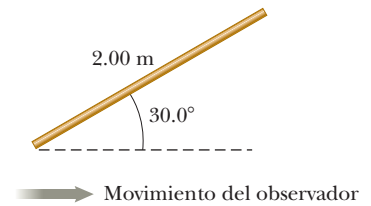


Figura P26.49 Vista de la barra que mira un observador que se mueve hacia la derecha.

50. Una nave espacial extraterrestre viajando a $0.600c$ hacia la Tierra lanza una sonda de desembarco con una guardia avanzada de agentes de compras. La sonda viaja en la misma dirección con una velocidad de $0.800c$ relativa a la nave espacial. Al ser observada en la Tierra, la nave espacial está 0.200 años luz de la Tierra cuando la sonda es lanzada. a) ¿Con qué velocidad se aproxima la sonda observada a los observadores en la Tierra? b) ¿Cuál es la distancia a la Tierra en el momento del lanzamiento de la sonda, según lo observado por los extraterrestres en la nave nodriza? c) ¿Cuánto tiempo tarda la sonda en alcanzar la Tierra según lo observado por los extraterrestres en la nave nodriza? d) Si la nave tiene una masa de 4.00×10^5 kg, ¿cuál es su energía cinética al ser observada en el marco de referencia de la Tierra?



Micrografía electrónica de barrido, mejorada en color, del ácaro *Lepidoglyphus destructor*. Estos ácaros comunes crecen hasta 0.75 mm y se alimentan de moho, harina y arroz. Viven a 25°C y alta humedad y pueden disparar alergias.

Física cuántica

27

Aunque muchos problemas se resolvieron con la teoría de la relatividad en la primera parte del siglo xx, muchos otros permanecieron sin resolverse. Los intentos por explicar el comportamiento de la materia a nivel atómico con las leyes de la física clásica fueron consistentemente fallidos. Varios fenómenos, como la radiación electromagnética emitida por un objeto caliente (radiación de cuerpo negro), la emisión de electrones mediante metales iluminados (el efecto fotoeléctrico) y la emisión de líneas espectrales características de átomos de gas en un tubo de descarga eléctrica, no se podían comprender dentro del marco conceptual de la física clásica. Sin embargo, entre 1900 y 1930, una versión moderna de la mecánica, llamada *mecánica cuántica* o *mecánica ondulatoria*, tuvo enorme éxito para explicar el comportamiento de átomos, moléculas y núcleos.

Las primeras ideas de la teoría cuántica las introdujo Planck y la mayoría de los desarrollos matemáticos posteriores, interpretaciones y mejoras las realizaron muchos físicos distinguidos, incluidos Einstein, Bohr, Schrödinger, de Broglie, Heisenberg, Born y Dirac. En este capítulo se introducen las ideas subyacentes de la teoría cuántica y la naturaleza onda-partícula de la materia y se estudian algunas aplicaciones simples de la teoría cuántica, incluidos el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y los rayos X.

- 27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck
- 27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz
- 27.3 Rayos X
- 27.4 Difracción de rayos X mediante cristales
- 27.5 El efecto Compton
- 27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia
- 27.7 La función de onda
- 27.8 El principio de incertidumbre

27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck

Un objeto a cualquier temperatura emite radiación electromagnética, llamada **radiación térmica**. La ley de Stefan, que se estudió en la sección 11.5, describe la energía total radiada. El espectro de la radiación depende de la temperatura y las propiedades del objeto. A bajas temperaturas, las longitudes de onda de la radiación térmica están, principalmente,

Tip 27.1 Espera confundirlo

Sus experiencias de vida tienen lugar en el mundo macroscópico, donde los efectos cuánticos no son evidentes. Los efectos cuánticos incluso pueden ser más extraños que los efectos relativistas. Como dijo alguna vez el físico ganador del Premio Nobel, Richard Feynman: “Nadie entiende la mecánica cuántica”.

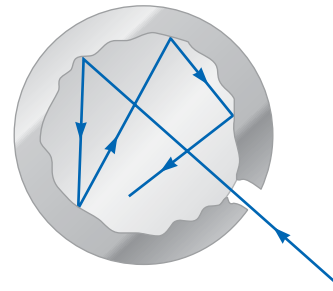


© Bettmann/COBBIS

Max Planck
Físico alemán (1858-1947)

Planck introdujo el concepto de “cuanto de acción” (constante de Planck h) en un intento por explicar la distribución espectral de la radiación de cuerpo negro, que proporcionó los cimientos de la teoría cuántica. En 1918 recibió el Premio Nobel en Física por este descubrimiento de la naturaleza cuantizada de la energía.

Figura 27.1 Una abertura en la cavidad de un cuerpo es una buena aproximación de un cuerpo negro. Conforme la luz entra a la cavidad a través de la pequeña abertura, parte se refleja y parte es absorbida en cada reflexión desde las paredes interiores. Después de muchas reflexiones, en esencia toda la energía incidente es absorbida.



en la región infrarroja y, por lo tanto, no son observables por el ojo. Conforme la temperatura de un objeto aumenta, el objeto eventualmente comienza a brillar rojo. A temperaturas suficientemente altas, parece ser blanco, como en el brillo del filamento de tungsteno caliente de una bombilla. Un estudio cuidadoso de la radiación térmica demuestra que consiste de una distribución continua de longitudes de onda, desde las porciones infrarroja, visible y ultravioleta del espectro.

Desde un punto de vista clásico, la radiación térmica se origina a partir de partículas cargadas aceleradas cerca de la superficie de un objeto; tales cargas emiten radiación, en gran medida como lo hacen las antenas pequeñas. Las cargas térmicamente agitadas pueden tener una distribución de frecuencias, que explica el espectro continuo de la radiación emitida por el objeto. Hacia finales del siglo XIX, resultó claro que la teoría clásica de la radiación térmica era inadecuada. El problema básico estaba en la comprensión de la distribución de energía observada como función de la longitud de onda en la radiación emitida por un cuerpo negro. Por definición, un **cuerpo negro** es un sistema ideal que absorbe *toda* la radiación que incide sobre él. Una buena aproximación de un cuerpo negro es un pequeño orificio que conduce al interior de un objeto hueco, como se muestra en la figura 27.1. La naturaleza de la radiación emitida a través del pequeño orificio que conduce a la cavidad depende *solamente de la temperatura* de las paredes de la cavidad, y no, en absoluto, de la composición material del objeto, su forma u otros factores.

En la figura activa 27.2 se muestran datos experimentales para la distribución de energía en la radiación de cuerpo negro a tres temperaturas. La energía radiada varía con la longitud de onda y la temperatura. Conforme aumenta la temperatura del cuerpo negro, aumenta la cantidad total de energía (área bajo la curva) que emite. Además, con temperatura creciente, el pico de la distribución se corre hacia longitudes de onda más cortas. Este corrimiento obedece la siguiente relación, llamada **ley de desplazamiento de Wien**,

$$\lambda_{\text{máx}} T = 0.2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad [27.1]$$

donde $\lambda_{\text{máx}}$ es la longitud de onda la cual tiene pico la curva y T es la temperatura absoluta del objeto que emite la radiación.

■ FÍSICA APLICADA 27.1 **Colores de las estrellas**

Si observa cuidadosamente las estrellas en el cielo nocturno, puede distinguir tres colores principales: rojo, blanco y azul. ¿Qué causa estos colores particulares?

EXPLICACIÓN Estos colores resultan de las diferentes temperaturas superficiales de las estrellas. Una estrella relativamente fría, con una temperatura superficial de 3000 K, tiene una curva de radiación similar a la curva media en la figura

activa 27.2. El pico en esta curva está por arriba de las longitudes de onda visibles, 0.4 a 0.7 μm , más allá de la longitud de onda de la luz roja, de modo que se emite significativamente más radiación dentro del rango visible en el extremo rojo que en el extremo azul del espectro. En consecuencia, la estrella parece de color rojizo, similar al brillo rojo del quemador de una hornilla eléctrica. ■

Una estrella más caliente tiene una curva de radiación más parecida a la curva superior de la figura activa 27.2. En este caso la estrella emite radiación significativa a todo lo largo del rango visible, y la combinación de todos los colores hace que la estrella parezca blanca. Tal es el caso del Sol, con una temperatura superficial de 5800 K. Para estrellas mucho más calientes, el pico puede correrse tanto por abajo del rango visible que se emite significati-

vamente más radiación azul que roja, de modo que la estrella parece de color azulado. Las estrellas más frías que el Sol tienden a mostrar colores anaranjado y rojo. La temperatura superficial de una estrella se puede obtener al encontrar primero la longitud de onda que corresponde al máximo en la curva de intensidad frente a la longitud de onda y luego sustituir dicha longitud de onda en la ley de Wien. Por ejemplo, si la longitud de onda es 2.30×10^{-7} m, la temperatura superficial sería

$$T = \frac{0.2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}}{\lambda_{\text{máx}}} = \frac{0.2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}}{2.30 \times 10^{-7} \text{ m}} = 1.26 \times 10^4 \text{ K}$$

Los intentos por usar ideas clásicas para explicar las formas de las curvas que se muestran en la figura activa 27.2 fracasaron. La figura activa 27.3 muestra una gráfica experimental del espectro de radiación de cuerpo negro (curva roja), junto con la imagen teórica de cómo debería verse esta curva con base en teorías clásicas (curva azul). A longitudes de onda largas, la teoría clásica está en buena concordancia con los datos experimentales. Sin embargo, a longitudes de onda cortas, existe mayor desacuerdo entre la teoría clásica y los experimentos. Conforme λ tiende a cero, la teoría clásica erróneamente predice que la intensidad debe tender a infinito, cuando los datos experimentales muestran que debe aproximarse a cero.

En 1900, Planck desarrolló una fórmula para radiación de cuerpo negro que concordaba por completo con los experimentos en todas las longitudes de onda, lo que condujo a una curva que se muestra mediante la línea roja en la figura activa 27.3. Planck supuso que la radiación de cuerpo negro era producto de osciladores cargados submicroscópicos, que llamó *resonadores*. Asumió que las paredes de una cavidad que brilla estaban compuestas de miles de millones de estos resonadores, aunque su naturaleza exacta era desconocida. A los resonadores se les permitió tener sólo ciertas energías discretas E_n , dadas por

$$E_n = nhf \quad [27.2]$$

donde n es un entero positivo llamado **número cuántico**, f es la frecuencia de vibración del resonador y h es una constante conocida como **constante de Planck**, que tiene el valor

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad [27.3]$$

Puesto que la energía de cada resonador puede tener sólo valores discretos dados por la ecuación 27.2, se dice que la energía está *cuantizada*. Cada valor de energía discreta representa un diferente *estado cuántico* y cada valor de n representa un estado cuántico específico. (Cuando el resonador está en el estado cuántico $n = 1$, su energía es hf ; cuando está en el estado cuántico $n = 2$, su energía es $2hf$; etcétera.)

El punto clave en la teoría de Planck es la suposición de los estados de energía cuantizados. Esta separación radical de la física clásica es el “salto cuántico” que condujo a una comprensión totalmente novedosa de la Naturaleza. Es impactante: es como decir que una bola de béisbol lanzada sólo puede tener un número fijo de diferentes velocidades y ninguna velocidad entre dichos valores fijos. El hecho de que la energía puede asumir sólo ciertos valores discretos en lugar de cualquiera de un continuo de valores es la única diferencia principal importante entre la teoría cuántica y las teorías clásicas de Newton y Maxwell.

27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz

En la parte final del siglo XIX, los experimentos demostraron que la luz que incide sobre ciertas superficies metálicas provoca la emisión de electrones de éstas. Este fenómeno se conoce como **efecto fotoeléctrico** y los electrones emitidos se llaman **fotoselectrones**. El primer descubrimiento de este fenómeno lo realizó Hertz, quien también fue el primero en producir las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell.

La figura activa 27.4 (página 914) es un diagrama esquemático de un aparato de efecto fotoeléctrico. Un tubo de vidrio al vacío, conocido como fotocelda, contiene una placa

La radiación total emitida (el área bajo una curva) aumenta con el incremento de la temperatura.

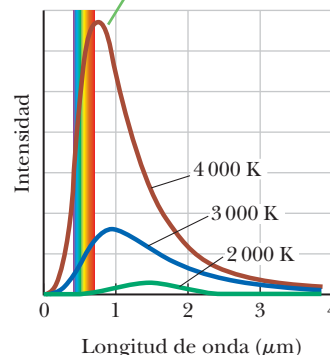


Figura activa 27.2 Intensidad de radiación de cuerpo negro frente a la longitud de onda a tres temperaturas diferentes. El rango visible de la longitud de onda está entre $4 \mu\text{m}$ y $7 \mu\text{m}$. Aproximadamente a 6000 K , el pico está en el centro de la longitud de onda visible y el objeto aparece en blanco.

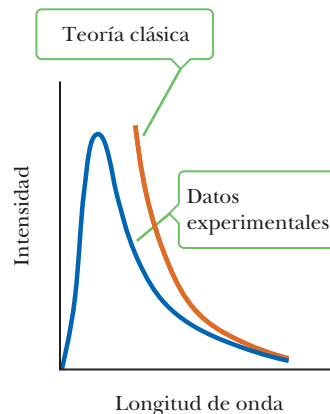


Figura activa 27.3 Comparación de datos experimentales con la teoría clásica de la radiación de cuerpo negro. La teoría de Planck coincide perfectamente con los datos experimentales.

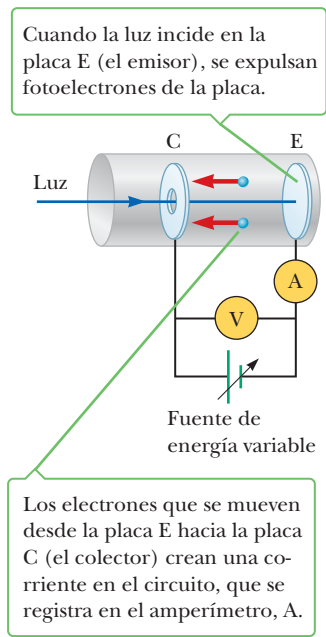


Figura activa 27.4 Diagrama de circuito para estudiar el efecto fotoeléctrico.

metálica E (el emisor) conectado a la terminal negativa de una fuente de energía variable. Otra placa metálica, C (el colector), se mantiene a un potencial positivo mediante la fuente de energía. Cuando el tubo se conserva en la oscuridad, el amperímetro lee cero, lo que indica que no hay corriente en el circuito. Sin embargo, cuando la placa E se ilumina con luz que tiene una longitud de onda más corta que cierta longitud de onda particular que depende del material utilizado para formar la placa E, el amperímetro detecta una corriente, lo que indica un flujo de cargas a través de la diferencia entre E y C. Esta corriente surge de los fotoelectrones emitidos de la placa negativa E y recolectados en la placa positiva C.

La figura 27.5 es una gráfica de la corriente fotoeléctrica frente a la diferencia de potencial ΔV entre E y C para dos intensidades de luz. A grandes valores de ΔV , la corriente alcanza un valor máximo. Además, la corriente aumenta conforme se incrementa la intensidad de la luz incidente, como era de esperarse. Finalmente, cuando ΔV es negativa (esto es, cuando el suministro de electricidad en el circuito se invierte para hacer E positivo y C negativo), la corriente cae a un valor bajo porque la mayoría de los fotoelectrones emitidos los repele a la ahora placa negativa C. En esta situación, sólo aquellos electrones que tienen una energía cinética mayor que la magnitud de $e\Delta V$ llegan a C, donde e es la carga del electrón.

Cuando ΔV es igual a o menor que $-\Delta V_s$, el **potencial de frenado**, ningún electrón llega a C y la corriente es cero. El potencial de frenado es *independiente* de la intensidad de la radiación. La máxima energía cinética de los fotoelectrones se relaciona con el potencial de frenado mediante la relación

$$EC_{\text{máx}} = e\Delta V_s \quad [27.4]$$

Muchas características del efecto fotoeléctrico no se pueden explicar con la física clásica o con la teoría ondulatoria de la luz:

- No se emiten electrones si la frecuencia de la luz incidente cae por abajo de cierta **frecuencia de corte** f_c , también llamada frecuencia umbral, que es característica del material que se ilumina. Este hecho es consistente con la teoría ondulatoria, que predice que el efecto fotoeléctrico debe ocurrir a *cualquier* frecuencia, siempre que la intensidad de la luz sea suficientemente alta.
- La máxima energía cinética de los fotoelectrones es independiente de la intensidad de la luz. De acuerdo con la teoría ondulatoria, la luz de mayor intensidad debe portar más energía hacia el metal por unidad de tiempo y, en consecuencia, expulsar fotoelectrones que tengan mayores energías cinéticas.
- La máxima energía cinética de los fotoelectrones aumenta con el aumento de la frecuencia de la luz. La teoría ondulatoria no predice relación entre la energía de los fotoelectrones y la frecuencia de la luz incidente.
- Los electrones se emiten de la superficie casi de manera instantánea (menos de 10^{-9} s después de iluminar la superficie), incluso a bajas intensidades de luz.

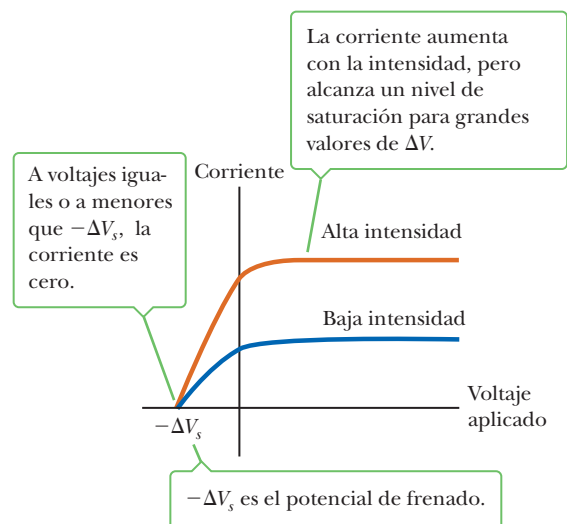


Figura 27.5 Corriente fotoeléctrica frente a la diferencia de potencial aplicado para dos intensidades de luz.

De manera clásica, se espera que los fotoelectrones requieran cierto tiempo para absorber la radiación incidente antes de que adquieran suficiente energía cinética para escapar del metal.

Una explicación exitosa del efecto fotoeléctrico la proporcionó Einstein en 1905, el mismo año que publicó su teoría de la relatividad especial. Como parte de un ensayo general acerca de la radiación electromagnética, por el cual recibió el Premio Nobel de Física en 1921, Einstein extendió el concepto de cuantización de Planck a las ondas electromagnéticas. Sugirió que un pequeño paquete de energía luminosa o **fotón** se emitiría cuando un oscilador cuantizado realizara un salto desde un estado de energía $E_n = nhf$ hacia el siguiente estado más bajo, $E_{n-1} = (n - 1)hf$. La conservación de la energía requeriría la disminución en energía del oscilador, hf , para igualar la energía del fotón E , de modo que

$$E = hf \quad [27.5]$$

◀ Energía de un fotón

donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la luz, que es igual a la frecuencia del oscilador de Planck.

El punto clave aquí es que la energía luminosa perdida por el emisor, hf , permanece muy localizada en un pequeño paquete o partícula llamada fotón. En el modelo de Einstein, un fotón está tan localizado que puede ceder *toda* su energía hf a un solo electrón en el metal. De acuerdo con Einstein, la máxima energía cinética para estos fotoelectrones liberados es

$$EC_{\text{máx}} = hf - \phi \quad [27.6]$$

◀ Ecuación del efecto fotoeléctrico

donde ϕ se llama **función de trabajo** del metal. La función de trabajo, que representa la mínima energía con la que un electrón se enlaza en el metal, está en el orden de algunos electrón-volts. La tabla 27.1 enlista las funciones de trabajo para varios metales.

Con la teoría fotónica de la luz es posible explicar las características anteriormente mencionadas del efecto fotoeléctrico que no se pueden comprender usando los conceptos de la física clásica:

- Los fotoelectrones se crean por absorción de un solo fotón, de modo que la energía de dicho fotón debe ser mayor que o igual a la función de trabajo, de otro modo no se producirán fotoelectrones. Esto explica la frecuencia de corte.
- A partir de la ecuación 27.6, $EC_{\text{máx}}$ sólo depende de la frecuencia de la luz y el valor de la función de trabajo. La intensidad de la luz es inmaterial porque la absorción de un solo fotón es responsable del cambio en energía cinética del electrón.
- La ecuación 27.6 es lineal en la frecuencia, de modo que $EC_{\text{máx}}$ aumenta con la frecuencia.
- Los electrones se emiten de manera casi instantánea, sin importar la intensidad, porque la energía luminosa está concentrada en paquetes en vez de dispersa en ondas. Si la frecuencia es suficientemente alta, no se necesita tiempo para que el electrón adquiera en forma gradual suficiente energía para escapar del metal.

Experimentalmente, se observa una relación lineal entre f y $EC_{\text{máx}}$, como se bosqueja en la figura 27.6. La intersección con el eje horizontal, que corresponde a $EC_{\text{máx}} = 0$, da la frecuencia de corte por abajo de la cual no se emiten fotoelectrones, sin importar la intensidad de la luz. La *longitud de onda* de corte λ_c se puede derivar de la ecuación 27.6:

$$EC_{\text{máx}} = hf_c - \phi = 0 \quad \rightarrow \quad h \frac{c}{\lambda_c} - \phi = 0$$

$$\lambda_c = \frac{hc}{\phi} \quad [27.7]$$

donde c es la velocidad de la luz. Las longitudes de onda *mayores* que λ_c incidentes sobre un material con función de trabajo ϕ no resultan en la emisión de fotoelectrones.

Tabla 27.1 Funciones de trabajo de metales seleccionados

Metal	ϕ (eV)
Ag	4.73
Al	4.08
Cu	4.70
Fe	4.50
Na	2.46
Pb	4.14
Pt	6.35
Zn	4.31

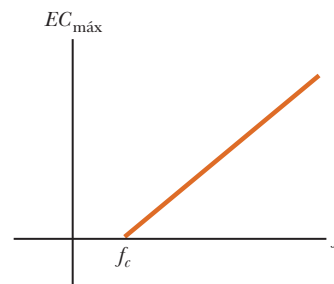


Figura 27.6 Bosquejo de $EC_{\text{máx}}$ frente a la frecuencia de la luz incidente en un experimento típico de efecto fotoeléctrico. Los fotones con frecuencias menores que f_c no tienen suficiente energía para expulsar un electrón del metal.

EJEMPLO 27.1 Fotoelectrones del sodio

OBJETIVO Comprender la cuantización de la luz y su papel en el efecto fotoeléctrico.

PROBLEMA Una superficie de sodio se ilumina con luz de $0.300 \mu\text{m}$ de longitud de onda. La función de trabajo para el sodio es 2.46 eV . Calcule **a)** la energía de cada fotón en electrón-volts, **b)** la máxima energía cinética de los fotoelectrones expulsados y **c)** la longitud de onda de corte para el sodio.

ESTRATEGIA Los incisos a), b) y c) requieren sustitución de valores en las ecuaciones 27.5, 27.6 y 27.7, respectivamente.

SOLUCIÓN

a) Calcule la energía de cada fotón.

Obtenga la frecuencia a partir de la longitud de onda:

Use la ecuación 27.5 para calcular la energía del fotón:

$$c = f\lambda \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{0.300 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

$$f = 1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$E = hf = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(1.00 \times 10^{15} \text{ Hz})$$

$$= 6.63 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= (6.63 \times 10^{-19} \text{ J}) \left(\frac{1.00 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 4.14 \text{ eV}$$

b) Encuentre la máxima energía cinética de los fotoelectrones.

Sustituya en la ecuación 27.6:

c) Calcule la longitud de onda de corte.

Convierta ϕ de electrón-volts a joules:

Encuentre la longitud de onda de corte a partir de la ecuación 27.7.

$$EC_{\text{máx}} = hf - \phi = 4.14 \text{ eV} - 2.46 \text{ eV} = 1.68 \text{ eV}$$

$$\phi = 2.46 \text{ eV} = (2.46 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})$$

$$= 3.94 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda_c = \frac{hc}{\phi} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{3.94 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

$$= 5.05 \times 10^{-7} \text{ m} = 505 \text{ nm}$$

COMENTARIOS La longitud de onda de corte está en la región amarillo-verde del espectro visible.

PREGUNTA 27.1 Verdadero o Falso: Suponga que en un experimento fotoeléctrico dado, la frecuencia de la luz es mayor que la frecuencia de corte. La magnitud del potencial de frenado, entonces, es mayor que la energía de los fotones incidentes.

EJERCICIO 27.1 a) ¿Cuál es la frecuencia mínima de la luz para expulsar fotoelectrones de una superficie de cobre? b) Si esta frecuencia se triplica, encuentre la máxima energía cinética (en eV) de los fotoelectrones resultantes.

RESPUESTAS a) $1.13 \times 10^{15} \text{ Hz}$ b) 9.40 eV

APLICACIÓN

Fotoceldas

Fotoceldas

El efecto fotoeléctrico tiene muchas aplicaciones interesantes que usan un dispositivo llamado *fotocelda*. La fotocelda que se muestra en la figura activa 27.4 produce una corriente en el circuito cuando la luz de frecuencia suficientemente alta cae sobre la celda, mas no permite una corriente en la oscuridad. Este dispositivo se utiliza en luminarias: una unidad de control fotoeléctrico en la base de la luminaria activa un interruptor que apaga la lámpara cuando la golpea la luz ambiente. Muchos sistemas de puertas de garaje y elevadores usan un haz de luz y una fotocelda como una característica de seguridad en su diseño. Cuando el haz de luz golpea la fotocelda, la corriente eléctrica generada es suficientemente grande para mantener un circuito cerrado. Cuando un objeto o persona bloquea el haz de luz, la corriente se interrumpe, lo que señala la apertura de la puerta.

27.3 Rayos X

Wilhelm Röntgen descubrió los rayos X en 1895 y más tarde se identificaron como ondas electromagnéticas, por una sugerencia de Max von Laue en 1912. Los rayos X tienen frecuencias más altas que la radiación ultravioleta y pueden penetrar la mayoría de los materiales con relativa facilidad. Las longitudes de onda típicas de los rayos X son de aproximadamente

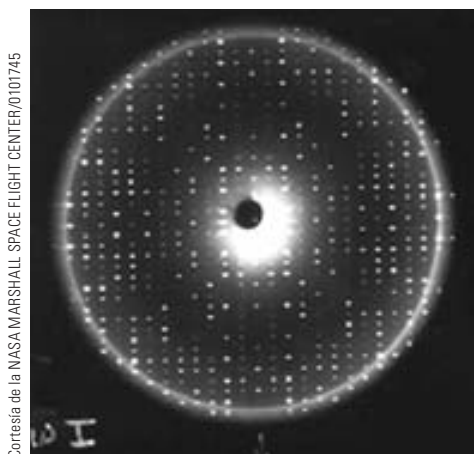


Figura 27.7 Un patrón de difracción de rayos X de un cristal de proteína bien ordenada puede ser analizado matemáticamente con potentes computadoras, lo que lleva a la determinación de la estructura de la proteína. Una vez que la estructura se conoce, las moléculas pueden ser diseñadas para que ajusten en el sitio activo de la proteína. Dichas moléculas se pueden utilizar en el desarrollo de fármacos terapéuticos que desactivan una proteína sin afectar a otros sistemas biológicos.

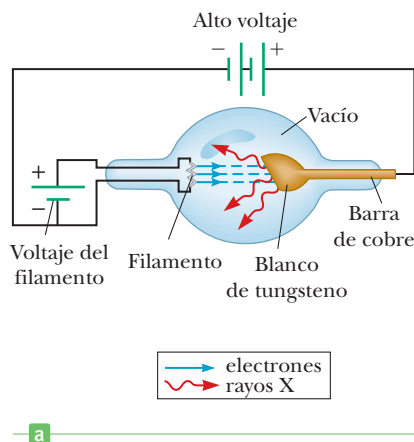


Figura 27.8 a) Diagrama de un tubo de rayos X. b) Fotografía de un tubo de rayos X.



0.1 nm, que está en el orden del espaciamiento atómico en un sólido. Como resultado, se pueden difractar en los espaciamientos atómicos regulares en una red cristalina, que actúa como rejilla de difracción. En la figura 27.7 se muestra el patrón de difracción de rayos X de un cristal de una proteína bien ordenada.

Los rayos X se producen cuando electrones a alta velocidad se frenan súbitamente, por ejemplo como cuando a un blanco metálico lo golpean electrones que se aceleraron a través de una diferencia de potencial de varios miles de volts. La figura 27.8a muestra un diagrama esquemático de un tubo de rayos X. Una corriente en el filamento provoca la emisión de electrones y estos electrones liberados se aceleran hacia un blanco metálico denso, como tungsteno, que se mantiene a un potencial superior que el filamento.

La figura 27.9 representa una gráfica de intensidad de rayos X frente a la longitud de onda para el espectro de radiación emitido por un tubo de rayos X. Observe que el espectro tiene dos componentes distintos. Un componente es un espectro ancho continuo que depende del voltaje aplicado al tubo. Superpuesta sobre este componente hay una serie de estrechas líneas intensas que dependen de la naturaleza del material del blanco. Para observar estas líneas, que representan la radiación emitida por los átomos del blanco conforme los electrones experimentan reordenamientos, el voltaje de aceleración debe superar cierto valor, llamado **voltaje umbral**. En el capítulo 28 se estudia más el voltaje umbral. La radiación continua a veces se llama **bremsstrahlung**, palabra alemana que significa “radiación que frena”, porque los electrones emiten radiación cuando experimentan una aceleración dentro del blanco.

La figura 27.10 ilustra cómo se producen rayos X cuando un electrón pasa cerca de un núcleo objetivo cargado. Conforme el electrón pasa cerca de un núcleo con carga positiva contenido en el material objetivo, se desvía de su trayectoria debido a su atracción eléctrica hacia el núcleo; por ende, experimenta una aceleración. Un análisis a partir de la física clásica demuestra que cualquier partícula cargada emitirá radiación electromagnética cuando se acelera. (Un ejemplo de este fenómeno es la producción de ondas electromagnéticas mediante cargas aceleradas en una antena de radio, como se describe en el capítulo 21.) De acuerdo con la teoría cuántica, esta radiación debe aparecer en la forma de fotones. Puesto que el fotón radiado que se muestra en la figura 27.10 porta energía, el electrón debe perder energía cinética debido a su encuentro con el núcleo objetivo. Un ejemplo extremo consiste del electrón que pierde toda su energía en una sola colisión. En este caso la energía inicial del electrón ($e \Delta V$) se transforma por completo en la energía del fotón ($hf_{\text{máx}}$). En forma de ecuación,

$$e \Delta V = hf_{\text{máx}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{mín}}} \quad [27.8]$$

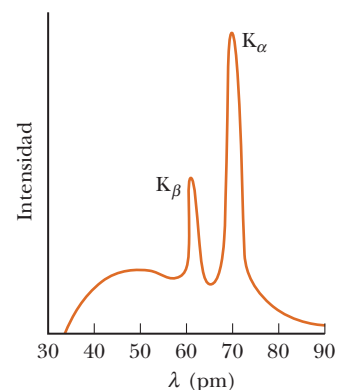


Figura 27.9 El espectro de rayos X de un blanco metálico consiste de un espectro continuo ancho más algunas líneas estrechas, que se deben a *rayos X característicos*. Los datos que se muestran se obtuvieron cuando electrones de 35 keV bombardearon un objetivo de molibdeno. Observe que $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m} = 10^{-3} \text{ nm}$.

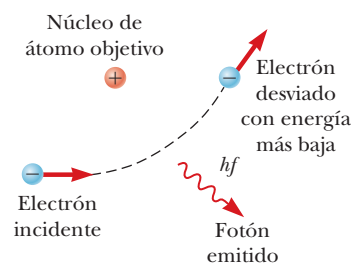


Figura 27.10 Un electrón que pasa cerca de un átomo objetivo cargado experimenta una aceleración y en el proceso se emite un fotón.

donde $e \Delta V$ es la energía del electrón después de que se aceleró a través de una diferencia de potencial de ΔV volts y e es la carga del electrón. Esta ecuación dice que la radiación con longitud de onda más corta que se puede producir es

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{hc}{e \Delta V} \quad [27.9]$$

No toda la radiación producida tiene esta longitud de onda particular porque muchos de los electrones no se detienen en una sola colisión. El resultado es la producción del espectro continuo de longitudes de onda.

Los rayos X proporcionan interesantes perspectivas del proceso de pintura y la revisión de obras maestras. Algunas pinturas, como las que tienen plomo, cadmio, cromo o cobalto como base, absorben en grados variables rayos X con longitud de onda larga. Las interacciones de los rayos X con las pinturas proporcionan contraste porque los diferentes elementos en las pinturas tienen distintas densidades de electrones. Además, las capas más gruesas absorberán más que las capas delgadas. Para examinar una pintura de un antiguo maestro, se coloca una película detrás mientras se expone a rayos X desde el frente. Cuando se revela la película, en ocasiones aparecen los contornos fantasmales de las pinturas anteriores y las formas primigenias de la obra maestra final.

APLICACIÓN

Uso de rayos X para estudiar la obra de pintores maestros

27.4 Difracción de rayos X mediante cristales

En el capítulo 24 se describió cómo se puede usar una rejilla de difracción para medir la longitud de onda de la luz. En principio, la longitud de onda de *cualquier* onda electromagnética se puede medir si se encuentra una rejilla con un espaciamiento lineal adecuado. El espaciamiento entre líneas debe ser aproximadamente igual a la longitud de onda de la radiación a medir. Los rayos X son ondas electromagnéticas con longitudes de onda del orden de 0.1 nm. Sería imposible construir una rejilla con un espaciamiento tan pequeño. Sin embargo, como se anotó en la sección anterior, el arreglo regular de átomos en un cristal podría actuar como una rejilla tridimensional para observar la difracción de rayos X.

En la figura 27.11 se muestra un arreglo experimental para observar rayos X. Un haz estrecho de rayos X, con un rango de longitud de onda continuo, incide sobre un cristal como el cloruro de sodio. La radiación difractada es muy intensa en ciertas direcciones, lo que corresponde a interferencia constructiva a partir de ondas reflejadas desde capas de átomos en el cristal. La radiación difractada se detecta mediante una película fotográfica y forma un arreglo de puntos conocido como *patrón de Laue*. La estructura cristalina se determina al analizar las posiciones e intensidades de los puntos en el patrón.

En la figura 27.12 se muestra el arreglo de átomos en un cristal de NaCl. Las esferas rojas más pequeñas representan iones Na^+ y las esferas azules más grandes representan iones Cl^- . El espaciamiento entre iones Na^+ (o Cl^-) sucesivos en esta estructura cúbica, que se denota mediante el símbolo a en la figura 27.12, es aproximadamente 0.563 nm.

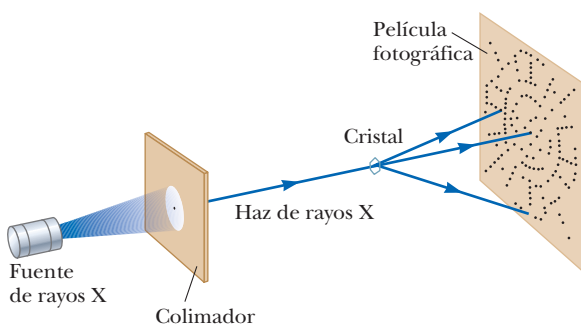


Figura 27.11 Diagrama esquemático de la técnica utilizada para observar la difracción de rayos X por un solo cristal. El conjunto de puntos formados en la película por los haces difractados se llama patrón de Laue. (Véase la figura 27.7.)

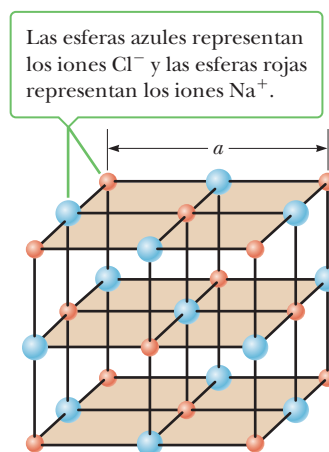


Figura 27.12 Modelo de la estructura cristalina cúbica del cloruro de sodio. La longitud de la arista del cubo es $a = 0.563$ nm.

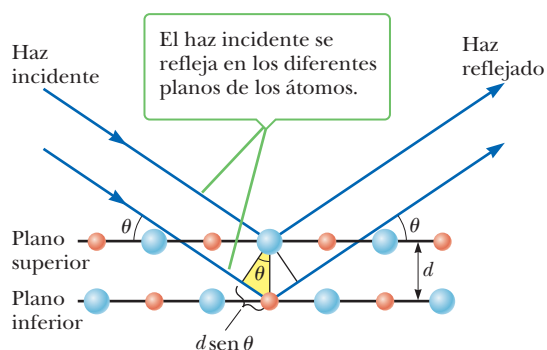


Figura 27.13 Bosquejo bidimensional de la reflexión de un haz de rayos X desde dos planos cristalinos paralelos separados una distancia d . El haz reflejado del plano inferior viaja más lejos que el que se refleja del plano superior por una cantidad igual a $2d \sin \theta$.

Un examen cuidadoso de la estructura de NaCl muestra que los iones se encuentran en varios planos. Las áreas sombreadas en la figura 27.12 representan un ejemplo en el cual los átomos yacen en planos igualmente espaciados. Ahora suponga que un haz de rayos X incide en un ángulo rasante θ sobre uno de los planos, como en la figura 27.13. El haz se puede reflejar tanto del plano superior como del inferior de los átomos. Sin embargo, la construcción geométrica en la figura 27.13 muestra que el haz reflejado de la superficie inferior viaja más lejos que el haz reflejado de la superficie superior por una distancia de $2d \sin \theta$. Las dos porciones del haz reflejado se combinarán para producir interferencia constructiva cuando esta diferencia de trayectoria iguale cierto múltiplo entero de la longitud de onda λ . La condición para interferencia constructiva está dada por

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad [27.10]$$

◀ Ley de Bragg

Esta condición se conoce como **ley de Bragg**, en honor a W. L. Bragg (1890-1971), quien fue el primero en derivar la relación. Si se miden la longitud de onda y el ángulo de difracción, se puede usar la ecuación 27.10 para calcular el espaciamiento entre planos atómicos.

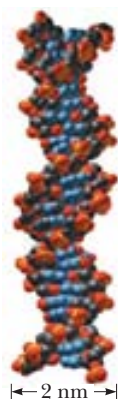
La técnica de difracción de rayos X se usa para determinar el arreglo atómico de moléculas orgánicas complejas como las proteínas. Las proteínas son moléculas grandes que contienen miles de átomos que ayudan a regular y acelerar los procesos químicos de la vida en las células. Algunas proteínas son sorprendentes catalizadores, que aceleran las lentas reacciones a temperatura ambiente en las células por 17 órdenes de magnitud. Para comprender esta increíble reactividad química, es importante determinar la estructura de estas intrincadas moléculas.

La principal técnica que se utiliza para determinar la estructura molecular de las proteínas, el ADN y el ARN es la difracción de rayos X que usan rayos X con longitud de onda de aproximadamente 1 \AA ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$). Esta técnica permite al experimentador “ver” átomos individuales que están separados por más o menos esta distancia en las moléculas. Puesto que la muestra bioquímica para difracción de rayos X se prepara en forma cristalina, la *geometría* (posición de los puntos brillantes en el espacio) del patrón de difracción se determina mediante el arreglo reticular cristalino tridimensional de las moléculas en la muestra. Las *intensidades* de los puntos de difracción brillantes se determinan por los átomos y sus distribuciones electrónicas en los bloques constructores fundamentales del cristal: la célula individual. Con el uso de complicadas técnicas computacionales, los investigadores en esencia pueden deducir la estructura molecular al relacionar las intensidades observadas de haces difractados con una serie de posiciones atómicas supuestas que determinan la estructura atómica y la densidad de electrones de la molécula.

Cristalizar una molécula grande como el ADN y obtener su patrón de difracción de rayos X es enormemente desafiante. En el caso del ADN, obtener cristales suficientemente puros es en especial difícil porque existen dos formas cristalinas, A y B, que surgen en forma mixta durante la preparación. Estas dos formas resultan en patrones de difracción que no se pueden descifrar fácilmente. En 1951, Rosalind Franklin, una investigadora en el King’s College de Londres, desarrolló un ingenioso método de separación para las dos formas y pudo obtener excelentes imágenes de difracción de rayos X de ADN cristalino puro en forma B. Con estas imágenes determinó que la forma helicoidal del ADN consistía de dos hélices entrelazadas, con el esqueleto de azúcar fosfato en el exterior de la molécula, lo que refutaba modelos previos que tenían el esqueleto en el interior. En la figura 27.14 se muestra una de sus imágenes.



Figura 27.14 Fotografía de difracción de rayos X de ADN tomada por Rosalind Franklin. El patrón en cruz de las manchas fue una pista de que el ADN tenía una estructura helicoidal.



James Watson y Francis Crick usaron el trabajo de Franklin para descubrir mayores detalles de la molécula y su función en la herencia, en particular en cuanto a la estructura interna. Junto a cada unidad de azúcar-fosfato de cada hélice hay una de cuatro bases moleculares: adenina, citosina, guanina o timina. Las bases están ordenadas en secuencia a lo largo de la hélice, con patrones en la secuencia de bases que actúan como códigos para proteínas que realizan varias funciones para un organismo dado. Las bases en una hélice se enlazan a las de la otra hélice, lo que forma una doble hélice. En la figura 27.15 se muestra un modelo de la doble hélice. En 1962, Watson, Crick y un colega de Franklin, Maurice Wilkins, recibieron el Premio Nobel de Fisiología y Medicina por su trabajo para comprender la estructura y función del ADN. Franklin habría compartido el premio, pero murió en 1958 de cáncer a la edad de 38 años. (El premio no se otorga de manera póstuma.)

Figura 27.15 La estructura de doble hélice del ADN.

■ EJEMPLO 27.2 Difracción de rayos X de la calcita

OBJETIVO Comprender la ley de Bragg y aplicarla a un cristal.

PROBLEMA Si el espaciamiento entre ciertos planos en un cristal de calcita (CaCO_3) es 0.314 nm, encuentre los ángulos rasantes a los que ocurrirá interferencia de primero y tercer orden para rayos X con longitud de onda de 0.070 0 nm.

ESTRATEGIA Resuelva la ley de Bragg para $\sin \theta$ y sustituya, y aplique la función seno inverso para obtener el ángulo.

SOLUCIÓN

Encuentre el ángulo rasante que corresponde a $m = 1$, para interferencia de primer orden:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} = \frac{(0.070\ 0\ \text{nm})}{2(0.314\ \text{nm})} = 0.111$$

$$\theta = \sin^{-1}(0.111) = 6.37^\circ$$

Repita el cálculo para interferencia de tercer orden ($m = 3$):

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} = \frac{3(0.070\ 0\ \text{nm})}{2(0.314\ \text{nm})} = 0.334$$

$$\theta = \sin^{-1}(0.334) = 19.5^\circ$$

COMENTARIOS Advierta que hay poca diferencia entre este tipo de problema y el experimento de rendija de Young.

PREGUNTA 27.2 Verdadero o Falso: Un ángulo rasante pequeño implica una menor distancia entre planos en la redícula cristalina.

EJERCICIO 27.2 Rayos X, con 0.060 0 nm de longitud de onda, se dispersan de un cristal con un ángulo de roce de 11.7° . Suponga $m = 1$ para este proceso. Calcule el espaciamiento entre los planos del cristal.

RESPUESTA 0.148 nm

27.5 El efecto Compton

Más justificación para la naturaleza fotónica de la luz provino de un experimento que realizó Arthur H. Compton en 1923. En su experimento, Compton dirigió un haz de rayos X con longitud de onda λ_0 hacia un bloque de grafito. Descubrió que los rayos X dispersados tenían una longitud de onda λ ligeramente mayor que los rayos X incidentes y, por lo tanto, las energías de los rayos dispersados era menor. La cantidad de reducción de energía dependió del ángulo al cual se dispersaron los rayos X. El cambio en longitud de onda $\Delta\lambda$ entre un rayo X disperso y un rayo X incidente se llamó **corrimiento Compton**.

Para explicar este fenómeno, Compton supuso que si un fotón se comporta como una partícula, su colisión con otras partículas es similar a una colisión entre dos bolas de billar. Por lo tanto, el fotón de rayos X lleva tanto *energía* como *cantidad de movimiento* mensurables, y estas dos cantidades se deben conservar en una colisión. Si el fotón incidente choca



Cortesía de AIP Niels Bohr Library

Arthur Holly Compton

Físico estadounidense (1892-1962)

Compton asistió al Wooster College y a Princeton University. Fue director del laboratorio en la Universidad de Chicago, donde realizó trabajo experimental relacionado con las reacciones en cadena sostenidas. Este trabajo fue de gran importancia para la construcción de la primera bomba atómica. Debido a su descubrimiento del efecto Compton y su trabajo con rayos cósmicos, compartió el Premio Nobel de Física, en 1927, con Charles Wilson.

con un electrón inicialmente en reposo, como en la figura 27.16, el fotón transfiere parte de su energía y cantidad de movimiento al electrón. Como consecuencia, la energía y la frecuencia del fotón disperso se reducen y su longitud de onda aumenta. Al aplicar la conservación de energía y cantidad de movimiento relativistas a la colisión descrita en la figura 27.16, el corrimiento en longitud de onda del fotón disperso está dada por

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad [27.11]$$

donde m_e es la masa del electrón y θ es el ángulo entre las direcciones de los fotones dispersado e incidente. La cantidad $h/m_e c$ se llama **longitud de onda de Compton** y tiene un valor de 0.002 43 nm. La longitud de onda de Compton es muy pequeña en relación con las longitudes de onda de la luz visible, de modo que el corrimiento en longitud de onda sería difícil de detectar si se usara luz visible. Más aún, observe que el corrimiento Compton depende del ángulo de dispersión θ y no de la longitud de onda. Resultados experimentales para dispersión de rayos X en varios blancos obedecen la ecuación 27.11 y apoyan fuertemente el concepto de fotón.

Examen rápido

27.1 Verdadero o Falso: Cuando un fotón se dispersa de un electrón, el fotón pierde energía.

27.2 Un fotón de rayos X se dispersa mediante un electrón. ¿La frecuencia del fotón dispersado en relación con la del fotón incidente a) aumenta, b) disminuye o c) permanece igual?

27.3 Un fotón de energía E_0 golpea un electrón libre y el fotón dispersado con energía E se mueve en la dirección opuesta a la del fotón incidente. En esta interacción de efecto Compton, ¿cuál es la energía cinética resultante del electrón? a) E_0 , b) E , c) $E_0 - E$, d) $E_0 + E$

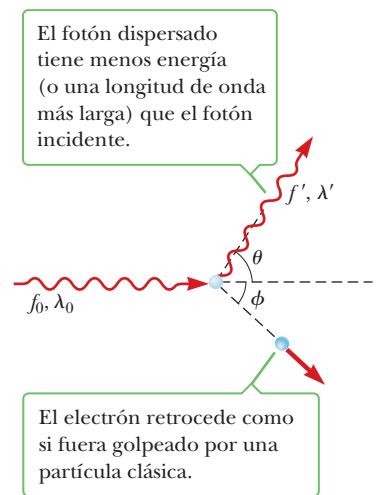


Figura 27.16 Diagrama que representa la dispersión Compton de un fotón por un electrón.

◀ **Fórmula de corrimiento Compton**

EJEMPLO 27.3 Dispersión de rayos X

OBJETIVO Comprender la dispersión Compton y su efecto sobre la energía del fotón.

PROBLEMA Rayos X con longitud de onda $\lambda_1 = 0.200\ 000$ nm se dispersan de un bloque de material. Los rayos X dispersados se observan a un ángulo de 45.0° con el haz incidente. **a)** Calcule la longitud de onda de los rayos X dispersos a este ángulo. **b)** Calcule el cambio fraccional en la energía de un fotón en la colisión.

ESTRATEGIA Para encontrar la longitud de onda de los fotones de rayos X dispersados, sustituya en la ecuación 27.11 para obtener el corrimiento de la longitud de onda, luego sume el resultado a la longitud de onda inicial, λ_i . En el inciso b), calcule el cambio fraccional en energía involucrada al calcular la energía del fotón de rayos X antes y después, a partir de $E = hf = hc/\lambda$. Al tomar la diferencia y dividir entre la energía inicial produce el cambio fraccional deseado en energía. Sin embargo, aquí se deriva una expresión simbólica que relaciona términos de energía y longitudes de onda.

(continúa)

SOLUCIÓN

a) Calcule la longitud de onda de los rayos X.

Sustituya en la ecuación 27.11 para obtener el corrimiento en la longitud de onda:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})} (1 - \cos 45.0^\circ) \\ &= 7.11 \times 10^{-13} \text{ m} = 0.000\,711 \text{ nm}\end{aligned}$$

Suma este corrimiento a la longitud de onda original para obtener la longitud de onda del fotón dispersado:

$$\lambda_f = \Delta\lambda + \lambda_i = 0.200\,711 \text{ nm}$$

b) Encuentre la fracción de energía que pierde el fotón en la colisión.

Reescriba la energía E en términos de longitud de onda, use $c = f\lambda$:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

Calcule $\Delta E/E$ usando esta expresión:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E_f - E_i}{E_i} = \frac{hc/\lambda_f - hc/\lambda_i}{hc/\lambda_i}$$

Cancele hc y reordene términos:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1/\lambda_f - 1/\lambda_i}{1/\lambda_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_f} - 1 = \frac{\lambda_i - \lambda_f}{\lambda_f} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_f}$$

Sustituya valores del inciso a):

$$\frac{\Delta E}{E} = -\frac{0.000\,711 \text{ nm}}{0.200\,711 \text{ nm}} = -3.54 \times 10^{-3}$$

COMENTARIOS También es posible encontrar esta respuesta al sustituir en la expresión de energía en una etapa anterior, pero la derivación algebraica es más elegante e instructiva porque muestra cómo los cambios en energía se relacionan con los cambios en longitud de onda.

PREGUNTA 27.3 El fotón incidente pierde energía. ¿A dónde va?

EJERCICIO 27.3 Repita el ejemplo para un fotón con longitud de onda de 3.00×10^{-2} nm que se dispersa a un ángulo de 60.0° .

RESPUESTAS a) 3.12×10^{-2} nm b) $\Delta E/E = -3.88 \times 10^{-2}$

27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia

Fenómenos como el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton ofrecen evidencia de que, cuando la luz (u otras formas de radiación electromagnética) y la materia interactúan, la luz se comporta como si estuviese compuesta de partículas que tienen energía hf y cantidad de movimiento h/λ . Sin embargo, en otros contextos, la luz actúa como una onda y exhibe efectos de interferencia y difracción. Esta aparente dualidad se puede explicar en parte al considerar las energías de los fotones en diferentes contextos. Por ejemplo, los fotones con frecuencias en las longitudes de onda de radio portan muy poca energía y pueden requerirse 10^{10} de tales fotones para crear una señal en una antena. En consecuencia, éstos actúan en conjunto como una onda para crear el efecto. Los rayos gamma, por otra parte, son tan energéticos que es posible detectar un solo fotón de rayo gamma.

Hipótesis de De Broglie ►

En su disertación doctoral en 1924, Louis de Broglie postuló que, **dado que los fotones tienen características de onda y partícula, acaso todas las formas de materia tienen ambas propiedades**. Esta idea enormemente revolucionaria no tuvo confirmación experimental en aquella época. De acuerdo con De Broglie, los electrones, como la luz, tienen una naturaleza dual partícula-onda.

En el capítulo 26 encontramos que la relación entre energía y cantidad de movimiento para un fotón, que tiene una energía en reposo de cero, es $p = E/c$. También sabemos, de la ecuación 27.5, que la energía de un fotón es

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

[27.12]

En consecuencia, la cantidad de movimiento de un fotón se puede expresar como

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hc}{c\lambda} = \frac{h}{\lambda} \quad [27.13]$$

◀ Cantidad de movimiento de un fotón

A partir de esta ecuación, vemos que la longitud de onda del fotón se puede especificar mediante su cantidad de movimiento, o $\lambda = h/p$. De Broglie sugirió que *todas* las partículas materiales con cantidad de movimiento p deben tener una longitud de onda característica $\lambda = h/p$. Puesto que la cantidad de movimiento de una partícula de masa m y velocidad v es $mv = p$, la **longitud de onda de De Broglie** de una partícula es

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad [27.14]$$

◀ Longitud de onda de De Broglie

Más aún, De Broglie postuló que las frecuencias de las ondas de materia (ondas asociadas con partículas que tienen energía en reposo distinta de cero) obedecen la relación de Einstein para fotones, $E = hf$, de modo que

$$f = \frac{E}{h} \quad [27.15]$$

◀ Frecuencia de ondas de materia

La naturaleza dual de la materia es bastante aparente en las ecuaciones 27.14 y 27.15 porque cada una contiene ambas propiedades de partícula (mv y E) como propiedades de onda (λ y f). El hecho de que estas relaciones se establecieran experimentalmente para fotones hizo que la hipótesis de De Broglie se aceptara con más facilidad. El experimento Davisson-Germer en 1927 confirmó la hipótesis de De Broglie al demostrar que los electrones que se dispersan de cristales forman un patrón de difracción. Los planos regularmente espaciados de los átomos en regiones cristalinas de un blanco de níquel actúan como una rejilla de difracción para ondas de materia de electrones.



Cortesía de AP/Niels Bohr Library

Louis de Broglie
Físico francés (1892-1987)

De Broglie asistió a la Sorbona, en París, donde cambió su especialidad de historia a física teórica. Recibió el Premio Nobel de Física en 1929 por su descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones.

■ Examen rápido

27.4 Verdadero o Falso: Conforme aumenta la cantidad de movimiento de una partícula de masa m , su longitud de onda se incrementa.

27.5 Un electrón no relativista y un protón no relativista se mueven y tienen la misma longitud de onda de De Broglie. ¿Cuáles de las siguientes también son las mismas para las dos partículas? a) velocidad, b) energía cinética, c) cantidad de movimiento, d) frecuencia

■ EJEMPLO 27.4 El electrón frente a la bola de béisbol

OBJETIVO Aplicar la hipótesis de De Broglie a un objeto cuántico y a uno clásico.

PROBLEMA a) Compare la longitud de onda de De Broglie para un electrón ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg) que se mueve con una velocidad igual a 1.00×10^7 m/s, con la de una bola de béisbol de 0.145 kg de masa que se lanza a 45.0 m/s. b) Compare estas longitudes de onda con la de un electrón que viaja a $0.999c$.

ESTRATEGIA Este problema es cuestión de sustituir en la ecuación 27.14 para la longitud de onda de De Broglie. En el inciso b) debe usar la cantidad de movimiento relativista.

SOLUCIÓN

a) Compare las longitudes de onda de De Broglie del electrón y la bola de béisbol.

Sustituya datos para el electrón en la ecuación 27.14:

$$\begin{aligned} \lambda_e &= \frac{h}{m_e v} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.00 \times 10^7 \text{ m/s})} \\ &= 7.28 \times 10^{-11} \text{ m} \end{aligned}$$

Repita el cálculo con los datos de la bola de béisbol:

$$\lambda_b = \frac{h}{m_b v} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(0.145 \text{ kg})(45.0 \text{ m/s})} = 1.02 \times 10^{-34} \text{ m}$$

(continúa)

b) Encuentre la longitud de onda para un electrón que viaja a $0.999c$.

Sustituya la cantidad de movimiento en la ecuación 27.14 con la cantidad de movimiento relativista:

Sustituya:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v / \sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{h\sqrt{1 - v^2/c^2}}{m_e v}$$

$$\lambda_e = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})\sqrt{1 - (0.999c)^2/c^2}}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.999 \cdot 3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}$$

$$= 1.09 \times 10^{-13} \text{ m}$$

COMENTARIOS La longitud de onda del electrón corresponde a la de los rayos X en el espectro electromagnético. La bola de béisbol, en contraste, tiene una longitud de onda mucho menor que cualquier abertura a través de la cual posiblemente pudiera pasar la bola, de modo que no se podrían observar efectos de difracción. Por lo general es cierto que las propiedades ondulatorias de los objetos a gran escala no se pueden observar. Advierta que, incluso a velocidades relativistas extremas, la longitud de onda del electrón todavía es mucho más grande que la de la bola de béisbol.

PREGUNTA 27.4 ¿Cómo es que el duplicar la velocidad de una partícula afecta su longitud de onda? ¿Su respuesta siempre es verdadera? Explique.

EJERCICIO 27.4 Encuentre la longitud de onda de De Broglie de un protón ($m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) que se mueve con una velocidad de $1.00 \times 10^7 \text{ m/s}$.

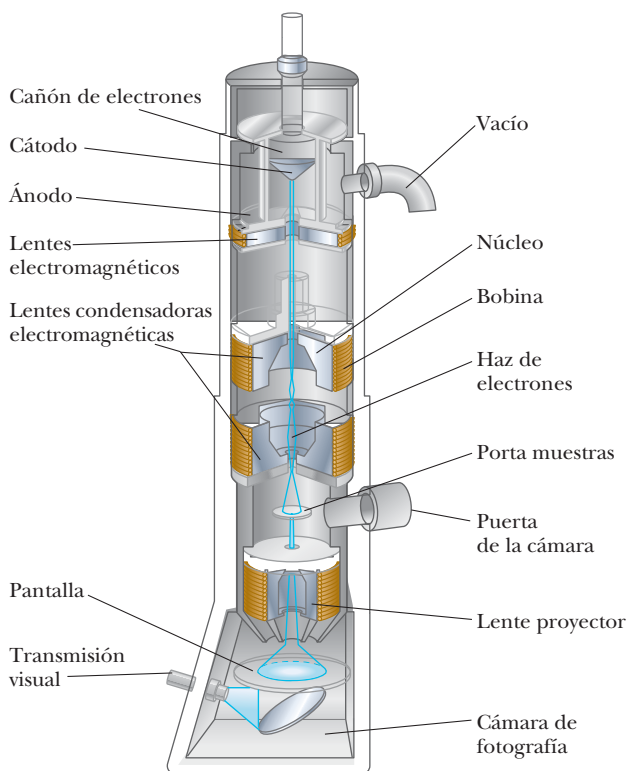
RESPUESTA $3.97 \times 10^{-14} \text{ m}$

Aplicación: el microscopio electrónico

BIO APLICACIÓN

Microscopios electrónicos

Un dispositivo práctico que se apoya en las características ondulatorias de los electrones es el **microscopio electrónico**. En la figura 27.17 se muestra un microscopio electrónico de *transmisión*, que se usa para ver delgadas muestras planas. En muchos aspectos es similar a un



a

b

Figura 27.17 a) Diagrama de un microscopio electrónico de transmisión para ver una delgada muestra seccionada. Las “lentes” que controlan el haz de electrones son bobinas de desviación magnéticas. b) Microscopio electrónico.

microscopio óptico, pero el microscopio electrónico tiene un poder de resolución mucho mayor porque puede acelerar electrones a energías cinéticas muy altas, lo que les da longitudes de onda muy cortas. Ningún microscopio puede resolver detalles que sean significativamente menores que la longitud de onda de la radiación que se usa para iluminar el objeto. Por lo general, las longitudes de onda de los electrones en un microscopio electrónico son menores que las longitudes de onda visibles por un factor de más o menos 10^{-5} .

El haz de electrones en un microscopio electrónico se controla mediante desviación electrostática o magnética, que actúa sobre los electrones para enfocar el haz a una imagen. Sin embargo, debido a limitaciones en las lentes electromagnéticas utilizadas, la mejora en resolución sobre los microscopios ópticos sólo es de un factor aproximado de 1000, dos órdenes de magnitud menor que el implicado por la longitud de onda del electrón. En lugar de examinar la imagen a través de un ocular como en un microscopio óptico, el observador mira una imagen formada sobre una pantalla fluorescente. (La pantalla de visualización debe ser fluorescente porque de otro modo la imagen producida no sería visible.)

■ FÍSICA APLICADA 27.2 ¿Microscopios de rayos X?

Los microscopios electrónicos (figura 27.17) sacan ventaja de la naturaleza ondulatoria de las partículas. Los electrones se aceleran a altas velocidades, lo que les da una corta longitud de onda de De Broglie. Imagine un microscopio electrónico que usa electrones con una longitud de onda de De Broglie de 0.2 nm. ¿Por qué no se diseña un microscopio que use fotones de 0.2 nm para hacer la mismo?

EXPLICACIÓN Puesto que los electrones son partículas cargadas, interactúan eléctricamente con la muestra en el microscopio y dispersan de acuerdo con la forma y densidad de varias porciones de la muestra, lo que proporciona un medio para visualizar la muestra. Los fotones con 0.2 nm de longitud de onda no tienen carga y están en la región de rayos X del espectro. Simplemente tenderían a pasar a través de la delgada muestra sin interactuar. ■

27.7 La función de onda

La revolucionaria idea de De Broglie de que las partículas tendrían una naturaleza ondulatoria pronto pasó del reino del escepticismo al punto donde se vio como un concepto necesario para entender el mundo subatómico. En 1926, el físico austro-alemán Erwin Schrödinger propuso una ecuación de onda que describía cómo las ondas de materia cambian en espacio y tiempo. La ecuación de onda de Schrödinger representa un elemento clave en la teoría de la mecánica cuántica. Es tan importante en la mecánica cuántica como las leyes de Newton en la mecánica clásica. La ecuación de Schrödinger se aplica con éxito al átomo de hidrógeno y a muchos otros sistemas microscópicos.

Al resolver la ecuación de Schrödinger (algo que está más allá del nivel de este curso) se determina una cantidad Ψ llamada **función de onda**. Cada partícula se representa mediante una función de onda Ψ que depende tanto de la posición como del tiempo. Una vez que se encuentra Ψ , Ψ^2 proporciona información acerca de la **probabilidad** (por unidad de volumen) de encontrar la partícula en alguna región dada. Para comprender esto, regrese al experimento de Young que involucra luz coherente que pasa a través de una doble rendija.

Primero, recuerde del capítulo 21 que la intensidad de un haz de luz es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico E asociado con el haz: $I \propto E^2$. De acuerdo con el modelo ondulatorio de la luz, existen ciertos puntos en la pantalla de visualización donde el campo eléctrico neto es cero como resultado de interferencia destructiva de las ondas provenientes de las dos rendijas. Puesto que E es cero en estos puntos, la intensidad también es cero y la pantalla es oscura en ese lugar. Del mismo modo, en puntos sobre la pantalla donde ocurre interferencia constructiva, E es grande, como la intensidad; por lo tanto, dichas posiciones son brillantes.

Ahora considere el mismo experimento cuando la luz se ve como poseedora de una naturaleza corpuscular. El número de fotones que llegan por segundo a un punto sobre la pantalla aumenta conforme la intensidad (brillo) aumenta. En consecuencia, el número de fotones que golpean un área unitaria sobre la pantalla cada segundo es proporcional al cuadrado del campo eléctrico, o $N \propto E^2$. Desde un punto de vista probabilístico, un fotón tiene una alta probabilidad de golpear la pantalla en un punto donde la intensidad (y E^2) es alta y una baja probabilidad de golpear la pantalla donde la intensidad es baja.



AIP Emilio Segre Visual Archives

Erwin Schrödinger Físico teórico austriaco (1887-1961)

Schrödinger es mejor conocido como el creador de la mecánica ondulatoria, una teoría menos complicada que la equivalente mecánica matricial desarrollada por Werner Heisenberg. En 1933, Schrödinger dejó Alemania y eventualmente se asentó en el Instituto Dublín de Estudios Avanzados, donde pasó 17 felices años creativos trabajando en problemas acerca de relatividad general, cosmología y la aplicación de la física cuántica a la biología. En 1956 regresó a su hogar en Austria y a sus amadas montañas tirolesas, donde murió en 1961.

Cuando se describen partículas en lugar de fotones, Ψ en vez de E juega el papel de la amplitud. Al usar una analogía con la descripción de la luz, se hace la siguiente interpretación de Ψ para partículas: si Ψ es una función de onda que se usa para describir una sola partícula, el valor de Ψ^2 en alguna posición en un tiempo dado es proporcional a la probabilidad por unidad de volumen de encontrar la partícula en dicha ubicación en dicho tiempo. Sumar todos los valores de Ψ^2 en una región dada proporciona la probabilidad de encontrar la partícula en dicha región.

27.8 El principio de incertidumbre

Si usted fuese a medir la posición y la velocidad de una partícula en algún instante, siempre se enfrentaría con incertidumbres experimentales en sus mediciones. De acuerdo con la mecánica clásica, no existe una barrera fundamental para un refinamiento último del aparato o procedimiento experimental. En otras palabras, es posible, en principio, realizar tales mediciones con incertidumbres arbitrariamente pequeñas. Sin embargo, la teoría cuántica predice que tal barrera sí existe. En 1927, Werner Heisenberg (1901-1976) introdujo esta noción, que ahora se conoce como **principio de incertidumbre**:

Si una medición de la posición de una partícula se realiza con una precisión Δx y una medición simultánea de la cantidad de movimiento lineal se efectúa con una precisión Δp_x , el producto de las dos incertidumbres nunca puede ser menor a $h/4\pi$:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad [27.16]$$

En otras palabras, **es físicamente imposible medir simultáneamente la posición exacta y la cantidad de movimiento lineal exacta de una partícula**. Si Δx es muy pequeña, entonces Δp_x es grande, y viceversa.

Para comprender el origen físico del principio de incertidumbre, considere el siguiente experimento mental introducido por Heisenberg. Suponga que quiere medir la posición y la cantidad de movimiento lineal de un electrón de manera tan precisa como sea posible. Tal vez quiera hacerlo al ver el electrón con un poderoso microscopio óptico. Para que vea el electrón y determine su posición, al menos un fotón de luz debe rebotar del electrón, como se muestra en la figura 27.18a y pasar a través del microscopio hacia su ojo, como se muestra en la figura 27.18b. Sin embargo, cuando golpea al electrón, el fotón transfiere alguna cantidad desconocida de su cantidad de movimiento al electrón. Por ende, en el proceso de ubicar al electrón con mucha precisión (esto es,

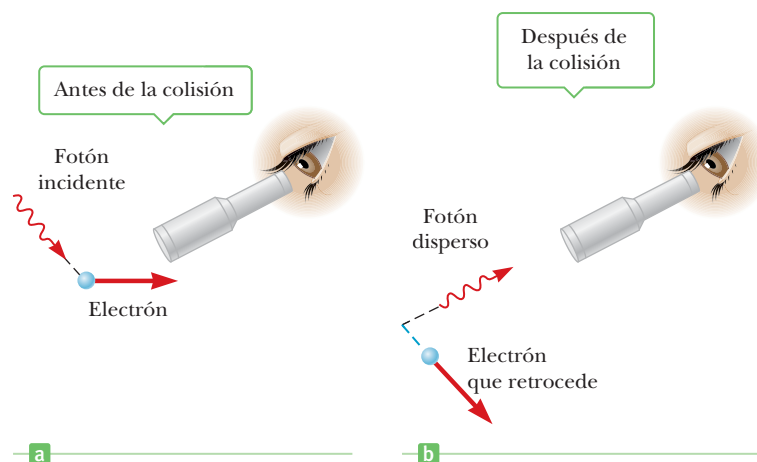


AIP Emilio Segre Visual Archives, Segre Collection

Werner Heisenberg Físico teórico alemán (1901-1976)

Heisenberg obtuvo su doctorado en 1923, en la Universidad de Munich, donde estudió bajo la dirección de Arnold Sommerfeld. Mientras que físicos como De Broglie y Schrödinger intentaban desarrollar modelos físicos del átomo, Heisenberg desarrolló un modelo matemático abstracto llamado *mecánica matricial* para explicar las longitudes de onda de las líneas espectrales. Heisenberg realizó muchas otras aportaciones significativas a la física, incluido su famoso principio de incertidumbre, por el cual recibió el Premio Nobel de Física en 1932; la predicción de dos formas de hidrógeno molecular y modelos teóricos del núcleo de un átomo.

Figura 27.18 Un experimento mental para ver un electrón con un poderoso microscopio. a) El electrón se ve antes de chocar con el fotón. b) El electrón retrocede (se perturba) como resultado de la colisión con el fotón.



al hacer Δx muy pequeña), la luz que le permite a usted triunfar en su medición, cambia la cantidad de movimiento del electrón en cierta medida indeterminable (lo que hace a Δp_x muy grande).

El fotón entrante tiene cantidad de movimiento h/λ . Como resultado de la colisión, el fotón transfiere parte o toda su cantidad de movimiento a lo largo del eje x hacia el electrón. Por lo tanto, la *incertidumbre* en la cantidad de movimiento del electrón después de la colisión es tan grande como la cantidad de movimiento del fotón entrante: $\Delta p_x = h/\lambda$. Más aún, dado que el fotón también tiene propiedades ondulatorias, se espera poder determinar la posición del electrón hasta dentro de una longitud de onda de la luz que se usa para verlo, de modo que $\Delta x = \lambda$. Al multiplicar estas dos incertidumbres obtenemos

$$\Delta x \Delta p_x = \lambda \left(\frac{h}{\lambda} \right) = h$$

El valor h representa el mínimo en el producto de las incertidumbres. Puesto que la incertidumbre siempre puede ser mayor que este mínimo, tenemos

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

Aparte del factor numérico $1/4\pi$ introducido por el análisis más preciso de Heisenberg, esta desigualdad concuerda con la ecuación 27.16.

Otra forma de la relación de incertidumbre establece un límite sobre la precisión con la que se puede medir la energía E de un sistema en un intervalo de tiempo finito Δt :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \quad [27.17]$$

Se puede inferir a partir de esta relación que la energía de una partícula no se puede medir con completa precisión en un intervalo de tiempo muy corto. Por ende, cuando un electrón se ve como partícula, el principio de incertidumbre dice que a) su posición y velocidad no se pueden conocer ambas con precisión al mismo tiempo y b) su energía puede ser incierta para un periodo dado por $\Delta t = h/(4\pi \Delta E)$.

■ EJEMPLO 27.5 Localización de un electrón

OBJETIVO Aplicar el principio de incertidumbre posición-cantidad de movimiento de Heisenberg.

PROBLEMA La velocidad de un electrón se mide en 5.00×10^3 m/s a una precisión de 0.003 00%. Encuentre la incertidumbre mínima al determinar la posición de este electrón.

ESTRATEGIA Después de calcular la cantidad de movimiento y su incertidumbre, sustituya en el principio de incertidumbre de Heisenberg, ecuación 27.16.

SOLUCIÓN

Calcule la cantidad de movimiento del electrón:

$$\begin{aligned} p_x &= m_e v = (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(5.00 \times 10^3 \text{ m/s}) \\ &= 4.56 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

La incertidumbre en p_x es 0.003 00% de este valor:

$$\begin{aligned} \Delta p_x &= 0.00300 p_x = (0.00300)(4.56 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}) \\ &= 1.37 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

Ahora calcule la incertidumbre en la posición usando este valor de Δp_x y la ecuación 27.17:

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta p_x &\geq \frac{h}{4\pi} \rightarrow \Delta x \geq \frac{h}{4\pi \Delta p_x} \\ \Delta x &\geq \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4\pi(1.37 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot \text{m/s})} = 0.385 \times 10^{-3} \text{ m} \\ &= \mathbf{0.385 \text{ mm}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Advierta que éste no es un cálculo exacto; la incertidumbre en la posición puede tomar cualquier valor en tanto sea mayor que o igual al valor dado por el principio de incertidumbre.

(continúa)

PREGUNTA 27.5 Verdadero o Falso: La incertidumbre en la posición de un protón en el núcleo de helio es, en promedio, menor que la incertidumbre de un protón en un átomo de uranio.

EJERCICIO 27.5 Suponga que un electrón se encuentra en alguna parte en un átomo de 1.25×10^{-10} m. Estime la incertidumbre en la cantidad de movimiento del electrón (en una dimensión).

RESPUESTA $\Delta p \geq 4.22 \times 10^{-25}$ kg · m/s

RESUMEN

27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck

Las características de la **radiación de cuerpo negro** no se pueden explicar con los conceptos clásicos. El pico de una curva de radiación de cuerpo negro está dado por la **ley de desplazamiento de Wien**,

$$\lambda_{\text{máx}} T = 0.2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad [27.1]$$

donde $\lambda_{\text{máx}}$ es la longitud de onda a la cual la curva tiene un pico y T es la temperatura absoluta del objeto que emite la radiación.

Planck fue el primero en introducir el concepto cuántico cuando supuso que los osciladores subatómicos responsables de la radiación de cuerpo negro podían tener sólo cantidades discretas de energía dada por

$$E_n = nhf \quad [27.2]$$

donde n es un entero positivo llamado **número cuántico** y f es la frecuencia de vibración del resonador.

27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz

El **efecto fotoeléctrico** es un proceso mediante el cual se expulsan electrones de una superficie metálica cuando sobre dicha superficie incide luz. Einstein proporcionó una explicación exitosa de este efecto al extender la hipótesis cuántica de Planck a las ondas electromagnéticas. En este modelo, la luz se ve como una corriente de partículas llamadas fotones, cada una con energía $E = hf$, donde f es la frecuencia de la luz y h es la **constante de Planck**. La máxima energía cinética de los fotoelectrones expulsados es

$$EC_{\text{máx}} = hf - \phi \quad [27.6]$$

donde ϕ es la **función de trabajo** del metal.

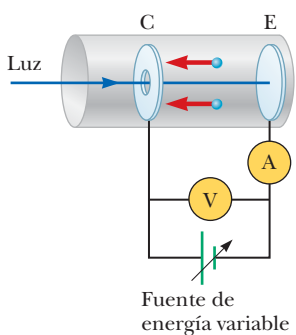


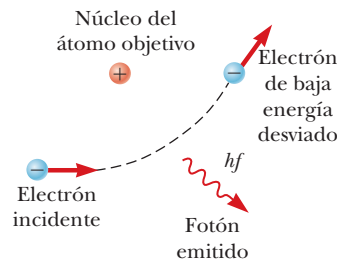
Diagrama de un circuito para el estudio del efecto fotoeléctrico.

27.3 Rayos X

27.4 Difracción de rayos X mediante cristales

Los **rayos X** se producen cuando electrones de alta velocidad se desaceleran súbitamente. Cuando los electrones se aceleran a través de un voltaje V , la radiación con longitud de onda más corta que se puede producir es

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{hc}{e\Delta V} \quad [27.9]$$

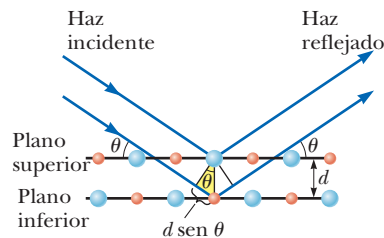


Un electrón pasando cerca de un átomo objetivo cargado experimenta aceleración y se emite un fotón en el proceso.

El arreglo regular de átomos en un cristal puede actuar como rejilla de difracción para rayos X y para electrones. La condición para interferencia constructiva de los rayos difractados está dada por la **ley de Bragg**:

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad [27.10]$$

La ley de Bragg tiene similitud con la ecuación para el patrón de difracción de una doble rendija.



Representación en dos dimensiones de la reflexión de un haz de rayos X de dos planos cristalinos paralelos separados por una distancia d . El rayo reflejado desde el plano inferior viaja más lejos que el reflejado desde el plano superior por una cantidad igual a $2d \sin \theta$.

27.5 El efecto Compton

Los rayos X de un haz incidente se dispersan a varios ángulos por los electrones en un blanco como el carbono. En tal evento

de dispersión, se observa un corrimiento en longitud de onda para los rayos X dispersos. Este fenómeno se conoce como **corrimiento Compton**. La conservación de cantidad de movimiento y energía aplicada a una colisión fotón-electrón produce la siguiente expresión para el corrimiento en longitud de onda de los rayos X dispersos:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad [27.11]$$

Aquí, m_e es la masa del electrón, c es la velocidad de la luz y θ es el ángulo de dispersión.

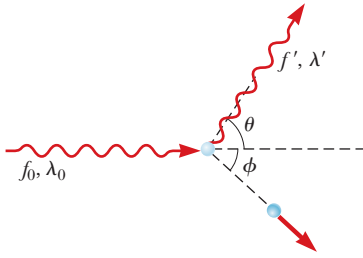


Diagrama que representa la dispersión Compton de un fotón debido a un electrón.

27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia

La luz muestra naturaleza tanto de partícula como de onda. De Broglie propuso que *toda* la materia tenía naturaleza tanto de partícula como de onda. La **longitud de onda de De Broglie** de cualquier partícula de masa m y velocidad v es

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad [27.14]$$

De Broglie también propuso que las frecuencias de las ondas asociadas con las partículas obedecen la relación de Einstein $E = hf$.

27.7 La función de onda

En la teoría de la **mecánica cuántica**, cada partícula se describe mediante una cantidad Ψ llamada **función de onda**. La probabilidad por unidad de volumen de encontrar la partícula en un punto específico en algún instante es proporcional a Ψ^2 . La mecánica cuántica ha sido enormemente exitosa para describir el comportamiento de los sistemas atómicos y moleculares.

27.8 El principio de incertidumbre

De acuerdo con el **principio de incertidumbre** de Heisenberg, es imposible medir simultáneamente la posición exacta y la cantidad de movimiento exacta de una partícula. Si Δx es la incertidumbre en la posición medida y Δp_x la incertidumbre en la cantidad de movimiento, el producto $\Delta x \Delta p_x$ está dado por

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad [27.16]$$

Además,

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \quad [27.17]$$

donde ΔE es la incertidumbre en la energía de la partícula y Δt es la incertidumbre en el tiempo que tarda medir la energía.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En un experimento fotoeléctrico, un metal es irradiado con luz de 3.56 eV de energía. Si se requiere un potencial de frenado de 1.10 V, ¿cuál es la función de trabajo del metal? a) 1.83 eV, b) 2.46 eV, c) 3.20 eV, d) 4.66 eV, e) 0.644 eV.
- ¿Cuál es la temperatura superficial de una estrella distante que tiene un pico con una longitud de onda de 475 nm? a) 6100 K, b) 5630 K, c) 5510 K, d) 6350 K, e) 6560 K.
- ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie de un electrón que acelera desde el reposo a través de una diferencia de potencial de 50.0 V? a) 0.100 nm, b) 0.174 nm, c) 0.139 nm, d) 0.834 nm, e) 0.435 nm.
- Un electrón se acelera a través de una diferencia de potencial de 3.00 V antes de chocar con un blanco metálico. ¿Cuál es la longitud de onda mínima de la luz para expulsar tal electrón? a) 204 nm, b) 352 nm, c) 414 nm, d) 536 nm, e) 612 nm.
- ¿Cuáles de los siguientes enunciados son ciertos de acuerdo con el principio de incertidumbre? a) Es imposible determinar simultáneamente tanto la posición como la cantidad de movimiento de una partícula con precisión arbitraria. b) Es imposible determinar simultáneamente tanto la energía como la cantidad de movimiento de una partícula con una precisión arbitraria. c) Es imposible determinar la energía de una partícula con precisión arbitraria en una cantidad finita de tiempo. d) Es imposible medir la posición de una partícula con precisión arbitraria en una cantidad finita de tiempo. e) Es imposible medir simultáneamente tanto la energía como la posición de una partícula con precisión arbitraria.
- Un fotón se dispersa de un electrón a un ángulo de $1.80 \times 10^2^\circ$ con respecto a su movimiento inicial. ¿Cuál es el cambio en la longitud de onda del fotón? a) 0.002 43 nm, b) 0.243 nm, c) 0.001 72 nm, d) 0.004 85 nm, e) 0.121 nm.
- Un protón, un electrón y un núcleo de helio se mueven con velocidad v . Clasifique sus longitudes de onda de De Broglie de mayor a menor: a) protón, núcleo de helio, electrón, b) núcleo de helio, protón, electrón, c) protón, electrón, núcleo de helio, d) núcleo de helio, electrón, protón, e) electrón, protón, núcleo de helio.
- El ángulo de dispersión de rayos X de primer orden del cristal A es mayor que el correspondiente ángulo de dispersión del cristal B para rayos X de una energía dada.

- ¿Qué se puede decir de la distancia de separación d_A de los planos cristalinos en el cristal A en comparación con la distancia de separación d_B en B ? a) $d_A = d_B$ b) $d_A > d_B$ c) $d_A < d_B$ d) La respuesta depende de la energía de los rayos X. e) La respuesta depende de la intensidad de los rayos X.
- ¿Cuál de los siguientes fenómenos demuestra con más claridad la naturaleza corpuscular de la luz? a) difracción, b) el efecto fotoeléctrico, c) polarización, d) interferencia, e) refracción.
 - ¿Cuál de los siguientes fenómenos demuestra con más claridad la naturaleza ondulatoria de los electrones?

a) el efecto fotoeléctrico, b) la ley de Wien, c) la radiación de cuerpo negro, d) el efecto Compton, e) la difracción de electrones mediante cristales.

- Un fotón de rayos X es dispersado por un electrón inicialmente estacionario. En relación con la frecuencia del fotón incidente, la frecuencia del fotón disperso es a) menor, b) mayor o igual, c) no cambia
- Un electrón y un protón, moviéndose en direcciones opuestas, se aceleran desde el reposo a través de la misma diferencia de potencial. ¿Qué partícula tiene la mayor longitud de onda? a) El electrón. b) El protón. c) Ambos son lo mismo. d) Ninguno tiene una longitud de onda.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Si observa objetos dentro de un horno muy caliente, ¿por qué es difícil discernir sus formas?
- ¿Por qué un microscopio electrónico es más adecuado que un microscopio óptico para “ver” objetos de tamaño atómico?
- ¿Los cuerpos negros son negros?
- ¿Por qué es imposible medir simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula con precisión infinita?
- Todos los objetos radian energía. ¿Por qué, entonces, no puede ver todos los objetos en una habitación oscura?
- ¿La luz es una onda o una partícula? Apoye su respuesta con la mención de evidencia experimental específica.
- En el efecto fotoeléctrico, explique por qué el potencial de frenado depende de la frecuencia de la luz mas no de la intensidad.
- ¿Cuál tiene más energía, un fotón de radiación ultravioleta o un fotón de luz amarilla?
- ¿Por qué la existencia de una frecuencia de corte en el efecto fotoeléctrico favorece una teoría corpuscular de la luz en lugar de una teoría ondulatoria?
- ¿Qué efecto, si hay alguno, esperaría usted que tuviera la temperatura de un material sobre la facilidad con la cual se pueden expulsar electrones de él a través del efecto fotoeléctrico?
- La frecuencia de corte de un material es f_0 . ¿Se emiten electrones del material cuando a) luz con frecuencia mayor que f_0 incide sobre el material? b) ¿Menor que f_0 ?
- La estrella más brillante en la constelación de Lyra es la estrella azulosa Vega, mientras que la estrella más brillante en Boötes es la estrella rojiza Arcturus. ¿Cómo explica la diferencia en color de las dos estrellas?
- Si el efecto fotoeléctrico se observa en un metal, ¿puede concluir que el efecto también se observará en otro metal bajo las mismas condiciones? Explique.
- Los átomos en un cristal yacen en planos separados por algunas décimas de nanómetro. ¿Se puede usar un cristal para producir un patrón de difracción con luz visible, como para los rayos X? Explique su respuesta con referencia a la ley de Bragg.
- ¿Un electrón es una onda o una partícula? Justifique su respuesta citando algunos resultados experimentales.
- Si la materia tiene una naturaleza de onda, ¿por qué esta característica no se observa en nuestras experiencias diarias?

■ PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck

- a) ¿Cuál es la temperatura superficial de Betelgeuse, una estrella gigante roja en la constelación de Orión, que radia con una longitud de onda con un máximo de aproxima-

damente 970 nm? b) Rigel, una estrella blanca-azulada en Orión, radia con una longitud de onda con un máximo de 145 nm. Encuentre la temperatura de la superficie de Rigel.

2. a) Los relámpagos producen una máxima temperatura de aire en el orden de 10^4 K, mientras que b) una explosión nuclear produce una temperatura en el orden de 10^7 K. Use la ley de desplazamiento de Wien para encontrar el orden de magnitud de la longitud de onda de los fotones producidos térmicamente que se radian con mayor intensidad por cada una de estas fuentes. Mencione la parte del espectro electromagnético donde esperaría que cada una radiara con mayor intensidad.
3. **BIO** La temperatura de la piel de un estudiante es 33.0° C. ¿Con qué longitud de onda la radiación emitida por la piel alcanza su punto máximo?
4. El radio del Sol es 6.96×10^8 m, y su potencia de salida total es 3.85×10^{26} W. a) Suponiendo que la superficie del Sol emite como un cuerpo negro, calcule la temperatura de su superficie. b) Usando el resultado del inciso a), encuentre $\lambda_{\text{máx}}$ para el Sol.
5. Calcule la energía en electrón-volts de un fotón que tiene una longitud de onda a) en el rango de microondas, 5.00 cm, b) en el rango de luz visible, 500 nm y c) en el rango de rayos X, 5.00 nm.
6. Suponga que una estrella con 8.50×10^8 m de radio tiene una longitud de onda con un máximo en 685 nm en el espectro de su radiación emitida. a) Encuentre la energía de un fotón con esta longitud de onda. b) ¿Cuál es la temperatura superficial de la estrella? c) ¿Con qué intervalo se emite energía de la estrella en la forma de radiación? Suponga que la estrella es un cuerpo negro ($e = 1$). d) Con la respuesta al inciso a), estime el intervalo con el que los fotones salen de la superficie de la estrella.
7. **M** Calcule la energía, en electrón-voltios, de un fotón cuya frecuencia es a) 620 THz, b) 3.10 GHz y c) 46.0 MHz.
8. **BIO** El umbral de visión adaptada a la oscuridad (escotopía) es 4.0×10^{-11} W/m² con una longitud de onda central de 500 nm. Si la luz con esta intensidad y longitud de onda entra al ojo cuando la pupila está abierta a su diámetro máximo de 8.5 mm, ¿cuántos fotones por segundo entran al ojo?

27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz

9. Cuando luz con 350 nm de longitud de onda cae sobre una superficie de potasio, se emiten electrones que tienen una energía cinética máxima de 1.31 eV. Encuentre a) la función de trabajo del potasio, b) la longitud de onda de corte y c) la frecuencia correspondiente a la longitud de onda de corte.
10. La función de trabajo para el zinc es 4.1 eV. a) Encuentre la longitud de onda de corte para el zinc. b) ¿Cuál es la frecuencia más baja de la luz incidente sobre el zinc que libera fotoelectrones de su superficie? c) Si los fotones de energía 5.50 eV inciden sobre el zinc, cuál es la energía cinética máxima de los fotoelectrones expulsados?
11. **PG** La función de trabajo para el platino es 6.35 eV. a) Convierta el valor de la función de trabajo, de electrón-volts a joules. b) Encuentre la frecuencia de corte para el

platino. c) ¿Qué longitud de onda máxima de luz incidente sobre platino libera fotoelectrones de la superficie del platino? d) Si luz con 8.50 eV de energía incide sobre el zinc, ¿cuál es la máxima energía cinética de los fotoelectrones expulsados? Proporcione su respuesta en electrón-volts. e) Para fotones de 8.50 eV de energía, ¿qué potencial de frenado se requeriría para detener la corriente de fotoelectrones?

12. **CIC** Litio, berilio y mercurio tienen funciones de trabajo de 2.30 eV, 3.90 eV y 4.50 eV, respectivamente. Luz con longitud de onda de 4.00×10^2 nm incide sobre cada uno de estos metales. a) ¿Cuál de estos metales emite fotoelectrones en respuesta a la luz? ¿Por qué? b) Encuentre la máxima energía cinética para los fotoelectrones en cada caso.
13. Cuando luz con longitud de onda de 254 nm cae sobre cesio, el potencial de frenado requerido es 3.00 V. Si se usa luz con 436 nm de longitud de onda, el potencial de frenado es 0.900 V. Use esta información para trazar una gráfica como la que se muestra en la figura 27.6 y a partir de la gráfica determine la frecuencia de corte para el cesio y su función de trabajo.
14. Dos fuentes de luz son utilizadas en un experimento fotoeléctrico para determinar la función de trabajo para una superficie de metal en particular. Cuando se usa la luz verde de una lámpara de mercurio ($\lambda = 546.1$ nm), un potencial de frenado de 0.376 V reduce la fotocorriente a cero. a) Con base en esta medida, ¿cuál es la función de trabajo de este metal? b) ¿Qué potencial de frenado se puede observar cuando se utiliza la luz amarilla de un tubo de descarga de helio ($\lambda = 587.5$ nm)?

27.3 Rayos X

15. Los extremos de la porción de rayos X del espectro electromagnético varían de aproximadamente 1.0×10^{-8} m a 1.0×10^{-13} m. Encuentre el máximo voltaje de aceleración que se requiere para producir longitudes de onda en estos dos extremos.
16. **CIC** Calcule la longitud de onda mínima de rayos X que se puede producir cuando un blanco se golpea con un electrón que se aceleró a través de una diferencia de potencial de a) 15.0 kV y b) 1.00×10^2 kV. c) ¿Qué ocurre con la longitud de onda mínima conforme aumenta la diferencia de potencial?
17. ¿Qué voltaje de aceleración mínimo se requiere para producir un rayo X con una longitud de onda de 70.0 pm?

27.4 Difracción de rayos X mediante cristales

18. Cuando rayos X con longitud de onda de 0.129 nm inciden sobre la superficie de un cristal que tiene una estructura similar a la del NaCl, a 8.15° se observa un máximo de primer orden. Con base en esta información, calcule el espaciamiento entre los planos del cristal.
19. **M** El yoduro de potasio tiene un espaciamiento entre planos de $d = 0.296$ nm. Un haz de rayos X monocromático muestra un máximo de difracción de primer orden cuando el ángulo rasante es 7.6° . Calcule la longitud de onda de los rayos X.

20. **CIC** El máximo de difracción de primer orden se observa en 12.6° para un cristal que tiene un espaciamiento entre planos de 0.240 nm . ¿Cuántos otros órdenes se pueden observar en el patrón de difracción y a qué ángulos aparecen? ¿Por qué hay un límite superior al número de órdenes observados?
21. Rayos X con longitud de onda de 0.140 nm se reflejan de cierto cristal y el máximo de primer orden ocurre a un ángulo de 14.4° . ¿Qué valor produce esto para el espaciamiento entre planos del cristal?

27.5 El efecto Compton

22. Rayos X se dispersan de un objetivo a un ángulo de 55.0° con la dirección del haz incidente. Encuentre el corrimiento de la longitud de onda de los rayos X dispersos.
23. **M** Un fotón de 0.00160 nm se dispersa de un electrón libre. ¿Para qué ángulo de dispersión (fotón) el electrón que retrocede y el fotón dispersado tendrán la misma energía cinética?
24. **S** Un fotón con longitud de onda λ se dispersa de un electrón libre en A (figura P27.24), produciendo un segundo fotón con longitud de onda de λ' . Este fotón se dispersa fuera de otro electrón libre en B , generando un tercer fotón de longitud de onda λ'' y moviéndose en una dirección directamente opuesta a la del fotón original como se muestra en la figura. Determinar el valor de $\Delta\lambda = \lambda'' - \lambda$.

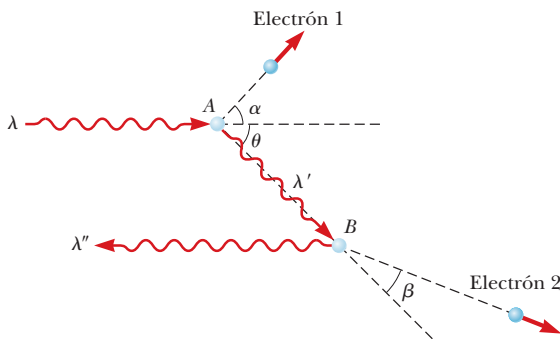


Figura P27.24

25. Un fotón de 0.110 nm choca con un electrón en reposo. Después de la colisión, el electrón se mueve hacia adelante y el fotón retrocede. Encuentre la cantidad de movimiento y la energía cinética del electrón.
26. En un experimento de dispersión de Compton, un haz de rayos X dispersa fotones a un ángulo de 17.4° a partir de un electrón libre que está inicialmente en reposo. El electrón retrocede a una velocidad de 2180 km/s . Calcule a) la longitud de onda del fotón incidente y b) el ángulo a través del cual los electrones se dispersan.

27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia

27. a) Si la longitud de onda de un electrón es $5.00 \times 10^{-7} \text{ m}$, ¿cuán rápido se mueve? b) Si el electrón tiene una velocidad igual a $1.00 \times 10^7 \text{ m/s}$, ¿cuál es su longitud de onda?
28. Calcule la longitud de onda de De Broglie de un protón que se mueve a a) $2.00 \times 10^4 \text{ m/s}$ y b) $2.00 \times 10^7 \text{ m/s}$.

29. De Broglie postuló que la relación $\lambda = h/p$ es válida para partículas relativistas. ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie para un electrón (relativista) que tiene una energía cinética de 3.00 MeV ?
30. a) Un electrón tiene una energía cinética de 3.00 eV . Encuentre su longitud de onda. b) Un fotón tiene una energía 3.00 eV . Encuentre su longitud de onda.
31. El poder de resolución de un microscopio es proporcional a la longitud de onda empleada. Para "ver" un átomo se requeriría una resolución de $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}$ (0.010 nm). a) Si se usaran electrones (microscopio electrónico), ¿qué energía cinética mínima requerirían los electrones? b) Si se usaran fotones, ¿qué energía mínima de fotón se necesitaría para obtener una resolución de $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}$?
32. **CIC** Una partícula no relativista de masa m y carga q se acelera desde el reposo a través de una diferencia de potencial ΔV . a) Use la conservación de energía para encontrar una expresión simbólica para la cantidad de movimiento de la partícula en términos de m , q y ΔV . Suponga que la velocidad de la partícula no es relativista. b) Escriba una expresión simbólica para la longitud de onda de De Broglie, con el resultado del inciso a). c) Si un electrón y un protón pasan a través de la misma diferencia de potencial, pero en direcciones opuestas, ¿cuál partícula tendrá la longitud de onda más corta?

27.7 La función de onda

27.8 El principio de incertidumbre

33. En el estado base del hidrógeno, la incertidumbre en la posición del electrón es aproximadamente 0.10 nm . Si la velocidad del electrón es aproximadamente la misma que la incertidumbre en su velocidad, ¿cuán rápido se mueve?
34. Un electrón se encuentra en la punta de un alfiler que tiene un diámetro de $2.5 \mu\text{m}$. ¿Cuál es el mínimo de incertidumbre en la velocidad del electrón?
35. **M** Un electrón y una bala de 0.020 kg cada uno, tienen una rapidez de 500 m/s y una precisión de 0.010% . ¿Dentro de qué límite menor podemos determinar la posición de cada objeto a lo largo de la dirección de la velocidad?
36. Suponga que Borrosito, un pato mecánico-cuántico, vive en un mundo donde $h = 2\pi \text{ J} \cdot \text{s}$. Borrosito tiene una masa de 2.00 kg e inicialmente se sabe que está dentro de un lago de 1.00 m de ancho. a) ¿Cuál es la incertidumbre mínima en la velocidad del pato? b) Suponiendo que esta incertidumbre en velocidad prevalece durante 5.00 s , determine la incertidumbre en la posición de Borrosito después de este tiempo.
37. La vida promedio de un muón es aproximadamente $2 \mu\text{s}$. Estime la incertidumbre mínima en la energía de un muón.
38. **CIC** a) Demuestre que la energía cinética de una partícula no relativista se puede escribir en términos de su cantidad de movimiento como $EC = p^2/2m$. b) Use los resultados del inciso a) para encontrar la energía cinética mínima de un protón confinado dentro de un núcleo que tiene un diámetro de $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}$.

Problemas adicionales

- 39. Un fotón de microondas en la región de la banda X tiene una longitud de onda de 3.00 cm. Encuentre a) la cantidad de movimiento, b) la frecuencia y c) la energía del fotón en electrón-volts.
- 40. Encuentre la velocidad de un electrón que tiene una longitud de onda de De Broglie igual a su longitud de onda Compton. *Sugerencia:* Este electrón es relativista.
- 41. Un objeto de 2.0 kg cae desde una altura de 5.0 m hasta el suelo. Si toda la energía potencial gravitacional de esta masa se pudiera convertir a luz visible de 5.0×10^{-7} m de longitud de onda, ¿cuántos fotones se producirían?
- 42. Un tubo de rayos X opera a 50 000 V. a) Encuentre la longitud de onda mínima de la radiación emitida por este tubo. b) Si la radiación se dirige a un cristal, el máximo de primer orden en la radiación reflejada ocurre cuando el ángulo de roce es 2.5° . ¿Cuál es el espaciamiento entre los planos que reflejan en el cristal?
- 43. **C|C** La figura P27.43 muestra el espectro de luz emitido por una luciérnaga. Determine la temperatura de un cuerpo negro que emitiría radiación con un máximo en la misma frecuencia. Con base en sus resultados, ¿diría que la radiación de la luciérnaga es radiación de cuerpo negro?

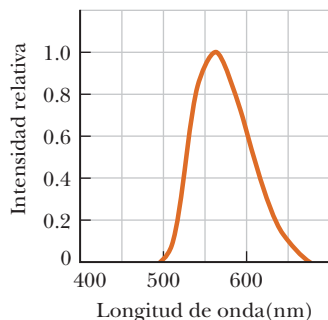


Figura P27.43

- 44. El truco favorito de Johnny el saltarín es saltar desde su ventana del piso 16 y caer 50.0 m en una alberca. Un reportero toma una fotografía de Johnny, de 75.0 kg, justo antes de dar el chapuzón y usa un tiempo de exposición de

5.00 ms. Encuentre a) la longitud de onda de De Broglie de Johnny en este momento, b) la incertidumbre de la medición de su energía cinética durante tal periodo y c) el error porcentual causado por tal incertidumbre.

- 45. **M** Fotones con 450 nm de longitud de onda inciden sobre un metal. Los electrones más energéticos que se expulsan del metal se desvían en un arco circular de 20.0 cm de radio mediante un campo magnético con una magnitud de 2.00×10^{-5} T. ¿Cuál es la función de trabajo del metal?
- 46. Un electrón inicialmente en reposo retrocede después de un choque frontal con un fotón de 6.20 keV. Determine la energía cinética adquirida por el electrón.
- 47. Una fuente de luz con longitud de onda λ ilumina un metal y expulsa fotoelectrones con una energía cinética máxima de 1.00 eV. Una segunda fuente de luz, con longitud de onda $\lambda/2$, expulsa fotoelectrones con una energía cinética máxima de 4.00 eV. ¿Cuál es la función de trabajo del metal?
- 48. Luz roja con longitud de onda de 670 nm produce fotoelectrones de cierto material fotoemisor. Luz verde con longitud de onda de 520 nm produce fotoelectrones del mismo material con 1.50 veces la máxima energía cinética. ¿Cuál es la función de trabajo del material?
- 49. ¿Cuán rápido se debe mover un electrón si toda su energía cinética se pierde en un solo fotón de rayo X a) en el extremo superior del espectro electromagnético de rayos X, con una longitud de onda de 1.00×10^{-8} m y b) en el extremo inferior del espectro electromagnético de rayos X, con una longitud de onda de 1.00×10^{-13} m?
- 50. **C|C** A partir de la dispersión de la luz del Sol, J. J. Thomson calculó el radio clásico del electrón que tiene el valor de $2.82 \text{ m} \times 10^{-15}$ m. La luz del Sol con una intensidad de 500 W/m^2 cae en un disco con este radio. Suponga que la luz es una onda mecánica y la luz que incide sobre el disco es absorbida completamente. a) Calcule el tiempo necesario para acumular 1.00 eV de energía. b) Explique cómo su resultado para el inciso a) se compara con la observación de que fotoelectrones son emitidos con prontitud (en 10^{-9} s).

La quema de pólvora transfiere energía a los átomos de los químicos que producen color, lo que excita sus electrones a estados de energía superiores. Al regresar al estado base, los electrones emiten luz de colores específicos, lo que resulta en espectaculares despliegues pirotécnicos. El estroncio produce rojo y el sodio produce amarillo/anaranjado.



© Sunnybeach/istockphoto.com

28

Física atómica

- 28.1 Primeros modelos del átomo
- 28.2 Espectros atómicos
- 28.3 El modelo de Bohr
- 28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno
- 28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica
- 28.6 Rayos X característicos
- 28.7 Transiciones atómicas y láseres

Un gas caliente emite luz de ciertas longitudes de onda características que se pueden usar para identificarlo, así como una huella digital puede identificar a una persona. Para un átomo dado, estas longitudes de onda características emitidas se pueden comprender con el uso de cantidades físicas llamadas números cuánticos. El átomo más simple es el hidrógeno y entenderlo puede conducir a comprender la estructura de otros átomos y sus combinaciones. El hecho de que dos electrones en un átomo no puedan tener el mismo conjunto de números cuánticos, el principio de exclusión de Pauli, es extremadamente importante para comprender las propiedades de los átomos complejos y el orden de los elementos en la tabla periódica. Conocer la estructura atómica se puede usar para describir los mecanismos involucrados en la producción de rayos X y la operación de un láser, entre muchas otras aplicaciones.

28.1 Primeros modelos del átomo

El modelo del átomo en la época de Newton era una pequeña esfera dura e indestructible. Aunque este modelo fue una buena base para la teoría cinética de los gases, se tuvieron que desarrollar nuevos modelos cuando experimentos posteriores revelaron la naturaleza electrónica de los átomos. J. J. Thomson (1856-1940) sugirió un modelo del átomo como un volumen de carga positiva con electrones incrustados a través de todo su volumen, en forma muy parecida a las semillas en una sandía (figura 28.1).

En 1911, Ernest Rutherford (1871-1937) y sus estudiantes Hans Geiger y Ernest Marsden realizaron un experimento crítico que demostró que el modelo de Thomson no podía ser correcto. En este experimento, un haz de **partículas alfa** con carga positiva se proyectó contra una delgada hoja metálica, como en la figura 28.2a. La mayoría de las partículas alfa pasaba a través de la hoja como si fuese espacio vacío, pero algunas partículas se dispersaban a través de grandes ángulos e incluso algunas viajaban de regreso.

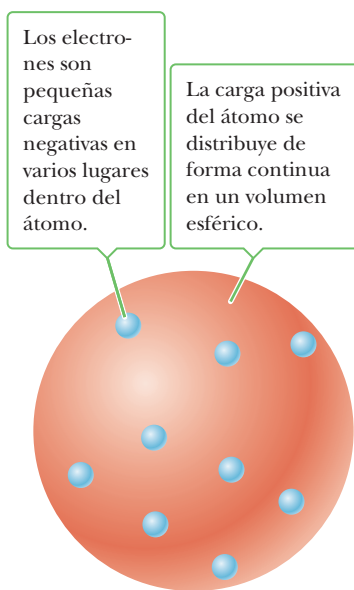


Figura 28.1 Modelo de Thomson del átomo.

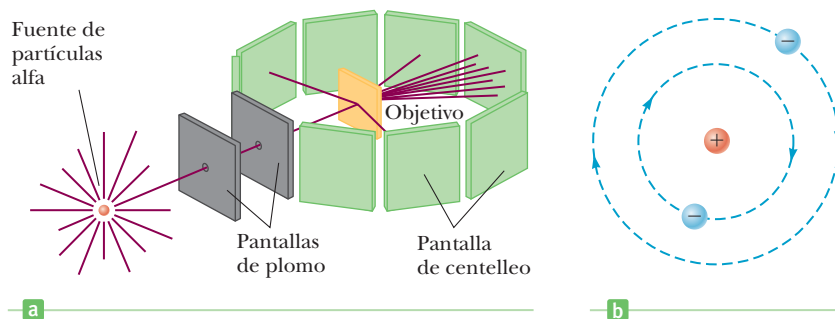


Figura 28.2 a) Técnica de Geiger y Marsden para observar la dispersión de partículas alfa en un delgado objetivo de hoja metálica. La fuente es una sustancia radiactiva natural, como el radio. b) Modelo planetario del átomo de Rutherford.

No se esperaban desviaciones tan grandes. En el modelo de Thomson una partícula alfa con carga positiva nunca se acercaría lo suficiente a una gran carga positiva para causar alguna desviación con un ángulo grande. Rutherford explicó estos resultados al suponer que la carga positiva en un átomo estaba concentrada en una región llamada **núcleo**, que era pequeño en relación con el tamaño del átomo. Cualquier electrón que pertenezca al átomo se visualiza como en órbita alrededor del núcleo, en forma muy parecida a los planetas que orbitan al Sol, como se muestra en la figura 28.2b. Las partículas alfa que se usaron en los experimentos de Rutherford se identificaron posteriormente como núcleos de átomos de helio.

Con el modelo planetario de Rutherford había dos dificultades básicas. Primera, un átomo emite ciertas frecuencias características discretas de radiación electromagnética y ninguna otra; el modelo de Rutherford era incapaz de explicar este fenómeno. Segunda, los electrones en el modelo de Rutherford experimentan una aceleración centrípeta. De acuerdo con la teoría de electromagnetismo de Maxwell, las cargas con aceleración centrípeta que giran con frecuencia f deben radiar ondas electromagnéticas de la misma frecuencia. Conforme el electrón radia energía, el radio de su órbita disminuye de manera estable y su frecuencia de revolución aumenta. Este proceso conduce a una frecuencia cada vez más creciente de radiación emitida y un rápido colapso del átomo conforme el electrón cae en espiral hacia el núcleo.

El modelo de Rutherford del átomo dio lugar al de Niels Bohr, que explicaba la radiación característica emitida por los átomos. A su vez, la teoría de Bohr fue sustituida por la mecánica cuántica. Las dos últimas teorías se basan en estudios de espectros atómicos: el patrón característico en las longitudes de onda de la luz emitida que es único para cada elemento diferente.



Stock Montage, Inc.

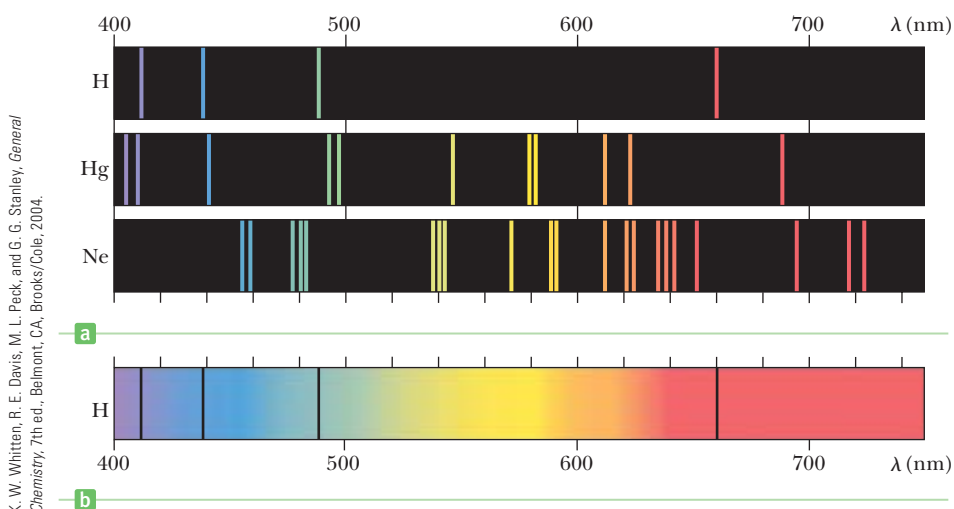
Sir Joseph John Thomson Físico inglés (1856-1940)

Thomson, generalmente conocido como el descubridor del electrón, abrió el campo de la física de partículas subatómicas con su extenso trabajo acerca de la desviación de rayos catódicos (electrones) en un campo eléctrico. Recibió el Premio Nobel de Física en 1906 por su descubrimiento del electrón.

28.2 Espectros atómicos

Suponga que un tubo de vidrio vacío se llena con hidrógeno (o algún otro gas) a baja presión. Si entre los electrodos metálicos del tubo se aplica un voltaje lo suficientemente grande como para producir una corriente eléctrica en el gas, el tubo emite luz que tiene un color que depende del gas en el interior. (Así es como funciona una señal de neón.) Cuando la luz emitida se analiza con un espectrómetro, se observan líneas brillantes tenues y cada una tiene una longitud de onda o color diferente. Tal serie de líneas espectrales se llama **espectro de emisión**. Las longitudes de onda contenidas en tal espectro son características del elemento que emite la luz. Puesto que ningún par de elementos emite el mismo

Figura 28.3 Espectros visibles. a) Espectros de línea producidos por emisión en el rango visible para los elementos hidrógeno, mercurio y neón. b) Espectro de absorción para hidrógeno. Las líneas de absorción oscuras ocurren a las mismas longitudes de onda que las líneas de emisión para el hidrógeno que se muestra en a).



espectro de líneas, este fenómeno representa una técnica confiable para identificar elementos en una sustancia gaseosa. Varios espectros de emisión se muestran en la figura 28.3a.

El espectro de emisión del hidrógeno que se muestra en la figura 28.4 incluye cuatro líneas prominentes que ocurren a longitudes de onda de 656.3 nm, 486.1 nm, 434.1 nm y 410.2 nm. En 1885, Johann Balmer (1825-1898) descubrió que las longitudes de onda de éstas y de líneas menos prominentes pueden describirse mediante la simple ecuación empírica

Serie de Balmer ▶

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad [28.1]$$

donde n puede tener valores enteros de 3, 4, 5, . . . , y R_H es una constante llamada **constante de Rydberg**. Si la longitud de onda está en metros, entonces R_H tiene el valor

Constante de Rydberg ▶

$$R_H = 1.097\,373\,2 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad [28.2]$$

La primera línea en la serie de Balmer, a 656.3 nm, corresponde a $n = 3$ en la ecuación 28.1, la línea a 486.1 nm corresponde a $n = 4$, etcétera. Además de la serie de Balmer de líneas espectrales, tiempo después se descubrió la serie de Lyman en el ultravioleta lejano y las longitudes radiadas se describen mediante una ecuación similar, pero con 1^2 en lugar de 2^2 en la ecuación 28.1 y el entero n mayor que 1. La serie de Paschen corresponde a longitudes de onda mayores que la serie de Balmer, pero con 3^2 en lugar de 2^2 en la ecuación 28.1 y $n > 3$. Estos modelos, junto con muchas otras observaciones, se pueden combinar para producir la ecuación de Rydberg,

Ecuación de Rydberg ▶

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad [28.3]$$

donde m y n son enteros positivos y $n > m$.

Además de emitir luz a longitudes de onda específicas, un elemento puede absorber luz a longitudes de onda específicas. Las líneas espectrales que corresponden a este proceso forman lo que se conoce como un **espectro de absorción**. Un espectro de absorción se puede obtener al pasar un espectro de radiación continuo (uno que contenga todas las longitudes de onda) a través de un vapor del elemento a analizar. El espectro de absorción consiste en una serie de líneas oscuras superpuestas sobre el espectro de otro modo brillante y continuo. Cada línea en el espectro de absorción de un elemento dado coincide con una línea en el espectro de emisión del elemento. Si el hidrógeno es el vapor que absorbe, por ejemplo, las líneas oscuras aparecerán a las longitudes de onda visibles 656.3 nm, 486.1 nm, 434.1 nm y 410.2 nm, como se muestra en las figuras 28.3b y 28.4.

El espectro de absorción de un elemento tiene muchas aplicaciones prácticas. Por ejemplo, el espectro continuo de la radiación emitida por el Sol debe pasar a través de los gases más fríos de la atmósfera solar antes de llegar a la Tierra. Las diversas líneas de absorción que se observan en el espectro solar sirvieron para identificar elementos en la atmósfera solar, incluido el helio, que anteriormente se desconocía.

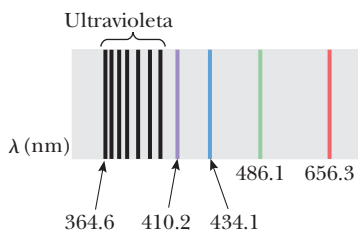


Figura 28.4 Serie de Balmer de líneas espectrales para hidrógeno atómico, con varias líneas marcadas con la longitud de onda en nanómetros. La línea marcada 364.6 es la línea de longitud de onda más corta y está en la región ultravioleta del espectro electromagnético. Las otras líneas marcadas están en la región visible.

■ FÍSICA APLICADA 28.1 Térmico o espectral

Al observar la flama amarilla de una vela, su compañero de laboratorio afirma que la luz proveniente de la flama se origina a partir de átomos de sodio excitados en la flama. Usted no está de acuerdo y postula que, dado que la flama de la vela está caliente, la radiación debe tener origen térmico. Antes de que el desacuerdo se vuelva más intenso, ¿cómo podría determinar quién está en lo correcto?

EXPLICACIÓN Podría realizar una determinación simple al observar la luz de la flama de la vela a través de un

espectrómetro, que es una combinación de rendija y rejilla de difracción, analizado en el capítulo 25. Si el espectro de la luz es continuo, probablemente tiene origen térmico. Si el espectro muestra líneas discretas, tiene origen atómico. Los resultados del experimento demuestran que la luz de hecho tiene origen térmico y se produce a partir de movimiento aleatorio en la flama de la vela. ■

■ FÍSICA APLICADA 28.2 Auroras

En el norte, a latitudes extremas, las auroras boreales proporcionan un hermoso y colorido despliegue en el cielo nocturno. Un despliegue similar, llamado aurora austral, ocurre cerca de la región polar del sur. ¿Cuál es el origen de los diversos colores que se ven en las auroras?

EXPLICACIÓN La aurora es el resultado de la interacción de partículas de alta velocidad con el campo magnético de la Tierra y entran a la atmósfera. Cuando estas partículas cho-

can con las moléculas en la atmósfera, excitan las moléculas tal como lo hace el voltaje en los tubos de espectro que se estudiaron anteriormente en esta sección. En respuesta, las moléculas emiten colores de luz de acuerdo con los espectros característicos de sus constituyentes atómicos. Para la atmósfera terrestre, los constituyentes principales son nitrógeno y oxígeno, que proporcionan los colores rojo, azul y verde de la aurora. ■

28.3 El modelo de Bohr

A comienzos del siglo XX, no se entendía por qué los átomos de un elemento dado emitían y absorbían sólo ciertas longitudes de onda. En 1913, Bohr proporcionó una explicación de los espectros de hidrógeno que incluye algunas características de la teoría actualmente aceptada. Su modelo del átomo de hidrógeno incluyó las siguientes suposiciones básicas:

1. El electrón se mueve en órbitas circulares en torno al protón bajo la influencia de la fuerza de atracción de Coulomb, como en la figura 28.5. La fuerza de Coulomb produce la aceleración centrípeta del electrón.
2. Sólo ciertas órbitas son estables y permitidas. En estas órbitas no se emite energía en forma de radiación electromagnética, de modo que la energía total del átomo permanece constante.
3. El átomo de hidrógeno emite radiación cuando el electrón “salta” de un estado inicial más energético a un estado menos energético. El “salto” no se puede visualizar o tratar de manera clásica. La frecuencia f de la radiación emitida en el salto se relaciona con el cambio en la energía del átomo, dada por

$$E_i - E_f = hf \quad [28.4]$$

donde E_i es la energía del estado inicial, E_f es la energía del estado final, h es la constante de Planck y $E_i > E_f$. La frecuencia de la radiación es *independiente de la frecuencia del movimiento orbital del electrón*.

4. La circunferencia de la órbita de un electrón debe contener un número entero de longitudes de onda de De Broglie,

$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(véase la figura 28.6). Puesto que la longitud de onda de De Broglie de un electrón es $\lambda = h/m_e v$, la ecuación anterior se puede escribir como

$$m_e v r = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [28.5]$$

donde $\hbar = h/2\pi$.

El electrón sólo puede estar en órbitas específicas de radios discretos.

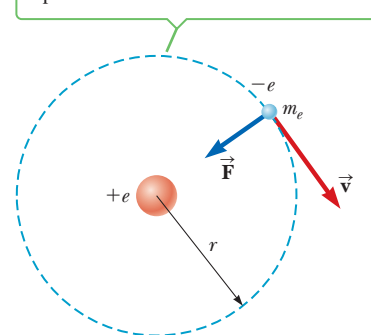


Figura 28.5 Diagrama que representa el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno.

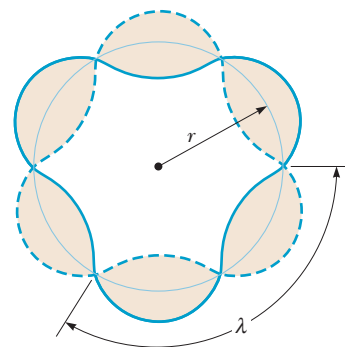
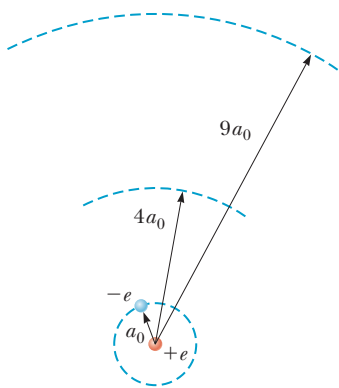


Figura 28.6 Patrón de onda estacionaria para una onda de electrones en una órbita estable del hidrógeno. Existen cuatro longitudes de onda completas en esta órbita.

**Niels Bohr****Físico danés (1885-1962)**

Bohr fue un participante activo en el desarrollo temprano de la mecánica cuántica y proporcionó mucho de su marco filosófico. Durante las décadas de 1920 y 1930, encabezó el Instituto para Estudios Avanzados en Copenhague, donde muchos de los mejores físicos del mundo llegaron para intercambiar ideas. Bohr recibió el Premio Nobel de Física en 1922 por su investigación de la estructura de los átomos y de la radiación que emana de ellos.

**Figura activa 28.7**

Las primeras tres órbitas circulares predichas por el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno. El electrón se muestra en órbita en su estado base.

Niveles de energía del hidrógeno ►

Con estas cuatro suposiciones, se pueden calcular las energías permitidas y las longitudes de onda de emisión del átomo de hidrógeno usando el modelo que se representa en la figura 28.5, en el cual el electrón viaja en una órbita circular de radio r con una velocidad orbital v . La energía potencial eléctrica del átomo es

$$EP = k_e \frac{q_1 q_2}{r} = k_e \frac{(-e)(e)}{r} = -k_e \frac{e^2}{r}$$

donde k_e es la constante de Coulomb. Suponiendo que el núcleo está en reposo, la energía total E del átomo es la suma de la energía cinética y potencial:

$$E = EC + EP = \frac{1}{2} m_e v^2 - k_e \frac{e^2}{r} \quad [28.6]$$

Por la segunda ley de Newton, la fuerza de atracción eléctrica sobre el electrón, $k_e e^2 / r^2$, debe ser igual a $m_e a_r$, donde $a_r = v^2 / r$ es la aceleración centrípeta del electrón, de modo que

$$m_e \frac{v^2}{r} = k_e \frac{e^2}{r^2} \quad [28.7]$$

Multiplique ambos lados de esta ecuación por $r/2$ para obtener una expresión para la energía cinética:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{k_e e^2}{2r} \quad [28.8]$$

Al combinar este resultado con la ecuación 28.6 obtenemos una expresión para la energía del átomo,

$$E = -\frac{k_e e^2}{2r} \quad [28.9]$$

donde el valor negativo de la energía indica que el electrón está enlazado al protón.

Al resolver las ecuaciones 28.5 y 28.7 para v^2 e igualar los resultados se obtiene una expresión para r :

$$v^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e^2 r^2} = \frac{k_e e^2}{m_e r}$$

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k_e e^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [28.10]$$

Esta ecuación se basa en la suposición de que **el electrón puede existir solamente en ciertas órbitas permitidas determinadas por el entero n** .

La órbita con el radio más pequeño, llamado **radio de Bohr**, a_0 , corresponde a $n = 1$ y tiene el valor

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m k_e e^2} = 0.0529 \text{ nm} \quad [28.11]$$

Una expresión general para el radio de cualquier órbita en el átomo de hidrógeno se obtiene al sustituir la ecuación 28.11 en la ecuación 28.10:

$$r_n = n^2 a_0 = n^2 (0.0529 \text{ nm}) \quad [28.12]$$

En la figura activa 28.7 se muestran las primeras tres órbitas de Bohr para el hidrógeno.

La ecuación 28.10 se puede sustituir entonces en la ecuación 28.9 para dar como resultado la siguiente expresión para las energías de los estados cuánticos:

$$E_n = -\frac{m_e k_e^2 e^4}{2 \hbar^2} \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [28.13]$$

Si se sustituyen valores numéricos en la ecuación 28.13, se obtiene

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \quad [28.14]$$

El estado de energía más bajo o **estado base**, corresponde a $n = 1$ y tiene una energía $E_1 = -m_e k_e^2 e^4 / 2\hbar^2 = -13.6$ eV. El siguiente estado, que corresponde a $n = 2$, tiene una energía $E_2 = E_1/4 = -3.40$ eV, etcétera. En la figura activa 28.8 se proporciona un diagrama de niveles de energía que muestra las energías de dichos estados estacionarios y los correspondientes números cuánticos. El nivel superior, que corresponde a $E = 0$ y $n \rightarrow \infty$, representa el estado para el cual el electrón se libera por completo del átomo. En este estado las EC y EP del electrón son ambas cero, lo cual significa que el electrón está en reposo infinitamente lejos del protón. La energía mínima requerida para ionizar el átomo (esto es, para removerlo por completo del electrón) se llama **energía de ionización**. La energía de ionización para el hidrógeno es 13.6 eV.

Las ecuaciones 28.4 y 28.13 y el tercer postulado de Bohr muestran que, si el electrón salta de una órbita con número cuántico n_i a una segunda órbita con número cuántico n_f , emite un fotón de frecuencia f dada por

$$f = \frac{E_i - E_f}{\hbar} = \frac{m_e k_e^2 e^4}{4\pi \hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad [28.15]$$

donde $n_f < n_i$.

Para convertir esta ecuación en una análoga a la ecuación de Rydberg, sustituya $f = c/\lambda$ y divida ambos lados por c , para obtener

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad [28.16]$$

donde

$$R_H = \frac{m_e k_e^2 e^4}{4\pi c \hbar^3} \quad [28.17]$$

Al sustituir los valores conocidos de m_e , k_e , e , c y \hbar se comprueba que este valor teórico para la constante de Rydberg está en excelente concordancia con el valor derivado experimentalmente en las ecuaciones de la 12.1 a la 12.3. Cuando Bohr demostró esta concordancia, se reconoció como un gran logro de su teoría.

Es posible usar la ecuación 28.16 para evaluar las longitudes de onda para las diversas series en el espectro del hidrógeno. Por ejemplo, en la serie de Balmer, $n_f = 2$ y $n_i = 3, 4, 5, \dots$ (ecuación 28.1). El diagrama de niveles de energía para el hidrógeno que se muestra en la figura activa 28.8 indica el origen de las líneas espectrales. Las transiciones entre niveles se representan mediante flechas verticales. Observe que, siempre que una transición ocurra entre un estado designado por n_i a uno designado por n_f (donde $n_i > n_f$), se emite un fotón con una frecuencia $(E_i - E_f)/h$. Este proceso se puede interpretar del modo siguiente: las líneas en la parte visible del espectro de hidrógeno surgen cuando el electrón salta de la órbita tercera, cuarta o incluso superior, a la segunda órbita. La teoría de Bohr predice exitosamente las longitudes de onda de todas las líneas espectrales observadas del hidrógeno.

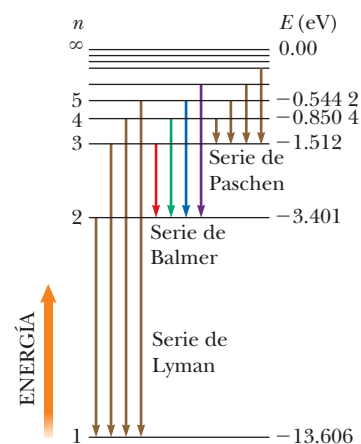


Figura activa 28.8 Diagrama de niveles de energía para el hidrógeno. A la izquierda se proporcionan los números cuánticos y a la derecha las energías (en electrón-volts). Las flechas verticales representan las cuatro transiciones de menor energía para cada una de las series espectrales que se muestran. Las flechas de colores para la serie de Balmer indican que esta serie resulta en luz visible.

Tip 28.1 La energía depende de n sólo para hidrógeno

Puesto que todas las otras cantidades en la ecuación 28.13 son constantes, los niveles de energía de un átomo de hidrógeno sólo dependen del número cuántico n . Para átomos más complicados, los niveles de energía también dependen de otros números cuánticos.

■ EJEMPLO 28.1 La serie de Balmer para el hidrógeno

OBJETIVO Calcular la longitud de onda, frecuencia y energía de un fotón emitido durante una transición electrónica en un átomo.

PROBLEMA La serie de Balmer para el átomo de hidrógeno corresponde a transiciones electrónicas que terminan en el estado con número cuántico $n = 2$, como se muestra en la figura 28.9. **a)** Encuentre el fotón con longitud de onda más larga emitida en la serie de Balmer y determine su frecuencia y energía. **b)** Encuentre el fotón con longitud de onda más corta emitido en la misma serie.

ESTRATEGIA Este problema es asunto de sustituir valores en la ecuación 28.16. Entonces la frecuencia se puede obtener a partir de $c = f\lambda$ y la energía de $E = hf$. El fotón con longitud de onda más largo corresponde al que se emite cuando el electrón salta del estado $n_i = 3$ al estado $n_f = 2$. El fotón con longitud de onda más corta corresponde al que se emite cuando el electrón salta de $n_i = \infty$ al estado $n_f = 2$.

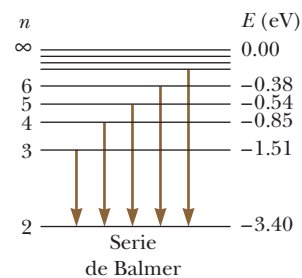


Figura 28.9 (Ejemplo 28.1) Transiciones responsables de la serie de Balmer para el átomo de hidrógeno. Todas las transiciones terminan en el nivel $n = 2$.

(continúa)

SOLUCIÓN

a) Encuentre el fotón con longitud de onda más larga emitido en la serie de Balmer y determine su frecuencia y energía.

Sustituya en la ecuación 28.16, con $n_i = 3$ y $n_f = 2$:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = \frac{5R_H}{36}$$

Tome el recíproco y sustituya, y encuentre la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{36}{5R_H} = \frac{36}{5(1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1})} = 6.563 \times 10^{-7} \text{ m} \\ = \mathbf{656.3 \text{ nm}}$$

Ahora use $c = f\lambda$ para obtener la frecuencia:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2.998 \times 10^8 \text{ m/s}}{6.563 \times 10^{-7} \text{ m}} = \mathbf{4.568 \times 10^{14} \text{ Hz}}$$

Calcule la energía del fotón al sustituir en la ecuación 27.5:

$$E = hf = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(4.568 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 3.027 \times 10^{-19} \text{ J} \\ = 3.027 \times 10^{-19} \text{ J} \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = \mathbf{1.892 \text{ eV}}$$

b) Encuentre el fotón con longitud de onda más corta emitido en la serie de Balmer.

Sustituya en la ecuación 28.16, con $1/n_i \rightarrow 0$ conforme $n_i \rightarrow \infty$ y $n_f = 2$

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = R_H \left(\frac{1}{2^2} - 0 \right) = \frac{R_H}{4}$$

Tome el recíproco y sustituya, y encuentre la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{4}{R_H} = \frac{4}{(1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1})} = 3.646 \times 10^{-7} \text{ m} \\ = \mathbf{364.6 \text{ nm}}$$

COMENTARIOS La primera longitud de onda está en la región roja del espectro visible. También podría obtener la energía del fotón al usar la ecuación 28.4 en la forma $h_f = E_3 - E_2$, donde E_2 y E_3 son los niveles de energía del átomo de hidrógeno, calculado a partir de la ecuación 28.14. Observe que este fotón es el que tiene la energía más baja en la serie de Balmer porque involucra el menor cambio de energía. El segundo fotón, el más energético, está en la región ultravioleta.

PREGUNTA 28.1 ¿Cuál es el límite de energía superior de un fotón que se puede emitir del hidrógeno debido a la transición de un electrón entre niveles de energía? Explique.

EJERCICIO 28.1 a) Calcule la energía del fotón con longitud de onda más corta emitido en la serie de Balmer para el hidrógeno. b) Calcule la longitud de onda del fotón que se emite cuando un electrón transita de $n = 4$ a $n = 2$.

RESPUESTAS a) 3.40 eV b) 486 nm

Principio de correspondencia de Bohr

En el estudio de la relatividad en el capítulo 26, descubrimos que la mecánica newtoniana no se puede usar para describir fenómenos que ocurren a velocidades que se aproximan a la rapidez de la luz. La mecánica newtoniana es un caso especial de mecánica relativista y se aplica solamente cuando v es mucho menor que c . De igual modo, **la mecánica cuántica está en concordancia con la física clásica cuando las diferencias de energía entre niveles cuantizados son muy pequeñas**. Este principio, que primero estableció Bohr, se llama **principio de correspondencia**.

Átomos hidrogenoides

El análisis que se usa en la teoría de Bohr también es exitoso cuando se aplica a átomos *hidrogenoides*. Se dice que un átomo es hidrogenoide cuando sólo contiene un electrón. Son ejemplos el helio ionizado individualmente, el litio doblemente ionizado y el berilio triplemente ionizado. Los resultados de la teoría de Bohr para el hidrógeno se pueden extender para los átomos hidrogenoides al sustituir Ze^2 por e^2 en las ecuaciones de hidrógeno,

donde Z es el número atómico del elemento. Por ejemplo, las ecuaciones 28.13 y de la 28.16 a la 28.17 se convierten en

$$E_n = -\frac{m_e k_e^2 Z^2 e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [28.18]$$

y

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e k_e^2 Z^2 e^4}{4\pi c \hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad [28.19]$$

Aunque se han hecho muchos intentos por extender la teoría de Bohr a átomos multielectrones más complejos, los resultados no han sido exitosos. Incluso en la actualidad, sólo están disponibles métodos aproximados para tratar a los átomos de muchos electrones.

Examen rápido

28.1 Considere un átomo de hidrógeno y un átomo de helio individualmente ionizado. ¿Cuál átomo tiene la menor energía de estado base? a) Hidrógeno b) Helio c) La energía del estado base es la misma para ambos.

EJEMPLO 28.2 Helio individualmente ionizado

OBJETIVO Aplicar la teoría de Bohr modificada a un átomo hidrogenoide.

PROBLEMA El helio individualmente ionizado, He^+ , es un sistema hidrogenoide, tiene un electrón en la órbita correspondiente a $n = 1$ cuando el átomo está en su estado base. Encuentre **a)** la energía del sistema en el estado base en electrón-volts y **b)** el radio de la órbita del estado base.

ESTRATEGIA El inciso a) requiere sustitución en el modelo de Bohr modificado, la ecuación 28.18. En el inciso b), modifique la ecuación 28.10 para el radio de las órbitas de Bohr al sustituir e^2 por Ze^2 , donde Z es el número de protones en el núcleo.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la energía del sistema en el estado base. Escriba la ecuación 28.18 para las energías de un sistema hidrogenoide:

$$E_n = -\frac{m_e k_e^2 Z^2 e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2}\right)$$

Sustituya las constantes y convierta a electrón-volts:

$$E_n = -\frac{Z^2(13.6 \text{ eV})}{n^2}$$

Sustituya $Z = 2$ (el número atómico del helio) y $n = 1$ para obtener la energía del estado base:

$$E_1 = -4(13.6 \text{ eV}) = -54.4 \text{ eV}$$

b) Encuentre el radio del estado base.

Generalice la ecuación 28.10 a un átomo hidrogenoide mediante la sustitución de e^2 por Ze^2 :

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k_e Z e^2} = \frac{n^2}{Z} (a_0) = \frac{n^2}{Z} (0.0529 \text{ nm})$$

Para el caso presente, $n = 1$ y $Z = 2$:

$$r_1 = 0.0265 \text{ nm}$$

COMENTARIOS Observe que, para Z superiores, la energía de un átomo hidrogenoide es menor, lo cual significa que el electrón está fuertemente enlazado que en el hidrógeno. El resultado es un átomo más pequeño, como se ve en el inciso b).

PREGUNTA 28.2 Cuando un electrón experimenta una transición de un estado superior a uno inferior en helio individualmente ionizado, ¿cómo se comparará la energía del fotón emitido con la transición análoga en hidrógeno? Explique.

EJERCICIO 28.2 Repita el problema para el primer estado excitado del litio doblemente ionizado ($Z = 3$, $n = 2$).

RESPUESTAS a) $E_2 = -30.6 \text{ eV}$ b) $r_2 = 0.0705 \text{ nm}$

La teoría de Bohr se extendió en forma *ad hoc* de modo que incluyera mayores detalles de los espectros atómicos. Todas estas modificaciones se sustituyeron con la teoría de la mecánica cuántica, que desarrollaron de manera independiente Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger.

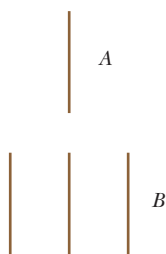


Figura 28.10 Una sola línea A) se puede dividir en tres líneas separadas B) en un campo magnético.

28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno

Uno de los primeros logros de la mecánica cuántica fue la solución de la ecuación de onda para el átomo de hidrógeno. Aunque los detalles de la solución están más allá del nivel de este libro, se pueden describir la solución y sus implicaciones para la estructura atómica.

De acuerdo con la mecánica cuántica, las energías de los estados permitidos están en exacta concordancia con los valores obtenidos por la teoría de Bohr (ecuación 28.13) cuando las energías permitidas sólo dependen del número cuántico principal n .

Además del número cuántico principal, a partir de la solución de la ecuación de onda de Schrödinger surgieron otros dos números cuánticos: el **número cuántico orbital** ℓ y el **número cuántico magnético orbital** m_ℓ .

El efecto del número cuántico magnético m_ℓ se puede observar en los espectros cuando hay campos magnéticos presentes, lo que resulta en la división de las líneas espectrales individuales en varias líneas. Esta división se llamó *efecto Zeeman*. La figura 28.10 muestra una sola línea espectral que se divide en tres líneas cercanamente espaciadas. Esto indica que la energía de un electrón se modifica ligeramente cuando el átomo se sumerge en un campo magnético.

Los rangos permitidos de los valores de estos números cuánticos son los siguientes:

- El valor de n puede variar de 1 a ∞ en incrementos enteros.
- El valor de ℓ puede variar de 0 a $n - 1$ en incrementos enteros.
- El valor de m_ℓ puede variar de $-\ell$ a ℓ en incrementos enteros.

A partir de estas reglas, podemos ver que para un valor dado de n , existen n posibles valores de ℓ , mientras que para un valor dado de ℓ , existen $2\ell + 1$ valores posibles de m_ℓ . Por ejemplo, si $n = 1$, existe solamente un valor de ℓ , $\ell = 0$. Dado que $2\ell + 1 = 2 \cdot 0 + 1 = 1$, sólo hay un valor de m_ℓ , que es $m_\ell = 0$. Si $n = 2$, el valor de ℓ puede ser 0 o 1; si $\ell = 0$, entonces $m_\ell = 0$; pero si $\ell = 1$, entonces m_ℓ puede ser 1, 0 o -1 . La tabla 28.1 resume las reglas para determinar los valores permitidos de ℓ y m_ℓ para un valor dado de n .

Por razones históricas, **se dice que todos los estados con el mismo número cuántico principal n forman una capa**. Las capas se identifican mediante las letras K, L, M, . . . , que designan los estados para los cuales $n = 1, 2, 3$, etcétera. **Se dice que los estados con valores dados de n y ℓ forman una subcapa**. Las letras s, p, d, f, g, \dots , se usan para designar los estados para los cuales $\ell = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$. Estas notaciones se resumen en la tabla 28.2.

No pueden existir estados que violen las reglas dadas en la tabla 28.1. Un estado que no puede existir, por ejemplo, es el estado $2d$, que tendría $n = 2$ y $\ell = 2$. Este estado no está permitido porque el valor más alto permitido de ℓ es $n - 1$, o 1 en este caso. De modo que para $n = 2$, $2s$ y $2p$ son estados permitidos, mas no lo son $2d, 2f, \dots$. Para $n = 3$, los estados permitidos son $3s, 3p$ y $3d$.

En general, para un valor dado de n , existen n^2 estados con distintos pares de valores de ℓ y m_ℓ .

Tabla 28.1 Tres números cuánticos para el átomo de hidrógeno

Número cuántico	Nombre	Valores permitidos	Número de estados permitidos
n	Número cuántico principal	1, 2, 3, . . .	Cualquier número
ℓ	Número cuántico orbital	0, 1, 2, . . . , $n - 1$	n
m_ℓ	Número cuántico magnético orbital	$-\ell, -\ell + 1, \dots, 0, \dots, \ell - 1, \ell$	$2\ell + 1$

Tabla 28.2 Notación de capa y subcapa

n	Símbolo de capa	ℓ	Símbolo de subcapa
1	K	0	s
2	L	1	p
3	M	2	d
4	N	3	f
5	O	4	g
6	P	5	h
.	

■ Examen rápido

28.2 Cuando el número cuántico principal es $n = 5$, ¿cuántos diferentes valores de a) ℓ y b) m_ℓ son posibles? c) ¿Cuántos estados tienen distintos pares de valores de ℓ y m_ℓ ?

Espín

En los espectrómetros de alta resolución, la visualización cercana de una de las líneas prominentes del vapor de sodio muestra que, de hecho, se trata de dos líneas espaciadas muy cercanamente. Las longitudes de onda de estas líneas ocurren en la región amarilla del espectro, en 589.0 y 589.6 nm. Este tipo de división se conoce como **estructura fina**. En 1925, cuando se apreció por primera vez este doblete, la teoría atómica no podía explicarlo, así que Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck, a partir de una sugerencia del físico austriaco Wolfgang Pauli, propusieron la introducción de un cuarto número cuántico para describir los niveles de energía atómica, m_s , llamado **número cuántico magnético de espín**. El espín (del inglés *spin*, girar) no se encuentra en las soluciones de las ecuaciones de Schrödinger; en vez de ello surge de manera natural en la ecuación de Dirac, que dedujo Paul Dirac en 1927. Esta ecuación es importante en la teoría cuántica relativista.

Al describir el número cuántico espín, es conveniente (mas técnicamente incorrecto) pensar en un electrón que gira sobre su eje conforme orbita el núcleo, tal como la Tierra gira sobre su eje conforme orbita al Sol. Sin embargo, a diferencia del espín de un mundo, sólo existen dos formas en las cuales el electrón puede girar mientras orbita el núcleo, como se muestra en la figura 28.11. Si la dirección de giro es como se muestra en la figura 28.11a, decimos que el electrón tiene “espín arriba”. Si la dirección de giro se invierte como en la figura 28.11b, decimos que el electrón tiene “espín abajo”. La energía del electrón es ligeramente diferente para las dos direcciones de espín y esta diferencia de energía explica el doblete del sodio. Los números cuánticos asociados con el espín del electrón son $m_s = 1/2$ para el estado de espín arriba y $m_s = -1/2$ para el estado de espín abajo. Como verá en el ejemplo 28.3, este nuevo número cuántico duplica el número de estados permitidos que especifican los números cuánticos n , ℓ y m_ℓ .

Para cada electrón existen dos estados de espín. Una subcapa que corresponde a un factor dado de ℓ puede contener no más de $2(2\ell + 1)$ electrones. Este número se usa porque los electrones en una subcapa deben tener pares únicos de los números cuánticos (m_ℓ , m_s). Existen $2\ell + 1$ diferentes números cuánticos magnéticos m_ℓ y dos diferentes números cuánticos de espín m_s , lo que produce $2(2\ell + 1)$ pares únicos (m_ℓ , m_s). Por ejemplo, la subcapa p ($\ell = 1$) está llena cuando contiene $2(2 \cdot 1 + 1) = 6$ electrones. Este hecho se puede extender para incluir los cuatro números cuánticos, lo que será importante más adelante cuando se estudie el *principio de exclusión de Pauli*.

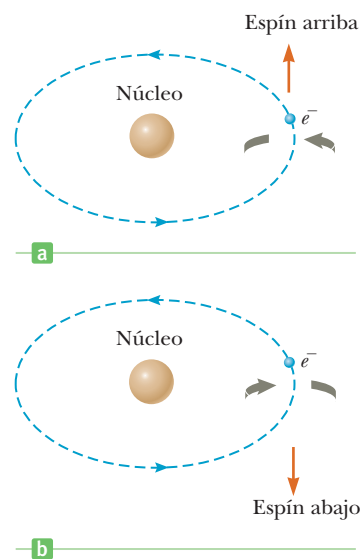


Figura 28.11 Conforme un electrón se mueve en su órbita alrededor del núcleo, su espín puede ser o a) arriba o b) abajo.

Tip 28.2 En realidad el electrón no gira

El electrón *no* gira físicamente. El espín del electrón es un efecto meramente cuántico que da al electrón una cantidad de movimiento angular *como si* girase físicamente.

■ EJEMPLO 28.3 El nivel $n = 2$ del hidrógeno

OBJETIVO Contar y tabular distintos estados cuánticos y determinar su energía con base en el nivel de energía atómica.

PROBLEMA a) Determine el número de estados con un conjunto único de valores para ℓ , m_ℓ y m_s en el átomo de hidrógeno para $n = 2$. b) Tabule los distintos estados cuánticos posibles, incluido el espín. c) Calcule las energías de estos estados en ausencia de un campo magnético, sin importar pequeñas diferencias causadas por el espín.

ESTRATEGIA Este problema es cuestión de contar, siguiendo las reglas cuánticas para n , ℓ , m_ℓ y m_s . “Único” significa que ningún otro estado cuántico tiene el mismo conjunto de números. Las energías, sin importar espín o desdoblamiento Zeeman en campos magnéticos, son todas las mismas porque todos los estados tienen el mismo número cuántico principal, $n = 2$.

SOLUCIÓN

a) Determine el número de estados con un conjunto único de valores para ℓ y m_ℓ en el átomo de hidrógeno para $n = 2$.

Determine los diferentes posibles valores de ℓ para $n = 2$.

$$0 \leq \ell \leq n - 1, \text{ de modo que para } n = 2, 0 \leq \ell \leq 1 \text{ y } \ell = 0 \text{ o } 1$$

Encuentre los diferentes posibles valores de m_ℓ para $\ell = 0$:

$$-\ell \leq m_\ell \leq \ell, \text{ de modo que } -0 \leq m_\ell \leq 0 \text{ implica que } m_\ell = 0$$

(continúa)

Mencione los distintos pares de (ℓ, m_ℓ) para $\ell = 0$:
 Encuentre los diferentes posibles valores de m_ℓ para $\ell = 1$:
 Mencione los distintos pares de (ℓ, m_ℓ) para $\ell = 1$:
 Sume los resultados para $\ell = 0$ y $\ell = 1$ y multiplique por 2 para explicar los dos posibles espines de cada estado:
b) Tabule los diferentes posibles conjuntos de números cuánticos.

Use los resultados del inciso a) y recuerde que el número cuántico de espín siempre es $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$.

Sólo existe uno: $(\ell, m_\ell) = (0, 0)$.
 $-\ell \leq m_\ell \leq \ell$, de modo que $-1 \leq m_\ell \leq 1$ implica que $m_\ell = -1, 0$ o 1
 Existen tres $(\ell, m_\ell) = (1, -1), (1, 0)$ y $(1, 1)$.
 Número de estados = $2(1 + 3) = 8$

n	ℓ	m_ℓ	m_s
2	1	-1	$-\frac{1}{2}$
2	1	-1	$+\frac{1}{2}$
2	1	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	0	$+\frac{1}{2}$
2	1	1	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$+\frac{1}{2}$
2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$+\frac{1}{2}$

c) Calcule las energías de estos estados.

La energía común de todos los estados, sin importar el desdoblamiento Zeeman y espín, se puede encontrar con la ecuación 28.14:

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \rightarrow E_2 = -\frac{13.6 \text{ eV}}{2^2} = -3.40 \text{ eV}$$

COMENTARIOS Aunque estos estados por lo general tienen la misma energía, la aplicación de un campo magnético hace que tengan energías ligeramente diferentes centradas en torno a la energía correspondiente a $n = 2$. Además, se despreció la ligera diferencia en energía debida al estado del espín.

PREGUNTA 28.3 ¿Cuál de los cuatro números cuánticos nunca es negativo?

EJERCICIO 28.3 a) Determine el número de estados con un par único de valores para ℓ, m_ℓ y m_s en el nivel $n = 3$ del hidrógeno. b) Determine las energías de dichos estados, sin importar cualquier efecto de desdoblamiento.

RESPUESTAS a) 18 b) $E_3 = -1.51 \text{ eV}$

Nubes de electrones

La solución de la ecuación de onda, como se discutió en la sección 27.7, produce una función de onda Ψ que depende de los números cuánticos n, ℓ y m_ℓ . Recuerde que, si p es un punto y V_p un volumen muy pequeño que contiene dicho punto, entonces $\Psi^2 V_p$ es aproximadamente la probabilidad de encontrar el electrón dentro del volumen V_p . La figura 28.12 proporciona la probabilidad por unidad de longitud de encontrar el electrón a varias distancias desde el núcleo en el estado 1s del hidrógeno ($n = 1, \ell = 0$ y $m_\ell = 0$). Observe que la curva tiene un máximo en un valor de $r = 0.0529 \text{ nm}$, el radio de Bohr para la primera órbita de electrón ($n = 1$) en el hidrógeno. Este máximo significa que hay una probabilidad máxima de encontrar el electrón en un pequeño intervalo de una longitud fija dada con centro en dicha distancia desde el núcleo. Sin embargo, como la curva indica, también existe una probabilidad de encontrar el electrón en tal pequeño intervalo centrado en cualquiera otra distancia desde el núcleo. En mecánica cuántica el electrón no está confinado a una distancia orbital particular desde el núcleo, como se supuso en el modelo de Bohr. El electrón se puede encontrar a varias distancias del núcleo, pero encontrarlo en un pequeño intervalo con centro en el radio de Bohr tiene la mayor probabilidad. La mecánica cuántica también predice que la función de onda para el átomo de hidrógeno en el estado base tiene simetría esférica; por lo tanto, el electrón se puede encontrar en una región esférica que rodea al núcleo. Esto está en contraste con la teoría de Bohr, que confina la posición del electrón a puntos en un plano. El resultado mecánico cuántico con frecuencia se interpreta al ver al electrón como una nube que rodea al núcleo. En la figura 28.13 se muestra un intento por bosquejar este comportamiento parecido una a nube. Las regiones más densas de la nube representan aquellas posiciones donde el electrón tiene más probabilidad de encontrarse.

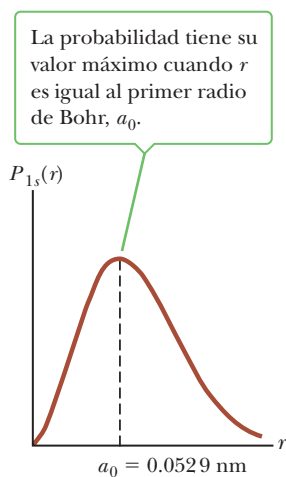


Figura 28.12 Probabilidad por unidad de longitud de encontrar el electrón contra la distancia desde el núcleo para el átomo de hidrógeno en el estado 1s (base).

Si un análisis similar se realiza para el estado $n = 2, \ell = 0$ del hidrógeno, un máximo de la curva de probabilidad se encuentra en $4a_0$, mientras que para el estado $n = 3, \ell = 0$, el máximo de la curva está en $9a_0$. En general, la mecánica cuántica predice una distancia del electrón más probable hacia el núcleo que concuerda con la posición descrita por la teoría de Bohr.

28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica

El estado de un electrón en un átomo de hidrógeno se especifica mediante cuatro números cuánticos: n, ℓ, m_ℓ y m_s . Como se evidencia, el estado de cualquier electrón en cualquier otro átomo también se puede especificar mediante este mismo conjunto de números cuánticos.

¿Cuántos electrones en un átomo pueden tener un conjunto particular de números cuánticos? Esta importante cuestión la respondió Pauli en 1925 en un poderoso enunciado conocido como **principio de exclusión de Pauli**:

Ningún par de electrones en un átomo puede tener jamás el mismo conjunto de valores para el conjunto de números cuánticos n, ℓ, m_ℓ y m_s .

El principio de exclusión de Pauli explica la estructura electrónica de átomos complejos como una sucesión de niveles llenos con diferentes números cuánticos que aumentan en energía, donde los electrones más externos son los principales responsables de las propiedades químicas del elemento. Si este principio no fuese válido, todo electrón terminaría en el estado energético más bajo del átomo y el comportamiento químico de los elementos sería enormemente diferente. La naturaleza como la conoce no existiría, ¡y usted no existiría para preguntar por qué!

Como regla general, el orden en el que los electrones llenan las subcapas de un átomo es el siguiente. Una vez que una subcapa está llena, el siguiente electrón pasa a la subcapa vacía que es más baja en energía. Si el átomo no estuviese en el estado energético más bajo disponible, radiaría energía hasta llegar a dicho estado. Una subcapa se llena cuando contiene $2(2\ell + 1)$ electrones. Esta regla se basa en el análisis de los números cuánticos que se describirá más adelante. Al seguir la regla, las capas y subcapas pueden contener números de electrones de acuerdo con el patrón dado en la tabla 28.3.

El principio de exclusión se puede ilustrar al examinar el arreglo electrónico en algunos de los átomos más ligeros. El *hidrógeno* tiene sólo un electrón, que, en su estado base, se puede describir mediante dos conjuntos de números cuánticos: $1, 0, 0, \frac{1}{2}$ o $1, 0, 0, -\frac{1}{2}$. La configuración electrónica de este átomo con frecuencia se designa como $1s^1$. La notación $1s$ se refiere a un estado para el cual $n = 1$ y $\ell = 0$, y el superíndice indica que un electrón está presente en este nivel.

Tabla 28.3 Número de electrones en subcapas y capas llenas

Capa	Subcapa	Número de electrones en subcapa llena	Número de electrones en capa llena
K ($n = 1$)	$s(\ell = 0)$	2	2
L ($n = 2$)	$s(\ell = 0)$	2	8
	$p(\ell = 1)$	6	
M ($n = 3$)	$s(\ell = 0)$	2	18
	$p(\ell = 1)$	6	
	$d(\ell = 2)$	10	
N ($n = 4$)	$s(\ell = 0)$	2	32
	$p(\ell = 1)$	6	
	$d(\ell = 2)$	10	
	$f(\ell = 3)$	14	

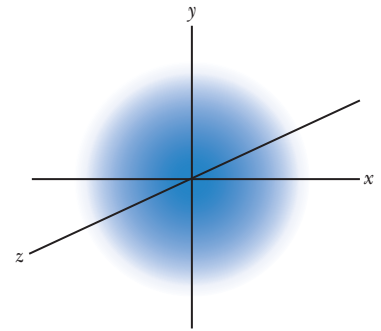


Figura 28.13 Nube de electrones esférica para el átomo de hidrógeno en su estado 1s.

Principio de exclusión de Pauli

Tip 28.3 El principio de exclusión es más general

El principio de exclusión que se enuncia aquí es una forma limitada del principio de exclusión más general, que afirma que ningún par de *fermiones* (partículas con espín $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$) puede estar en el mismo estado cuántico.



Wolfgang Pauli
Físico teórico austriaco (1900-1958)
El extremadamente talentoso Pauli ganó reconocimiento público por primera vez a los 21 años de edad, con un magistral artículo de revisión acerca de la relatividad. En 1945 recibió el Premio Nobel de Física por su descubrimiento del principio de exclusión. Entre sus otras grandes aportaciones se encuentran la explicación de la conexión entre espín de partícula y estadística, la teoría de la electrodinámica cuántica relativista, la hipótesis del neutrino y la hipótesis del espín nuclear.

El *helio* neutro tiene dos electrones. En el estado base, los números cuánticos para estos dos electrones son 1, 0, 0, $\frac{1}{2}$ y 1, 0, 0, $-\frac{1}{2}$. Para este nivel no existen otras posibles combinaciones de números cuánticos y se dice que la capa K está llena. La configuración electrónica del helio se designa $1s^2$.

El *litio* neutro tiene tres electrones. En el estado base, dos de ellos están en la subcapa $1s$ y el tercero está en la subcapa $2s$ porque la última subcapa es más baja en energía que la subcapa $2p$. Por lo tanto, la configuración electrónica para el litio es $1s^2 2s^1$.

En la tabla 28.4 se proporciona una lista de configuraciones de estado base para algunos átomos. En 1871, Dimitry Mendeleev (1834-1907), químico ruso, ordenó los elementos conocidos en esa época en una tabla de acuerdo con sus masas atómicas y similitudes químicas. La primera tabla que propuso Mendeleev contenía muchos espacios en blanco y él afirmó con decisión que las brechas estaban ahí sólo porque dichos elementos todavía no se habían descubierto. Al observar la columna en la que se deben ubicar dichos elementos faltantes, pudo realizar predicciones burdas acerca de sus propiedades químicas. De hecho, se descubrieron tales elementos 20 años después de su anuncio.

Los elementos en la versión actual de la tabla periódica todavía se ordenan de modo que todos los que están en una columna vertical tienen propiedades químicas similares. Por ejemplo, considere los elementos en la última columna: He (helio), Ne (neón), Ar (argón), Kr (kriptón), Xe (xenón) y Rn (radón). La característica destacada de estos elementos es que por lo general no toman parte en reacciones químicas, no se unen con otros átomos para formar moléculas y por lo tanto se clasifican como inertes. Se llaman *gases nobles*. Su comportamiento se puede explicar en parte al observar las configuraciones electrónicas que se muestran en la tabla 28.4. El elemento helio tiene la configuración electrónica $1s^2$. En otras palabras, una capa está llena. Los electrones en esta capa llena están considerablemente separados en energía del siguiente nivel disponible, el nivel $2s$.

La configuración electrónica para el neón es $1s^2 2s^2 2p^6$. De nuevo, la capa exterior está llena y hay una gran diferencia en energía entre el nivel $2p$ y el nivel $3s$.

Tabla 28.4 Configuraciones electrónicas de algunos elementos

Z	Símbolo	Configuración de estado	Energía de ionización (eV)	Z	Símbolo	Configuración de estado	Energía de ionización (eV)
1	H	$1s^1$	13.595	19	K	[Ar] $4s^1$	4.339
2	He	$1s^2$	24.581	20	Ca	$4s^2$	6.111
3	Li	[He] $2s^1$	5.390	21	Sc	$3d4s^2$	6.54
4	Be	$2s^2$	9.320	22	Ti	$3d^24s^2$	6.83
5	B	$2s^2 2p^1$	8.296	23	V	$3d^34s^2$	6.74
6	C	$2s^2 2p^2$	11.256	24	Cr	$3d^54s^1$	6.76
7	N	$2s^2 2p^3$	14.545	25	Mn	$3d^54s^2$	7.432
8	O	$2s^2 2p^4$	13.614	26	Fe	$3d^64s^2$	7.87
9	F	$2s^2 2p^5$	17.418	27	Co	$3d^74s^2$	7.86
10	Ne	$2s^2 2p^6$	21.559	28	Ni	$3d^84s^2$	7.633
11	Na	[Ne] $3s^1$	5.138	29	Cu	$3d^{10}4s^1$	7.724
12	Mg	$3s^2$	7.644	30	Zn	$3d^{10}4s^2$	9.391
13	Al	$3s^2 3p^1$	5.984	31	Ga	$3d^{10}4s^2 4p^1$	6.00
14	Si	$3s^2 3p^2$	8.149	32	Ge	$3d^{10}4s^2 4p^2$	7.88
15	P	$3s^2 3p^3$	10.484	33	As	$3d^{10}4s^2 4p^3$	9.81
16	S	$3s^2 3p^4$	10.357	34	Se	$3d^{10}4s^2 4p^4$	9.75
17	Cl	$3s^2 3p^5$	13.01	35	Br	$3d^{10}4s^2 4p^5$	11.84
18	Ar	$3s^2 3p^6$	15.755	36	Kr	$3d^{10}4s^2 4p^6$	13.996

Nota: La notación entre corchetes se utiliza como un método abreviado para evitar repetición al indicar electrones de capa interior. Por ende, [He] representa $1s^2$, [Ne] representa $1s^2 2s^2 2p^6$, [Ar] representa $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$, etcétera.

El argón tiene la configuración $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. Aquí, la subcapa $3p$ está llena y hay una gran brecha en energía entre la subcapa $3p$ y la subcapa $3d$. A lo largo de todos los gases nobles el patrón permanece igual: un gas noble se forma cuando o una capa o una subcapa está llena y hay una gran brecha en energía antes de encontrar el siguiente nivel posible.

Los elementos en la primera columna de la tabla periódica se llaman *metales alcalinos* y químicamente son muy activos. Si consulta la tabla 28.4, podrá entender por qué estos elementos interactúan tan fuertemente con otros elementos. Todos estos metales alcalinos tienen un solo electrón exterior en una subcapa s . Este electrón está blindado del núcleo por todos los electrones en las capas interiores. En consecuencia, sólo está ligeramente enlazado al átomo y otros átomos lo pueden aceptar fácilmente, enlazándolo más firmemente para formar moléculas.

Los elementos en la séptima columna de la tabla periódica se llaman *halógenos* y también son químicamente muy activos. Todos estos elementos carecen de un electrón en una subcapa, de modo que fácilmente aceptan electrones de otros átomos para formar moléculas.

Examen rápido

28.3 ¿Cuántos electrones tiene el kriptón (número atómico 36) en su penúltima capa exterior ($n = 3$)? a) 2 b) 4 c) 8 d) 18

28.6 Rayos X característicos

Los rayos X se emiten cuando un blanco metálico se bombardea con electrones de alta energía. El espectro de rayos X por lo general consiste de una amplia banda continua y una serie de intensas líneas estrechas que dependen del tipo de metal utilizado para el blanco, como muestra la figura 28.14. Estas líneas discretas, llamadas **rayos X característicos**, se descubrieron en 1908, pero su origen permaneció sin explicar hasta que se desarrollaron los detalles de la estructura atómica.

El primer paso en la producción de rayos X característicos ocurre cuando se bombardea un electrón, éste choca con otro en una capa interior de un átomo blanco con suficiente energía para remover el electrón del átomo. La vacancia creada en la capa se llena cuando un electrón en un nivel superior cae hacia el nivel de menor energía que contiene la vacante. El tiempo que transcurre para que esto ocurra es muy corto, menor que 10^{-9} s. La transición se acompaña mediante la emisión de un fotón con energía que iguala la diferencia en energía entre los dos niveles. Por lo general, la energía de tales transiciones es mayor que 1000 eV y los fotones de rayos X emitidos tienen longitudes de onda en el rango de 0.01 a 1 nm.

Suponga que el electrón incidente desalojó un electrón atómico de la capa más interna, la capa K. Si la vacancia se llena con un electrón que cae de la siguiente capa superior, la capa L, el fotón emitido en el proceso se le conoce como línea K_α sobre la curva de la figura 28.14. Si la vacancia se llena con un electrón que cae de la capa M, la línea producida se llama línea K_β .

Otras líneas de rayos X característicos se forman cuando los electrones caen desde niveles superiores a vacancias distintas a las de la capa K. Por ejemplo, las líneas L se producen cuando las vacantes en la capa L se llenan con electrones que caen desde capas superiores. Una línea L_α se produce cuando un electrón cae desde la capa M hacia la capa L y una línea L_β se produce mediante una transición desde la capa N hacia la capa L.

La energía de los rayos X emitidos se puede estimar del modo siguiente. Considere dos electrones en la capa K de un átomo cuyo número atómico es Z . Cada electrón blindado parcialmente la otra forma de carga del núcleo, Ze , de modo que está sujeto a una carga nuclear efectiva $Z_{\text{eff}} = (Z - 1)e$. Ahora puede usar una forma modificada de la ecuación 28.18 para estimar la energía de cualquier electrón en la capa K (con $n = 1$). Tenemos

$$E_K = -m_e Z_{\text{eff}}^2 \frac{k_e^2 e^4}{2\hbar^2} = -Z_{\text{eff}}^2 E_0$$

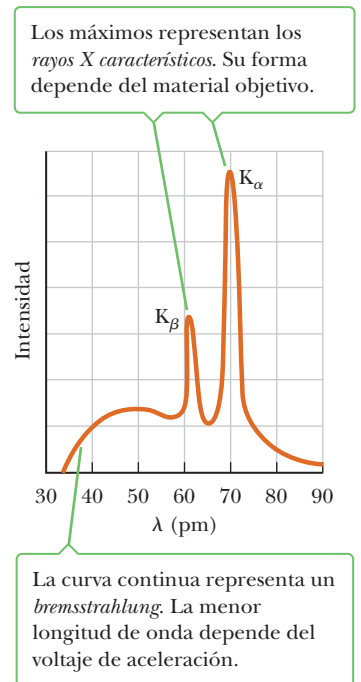


Figura 28.14 El espectro de rayos X de un objetivo metálico. Los datos que se muestran se obtuvieron cuando electrones de 35 keV bombardearon un blanco de molibdeno. Observe que $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m} = 0.001 \text{ nm}$.

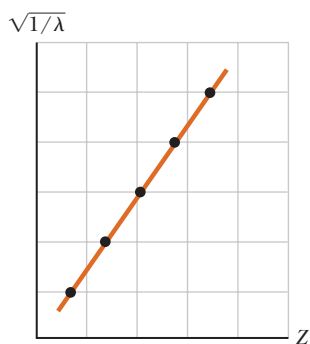


Figura 28.15 Gráfica de Moseley de $\sqrt{1/\lambda}$ frente a Z , donde λ es la longitud de onda de la línea de rayos X K_α del elemento con número atómico Z .

donde E_0 es la energía del estado base. Al sustituir $Z_{\text{ef}} = Z - 1$ obtenemos

$$E_K = -(Z - 1)^2(13.6 \text{ eV}) \quad [28.20]$$

Como muestra el ejemplo 28.4, es posible estimar la energía de un electrón en una capa L o M en forma similar. Al tomar la diferencia de energía entre estos dos niveles, se puede calcular entonces la energía y la longitud de onda del fotón emitido.

En 1914, Henry G. J. Moseley graficó los valores Z para algunos elementos contra $\sqrt{1/\lambda}$, donde λ es la longitud de onda de la línea K_α para cada elemento. Descubrió que tal gráfica producía una línea recta, como en la figura 28.15, que es consistente con los cálculos burdos de los niveles de energía basados en la ecuación 28.20. A partir de esta gráfica, Moseley pudo determinar los valores Z de otros elementos, lo que proveyó un gráfico periódico en excelente concordancia con las propiedades químicas de los elementos.

■ EJEMPLO 28.4 Rayos X característicos

OBJETIVO Calcular la energía y longitud de onda de rayos X característicos.

PROBLEMA Estime la energía y la longitud de onda de los rayos X característicos emitidos de un blanco de tungsteno cuando un electrón cae de una capa M (estado $n = 3$) a una vacancia en la capa K (estado $n = 1$).

ESTRATEGIA Desarrolle dos estimaciones, una para el electrón en la capa K ($n = 1$) y una para el electrón en la capa M ($n = 3$). Para la estimación de la capa K, puede usar la ecuación 28.20. Para la estimación de la capa M, necesita una nueva ecuación. Hay 1 electrón en la capa K (porque uno está perdido) y hay 8 en la capa L, lo que hace 9 electrones que blindan la carga nuclear. Por lo tanto, $Z_{\text{ef}} = 74 - 9$ y $E_M = -Z_{\text{ef}}^2 E_3$, donde E_3 es la energía del nivel $n = 3$ en hidrógeno. La diferencia $E_M - E_K$ es la energía del fotón.

SOLUCIÓN

Use la ecuación 28.20 para estimar la energía de un electrón en la capa K del tungsteno, número atómico $Z = 74$:

$$E_K = -(74 - 1)^2(13.6 \text{ eV}) = -72500 \text{ eV}$$

Estime la energía de un electrón en la capa M en la misma forma:

$$\begin{aligned} E_M &= -Z_{\text{ef}}^2 E_3 = -(Z - 9)^2 \frac{E_0}{3^2} = -(74 - 9)^2 \frac{(13.6 \text{ eV})}{9} \\ &= -6380 \text{ eV} \end{aligned}$$

Calcule la diferencia en energía entre las capas M y K:

$$E_M - E_K = -6380 \text{ eV} - (-72500 \text{ eV}) = \mathbf{66100 \text{ eV}}$$

Encuentre la longitud de onda del rayo X emitido:

$$\begin{aligned} \Delta E &= hf = h \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{hc}{\Delta E} \\ \lambda &= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{(6.61 \times 10^4 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} \\ &= 1.88 \times 10^{-11} \text{ m} = \mathbf{0.0188 \text{ nm}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Estas estimaciones dependen de la cantidad de blindaje de la carga nuclear, que puede ser difícil de determinar.

PREGUNTA 28.4 ¿Una transición de la capa L a la capa K podría resultar alguna vez en un fotón más energético que una transición desde la capa M a la capa K? Analice.

EJERCICIO 28.4 Repita el problema para un electrón $2p$ que transita de la capa L a la capa K. (Por razones técnicas, el electrón de capa L debe tener $\ell = 1$, de modo que un solo electrón $1s$ y dos electrones $2s$ blindan el núcleo.)

RESPUESTAS a) $5.54 \times 10^4 \text{ eV}$ b) 0.0224 nm

28.7 Transiciones atómicas y láseres

Ya vimos que un átomo emitirá radiación sólo a ciertas frecuencias que correspondan a la separación de energía entre los varios estados permitidos. Considere un átomo con muchos estados de energía permitidos, marcados E_1, E_2, E_3, \dots , como en la figura 28.16. Cuando incide luz sobre el átomo, éste sólo puede absorber aquellos fotones con energía hf que coincide con la separación de energía ΔE entre dos niveles que puede ser absorbida por el átomo. En la figura 28.17 se muestra un diagrama esquemático que representa este **proceso de absorción estimulada**. A temperaturas ordinarias, la mayoría de los átomos en una muestra están en el estado base. Si un recipiente que contiene muchos átomos de un gas se ilumina con un haz de luz que contenga todas las posibles frecuencias de fotón (esto es, un espectro continuo), sólo aquellos fotones con energías $E_2 - E_1, E_3 - E_1, E_4 - E_1$, etc., pueden absorberse. Como resultado de esta absorción, algunos átomos se elevan a varios niveles permitidos de mayor energía, llamados **estados excitados**.

Una vez que un átomo está en un estado excitado, hay una probabilidad constante de que saltará de vuelta a un nivel inferior mediante la emisión de un fotón, como se muestra en la figura 28.18. Este proceso se conoce como **emisión espontánea**. Por lo general, un átomo permanecerá en un estado excitado sólo durante aproximadamente 10^{-8} s.

Un tercer proceso que es importante en láseres, la **emisión estimulada**, lo predijo Einstein en 1917. Suponga que un átomo está en el estado excitado E_2 , como en la figura 28.19 y un fotón con energía $hf = E_2 - E_1$ incide sobre él. El fotón incidente aumenta la probabilidad de que el átomo excitado regresará al estado base y por ende emite un segundo fotón que tiene la misma energía hf . Observe que dos fotones idénticos resultan de la emisión estimulada: el fotón incidente y el fotón emitido. *El fotón emitido está exactamente en fase con el fotón incidente*. Estos fotones pueden estimular otros átomos para emitir fotones en una cadena de procesos similares.

La intensa luz coherente (en fase) en un láser (acrónimo del inglés para amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación) es resultado de emisión estimulada. En un láser, se pueden usar voltajes para poner más electrones en estados excitados que en el estado base. Este proceso se llama **inversión de población**. El estado excitado del sistema debe ser un *estado metaestable*, lo cual significa que su tiempo de vida debe ser relativamente largo. Cuando este es el caso, ocurrirá emisión estimulada antes que emisión espontánea. Finalmente, los fotones producidos se deben retener en el sistema durante un rato para que puedan estimular la producción de todavía más fotones. Este paso se puede realizar con espejos, uno de los cuales es parcialmente transparente.

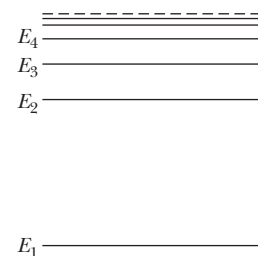


Figura 28.16 Diagrama de niveles de energía de un átomo con varios estados permitidos. El estado de energía más bajo, E_1 , es el estado base. Todos los demás son estados excitados.



Un científico comprueba el desempeño de un dispositivo experimental de láser montado en un brazo robótico. El láser se usa para cortar a través de una placa metálica.

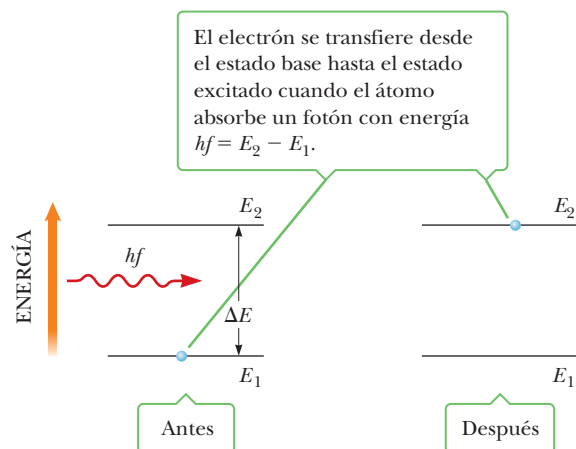


Figura activa 28.17

Diagrama que representa el proceso de *absorción estimulada* de un fotón por un átomo.

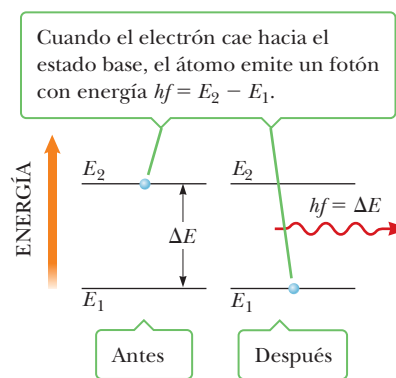


Figura 28.18 Diagrama que representa el proceso de *emisión espontánea* de un fotón por un átomo que inicialmente está en el estado excitado E_2 .

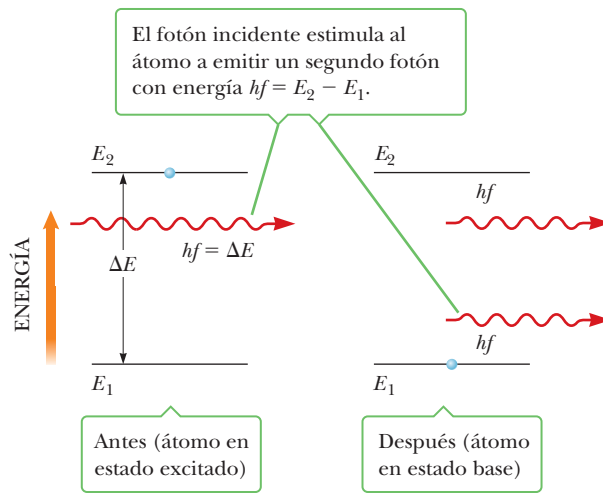


Figura 28.19 Diagrama que representa el proceso de *emisión estimulada* de un fotón mediante un fotón entrante con energía hf . Inicialmente, el átomo está en el estado excitado.

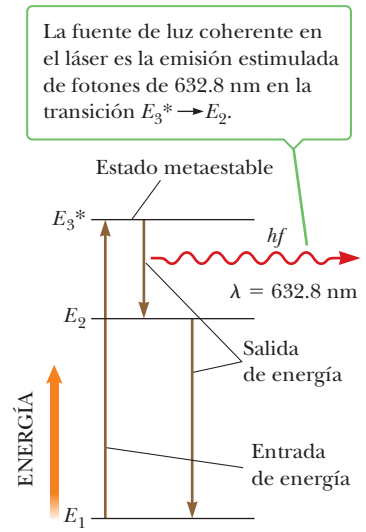


Figura 28.20 Diagrama de niveles de energía para el átomo de neón en un láser helio-neón.

La figura 28.20 es un diagrama de niveles de energía para el átomo de neón en un láser de gas helio-neón. La mezcla de helio y neón está confinada a un tubo de vidrio sellado en los extremos con espejos. Un alto voltaje aplicado al tubo hace que los electrones pasen rápidamente a través de él, choquen con los átomos del gas y los eleven a estados excitados. Los átomos de neón se excitan al estado E_3^* mediante este proceso y también como resultado de colisiones con átomos de helio excitados. Cuando un átomo de neón realiza una transición al estado E_2^* , estimula emisión mediante átomos excitados vecinos. El resultado es la producción de luz coherente con una longitud de onda de 632.8 nm. La figura 28.21 resume los pasos en la producción de un haz de láser.

APLICACIÓN
Tecnología láser

Ahora hay láseres disponibles que cubren longitudes de onda en las regiones infrarroja, visible y ultravioleta del espectro. Sus aplicaciones incluyen el “soldado” quirúrgico de retinas desprendidas, cirugía “lasik”, valoración de precisión y medición de longitud, una fuente potencial para inducir reacciones de fusión nuclear, corte de precisión de metales y otros materiales, y comunicación telefónica a lo largo de fibras ópticas.

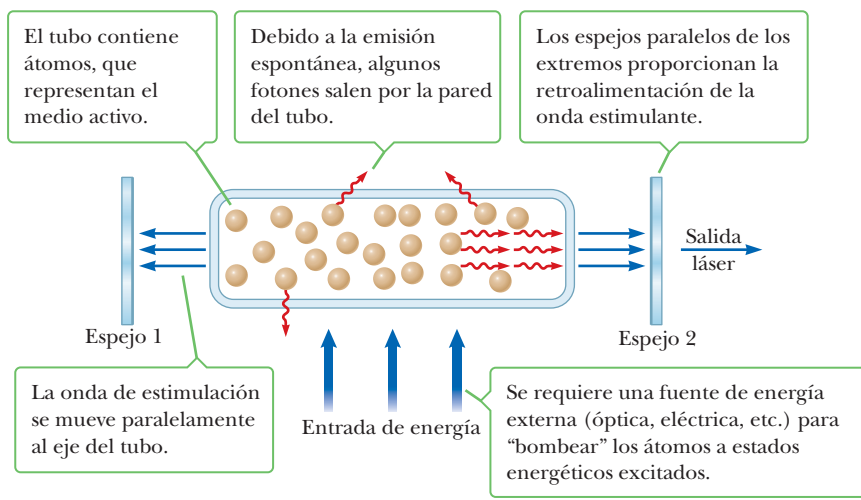


Figura 28.21 a) Pasos en la producción de un haz de láser. b) Fotografía del primer láser de rubí, que muestra la lámpara de destello que rodea la barra de rubí.

RESUMEN

28.3 El modelo de Bohr

El **modelo de Bohr** del átomo describe exitosamente los espectros del hidrógeno atómico y de iones hidrogenoides. Una suposición básica del modelo es que el electrón sólo puede existir en ciertas órbitas tales que su cantidad de movimiento angular mvr es un múltiplo entero de \hbar , donde \hbar es la constante de Planck dividida entre 2π . Si supone órbitas circulares y una fuerza atractiva de Coulomb entre electrón y protón, las energías de los estados cuánticos para el hidrógeno son

$$E_n = -\frac{m_e k_e^2 e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [28.13]$$

donde k_e es la constante de Coulomb, e es la carga del electrón y n es un entero llamado **número cuántico**.

Si el electrón en el átomo de hidrógeno salta de una órbita que tenga número cuántico n_i a una órbita que tenga número cuántico n_f , emite un fotón con frecuencia f , dado por

$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{m_e k_e^2 e^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad [28.15]$$

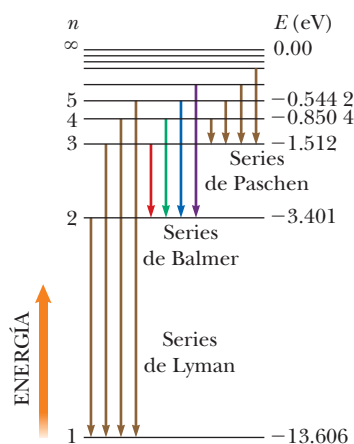


Diagrama de nivel de energía del hidrógeno. Las flechas verticales representan las transiciones de menor energía para cada una de las series espectrales mostradas.

El **principio de correspondencia** de Bohr afirma que la mecánica cuántica está en concordancia con la física clásica cuando los números cuánticos para un sistema son muy grandes.

La teoría de Bohr se puede generalizar a átomos hidrogenoides como el helio individualmente ionizado o el litio doblemente ionizado. Esta modificación consiste en sustituir e^2 por Ze^2 dondequiera que ocurra.

28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno

Uno de los muchos éxitos de la mecánica cuántica es que los números cuánticos n , ℓ y m_ℓ asociados con la estructura atómica surgen directamente de la matemática de la teoría. El

número cuántico n se llama **número cuántico principal**, ℓ es el **número cuántico orbital** y m_ℓ es el **número cuántico magnético orbital**. Estos números cuánticos pueden tomar sólo ciertos valores: $1 \leq n < \infty$ en incrementos enteros, $0 \leq \ell \leq n - 1$, y $-\ell \leq m_\ell \leq \ell$. Además, para explicar un desdoblamiento de líneas en los espectros atómicos se necesita un cuarto número cuántico, llamado **número cuántico magnético de espín**, con $m_s = \pm \frac{1}{2}$.

28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica

La comprensión de la tabla periódica de los elementos fue posible cuando Pauli formuló el **principio de exclusión**, el cual afirma que ningún par de electrones en el mismo átomo puede tener los mismos valores para el conjunto de números cuánticos n , ℓ , m_ℓ y m_s . Un conjunto particular de estos números cuánticos se llama estado cuántico. El principio de exclusión explica cómo se llenan los diferentes niveles de energía. Una vez que se llena una subcapa, el siguiente electrón se dirige hacia la subcapa vacante que es más baja en energía. Los átomos con configuraciones similares en su capa exterior tienen propiedades químicas similares y se encuentran en la misma columna de la tabla periódica.

28.6 Rayos X característicos

Los rayos X característicos se producen cuando en un bombardeo, un electrón choca con otro en una capa interior de un átomo con suficiente energía para remover el electrón del átomo. La vacancia se llena cuando un electrón de un nivel superior cae hacia el nivel que contiene la vacancia y en el proceso emite un fotón en la parte de rayos X del espectro.

28.7 Transiciones atómicas y láseres

Cuando luz de todas las diferentes longitudes de onda irradia un átomo, solamente absorberá longitudes de onda iguales a la diferencia en energía de dos de sus niveles de energía. Este fenómeno, llamado **absorción estimulada**, coloca los electrones de un átomo en **estados excitados**. Los átomos en un estado excitado tienen una probabilidad de regresar a un nivel inferior de excitación mediante **emisión espontánea**. Las longitudes de onda que se pueden emitir son las mismas que las longitudes de onda que se pueden absorber. Si un átomo está en un estado excitado y un fotón con energía $hf = E_2 - E_1$ incide sobre él, la probabilidad de emisión de un segundo fotón de esta energía aumenta enormemente. El fotón emitido está exactamente en fase con el fotón incidente. Este proceso se llama **emisión estimulada**. Entonces los fotones emitido y original pueden estimular más emisiones, lo que crea un efecto de amplificación.

Los **láseres** son fuentes de luz monocromática coherente que funciona bajo el principio de **emisión estimulada** de radiación de un sistema de átomos.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un átomo de berilio se despoja de sus electrones, menos de uno. ¿Cuál es la energía del estado base? a) -13.6 eV b) -218 eV c) -122 eV d) -40.8 eV e) 0
- Un electrón en el nivel de energía $n = 5$ del hidrógeno experimenta una transición hacia el nivel de energía $n = 3$. ¿Qué longitud de onda de fotón emite el átomo en este proceso? a) 1.28×10^{-6} m b) 2.37×10^{-6} m c) 4.22×10^{-7} m d) 3.04×10^{-6} m e) 5.92×10^{-5} m
- Considere un átomo que tiene cuatro distintos niveles de energía. Si un electrón puede realizar transiciones entre cualesquiera dos niveles, ¿cuántas diferentes longitudes de onda de radiación podría emitir el átomo? a) 2 b) 3 c) 4 d) 5 e) 6
- Un electrón en un átomo de hidrógeno está en el nivel de energía $n = 3$. ¿Cuántos diferentes estados cuánticos están a su disposición? a) 1 b) 2 c) 8 d) 9 e) 18
- ¿En cuál de los siguientes principios se basa principalmente la tabla periódica? a) Se basa en el principio de incertidumbre b) Todos los electrones en un átomo deben tener el mismo conjunto de números cuánticos. c) Ningún par de electrones en un átomo puede tener el mismo conjunto de números cuánticos. d) Todos los electrones en un átomo están en orbitales que tienen la misma energía. e) La energía se conserva en todas las interacciones.
- ¿Cuáles de las siguientes configuraciones electrónicas no están permitidas para un átomo? a) $2s^2 2p^6$ b) $3s^2 3p^7$ c) $3d^7 4s^2$ d) $3d^{10} 4s^2 4p^6$ e) $1s^2 2s^2 2d^1$
- Si un electrón en un átomo tiene los números cuánticos $n = 3$, $\ell = 2$, $m_\ell = 1$ y $m_s = \frac{1}{2}$, ¿en cuál estado está? a) $3s$ b) $3p$ c) $3d$ d) $4d$ e) $3f$
- Si un electrón tiene un espín de $\frac{3}{2}$, su número cuántico de espín podría tener los siguientes cuatro valores: $m_s = +\frac{3}{2}$, $+\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$ y $-\frac{3}{2}$. Si eso fuese cierto, ¿cuál de los siguientes elementos con una capa llena se convertiría en el primero de los gases nobles? a) He con 2 electrones b) Li con 3 electrones c) Be con 4 electrones d) B con 5 electrones e) C con 6 electrones
- ¿Qué se puede concluir acerca de un átomo de hidrógeno con un electrón en el estado d ? a) El átomo está ionizado. b) La cantidad de movimiento angular del átomo es cero. c) La cantidad de movimiento angular del átomo no es cero. d) El átomo está en su estado base. e) El número cuántico principal es $n = 2$.
- Al relacionar la teoría de Bohr con la longitud de onda de De Broglie de los electrones, ¿por qué la circunferencia de la órbita de un electrón se vuelve nueve veces más grande cuando el electrón se mueve del nivel $n = 1$ al nivel $n = 3$? a) En la nueva órbita existen nueve veces más longitudes de onda. b) La longitud de onda del electrón se vuelve nueve veces mayor. c) Existen tres veces más longitudes de onda y cada longitud de onda es tres veces mayor. d) El electrón se mueve nueve veces más rápido. e) El átomo está parcialmente ionizado.
- Cuando un electrón choca con un átomo, se puede transferir toda o parte de su energía al átomo. Un átomo de hidrógeno se encuentra en su estado base. En el átomo inciden varios electrones, cada uno con una energía cinética de 10.5 eV. ¿Cuál es el resultado? a) El átomo puede ser excitado a un mayor estado permitido. b) El átomo es ionizado. c) Los electrones pasan por el átomo sin interacción.
- ¿Cuál de los siguientes *no* es uno de los supuestos básicos del modelo de Bohr del hidrógeno? a) Sólo ciertas órbitas de los electrones son estables y permitidas. b) El electrón se mueve en órbitas circulares alrededor del protón bajo la influencia de la fuerza de Coulomb. c) La carga del electrón está cuantificada. d) La radiación es emitida por el átomo cuando un electrón pasa de un estado de energía superior a un estado energético más bajo. e) El momento angular asociado con el movimiento orbital del electrón está cuantificado.
- Cuando un átomo emite un fotón, ¿qué pasa? a) Uno de sus electrones deja al átomo. b) El átomo se mueve a un estado de mayor energía. c) El átomo se mueve a un estado de menor energía. d) Uno de sus electrones choca con otra partícula. e) Ninguno de dichos eventos ocurre.

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En el átomo de hidrógeno, el número cuántico n puede aumentar sin límite. Debido a este hecho, ¿la frecuencia de las posibles líneas espectrales del hidrógeno también aumenta sin límite?
- ¿La luz emitida por una señal de neón constituye un espectro continuo o sólo algunos colores? Defienda su respuesta.
- En un tubo de rayos X, si aumenta la energía con la que los electrones golpean el blanco metálico, las longitudes de onda de los rayos X característicos no cambia. ¿Por qué no?
- Una energía de alrededor de 21 eV es necesaria para excitar un electrón en un átomo de helio del estado $1s$ al estado $2s$. La misma transición para el ion He^+ requiere de aproximadamente el doble de energía. Explique.

- ¿Es posible que el espectro de un tubo de rayos X muestre el espectro continuo de rayos X sin la presencia de los rayos X característicos?
- Suponga que el electrón en el átomo de hidrógeno obedece la mecánica clásica en lugar de la mecánica cuántica. ¿Por qué tal átomo hipotético debe emitir un espectro continuo en vez del espectro de líneas observado?
- Cuando se produce un holograma, el sistema (incluidos fuente de luz, objeto, divisor de haz, etc.) se deben mantener sin movimiento dentro de un cuarto de la longitud de onda de la luz. ¿Por qué?
- ¿Por qué son necesarios tres números cuánticos para describir el estado de un átomo de un electrón (desprecie el spin)?
- Describa cómo sería diferente la estructura de los átomos si el principio de exclusión de Pauli no es válido. ¿Qué consecuencias tendría a nivel atómico y en el mundo en general?
- ¿El electrón en el estado base del hidrógeno puede absorber un fotón de energía menor que 13.6 eV? ¿Puede absorber un fotón de energía mayor que 13.6 eV? Explique.
- ¿Por qué litio, potasio y sodio exhiben propiedades químicas similares?
- Mencione algunas formas en las cuales la mecánica cuántica alteró la visión del átomo que presentaba la teoría de Bohr.
- Es fácil comprender cómo dos electrones (uno con espín arriba, uno con espín abajo) pueden llenar la capa 1s para un átomo de helio. ¿Cómo es posible que ocho electrones más puedan encajar en el nivel 2s, 2p para completar la capa 1s2s²2p⁶ para un átomo de neón?
- Las energías de ionización para Li, Na, K, Rb y Cs son 5.390, 5.138, 4.339, 4.176 y 3.893 eV, respectivamente. Explique por qué se esperan estos valores en términos de las estructuras atómicas.
- ¿Por qué la emisión estimulada es tan importante en la operación de un láser?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch it.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
BIO denota problemas biomédicos
PG denota problemas guiados
M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
S denota problema de razonamiento simbólico

28.1 Primeros modelos del átomo

28.2 Espectros atómicos

1. **CIC** Las longitudes de onda de la serie de Lyman para el hidrógeno están dadas por

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

a) Calcule las longitudes de onda de las primeras tres líneas en esta serie. b) Identifique la región del espectro electromagnético en el cual aparecen estas líneas.

2. **CIC** Las longitudes de onda de la serie de Paschen para el hidrógeno están dadas por

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

a) Calcule las longitudes de onda de las primeras tres líneas en esta serie. b) Identifique la región del espectro electromagnético en el cual aparecen estas líneas.

3. El “tamaño” del átomo en el modelo de Rutherford es de aproximadamente 1.0×10^{-10} m. a) Determine la fuerza electrostática atractiva entre un electrón y un protón separados por esta distancia. b) Determine (en eV) la energía potencial electrostática del átomo.

4. Un átomo aislado de un determinado elemento emite luz de longitud de onda de 520 nm cuando el átomo cae de su estado excitado a un segundo estado excitado. El átomo emite un fotón de longitud de onda de 410 nm cuando cae de su sexto estado de excitación a su segundo estado excitado. Encuentre la longitud de onda de la luz irradiada cuando el átomo hace una transición de su sexto a su quinto estado excitado.

5. **CIC** El “tamaño” del átomo en el modelo de Rutherford es de aproximadamente 1.0×10^{-10} m. a) Determine la velocidad de un electrón que se mueve en torno al protón usando la fuerza electrostática atractiva entre un electrón y un protón separados por esta distancia. b) ¿Esta velocidad sugiere que se debe considerar la relatividad einsteiniana al estudiar el átomo? c) Calcule la longitud de onda de De Broglie del electrón conforme se mueve en torno al protón. d) ¿Esta longitud de onda sugiere que se deben considerar efectos ondulatorios, como difracción e interferencia, al estudiar el átomo?

6. En un experimento de dispersión de Rutherford, una partícula α (carga = $+2e$) se dirige directamente hacia un núcleo de oro (carga = $+79e$). La partícula α tiene una energía cinética de 5.0 MeV cuando está muy lejos ($r \rightarrow \infty$) del núcleo. Suponiendo que el núcleo de oro

está fijo en el espacio, determine la distancia de máximo acercamiento. *Sugerencia:* Use la conservación de la energía con $EP = k_e q_1 q_2 / r$.

28.3 El modelo de Bohr

- 7. M** Un átomo de hidrógeno está en su primer estado excitado ($n = 2$). Con la teoría del átomo de Bohr, calcule: a) el radio de la órbita, b) la cantidad de movimiento lineal del electrón, c) la cantidad de movimiento angular del electrón, d) la energía cinética, e) la energía potencial y f) la energía total.
- 8.** Para un átomo de hidrógeno en su estado base, use el modelo de Bohr para calcular a) la velocidad orbital del electrón, b) la energía cinética del electrón y c) la energía potencial eléctrica del átomo.
- 9. S** Demuestre que la velocidad del electrón en la n -ésima órbita de Bohr en el hidrógeno está dada por

$$v_n = \frac{k_e e^2}{n\hbar}$$

- 10.** Cuando un átomo de hidrógeno experimenta una transición del estado $n = 5$ al estado $n = 3$, se emite un fotón. Calcule a) la longitud de onda, b) la frecuencia y c) la energía (en electrón-volts) del fotón emitido.
- 11.** Un átomo de hidrógeno emite un fotón con 656 nm de longitud de onda. ¿Desde cuál órbita energética hacia cuál órbita de menor energía salta el electrón?
- 12.** A continuación se presentan cuatro posibles transiciones para un átomo de hidrógeno
- | | |
|-------------------------|------------------------|
| I. $n_i = 2; n_f = 5$ | II. $n_i = 5; n_f = 3$ |
| III. $n_i = 7; n_f = 4$ | IV. $n_i = 4; n_f = 7$ |

- a) ¿Cuál transición emitirá el fotón con longitud de onda más corta? b) ¿Para cuál transición el átomo ganará más energía? c) ¿Para cuál(es) transición(es) el átomo pierde energía?
- 13. M** ¿Cuál es la energía de un fotón que, cuando lo absorbe un átomo de hidrógeno, podría causar una transición electrónica desde a) el estado $n = 2$ al estado $n = 5$, y b) el estado $n = 4$ al estado $n = 6$?
- 14.** Un átomo de hidrógeno inicialmente en su estado base ($n = 1$) absorbe un fotón y termina en el estado para el cual $n = 3$. a) ¿Cuál es la energía del fotón absorbido? b) Si el átomo eventualmente regresa al estado base, ¿qué energías de fotón podría emitir el átomo?
- 15.** La serie de Balmer del átomo de hidrógeno corresponde a transiciones electrónicas que terminan en el estado con número cuántico $n = 2$ como se muestra en la figura P28.15. Considere que el fotón de mayor longitud de onda corresponde a la transición que se muestra en la figura. Determine a) su energía y b) la longitud de onda. Considere que la línea espectral de menor longitud de onda corresponde a la transición que se muestra en la figura. Determine c) la energía de sus fotones y d) su

longitud de onda. e) ¿Cuál es la longitud de onda más corta posible en la serie de Balmer?

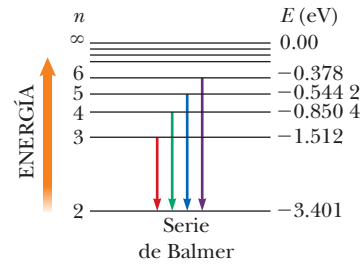


Figura P28.15

- 16. S** Una partícula con carga q y masa m , que se mueve con una velocidad constante v , perpendicular a un campo magnético constante B , sigue una trayectoria circular. Si en este caso la cantidad de movimiento angular en torno al centro de este círculo está cuantizada de modo que $mvr = 2n\hbar$, demuestre que los radios permitidos para la partícula son
- $$r_n = \sqrt{\frac{2n\hbar}{qB}}$$
- donde $n = 1, 2, 3, \dots$
- 17. M** a) Si un electrón realiza una transición desde la órbita de Bohr $n = 4$, hacia la órbita $n = 2$, determine la longitud de onda del fotón creada en el proceso. b) Suponiendo que el átomo inicialmente estaba en reposo, determine la velocidad de retroceso del átomo de hidrógeno cuando se emite este fotón.
- 18.** Considere un gran número de átomos de hidrógeno, con todos los electrones inicialmente en el estado $n = 4$. a) ¿Cuántas diferentes longitudes de onda se observarían en el espectro de emisión de estos átomos? b) ¿Cuál es la longitud de onda más larga que se podría observar? c) ¿A qué serie pertenece la longitud de onda encontrada en (b)?
- 19.** Un fotón con una energía 2.28 eV es absorbido por un átomo de hidrógeno. Encuentre a) el valor mínimo de n en un átomo de hidrógeno que puede ser ionizado por un fotón y b) la velocidad de los electrones liberados en el estado en el inciso a) cuando están lejos del núcleo.
- 20.** a) Calcule la cantidad de movimiento angular de la Luna debida a su movimiento orbital en torno a la Tierra. En su cálculo use 3.84×10^8 m como la distancia promedio Tierra-Luna y 2.36×10^6 s como el periodo de la Luna en su órbita. b) Si la cantidad de movimiento angular de la Luna obedece la regla de cuantización de Bohr ($L = n\hbar$), determine el valor del número cuántico n . c) ¿En qué fracción tendría que aumentar el radio Tierra-Luna para aumentar el número cuántico en 1?
- 21.** Un electrón está en la segunda órbita excitada del hidrógeno, que corresponde a $n = 3$. Encuentre a) el radio de la órbita y b) la longitud de onda del electrón en su órbita.
- 22. S** a) Escriba una expresión que relacione la energía cinética EC del electrón y la energía potencial EP en el modelo

de Bohr del átomo de hidrógeno. b) Suponga que un átomo de hidrógeno absorbe un fotón con energía E , lo que resulta en la transferencia del electrón a un nivel de energía superior. Expresé el cambio resultante en la energía potencial del sistema en términos de E . c) ¿Cuál es el cambio en la energía cinética del electrón durante este proceso?

23. Los radios orbitales de un átomo hidrogenoide están dados por la ecuación

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{Z m_e k_e e^2}$$

¿Cuál es el radio de la primera órbita de Bohr en a) He^+ , b) Li^{2+} y c) Be^{3+} ?

24. **PG** Considere un modelo de Bohr de litio doblemente ionizado. a) Escriba una expresión similar a la ecuación 28.14 para los niveles de energía del único electrón restante. b) Encuentre la energía que corresponde a $n = 4$. c) Encuentre la energía que corresponde a $n = 2$. d) Calcule la energía del fotón que se emite cuando el electrón transita del cuarto nivel energético al segundo nivel energético. Expresé la respuesta tanto en electrón-volts como en joules. e) Encuentre la frecuencia y longitud de onda del fotón emitido. f) ¿En qué parte del espectro está la luz emitida?

25. Una expresión general para los niveles de energía de los electrones y los iones de un átomo es

$$E_n = -\frac{\mu k_e^2 q_1^2 q_2^2}{2 \hbar^2 n^2}$$

Aquí μ es la masa reducida del átomo, dada por $\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$, donde m_1 es la masa del electrón y m_2 es la masa del núcleo, k_e es la constante de Coulomb, y q_1 y q_2 son las cargas de los electrones y el núcleo, respectivamente. La longitud de onda para la transición de $n = 3$ a $n = 2$ del átomo de hidrógeno es 656.3 nm (luz roja visible). ¿Cuáles son las longitudes de onda de la misma transición en a) un positrón, que consiste en un electrón y un positrón, y b) el helio simplemente ionizado? *Nota:* Un positrón es un electrón con carga positiva.

26. **S** Con el concepto de onda estacionaria, De Broglie pudo deducir el postulado de órbita estacionaria de Bohr. De Broglie supuso que un electrón confinado sólo podría existir en estados donde sus ondas de De Broglie forman patrones de onda estacionaria, como en la figura 28.6. Considere que una partícula confinada en una caja de longitud L es equivalente a una cuerda de longitud L y fija en ambos extremos. Aplique el concepto de De Broglie para demostrar que a) la cantidad de movimiento lineal de esta partícula está cuantizada con $p = mv = nh/2L$ y b) los estados permitidos corresponden a energías de partícula de $E_n = n^2 E_0$, donde $E_0 = \hbar^2 / (8mL^2)$.

28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno

27. Mencione los posibles conjuntos de números cuánticos para electrones en la subcapa 3d.

28. Cuando el número cuántico principal es $n = 4$, ¿cuántos diferentes valores de a) ℓ y b) m_ℓ son posibles?

29. El mesón ρ tiene una carga de $-e$, un número cuántico de espín de 1 y una masa 1 507 veces la del electrón. Si los electrones en los átomos se sustituyeran por mesones ρ , mencione los posibles conjuntos de números cuánticos para mesones ρ en la subcapa 3d.

28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica

30. a) Escriba la configuración electrónica del estado base para el nitrógeno ($Z = 7$). b) Escriba los valores para el posible conjunto de números cuánticos n , ℓ , m_ℓ y m_s para los electrones en el nitrógeno.

31. Un cierto elemento tiene su electrón más exterior en una subcapa 3p. Posee valencia +3, ya que tiene tres electrones más que un cierto gas noble. ¿Qué elemento es?

32. Dos electrones en el mismo átomo tienen $n = 3$ y $\ell = 1$. a) Mencione los números cuánticos para los posibles estados del átomo. b) ¿Cuántos estados serían posibles si el principio de exclusión no se aplicara al átomo?

33. El circonio ($Z = 40$) tiene dos electrones en una subcapa d incompleta. a) ¿Cuáles son los valores de n y ℓ para cada electrón? b) ¿Cuáles son los posibles valores de m_ℓ y m_s ? c) ¿Cuál es la configuración electrónica en el estado base del circonio?

28.6 Rayos X característicos

34. Un objetivo de tungsteno es golpeado por electrones que se han acelerado desde el reposo a través de una diferencia de potencial de 40.0 kV. Encuentre la menor longitud de onda de la radiación emitida.

35. Un objetivo de bismuto es golpeado por electrones y emite rayos X. Estime a) la energía de transición de la capa M a la capa L del bismuto y b) la longitud de onda de los rayos X emitidos cuando un electrón cae de la capa M a la capa L.

36. Cuando un electrón cae de la capa M ($n = 3$) a una vacancia en la capa K ($n = 1$), la longitud de onda medida del rayo X emitido es de 0.101 nm. Identifique al elemento.

37. **M** La serie K del espectro discreto del tungsteno contiene longitudes de onda de 0.0185 nm, 0.0209 nm y 0.0215 nm. La energía de ionización de la capa K es 69.5 keV. Determine las energías de ionización de las capas L, M y N.

Problemas adicionales

38. En un átomo de hidrógeno, ¿cuál es el número cuántico principal de la órbita del electrón con un radio más cercano a 1.0 μm ?

39. a) ¿Cuánta energía se requiere para hacer que un electrón en hidrógeno se mueva desde el estado $n = 1$ hasta el estado $n = 2$? b) Si los electrones ganan esta energía mediante colisiones entre átomos de hidrógeno en un gas a alta temperatura, encuentre la temperatura mínima

ma del gas hidrógeno caliente. La energía térmica de los átomos calentados está dada por $3k_B T/2$, donde k_B es la constante de Boltzmann.

40. Un láser de rubí pulsátil emite luz a 694.3 nm. Para un pulso de 14.0 ps que contiene 3.00 J de energía, encuentre a) la longitud física del pulso mientras viaja a través del espacio y b) el número de fotones en él. c) Si el haz tiene una sección transversal circular de 0.600 cm de diámetro, ¿cuál es el número de fotones por milímetro cúbico?
41. Un electrón en cromo se mueve desde el estado $n = 2$ hasta el estado $n = 1$ sin emitir un fotón. En vez de ello, la energía en exceso se transfiere a un electrón exterior (uno en el estado $n = 4$), que entonces expulsa el átomo. En este proceso Auger, el electrón expulsado se conoce como un electrón Auger. a) Encuentre el cambio en energía asociado con la transición desde $n = 2$ hacia el estado vacante $n = 1$, usando la teoría de Bohr. Suponga que sólo un electrón en la capa K blindada parte de la carga nuclear. b) Encuentre la energía necesaria para ionizar un electrón $n = 4$, suponiendo 22 electrones que blindan el núcleo. c) Encuentre la energía cinética del electrón expulsado (Auger). (Todas las respuestas deben estar en electrón-volts.)
42. **CIC S** A medida que la Tierra se mueve alrededor del Sol, sus órbitas están cuantizadas. a) Siga los pasos del análisis de Bohr del átomo de hidrógeno para demostrar que el radio permitido de la órbita de la Tierra está dado por

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{GM_S M_E^2}$$

donde n es un número entero cuántico, M_S es la masa del Sol, y M_T es la masa de la Tierra. b) Calcule el valor

numérico de n para el sistema Sol-Tierra. c) Determine la distancia entre la órbita para el número cuántico n y la siguiente órbita fuera del Sol que corresponde al número cuántico $n + 1$. d) Discuta la importancia de los resultados de los incisos b) y c).

43. **BIO M** Un láser que se usa en cirugía ocular emite un pulso de 3.00 Jm en 1.00 ns, enfocado sobre una mancha de 3.00 μm de diámetro sobre la retina. a) Encuentre (en unidades SI) la potencia por unidad de área en la retina. (Esta cantidad se llama *irradiancia*.) b) ¿Qué energía se entrega por pulso a un área de tamaño molecular (por decir, un área circular de 0.600 nm de diámetro)?
44. Un electrón tiene una longitud de onda de De Broglie igual al diámetro de un átomo de hidrógeno en su estado base. a) ¿Cuál es la energía cinética del electrón? b) ¿Cómo se compara esta energía con la energía del estado base del átomo de hidrógeno?
45. **S** Use el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno para demostrar que, cuando el átomo realiza una transición del estado n al estado $n - 1$, la frecuencia de la luz emitida está dada por

$$f = \frac{2\pi^2 m k_e^2 e^4}{h^3} \left[\frac{2n - 1}{(n - 1)^2 n^2} \right]$$

46. Suponga que la energía de ionización de un átomo es 4.100 eV. En este mismo átomo, se observan líneas de emisión que tienen longitudes de onda de 310.0, 400.0 y 1378 nm. Use esta información para construir el diagrama de niveles de energía con el menor número de niveles. Suponga que los niveles de energía más altos están muy juntos.



Los técnicos preparan la cámara de vacío del reactor de fusión mejorada ASDEX (Experimento Divertor de Simetría Axial), donde se calienta plasma a más de 60 millones de grados, dando lugar a la fusión del deuterio y el tritio y la liberación de energía. Tal tokamak experimental puede llevar a los reactores al trabajo de fusión.

Física nuclear

29

En este capítulo estudiamos las propiedades y estructura de los núcleos atómicos. Comenzamos por describir las propiedades básicas de los núcleos y continuamos con un análisis del fenómeno de la radiactividad. Finalmente, exploramos las reacciones nucleares y los diversos procesos mediante los cuales decaen los núcleos.

- 29.1 Algunas propiedades del núcleo
- 29.2 Energía de enlace
- 29.3 Radiactividad
- 29.4 Los procesos de decaimiento
- 29.5 Radiactividad natural
- 29.6 Reacciones nucleares
- 29.7 Aplicaciones médicas de la radiación

29.1 Algunas propiedades del núcleo

Todos los núcleos están compuestos de dos tipos de partículas: protones y neutrones. La única excepción es el núcleo de hidrógeno ordinario, que es un solo protón. Al describir algunas de las propiedades de los núcleos, como su carga, masa y radio, se utilizan las siguientes cantidades:

- el **número atómico** Z , que es igual al número de protones en el núcleo
- el **número de neutrones** N , que es igual al número de neutrones en el núcleo
- el **número de masa** A , que es igual al número de nucleones en el núcleo (*nucleón* es un término genérico que se usa para referirse a un protón o a un neutrón)

El símbolo que se usa para representar el núcleo es A_ZX , donde X representa el símbolo químico del elemento. Por ejemplo, ${}^{27}_{13}\text{Al}$ tiene el número de masa 27 y el número atómico 13; por lo tanto, contiene 13 protones y 14 neutrones. Cuando no hay probabilidad de que surja confusión, con frecuencia se omite el subíndice Z porque el símbolo químico siempre se puede usar para determinar Z .



Ernest Rutherford
Físico neozelandés (1871-1937)

Rutherford recibió el Premio Nobel de Química en 1908, por su estudio de la radiactividad y por descubrir que los átomos se pueden romper mediante rayos alfa. “Al considerarlo, me doy cuenta de que esta dispersión hacia atrás debe ser resultado de una sola colisión y cuando hice cálculos, vi que era imposible obtener algo de ese orden de magnitud a menos que se tomara un sistema en el cual la mayor parte de la masa del átomo estuviera concentrada en un núcleo diminuto. Entonces fue que tuve la idea de un átomo con un diminuto centro masivo que porta una carga.”

Definición de la unidad de masa unificada, u

Tabla 29.1 Masas del protón, neutrón y electrón en varias unidades

Partícula	Masa		
	kg	u	MeV/c ²
Protón	$1.672\ 6 \times 10^{-27}$	1.007 276	938.28
Neutrón	$1.675\ 0 \times 10^{-27}$	1.008 665	939.57
Electrón	9.109×10^{-31}	5.486×10^{-4}	0.511

Los núcleos de todos los átomos de un elemento particular deben contener el mismo número de protones, pero pueden contener diferentes números de neutrones. Los núcleos que se relacionan de esta forma se llaman **isótopos**. **Los isótopos de un elemento tienen el mismo valor Z, pero diferentes valores N y A.** Las abundancias naturales de isótopos pueden diferir de manera sustancial. Por ejemplo, $^{11}_6\text{C}$, $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$ y $^{14}_6\text{C}$ son cuatro isótopos del carbono. La abundancia natural del isótopo es de aproximadamente 98.9%, mientras que el del isótopo $^{13}_6\text{C}$ sólo es de más o menos 1.1%. Algunos isótopos no ocurren de manera natural, pero se pueden producir en el laboratorio mediante reacciones nucleares. Incluso el elemento más simple, hidrógeno, tiene isótopos: ^1_1H , hidrógeno; ^2_1H , deuterio, y ^3_1H , tritio.

Carga y masa

El protón porta una sola carga positiva $+e = 1.602\ 177\ 33 \times 10^{-19}\ \text{C}$, el electrón porta una sola carga negativa $-e$ y el neutrón es eléctricamente neutro. Puesto que el neutrón no tiene carga, es difícil de detectar. El protón es aproximadamente 1 836 veces más masivo que el electrón, y las masas del protón y el neutrón casi son iguales (tabla 29.1).

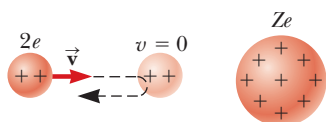
Para masas atómicas, es conveniente definir la **unidad de masa unificada, u**, en tal forma que la masa de un átomo del isótopo $^{12}_6\text{C}$ es exactamente 12 u, donde $1\ \text{u} = 1.660\ 559 \times 10^{-27}\ \text{kg}$. El protón y el neutrón tienen cada uno una masa de aproximadamente 1 u y el electrón tiene una masa que sólo es una pequeña fracción de una unidad de masa atómica.

Puesto que la energía en reposo de una partícula está dada por $E_R = mc^2$, con frecuencia es conveniente expresar la masa de la partícula en términos de su energía equivalente. Para una unidad de masa atómica, se tiene una energía equivalente de

$$E_R = mc^2 = (1.660\ 559 \times 10^{-27}\ \text{kg})(2.997\ 92 \times 10^8\ \text{m/s})^2 = 1.492\ 431 \times 10^{-10}\ \text{J} = 931.494\ \text{MeV}$$

En sus cálculos, los físicos nucleares usualmente expresan la masa en términos de la unidad MeV/c², donde

$$1\ \text{u} = 931.494\ \text{MeV}/c^2$$



El tamaño del núcleo

El tamaño y estructura del núcleo se investigó primero en experimentos de dispersión por parte de Rutherford, que se analiza en la sección 28.1. Al usar el principio de conservación de la energía, Rutherford encontró una expresión para cuán cerca una partícula alfa que se mueve directamente hacia el núcleo puede llegar a éste antes de ser repelido por la repulsión de Coulomb.

En tal colisión frontal, la energía cinética de la partícula alfa entrante se debe convertir por completo en energía potencial eléctrica cuando la partícula se detiene en el punto de máximo acercamiento y da la vuelta (figura activa 29.1). Si la energía cinética inicial de la partícula alfa se iguala con la máxima energía potencial eléctrica del sistema (partícula alfa más núcleo blanco), se tiene

$$\frac{1}{2}mv^2 = k_e \frac{q_1q_2}{r} = k_e \frac{(2e)(Ze)}{d}$$

Figura activa 29.1 Una partícula alfa en un curso de colisión frontal con un núcleo de carga Ze.

Debido a la repulsión de Coulomb entre cargas iguales, la partícula alfa se detendrá instantáneamente a una distancia d del núcleo, llamada distancia de máximo acercamiento.

donde d es la distancia de máximo acercamiento. Al resolver para d obtenemos

$$d = \frac{4k_e Z e^2}{m v^2}$$

A partir de esta expresión, Rutherford descubrió que las partículas alfa se aproximaban hasta 3.2×10^{-14} m dentro de un núcleo cuando la hoja está hecha de oro, lo que implica que el radio del núcleo de oro debe ser menor que este valor. Para átomos de plata, la distancia de máximo acercamiento era 2×10^{-14} m. A partir de estos resultados, Rutherford concluyó que la carga positiva en un átomo está concentrada en una pequeña esfera, a la que llamó núcleo, con radios no mayores que aproximadamente 10^{-14} m. Puesto que tales longitudes son comunes en física nuclear, una conveniente unidad de longitud es el *femtómetro* (fm), en ocasiones llamado **fermi** y que se define como

$$1 \text{ fm} \equiv 10^{-15}$$

Desde la época de los experimentos de dispersión de Rutherford, una multitud de otros experimentos demostraron que la mayoría de los núcleos son aproximadamente esféricos y tienen un radio promedio dado por

$$r = r_0 A^{1/3} \quad [29.1]$$

donde r_0 es una constante igual a 1.2×10^{-15} m y A es el número total de nucleones. Puesto que el volumen de una esfera es proporcional al cubo de su radio, de la ecuación 29.1 se tiene que el volumen de un núcleo (supuesto esférico) es directamente proporcional a A , el número total de nucleones. Entonces esta relación sugiere que **todos los núcleos tienen casi la misma densidad**. Los nucleones se combinan para formar un núcleo *como si* fuesen esferas fuertemente empaquetadas (figura 29.2).

Estabilidad nuclear

Dado que el núcleo consiste en una colección de protones y neutrones fuertemente empaquetados, tal vez le sorprenda que alguna vez puedan existir. Las grandes fuerzas electrostáticas repulsivas entre protones deben hacer que el núcleo se separe. Sin embargo, los núcleos son estables debido a la presencia de otra fuerza de corto alcance (aproximadamente 2 fm): la **fuerza nuclear**, una fuerza atractiva que actúa entre todas las partículas nucleares. Los protones se atraen mutuamente vía la fuerza nuclear y al mismo tiempo se repelen mutuamente mediante la fuerza de Coulomb. La fuerza nuclear atractiva también actúa entre pares de neutrones y entre neutrones y protones.

La fuerza nuclear atractiva es más fuerte que la fuerza repulsiva de Coulomb dentro del núcleo (a distancias cortas). Si no fuese así, los núcleos estables no existirían. Más aún, la fuerza nuclear fuerte es casi independiente de la carga. En otras palabras, las fuerzas nucleares asociadas con las interacciones protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón son aproximadamente iguales, aparte de la adicional fuerza de Coulomb repulsiva para la interacción protón-protón.

Hay alrededor de 260 núcleos estables, otros cientos han sido observados, pero son inestables. Una gráfica de N contra Z para una serie de núcleos estables se da en la figura 29.3 (página 960). Observe que los núcleos ligeros son más estables si contienen igual número de protones y neutrones, de modo que $N = Z$, pero los núcleos pesados son más estables si $N > Z$. Esta diferencia se puede entender en parte al reconocer que, conforme aumenta el número de protones, aumenta la intensidad de la fuerza de Coulomb, que tiende a romper al núcleo. Como resultado, se necesitan más neutrones para mantener al núcleo estable porque a los neutrones sólo los afecta la fuerza nuclear atractiva. En efecto, los neutrones adicionales “disminuyen” la densidad de carga nuclear. Eventualmente, cuando $Z = 83$, las fuerzas repulsivas entre los protones no se pueden compensar mediante la adición de neutrones. Los elementos que contienen más de 83 protones no tienen núcleos estables sino que, más bien, decaen o se desintegran en otras partículas en varios periodos. En el apéndice B se proporcionan las masas y algunas otras propiedades de isótopos seleccionados.

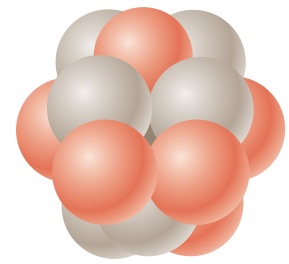


Figura 29.2 Un núcleo se puede visualizar como un cúmulo de esferas fuertemente empaquetadas, cada una de las cuales es un nucleón.

Tip 29.1 El número de masa no es la masa atómica

No confunda el número de masa A con la masa atómica. El número de masa es un entero que especifica un isótopo y no tiene unidades; simplemente es igual al número de nucleones. La masa atómica es un promedio de las masas de los isótopos de un elemento dado y tiene unidades de u.

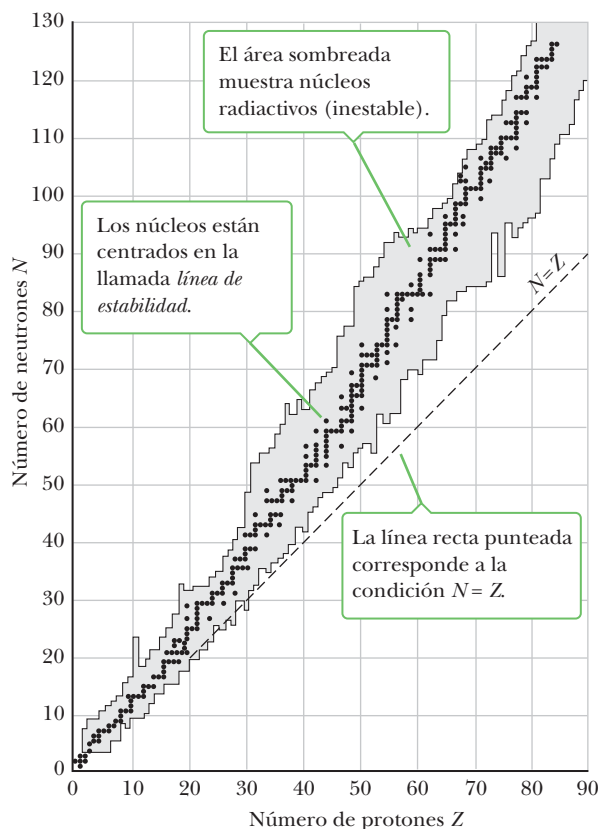


Cortesía de Louise Baker/API Niels Bohr Library

María Goeppert-Mayer Física alemana (1906-1972)

Goeppert-Mayer es mejor conocida por su desarrollo del modelo de capas del núcleo, publicado en 1950. Un modelo similar se desarrolló simultáneamente por parte de Hans Jensen, un científico alemán. María Goeppert-Mayer y Hans Jensen recibieron el Premio Nobel de Física en 1963, por su extraordinario trabajo para comprender la estructura del núcleo.

Figura 29.3 Una gráfica del número de neutrones N contra el número de protones Z para los núcleos estables (puntos sólidos).



29.2 Energía de enlace

La masa total de un núcleo siempre es menor que la suma de las masas de sus nucleones. Además, dado que la masa es otra manifestación de energía, **la energía total del sistema enlazado (el núcleo) es menor que la energía combinada de los nucleones separados**. Esta diferencia en energía se llama **energía de enlace** del núcleo y se puede considerar como la energía que se debe agregar a un núcleo para romperlo en sus neutrones y protones separados.

■ EJEMPLO 29.1 La energía de enlace del deuterón

OBJETIVO Calcular la energía de enlace de un núcleo.

PROBLEMA El núcleo del átomo de deuterio, llamado deuterón, consiste en un protón y un neutrón. Calcule la energía de enlace del deuterón en MeV, dado que su masa atómica, *la masa de un núcleo de deuterio más un electrón*, es 2.014 102 u.

ESTRATEGIA Calcule la suma de las masas de las partículas individuales y reste la masa de la partícula combinada. Se pueden usar las masas de los átomos neutros en lugar de los núcleos porque las masas del electrón se cancelan. Use los valores del apéndice B. La masa de un átomo dado en el apéndice B incluye la masa de Z electrones, donde Z es el número atómico del átomo.

SOLUCIÓN

Para encontrar la energía de enlace, primero sume las masas del átomo de hidrógeno y el neutrón y reste la masa del deuterón:

$$\begin{aligned} \Delta m &= (m_p + m_n) - m_d \\ &= (1.007\,825\text{ u} + 1.008\,665\text{ u}) - 2.014\,102\text{ u} \\ &= 0.002\,388\text{ u} \end{aligned}$$

Convierta esta diferencia de masa a su equivalente en MeV:

$$E_b = (0.002\,388\text{ u}) \frac{931.5\text{ MeV}}{1\text{ u}} = 2.224\text{ MeV}$$

COMENTARIOS Este resultado dice que, para separar un deuterón en un protón y un neutrón, es necesario agregar 2.224 MeV de energía al deuterón para superar la fuerza nuclear atractiva entre el protón y el neutrón. Una forma de suministrar al deuterón con esta energía es bombardearlo con partículas energéticas.

Si la energía de enlace de un núcleo fuese cero, el núcleo se separaría en sus protones y neutrones constituyentes sin la adición de energía alguna; es decir, se separaría espontáneamente.

PREGUNTA 29.1 Tritio y helio-3 tienen el mismo número de nucleones, pero el tritio tiene un protón y dos neutrones mientras que el helio-3 tiene dos protones y un neutrón. Sin hacer un cálculo, ¿cuál núcleo tiene mayor energía de enlace? Explique.

EJERCICIO 29.1 Calcule la energía de enlace de ${}^3_2\text{He}$.

RESPUESTA 7.718 MeV

Es interesante examinar una gráfica de energía de enlace por nucleón, E_b/A , como función del número de masa para varios núcleos estables (figura 29.4). Excepto por los núcleos más ligeros, la energía de enlace promedio por nucleón es aproximadamente 8 MeV. Observe que la curva tiene picos en la vecindad de $A = 60$, lo cual significa que los núcleos con números de masa mayor o menor que 60 no se enlazan tan fuertemente como los que están cerca de la mitad de la tabla periódica. Como verá más adelante, este hecho permite que se libere energía en las reacciones de fisión y fusión. La curva varía lentamente para $A > 40$, lo cual sugiere que la fuerza nuclear se satura. En otras palabras, un nucleón particular puede interactuar sólo con un número limitado de otros nucleones, que se pueden ver como los “vecinos más cercanos” en la estructura empaquetada que se ilustra en la figura 29.2.

■ FÍSICA APLICADA 29.1 Enlace de nucleones y electrones

La figura 29.4 muestra una gráfica de la cantidad de energía requerida para remover un nucleón del núcleo. La figura indica que se necesita una cantidad de energía aproximadamente constante para remover un nucleón arriba de $A = 40$, mientras que en el capítulo 28 vimos que se requieren can-

tidades de energía enormemente variables para remover un electrón del átomo. ¿Qué explica esta diferencia?

EXPLICACIÓN En el caso de la figura 29.4, el valor aproximadamente constante de la energía de enlace nuclear es

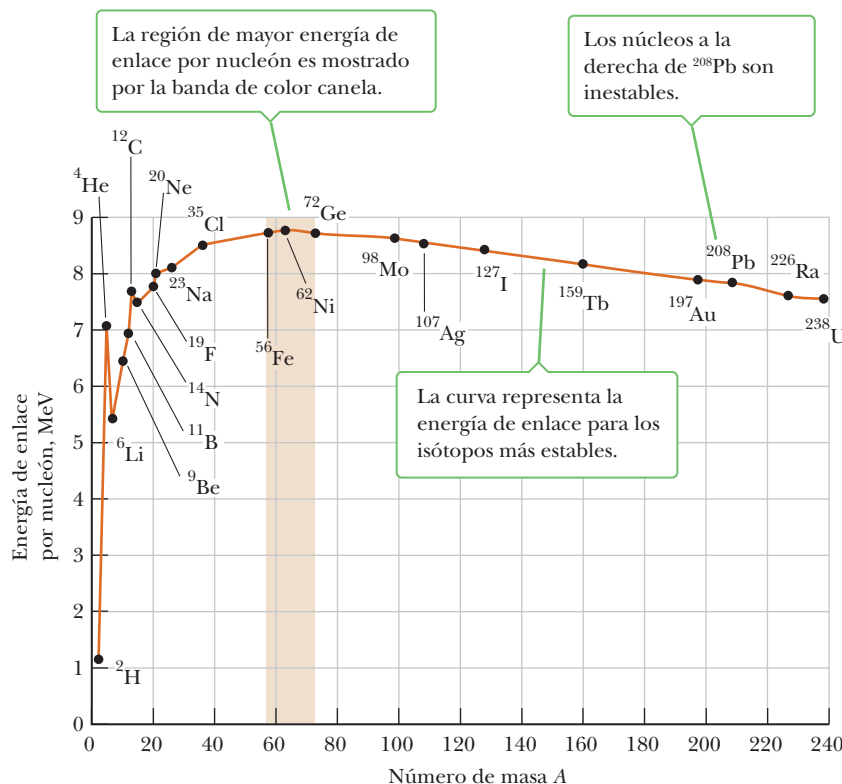


Figura 29.4 Energía de enlace por nucleón contra el número de masa A para núcleos que están a lo largo de la línea de estabilidad que se muestra en la figura 29.3. Algunos núcleos representativos aparecen como puntos negros con etiquetas.

resultado de la naturaleza de corto alcance de la fuerza nuclear. Un nucleón dado sólo interactúa con sus pocos vecinos más cercanos en lugar de hacerlo con todos los nucleones en el núcleo. En consecuencia, sin importar cuántos nucleones estén presentes en el núcleo, remover cualquier nucleón involucra separarlo sólo de sus vecinos más cercanos. Por lo tanto, la energía para hacerlo es aproximada e independiente de cuántos nucleones están presentes. Para la comparación más clara con el electrón, piense en promediar las energías requeridas para remover todos los electrones de

un átomo, desde el electrón de valencia más externo, hasta el electrón de la capa K más interno. Este promedio aumenta con el aumento en número atómico. La fuerza eléctrica que enlaza los electrones al núcleo en un átomo es una fuerza de largo alcance. Un electrón en un átomo interactúa con todos los protones en el núcleo. Cuando las cargas nucleares aumentan, hay una interacción más fuerte entre el núcleo y los electrones. En consecuencia, conforme aumenta la carga nuclear, se necesita más energía para remover un electrón promedio. ■

29.3 Radiactividad

En 1896, Becquerel descubrió accidentalmente que los cristales de sal de uranio emiten una radiación invisible que puede oscurecer una placa fotográfica incluso si la placa se cubre para excluir la luz. Después de muchas de estas observaciones bajo condiciones controladas, concluyó que la radiación emitida por los cristales era de un nuevo tipo, uno que no requería estimulación externa. Esta emisión espontánea de radiación pronto se llamó **radiactividad**. Experimentos posteriores de otros científicos demostraron que otras sustancias también eran radiactivas.

Las investigaciones más significativas de este tipo las desarrollaron Marie y Pierre Curie. Luego de varios años de cuidadosos y laboriosos procesos de separación química sobre toneladas de pechblenda, un material radiactivo, los Curie reportaron el descubrimiento de dos elementos anteriormente desconocidos, ambos radiactivos. Estos elementos recibieron los nombres de polonio y radio. Experimentos posteriores, incluido el famoso trabajo de Rutherford sobre dispersión de partículas alfa, sugirió que la radiactividad era resultado del decaimiento o desintegración, de núcleos inestables.

Una sustancia radiactiva puede emitir alguno de tres tipos de radiación: partículas alfa (α), en la que las partículas emitidas son núcleos $\frac{4}{2}\text{He}$; partículas beta (β), en la que las partículas emitidas son electrones o positrones; y rayos gamma (γ), en la que los “rayos” emitidos son fotones de alta energía. Un **positrón** es una partícula similar al electrón en todos aspectos, excepto que tiene una carga de $+e$. (Se dice que el positrón es la **antipartícula** del electrón.) El símbolo e^- se usa para designar un electrón y e^+ designa un positrón.

Es posible distinguir estas tres formas de radiación con el uso del esquema descrito en la figura 29.5. La radiación de una muestra radiactiva se dirige hacia una región con un campo magnético y el haz se divide en tres componentes, dos que se doblan en direcciones opuestas y la tercera que no cambia de dirección. A partir de esta simple observación, se puede concluir que la radiación del haz sin desviar (el rayo gamma) no porta carga, el componente que se desvía hacia arriba contiene partículas con carga positiva (partículas alfa) y el componente que se desvía hacia abajo contiene partículas con carga negativa (e^-). Si el haz incluye un positrón (e^+), se desvía hacia arriba.

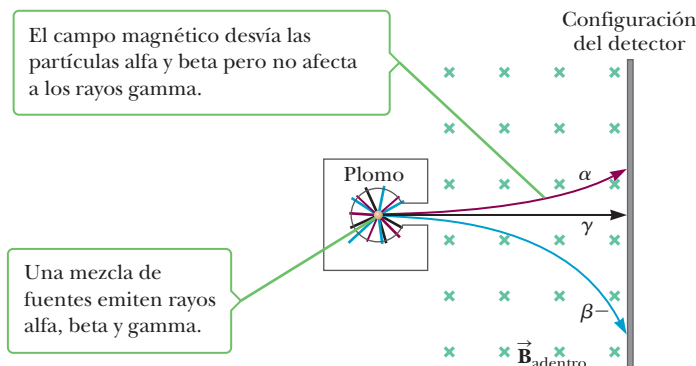


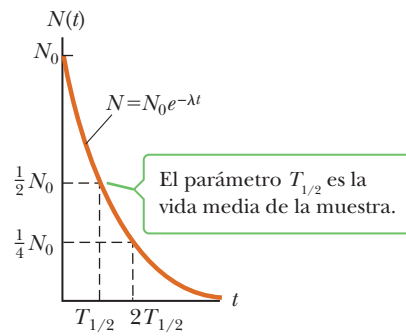
Marie Curie

Científica polaca (1867-1934)

En 1903 Marie Curie compartió el Premio Nobel de Física con su esposo, Pierre y con Antoine Henri Becquerel por sus estudios de las sustancias radiactivas. En 1911 recibió un segundo Premio Nobel, esta vez en química, por el descubrimiento del radio y el polonio. Marie Curie murió de leucemia causada por años de exposición a sustancias radiactivas. “Sigo creyendo que las ideas que nos guiaron entonces, son las únicas que pueden conducir al verdadero progreso social. No podemos esperar construir un mundo mejor sin mejorar lo individual. Para este fin, cada uno de nosotros debe trabajar hacia su más alto desarrollo y aceptar al mismo tiempo su parte de responsabilidad en la vida general de la humanidad.”

Figura 29.5 La radiación de una fuente radiactiva, como el radio, se puede separar en tres componentes con el uso de un campo magnético para desviar las partículas cargadas. El detector a la derecha registra los eventos.



**Figura activa 29.6**

Gráfica de la ley de decaimiento exponencial para núcleos radiactivos. El eje vertical representa el número de núcleos radiactivos presente en cualquier tiempo t , y el eje horizontal es tiempo.

Los tres tipos de radiación tienen energías de penetración muy diferentes. Las partículas alfa apenas penetran una hoja de papel, las partículas beta pueden penetrar algunos milímetros de aluminio y los rayos gamma pueden penetrar varios centímetros de plomo.

La constante de decaimiento y vida media

Las observaciones demuestran que si una muestra radiactiva contiene N núcleos radiactivos en algún instante, el número de núcleos, ΔN , que decaen en un pequeño intervalo de tiempo Δt es proporcional a N ; matemáticamente

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

o

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad [29.2]$$

donde λ es una constante llamada **constante de decaimiento**. El signo negativo significa que N disminuye con el tiempo; esto es, ΔN es negativo. El valor de λ para cualquier isótopo determina la razón a la que dicho isótopo decaerá. **La razón de decaimiento o actividad R , de una muestra se define como el número de decaimientos por segundo.** A partir de la ecuación 29.2, se ve que la razón de decaimiento es

$$R = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N \quad [29.3]$$

◀ Razón de decaimiento

Los isótopos con un gran valor λ decaen rápidamente; los que tienen pequeña λ decaen lentamente.

En la figura activa 29.6 se muestra una curva de decaimiento general para una muestra radiactiva. A partir de la ecuación 29.2 se puede demostrar (usando cálculo) que el número de núcleos presente varía con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad [29.4a]$$

donde N es el número de núcleos radiactivos presente en un tiempo t , N_0 es el número presente en el tiempo $t = 0$ y $e = 2.718 \dots$ es la constante de Euler. Los procesos que obedecen la ecuación 29.4a en ocasiones se dice que experimentan **decaimiento exponencial**.¹

Otro parámetro que es útil para caracterizar el decaimiento radiactivo es **la vida media $T_{1/2}$. La vida media de una sustancia radiactiva es el tiempo que tarda en decaer la mitad de un número dado de núcleos radiactivos.** Al usar el concepto de vida media, se puede demostrar que la ecuación 29.4a también se puede escribir como

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^n \quad [29.4b]$$

donde n es el número de vidas medias. El número n puede tomar cualquier valor no negativo y no necesita ser entero. A partir de la definición, se sigue que n se relaciona con el tiempo t y la vida media $T_{1/2}$ por

¹En el capítulo 18 se estudian otros ejemplos de decaimiento exponencial, en conexión con los circuitos RC y en el capítulo 20 en conexión con los circuitos RL .

$$n = \frac{t}{T_{1/2}} \quad [29.4c]$$

Haciendo $N = N_0/2$ y $t = T_{1/2}$ en la ecuación 29.4a tenemos

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Al escribir esta expresión en la forma $e^{\lambda T_{1/2}} = 2$ y tomar el logaritmo natural de ambos lados se tiene

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad [29.5]$$

La ecuación 29.5 es una expresión conveniente que relaciona la vida media con la constante de decaimiento. Observe que, después de transcurrido un tiempo de una vida media, permanecen $N_0/2$ núcleos radiactivos (por definición); después de dos vidas medias, decaerá la mitad de éstos y quedarán $N_0/4$ núcleos radiactivos; después de tres vidas medias, restarán $N_0/8$; etcétera.

Tip 29.2 Dos vidas medias no hacen una vida entera

Una vida media es el tiempo que transcurre para que decaiga la mitad de un número dado de núcleos. Durante una segunda vida media, la mitad de los núcleos restantes decae, de modo que en dos vidas medias decayeron tres cuartos del material original, no todo el material.

La unidad de actividad R es el **curie** (Ci), que se define como

$$1 \text{ Ci} \equiv 3.7 \times 10^{10} \text{ decaimientos/s} \quad [29.6]$$

Esta unidad se seleccionó como la unidad de actividad original porque es la actividad aproximada de 1 g de radio. La unidad SI de actividad es el **becquerel** (Bq):

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ decaimiento/s} \quad [29.7]$$

Por lo tanto, $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$. Las unidades de actividad de uso más común son el milicurie (10^{-3} Ci) y el microcurie (10^{-6} Ci).

Examen rápido

29.1 Verdadero o Falso: Un átomo radiactivo siempre decae después de transcurridas dos vidas medias.

29.2 ¿Qué fracción de una muestra radiactiva decae después de transcurridas tres vidas medias? a) 1/8 b) 3/4 c) 7/8 d) ninguno de éstos

29.3 Suponga que la constante de decaimiento de la sustancia radiactiva A es el doble que la constante de decaimiento de la sustancia radiactiva B. Si la sustancia B tiene una vida media de 4 h, ¿cuál es la vida media de la sustancia A? a) 8 h b) 4 h c) 2 h

EJEMPLO 29.2 La actividad del radio

OBJETIVO Calcular la actividad de una sustancia radiactiva en diferentes tiempos.

PROBLEMA La vida media del núcleo radiactivo $^{226}_{88}\text{Pa}$ es 1.6×10^3 años. Si una muestra inicialmente contiene 3.00×10^{16} de tal núcleo, determine **a)** la actividad inicial en curies, **b)** el número de núcleos que permanecen después de 4.8×10^3 años y **c)** la actividad en este último tiempo.

ESTRATEGIA Para los incisos a) y c), encuentre la constante de decaimiento y multiplíquela por el número de núcleos. El inciso b) requiere de multiplicar el número inicial del núcleo por un medio de cada vida media transcurrida. (En esencia, ésta es una aplicación de la ecuación 29.4b.)

SOLUCIÓN

a) Determine la actividad inicial en curies.

Convierta la vida media a segundos:

$$T_{1/2} = (1.6 \times 10^3 \text{ años})(3.156 \times 10^7 \text{ s/años}) = 5.0 \times 10^{10} \text{ s}$$

Sustituya este valor en la ecuación 29.5 para obtener la constante de decaimiento:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{5.0 \times 10^{10} \text{ s}} = 1.4 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

Calcule la actividad de la muestra en $t = 0$ y use $R_0 = \lambda N_0$, donde R_0 es la razón de decaimiento en $t = 0$ y N_0 es el número de núcleos radiactivos presente en $t = 0$:

$$\begin{aligned} R_0 &= \lambda N_0 = (1.4 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1})(3.0 \times 10^{16} \text{ núcleos}) \\ &= 4.2 \times 10^5 \text{ decaimientos/s} \end{aligned}$$

Convierta a curies para obtener la actividad en $t = 0$ y use $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ decaimientos/s:

$$R_0 = (4.2 \times 10^5 \text{ decaimientos/s}) \left(\frac{1 \text{ Ci}}{3.7 \times 10^{10} \text{ decaimientos/s}} \right) \\ = 1.1 \times 10^{-5} \text{ Ci} = 11 \mu\text{Ci}$$

b) ¿Cuántos núcleos de radio permanecen después de 4.8×10^3 años? Calcule el número de vidas medias, n :

$$n = \frac{4.8 \times 10^3 \text{ años}}{1.6 \times 10^3 \text{ años/vidas medias}} = 3.0 \text{ vidas medias}$$

Multiplique el número inicial de núcleos por el número de factores de un medio:

$$(1) \quad N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^n$$

Sustituya $N_0 = 3.0 \times 10^{16}$ y $n = 3.0$:

$$N = (3.0 \times 10^{16} \text{ núcleos}) \left(\frac{1}{2} \right)^{3.0} = 3.8 \times 10^{15} \text{ núcleos}$$

c) Calcule la actividad después de 4.8×10^3 años.

Multiplique el número de núcleos restantes por la constante de decaimiento para encontrar la actividad R :

$$R = \lambda N = (1.4 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1})(3.8 \times 10^{15} \text{ núcleos}) \\ = 5.3 \times 10^4 \text{ decaimientos/s} \\ = 1.4 \mu\text{Ci}$$

COMENTARIOS La actividad se reduce a la mitad cada vida media, lo que es naturalmente el caso porque la actividad es proporcional al número del núcleo restante. El número preciso del núcleo en cualquier tiempo nunca es exacto porque las partículas decaen de acuerdo con una probabilidad. Sin embargo, mientras mayor sea la muestra, más precisas serán las predicciones de la ecuación 29.4.

PREGUNTA 29.2 ¿Cómo es que el duplicar la masa inicial del material radiactivo afectaría la actividad inicial? ¿Cómo afectaría la vida media?

EJERCICIO 29.2 Encuentre a) el núcleo de radio restante después de 3.2×10^3 años y b) la actividad en este tiempo.

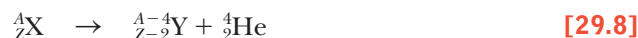
RESPUESTAS a) 7.5×10^{15} núcleos b) $2.8 \mu\text{Ci}$

29.4 Los procesos de decaimiento

Como se afirmó en la sección anterior, los núcleos radiactivos decaen espontáneamente vía decaimiento alfa, beta y gamma. Como verá en esta sección, estos procesos son muy diferentes uno de otro.

Decaimiento alfa

Si un núcleo emite una partícula alfa (${}^4_2\text{He}$), pierde dos protones y dos neutrones. Por lo tanto, el número de neutrones N de un solo núcleo disminuye por 2, Z disminuye por 2 y A disminuye por 4. El decaimiento puede escribirse simbólicamente como



donde X se llama **núcleo padre** y Y se conoce como **núcleo hijo**. Como ejemplos, ${}^{238}\text{U}$ y ${}^{226}\text{Ra}$ son emisores alfa y decaen de acuerdo con los esquemas



y



La vida media para decaimiento de ${}^{238}\text{U}$ es 4.47×10^9 años y la vida media de decaimiento de ${}^{226}\text{Ra}$ es 1.60×10^3 años. En ambos casos, observe que el número de masa A del núcleo

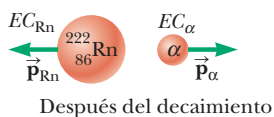
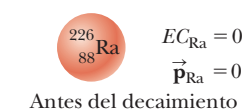


Figura activa 29.7

Decaimiento alfa de radio-226. El núcleo de radio inicialmente está en reposo. Después del decaimiento, el núcleo de radón tiene energía cinética EC_{Rn} y cantidad de movimiento \vec{p}_{Rn} , y la partícula alfa tiene energía cinética EC_α y cantidad de movimiento \vec{p}_α .

hijo es cuatro menos que el del núcleo padre y el número atómico Z se reduce por dos. Las diferencias se explican en la partícula alfa emitida (el núcleo ${}^4\text{He}$).

El decaimiento de ${}^{226}\text{Ra}$ se muestra en la figura activa 29.7. Cuando un elemento cambia en otro, como ocurre en el decaimiento alfa, el proceso se llama **decaimiento espontáneo** o transmutación. Como regla general, 1) la suma de los números de masa A debe ser la misma en ambos lados de la ecuación y 2) la suma de los números atómicos Z debe ser la misma en ambos lados de la ecuación.

Para que ocurra emisión alfa, la masa del padre debe ser mayor que la masa combinada del hijo y la partícula alfa. En el proceso de decaimiento, este exceso de masa se convierte en energía de otras formas y aparece en forma de energía cinética en el núcleo hijo y la partícula alfa. La mayor parte de la energía cinética se retira mediante la partícula alfa porque es mucho menos masiva que el núcleo hijo. Esto se puede entender al notar primero que la energía cinética y la cantidad de movimiento p de una partícula se relacionan del modo siguiente:

$$EC = \frac{p^2}{2m}$$

Puesto que la cantidad de movimiento se conserva, las dos partículas emitidas en el decaimiento de un núcleo en reposo deben tener cantidades iguales de movimiento, pero con dirección opuesta. Como resultado, la partícula más ligera, con la masa más pequeña en el denominador, tiene más energía cinética que la partícula más masiva.

■ FÍSICA APLICADA 29.2 Energía y vida media

Al comparar las energías de decaimiento alfa de algunos núclidos radiactivos, ¿por qué se encuentra que la vida media del decaimiento baja conforme la energía del decaimiento sube?

EXPLICACIÓN Debe parecer razonable que mientras más alta sea la energía de la partícula alfa, más probabilidad hay

de que escape a los confines del núcleo. La mayor probabilidad de escape se traduce a una razón de decaimiento más rápida, que aparece como una vida media más corta. ■

■ EJEMPLO 29.3 Decaimiento de radio

OBJETIVO Calcular la energía liberada durante un decaimiento alfa.

PROBLEMA Se demostró que el núcleo ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ experimenta decaimiento alfa a ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ (ecuación 29.10). Calcule la cantidad de energía liberada en este decaimiento. Considere que la masa de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ es 226.025 402 u, que la ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ es de 222.017 571 u y que la de ${}^4_2\text{He}$ es 4.002 602 u, como se detalla en el apéndice B.

ESTRATEGIA La solución es cuestión de restar las masas neutras de las partículas hijas de la masa original del átomo de radón.

SOLUCIÓN

Calcule la suma de la masa de la partícula hija, m_d , y la masa de la partícula alfa, m_α :

$$m_d + m_\alpha = 222.017\,571\text{ u} + 4.002\,602\text{ u} = 226.020\,173\text{ u}$$

Calcule la pérdida de masa, Δm , durante el decaimiento al restar el resultado previo de M_p , la masa de la partícula original:

$$\begin{aligned}\Delta m &= M_p - (m_d + m_\alpha) = 226.025\,402\text{ u} - 226.020\,173\text{ u} \\ &= 0.005\,229\text{ u}\end{aligned}$$

Convierta la pérdida de masa Δm a su energía equivalente en MeV:

$$E = (0.005\,229\text{ u})(931.494\text{ MeV/u}) = 4.871\text{ MeV}$$

COMENTARIOS La barrera de potencial por lo general es mayor que este valor de la energía, pero tuncamiento cuántico permite que el evento ocurra de cualquier forma.

PREGUNTA 29.3 Convierta la respuesta final a joules y estime la energía producida por un número de Avogadro de tales decaimientos.

EJERCICIO 29.3 Calcule la energía liberada cuando ${}^8_4\text{Be}$ se separa en dos partículas alfa. El berilio-8 tiene una masa atómica de 8.005 305 u.

RESPUESTA 0.094 1 MeV

Decaimiento beta

Cuando un núcleo radiactivo experimenta decaimiento beta, el núcleo hijo tiene el mismo número de nucleones que el núcleo padre, pero el número atómico cambia por 1:



De nuevo, observe que el número de nucleones y la carga total se conservan ambos en estos decaimientos. Sin embargo, como verá dentro de poco, estos procesos no se describen por completo mediante estas expresiones. Un evento típico de decaimiento beta es



La emisión de electrones de un *núcleo* es sorprendente porque, en todos los análisis anteriores, se afirmó que el núcleo está compuesto solamente de protones y neutrones. Esta aparente discrepancia se puede explicar al notar que el electrón emitido se crea en el núcleo mediante un proceso en el cual un neutrón se transforma en un protón. Este proceso se puede representar mediante

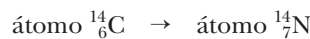


Considere la energía del sistema de la ecuación 29.13 antes y después del decaimiento. Como con el decaimiento alfa, la energía se debe conservar en el decaimiento beta. El siguiente ejemplo ilustra cómo calcular la cantidad de energía liberada en el decaimiento beta de ${}^{14}_6\text{C}$.

■ EJEMPLO 29.4 Decaimiento beta de carbono-14

OBJETIVO Calcular la energía liberada en un decaimiento beta.

PROBLEMA Encuentre la energía liberada en el decaimiento beta de ${}^{14}_6\text{C}$ a ${}^{14}_7\text{N}$, como se representa mediante la ecuación 29.13. Esta ecuación se refiere al núcleo, mientras que el apéndice B proporciona las masas de átomos neutros. Agregar seis electrones a ambos lados de la ecuación 29.13 produce



ESTRATEGIA Como en problemas precedentes, encontrar la energía liberada involucra calcular la diferencia en masa entre la partícula resultante y la partícula inicial y convertirla a MeV.

SOLUCIÓN

Obtenga las masas de ${}^{14}_6\text{C}$ y ${}^{14}_7\text{N}$ del apéndice B y calcule la diferencia entre ellas:

$$\Delta m = m_{\text{C}} - m_{\text{N}} = 14.003\,242\text{ u} - 14.003\,074\text{ u} = 0.000\,168\text{ u}$$

Convierta la diferencia de masa a MeV:

$$E = (0.000\,168\text{ u})(931.494\text{ MeV/u}) = 0.156\text{ MeV}$$

COMENTARIOS La energía calculada por lo general es más que la energía observada en este proceso. La discrepancia condujo a una crisis en la física porque parecía que la energía no se conservaba. Como se analizó anteriormente, esta crisis se resolvió mediante el descubrimiento de que en la reacción también se producía otra partícula.

PREGUNTA 29.4 ¿La energía de enlace por nucleón del núcleo de nitrógeno-14 es mayor o menor que la energía de enlace por nucleón para el núcleo de carbono-14? Justifique su respuesta.

EJERCICIO 29.4 Calcule la máxima energía liberada en el decaimiento beta del potasio radiactivo a calcio: ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + e^-$.

RESPUESTA 1.31 MeV

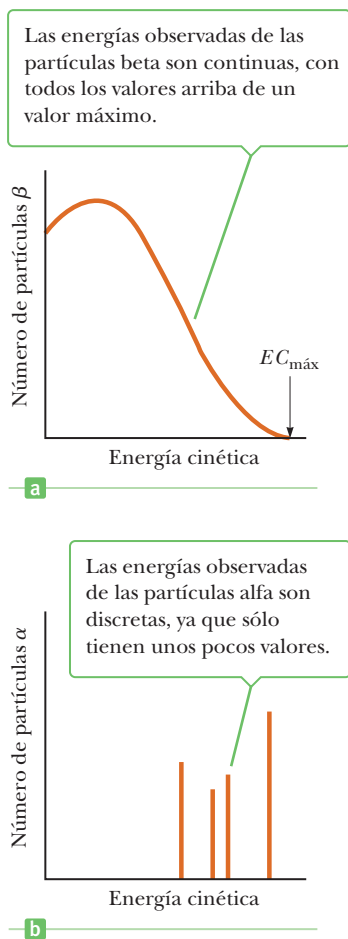


Figura 29.8 a) Distribución de energías de partícula beta en un decaimiento beta típico. Todas las energías se observan hasta un valor máximo. b) Distribución de energías de las partículas alfa en una desintegración alfa típica.

Tip 29.3 Número de masa del electrón

Otra notación que a veces se utiliza para un electrón es ${}^0_0\text{e}$. Esta notación no implica que el electrón tenga energía en reposo cero. La masa del electrón es mucho menor que la del nucleón más ligero, de modo que se puede aproximar a cero cuando se estudien decaimientos nucleares y reacciones.

A partir del ejemplo 29.4, vemos que la energía liberada en el decaimiento beta de ${}^{14}\text{C}$ es aproximadamente 0.16 MeV. Como con el decaimiento alfa, se espera que el electrón se lleve virtualmente toda esta energía como energía cinética porque, en apariencia, es la partícula más ligera producida en el decaimiento. Sin embargo, como muestra la figura 29.8, sólo un pequeño número de electrones tienen esta energía cinética máxima, representada como $EC_{\text{máx}}$ en la gráfica; la mayoría de los electrones emitidos tienen energías cinéticas menores que este valor predicho. Si el núcleo hijo y el electrón no se llevan esta energía liberada, ¿a dónde va la energía? Como una complicación adicional, ¡mayor análisis del decaimiento beta muestra que los principios de conservación de la cantidad de movimiento tanto angular como lineal parecen haberse violado!

En 1930, Pauli propuso que una tercera partícula debe estar presente para llevarse la energía “faltante” y conservar la cantidad de movimiento. Más tarde, Enrico Fermi desarrolló una teoría completa del decaimiento beta y llamó a esta partícula **neutrino** (“el pequeño neutro”) porque debía ser eléctricamente neutro y tener poca o ninguna masa. Aunque eludió la detección durante muchos años, el neutrino (ν) finalmente se detectó de manera experimental en 1956. El neutrino tiene las siguientes propiedades:

- Carga eléctrica cero
- Una masa mucho menor que la del electrón, pero probablemente no cero. (Experimentos recientes sugieren que el neutrino definitivamente tiene masa, mas el valor es incierto, acaso menor que $1 \text{ eV}/c^2$)
- Un espín de $\frac{1}{2}$
- Interacción muy débil con la materia, lo que lo hace difícil de detectar

Con la introducción del neutrino, ahora el proceso de decaimiento beta de la ecuación 29.13 se puede representar en su forma correcta:



La barra en el símbolo $\bar{\nu}$ indica un **antineutrino**. Para explicar qué es un antineutrino, primero considere el siguiente decaimiento:



Aquí se ve que, cuando ${}^{12}\text{N}$ decae a ${}^{12}\text{C}$, se produce una partícula que es idéntica al electrón, excepto que tiene una carga positiva de $+e$. Esta partícula se llama **positrón**. Puesto que es como el electrón en todos los aspectos, excepto en carga, se dice que el positrón es la **antipartícula** del electrón. En el capítulo 30 se analizan con más profundidad las antipartículas; por ahora, es suficiente decir que, **en el decaimiento beta, se emiten un electrón y un antineutrino o un positrón y un neutrino.**

A diferencia del decaimiento beta, que resulta en una partícula hija con una variedad de posibles energías cinéticas, los decaimientos alfa vienen en cantidades discretas, como se ve en la figura 29.8b. Esto se debe a que las dos partículas hijas tienen cantidades de movimiento iguales en magnitud y opuestas en dirección y cada una está compuesta de un número fijo de nucleones.

Decaimiento gamma

Con mucha frecuencia un núcleo que experimenta decaimiento radiactivo se deja en un estado de energía excitado. Entonces el núcleo puede experimentar un segundo decaimiento a un estado energético más bajo, acaso incluso al estado base, al emitir uno o más fotones de alta energía. El proceso es similar a la emisión de luz mediante un átomo. Un átomo emite radiación para liberar algo de energía adicional cuando un electrón “salta” desde un estado de alta energía hasta un estado de menor energía. Del mismo modo, el núcleo usa esencialmente el mismo método para liberar cualquier energía adicional que pudiera tener después de un decaimiento o algún otro evento nuclear. En la des-excitación nuclear, los “saltos” que liberan energía se realizan mediante protones o neutrones en el núcleo conforme se mueven desde un nivel de energía más alto a un nivel más bajo. Los fotones emitidos en el proceso se llaman **rayos gamma**, que tienen muy alta energía en relación con la energía de la luz visible.

Un núcleo puede alcanzar un estado excitado como resultado de una violenta colisión con otra partícula. Sin embargo, es más común que un núcleo esté en un estado excitado como resultado de decaimiento alfa o beta. La siguiente secuencia de eventos tipifica los procesos de decaimiento alfa:



La ecuación 29.17 representa un decaimiento beta en el cual ${}^{12}\text{B}$ decae a ${}^{12}\text{C}^*$, donde el asterisco indica que el núcleo de carbono queda en un estado excitado después del decaimiento. El núcleo de carbono excitado decae entonces al estado base mediante la emisión de un rayo gamma, como se indica mediante la ecuación 29.18. Observe que la emisión gamma no resulta en algún cambio en Z o en A .



© Bettmann/Corbis

Enrico Fermi Físico italiano (1901-1954)

Fermi recibió el Premio Nobel de Física en 1938 por producir los elementos transuránicos mediante irradiación de neutrones y por su descubrimiento de las reacciones nucleares producidas por neutrones lentos. Hizo muchas otras aportaciones sobresalientes a la física, incluida su teoría del decaimiento beta, la teoría de electrones libres de los metales y el desarrollo del primer reactor de fisión del mundo en 1942. Fermi fue verdaderamente un físico teórico y experimental dotado. También fue bien conocido por su habilidad para presentar la física en una forma clara y excitante. “Cualquier cosa que la Naturaleza tenga guardada para la humanidad, por desagradable que parezca, el hombre debe aceptarla, pues la ignorancia nunca es mejor que el conocimiento.”

APLICACIÓN

Detectores de humo

Usos prácticos de la radiactividad

Datación con carbono El decaimiento beta de ${}^{14}\text{C}$ dado por la ecuación 29.15 comúnmente se utiliza para datar muestras orgánicas. Los rayos cósmicos (partículas de alta energía del espacio exterior) en la parte superior de la atmósfera provocan reacciones nucleares que crean ${}^{14}\text{C}$ a partir de ${}^{14}\text{N}$. De hecho, la proporción de ${}^{14}\text{C}$ a ${}^{12}\text{C}$ (por números de núcleos) en las moléculas de dióxido de carbono de la atmósfera tiene un valor constante de aproximadamente 1.3×10^{-12} , según se determina a partir de mediciones de las proporciones de carbono en los anillos de los árboles. Todos los organismos vivos tienen la misma proporción de ${}^{14}\text{C}$ a ${}^{12}\text{C}$ porque continuamente intercambian dióxido de carbono con sus alrededores. Sin embargo, cuando un organismo muere, ya no absorbe ${}^{14}\text{C}$ de la atmósfera, de modo que la proporción de ${}^{14}\text{C}$ a ${}^{12}\text{C}$ disminuye como resultado del decaimiento beta de ${}^{14}\text{C}$. Por lo tanto, es posible determinar la edad de un material al medir su actividad por unidad de masa como resultado del decaimiento de ${}^{14}\text{C}$. A través de la datación con carbono, se han identificado muestras de madera, carbón, hueso y concha que vivieron hace 1000 a 25 000 años. Este conocimiento ayudó a los investigadores a reconstruir la historia de los organismos vivos, incluidos los humanos, durante dicho lapso.

Detectores de humo Los detectores de humo se usan frecuentemente en hogares e industrias para protección contra incendios. La mayoría de los detectores comunes son de tipo ionización, que usan materiales radiactivos. (Véase la figura 29.9.) Un detector de humo consiste de una cámara de ionización, un detector sensible a la corriente y una alarma. Una débil fuente radiactiva ioniza el aire en la cámara del detector, lo que crea partículas cargadas. Entre las placas dentro de la cámara se mantiene un voltaje, que establece una pequeña corriente detectable en el circuito externo. En tanto se mantenga la corriente, la alarma se desactiva. Sin embargo, si el humo entra a la cámara, los iones se unen a las partículas de humo. Estas partículas más pesadas no derivan tan fácilmente como los iones más ligeros y generan una disminución en la corriente del detector. El circuito externo percibe esta disminución en la corriente y activa la alarma.

Detección de radón La radiactividad también puede afectar su vida diaria en forma dañina. Poco después del descubrimiento del radio por los Curie, se descubrió que el aire en contacto con compuestos de radio se volvía radiactivo. Entonces se demostró que esta radiactividad proviene del mismo radio y en consecuencia al producto se le llamó “emanación de radio”. Rutherford y Frederick Soddy tuvieron éxito al condensar esta “emanación”, lo que confirmó que era una sustancia real: el elemento gaseoso inerte ahora llamado **radón** (Rn). Más tarde se descubrió que el aire en las minas de uranio es radiactivo debido a la presencia de gas radón. Por lo tanto, las minas deben estar bien ventiladas para ayudar a proteger a los mineros. Finalmente, el miedo a la contaminación por radón se movió de las minas de uranio hacia las casas. Puesto que ciertos tipos de rocas, suelo, ladrillos y concreto contienen pequeñas cantidades de radio, parte del gas radón resultante encuentra su camino hacia las casas y otros edificios. El problema más serio surge de la fuga de radón del suelo hacia la estructura. Un remedio práctico es expulsar el aire a través de una

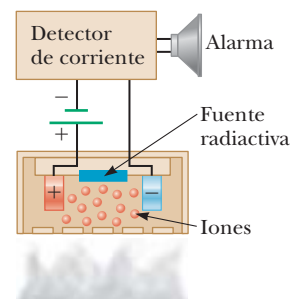


Figura 29.9 Detector de humo del tipo ionización. El humo que entra a la cámara reduce la corriente detectada, lo que hace sonar la alarma.

APLICACIÓN

Contaminación con radón

tubería justo sobre el suelo o grava subyacente directamente hacia el exterior mediante un pequeño ventilador o fuelle.

Para usar técnicas de datación radiactiva es necesario remodelar algunas de las ecuaciones ya introducidas. Comience por multiplicar ambos lados de la ecuación 29.4 por λ :

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

A partir de la ecuación 29.3 se tiene $\lambda N = R$ y $\lambda N_0 = R_0$. Sustituya estas expresiones en la ecuación anterior y divida entre R_0 :

$$\frac{R}{R_0} = e^{-\lambda t}$$

donde R es la actividad presente y R_0 era la actividad cuando el objeto en cuestión era parte de un organismo viviente. Es posible resolver para el tiempo al tomar el logaritmo natural de ambos lados de la ecuación precedente:

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \ln(e^{-\lambda t}) = -\lambda t$$

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\lambda}$$

[29.19]**EJEMPLO 29.5** ¿Debes reportar este esqueleto a homicidios?

OBJETIVO Aplicar la técnica de datación con carbono-14.

PROBLEMA Una muestra de 50.0 g de carbono tomada del hueso pélvico de un esqueleto tiene una razón de decaimiento de carbono-14 de 200.0 decaimientos/min. Se sabe que el carbono de un organismo viviente tiene una razón de decaimiento de 15.0 decaimientos/min · g y que ^{14}C tiene una vida media de 5730 años = 3.01×10^9 min. Encuentre la edad del esqueleto.

ESTRATEGIA Calcule la actividad original y la constante de decaimiento y luego sustituya estos números y la actividad actual en la ecuación 29.19.

SOLUCIÓN

Calcule la actividad original R_0 a partir de la razón de decaimiento y la masa de la muestra:

$$R_0 = \left(15.0 \frac{\text{decaimientos}}{\text{min} \cdot \text{g}}\right)(50.0 \text{ g}) = 7.50 \times 10^2 \frac{\text{decaimientos}}{\text{min}}$$

Encuentre la constante de decaimiento a partir de la ecuación 29.5:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{3.01 \times 10^9 \text{ min}} = 2.30 \times 10^{-10} \text{ min}^{-1}$$

R está dada, de modo que ahora se sustituyen todos los valores en la ecuación 29.19 para encontrar la edad del esqueleto:

$$\begin{aligned} t &= -\frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\lambda} = -\frac{\ln\left(\frac{200.0 \text{ decaimientos/min}}{7.50 \times 10^2 \text{ decaimientos/min}}\right)}{2.30 \times 10^{-10} \text{ min}^{-1}} \\ &= \frac{1.32}{2.30 \times 10^{-10} \text{ min}^{-1}} \\ &= 5.74 \times 10^9 \text{ min} = 1.09 \times 10^4 \text{ años} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Para periodos mucho más largos, se deben usar otras sustancias radiactivas con vidas medias más largas para realizar estimaciones.

PREGUNTA 29.5 ¿Los resultados de la datación con carbono dependen de la masa de la muestra original?

EJERCICIO 29.5 Una muestra de carbono de 7.60 g de masa tomada de una mandíbula animal tiene una actividad de 4.00 decaimientos/min. ¿Cuán antigua es la mandíbula?

RESPUESTA 2.77×10^4 años

Tabla 29.2 Las cuatro series radiactivas

Series	Isótopo de partida	Vida media (años)	Producto estable final
Uranio	${}_{92}^{238}\text{U}$	4.47×10^9	${}_{82}^{206}\text{Pb}$
Actinio	${}_{92}^{235}\text{U}$	7.04×10^8	${}_{82}^{207}\text{Pb}$
Torio	${}_{90}^{232}\text{Th}$	1.41×10^{10}	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
Neptunio	${}_{93}^{237}\text{Np}$	2.14×10^6	${}_{82}^{209}\text{Pb}$

29.5 Radiactividad natural

Los núcleos radiactivos por lo general se clasifican en dos grupos: 1) núcleos inestables que se encuentran en la naturaleza, que dan lugar a lo que se llama **radiactividad natural** y 2) núcleos producidos en el laboratorio a través de reacciones nucleares, que muestran **radiactividad artificial**.

Existen tres series de núcleos que ocurren en la naturaleza (tabla 29.2). Cada una comienza con un isótopo radiactivo específico de larga duración, con vida media que supera la de cualquiera de sus descendientes. La cuarta serie en la tabla 29.2 comienza con ${}^{237}\text{Np}$, un elemento transuránico (un elemento que tiene un número atómico mayor que el del uranio) que no se encuentra en la naturaleza. Este elemento tiene una vida media de “solamente” 2.14×10^6 años.

Las dos series del uranio son un poco más complejas que la serie de ${}^{232}\text{Th}$ (figura 29.10). Además, existen muchos otros isótopos radiactivos que ocurren de manera natural, como ${}^{14}\text{C}$ y ${}^{40}\text{K}$, que no son parte de alguna serie de decaimiento.

La radiactividad natural constantemente suministra elementos radiactivos al ambiente, que de otra forma habrían desaparecido hace mucho tiempo. Por ejemplo, puesto que el sistema solar tiene aproximadamente 5×10^9 años de antigüedad, el suministro de ${}^{226}\text{Ra}$ (con una vida media de sólo 1600 años) se habría agotado hace mucho mediante decaimiento radiactivo de no ser por las series de decaimiento que comienzan con ${}^{238}\text{U}$, con una vida media de 4.47×10^9 años.

29.6 Reacciones nucleares

Es posible cambiar la estructura de los núcleos al bombardearlos con partículas energéticas. Tales cambios se llaman **reacciones nucleares**. Rutherford fue el primero en observar reacciones nucleares, usando fuentes radiactivas de la naturaleza para el bombardeo de partículas. Descubrió que se liberaban protones cuando se permitía que partículas alfa chocaran con átomos de nitrógeno. El proceso se puede representar simbólicamente como



Esta ecuación dice que una partícula alfa (${}^4_2\text{He}$) golpea un núcleo de nitrógeno y produce un núcleo producto desconocido (X) y un protón (${}^1_1\text{H}$). Balancear los números atómicos y los números de masa, como se hizo para decaimiento radiactivo, permite concluir que el desconocido se caracteriza como ${}^{17}_8\text{X}$. Puesto que el elemento con número atómico 8 es oxígeno, se ve que la reacción es



Esta reacción nuclear comienza con dos isótopos estables, helio y nitrógeno y produce dos diferentes isótopos estables, hidrógeno y oxígeno.

Desde la época de Rutherford se han observado miles de reacciones nucleares, en particular después del desarrollo de los aceleradores de partículas cargadas en 1930. Con el avance tecnológico actual en aceleradores y detectores de partículas, es posible lograr energías de partícula de al menos $1\,000\text{ GeV} = 1\text{ TeV}$. Estas partículas de alta energía se usan para crear nuevas partículas cuyas propiedades ayudan a resolver los misterios del núcleo (y, de hecho, del Universo en sí).

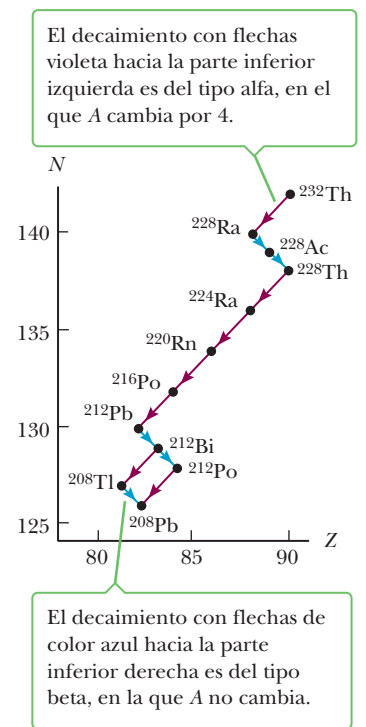
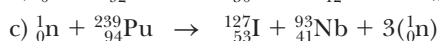
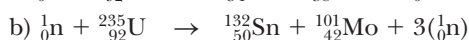
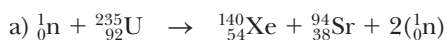
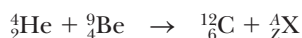
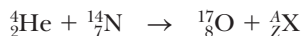


Figura 29.10 Serie de decaimiento que comienza con ${}^{232}\text{Th}$.

Examen rápido**29.4** ¿Cuáles de las siguientes reacciones son posibles?**EJEMPLO 29.6** El descubrimiento del neutrón**OBJETIVO** Balancear una reacción nuclear para determinar un producto de decaimiento desconocido.**PROBLEMA** Una reacción nuclear de particular importancia ocurrió en 1932, cuando Robert Chadwick, en Inglaterra, bombardeó un blanco de berilio con partículas alfa. El análisis del experimento indicó la ocurrencia de la siguiente reacción:¿Cuál es ${}_Z^AX$ en esta reacción?**ESTRATEGIA** Balancear los números de masa y los números atómicos produce la respuesta.**SOLUCIÓN**Escriba una ecuación que relacione las masas atómicas en cualquier lado: $4 + 9 = 12 + A \rightarrow A = 1$ Escriba una ecuación que relacione los números atómicos: $2 + 4 = 6 + Z \rightarrow Z = 0$ Identifique la partícula: ${}_Z^AX = {}_0^1\text{n}$ (un neutrón)**COMENTARIOS** Éste fue el primer experimento que arrojó pruebas positivas de la existencia de los neutrones.**PREGUNTA 29.6** ¿Dónde, en la naturaleza, se encuentra comúnmente la reacción entre helio y berilio?**EJERCICIO 29.6** Identifique la partícula desconocida en la reacción**RESPUESTA** ${}_Z^AX = {}_1^1\text{H}$ (un átomo de hidrógeno neutro)**Valores Q**

Acaba usted de examinar algunas reacciones nucleares para las cuales se deben balancear los números de masa y los números atómicos en las ecuaciones. Ahora considerará la energía involucrada en estas reacciones, porque la energía es otra cantidad importante que se debe conservar.

Este procedimiento se ilustra al analizar la reacción nuclear

La masa total en el lado izquierdo de la ecuación es la suma de la masa de ${}_1^2\text{H}$ (2.014 102 u) y la masa de ${}_7^{14}\text{N}$ (14.003 074 u), que es igual a 16.017 176 u. De igual modo, la masa en el lado derecho de la ecuación es la suma de la masa de ${}_6^{12}\text{C}$ (12.000 000 u) más la masa de ${}_2^4\text{He}$ (4.002 602 u), para un total de 16.002 602 u. Por ende, la masa total antes de la reacción es mayor que la masa total después de la reacción. La diferencia de masa en la reacción es igual a $16.017 176 \text{ u} - 16.002 602 \text{ u} = 0.014 574 \text{ u}$. Esta “pérdida” de masa se convierte en energía cinética de los núcleos presentes después de la reacción. En unidades de energía, 0.014 574 u es equivalente a 13.576 MeV de energía cinética transportada por los núcleos de carbono y helio.La energía requerida para balancear la ecuación se llama valor Q de la reacción. En la ecuación 29.22, el valor Q es 13.576 MeV. Las reacciones nucleares en las que hay liberación de energía (esto es, valores Q positivos) se llaman **reacciones exotérmicas**.

Sin embargo, el balance de energía no está completo, porque también se debe considerar la energía cinética de la partícula incidente antes de la colisión. Como ejemplo, suponga que el deuterón en la ecuación 29.22 tiene una energía cinética de 5 MeV. Al sumar este valor al valor Q , se encuentra que los núcleos de carbono y helio tienen una energía cinética total de 18.576 MeV después de la reacción.

Ahora considere la reacción



Antes de la reacción, la masa total es la suma de las masas de la partícula alfa y el núcleo de nitrógeno: $4.002\,602\text{ u} + 14.003\,074\text{ u} = 18.005\,676\text{ u}$. Después de la reacción, la masa total es la suma de las masas del núcleo de oxígeno y el protón: $16.999\,133\text{ u} + 1.007\,825\text{ u} = 18.006\,958\text{ u}$. En este caso, la masa total después de la reacción es *mayor* que la masa total antes de la reacción. El déficit de masa es $0.001\,282\text{ u}$, equivalente a un déficit de energía de 1.194 MeV. Este déficit se expresa mediante el valor Q negativo de la reacción, -1.194 MeV . Las reacciones con valores Q negativo se llaman **reacciones endotérmicas**. Tales reacciones no tendrán lugar a menos que la partícula entrante tenga al menos suficiente energía cinética para superar el déficit de energía.

Al principio puede parecer que la reacción en la ecuación 29.23 puede tener lugar si la partícula alfa entrante tiene una energía cinética de 1.194 MeV. Sin embargo, en la práctica, la partícula alfa debe tener más energía que esto. Si tiene una energía de sólo 1.194 MeV, la energía se conserva; no obstante, un análisis cuidadoso muestra que la cantidad de movimiento no se conserva, lo que se puede entender al reconocer que la partícula alfa entrante tiene cierta cantidad de movimiento antes de la reacción. Sin embargo, si su energía cinética sólo es de 1.194 meV, los productos (oxígeno y un protón) se crearían con energía cinética cero y por ende cantidad de movimiento cero. Se puede demostrar que, para conservar tanto la energía como la cantidad de movimiento, la partícula entrante debe tener una energía cinética mínima dada por

$$EC_{\text{mín}} = \left(1 + \frac{m}{M}\right)|Q| \quad [29.24]$$

donde m es la masa de la partícula incidente, M es la masa del blanco y se usa el valor absoluto del valor Q . Para la reacción dada por la ecuación 29.23, se encuentra que

$$EC_{\text{mín}} = \left(1 + \frac{4.002\,602}{14.003\,074}\right)|-1.194\text{ MeV}| = 1.535\text{ MeV}$$

Este valor mínimo de la energía cinética de la partícula entrante se llama **energía umbral**. La reacción nuclear que se muestra en la figura 29.23 no ocurrirá si la partícula alfa entrante tiene una energía cinética menor que 1.535 MeV, pero puede ocurrir si su energía cinética es igual a o mayor que 1.535 meV.

■ Examen rápido

29.5 Si el valor Q de una reacción endotérmica es -2.17 MeV , la mínima energía cinética necesaria en los núcleos reactantes para que ocurra la reacción debe ser a) igual a 2.17 MeV , b) mayor que 2.17 MeV , c) menor que 2.17 MeV o d) exactamente la mitad de 2.17 MeV .

29.7 Aplicaciones médicas de la radiación **BIO**

Daño por radiación en la materia

La radiación absorbida por la materia puede causar daño severo. El grado y tipo de daño depende de varios factores, incluidos el tipo y la energía de la radiación y las propiedades del material absorbente. El daño por radiación en los organismos biológicos se debe prin-

principalmente a los efectos de ionización en las células. La función normal de una célula se puede perturbar cuando se forman iones o radicales enormemente reactivos como resultado de la radiación ionizante. Por ejemplo, los radicales hidrógeno e hidroxilo producidos de las moléculas de agua pueden inducir reacciones químicas que pueden romper enlaces en las proteínas y otras moléculas vitales. Las grandes dosis agudas de radiación son especialmente peligrosas porque el daño a un gran número de moléculas en una célula puede hacer que la célula muera. Además, las células que sobreviven a la radiación pueden volverse defectuosas, lo que puede conducir a cáncer.

En los sistemas biológicos es común separar el daño por radiación en dos categorías: el daño somático y el daño genético. El **daño somático** es el daño por radiación a cualquier célula, excepto las células reproductivas. Tal daño puede conducir a cáncer a altos niveles de radiación o alterar seriamente las características de organismos específicos. El **daño genético** afecta sólo a las células reproductivas. El daño a los genes en las células reproductivas puede conducir a descendencia defectuosa. Claramente, uno debe preocuparse por el efecto de los tratamientos diagnósticos, como los rayos X y otras formas de exposición a la radiación.

Para cuantificar la exposición y dosis de radiación se usan varias unidades. El **roentgen (R)** se define como **la cantidad de radiación ionizante que producirá 2.08×10^9 pares de iones en 1 cm^3 de aire bajo condiciones estándar**. De manera equivalente, el roentgen es **la cantidad de radiación que deposita $8.76 \times 10^{-3} \text{ J}$ de energía en 1 kg de aire**.

Para la mayoría de las aplicaciones, el roentgen se sustituye por el **rad** (acrónimo en inglés para *dosis de radiación absorbida*), que se define del modo siguiente: **un rad es la cantidad de radiación que deposita 10^{-2} J de energía en 1 kg de material absorbente**.

Aunque el rad es una unidad física perfectamente buena, no es la mejor unidad para medir el grado de daño biológico producido por la radiación, porque el grado de daño no sólo depende de la dosis, sino también del *tipo* de radiación. Por ejemplo, una dosis dada de partículas alfa causa aproximadamente 10 veces más daño biológico que una dosis igual de rayos X. El factor **EBR** (acrónimo en inglés de *eficacia biológica relativa*) se define como **el número de rads de radiación X o radiación gamma que produce el mismo daño biológico que 1 rad de la radiación que se usa**. En la tabla 29.3 se proporcionan los factores EBR para diferentes tipos de radiación. Observe que los valores sólo son aproximados porque varían con la energía de la partícula y la forma de daño.

Finalmente, el **rem** (acrónimo en inglés de *roentgen equivalente en masculino*) se define como el producto de la dosis en rads y el factor EBR:

$$\text{Dosis en rem} = \text{dosis en rads} \times \text{EBR}$$

De acuerdo con esta definición, 1 rem de cualesquiera dos tipos de radiación producirá la misma cantidad de daño biológico. A partir de la tabla 29.3, vemos que una dosis de 1 rad de neutrones rápidos representa una dosis efectiva de 10 rem y que 1 rad de radiación X es equivalente a una dosis de 1 rem.

La radiación de bajo nivel de las fuentes naturales, como los rayos cósmicos y las rocas y suelos radiactivos, aportan una dosis de más o menos 0.13 rem/año por persona. El límite superior de la dosis de radiación recomendado por el gobierno estadounidense (además de la radiación de fondo y la exposición relacionada a procedimientos médicos) es 0.5 rem/año. Muchas ocupaciones involucran niveles superiores de exposición a la radiación y para los individuos en estas ocupaciones, se estableció un límite superior

BIO APLICACIÓN
Límites de la exposición ocupacional a la radiación

Tabla 29.3 Factores EBR para varios tipos de radiación

Radiación	Factor EBR
Rayos X y rayos gamma	1.0
Partículas beta	1.0-1.7
Partículas alfa	10-20
Neutrones lentos	4-5
Neutrones rápidos y protones	10
Iones pesados	20

de 5 rem/año para exposición de todo el cuerpo. Límites superiores más altos son permisibles para ciertas partes del cuerpo, como las manos y antebrazos. Una dosis aguda en todo el cuerpo de 400 a 500 rem resulta en una tasa de mortalidad de aproximadamente 50%. La forma más peligrosa de exposición es la ingestión o inhalación de isótopos radiactivos, en especial aquellos elementos que el cuerpo retiene y concentra, como ^{90}Sr . En algunos casos, una dosis de 1 000 rem pueden resultar de ingerir 1 mCi de material radiactivo.

Durante muchos años se han esterilizado objetos al exponerlos a la radiación, pero en años recientes los métodos empleados son más seguros en su utilización y más económicos. La mayoría de las bacterias, gusanos e insectos se destruyen fácilmente al exponerlos a radiación gamma de cobalto radiactivo. En tales procesos no hay ingesta de núcleos radiactivos por parte de un organismo, como la hay al usar trazadores radiactivos. El proceso es enormemente efectivo para destruir gusanos *Trichinella* en cerdos, bacterias salmonella en pollos, huevos de insecto en trigo y bacterias superficiales en frutas y vegetales que pueden conducir a rápida descomposición. Recientemente, el procedimiento se expandió para incluir la esterilización de equipo médico mientras está en su cubierta protectora. Los guantes quirúrgicos, esponjas, suturas, etcétera, se irradian mientras están empaquetados. Además, hueso, cartílago y piel que se utilizan para injertos con frecuencia se irradian para reducir la posibilidad de infección.

BIO APLICACIÓN

Irradiación para alimentos y equipo médico

Trazadores

Las partículas radiactivas se pueden usar para trazar químicos que participan en varias reacciones. Uno de los usos más valiosos de los trazadores radiactivos está en la medicina. Por ejemplo, ^{131}I es un isótopo de yodo producido artificialmente. (El isótopo natural no radiactivo es ^{127}I .) El yodo, un nutriente necesario para el cuerpo, se obtiene principalmente a través de la ingesta de alimentos marinos y sal yodada. La glándula tiroides tiene un importante papel en la distribución del yodo a todo el cuerpo. Para evaluar el desempeño de la tiroides, el paciente bebe una pequeña cantidad de yoduro de sodio radiactivo. Dos horas después, la cantidad de yodo en la glándula tiroides se determina al medir la intensidad de la radiación en el área del cuello.

Una aplicación médica del uso de los trazadores radiactivos en situaciones de emergencia es la de localizar una hemorragia dentro del cuerpo. Con frecuencia la ubicación del sitio no se puede determinar con facilidad, pero el cromo radiactivo puede identificar la ubicación con un alto grado de precisión. Los eritrocitos capturan el cromo y lo llevan uniformemente a todo el cuerpo. Sin embargo, la sangre se acumulará en un sitio de hemorragia y la radiactividad de dicha región aumentará considerablemente.

Las técnicas de trazado son tan amplias como puede vislumbrar el ingenio humano. Las aplicaciones actuales varían desde comprobar la absorción de flúor en los dientes, hasta comprobar la contaminación de equipo de procesamiento de alimentos con limpiadores, e incluso monitorear el deterioro dentro del motor de un automóvil. En el último caso, se usa un material radiactivo en la fabricación de los pistones y se comprueba la radiactividad del aceite para determinar la cantidad de uso en los pistones.

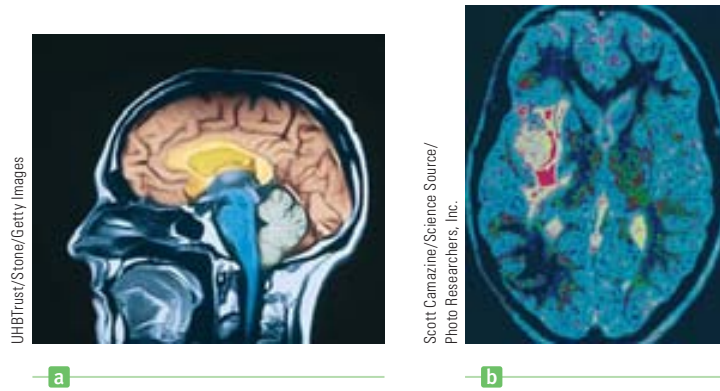
BIO APLICACIÓN

Trazadores radiactivos en medicina

Imágenes por resonancia magnética (IRM)

El punto central de la formación de imágenes por resonancia magnética (IRM) es que, cuando un núcleo que tiene un momento magnético se coloca en un campo magnético externo, su momento tiene precesión en torno al campo magnético con una frecuencia que es proporcional al campo. Por ejemplo, un protón, con un espín de $\frac{1}{2}$, puede ocupar uno de dos estados de energía cuando se coloca en un campo magnético externo. El estado de menor energía corresponde al caso donde el espín se alinea con el campo, mientras que el estado de mayor energía corresponde al caso donde el espín se opone al campo. Las transiciones entre estos dos estados se pueden observar con una técnica conocida como **resonancia magnética nuclear**. Para alinear los momentos magnéticos, se aplica un campo magnético CD y un segundo campo magnético oscilatorio débil se aplica perpendicular al campo CD. Cuando la frecuencia del campo oscilatorio se ajusta para coincidir con la frecuencia de precesión de los momentos magnéticos, los núcleos se “voltarán” entre los

Figura 29.11 Imágenes de IRM mejoradas en computadora de a) un cerebro humano normal y b) un cerebro humano con un glioma.



BIO APLICACIÓN

Formación de imágenes por resonancia magnética (IRM)

dos estados de espín. Estas transiciones resultan en una absorción neta de energía por el sistema de espín, lo cual se puede detectar electrónicamente.

En la IRM, la reconstrucción de las imágenes se obtiene con el uso de campos magnéticos que varían espacialmente y un procedimiento para codificar cada punto en la muestra a observar. En la figura 29.11 se muestran dos imágenes IRM tomadas en un cuerpo humano. En la práctica, se usa una técnica de secuenciación de pulso controlada por computadora para producir señales que se capturan mediante un dispositivo de procesamiento adecuado. Luego las señales se someten a manipulaciones matemáticas apropiadas para proporcionar datos para la imagen final. La ventaja principal de la IRM sobre otras técnicas de formación de imágenes en un diagnóstico médico es que causan mínimo daño a las estructuras celulares. Los fotones asociados con las señales de radiofrecuencia que se usan en IRM tienen energías de sólo aproximadamente 10^{-7} eV. Dado que la intensidad de los enlaces moleculares es mucho mayor (en el orden de 1 eV), los fotones de rf causan poco daño celular. En comparación, los rayos X o los rayos γ tienen energías que varían de 10^4 a 10^6 eV y pueden provocar considerable daño celular.

RESUMEN

29.1 Algunas propiedades del núcleo

29.2 Energía de enlace

Los núcleos se representan simbólicamente como A_ZX , donde X representa el símbolo químico para el elemento. La cantidad A es el **número de masa**, que es igual al número total de nucleones (neutrones más protones) en el núcleo. La cantidad Z es el **número atómico**, que es igual al número de protones en el núcleo. Los núcleos que contienen el mismo número de protones pero diferentes números de neutrones se llaman **isótopos**. En otras palabras, los isótopos tienen los mismos valores Z pero diferentes valores A .

La mayoría de los núcleos son aproximadamente esféricos, con un radio promedio dado por

$$r = r_0 A^{1/3} \quad [29.1]$$

donde r_0 es una constante igual a 1.2×10^{-15} m y A es el número de masa.

La masa total de un núcleo siempre es menor que la suma de las masas de sus nucleones individuales. Esta diferencia de masa Δm , multiplicada por c^2 , proporciona la **energía de enlace** del núcleo.

29.3 Radiactividad

La emisión espontánea de radiación por ciertos núcleos se llama **radiactividad**. Existen tres procesos mediante los cuales

una sustancia puede decaer: decaimiento alfa (α), en el cual las partículas emitidas son núcleos ${}^4_2\text{He}$; decaimiento beta (β), en el cual las partículas emitidas son electrones o positrones; y decaimiento gamma (γ), en el cual las partículas emitidas son fotones de alta energía.

La **razón de decaimiento** o **actividad**, R , de una muestra está dada por

$$R = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N \quad [29.3]$$

donde N es el número del núcleo radiactivo en cierto instante y λ es una constante para una sustancia dada llamada **constante de decaimiento**.

El núcleo en una sustancia radiactiva decae en tal forma que el número de núcleo presente varía con el tiempo de acuerdo con la expresión

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad [29.4a]$$

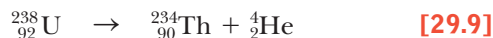
donde N es el número del núcleo radiactivo presente en el tiempo t , N_0 es el número en el tiempo $t = 0$ y $e = 2.718 \dots$ es la base de los logaritmos naturales.

La **vida media** $T_{1/2}$ de una sustancia radiactiva es el tiempo requerido para que decaiga la mitad de un número dado de núcleos radiactivos. La vida media se relaciona con la constante de decaimiento mediante

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad [29.5]$$

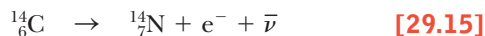
29.4 Los procesos de decaimiento

Si un núcleo decae mediante emisión alfa, pierde dos protones y dos neutrones. Un decaimiento alfa típico es



Observe que, en este decaimiento, como en todos los procesos de decaimiento radiactivo, la suma de los valores Z a la izquierda es igual a la suma de los valores Z a la derecha; lo mismo es cierto para los valores A .

Un decaimiento beta típico es



Cuando un núcleo experimenta decaimiento beta, se emite un **antineutrino** junto con un electrón o un **neutrino** junto con un positrón. Un neutrino tiene carga eléctrica cero y una masa pequeña (que puede ser cero) e interactúa débilmente con la materia.

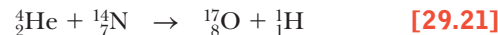
Con frecuencia, el núcleo se encuentra en un estado excitado después de decaimiento radiactivo y libera su energía adicional al emitir un fotón de alta energía llamado **rayo gamma** (γ). Una emisión típica de rayo gamma es



donde el asterisco indica que el núcleo de carbono estaba en un estado excitado antes de la emisión gamma.

29.6 Reacciones nucleares

Las **reacciones nucleares** pueden ocurrir cuando una partícula bombardeada golpea a otro núcleo. Una reacción nuclear típica es



En esta reacción, una partícula alfa golpea un núcleo de nitrógeno, lo que produce un núcleo de oxígeno y un protón. Como en decaimiento radiactivo, los números atómicos y los números de masa se balancean en los dos lados de la flecha.

Las reacciones nucleares en las cuales se libera energía se dice que son **reacciones exotérmicas** y se caracterizan por valores Q positivos. Las reacciones con valores Q negativos, llamadas **reacciones endotérmicas**, no pueden ocurrir a menos que la partícula entrante tenga al menos suficiente energía cinética para superar el déficit de energía. Para conservar tanto la energía como la cantidad de movimiento, la partícula entrante debe tener una energía cinética mínima, llamada **energía umbral**, dada por

$$EC_{\text{mín}} = \left(1 + \frac{m}{M}\right)|Q| \quad [29.24]$$

donde m es la masa de la partícula incidente y M es la masa del átomo objetivo.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Estime la razón del volumen de un núcleo de neón, a la de un núcleo de helio. a) 1 b) 2 c) 4 d) 5 e) 7
- Convierta la masa atómica de un átomo de oxígeno a unidades de MeV/c^2 . a) $1.88 \times 10^4 \text{ MeV}/c^2$ b) $2.47 \times 10^4 \text{ MeV}/c^2$ c) $7.37 \times 10^3 \text{ MeV}/c^2$ d) $9.21 \times 10^5 \text{ MeV}/c^2$ e) $1.49 \times 10^4 \text{ MeV}/c^2$
- La masa atómica del oxígeno es 15.999 u. Convierta esta masa a kilogramos. a) $1.28 \times 10^{-26} \text{ kg}$ b) $3.37 \times 10^{-26} \text{ kg}$ c) $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ d) $4.72 \times 10^{-26} \text{ kg}$ e) $2.66 \times 10^{-26} \text{ kg}$
- Clasifique cloro, níquel y oro por energía de enlace por nucleón, de menor a mayor. a) oro, cloro, níquel b) cloro, oro, níquel c) níquel, oro, cloro d) oro, níquel, cloro e) cloro, níquel, oro
- ¿Un átomo neutro designado como ${}_{18}^{40}\text{X}$ contiene a) 20 neutrones y 20 protones, b) 22 protones y 18 neutrones, c) 18 protones y 22 neutrones, d) 18 protones y 40 neutrones o e) 40 protones y 18 neutrones?
- La vida media del radio-224 es aproximadamente 3.6 días. ¿Qué fracción aproximada de una muestra permanece sin decaer después de dos semanas? a) $\frac{1}{2}$ b) $\frac{1}{4}$ c) $\frac{1}{8}$ d) $\frac{1}{16}$ e) $\frac{1}{32}$
- La sustancia A tiene una constante de decaimiento λ que es tres veces la de B. Encuentre la razón de la vida media de la sustancia A, a la vida media de la sustancia B. a) $\frac{1}{3}$ b) 1 c) 3 d) 2 e) $\frac{1}{2}$
- Cuando el núcleo ${}_{36}^{95}\text{Kr}$ experimenta decaimiento beta, ¿el núcleo hijo (Rb) contiene a) 58 neutrones y 37 protones, b) 58 protones y 37 neutrones, c) 54 neutrones y 41 protones, d) 59 neutrones y 36 protones o e) 55 neutrones y 40 protones?
- Cuando ${}_{15}^{32}\text{P}$ decae a ${}_{16}^{32}\text{S}$, ¿cuál de las siguientes partículas se emite? a) un protón b) una partícula alfa c) un electrón d) un rayo gamma e) un antineutrino
- En el decaimiento ${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_{88}^{234}\text{Ra} + {}_2^4\text{He}$, identifique el número de masa y el número atómico del núcleo Ra. a) $A = 230$, $Z = 92$ b) $A = 238$, $Z = 88$ c) $A = 230$, $Z = 88$ d) $A = 234$, $Z = 88$ e) $A = 238$, $Z = 86$
- ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto al considerar un isótopo radiactivo ${}_{Z}^AX$ que decae por emisión de rayo gamma? a) El isótopo resultante tiene un valor Z diferente. b) El isótopo resultante tiene el mismo valor A y el mismo valor Z . c) El isótopo resultante tiene un valor A diferente. d) Tanto A como Z son diferentes. e) El átomo salta a un estado de mayor energía.
- ¿Cuál es el valor Q para la reacción ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$? a) 8.4 MeV b) 7.3 MeV c) 6.2 MeV d) 5.7 MeV e) 4.2 MeV

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un estudiante afirma que una forma pesada de hidrógeno decae mediante emisión alfa. ¿Cómo responde usted?
- Si un núcleo pesado que inicialmente está en reposo experimenta decaimiento alfa, ¿cuál tiene más energía cinética después del decaimiento, la partícula alfa o el núcleo hijo?
- ¿Por qué los isótopos de un elemento dado tienen diferentes propiedades físicas, como la masa, pero las mismas propiedades químicas?
- ¿Por qué casi todos los isótopos naturales están por encima de la línea $N = Z$ en la figura 29.3?
- Considere dos núcleos pesados X e Y con un número parecido de masa. Si X tiene la mayor energía de unión, ¿cuál núcleo tiende a ser más inestable? Explique su respuesta.
- Explique las principales diferencias entre alfa, beta y rayos gamma.
- En el decaimiento beta, la energía del electrón o positrón emitido del núcleo se encuentra en algún lugar en un rango relativamente grande de posibilidades. Sin embargo, en el decaimiento alfa, la energía de la partícula alfa sólo puede tener valores discretos. ¿Por qué existe esta diferencia?
- ¿Qué fracción de una muestra radiactiva se ha deteriorado después de que han pasado dos vidas medias?
- Escoja cualquier proceso de decaimiento beta y demuestre que el neutrino debe tener carga cero.
- Si la película se mantiene en una caja, las partículas alfa de una fuente radiactiva afuera de la caja no pueden velar la película, pero las partículas alfa sí pueden. Explique.
- En el decaimiento de un positrón, un protón en el núcleo se convierte en un neutrón y la carga positiva se la lleva el positrón. No obstante, un neutrón tiene una mayor energía en reposo que un protón. ¿Cómo es esto posible?
- Una partícula alfa tiene el doble de carga que una partícula beta. ¿Por qué la primera se desvía menos que la última cuando pasan entre placas con carga eléctrica, suponiendo que ambas tienen la misma velocidad?
- ¿La datación con carbono-14 se puede usar para medir la edad de una piedra? Explique

PROBLEMAS

ENHANCED

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

Una lista de las masas atómicas se da en el apéndice B.

29.1 Algunas propiedades del núcleo

- Determine los radios nucleares de los siguientes núclidos: a) ${}^2_1\text{H}$ b) ${}^{60}_{27}\text{Co}$ c) ${}^{197}_{79}\text{Au}$ d) ${}^{239}_{94}\text{Pu}$.
- Determine el radio de un núcleo de a) ${}^4_2\text{He}$ y b) ${}^{238}_{92}\text{U}$.
- Con $2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ como la densidad de la materia nuclear, encuentre el radio de una esfera de tal materia que tendría una masa igual a la de la Tierra. La Tierra tiene una masa igual a $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ y radio promedio de $6.37 \times 10^6 \text{ m}$.
- Considere el núcleo ${}^{65}_{29}\text{Cu}$. Encuentre valores aproximados para su a) radio, b) volumen y c) densidad.
- M** Una partícula alfa ($Z = 2$, masa = $6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$) se aproxima hasta dentro de $1.00 \times 10^{-14} \text{ m}$ de un núcleo de carbono ($Z = 6$). ¿Cuáles son a) la máxima fuerza de Coulomb sobre la partícula alfa, b) la aceleración de la partícula alfa en este tiempo y c) la energía potencial de la partícula alfa en el mismo tiempo?
- CIC** Átomos de carbono individualmente ionizados se aceleran a través de 1000 V y pasan hacia un espectró-

metro de masas para determinar los isótopos presentes. (Véase el capítulo 19.) La intensidad del campo magnético en el espectrómetro es 0.200 T. a) Determine los radios orbitales para los isótopos ${}^{12}\text{C}$ y ${}^{13}\text{C}$ conforme pasan a través del campo. b) Demuestre que la razón de los radios se puede escribir en la forma

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$$

y verifique que sus radios en el inciso a) satisfacen esta fórmula.

- a) Encuentre la velocidad que requiere una partícula alfa para llegar hasta dentro de $3.2 \times 10^{-14} \text{ m}$ de un núcleo de oro. b) Encuentre la energía de la partícula alfa en MeV.
- Al final de su vida, una estrella con una masa de dos veces la masa del Sol se espera que colapse, al combinar sus protones y neutrones para formar una estrella de neutrones. Tal estrella podría considerarse como un núcleo atómico gigante. Si una estrella de $2 \times 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ de masa colapsa en neutrones ($m_n = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$), ¿cuál sería su radio? Suponga $r = r_0 A^{1/3}$.

29.2 Energía de enlace

9. Calcule la energía de enlace promedio por nucleón de a) $^{24}_{12}\text{Mg}$ y b) $^{85}_{37}\text{Rb}$.
10. Calcule la energía de enlace por nucleón para a) ^2H , b) ^4He , c) ^{56}Fe y d) ^{238}U .
11. Un par de núcleos para los cuales $Z_1 = N_2$ y $Z_2 = N_1$ se llaman *isobaros espejo*. (Los números atómico y neutrónico son intercambiables.) Las mediciones de energía de enlace en tales pares se pueden usar para obtener evidencia de la independencia de la carga de las fuerzas nucleares. Independencia de la carga significa que las fuerzas protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón son aproximadamente iguales. Calcule la diferencia en energía de enlace para los dos núcleos espejo $^{15}_8\text{O}$ y $^{15}_7\text{N}$.
12. El pico de la curva de estabilidad ocurre en ^{56}Fe , motivo por el que el hierro destaca en el espectro del Sol y las estrellas. Demuestre que ^{56}Fe tiene una energía de enlace superior por nucleón que sus vecinos ^{55}Mn y ^{59}Co . Compare sus resultados con la figura 29.4.
13. **CIC** Dos núcleos que tienen el mismo número de masa se conocen como *isobaros*. a) Calcule la diferencia en energía de enlace por nucleón para los isobaros $^{23}_{11}\text{Na}$ y $^{23}_{12}\text{Mg}$. b) ¿Cómo explica esta diferencia? (La masa de $^{23}_{12}\text{Mg}$ = 22.994 127 u.)
14. Calcule la energía de enlace del último neutrón en el núcleo $^{43}_{20}\text{Ca}$. *Sugerencia:* Debe comparar la masa de $^{43}_{20}\text{Ca}$ con la masa de $^{42}_{20}\text{Ca}$, más la masa de un neutrón. La masa de $^{42}_{20}\text{Ca}$ = 41.958 622 u, mientras que la masa de $^{43}_{20}\text{Ca}$ = 42.958 770 u.

29.3 Radiactividad

15. El gas radón tiene una vida media de 3.83 días. Si 3.00 g de gas radón está presente en el tiempo $t = 0$, ¿qué masa de radón permanecerá después de que han pasado 1.50 días?
16. **BIO** Un medicamento marcado con $^{99}_{43}\text{Tc}$ (vida media = 6.05 h) se prepara para un paciente. Si la actividad original de la muestra fue de 1.1×10^4 Bq, ¿cuál es su actividad después de estar en el anaquel durante 2.0 h?
17. **PG** La vida media de ^{131}I es 8.04 días. a) Convierta la vida media a segundos. b) Calcule la constante de decaimiento para este isótopo. c) Convierta 0.500 μCi a la unidad SI de becquerel. d) Encuentre el número de núcleos ^{131}I necesarios para producir una muestra con una actividad de 0.500 μCi . e) Suponga que la actividad de cierta muestra de ^{131}I es 6.40 mCi en un momento dado. Encuentre el número de vidas medias por las que pasará la muestra en 40.2 días y la actividad al final de dicho periodo.
18. **CIC** El tritio tiene una vida media de 12.33 años. a) ¿Qué fracción de los núcleos en una muestra de tritio permanecerán después de 5.00 años? b) ¿10.0 años? c) ¿123.3 años? d) De acuerdo con la ecuación 29.4a, se requiere una cantidad infinita de tiempo para que toda la muestra decaiga. ¿Esto es real? Analice.
19. Después de 2.00 días, la actividad de una muestra de un tipo de material radiactivo desconocido ha disminuido

a 84.2% de la actividad inicial. ¿Cuál es la vida media de este material?

20. **BIO** Después de que una planta o animal muere, su contenido de ^{14}C disminuye con una vida media de 5730 años. Si un arqueólogo descubre una antigua fogata que contiene madera parcialmente consumida y el contenido de ^{14}C de la madera es de sólo 12.5% el de una muestra igual de carbono contenido en un árbol actual, ¿cuál es la edad del sitio antiguo?
21. **M** Una muestra recientemente preparada de cierto isótopo radiactivo tiene una actividad de 10.0 mCi. Después de 4.00 h, la actividad es 8.00 mCi. a) Encuentre la constante de decaimiento y la vida media del isótopo. b) ¿Cuántos átomos del isótopo estaban contenidos en la muestra recientemente preparada? c) ¿Cuál es la actividad de la muestra 30 h después de preparada?
22. Un edificio accidentalmente se contaminó con radiactividad. El material de más larga vida en el edificio es estroncio-90. (La masa atómica de $^{90}_{38}\text{Sr}$ es 89.907 7 u.) Si inicialmente el edificio contenía 5.0 kg de esta sustancia y el nivel seguro es menor que 10.0 conteos/min, ¿cuánto tiempo el edificio será inseguro?

29.4 Los procesos de decaimiento

23. Identifique los núclidos faltantes (?) en los siguientes decaimientos:
 - a) $^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow ? + ^4_2\text{He}$
 - b) $^{95}_{36}\text{Kr} \rightarrow ? + e^- + \bar{\nu}$
 - c) $? \rightarrow ^4_2\text{He} + ^{140}_{58}\text{Ce}$
24. Complete las siguientes fórmulas de decaimiento:
 - a) $^{12}_5\text{B} \rightarrow ? + e^- + \bar{\nu}$
 - b) $^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{230}_{88}\text{Ra} + ?$
 - c) $? \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$
25. La masa de ^{56}Fe es 55.934 9 u, y la masa de ^{56}Co es 55.939 9 u. ¿Cuál isótopo decae en el otro y mediante cuál proceso?
26. Encuentre la energía liberada en el decaimiento alfa de $^{238}_{92}\text{U}$. El siguiente valor de masa será útil: $^{234}_{90}\text{Th}$ tiene una masa de 234.043 583 u.
27. Determine cuál de los siguientes decaimientos sugeridos puede ocurrir espontáneamente:
 - a) $^{40}_{20}\text{Ca} \rightarrow e^+ + ^{40}_{19}\text{K}$
 - b) $^{144}_{60}\text{Nd} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^{140}_{58}\text{Ce}$
28. $^{66}_{28}\text{Ni}$ (masa = 65.929 1 u) experimenta decaimiento beta a $^{66}_{29}\text{Cu}$ (masa = 65.928 9 u). a) Escriba la fórmula de decaimiento completa para este proceso. b) Encuentre la máxima energía cinética de los electrones salientes.
29. Un núcleo de ^3H (tritio) tiene decaimiento beta a ^3He mediante la creación de un electrón y un antineutrino de acuerdo con la reacción

$$^3_1\text{H} \rightarrow ^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}$$

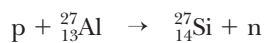
Use el apéndice B para determinar la energía total liberada en esta reacción.
30. En los restos de un antiguo campamento se encuentra un trozo de carbón usado para cocinar. Una muestra de

1.00 kg de carbón de la madera tiene una actividad de 5.00×10^2 decaimientos por minuto. Encuentre la edad del carbón. *Sugerencia:* El material vivo tiene un actividad de 15.0 decaimientos/minuto por gramo de carbono presente.

31. **M** En una antigua tumba se encuentra un artefacto de madera. Su actividad de carbono-14 (^{14}C) se mide en 60.0% de la de una muestra fresca de madera de la misma región. Suponiendo que la misma cantidad de ^{14}C inicialmente estaba presente en la madera de la cual se fabricó el artefacto, determine la edad del artefacto.

29.6 Reacciones nucleares

32. Un haz de protones de 6.61 MeV incide sobre un blanco de $^{27}_{13}\text{Al}$. Aquellos protones que chocan con el objetivo producen la reacción

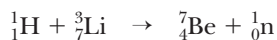


($^{27}_{14}\text{Si}$ tiene una masa de 26.986 721 u.) Si desprecia cualquier retroceso del núcleo producto, determine la energía cinética de los neutrones salientes.

33. Identifique las partículas desconocidas X y X' en las siguientes reacciones nucleares:

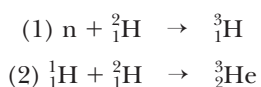
- a) $X + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg} + {}^1_0n$
 b) ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow {}^{90}_{38}\text{Sr} + X + 2{}^1_0n$
 c) $2 {}^1_1\text{H} \rightarrow 2{}^2_1\text{H} + X + X'$

34. **PG** Un método de producción de neutrones para uso experimental es bombardear ${}^7_3\text{Li}$ con protones. Los neutrones se emiten de acuerdo con la reacción



- a) Calcule la masa en unidades de masa atómica de las partículas en el lado izquierdo de la ecuación. b) Calcule la masa (en unidades de masa atómica) de las partículas en el lado derecho de la ecuación. c) Reste la respuesta al inciso b) a la del inciso a) y convierta el resultado de megaelectrón-volts y obtenga el valor Q para esta reacción. d) Suponiendo que el litio inicialmente está en reposo, el protón se mueve con velocidad v, y que el berilio y el neutrón resultantes se mueven ambos con velocidad V después de la colisión, escriba una expresión que describa la conservación de la cantidad de movimiento para esta reacción en términos de las masas m_p , m_{Be} , m_n y las velocidades. e) Escriba una expresión que relacione las energías cinéticas de las partículas antes y después junto con Q. f) ¿Qué energía cinética mínima debe tener el protón incidente si debe ocurrir esta reacción?
35. a) Suponga que una partícula alfa golpea a $^{10}_5\text{B}$, lo que libera un protón y un núcleo producto en la reacción. ¿Cuál es el núcleo producto? b) Una partícula alfa y un núcleo producto se producen cuando un protón golpea $^{13}_6\text{C}$. ¿Cuál es el núcleo producto?

36. **C/C** Considere dos reacciones:



- a) Calcule los valores Q para estas reacciones. Identifique si cada reacción es exotérmica o endotérmica. b) ¿Cuáles reacciones resultan en más energía liberada? ¿Por qué? c) Suponiendo que la diferencia se debe principalmente al trabajo realizado por la fuerza eléctrica, calcule la distancia entre los dos protones en helio-3.

37. El oro natural tiene solamente un isótopo, $^{197}_{79}\text{Au}$. Si el oro se bombardea con neutrones lentos, se emiten partículas e^- . a) Escriba la ecuación de reacción adecuada. b) Calcule la máxima energía de las partículas beta emitidas. La masa de $^{198}_{80}\text{Hg}$ es 197.966 75 u.

38. Complete las siguientes reacciones nucleares:



39. a) Determine el valor de la reacción ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ? + n$
 b) ¿Cuál es el valor Q de la reacción?

29.7 Aplicaciones médicas de la radiación

40. **BIO** En términos de daño biológico, ¿cuántos rad de iones pesados son equivalentes a 100 rad de rayos X?

41. **BIO M** Una persona cuya masa es de 75.0 kg se expone a una dosis de todo el cuerpo de 25.0 rad. ¿Cuántos joules de energía se depositan en el cuerpo de la persona?

42. **BIO** Con la finalidad de combatir un crecimiento canceroso, a un paciente se le administra una dosis de 200 rad de radiación. Suponiendo que toda la energía depositada la absorbe el crecimiento canceroso, a) Calcule la cantidad de energía entregada por unidad de masa. b) Suponiendo que el crecimiento tiene una masa de 0.25 kg y un calor específico igual al del agua, calcule su aumento de temperatura.

43. Un "astuto" técnico decide calentar algo de agua para su café con una máquina de rayos X. Si la máquina produce 10 rad/s, ¿cuánto tardará en elevar la temperatura de una taza de agua en 50 °C? Ignore las pérdidas de calor durante este tiempo.

44. **BIO** Un técnico de rayos X trabaja 5 días a la semana, 50 semanas por año. Suponga que el técnico toma un promedio de ocho rayos X por día y recibe una dosis de 5.0 rem/año como resultado. a) Estime la dosis en rem por rayo X tomado. b) ¿Cómo se compara este resultado con la cantidad de radiación de fondo de bajo nivel a la que está expuesto el técnico?

45. **BIO** Un paciente ingiere un radiofármaco marcado con fósforo-32 ($^{32}_{15}\text{P}$), un emisor β^- con una vida media de 14.3 días. La energía cinética promedio de los electrones emitidos es 700 keV. Si la actividad inicial de la muestra es 1.31 MBq, determine a) el número de electrones emitidos en un periodo de 10 días, b) la energía total depositada en el cuerpo durante los 10 días y c) la dosis absorbida si los electrones se absorben por completo en 100 g de tejido.

46. **BIO** Una fuente radiactiva particular produce 100 mrad de rayos gamma de 2 MeV por hora a una distancia de 1.0 m. a) ¿Cuánto tiempo se podría parar una persona a esta distancia antes de acumular una dosis intolerable de

1 rem? b) Suponiendo que la radiación gamma se emite de manera uniforme en todas direcciones, ¿a qué distancia una persona recibiría una dosis de 10 mrad/h de esta fuente?

Problemas adicionales

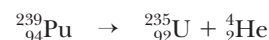
- 47. Una muestra radiactiva contiene 3.50 μg de ¹¹C puro, que tiene una vida media de 20.4 min. a) ¿Cuántos moles de ¹¹C están presentes inicialmente? b) Determine el número de núcleos presentes inicialmente. ¿Cuál es la actividad de la muestra c) inicialmente y d) después de 8.00 h?
- 48. Determine el umbral de energía que el neutrón incidente debe tener para producir la reacción: ${}_0^1n + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H}$.
- 49. **M** Una casa de suministros médicos compra una muestra de 200.0 mCi de un isótopo radiactivo. Si la muestra tiene una vida media de 14.0 días, ¿cuánto tiempo se mantendrá antes de que su actividad se reduzca a 20.0 mCi?
- 50. El isótopo ¹⁴C sufre decaimiento beta de acuerdo con el proceso dado por la ecuación 29.15. Encuentre el valor de *Q* para este proceso.
- 51. **CIC** En un trozo de roca de la Luna, el contenido de ⁸⁷Rb se analiza en 1.82×10^{10} átomos por gramo de material y el contenido de ⁸⁷Sr es de 1.07×10^9 átomos por gramo. (El decaimiento relevante es ${}^{87}\text{Rb} \rightarrow {}^{87}\text{Sr} + e^-$. La vida media del decaimiento es 4.8×10^{10} años.) a) Determine la edad de la roca. b) ¿El material en la roca realmente podría ser mucho más antiguo? ¿Qué suposición está implícita en el uso del método de datación radiactivo?
- 52. Un gran número de radioisótopos tienen importantes aplicaciones industriales, médicas y de investigación. Uno de ellos es ⁶⁰Co, que tiene una vida media de 5.2 años y se desintegra por la emisión de una partícula beta (0.31 MeV de energía) y dos fotones gamma (1.17 MeV y energías MeV 1.33). Un científico quiere preparar una fuente de ⁶⁰Co sellado que tendrá una actividad de al menos 10 Ci después de 30 meses de uso. ¿Cuál es la masa mínima inicial de ⁶⁰Co que requiere?

53. **BIO** Una solución almacenada en un laboratorio médico se prepara con una actividad inicial debida a ²⁴Na de 2.5 mCi/mL, y 10.0 mL de la solución almacenada se diluye en $t_0 = 0$ a una solución operativa cuyo volumen total es 250 mL. Después de 48 h, una muestra de 5.0 mL de la solución operativa se monitoriza con un contador. ¿Cuál es la actividad medida? *Nota:* 1 mL = 1 mililitro.

54. Después de la súbita liberación de radiactividad del accidente del reactor nuclear de Chernobyl en 1986, la radiactividad de la leche en Polonia se elevó a 2 000 Bq/L debido a yodo-131, con una vida media de 8.04 días. El yodo radiactivo es particularmente peligroso porque la glándula tiroidea concentra yodo. El accidente de Chernobyl provocó un aumento mensurable en cáncer de tiroides entre niños de Bielorrusia. a) Para comparación, encuentre la actividad de la leche debida a potasio. Suponga que 1 litro de leche contiene 2.00 g de potasio, de los cuales 0.011 7% es el isótopo ⁴⁰K, que tiene una vida media de 1.28×10^9 años. b) Después de qué intervalo de tiempo la actividad debida a yodo caería por abajo de la debida al potasio?

55. La teoría de la astrofísica nuclear es que todos los elementos pesados como el uranio se forman en el interior de estrellas masivas. Estas estrellas eventualmente explotan, liberando los elementos en el espacio. Si asumimos que en el momento de la explosión no había la misma cantidad de ²³⁵U y ²³⁸U, ¿hace cuánto tiempo fueron liberados los elementos que forman nuestro planeta, dado que la actual relación ²³⁵U/²³⁸U es de 0.007? (La vida media de ²³⁵U y ²³⁸U es 0.70×10^9 años y 4.47×10^9 , respectivamente.)

56. Un subproducto de algunos reactores de fisión es el isótopo ²³⁹Pu, que es un emisor alfa con una vida media de 24000 años:



Considere una muestra de 1.0 kg de ²³⁹Pu pura en $t = 0$. Calcule a) el número del núcleo de ²³⁹Pu presentes en $t = 0$ y b) la actividad inicial de la muestra. c) ¿Cuánto tiempo tiene que ser almacenada la muestra si un nivel “seguro” de actividad es de 0.10 Bq?

Luz de alta intensidad de 24 láseres se concentró en una pastilla combustible hecha de deuterio y tritio, provocando la explosión de las capas exteriores de la pastilla. Entonces, una poderosa fuerza de reacción derrumba la parte interior de la pastilla, comprimiéndola y calentándola. Las ondas de choque desarrolladas y reunidas en el centro, encienden las reacciones de fusión y liberan energía. Una exitosa prueba reciente en la Instalación Nacional de Ignición (NIF, por sus siglas en inglés) disparó un millón de joules de energía sobre un objetivo en unas pocas millonésimas de segundo.



Roger Ressmeyer/CORBIS

30

Energía nuclear y partículas elementales

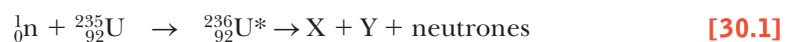
- 30.1 Fisión nuclear
- 30.2 Fusión nuclear
- 30.3 Partículas elementales y las fuerzas fundamentales
- 30.4 Positrones y otras antipartículas
- 30.5 Clasificación de partículas
- 30.6 Leyes de conservación
- 30.7 El método óctuple
- 30.8 Quarks y color
- 30.9 Teoría electrodébil y el modelo estándar
- 30.10 La conexión cósmica
- 30.11 Preguntas sin respuesta en cosmología
- 30.12 Problemas y perspectivas

En este capítulo final estudiamos los medios por los cuales se puede derivar energía de las reacciones nucleares: fisión, en la que un núcleo con número de masa grande se divide en dos núcleos más pequeños, y la fusión, en la que dos núcleos ligeros se funden para formar un núcleo más pesado. En cualquier caso, existe una liberación de grandes cantidades de energía que se puede usar de manera destructiva a través de bombas o constructivamente mediante la producción de energía eléctrica. El estudio de la física termina al examinar las partículas subatómicas conocidas y las interacciones fundamentales que gobiernan su comportamiento. También estudiamos la teoría actual de las partículas elementales, que afirma que toda la materia en la Naturaleza se construye a partir de sólo dos familias de partículas: quarks y leptones. Finalmente, analizamos cómo tales modelos ayudan a entender la evolución del Universo.

30.1 Fisión nuclear

La **fisión nuclear** ocurre cuando un núcleo pesado, como ^{235}U , se divide o fisiona en dos núcleos más pequeños. En tal reacción, **la masa total de los productos es menor que la masa original del núcleo pesado**.

La fisión de ^{235}U mediante neutrones lentos (baja energía) se puede representar mediante la secuencia de eventos



donde $^{236}\text{U}^*$ es un estado intermedio que dura sólo aproximadamente 10^{-12} s antes de dividirse en los núcleos X y Y, llamados **fragmentos de fisión**. Muchas combinaciones de X y Y satisfacen los requerimientos de conservación de energía y carga. En la fisión del uranio, se pueden formar alrededor de 90 diferentes núcleos hijo. El proceso también resulta en

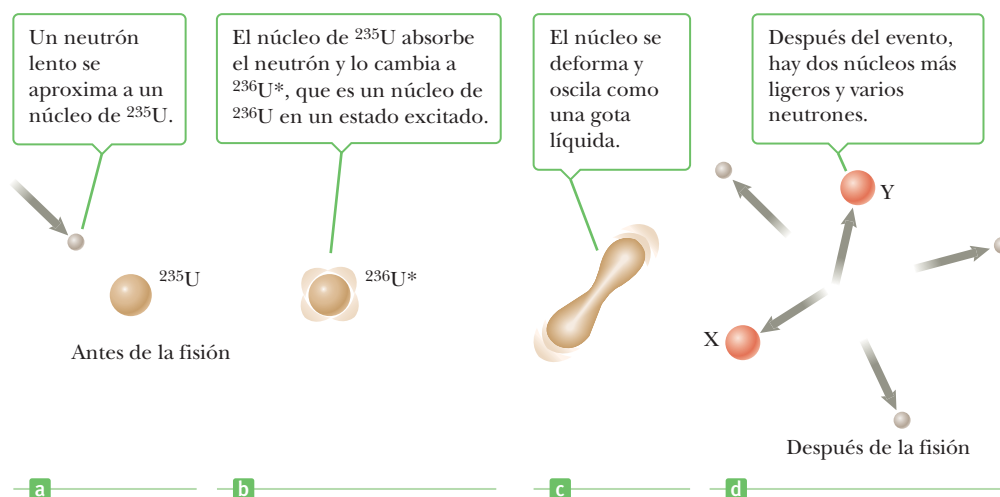
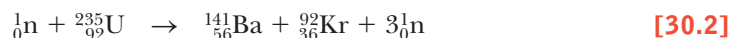


Figura 30.1 Un evento de fisión nuclear como lo describe el modelo de la gota líquida del núcleo.

la producción de muchos neutrones (por lo general dos o tres) por evento de fisión. En promedio, se liberan 2.47 neutrones por evento.

Una reacción típica de este tipo es



Los fragmentos de fisión, bario y criptón, y los neutrones liberados tienen una mayor cantidad de energía cinética después del evento de fisión. Observe que la suma de los números de masa, o número de nucleones, a la izquierda ($1 + 235 = 236$) es la misma que el número total de nucleones a la derecha ($141 + 92 + 3 = 236$). El número total de protones (92) también es el mismo en ambos lados. La energía Q liberada a través de la desintegración en la ecuación 30.2 se puede calcular fácilmente usando los datos del apéndice B. Los detalles de este cálculo se pueden encontrar en el capítulo 26 (ejemplo 26.5), con una respuesta de $Q = 200.422 \text{ MeV}$.

El rompimiento del núcleo de uranio se puede comparar con lo que ocurre a una gota de agua cuando se le agrega energía en exceso. Todos los átomos en la gota tienen energía, pero no suficiente para romper la gota. Sin embargo, si se agrega suficiente energía para hacer que la gota vibre, experimentará elongación y compresión hasta que la amplitud de la vibración se vuelve suficientemente grande como para hacer que la gota se rompa. En el núcleo de uranio ocurre un proceso similar (figura 30.1). La secuencia de eventos es la siguiente:

1. El núcleo ^{235}U captura un neutrón térmico (movimiento lento).
2. La captura resulta en la formación de $^{236}\text{U}^*$ y la energía en exceso de este núcleo hace que experimente violentas oscilaciones.
3. El núcleo de $^{236}\text{U}^*$ se vuelve enormemente elongado y la fuerza de repulsión entre protones en las dos mitades del núcleo con forma de mancuerna tiende a aumentar la distorsión.
4. El núcleo se divide en dos fragmentos, lo que emite varios neutrones en el proceso.

◀ Secuencia de eventos en un proceso de fisión nuclear.

Por lo general, la cantidad de energía liberada por la fisión de un solo átomo radiactivo pesado es de aproximadamente 100 millones de veces la energía liberada en la combustión de una molécula del octano que se usa en los motores de gasolina.

■ FÍSICA APLICADA 30.1 Productos inestables

Si un núcleo pesado se fisionara sólo en dos núcleos producidos, serían muy inestables. ¿Por qué?

EXPLICACIÓN De acuerdo con la figura 29.3, la razón del número de neutrones al número de protones aumenta con Z . Como resultado, en una reacción de fisión, cuando un núcleo

pesado se divide en dos núcleos más ligeros, los núcleos más ligeros tienden a tener demasiados neutrones. El resultado es la inestabilidad porque los núcleos regresan a la curva en la figura 29.3 mediante los procesos de decaimiento que reducen el número de neutrones ■

EJEMPLO 30.1 Un mundo impulsado por fisión**OBJETIVO** Relacionar material bruto con salida de energía.**PROBLEMA** a) Calcule la energía total liberada si 1.00 kg de ^{235}U experimenta fisión y considere que la energía de desintegración por evento es $Q = 208 \text{ MeV}$. b) ¿Cuántos kilogramos de ^{235}U se necesitarían para satisfacer el consumo de energía anual mundial (aproximadamente $4 \times 10^{20} \text{ J}$)?**ESTRATEGIA** En el inciso a), use el concepto de mol y el número de Avogadro para obtener el número total de núcleos. Multiplicar por la energía por reacción produce entonces la energía total liberada. El inciso b) requiere algo de álgebra simple.**SOLUCIÓN**a) Calcule la energía total liberada de 1.00 kg de ^{235}U .

Encuentre el número total de núcleos en 1.00 kg de uranio:

$$N = \left(\frac{6.02 \times 10^{23} \text{ núcleos/mol}}{235 \text{ g/mol}} \right) (1.00 \times 10^3 \text{ g})$$

$$= 2.56 \times 10^{24} \text{ núcleos}$$

Multiplique N por la energía producida por núcleos y obtenga la energía de desintegración total:

$$E = NQ = (2.56 \times 10^{24} \text{ núcleos}) \left(208 \frac{\text{MeV}}{\text{núcleo}} \right)$$

$$= 5.32 \times 10^{26} \text{ MeV}$$

b) ¿Cuántos kilogramos suministrarían las necesidades de energía anual del mundo?

Establezca la energía por kilogramo, E_{kg} , por el número de kilogramos, N_{kg} , igual al consumo de energía anual total. Resuelva para N_{kg} :

$$E_{\text{kg}} N_{\text{kg}} = E_{\text{tot}}$$

$$N_{\text{kg}} = \frac{E_{\text{tot}}}{E_{\text{kg}}} = \frac{4 \times 10^{20} \text{ J}}{(5.32 \times 10^{32} \text{ eV/kg})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}$$

$$= 5 \times 10^6 \text{ kg}$$

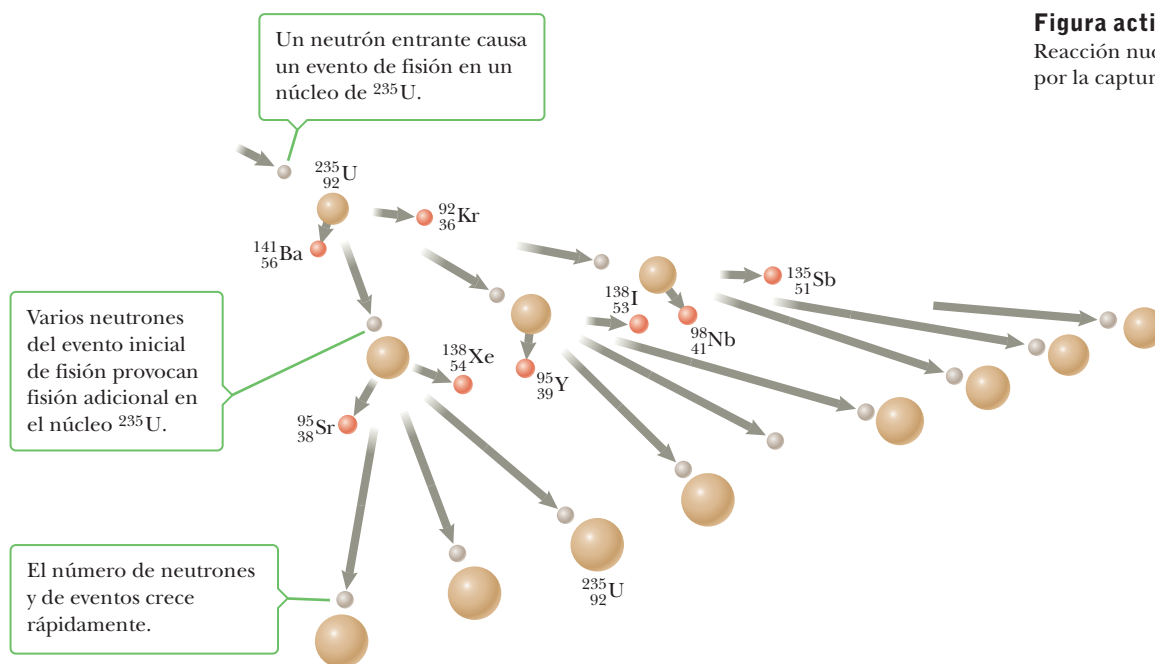
COMENTARIOS El cálculo supone implícitamente la conversión perfecta a potencia útil, lo que nunca es el caso en sistemas reales. Se conocen suficientes depósitos de uranio como para satisfacer los requisitos de energía actuales del mundo durante algunos cientos de años. La tecnología de reactores reproductores puede aumentar enormemente dichas reservas.**PREGUNTA 30.1** Estime la masa promedio de ^{235}U necesaria para proporcionar energía para una familia durante un año.**EJERCICIO 30.1** ¿Cuánto tiempo puede mantener encendido un foco de 100 vatios 1 kg de uranio-235, si toda su energía liberada se convierte en energía eléctrica?**RESPUESTA** $\sim 30\,000$ años**Reactores nucleares**

Los neutrones emitidos cuando ^{235}U experimenta fisión a su vez pueden hacer que otros núcleos experimenten fisión, con la posibilidad de una reacción en cadena (figura activa 30.2). Los cálculos demuestran que si la reacción en cadena no se controla, procederá muy rápido y posiblemente resultará en la súbita liberación de una enorme cantidad de energía (una explosión), incluso a partir de un solo gramo de ^{235}U . Si la energía en 1 kg de ^{235}U se liberara, ¡sería igual a la liberada por la detonación de aproximadamente 20 000 toneladas de TNT! Desde luego, una reacción de fisión descontrolada es el principio detrás de la primera bomba nuclear.

Un reactor nuclear es un sistema diseñado para mantener lo que se llama **reacción en cadena autosostenida**, que logró por primera vez Enrico Fermi en 1942. La mayoría de los reactores en operación actual también usan uranio como combustible. El uranio natural contiene sólo alrededor de 0.7% del isótopo ^{235}U y el restante 99.3% es el isótopo ^{238}U . Este hecho es importante para la operación de un reactor porque ^{238}U casi nunca experimenta fisión. En vez de ello, tiende a absorber neutrones, lo que produce neptunio y plutonio. Por esta razón, los combustibles de reactor se deben enriquecer artificialmente de modo que contengan un gran porcentaje del isótopo ^{235}U .

Figura activa 30.2

Reacción nuclear en cadena iniciada por la captura de un neutrón.



En promedio, en cada evento de fisión de ^{235}U se emiten alrededor de 2.5 neutrones. Para lograr una reacción en cadena autosostenida, uno de estos neutrones se debe capturar mediante otro núcleo de ^{235}U y hacer que experimente fisión. Un parámetro útil para describir el nivel de operación del reactor es la **constante de reproducción K** , que se define como el número promedio de neutrones de cada evento de fisión que causará otro evento.

Una reacción en cadena autosostenida se logra cuando $K = 1$. Bajo esta condición, se dice que el reactor es **crítico**. Cuando K es menor que 1, el reactor es subcrítico y la reacción muere. Cuando K es mayor que 1, se dice que el reactor es supercrítico y ocurre una reacción de escape. En un reactor nuclear que se usa para suministrar potencia a una compañía eléctrica, es necesario mantener un valor K cercano a 1.

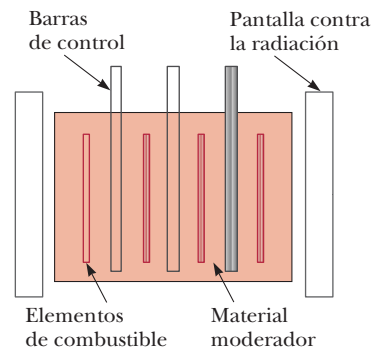
En la figura 30.3 se muestra el diseño básico de un reactor nuclear. Los elementos de combustible consisten de uranio enriquecido. El tamaño del reactor es importante para reducir la fuga de neutrones: un reactor grande tiene una razón superficie a volumen más pequeña y menor fuga que un reactor más pequeño.

También es importante regular las energías de neutrón porque los neutrones lentos tienen más probabilidad de generar fisiones que los neutrones rápidos en ^{235}U . Más aún, ^{238}U no absorbe neutrones lentos. En consecuencia, para que la reacción en cadena continúe, deben frenarse los neutrones. Este frenado se logra al rodear el combustible con una sustancia llamada **moderador**, como el grafito (carbono) o agua pesada (D_2O). La mayoría de los reactores modernos usan agua pesada. Las colisiones en el moderador frenan los neutrones y mejoran la fisión de ^{235}U .

La salida de potencia de un reactor de fisión se controla mediante las barras de control que se bosquejan en la figura 30.3. Estas barras están hechas con materiales como cadmio, que fácilmente absorben neutrones.

Las fisiones en un reactor nuclear calientan sodio fundido (o agua, dependiendo del sistema), que se bombea a través de un intercambiador de calor. Ahí, la energía térmica se transfiere al agua en un sistema secundario. El agua se convierte en vapor, que impulsa un generador de turbina para crear potencia eléctrica.

Los reactores de fisión son extremadamente seguros. De acuerdo con la *Oak Ridge National Laboratory Review*, “El riesgo a la salud de vivir a 8 km de un reactor nuclear durante 50 años no es mayor que el riesgo de fumar 1.4 cigarrillos, beber 0.5 L de vino, viajar 240 km en auto, volar 9600 km en *jet* o tomar rayos X de pecho en un hospital. Cada actividad, por sí misma, se estima aumenta la posibilidad de una persona de morir en cualquier año dado por uno en un millón”.

**Figura 30.3** Sección transversal del núcleo de un reactor que muestra las barras de control, los elementos de combustible que contienen combustible enriquecido y el material moderador, todo rodeado por una pantalla contra la radiación.**APLICACIÓN**

Diseño de un reactor nuclear

El costo es un factor importante; el costo por kilovatio-hora de energía nuclear es ligeramente menor que la de carbón y mucho menos que el petróleo o el gas. Con el tiempo, el menor costo de la energía nuclear por kilovatio-hora y un menor impacto sobre el medio compensan con creces los costos iniciales más altos. Los temas de seguridad asociados con los reactores de potencia nuclear son complejos y con frecuencia subjetivos. Todas las fuentes de energía tienen riesgos asociados. El carbón, por ejemplo, expone a los trabajadores a peligros a la salud (incluido radón radiactivo) y produce contaminación atmosférica (incluidos gases invernadero). En cada caso los riesgos se deben ponderar contra los beneficios y la disponibilidad de la fuente de energía.

Las fuentes conocidas de mineral de uranio son suficientes para satisfacer todos los requerimientos energéticos de la Humanidad por varios años a la razón actual de uso si se quemara en reactores convencionales. (Véase el problema 8.) Los reactores reproductores, por otro lado, convierten los residuos nucleares en combustible nuclear y también pueden cambiar el torio en un isótopo de uranio apto para un reactor. Utilizando esta tecnología, las reservas actuales probablemente serían suficientes para más de mil años, aun sin el descubrimiento o explotación de nuevas fuentes de uranio o torio. La mayor fuente sin explotar son los 4.5 miles de millones de toneladas métricas de uranio disuelto en los océanos de la Tierra. Existen varios métodos para extraer uranio económicamente que se encuentran actualmente en estudio. El uranio disuelto es alimentado en forma constante por los ríos de la Tierra y en potencia podría proporcionar combustible para el reactor casi de manera indefinida. (Véase el problema 10.)

30.2 Fusión nuclear

Cuando dos núcleos ligeros se combinan para formar un núcleo más pesado, el proceso se llama fusión nuclear. Puesto que la masa del núcleo final es menor que la suma de las masas de los núcleos originales, hay una pérdida de masa, acompañada por la liberación de energía. Aunque todavía no se desarrollan plantas de energía de fusión, hay en marcha un esfuerzo mundial para aprovechar la energía de las reacciones de fusión en el laboratorio.

Fusión en el Sol

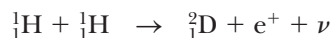
Todas las estrellas generan su energía a través de procesos de fusión. Alrededor de 90% de las estrellas, incluido el Sol, fusionan hidrógeno, mientras que algunas estrellas más viejas fusionan helio u otros elementos más pesados. La energía producida por fusión aumenta la presión dentro de la estrella y evita su colapso debido a la gravedad.

Antes de que las reacciones de fusión en la estrella puedan sostener sus necesidades de energía, se deben satisfacer dos condiciones. Primera: la temperatura debe ser suficientemente alta (alrededor de 10^7 K para el hidrógeno) para permitir que la energía cinética de los núcleos de hidrógeno con carga positiva supere su repulsión coulombiana mutua mientras chocan. Segunda: la densidad de los núcleos debe ser suficientemente alta para asegurar una alta proporción de colisiones.

Es interesante observar que un efecto cuántico es clave en la formación del brillo solar. Las temperaturas dentro de las estrellas como el Sol no son suficientemente elevadas como para permitir que las colisiones de los protones superen la repulsión coulombiana. Sin embargo, en cierto porcentaje de colisiones, los núcleos pasan de cualquier forma a través de la barrera, un ejemplo de *tunelamiento cuántico*.

El **ciclo protón-protón** es una serie de tres reacciones nucleares que se cree son las etapas en la liberación de energía en el Sol y otras estrellas ricas en hidrógeno. Una visión global del ciclo protón-protón es que cuatro protones se combinan para formar una partícula alfa y dos positrones, con la liberación de 25 MeV de energía en el proceso.

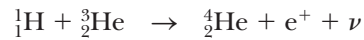
Los pasos específicos en el ciclo protón-protón son



y



donde D representa deuterio, el isótopo de hidrógeno que tiene un protón y un neutrón en el núcleo. (También se puede escribir como ${}^2_1\text{H}$.) La segunda reacción se sigue por la fusión hidrógeno-helio o por la fusión helio-helio:



o

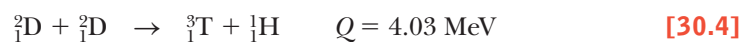
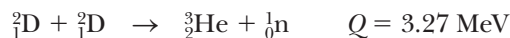


La energía liberada se transporta principalmente mediante rayos gamma, positrones y neutrinos, como se puede ver a partir de las reacciones. Los rayos gamma se absorben pronto en el denso gas, lo que eleva su temperatura. Los positrones se combinan con electrones para producir rayos gamma, que a su vez también se absorben en el gas dentro de pocos centímetros. Sin embargo, los neutrinos casi nunca interactúan con la materia; en consecuencia, escapan de la estrella y se llevan consigo alrededor de 2% de la energía generada. Estas reacciones de fusión liberadoras de energía se llaman **reacciones de fusión termonucleares**. La bomba de hidrógeno (fusión), que explotó por primera vez en 1952, es un ejemplo de una reacción de fusión termonuclear incontrolada.

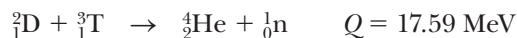
Reactores de fusión

Actualmente se realiza un gran esfuerzo por desarrollar un reactor de energía de fusión sostenida y controlable. La fusión controlada con frecuencia se llama fuente máxima de energía, debido a la disponibilidad de agua, su fuente de combustible. Por ejemplo, si el deuterio, el isótopo de hidrógeno que consiste de un protón y un neutrón, se usara como combustible, 0.06 g del mismo se podría extraer de 1 gal de agua a un costo de más o menos cuatro centavos de dólar. Por lo tanto, los costos de combustible de incluso un reactor ineficiente serían casi insignificantes. Una ventaja adicional de los reactores de fusión es que, comparativamente, se producen pocos subproductos radiactivos. Como se observa en la ecuación 30.3, el producto final de la fusión de núcleos de hidrógeno es seguro, helio no radiactivo. Por desgracia, un reactor termonuclear que pueda entregar una salida de potencia neta sobre un intervalo de tiempo razonable todavía no es una realidad y se deben resolver muchos problemas antes de construir un dispositivo exitoso.

Las reacciones de fusión que parecen más prometedoras en la construcción de un reactor de energía de fusión involucran deuterio (D) y tritio (T), que son isótopos de hidrógeno. Estas reacciones son



y



donde los valores Q se refieren a la cantidad de energía liberada por reacción. Como se notó anteriormente, el deuterio está disponible en cantidades casi ilimitadas en lagos y océanos, y es muy barato de extraer. Sin embargo, el tritio es radiactivo ($T_{1/2} = 12.3$ años) y experimenta decaimiento beta a ${}^3\text{He}$. Por esta razón, el tritio no existe en la naturaleza en gran cantidad y se debe producir de manera artificial.

El reto fundamental de la energía de fusión nuclear es dar a los núcleos suficiente energía cinética para superar la fuerza coulombiana repulsiva entre ellos en cercana proximidad. Este paso se puede lograr al calentar el combustible a temperaturas extremadamente elevadas (alrededor de 10^8 K, muy por arriba de la temperatura interior del Sol). Tales temperaturas no son fáciles de obtener en un laboratorio o una planta. A estas altas temperaturas, los átomos se ionizan y entonces el sistema consiste en una colección de electrones y núcleos, comúnmente conocida como *plasma*.

Además de los requisitos de alta temperatura, otros dos factores cruciales determinan si funcionará o no el reactor termonuclear: la **densidad de iones en el plasma** n y el **tiempo de confinamiento del plasma** τ , el tiempo que los iones en interacción se mantienen a una temperatura igual o mayor que la requerida para que se produzca la reacción. La densidad y el tiempo de confinamiento deben ser suficientemente grandes para asegurar que se liberará más energía de fusión de la que se requiere para calentar el plasma.

APLICACIÓN

Reactores de fusión

Criterio de Lawson ▶

El **criterio de Lawson** afirma que es posible una salida de potencia neta en un reactor de fusión bajo las siguientes condiciones:

$$n\tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3 \quad \text{Interacción deuterio-tritio} \quad [30.5]$$

$$n\tau \geq 10^{16} \text{ s/cm}^3 \quad \text{Interacción deuterio-deuterio}$$

El problema del tiempo de confinamiento del plasma todavía no se resuelve. ¿Cómo se puede confinar un plasma a una temperatura de 10^8 K por tiempos del orden de 1 s ? La mayoría de los experimentos de fusión usan confinamiento de campo magnético para contener un plasma. Un dispositivo, llamado **tokamak**, tiene una geometría con forma de dona (un toroide), como se muestra en la figura 30.4. Este dispositivo usa una combinación de dos campos magnéticos para confinar el plasma dentro de la dona. La corriente en los devanados produce un fuerte campo magnético y la corriente en el toroide produce un campo magnético más débil. Las líneas de campo magnético resultante son helicoidales, como se muestra en la figura. En esta configuración las líneas de campo forman espirales alrededor del plasma y evitan que toque las paredes de la cámara de vacío.

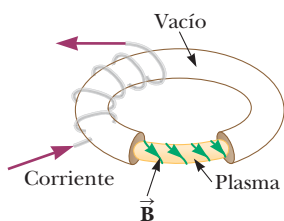


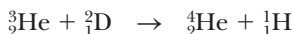
Figura 30.4 Diagrama de un tokamak utilizado en el esquema de confinamiento magnético. El plasma está atrapado dentro de las líneas del campo magnético en espiral, como se muestra.

En la fusión por confinamiento de láser inercial, el combustible, por lo general deuterio y tritio, se pone en la forma de una pequeña píldora. Directa o indirectamente, el láser de gran alcance entrega energía rápidamente a la píldora, la explosión de las capas externas e implosión del resto de la pastilla, la calientan y se comprimen. Las ondas de choque se forman y se encuentran en el centro, aumentando la densidad y la presión y provocando reacciones de fusión. La energía liberada entonces causa más reacciones de fusión. La fusión también puede tener lugar en un dispositivo del tamaño de un televisor y, de hecho, lo inventó Philo Farnsworth, uno de los padres de la televisión electrónica. En este método, llamado confinamiento electrostático inercial, partículas con carga positiva son atraídas rápidamente hacia una rejilla con carga negativa. Entonces algunas de las partículas positivas chocan y se funden.

EJEMPLO 30.2 Astrocombustible en la Luna

OBJETIVO Calcular la energía liberada en una reacción de fusión.

PROBLEMA Encuentre la energía liberada en la reacción de helio-3 con deuterio:



ESTRATEGIA La energía liberada es la diferencia entre la energía masa de los reactantes y los productos.

SOLUCIÓN

Suma las masas en el lado izquierdo y reste las masas en la derecha y obtenga Δm en unidades de masa atómica:

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{\text{He-3}} + m_{\text{D}} - m_{\text{He-4}} - m_{\text{H}} \\ &= 3.016029 \text{ u} + 2.014102 \text{ u} - 4.002603 \text{ u} - 1.007825 \text{ u} \\ &= 0.019703 \text{ u} \end{aligned}$$

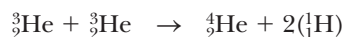
Convierta la diferencia de masa en una cantidad equivalente de energía en MeV:

$$E = (0.019703 \text{ u}) \left(\frac{931.5 \text{ MeV}}{1 \text{ u}} \right) = 18.35 \text{ MeV}$$

COMENTARIOS El resultado es una gran cantidad de energía por reacción. El helio-3 es raro en la Tierra, pero abundante en la Luna, donde quedó atrapado en el fino polvo del suelo lunar. El helio-3 tiene la ventaja de producir más protones que neutrones (algunos neutrones todavía se producen mediante reacciones laterales, como D-D), pero tiene la desventaja de una muy alta temperatura de ignición. Si las plantas de energía de fusión que usan helio-3 se vuelven realidad, los estudios indican que sería económicamente ventajoso minar helio-3 de manera robótica y traerlo a la Tierra. ¡El beneficio en energía por dólar sería mucho mayor que minar carbón o extraer petróleo!

PREGUNTA 30.2 ¿Cuánta energía, en joules, se podría obtener de un número de Avogadro de reacciones de fusión de helio-3-deuterio?

EJERCICIO 30.2 Encuentre la energía que se produce en la fusión de dos núcleos de helio-3:



RESPUESTA 12.9 MeV

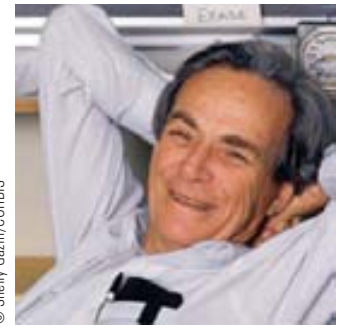
30.3 Partículas elementales y las fuerzas fundamentales

Además de los constituyentes de los átomos (protones, electrones y neutrones), muchas otras partículas se pueden encontrar en los experimentos de alta energía u observarse en la Naturaleza, posteriores a las colisiones que involucran rayos cósmicos. A diferencia de los protones y electrones enormemente estables, estas partículas decaen con rapidez, con vidas medias que varían de 10^{-23} s a 10^{-6} s. Existe evidencia indirecta muy fuerte de que la mayoría de estas partículas, incluidos neutrones y protones, son combinaciones de partículas más elementales llamadas quarks. Los quarks, los leptones (el electrón es un ejemplo) y las partículas que transportan fuerzas (el fotón es un ejemplo) ahora se consideran como las verdaderas partículas fundamentales. La clave para entender las propiedades de las partículas elementales es la descripción de las fuerzas de la naturaleza en las que participan.

Todas las partículas en la naturaleza están sujetas a cuatro fuerzas fundamentales: las fuerzas fuerte, electromagnética, débil y gravitacional. La **fuerza fuerte** es responsable del firme enlace de los quarks para formar neutrones y protones y de la fuerza nuclear, una especie de fuerza fuerte residual, que enlaza neutrones y protones en núcleos. Esta fuerza representa el “pegamento” que mantiene unidos los nucleones y es la más fuerte de todas las fuerzas fundamentales. Es una fuerza de muy corto alcance y es despreciable para separaciones mayores que aproximadamente 10^{-15} m (el tamaño aproximado del núcleo). La **fuerza electromagnética**, que es más o menos 10^{-2} veces la intensidad de la fuerza fuerte, es responsable del enlace de átomos y moléculas. Es una fuerza de largo alcance que disminuye en intensidad como el cuadrado inverso de la separación entre partículas en interacción. La **fuerza débil** es una fuerza nuclear de corto alcance que se muestra en la inestabilidad de ciertos núcleos. Está involucrada en el mecanismo de decaimiento beta y tiene una intensidad de sólo 10^{-6} veces la fuerza fuerte. Finalmente, la **fuerza gravitacional** es una fuerza de largo alcance, con una intensidad de sólo aproximadamente 10^{-43} veces la de la fuerza fuerte. Aunque esta interacción conocida es la fuerza que mantiene unidos los planetas, estrellas y galaxias, su efecto sobre las partículas elementales es despreciable. La fuerza gravitacional es con mucho la más débil de todas las fuerzas fundamentales.

Con frecuencia, la física moderna describe las fuerzas entre partículas en términos de las acciones de las partículas de campo o cuantos. En el caso de la conocida interacción electromagnética, las partículas de campo son los fotones. En el lenguaje de la física moderna, la fuerza electromagnética está *mediada* (transportada) por los fotones, que son los cuantos del campo electromagnético. La fuerza fuerte está medida por partículas de campo llamadas *gluones*, la fuerza débil está medida por partículas llamadas *bosones W y Z*, y se cree que la fuerza gravitacional está mediada por cuantos del campo gravitacional llamados *gravitones*. Las fuerzas entre dos partículas se transportan mediante un intercambio de cuantos de campo. Este proceso es análogo al enlace covalente entre dos átomos creado por un intercambio o compartición de electrones. La interacción electromagnética, por ejemplo, involucra un intercambio de fotones.

La fuerza entre dos partículas se puede comprender en general con una ilustración simple llamada *diagrama de Feynman*, que desarrolló Richard P. Feynman (1918-1988). La figura 30.5 es un diagrama de Feynman para la interacción electromagnética entre dos electrones. En este caso simple, un fotón es la partícula de campo que media la fuerza electromagnética entre los electrones. El fotón transfiere energía y cantidad de movimiento de un electrón al otro en la interacción. Tal fotón, llamado *fotón virtual*, nunca se puede detectar directamente porque el segundo fotón lo absorbe muy poco tiempo después de que lo emite el primer electrón. Se esperaría que la existencia de un fotón virtual viole la ley de la conservación de la energía, pero no lo hace debido al principio de incertidumbre tiempo-energía. Recuerde que el principio de incertidumbre dice que la energía es incierta o no se conserva por una cantidad ΔE durante un tiempo Δt tal que $\Delta E \Delta t \approx \hbar$. Si el intercambio del fotón virtual sucede con suficiente rapidez, la breve discrepancia en la conservación de energía es menor que la mínima incertidumbre en energía y el intercambio es un proceso físicamente aceptable.



© Shelly Gairin/CORBIS

Richard Feynman Físico estadounidense (1918-1988)

Feynman, junto con Julian S. Schwinger y Shinichiro Tomonaga, ganaron el Premio Nobel de Física en 1965, por su trabajo fundamental en los principios de la electrodinámica cuántica. Sus importantes y numerosas aportaciones a la física incluyen trabajo en la primera bomba atómica en el proyecto Manhattan, la invención de diagramas simples para representar gráficamente las interacciones de partículas, la teoría de la interacción débil de las partículas subatómicas, una reformulación de la mecánica cuántica y la teoría del helio superfluido. Más tarde trabajó en la comisión que investigó la tragedia del *Challenger*, que demostró el problema con los anillos O del transbordador espacial al sumergir un modelo a escala del anillo O en su vaso con agua helada y luego hacerlo añicos con un martillo. También contribuyó con la enseñanza de la física a través del magnífico texto en tres volúmenes *The Feynman Lectures on Physics*.

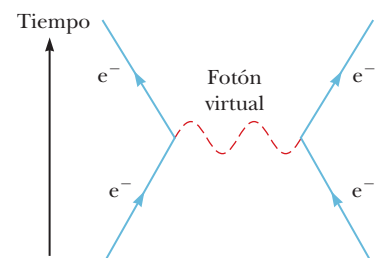


Figura 30.5 Diagrama de Feynman que representa un fotón que media la fuerza electromagnética entre dos electrones.

Tabla 30.1 Interacciones de partículas

Interacción (fuerza)	Intensidad relativa ^a	Rango de la fuerza	Partícula de campo mediadora
Fuerte	1	Corto (≈ 1 fm)	Gluón
Electromagnética	10^{-2}	Largo ($\propto 1/r^2$)	Fotón
Débil	10^{-6}	Corto ($\approx 10^{-3}$ fm)	Bosones W^\pm y Z
Gravitacional	10^{-43}	Largo ($\propto 1/r^2$)	Gravitón

^aPara dos quarks separados 3×10^{-17} m.

Todos los cuantos de campo se han detectado, excepto el gravitón, que tal vez nunca se pueda detectar de manera directa debido a la debilidad del campo gravitacional. En la tabla 30.1 se resumen estas interacciones, sus rangos y sus intensidades relativas.

30.4 Positrones y otras antipartículas

En la década de 1920, el físico teórico Paul Dirac (1902-1984) desarrolló una versión de mecánica cuántica que incorpora la relatividad especial. La teoría de Dirac explica el espín del electrón y su momento magnético, pero tiene un fallo aparente en que predijo estados de energía negativos. La teoría se rescató al plantear la existencia de un antielectrón que tiene la misma masa que un electrón, más la carga opuesta, llamado *positrón*. La general y profunda implicación de la teoría de Dirac es que, **para toda partícula, existe una antipartícula con la misma masa que la partícula, pero con carga opuesta**. Una antipartícula por lo general se designa mediante una barra sobre el símbolo de la partícula. Por ejemplo, \bar{p} denota el antiprotón y $\bar{\nu}$ el antineutrino. En este libro se prefiere la notación e^+ para el positrón. Prácticamente toda partícula elemental conocida tiene una antipartícula distintiva. Entre las excepciones están el fotón y el pión neutro (π^0), que son sus propias antipartículas.

Tip 30.1 Antipartículas

Una antipartícula no se identifica exclusivamente sobre la base de carga opuesta. Incluso las partículas neutras tienen antipartículas.

En 1932, Carl Anderson descubrió el positrón en un experimento de cámara de niebla. Para discriminar entre cargas positiva y negativa, colocó la cámara de niebla en un campo magnético, lo que hizo que las cargas en movimiento siguieran trayectorias curvas. Él notó que algunas de las trazas parecidas a electrón se desviaban en una dirección que correspondía a una partícula con carga positiva: los positrones.

Cuando una partícula se topa con su antipartícula, ambas partículas se aniquilan, lo que resulta en fotones de alta energía. El proceso de aniquilación electrón-positrón se usa en la técnica de diagnóstico médico de tomografía por emisión de positrón (TEP o PET, por sus siglas en inglés). Al paciente se le inyecta una solución de glucosa que contiene una sustancia radiactiva que decae por emisión de positrones. Ejemplos de tales sustancias son oxígeno-15, nitrógeno-13, carbono-11 y flúor-18. El material radiactivo se transporta al cerebro. Cuando ocurre un decaimiento, el positrón emitido se aniquila con un electrón en el tejido cerebral, lo que resulta en dos fotones de rayos gamma. Con la ayuda de una computadora se puede crear una imagen de los sitios en el cerebro donde se acumula glucosa.

BIO APLICACIÓN

Tomografía por emisión de positrones (TEP)

Las imágenes de un escaneo TEP pueden apuntar a una amplia variedad de trastornos en el cerebro, incluida la enfermedad de Alzheimer. Además, puesto que la glucosa se metaboliza más rápidamente en áreas activas del cerebro que en otras partes del cuerpo, una exploración TEP puede indicar cuáles áreas del cerebro se involucran en varios procesos como lenguaje, música y visión.

30.5 Clasificación de partículas

Todas las partículas distintas a las que transmiten fuerzas se pueden clasificar en dos amplias categorías, hadrones y leptones, de acuerdo con sus interacciones. Los hadrones están compuestos de quarks, mientras que los leptones se consideran como verdaderamente elementales, aunque hay sugerencias de que también pueden tener estructura interna.

Hadrones

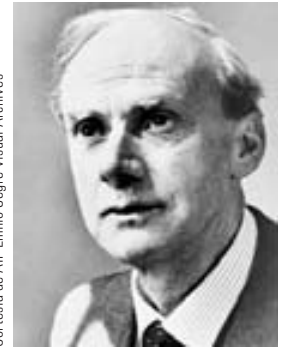
Las partículas que interactúan a través de la fuerza fuerte se llaman *hadrones*. Las dos clases de hadrones, conocidos como *mesones* y *bariones*, se distinguen por sus masas y espines.

Se sabe que todos los mesones decaen finalmente a electrones, positrones, neutrinos y fotones. Un buen ejemplo de un mesón es el pión (π), el más ligero de los mesones conocidos, con una masa aproximada de $140 \text{ MeV}/c^2$ y un espín de 0. Como se ve en la tabla 30.2, el pión viene en tres variedades, que corresponden a tres estados de carga: π^+ , π^- y π^0 . Los piones son partículas enormemente inestables. Por ejemplo, el π^- , que tiene una vida de aproximadamente $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$, decae en un muón y un antineutrino. El muón μ^- , en esencia un electrón pesado con una vida de $2.2 \mu\text{s}$, decae entonces en un electrón, un neutrino y un antineutrino. La secuencia de decaimientos es



Los bariones tienen masas iguales a o mayores que la masa del protón (el nombre *barión* significa “pesado” en griego) y su espín siempre es un valor no entero ($\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{2}$). Protones y neutrones son bariones, pero hay muchas otras partículas. Con excepción del protón, todos los bariones decaen en tal forma que los productos finales incluyen un protón. Por ejemplo, el barión llamado hiperón Ξ decae primero a Λ^0 en aproximadamente 10^{-10} s . Luego Λ^0 decae a un protón y un π^- en alrededor de $3 \times 10^{-10} \text{ s}$.

En la actualidad se cree que los hadrones están compuestos de quarks. En la tabla 30.2 se citan algunas de las propiedades importantes de los hadrones.



Cortesía de AIP Emilio Segre Visual Archives

Paul Adrien Maurice Dirac Físico inglés (1902-1984)

Dirac tuvo un papel decisivo en la comprensión de la antimateria y en la unificación de la mecánica cuántica y la relatividad. Realizó numerosas aportaciones al desarrollo de la física cuántica y la cosmología. En 1933 ganó el Premio Nobel de Física.

Tabla 30.2 Algunas partículas y sus propiedades

Categoría	Nombre de la partícula	Símbolo	Anti-partícula	Masa (MeV/c ²)	B	L _e	L _μ	L _τ	S	Vida(s)	Principal modo de decaimiento ^a	
Leptones	Electrón	e ⁻	e ⁺	0.511	0	+1	0	0	0	Estable		
	Neutrino electrónico	ν _e	ν̄ _e	< 7eV/c ²	0	+1	0	0	0	Estable		
	Muón	μ ⁻	μ ⁺	105.7	0	0	+1	0	0	2.20 × 10 ⁻⁶	e ⁻ ν̄ _e ν _μ	
	Neutrino muónico	ν _μ	ν̄ _μ	< 0.3	0	0	+1	0	0	Estable		
	Tau	τ ⁻	τ ⁺	1784	0	0	0	+1	0	< 4 × 10 ⁻¹³	μ ⁻ ν̄ _μ ν _τ , e ⁻ ν̄ _e ν _τ	
	Neutrino tauónico	ν _τ	ν̄ _τ	< 30	0	0	0	+1	0	Estable		
Hadrones												
Mesones	Pión	π ⁺	π ⁻	139.6	0	0	0	0	0	2.60 × 10 ⁻⁸	μ ⁺ ν _μ	
		π ⁰	Mismo	135.0	0	0	0	0	0	0.83 × 10 ⁻¹⁶	2γ	
	Kaón	K ⁺	K ⁻	493.7	0	0	0	0	+1	1.24 × 10 ⁻⁸	μ ⁺ ν _μ , π ⁺ π ⁰	
		K _S ⁰	K _S ⁰	497.7	0	0	0	0	+1	0.89 × 10 ⁻¹⁰	π ⁺ π ⁻ , 2π ⁰	
		K _L ⁰	K _L ⁰	497.7	0	0	0	0	+1	5.2 × 10 ⁻⁸	π [±] e [∓] ν̄ _e , 3π ⁰	
	Eta	η	Mismo	548.8	0	0	0	0	0	< 10 ⁻¹⁸	2γ, 3π	
η'		Mismo	958	0	0	0	0	0	2.2 × 10 ⁻²¹	η π ⁺ π ⁻		
Bariones	Protón	p	p̄	938.3	+1	0	0	0	0	Estable		
	Neutrón	n	n̄	939.6	+1	0	0	0	0	920	p e ⁻ ν̄ _e	
	Lambda	Λ ⁰	Λ̄ ⁰	1115.6	+1	0	0	0	-1	2.6 × 10 ⁻¹⁰	p π ⁻ , n π ⁰	
		Sigma	Σ ⁺	Σ̄ ⁻	1189.4	+1	0	0	0	-1	0.80 × 10 ⁻¹⁰	p π ⁰ , n π ⁺
			Σ ⁰	Σ̄ ⁰	1192.5	+1	0	0	0	-1	6 × 10 ⁻²⁰	Λ ⁰ γ
	Xi	Σ ⁻	Σ̄ ⁺	1197.3	+1	0	0	0	-1	1.5 × 10 ⁻¹⁰	n π ⁻	
		Xi	Ξ ⁰	Ξ̄ ⁰	1315	+1	0	0	0	-2	2.9 × 10 ⁻¹⁰	Λ ⁰ π ⁰
			Ξ ⁻	Ξ̄ ⁺	1321	+1	0	0	0	-2	1.64 × 10 ⁻¹⁰	Λ ⁰ π ⁻
	Omega	Ω ⁻	Ω ⁺	1672	+1	0	0	0	-3	0.82 × 10 ⁻¹⁰	Ξ ⁰ π ⁻ , Λ ⁰ K ⁻	

^aLa notación en esta columna, como p π⁻, n π⁰, significan dos posibles modos de decaimiento. En este caso, los dos posibles decaimientos son Λ⁰ → p + π⁻ y Λ⁰ → n + π⁰.

Leptones

Los leptones (del griego *leptos*, que significa “pequeño” o “ligero”) son un grupo de partículas que participan en la interacción débil. Todos los leptones tienen un espín de $\frac{1}{2}$. En este grupo se incluyen electrones, muones y neutrinos, que son todos menos masivos que el hadrón más ligero. Un muón es idéntico a un electrón, excepto que su masa es 207 veces la masa del electrón. Aunque los hadrones tienen tamaño y estructura, los leptones parecen ser verdaderamente elementales, sin estructura hasta el límite de resolución experimental (más o menos 10^{-19} m).

A diferencia de los hadrones, el número de leptones conocidos es pequeño. En la actualidad, los científicos creen que sólo existen seis leptones (cada uno con una antipartícula), el electrón, el muón, el tau y un neutrino asociado con cada uno:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

El leptón *tauónico*, descubierto en 1975, tiene una masa aproximada del doble de la del protón.

Aunque los neutrinos tienen masas aproximadas de cero, hay fuerte evidencia indirecta de que el neutrino electrónico tiene una masa distinta de cero de alrededor de $3 \text{ eV}/c^2$, o $1/180\,000$ de la masa del electrón. Un firme conocimiento de la masa del neutrino podría tener gran significado en los modelos cosmológicos y en la comprensión del futuro del Universo.

30.6 Leyes de conservación

Algunas leyes de conservación son importantes en el estudio de las partículas elementales. Aunque las que se describen aquí no tienen fundamento teórico, se sostienen mediante abundante evidencia empírica.

Número bariónico

La ley de conservación del número bariónico significa que, siempre que en una reacción o decaimiento se crea un barión, también se crea un antibarión. Esta información se puede cuantificar al asignar un número bariónico: $B = 1$ para todos los bariones, $B = -1$ para todos los antibariones y $B = 0$ para todas las otras partículas. Por ende, la **ley de conservación del número bariónico** afirma que, siempre que ocurre una reacción o decaimiento nuclear, la suma de los números bariónicos antes del proceso es igual a la suma de los números bariónicos después del proceso.

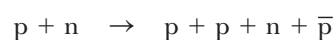
Observe que si el número bariónico se conserva por completo, el protón debe ser absolutamente estable: si esto no fuera así por la ley de conservación del número bariónico, el protón puede decaer en un positrón y un pión neutro. Sin embargo, tal decaimiento nunca se ha observado. En el presente, sólo se puede decir que el protón tiene una vida media de al menos 10^{31} años. (La edad estimada del Universo es de alrededor de 10^{10} años.) En una versión de la llamada gran teoría unificada, GTU, los físicos predicen que el protón en realidad es inestable. De acuerdo con esta teoría, el número bariónico (a veces llamada *carga bariónica*) no se conserva de manera absoluta, mientras que la carga eléctrica siempre se conserva.

Conservación del número ▶
bariónico

■ EJEMPLO 30.3 Comprobación del número bariónico

OBJETIVO Usar la conservación del número bariónico para determinar si puede ocurrir una reacción dada.

PROBLEMA Determine si la siguiente reacción puede ocurrir con base en la ley de conservación del número bariónico:



ESTRATEGIA Cuente los bariones en ambos lados de la reacción y recuerde que $B = 1$ para los bariones y $B = -1$ para los antibariones.

SOLUCIÓN

Cuenta los bariones a la izquierda:

El neutrón y el protón son bariones; por lo tanto,
 $1 + 1 = 2$.

Cuenta los bariones a la derecha:

Existen tres bariones y un antibarión, de modo que
 $1 + 1 + 1 + (-1) = 2$.

COMENTARIOS El número bariónico se conserva en esta reacción, de modo que puede ocurrir siempre que el fotón entrante tenga suficiente energía.

PREGUNTA 30.3 Verdadero o Falso: Un protón no puede decaer en un positrón más un neutrino.

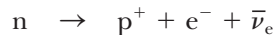
EJERCICIO 30.3 ¿Puede ocurrir la siguiente reacción, con base en la ley de la conservación del número bariónico?



RESPUESTA No. (Calcule los números bariónicos en ambos lados y demuestre que no son iguales.)

Número leptónico

Existen tres leyes de conservación que involucran números leptónicos, uno para cada variedad de leptón. La **ley de conservación del número leptón-electrón** afirma que la suma de los números leptón-electrón antes de una reacción o decaimiento debe ser igual a la suma de los números leptón-electrón después de la reacción o decaimiento. Al electrón y al neutrino electrón se les asigna un número leptón-electrón positivo $L_e = 1$, a los antileptones e^+ y $\bar{\nu}_e$ se les asigna un número leptón-electrón $L_e = -1$, y todas las otras partículas tienen $L_e = 0$. Por ejemplo, considere el decaimiento de neutrón:



Antes del decaimiento, el número leptón-electrón es $L_e = 0$; después del decaimiento, es $0 + 1 + (-1) = 0$, de modo que el número leptón-electrón se conserva. Es importante reconocer que también se debe conservar el número bariónico. Esto se puede ver fácilmente al observar que, antes del decaimiento, $B = 1$, mientras que después del decaimiento $B = 1 + 0 + 0 = 1$.

De igual modo, cuando un decaimiento involucra muones, el número leptón-muón L_μ se conserva. A μ^- y ν_μ se les asigna $L_\mu = +1$, a los antimuones μ^+ y $\bar{\nu}_\mu$ se les asigna $L_\mu = -1$, y todas las demás partículas tienen $L_\mu = 0$. Finalmente, el número leptón tau L_τ se conserva y asignaciones similares se pueden hacer para el leptón τ y su neutrino.

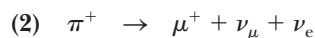
◀ Conservación del número leptón

◀ Decaimiento del neutrón

■ EJEMPLO 30.4 Comprobación del número leptónico

OBJETIVO Usar la conservación del número leptónico para determinar si es posible un proceso dado.

PROBLEMA Determine cuál de los siguientes esquemas de decaimiento puede ocurrir sobre la base de la conservación del número leptónico:



ESTRATEGIA Cunte los leptones en cada lado y vea si los números son iguales.

SOLUCIÓN

Puesto que el decaimiento 1 involucra tanto un muón como un electrón, L_μ y L_e ambos se deben conservar. Antes del decaimiento, $L_\mu = +1$ y $L_e = 0$. Después del decaimiento, $L_\mu = 0 + 0 + 1 = +1$ y $L_e = +1 - 1 + 0 = 0$. Ambos números leptónicos se conservan y, sobre esta base, el modo de decaimiento es posible.

Antes de que ocurra el decaimiento 2, $L_\mu = 0$ y $L_e = 0$. Después del decaimiento, $L_\mu = -1 + 1 + 0 = 0$, pero $L_e = +1$. Este decaimiento no es posible porque el número leptón-electrón no se conserva.

PREGUNTA 30.4 ¿Un neutrón puede decaer en un positrón y un electrón? Explique.

EJERCICIO 30.4 Determine si puede ocurrir el decaimiento $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$.

RESPUESTA No. (Calcule los números leptónicos a ambos lados y demuestre que no son iguales en este caso.)

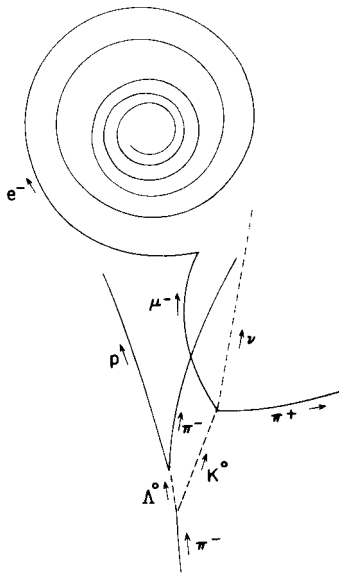


Figura 30.6 Este dibujo representa trazas de muchos eventos obtenidos al analizar una fotografía de cámara de burbujas. Las partículas extrañas Λ^0 y K^0 se forman (en el fondo) conforme π^- interactúa con un protón, de acuerdo con la interacción $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$. (Observe que las partículas neutras no dejan traza, como se indica mediante las líneas rayadas.) Λ^0 y K^0 decaen entonces de acuerdo con las interacciones $\Lambda^0 \rightarrow \pi + p$ y $K^0 \rightarrow \pi + \mu^- + \nu_\mu$.

Examen rápido

30.1 ¿Cuál de las siguientes reacciones no puede ocurrir?

- a) $p + p \rightarrow p + p + \bar{p}$
- b) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- c) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
- d) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

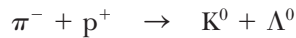
30.2 ¿Cuál de las siguientes reacciones no puede ocurrir?

- a) $p + \bar{p} \rightarrow 2\gamma$
- b) $\gamma + p \rightarrow n + \pi^0$
- c) $\pi^0 + n \rightarrow K^+ + \Sigma^-$
- d) $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$

Conservación de extrañeza

Las partículas K, Λ y Σ muestran propiedades inusuales en su producción y decaimiento y, por lo tanto, se llaman *partículas extrañas*.

Una propiedad inusual de las partículas extrañas es que siempre se producen en pares. Por ejemplo, cuando un pión choca con un protón, se producen dos partículas extrañas neutras con alta probabilidad (figura 30.6) después de la reacción:



Por otra parte, la reacción $\pi^- + p^+ \rightarrow K^0 + n$ nunca ha ocurrido, aun cuando no viola las leyes de conservación conocidas y la energía del pión es suficiente para iniciar la reacción.

La segunda característica peculiar de las partículas extrañas es que, aunque se producen mediante la interacción fuerte a razones altas, no decaen en partículas que interactúen vía la fuerza fuerte a una razón muy alta. En vez de ello, decaen muy lentamente, lo que es característico de la interacción débil. Sus vidas medias están en el rango de 10^{-10} s a 10^{-8} s; la mayoría de las demás partículas que interactúan vía la fuerza fuerte tienen vidas mucho más cortas en el orden de 10^{-23} s.

Para explicar estas inusuales propiedades de las partículas extrañas, se introdujo una ley llamada *conservación de extrañeza*, junto con un nuevo número cuántico S llamado **extrañeza**. En la tabla 30.2 se proporcionan los números extraños para algunas partículas. La producción de partículas extrañas en pares se explica al asignar $S = +1$ a una de las partículas y $S = -1$ a la otra. A todas las partículas no extrañas se les asigna extrañeza $S = 0$. La **ley de conservación de extrañeza** afirma que, siempre que ocurre una reacción nuclear o decaimiento, la suma de los números de extrañeza antes del proceso debe ser igual a la suma de los números de extrañeza después del proceso.

El lento decaimiento de las partículas extrañas se puede explicar al suponer que las interacciones fuerte y electromagnética obedecen a la ley de conservación de extrañeza, mientras que la interacción débil no lo hace. Puesto que la reacción de decaimiento involucra la pérdida de una partícula extraña, viola la conservación de extrañeza y, por lo tanto, avanza lentamente mediante la interacción débil.

Al verificar las reacciones para la adecuada conservación de extrañeza, se sigue el mismo procedimiento que con la conservación de los números bariónico y leptónico. Con la tabla 30.2, cuente la extrañeza de cada lado. Si los dos resultados son iguales, la reacción conserva extrañeza.

FÍSICA APLICADA 30.2 **Rompimiento de las leyes de conservación**

Un estudiante afirma haber observado un decaimiento de un electrón en dos neutrinos que viajan en direcciones opuestas. ¿Qué leyes de conservación violaría este decaimiento?

EXPLICACIÓN Se violarían varias leyes de conservación. Se violaría la conservación de la carga eléctrica porque la carga negativa del electrón desaparece. La conservación del número leptón-electrón también se violaría porque hay un

leptón antes del decaimiento y dos después de él. Si ambos neutrinos fuesen neutrón-electrón, la conservación del número leptón-electrón se violaría en el estado final. Sin embargo, si uno de los neutrinos producto fuese distinto a un neutrón-electrón, se violaría otra ley de conservación leptónica porque no habría otros leptones en el estado inicial. En este decaimiento se obedecerían otras leyes de conservación. La energía se puede conservar; la energía en reposo del

electrón aparece como la energía cinética (y posiblemente alguna pequeña energía en reposo) de los neutrinos. Las direcciones opuestas de las velocidades de los dos neutrinos permiten la conservación de la cantidad de movimiento.

La conservación del número bariónico y la conservación de otros números leptónicos también se mantendría en este decaimiento. ■

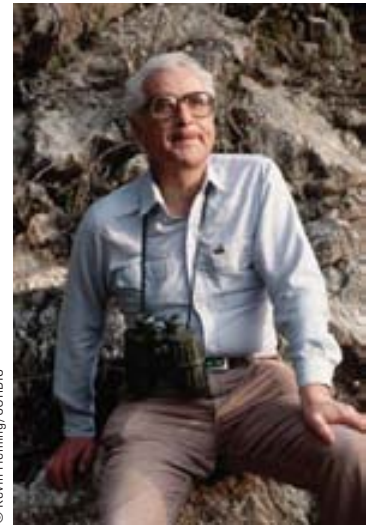
30.7 El método óctuple

Las cantidades como espín, número bariónico, número leptónico y extrañeza son etiquetas que se asocian con partículas. Se han propuesto muchos esquemas de clasificación que agrupan las partículas en familias con base en tales etiquetas. Primero, considere los primeros ocho bariones que se mencionan en la tabla 30.2, donde todos tienen espín $\frac{1}{2}$. La familia consiste del protón, el neutrón y otras seis partículas. Si grafica su extrañeza contra su carga en un sistema coordenado inclinado, como en la figura 30.7a, surge un patrón fascinante: seis de los bariones forman un hexágono y los dos restantes están en el centro del hexágono. (Las partículas con número cuántico de espín $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{2}$ se llaman *fermiones*.)

Ahora considere la familia de mesones que se menciona en la tabla 30.2 con espines cero. (Las partículas con número cuántico de espín 0 o 1 se llaman *bosones*.) Si cuenta tanto partículas como antipartículas, existen nueve de tales mesones. La figura 30.7b es una gráfica de extrañeza contra carga para esta familia. De nuevo, surge un fascinante patrón hexagonal. En este caso las partículas en el perímetro del hexágono yacen opuestas a sus antipartículas y las tres restantes (que forman sus propias antipartículas) están en su centro. Éstos y otros patrones simétricos relacionados, llamados **método óctuple**, se propusieron de manera independiente en 1961 por parte de Murray Gell-Mann y Yuval Ne'eman.

Los grupos de bariones y mesones se pueden desplegar en muchos otros patrones simétricos dentro del marco del método óctuple. Por ejemplo, la familia de bariones de espín $\frac{3}{2}$ contiene diez partículas ordenadas en un patrón como los diez pinos en una línea de boliche. Después de proponer el patrón, faltaba una de las partículas; tenía que descubrirse. Gell-Mann predijo que la partícula faltante, que él llamó *omega menos* (Ω^-), debe tener un espín de $\frac{3}{2}$, una carga de -1 , una extrañeza de -3 y una masa aproximada de $1680 \text{ MeV}/c^2$. Poco después, en 1964, científicos en el Brookhaven National Laboratory descubrieron la partícula faltante a través de un cuidadoso análisis de fotografías de cámara de burbujas y confirmaron todas sus propiedades predichas.

Los patrones del método óctuple en el campo de la física de partículas tienen mucho en común con la tabla periódica. Siempre que ocurre una vacante (una partícula o elemento faltante) en los patrones organizados, los experimentadores tienen una guía para sus investigaciones.



© Kevin Fleming/CORBIS

Murray Gell-Mann
Físico estadounidense (n. 1929)
Gell-Mann ganó el Premio Nobel de Física en 1969 por sus estudios teóricos que tratan con partículas subatómicas.

30.8 Quarks y color

Aunque los leptones parecen ser partículas verdaderamente elementales, sin tamaño o estructura mensurable, los hadrones son más complejos. Existe fuerte evidencia, incluida la dispersión de electrones del núcleo, de que los hadrones están compuestos de partículas más elementales llamadas quarks.

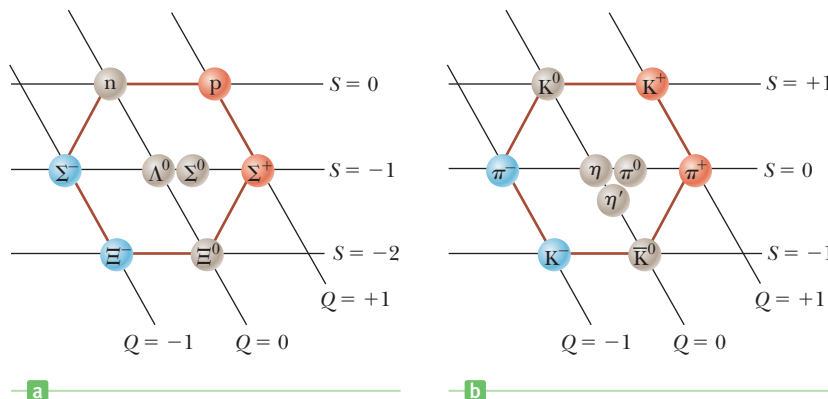


Figura 30.7 a) Patrón óctuple hexagonal para los ocho bariones de espín $\frac{1}{2}$. Esta gráfica de extrañeza contra carga usa un eje horizontal para los valores de extrañeza S , más un eje inclinado para el número de carga Q . b) El patrón óctuple para los nueve mesones de espín 0.

Tabla 30.3 Propiedades de los quarks y antiquarks

Quarks								
Nombre	Símbolo	Espín	Carga	Número bariónico	Extra-ñeza	Encanto	Bottom-ness	Top-ness
Up (arriba)	u	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Down (abajo)	d	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Strange (extraño)	s	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
Charmed (encanto)	c	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	+1	0	0
Bottom (fondo)	b	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	+1	0
Top (cima)	t	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	+1

Antiquarks								
Nombre	Símbolo	Espín	Carga	Número bariónico	Extra-ñeza	Encanto	Bottom-ness	Top-ness
Anti-up (antiarriba)	\bar{u}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Anti-down (antiabajo)	\bar{d}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Anti-strange (antiextraño)	\bar{s}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	+1	0	0	0
Anti-charmed (antiencanto)	\bar{c}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	-1	0	0
Anti-bottom (antifondo)	\bar{b}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	-1	0
Anti-top (anticima)	\bar{t}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	-1

Tabla 30.4 Composición de quarks de varios hadrones

Partícula	Composición de quarks
Mesones	
π^+	$\bar{d}u$
π^-	$\bar{u}d$
K^+	$\bar{s}u$
K^-	$\bar{u}s$
K^0	$\bar{s}d$
Bariones	
p	uud
n	udd
Λ^0	uds
Σ^+	uus
Σ^0	uds
Σ^-	dds
Ξ^0	uss
Ξ^-	dss
Ω^-	sss

El modelo de quarks

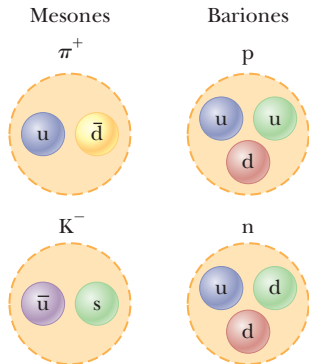


Figura activa 30.8 Composiciones de quarks de dos mesones y dos bariones. Observe que los mesones a la izquierda contienen dos quarks y que los bariones a la derecha contienen tres quarks.

De acuerdo con el modelo de quarks, todos los hadrones son sistemas compuestos de dos o tres de seis constituyentes fundamentales llamados **quarks**. Estos seis quarks reciben los nombres arbitrarios *up* (arriba), *down* (abajo), *strange* (extraño), *charmed* (encanto), *bottom* (fondo) y *top* (cima), que se designan mediante las letras u, d, s, c, b y t.

Los quarks tienen cargas eléctricas fraccionarias, junto con otras propiedades, como se muestra en la tabla 30.3. Asociado con cada quark hay un antiquark con carga, número bariónico y extrañeza opuestos. Los mesones consisten de un quark y un antiquark, mientras que los bariones consisten de tres quarks.

La tabla 30.4 menciona las composiciones de quark de varios mesones y bariones. Observe que sólo dos de los quarks, u y d, están contenidos en todos los hadrones que se encuentran en la materia ordinaria (protones y neutrones). El tercer quark, s, sólo se necesita para construir partículas extrañas con una extrañeza de +1 o de -1. La figura 30.8 es una representación gráfica de las composiciones de quarks de varias partículas.

Los quarks encanto, fondo y cima son más masivos que los otros quarks y ocurren en interacciones de mayor energía. Cada uno tiene su propio número cuántico, llamado encanto, *bottomness* y *topness*, respectivamente. Un ejemplo de un hadrón formado a partir de estos quarks es la partícula J/Ψ , también llamada *charmonium* (algo así como “encantonio”), que está compuesta de un quark encanto y un quark antiencanto, $c\bar{c}$.

■ FÍSICA APLICADA 30.3 Conservación de número mesónico

Usted ya estudió una ley de conservación del número leptónico y una ley de conservación del número bariónico. ¿Por qué no hay una ley de conservación del número mesónico?

EXPLICACIÓN Esta pregunta se puede responder desde el punto de vista de la reacción de partes partículas-antipartículas a partir de la energía disponible. Si la energía se convierte a energía en reposo de un par leptón-antileptón, no hay un cambio neto en el número leptónico porque el leptón tiene

un número leptónico de +1 y el antileptón de -1. La energía también se podría transformar en la energía en reposo de un par barión-antibarión. El barión tiene número bariónico +1, el antibarión -1 y no hay cambio neto en el número bariónico.

Ahora suponga que la energía se transforma en energía en reposo de un par quark-antiquark. Por definición, en la teoría de los quarks, un par quark-antiquark es un mesón. Por lo tanto, en esta reacción, el número de mesones aumenta de cero a uno, de modo que el número mesónico no se conserva. ■

Color

Los quarks tienen otra propiedad llamada **color** o **carga de color**. Esta propiedad no es color en el sentido visual; más bien, sólo es una etiqueta para algo análogo a la carga eléctrica. Se dice que los quarks vienen en tres colores: rojo, verde y azul. Los antiquarks tienen las propiedades antirrojo, antiverde y antiazul.

El color se definió porque algunas combinaciones de quarks parecían violar el principio de exclusión de Pauli. Un ejemplo es la partícula omega menos (Ω^-), que consiste de tres quarks extraños, sss, que tienen todos espín arriba, lo que da un espín de $\frac{3}{2}$. Se supone que cada quark extraño tiene un color diferente y, por ende, está en un estado cuántico distinto, lo que satisface el principio de exclusión.

En general, las combinaciones de quarks deben ser “incoloras”. Un mesón consiste en un quark de un color y un antiquark del anticolor correspondiente. Los bariones deben consistir de un quark rojo, uno verde y uno azul, o sus anticolores.

La teoría de cómo interactúan los quarks unos con otros mediante la carga de color se llama **cromodinámica cuántica**, o QCD, por sus siglas en inglés, para hacer paralelo a la electrodinámica cuántica (la teoría de interacción entre cargas eléctricas). La fuerza fuerte entre quarks con frecuencia se denomina **fuerza de color**. La fuerza se transporta mediante partículas sin masa llamadas **gluones** (que son análogas a fotones para la fuerza electromagnética). De acuerdo con la QCD, existen ocho gluones, todos con carga de color y sus antigluones. Cuando un quark emite o absorbe un gluón, cambia su color. Por ejemplo, un quark azul que emite un gluón puede convertirse en un quark rojo y un quark rojo que absorbe este gluón se convierte en un quark azul. La fuerza de color entre quarks es análoga a la fuerza eléctrica entre cargas: colores iguales se repelen y colores opuestos se atraen. Por lo tanto, dos quarks rojos se repelen mutuamente, pero un quark rojo atraerá un quark antirrojo. La atracción entre quarks de color opuesto para formar un mesón ($q\bar{q}$) se indica en la figura 30.9a.

Quarks de colores diferentes también se atraen mutuamente, pero con menos intensidad que colores opuestos de quark y antiquark. Por ejemplo, un cúmulo de quarks rojo, azul y verde se atraen todos unos a otros para formar bariones, como se indica en la figura 30.9b. Todo barión contiene tres quarks de tres colores diferentes.

Aunque la fuerza de color entre dos hadrones de color neutro (como un protón y un neutrón) es despreciable a grandes separaciones, la fuerza fuerte de color entre sus quarks constituyentes no se cancela exactamente a separaciones pequeñas de más o menos 1 fm. **Esta fuerza fuerte residual de hecho está en la fuerza nuclear que enlaza protones y neutrones para formar núcleos.** Es similar a la fuerza electromagnética residual que enlaza átomos neutros en las moléculas.

Tip 30.2 El color realmente no es color

Cuando se usa la palabra *color* para describir un quark, no tiene nada que ver con la sensación visual de la luz. Simplemente es un nombre conveniente para una propiedad análoga a la carga eléctrica.

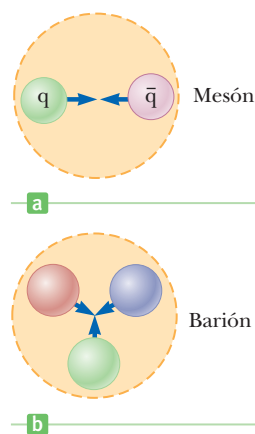


Figura 30.9 a) Un quark verde ha atraído a un quark antiverde para formar un mesón con estructura de quark ($q\bar{q}$). b) Quarks de tres colores diferentes se atraen mutuamente para formar un barión.

30.9 Teoría electrodébil y el modelo estándar

Recuerde que la interacción débil es una fuerza de rango extremadamente corto que tiene una distancia de interacción de aproximadamente 10^{-18} m. Tal interacción de corto alcance implica que las partículas cuantizadas que portan el campo débil (los bosones W^+ , W^- y Z^0 de espín 1) son extremadamente masivas, como de hecho es el caso. ¡Estos sorprendentes bosones se pueden considerar como partículas puntuales sin estructura tan masiva como átomos de kriptón! La interacción débil es responsable del decaimiento de los quarks c, s, b y t en los quarks u y d más ligeros y más estables, así como del decaimiento de los masivos leptones μ y τ en electrones (más ligeros). **La interacción débil es muy importante porque gobierna la estabilidad de las partículas básicas de la materia.**

Una misteriosa característica de la interacción débil es su falta de simetría, en especial cuando se le compara con el alto grado de simetría que muestran las interacciones fuerte, electromagnética y gravitacional. Por ejemplo, la interacción débil, a diferencia de la interacción fuerte, no es simétrica bajo reflexión especular o intercambio de carga. (*Reflexión especular* significa que todas las cantidades en una reacción de partículas dada se



CERN

Un ingeniero prueba la electrónica asociada a un imán superconductor en el Gran Colisionador de Hadrones en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, dirigido por el CERN. (El acrónimo de Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, y se ha mantenido a pesar de que “Conseil”, o “Consejo”, ha sido sustituido por “Organización”).

intercambian como si se reflejaran en un espejo: izquierda por derecha, un movimiento hacia el espejo para un movimiento hacia afuera y así por el estilo. *Intercambio de carga* significa que todas las cargas eléctricas en una reacción de partículas se convierten en sus opuestas: todas las positivas en negativas, y viceversa.) Sin simetría significa que la reacción con todas las cantidades cambiadas ocurre con menos frecuencia que la reacción directa. Por ejemplo, el decaimiento de K^0 , que está gobernado por la interacción débil, no es simétrico bajo intercambio de carga porque la reacción $K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$ ocurre con mucha más frecuencia que la reacción $K^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$.

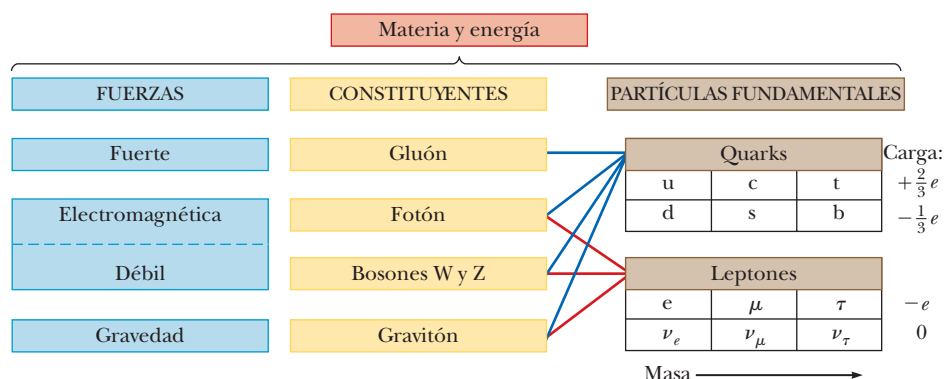
La **teoría electrodébil** unifica las interacciones electromagnética y débil. Esta teoría postula que las interacciones débil y electromagnética tienen la misma intensidad a energías de partícula muy altas y son diferentes manifestaciones de una sola interacción electrodébil unificadora. El fotón y los tres bosones masivos (W^\pm y Z^0) juegan papeles clave en la teoría electrodébil. La teoría realiza muchas predicciones concretas, como la predicción de las masas de las partículas W y Z en aproximadamente 82 y $93 \text{ GeV}/c^2$, respectivamente. Estas predicciones se han comprobado en forma experimental.

La combinación de la teoría electrodébil y la QCD para la interacción fuerte forma lo que se conoce en física de altas energías como **Modelo estándar**. Aunque los detalles del Modelo estándar son complejos, sus ingredientes esenciales se pueden resumir con la ayuda de la figura 30.10. La fuerza fuerte, mediada por gluones, mantiene unidos a los quarks para formar partículas compuestas como protones, neutrones y mesones. Los leptones sólo participan en las interacciones electromagnética y débil. La fuerza electromagnética está medida por fotones, y la fuerza débil está medida por los bosones W y Z. Observe que todas las fuerzas fundamentales están mediadas por bosones (partículas con espín 1) que tienen propiedades dadas, en gran medida, por las simetrías involucradas en las teorías.

Sin embargo, el Modelo estándar no responde todas las preguntas. Una gran pregunta es por qué el fotón no tiene masa, aunque los bosones W y Z sí la tienen. Debido a esta diferencia de masa, las fuerzas electromagnética y débil son muy diferentes a bajas energías, pero se vuelven similares en naturaleza a energías muy altas, donde las energías en reposo de los bosones W y Z son fracciones insignificantes de sus energías totales. Este comportamiento durante la transición de energías altas a bajas, llamado **rompimiento de simetría**, no responde la pregunta del origen de las masas de las partículas. Para resolver este problema, se ha propuesto una partícula hipotética, llamada **bosón de Higgs**, que proporciona un mecanismo para romper la simetría electrodébil y conferir diferentes masas de partícula a diferentes partículas. El Modelo estándar, incluido el mecanismo de Higgs, proporciona una explicación lógicamente consistente de la naturaleza masiva de los bosones W y Z. Por desgracia, el bosón de Higgs todavía no se descubre, pero los físicos predicen que su masa debe ser menor que $1 \text{ TeV}/c^2$ (10^{12} eV).

A partir del éxito de la teoría electrodébil, los científicos intentaron combinarla con la QCD en una **gran teoría unificada** (GTU). En este modelo, la fuerza electrodébil surgió con la fuerza de color fuerte para formar una gran fuerza unificada. Una versión de la teoría considera a leptones y quarks como miembros de la misma familia que pueden cambiar uno en otro mediante el intercambio de una partícula adecuada. Muchas teorías GTU

Figura 30.10 El Modelo estándar de la física de partículas.



predicen que los protones son inestables y decaerán con una vida de aproximadamente 10^{31} años, un período mucho mayor que la edad del Universo. Sin embargo, todavía no se observan decaimientos de protón.

30.10 La conexión cósmica

De acuerdo con la teoría del Big Bang, el Universo explotó a partir de una singularidad infinitamente densa hace aproximadamente 15 mil a 20 mil millones de años. Los primeros minutos después del Big Bang vieron tales extremos de energía que se cree que las cuatro interacciones de la física estaban unificadas y toda la materia estaba contenida en una “sopa de quarks” indiferenciada.

En la figura 30.11 se muestra la evolución de las cuatro fuerzas fundamentales desde el Big Bang hasta el presente. Durante los primeros 10^{-43} s (la época ultracaliente, con $T < 10^{32}$ K), las fuerzas fuerte, electrodébil y gravitacional se unieron para formar una fuerza completamente unificada. En los primeros 10^{-35} s después del Big Bang (la época caliente, con $T < 10^{29}$ K), la gravedad se liberó de esta unificación y las fuerzas fuerte y electrodébil permanecieron como una, descritas por una gran teoría unificada. Durante este periodo las energías de las partículas eran tan grandes ($> 10^{16}$ GeV) que existían partículas muy masivas, así como quarks, leptones y sus antipartículas. Luego, después de 10^{-35} s, el Universo se expandió rápidamente y se enfrió (la época tibia, con $T < 10^{29}$ a 10^{15} K), las fuerzas fuerte y electrodébil se separaron y el esquema de gran unificación se rompió. Conforme el Universo continuó enfriándose, la fuerza electrodébil se dividió en la fuerza débil y la fuerza electromagnética aproximadamente 10^{-10} s después del Big Bang.



Cortesía de APF Emilio Segre Visual Archives

George Gamow Físico ruso (1904-1968)

Gamow y dos de sus estudiantes, Ralph Alpher y Robert Herman, fueron los primeros en tomar en serio la primera media hora del Universo. En un artículo publicado en 1948, que en su mayor parte se pasó por alto, realizaron predicciones cosmológicas verdaderamente notables. Calcularon correctamente la abundancia de hidrógeno y helio después de la primera media hora (75% H y 25% He) y predijeron que la radiación del Big Bang todavía debe estar presente y tener una temperatura aparente de más o menos 5 K.

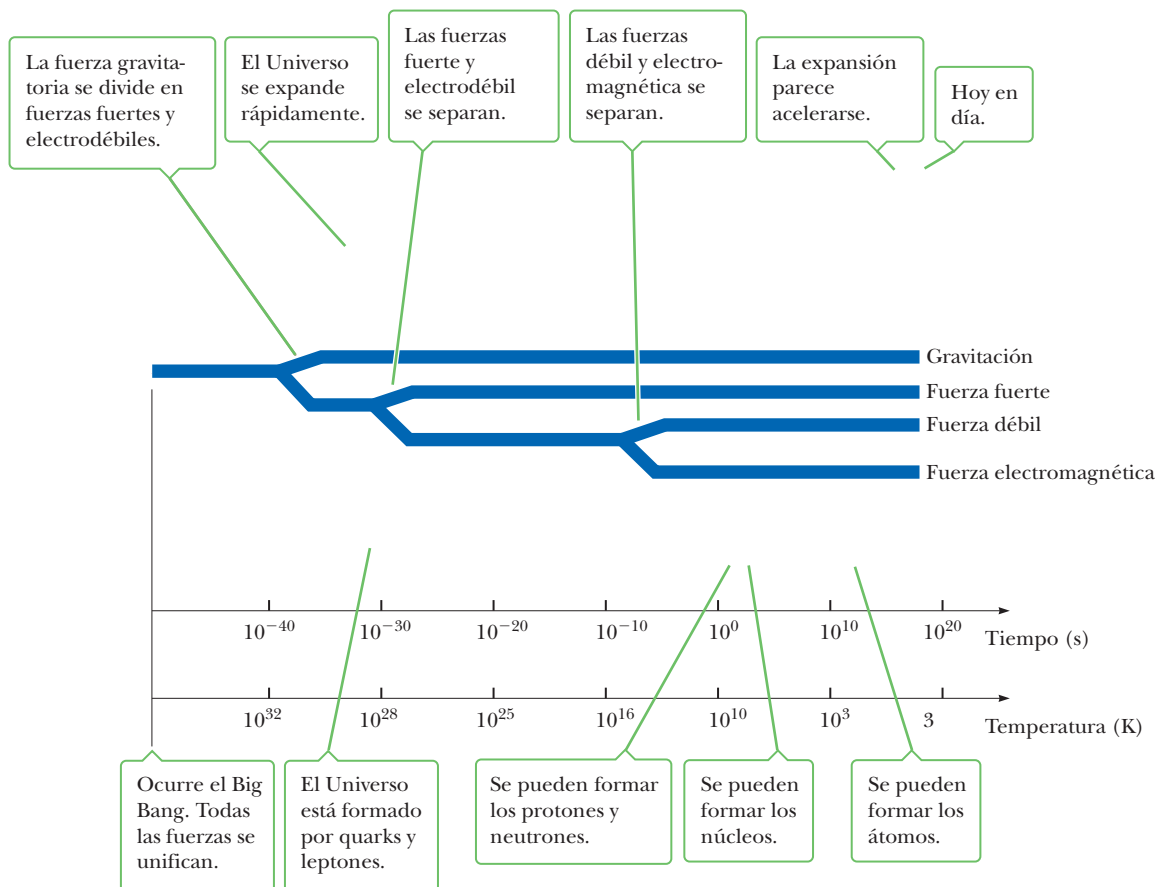


Figura 30.11 Breve historia del Universo, desde el Big Bang hasta el presente. Las cuatro fuerzas se volvieron distinguibles durante el primer microsegundo. Luego, todos los quarks se combinaron para formar partículas que interactuaron vía la fuerza fuerte. Sin embargo, los leptones permanecieron separados y hasta este día existen como partículas observables de manera individual.



Figura 30.12 Robert W. Wilson (izquierda) y Arno A. Penzias (derecha), con la antena corno-reflectora de los Bell Telephone Laboratories.

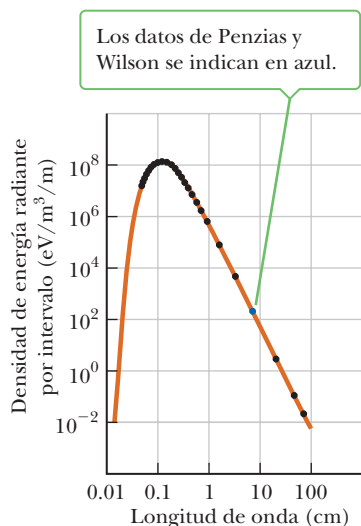


Figura 30.13 Espectros de radiación de cuerpo negro teórico (curva café) y medido (puntos negros) del Big Bang. La mayoría de los datos se recolectaron del satélite Cosmic Background Explorer (COBE, Explorador de Fondo Cósmico). Se indican los datos de Wilson y Penzias.

Después de algunos minutos, los protones se condensaron a partir de la sopa caliente. Durante media hora, el Universo experimentó detonación termonuclear y explotó como una bomba de hidrógeno y produjo la mayoría de los núcleos de helio presentes en la actualidad. El Universo continuó expandiéndose y su temperatura cayó. Hasta alrededor de 700 000 años después del Big Bang, el Universo estuvo dominado por radiación. La radiación energética evitó que la materia formara átomos de hidrógeno individuales porque las colisiones instantáneamente ionizarían cualquier átomo que pudiera formarse. Los fotones experimentaron continua dispersión Compton a partir del gran número de electrones libres, lo que resultó en un Universo que era opaco a la radiación. Para cuando el Universo tenía más o menos 700 000 años de antigüedad, se había expandido y enfriado a aproximadamente 3000 K. Ahora los protones se podían enlazar a los electrones para formar átomos de hidrógeno neutros y súbitamente el Universo se volvió transparente a los fotones. La radiación ya no dominó el Universo y aglomeraciones de materia neutra crecieron de manera estable: primero átomos, después moléculas, nubes de gas, estrellas y finalmente galaxias.

Observación de la radiación de la bola de fuego primordial

En 1965, Arno A. Penzias (n. 1933) y Robert W. Wilson (n. 1936), de los Laboratorios Bell, hicieron un sorprendente descubrimiento mientras probaban un sensible receptor de microondas. Una molesta señal que producía un débil siseo de fondo interfería con sus experimentos de satélites de comunicaciones. A pesar de todos sus esfuerzos, la señal permanecía. A final de cuentas, se volvió claro que estaban observando radiación de microondas de fondo (a una longitud de onda de 7.35 cm) que representa el “brillo” remanente del Big Bang.

En la figura 30.12 se muestra el “cuerno” de microondas que sirvió como su antena receptora. La intensidad de la señal detectada permaneció sin variar conforme la antena se apuntaba en diferentes direcciones. La radiación tenía igual intensidad en todas direcciones, lo que sugirió que todo el Universo era la fuente de esta radiación.

Experimentos posteriores de otros grupos agregaron datos de intensidad a diferentes longitudes de onda, como se muestra en la figura 30.13. Los resultados confirmaron que la radiación era la de un cuerpo negro a 2.9 K. Esta cifra acaso es la evidencia más clara para la teoría del Big Bang.

Se descubrió que la radiación de fondo cósmico era demasiado uniforme para conducir al desarrollo de las galaxias. En 1992, después de un estudio que utilizó el Explorador de Fondo Cósmico, o COBE, por sus siglas en inglés, se descubrieron ligeras irregularidades en el fondo cósmico. Se cree que dichas irregularidades son las semillas de la formación de las galaxias.

30.11 Preguntas sin respuesta en cosmología

En la última década, los nuevos datos han planteado preguntas que muchos consideran como las más importantes de la ciencia de hoy. El tema es la composición del Universo, que está estrechamente ligada a su destino final. Una de estas preguntas se refiere a la velocidad a la que orbitan las estrellas de la galaxia, explicada por un material postulado llamado **materia oscura**. Aunque la evidencia de su existencia fue descubierta por Fritz Zwicky en 1933, sólo recientemente se ha vuelto un campo dominante de la investigación. La otra pregunta implica la expansión acelerada del Universo descubierta en 1998, atribuida a un material igualmente misterioso llamado **energía oscura**.

Materia oscura

Cuando se miden las velocidades de las estrellas de nuestra galaxia, se encuentra que están viajando demasiado rápido como para mantenerse unidas por la gravedad de la Vía Láctea si la masa de la galaxia es debida a que se encuentra en estrellas luminosas. La figura 30.14a muestra la comparación de la velocidad con la curva de distancia radial de los cuerpos orbitando al Sol. A medida que la distancia desde el Sol aumenta, la velocidad de los cuerpos planetarios disminuye, a consecuencia de la ley del cuadrado inverso de la gravitación. La figura 30.14b, por el contrario, muestra la curva de velocidad de las

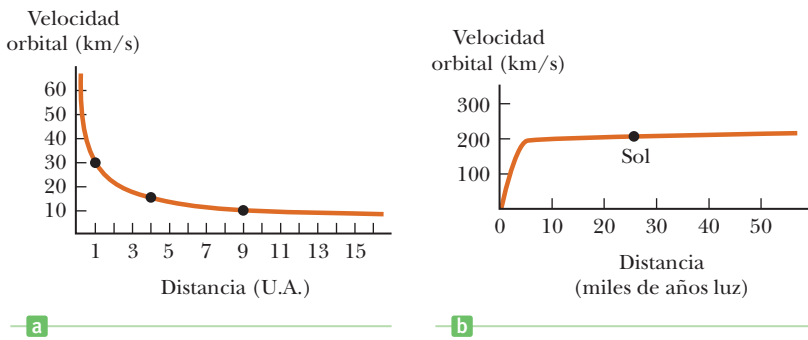


Figura 30.14 a) Velocidad frente a la curva de distancia radial de los cuerpos orbitando alrededor del Sol. b) Curva de velocidad de las estrellas en la Vía Láctea.

estrellas en la Vía Láctea. La curva aumenta y se aplanan, pero no decrece, lo que significa que las estrellas están viajando mucho más rápido de lo esperado, principalmente bajo la influencia de la gravedad de las estrellas visibles. Viajando más rápido de lo esperado que la velocidad de escape galáctico, las estrellas deben salir de la galaxia, sin embargo, permanecen en sus órbitas. Observaciones similares se han hecho de estrellas en otras galaxias.

Dos teorías generales se han propuesto para explicar el comportamiento de las estrellas moviéndose demasiado rápido: o hay una nueva forma de materia oscura que no ha sido observada directamente, o la ley de la gravedad debe ser más fuerte que el inverso de la distancia al cuadrado. A partir del perfil de velocidad de las estrellas, 90% de la materia de la galaxia estaría compuesto por la materia oscura hipotética. Entre los candidatos a materia oscura están los neutrinos, que debido a “la oscilación de neutrinos”, la espontánea evolución de un tipo de neutrino en otro, ahora se piensa que tienen masa. Todas las estrellas emiten enormes cantidades de neutrinos por segundo, así que si los neutrinos tenían incluso una pequeña masa, podrían explicar la materia oscura. Otro candidato hipotético es un WIMP, una partícula masiva de interacción débil (*weakly interacting massive particle*) dejada por el Big Bang. Dado que las otras galaxias tienen curvas de rotación similares a la de la Vía Láctea, es muy posible que la materia oscura predomine sobre la materia ordinaria del Universo en general.

La principal explicación alternativa para las curvas de rotación galáctica es que la ley de gravitación de Newton no se cumple a través de distancias grandes. Esa teoría, llamada Dinámica Newtoniana Modificada (MOND, por sus siglas en inglés), ha recibido una gran atención, pero hasta ahora no ha funcionado lo suficientemente bien como para ganar la aceptación generalizada. Algunos investigadores también han tratado de dar cuenta de las curvas de rotación de las galaxias mediante el uso de la teoría de la relatividad de Einstein, la relatividad general. Por último, es muy posible que la teoría correcta pueda requerir dos nuevos tipos de materia y una modificación de la teoría de la gravedad.

La energía oscura y la aceleración del Universo

En 1998 dos grupos de astrónomos, uno liderado por Brian Schmidt y Adam Riess y el otro por Saul Perlmutter, habían hecho nuevas mediciones de alta precisión de las distancias a otras galaxias usando supernovas de Tipo Ia. Estas observaciones demostraron que el Universo se expande y acelera al mismo tiempo. La expansión acelerada no puede ser causada por la materia normal, ni por la materia oscura, ya que ejercen una fuerza gravitacional de atracción. En su lugar, se cree que un nuevo tipo de materia, llamada **energía oscura**, ejerce una fuerza repulsiva que hace que el Universo se expanda más rápidamente de lo predicho por la teoría de la relatividad general de Einstein. La figura 30.15 muestra las proporciones de la teoría de la materia, la materia y energía oscuras. Los átomos normales, el tipo del que estamos hechos, sólo representan alrededor de 4% del Universo, mientras que aproximadamente 23% es materia oscura y 73% es energía oscura.

Einstein introdujo una constante cosmológica en su teoría de la relatividad general con el fin de explicar por qué el Universo parece no cambiar con el tiempo. La constante cosmológica siempre es una fuerza de repulsión suficiente para evitar que la materia del Universo se derrumbe bajo la influencia atractiva de la gravedad. Cuando las observaciones de Edwin Hubble del corrimiento de las galaxias hacia el rojo lo llevaron a la noción

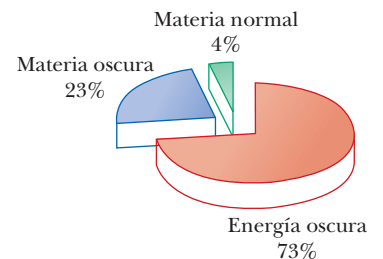


Figura 30.15 La teoría de la composición del Universo. La materia normal, que se encuentra en la Tierra y el Sol, representa sólo el 4% de la materia en el Universo. El material desconocido que causa mayor atracción gravitatoria en la escala de la galaxia es llamada materia oscura, mientras que el material desconocido que de manera similar causa la expansión acelerada del Universo es llamada energía oscura.

de un Universo de expansión dinámica, Einstein llamó la constante cosmológica como “el mayor error” de su vida. La misma constante cosmológica ahora puede producir un buen modelo del Universo en aceleración, convirtiendo su “error” en una especie de triunfo. Sin embargo, la constante cosmológica no resuelve completamente el misterio, debido a que no se ha explicado el origen de ésta. Como en el caso de las curvas de rotación galáctica, no se sabe si la aceleración del Universo es una consecuencia de una nueva forma de materia o energía, o una indicación de que las teorías estándar de la cosmología derivada de la relatividad general necesitan modificarse.

La evolución y el destino del Universo

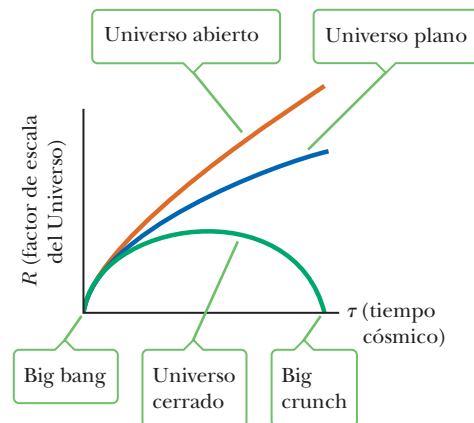
Existen preguntas que permanecen sin responder sobre el origen y la evolución temprana del Universo. Aunque el modelo del Big Bang explica por qué las galaxias parecen estar alejándose de nosotros, varios problemas han surgido de observaciones que no pueden ser completamente explicadas sólo por la hipótesis del Big Bang.

En primer lugar, el Universo, medido por la temperatura de fondo de microondas, es muy uniforme. Es como si el Universo entero se encontrara en equilibrio. Para que un sistema esté en equilibrio, sus componentes deben ser capaces de intercambiar energía, llegando después de un cierto tiempo a una temperatura uniforme. ¿Cómo podría lograrse este equilibrio, sin embargo, cuando las diferentes partes del Universo están tan separadas una de otra que no es posible el intercambio de energía? Este misterio se llama el problema del horizonte.

En segundo lugar, las medidas del fondo cósmico de microondas sugieren que el Universo tiene una geometría plana. La figura 30.16 muestra el estándar de tres destinos del Universo, que se derivan de la teoría de la relatividad general de Einstein, al graficar el factor de expansión, R , en función del tiempo cósmico. El factor de expansión puede ser pensado para dar una medida del tamaño del Universo, igual que un radio cósmico. Un Universo plano se expandirá para siempre, aunque en el límite cuando el tiempo tiende a infinito, la velocidad de expansión disminuye gradualmente a cero. Un Universo plano, sin embargo, es un estado de equilibrio inestable, como un lápiz parado en su punta. Con una pequeña desviación de un modo u otro, el Universo se colapsaría de nuevo como en la curva inferior de la figura 30.16, o se expandiría para siempre como en la curva superior de la figura 30.16. Para ser plano ahora, el Universo tuvo que ser plano también al principio con una precisión extremadamente alta. Es un extremo improbable que el Universo fuera tan finamente sintonizado al principio de su evolución. Esa puesta a punto se le llama el problema de la planitud.

Un tercer problema surge cuando las teorías de partículas se combinan con la cosmología. Los estudios sobre el modelo estándar de física de partículas en el Universo temprano muestran que un gran número de monopolos magnéticos se crearon en los inicios del Universo, por lo que muchos cientos de miles de ellos pasan a través de nuestros cuerpos

Figura 30.16 Los tres destinos del Universo, de acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein. Con una cantidad suficiente de la materia atractiva, el Universo se expandiría al principio, pero eventualmente colapsará en un “big crunch”. Un Universo plano se expandiría para siempre, con la expansión desacelerando a cero en el límite cuando τ tiende a infinito. El Universo hiperbólico (o abierto) se acelera para siempre. Un Universo de energía oscura, o equivalente, debido a una constante cosmológica positiva, sería similar al Universo hiperbólico, pero la curva iría hacia arriba.



cada segundo. Los monopolos magnéticos son pequeños imanes que consisten en un aislado Norte o el Polo Sur, y a pesar de los cálculos de la predicción de que sean comunes, que nunca han sido observados. Eso se llama el problema monopolo.

En 1981, Alan Guth, ahora en el MIT, propuso el modelo inflacionario del Universo para resolver estos tres problemas, con un solo mecanismo. En este modelo, un campo aún no identificado llamado **campo de inflación**, es causado por el Universo al entrar en una inflación exponencial muy rápida, aumentando 10^{32} veces el tamaño de una pequeña fracción de segundo.

Esta expansión acelerada del Universo muy temprano resolvería el problema del monopolo, haciéndolo tan diluido que muy pocos existirían en el Universo observable. Además, debido a que el Universo era mucho más pequeño justo antes de la inflación, estaría en equilibrio térmico y, en consecuencia, después de la expansión seguirá siendo similar en todos los lugares y en todas las direcciones, resolviendo el problema del horizonte. Por último, la rápida inflación podría causar que la curvatura del espacio-tiempo pareciera volverse plana, al igual que la Tierra parece plana a aquéllos que están en su superficie debido a que sólo una porción muy pequeña de toda la Tierra es visible en una determinada localidad. Esto resuelve el problema de la planitud.

Después de la breve época inflacionaria del Universo podría continuar expandiéndose con normalidad. Considerando que no hay pruebas definitivas de que el Universo inflacionario es correcto, actualmente es la hipótesis de trabajo más aceptada para saber cómo evolucionó el Universo temprano. Algunos investigadores han tratado de combinar la inflación y la energía oscura en una única teoría llamada “quinta esencia”. Hasta la fecha, sin embargo, ninguna teoría que explique los orígenes de la inflación temprana o la aceleración universal tardía ha encontrado un apoyo general entre los cosmólogos.

30.12 Problemas y perspectivas

Mientras que los físicos de partículas exploran el reino de lo muy pequeño, los cosmólogos exploran la historia cósmica de vuelta al primer microsegundo del Big Bang. La observación de los eventos que ocurren cuando dos partículas chocan en un acelerador es esencial para reconstruir los primeros momentos de la historia cósmica. Acaso la clave para comprender el Universo temprano sea primero entender el mundo de las partículas elementales.

La comprensión de la física a distancias cortas y grandes está lejos de ser completa. Los físicos de partículas enfrentan muchas preguntas sin responder. ¿Por qué hay tan poca antimateria en el Universo? ¿Los neutrinos tienen una masa pequeña y, si es así, cuánto aportan a la “materia oscura” que mantiene unido gravitacionalmente al Universo? ¿Cómo se pueden entender las más recientes mediciones astronómicas, que muestran que la expansión del Universo es acelerada y que acaso exista un tipo de “fuerza antigravedad”, o energía oscura, que actúa entre galaxias enormemente separadas? ¿Es posible unificar las teorías fuerte y electrodébil en una forma lógica y consistente? ¿Por qué los quarks y los leptones forman tres familias similares pero distintas? ¿Los muones son lo mismo que los electrones (aparte de sus masas diferentes), o tienen sutiles diferencias que no se han detectado? ¿Por qué algunas partículas tienen carga y otras son neutras? ¿Por qué los quarks portan una carga fraccional? ¿Qué determina las masas de las partículas elementales? Las preguntas siguen y siguen. Debido al rápido avance y los nuevos descubrimientos en los campos relacionados de física de partículas y cosmología, para cuando usted lea este libro acaso algunas de estas preguntas se hayan resuelto y otras hayan surgido.

Una pregunta importante que continúa es si los leptones y los quarks tienen una subestructura. Muchos físicos creen que las cantidades fundamentales no son puntos infinitesimales, sino cuerdas vibratorias extremadamente pequeñas. Sin embargo, a pesar de más de tres décadas de investigación en teoría de cuerdas por parte de miles de físicos, todavía no se encuentra una Teoría final del Todo. Si hay un límite al conocimiento, es una pregunta abierta.

RESUMEN**30.1 Fisión nuclear**

En la **fisión nuclear** la masa total de los productos siempre es menor que la masa original de los reactantes. La fisión nuclear ocurre cuando un núcleo pesado se divide, o fisiona, en dos núcleos más pequeños. La masa perdida se transforma en energía, radiación electromagnética y la energía cinética de las partículas hijas.

Un **reactor nuclear** es un sistema diseñado para mantener una reacción en cadena autosostenida. Los reactores nucleares que usan eventos de fisión controlados en la actualidad se utilizan para generar energía eléctrica. Un parámetro útil para describir el nivel de operación del reactor es la constante de reproducción K , que es el número promedio de neutrones de cada evento de fisión que causará otro evento. Una reacción autosostenida se logra cuando $K = 1$.

30.2 Fusión nuclear

En la fusión nuclear dos núcleos ligeros se combinan para formar un núcleo más pesado. Este tipo de reacción nuclear ocurre en el Sol, asistido por un proceso de tunelamiento cuántico que ayuda a las partículas a pasar a través de la barrera de Coulomb.

Los eventos de fusión controlados ofrecen la esperanza de abundante suministro de energía en el futuro. El reactor de fusión nuclear es considerado por muchos científicos como la fuente máxima de energía, porque su combustible es el agua. El **criterio de Lawson** afirma que un reactor de fusión proporcionará una salida de potencia neta si el producto de la densidad de iones en el plasma n y el tiempo de confinamiento del plasma τ satisfacen las siguientes relaciones:

$$n\tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3 \quad \text{Interacción deuterio-tritio}$$

$$n\tau \geq 10^{16} \text{ s/cm}^3 \quad \text{Interacción deuterio-deuterio} \quad [30.5]$$

30.3 Partículas elementales y las fuerzas fundamentales

Existen cuatro fuerzas fundamentales de la Naturaleza: las fuerzas **fuerte** (hadrónica), **electromagnética**, **débil** y **gravitatoria**. La fuerza fuerte es aquella entre nucleones que mantiene unidos los núcleos. La fuerza débil es responsable del decaimiento beta. Las fuerzas electromagnética y débil ahora se consideran como manifestaciones de una sola fuerza llamada fuerza **electrodébil**.

Se dice que toda interacción fundamental está medida por el intercambio de partículas de campo. La interacción electromagnética está medida por el fotón, la interacción débil por los bosones W^\pm y Z^0 , la interacción gravitacional por los gravitones y la interacción fuerte por los gluones.

30.4 Positrones y otras antipartículas

Una antipartícula y una partícula tienen la misma masa, pero carga opuesta, y también pueden tener otras propiedades con valores opuestos, como el número leptónico y el número bariónico. En las reacciones nucleares es posible producir pares partícula-antipartícula si la energía disponible es mayor que $2mc^2$, donde m es la masa de la partícula (o antipartícula).

30.5 Clasificación de partículas

Las partículas distintas de los fotones se clasifican como hadrones o leptones. Los **hadrones** interactúan principalmente a través de la fuerza fuerte. Tienen tamaño y estructura y, en consecuencia, no son partículas elementales. Existen dos tipos de hadrones: *bariones* y *mesones*. Los mesones tienen un número bariónico de cero y tienen espín o cero o entero. Los bariones, que por lo general son las partículas más masivas, tienen números bariónicos distintos de cero y espines de $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{2}$. El neutrón y el protón son ejemplos de bariones.

Los **leptones** no tienen estructura conocida, hasta los límites de la resolución actual (aproximadamente 10^{-19} m). Los leptones sólo interactúan a través de las fuerzas débil y electromagnética. Existen seis leptones: el electrón, e^- ; el muón, μ^- ; el tau, τ^- ; y sus neutrinos asociados, ν_e , ν_μ y ν_τ .

30.6 Leyes de conservación

En todas las reacciones y decaimientos, cantidades como energía, cantidad de movimiento lineal, cantidad de movimiento angular, carga eléctrica, número bariónico y número leptónico se conservan estrictamente. Ciertas partículas tienen propiedades llamadas **extrañeza** y **encanto**. Estas partículas inusuales se conservan sólo en aquellas reacciones y decaimientos que ocurren vía la fuerza fuerte.

30.8 Quarks y color

Teorías recientes postulan que todos los hadrones están compuestos por unidades más pequeñas conocidas como **quarks**, que tienen cargas eléctricas fraccionales y números bariónicos de $\frac{1}{3}$ y vienen en seis "sabores": arriba (*up*), abajo (*down*), extraño (*strange*), encanto (*charmed*), cima (*top*) y fondo (*bottom*). Cada barión contiene tres quarks, y cada mesón contiene un quark y un antiquark.

De acuerdo con la teoría de la **Cromodinámica cuántica**, los quarks tienen una propiedad llamada **color** y la fuerza fuerte entre quarks se conoce como **fuerza de color**. La fuerza de color aumenta conforme la distancia entre las partículas se incrementa, de modo que los quarks están confinados y nunca se observan en aislamiento. Cuando dos quarks enlazados se separan ampliamente, se forma un nuevo par quark-antiquark entre ellos, y la partícula individual se rompe en dos nuevas partículas, cada una compuesta de un par quark-antiquark.

30.10 La conexión cósmica

La observación de la radiación de microondas de fondo por parte de Penzias y Wilson confirmó fuertemente que el Universo comenzó con un Big Bang hace aproximadamente 15 mil millones de años y desde entonces se expande. La radiación de fondo es equivalente a la de un cuerpo negro a una temperatura de más o menos 3 K.

El fondo cósmico de microondas tiene muy pocas irregularidades, lo que corresponde a variaciones de temperatura de 0.0003 K. Sin estas irregularidades que actúan como sitios de nucleación, las partículas nunca se habrían agrupado para formar galaxias y estrellas.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En la primera bomba atómica, una prueba realizada en Nuevo México, llamada Trinity, la energía liberada fue equivalente a aproximadamente 17 kilotonnes de TNT. Estime la masa convertida en energía en este evento. *Nota:* Una tonelada de TNT tiene una energía equivalente a 4.0×10^9 J. a) 20 kilotonnes b) 0.1 kilotonnes c) 1 kg d) 1 g e) 1 mg
- Cuando un neutrón decae a un protón, electrón y neutrino, ¿cuánta energía se libera? (Desprecie la energía del neutrino.) a) 0.784 MeV b) 0.352 MeV c) 4.31 MeV d) 2.22 MeV e) 1.70 MeV
- La partícula Ω^- es un barión con espín $\frac{3}{2}$. ¿Cuál de las siguientes situaciones es cierta acerca de esta partícula? a) Tiene tres posibles estados de espín en un campo magnético. b) Tiene cuatro posibles estados de espín. c) Tiene tres veces la carga de una partícula de espín $\frac{1}{2}$. d) Tiene tres veces la masa de una partícula de espín $\frac{1}{2}$. e) No puede decaer a una partícula de espín $\frac{1}{2}$.
- ¿Por qué un protón no puede decaer en un positrón y un neutrino? a) Se viola la conservación de carga. b) Se viola la conservación de número bariónico. c) Se viola la conservación de la energía. d) Se viola la conservación del número leptónico. e) Se viola la conservación de extrañeza.
- ¿Cuál partícula es más probable que capture un núcleo ^{235}U y haga que experimente fisión? a) un protón energético b) un neutrón energético c) una partícula alfa de movimiento lento d) un neutrón de movimiento lento e) un electrón de movimiento rápido
- Si el moderador se removiera súbitamente de un reactor nuclear en una estación de generación de electricidad, ¿cuál es la consecuencia más probable? a) El reactor se volvería supercrítico y ocurriría una reacción de escape. b) Las reacciones nucleares procederían como antes, pero el reactor se sobrecalentaría. c) El reactor se volvería subcrítico y la rapidez a la que las reacciones ocurren disminuiría. d) No ocurrirían cambios en la operación del reactor. e) La rapidez a la que ocurren las reacciones aumentaría, pero el reactor no se volvería supercrítico.
- Cuando un electrón y un positrón se encuentran a baja rapidez en espacio vacío, se aniquilan mutuamente para producir dos rayos gamma de 0.511 MeV. ¿Qué ley se violaría si produjeran un rayo gamma con una energía de 1.02 MeV? a) conservación de energía b) conservación de cantidad de movimiento c) conservación de carga d) conservación de número bariónico e) conservación de número leptónico electrónico
- En una reacción de fisión un núcleo ^{235}U captura un neutrón, lo que divide el núcleo en ^{137}I y ^{96}Y . ¿Cuántos neutrones libres resultan de este proceso? a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5
- ¿Cuál de las siguientes reacciones de partículas no puede ocurrir?
 - $p + p \rightarrow 2\gamma$
 - $\pi^0 + n \rightarrow K_s^0 + \Sigma^0$
 - $\gamma + p \rightarrow n + \pi^0$
 - $\Omega^- \rightarrow 2\Xi^- + e^+ + \nu_e$
 - $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$
- ¿Cuál de las siguientes reacciones de partículas no puede ocurrir?
 - $p + n \rightarrow p + p + \bar{p}$
 - $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
 - $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
 - $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 - $\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\tau + \bar{\nu}_e$
- ¿Cuál de las siguientes condiciones del combustible se requieren en la operación de un reactor de fusión auto-sostenida controlada? a) El combustible debe estar a una temperatura suficientemente alta. b) El combustible debe ser radiactivo. c) El combustible debe estar a una densidad suficientemente alta. d) El combustible debe confinarse a un periodo suficientemente largo. e) El combustible debe constar solamente de los isótopos de hidrógeno.
- Si una partícula alfa y un electrón tienen la misma energía cinética, ¿cuál sufre la desviación más grande cuando pasa a través de un campo magnético? a) La partícula alfa. b) El electrón. c) Se someten a la misma desviación. d) Ninguno se desvía.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Si electrones de alta energía, con longitudes de onda de De Broglie menores que el tamaño del núcleo, se dispersan de los núcleos, el comportamiento de los electrones es consistente con la dispersión de estructuras muy masivas mucho menores en tamaño que el núcleo, llamadas quarks. ¿Cómo es que este comportamiento es similar a un experimento clásico que detectó pequeñas estructuras en un átomo?
- ¿Qué factores hacen difícil lograr una reacción de fusión?
- Se sabe que existen bariones con carga doble. ¿Por qué no hay mesones con carga doble?
- ¿Por qué un reactor de fusión produciría menos desecho radiactivo que un reactor de fisión?
- ¿Por qué los átomos no existieron sino hasta cientos de miles de años después del Big Bang?
- Partículas conocidas como resonancias tienen vidas medias muy cortas, en el orden de 10^{-23} s. ¿Supondría que son hadrones o leptones? Explique.

7. Describa el modelo de quark de hadrones, incluidas las propiedades de los quarks.
8. En la teoría de la cromodinámica cuántica, los quarks vienen en tres colores. ¿Cómo justificaría el enunciado “todos los bariones y mesones son incoloros”?
9. Describa las propiedades de bariones y mesones y las diferencias importantes entre ellos.
10. Identifique la partícula que decae en la tabla 30.2 que ocurre mediante la interacción electromagnética. Justifique su respuesta.
11. Los kaones decaen en estados finales que no contienen protones o neutrones. ¿Cuál es el número bariónico de los kaones?
12. ¿Por qué un neutrón es estable dentro del núcleo? (En el espacio libre el neutrón decae en 900 s.)
13. Analice las ventajas y desventajas de los reactores de fisión desde el punto de vista de la seguridad, la contaminación y los recursos. Haga una comparación con la energía generada por la quema de combustibles fósiles.

PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch it.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

I. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master it disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

30.1 Fisión nuclear

1. **M** Si el promedio de energía liberada en un evento de fisión es 208 MeV, calcule el número total de eventos de fisión necesarios para operar un foco de 100 W durante 1.0 h.
2. Encuentre la energía liberada en la reacción de fisión

$${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{40}^{98}\text{Zr} + {}_{52}^{135}\text{Te} + 3{}_0^1\text{n}$$
 Las masas atómicas de los productos de fisión son 97.9120 u para ${}_{40}^{98}\text{Zr}$ y 134.9087 u para ${}_{52}^{135}\text{Te}$.
3. Encuentre la energía liberada en la reacción de fisión

$${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{38}^{88}\text{Sr} + {}_{54}^{136}\text{Xe} + 12{}_0^1\text{n}$$
4. Según una estimación, la primera bomba atómica liberó una energía equivalente a 20 kilotonnes de TNT. Si una tonelada de TNT libera aproximadamente 4.0×10^9 J, ¿qué cantidad de uranio se perdió a través de la fisión de esta bomba? (Suponga que 208 MeV fueron liberados por la fisión.)
5. **M** Suponga que el suelo ordinario contiene uranio natural en cantidades de una parte por millón por masa. a) ¿Cuánto uranio hay en la parte superior de 1.00 m de suelo en un terreno con una superficie de un acre (43560 pies^2), suponiendo que la gravedad específica del suelo es 4.00? b) ¿Cuánto del isótopo ${}^{235}\text{U}$, adecuado para combustible de reactor nuclear, hay en este suelo? *Sugerencia:* Véase el apéndice B para la abundancia porcentual de ${}^{235}\text{U}$.
6. Una planta eléctrica de fisión nuclear típica produce alrededor de 1.00 GW de potencia eléctrica. Suponga que la planta tiene una eficiencia global de 40.0% y cada fisión produce 200 MeV de energía térmica. Calcule la masa de ${}^{235}\text{U}$ consumida cada día.
7. Con el fin de minimizar la fuga de neutrones de un reactor, la proporción de la superficie con el volumen debe ser lo más pequeña posible. Suponga que una esfera de radio a y un cubo tienen el mismo volumen. Encuentre la relación entre superficie y volumen para a) la esfera y

b) el cubo. c) ¿Cuál de estas formas de reactor tendría la fuga mínima?

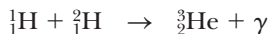
8. **PG** De acuerdo con una estimación, existen 4.4×10^6 toneladas métricas de reservas de uranio mundiales extraíbles a \$130/kg o menos. Alrededor de 0.7% del uranio que ocurren de manera natural es el isótopo fisionable ${}^{235}\text{U}$. a) Calcule la masa de ${}^{235}\text{U}$ en esta reserva, en gramos. b) Encuentre el número de moles de ${}^{235}\text{U}$ y conviértela a un número de átomos. c) Suponiendo que de cada reacción se obtiene 208 MeV y que toda esta energía se captura, calcule la energía total que se puede extraer de las reservas, en joules. d) Suponiendo que el consumo de potencia mundial es constante en 1.5×10^{13} J/s, ¿durante cuántos años las reservas de uranio podrían abastecer todas las necesidades de energía del mundo? e) ¿Qué conclusión se puede extraer?
9. **M** Una casa completamente eléctrica usa aproximadamente 2000 kWh de energía eléctrica por mes. ¿Cuánto uranio-235 se requeriría para abastecer esta casa con sus necesidades de energía durante un año? Suponga 100% de eficiencia de conversión y 208 MeV liberados por fisión.
10. **C/C** El agua de mar contiene 3 mg de uranio por metro cúbico. a) Dado que la profundidad promedio del océano es de alrededor de 4 km y el agua cubre dos tercios de la superficie de la Tierra, estime la cantidad de uranio disuelta en el océano. b) Estime cuánto tiempo este uranio podría abastecer las necesidades de energía del mundo al uso actual de 1.5×10^{13} J/s. c) ¿De dónde proviene el uranio disuelto? ¿Es una fuente de energía renovable? ¿El uranio del océano puede satisfacer los requerimientos de energía? Analice. *Nota:* Los reactores reproductores aumentan la eficiencia del combustible nuclear utilizado en aproximadamente dos órdenes de magnitud.

30.2 Fusión nuclear

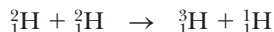
11. Cuando una estrella agota su combustible de hidrógeno, puede fundir otros combustibles nucleares. A temperaturas

por arriba de 1.0×10^8 K, puede ocurrir fusión de helio. Escriba las ecuaciones para los siguientes procesos. a) Dos partículas alfa se fusionan para producir un núcleo A y un rayo gamma. ¿Cuál es el núcleo A ? b) El núcleo A absorbe una partícula alfa para producir un núcleo B y un rayo gamma. ¿Cuál es el núcleo B ? c) Encuentre la energía total liberada en las reacciones dadas en los incisos a) y b). *Nota:* La masa de ${}^8_4\text{Be} = 8.005\,305$ u.

12. Encuentre la energía liberada en la reacción de fusión



13. Encuentre la energía liberada en la reacción de fusión



14. **PG** Otra serie de reacciones nucleares que pueden producir energía en el interior de las estrellas es el ciclo descrito a continuación. Este ciclo es más eficiente cuando la temperatura central en una estrella está por arriba de 1.6×10^7 K. Dado que la temperatura en el centro del Sol sólo es de 1.5×10^7 K, el siguiente ciclo produce menos de 10% de la energía del Sol. a) ${}^{12}_6\text{C}$ absorbe un protón de alta energía. Otro núcleo, A , se produce en la reacción, junto con un rayo gamma. Identifique el núcleo A . b) El núcleo A decae mediante emisión de positrón para formar el núcleo B . Identifique el núcleo B . c) El núcleo B absorbe un protón para producir el núcleo C y un rayo gamma. Identifique el núcleo C . d) El núcleo C absorbe un protón para producir el núcleo D y un rayo gamma. Identifique el núcleo D . e) El núcleo D decae mediante emisión de positrón para producir el núcleo E . Identifique el núcleo E . f) El núcleo E absorbe un protón para producir el núcleo F más una partícula alfa. ¿Cuál es el núcleo F ? *Nota:* Si el núcleo F no es ${}^{12}_6\text{C}$ (esto es, el núcleo con el que comenzó), cometió un error y debe revisar la secuencia de eventos.

15. Suponga que un deuterón y un tritón están en reposo cuando se fusionan de acuerdo con la reacción



Si desprecia correcciones relativistas, determine la energía cinética que adquiere el neutrón.

16. **CIC** Una reacción que se ha considerado como fuente de energía es la absorción de un protón por parte de un núcleo de boro-11, para producir tres partículas alfa:



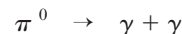
Esta reacción es una atractiva posibilidad porque el boro se obtiene fácilmente de la corteza terrestre. Una desventaja es que los protones y los núcleos de boro deben tener grandes energías cinéticas para que tenga lugar la reacción. Este requisito contrasta con la iniciación de la fisión de uranio mediante neutrones lentos. a) ¿Cuánta energía se libera en cada reacción? b) ¿Por qué las partículas reactantes deben tener altas energías cinéticas?

30.4 Positrones y otras antipartículas

17. Un fotón produce un par protón-antiprotón de acuerdo con la reacción $\gamma \rightarrow \text{p} + \bar{\text{p}}$. ¿Cuál es la mínima frecuencia posible del fotón? ¿Cuál es su longitud de onda?

18. **M** Un fotón, con una energía de 2.09 GeV, crea un par protón-antiprotón en el cual el protón tiene una energía cinética de 95.0 MeV. ¿Cuál es la energía cinética del antiprotón?

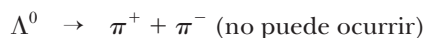
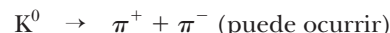
19. Un pión neutro en reposo decae en dos fotones de acuerdo con



Encuentre la energía, cantidad de movimiento y frecuencia de cada fotón.

30.6 Leyes de conservación

20. Para las siguientes dos reacciones, la primera puede ocurrir pero la segunda no. Explique.



21. Cada una de las siguientes reacciones está prohibida. Determine una ley de conservación que es violada por cada reacción.

- a) $\text{p} + \bar{\text{p}} \rightarrow \mu^+ + e^-$ d) $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{p} + \text{p} + \text{n}$
 b) $\pi^- + \text{p} \rightarrow \text{p} + \pi^+$ e) $\gamma + \text{p} \rightarrow \text{n} + \pi^0$
 c) $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{p} + \pi^+$

22. Determine cuál de las reacciones puede ocurrir a continuación. Para aquellas que no pueden ocurrir, determine la ley de la conservación (o leyes) que cada una viola.

- a) $\text{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ d) $\text{n} \rightarrow \text{p} + e^- + \bar{\nu}_e$
 b) $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{p} + \text{p} + \pi^0$ e) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \text{n}$
 c) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

23. ¿Cuál de los siguientes procesos son permitidos por la interacción fuerte, la interacción electromagnética, la interacción débil o ninguna interacción en absoluto?

- a) $\pi^- + \text{p} \rightarrow 2\eta^0$ d) $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + \pi^0$
 b) $K^- + \text{n} \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$ e) $\eta^0 \rightarrow 2\gamma$
 c) $K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$

24. **CIC** a) Demuestre que el número bariónico y la carga se conservan en las siguientes reacciones de un pión con un protón:

- (1) $\pi^+ + \text{p} \rightarrow K^+ + \Sigma^+$
 (2) $\pi^+ + \text{p} \rightarrow \pi^+ + \Sigma^+$

b) La primera reacción se observa, pero la segunda nunca ocurre. Explique estas observaciones. c) ¿La segunda reacción podría ocurrir si se crea una tercera partícula? Si es así, ¿cuáles partículas en la tabla 30.2 pueden posibilitarla? ¿La reacción requeriría menos energía o más energía que la reacción de la ecuación 1)? ¿Por qué?

25. Determine si la extrañeza se conserva en las siguientes desintegraciones y reacciones.

- a) $\Lambda^0 \rightarrow \text{p} + \pi^-$ d) $\pi^- + \text{p} \rightarrow \pi^- + \Sigma^+$
 b) $\pi^- + \text{p} \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ e) $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
 c) $\bar{\text{p}} + \text{p} \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \Lambda^0$ f) $\Xi^0 \rightarrow \text{p} + \pi^-$

30.8 Quarks y color

26. La composición de quarks del protón es uud, mientras que la del neutrón es udd. Demuestre que la carga, número bariónico y extrañeza de estas partículas es igual a las sumas de estos números para sus quarks constituyentes.
27. **M** Encuentre el número de electrones y de cada especie de quark, en 1 L de agua.
28. Las composiciones de quarks de las partículas K^0 y Λ^0 son $d\bar{s}$ y uds, respectivamente. Demuestre que la carga, número bariónico y extrañeza de estas partículas es igual a la suma de estos números para sus quarks constituyentes.
29. Identifique las partículas que corresponden a los quarks a) suu, b) $\bar{u}d$, c) $\bar{s}d$ y d) ssd.
30. ¿Cuál es la carga eléctrica de los bariones con las composiciones de quarks a) $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ y b) $\bar{u}d\bar{d}$? ¿Cómo se llaman estos bariones?

Problemas adicionales

31. Una partícula Σ^0 que viaja a través de la materia golpea un protón y una Σ^+ un rayo gamma, así como una tercera partícula aparecen. Use el modelo de quark de cada uno para determinar la identidad de la tercera partícula.
32. Nombre al menos una ley de conservación que evita la realización de cada una de las siguientes reacciones.
- a) $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0$
 b) $\mu^- \rightarrow \pi^- + \nu_e$
 c) $p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$
33. Encuentre la energía que se libera en la reacción de fusión
- $${}^1_1\text{H} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + e^+ + \nu$$
34. Ocasionalmente, muones de alta energía chocan con electrones y producen dos neutrinos, de acuerdo con la reacción $\mu^+ + e^- \rightarrow 2\nu$. ¿Qué tipo de neutrinos son?
35. Escriba en (?) la partícula que falta. Suponga que a) se produce a través de la interacción fuerte, mientras que b) y c) implican la interacción débil.
- a) $K^+ + p \rightarrow ? + p$
 b) $\Omega^- \rightarrow ? + \pi^-$
 c) $K^+ \rightarrow ? + \mu^+ + \nu_\mu$
36. Dos protones se aproximan uno hacia el otro con 70.4 MeV de energía cinética y se involucran en una reacción en la que un protón y un pión positivo salen en reposo. ¿Cuál tercera partícula, obviamente sin carga y, por lo tanto, difícil de detectar, se debió crear?
37. Un neutrón de 2.0 MeV se emite en un reactor de fisión. Si el neutrón pierde la mitad de su energía cinética en cada colisión con un átomo moderador, ¿cuántas colisiones debe experimentar para llegar a una energía asociada con un gas a temperatura ambiente de 20.0 °C?
38. **CIC** La reacción de fusión ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ libera 3.27 MeV de energía. Si un reactor de fusión opera

estrictamente sobre la base de esta reacción, a) ¿cuánta energía podría producir al reaccionar por completo 1 kg de deuterio? b) A ocho centavos el kilovatio-hora, ¿cuánto costaría la energía producida? c) El agua pesada (D_2O) cuesta alrededor de \$300 por kilogramo. Si desprecia el costo de separar el deuterio del oxígeno vía electrólisis, ¿cuánto cuesta 1 kg de deuterio, si se deriva de D_2O ? d) ¿Sería efectivo en costo utilizar deuterio como fuente de energía? Analice y suponga que el costo de la producción de energía es nueve décimos el valor de la energía generada.

39. a) Demuestre que alrededor de 1.0×10^{10} J se liberarían de la fusión de los deuterones en 1.0 gal de agua. Observe que 1 de cada 6500 átomos de hidrógeno es un deuterón. b) El promedio de consumo de energía de una persona que vive en Estados Unidos es de más o menos 1.0×10^4 J/s (una potencia promedio de 10 kW). A esta razón, ¿durante cuánto tiempo se abastecerían las necesidades de energía de una persona por la fusión de los deuterones en 1.0 g de agua? Suponga que la energía liberada por deuterón es 1.64 MeV.
40. Los océanos tienen un volumen de 317 millones de kilómetros cúbicos y contienen 1.32×10^{21} kg de agua. De todos los núcleos de hidrógeno en el agua, 0.0156% son de deuterio. a) Si todos estos núcleos de deuterio se fusionan en helio a través de la primera reacción en la ecuación 30.4, determine la cantidad total de energía que podría ser liberada. b) El consumo mundial actual de energía eléctrica es de aproximadamente 7.00×10^{12} W. Si el consumo fuera 100 veces mayor, ¿para cuántos años sería la fuente de energía calculada en el inciso a)?

41. Un mesón π en reposo decae de acuerdo con

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

¿Cuál es la energía que se lleva el neutrino? Suponga que el neutrino no tiene masa y se mueve con la rapidez de la luz. Considere $m_\pi c^2 = 139.6$ MeV y $m_\mu c^2 = 105.7$ MeV. *Nota:* Use la relatividad; vea la ecuación 26.13.

42. La reacción $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ ocurre con alta probabilidad, mientras que la reacción $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$ nunca ocurre. Analice estas reacciones a nivel del quark. Demuestre que la primera reacción conserva el número total de cada tipo de quark y la segunda reacción no lo hace.
43. El Sol radia energía a razón de 3.85×10^{26} W. Suponga que la reacción neta

$$4p + 2e^- \rightarrow \alpha + 2\nu_e + 6\gamma$$

representa toda la energía liberada. Calcule el número de protones fusionados por segundo. *Nota:* Recuerde que una partícula alfa es un núcleo de helio-4.

44. Una partícula K^0 en reposo se desintegra en un π^+ y un π^- . La masa del K^0 es 497.7 MeV/ c^2 y la masa de cada pión es 139.6 MeV/ c^2 . ¿Cuál será la velocidad de cada uno de los piones?

A.1 Notación matemática

A lo largo de este libro se utilizan muchos símbolos matemáticos que aquí se describen ejemplificando su uso.

El signo de igual: =

En matemáticas, el signo = denota la igualdad de dos cantidades. En Física, establece una relación entre diferentes conceptos físicos. Un ejemplo es la famosa ecuación $E = mc^2$ que dice que una masa m dada, *medida en kilogramos*, es equivalente a cierta cantidad de energía, E , *medida en joules*. El cuadrado de la velocidad de la luz, c^2 , puede considerarse una constante de proporcionalidad necesaria, porque las unidades se eligen para cantidades dadas, de manera arbitraria por razones históricas.

Proporcionalidad: \propto

El símbolo \propto denota una proporcionalidad. Este símbolo se utiliza cuando se establece una relación más que una igualdad matemática exacta. Por ejemplo, podríamos escribir $E \propto m$, que dice en palabras que “la energía E asociada con un objeto es proporcional a la masa m del objeto.” Otro ejemplo se encuentra en la energía cinética, en la que la energía asociada al movimiento de un objeto, definida por $EC = \frac{1}{2}mv^2$, donde m es otra vez la masa y v es la velocidad. Ambas, m y v , son variables en esta expresión. Aquí, la energía cinética EC es proporcional a m , $EC \propto m$, y al mismo tiempo EC , es proporcional al cuadrado de la velocidad, $EC \propto v^2$. Otro término usado aquí es “directamente proporcional.” La densidad ρ de un objeto se relaciona con su masa y volumen por $\rho = m/V$. Por lo tanto, se dice que la densidad es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional al volumen.

Desigualdades

El símbolo $<$ significa “es menor que”, y $>$ “mayor que”. Por ejemplo, $\rho_{\text{Fe}} > \rho_{\text{Al}}$ significa que la densidad del hierro, ρ_{Fe} , es mayor que la densidad de aluminio, ρ_{Al} . Si hay una línea debajo del símbolo, existe la posibilidad de igualdad: \leq “menor que o igual a”, mientras que \geq significa “mayor que o igual a”; cualquier velocidad v de una partícula, por ejemplo, es menor o igual a la velocidad de la luz, c : $v \leq c$.

A veces el tamaño de una cantidad determinada difiere considerablemente del tamaño de otra cantidad. Un simple signo de desigualdad no representa enormes diferencias. Para tales casos, el símbolo \ll significa “es mucho menor que” y \gg significa “mucho mayor que”. La masa del Sol, M_{Sol} es mucho mayor que la masa de la tierra, M_{T} : $M_{\text{Sol}} \gg M_{\text{T}}$. La masa de un electrón, m_e , es mucho menor que la masa de un protón, m_p : $m_e \ll m_p$.

Aproximadamente igual: \approx

El símbolo \approx indica que dos cantidades son aproximadamente iguales entre sí. La masa de un protón, m_p , es aproximadamente la misma que la masa de un neutrón, m_n . Esta relación se puede escribir $m_p \approx m_n$.

Equivalencia: \equiv

El símbolo \equiv significa “está definido como”, que es una afirmación diferente que un simple =. Significa que la cantidad de la izquierda —usualmente una simple cantidad— es

otra manera de expresar la cantidad o cantidades de la derecha. La clásica cantidad de movimiento de un objeto, p , está definida como la masa del objeto m veces su velocidad v , de ahí que $p \equiv mv$. Como esta equivalencia es por definición, no hay posibilidad de que p sea igual a alguna otra cosa. En contraste, se puede ver la velocidad v de un objeto bajo aceleración constante, $v = at + v_0$. Esta ecuación no podría escribirse con un signo de equivalencia porque v , en este contexto, no es una cantidad definida ya que se sostiene sólo bajo la condición de que la aceleración sea constante. Sin embargo, la expresión para la cantidad de movimiento es siempre cierta por definición, por lo que es apropiado escribir $p \equiv mv$ para la primera vez que se introduce el concepto. Después que se ha introducido el concepto, un signo de igual ordinario es suficiente.

Diferencias: Δ

La letra griega Δ (delta mayúscula) es un símbolo utilizado para indicar la diferencia en una medición de una cantidad física, usualmente en dos diferentes momentos. El mejor ejemplo, es un desplazamiento a lo largo del eje x , indicado por Δx (que se lee “delta x ”). Observe que Δx no significa el “producto de Δ por x ”. Suponga que una persona que sale a un paseo matinal mide la distancia que recorre a partir de 10 m de la puerta de su casa. Continúa caminando en línea recta y se detiene a 50 m de la puerta. Su cambio de posición durante la caminata es $\Delta x = 50 \text{ m} - 10 \text{ m} = 40 \text{ m}$. Simbólicamente, este desplazamiento se puede escribir como

$$\Delta x = x_f - x_i$$

En esta ecuación x_f es la posición final y x_i es la posición inicial. Hay otros numerosos ejemplos de diferencias en física, tales como la diferencia (o cambio) en la cantidad de movimiento $\Delta p = p_f - p_i$; el cambio en energía cinética $\Delta K = K_f - K_i$ y el cambio de temperatura $\Delta T = T_f - T_i$.

Sumas: Σ

En Física hay a menudo contextos en los cuales es necesario sumar varias cantidades. Una abreviatura útil para representar tal suma es la letra griega Σ (sigma mayúscula). Suponga que deseamos sumar un conjunto de cinco números representados por x_1, x_2, x_3, x_4 y x_5 . En la notación abreviada, escribiríamos la suma como

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = \sum_{i=1}^5 x_i$$

donde el subíndice i de x representa cualquiera de los números del conjunto. Por ejemplo, si hay cinco masas en un sistema m_1, m_2, m_3, m_4 y m_5 , la masa total del sistema $M = m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$, podría expresarse como

$$M = \sum_{i=1}^5 m_i$$

La coordenada en x del centro de masa de las cinco masas, por tanto, podría escribirse como

$$x_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^5 m_i x_i}{M}$$

con expresiones similares para las coordenadas y y z del centro de masa.

Valor absoluto: $||$

La magnitud de una cantidad x , escrita como $|x|$, es simplemente el valor absoluto de esta cantidad. El signo $|x|$ es siempre positivo, sin tener en cuenta el signo de x . Por ejemplo,

si $x = -5$, entonces $|x| = 5$; si $x = 8$, entonces $|x| = 8$. En Física este signo es útil siempre que la magnitud de una cantidad sea más importante que cualquier dirección que pueda estar implicada por un signo.

A.2 Notación científica

Muchas cantidades en ciencia tienen valores muy grandes o muy pequeños. La velocidad de la luz es cerca de 300 000 000 m/s, y la tinta requerida para hacer el punto de una *i* en este libro de texto tiene una masa de cerca de 0.000 000 001 kilogramos. Es muy incómodo leer, escribir, y no perder de vista tales números porque los lugares decimales tienen que ser contados y porque un número con un dígito significativo puede requerir una gran cantidad de ceros. La notación científica es una manera de representar estos números sin tener que poner tantos ceros en el escrito, que, en general, se utilizan solamente para establecer la magnitud del número, no su exactitud. La clave es utilizar potencias de 10. Las potencias no negativas de 10 son:

$$\begin{aligned}10^0 &= 1 \\10^1 &= 10 \\10^2 &= 10 \times 10 = 100 \\10^3 &= 10 \times 10 \times 10 = 1\,000 \\10^4 &= 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10\,000 \\10^5 &= 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 100\,000\end{aligned}$$

y así sucesivamente. El número de lugares decimales del primer dígito en el número y a la izquierda del punto decimal, corresponde a la potencia a la que el 10 está elevado y se le denomina **exponente** de 10. La velocidad de la luz, 300 000 000 m/s, se puede expresar como 3×10^8 m/s. Observe que hay ocho lugares decimales a la derecha del dígito principal, 3, y a la izquierda de donde el punto decimal estaría escrito.

Para números menores que 1, se observa lo siguiente:

$$\begin{aligned}10^{-1} &= \frac{1}{10} = 0.1 \\10^{-2} &= \frac{1}{10 \times 10} = 0.01 \\10^{-3} &= \frac{1}{10 \times 10 \times 10} = 0.001 \\10^{-4} &= \frac{1}{10 \times 10 \times 10 \times 10} = 0.000\,1 \\10^{-5} &= \frac{1}{10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10} = 0.000\,01\end{aligned}$$

En estos casos, el número de lugares decimales a la derecha del punto decimal aumenta e incluye sólo el primer dígito diferente de cero igual al valor del exponente (negativo).

En cuanto a los números que se expresan como potencias de 10 multiplicada por otro número entre 1 y 10, se dice que están en **notación científica**. Por ejemplo, la constante de Coulomb asociada con las fuerzas eléctricas, está dada por $8\,987\,551\,789 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, y su escritura en notación científica es $8.987\,551\,789 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. La constante de Newton de gravitación está dada por $0.000\,000\,000\,066\,731 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, que escrita en notación científica es $6.6731 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$.

Cuando se realizan multiplicaciones con números expresados en notación científica, la siguiente regla es muy útil:

$$10^n \times 10^m = 10^{n+m} \quad \text{[A.1]}$$

donde n y m pueden ser cualquier número (no necesariamente entero). Por ejemplo, $10^2 \times 10^5 = 10^7$. La regla también se aplica si uno de los exponentes es negativo: $10^3 \times 10^{-8} = 10^{-5}$.

Observe que, cuando se efectúan divisiones con números expresados en notación científica,

$$\frac{10^n}{10^m} = 10^n \times 10^{-m} = 10^{n-m} \quad \text{[A.2]}$$

Ejercicios

Con ayuda de las reglas anteriores, verifique las siguientes respuestas:

1. $86\,400 = 8.64 \times 10^4$
2. $9\,816\,762.5 = 9.816\,762\,5 \times 10^6$
3. $0.000\,000\,039\,8 = 3.98 \times 10^{-8}$
4. $(4 \times 10^8)(9 \times 10^9) = 3.6 \times 10^{18}$
5. $(3 \times 10^7)(6 \times 10^{-12}) = 1.8 \times 10^{-4}$
6. $\frac{75 \times 10^{-11}}{5 \times 10^{-3}} = 1.5 \times 10^{-7}$
7. $\frac{(3 \times 10^6)(8 \times 10^{-2})}{(2 \times 10^{17})(6 \times 10^5)} = 2 \times 10^{-18}$

A.3 Álgebra

A. Algunas reglas básicas

Cuando se realizan operaciones algebraicas, se aplican las leyes de la aritmética. Símbolos tales como x , y y z se utilizan generalmente para representar cantidades que no se especifican, y que se conocen como **incógnitas**.

Primero, considere la ecuación

$$8x = 32$$

Si deseamos resolver para x , podemos dividir (o multiplicar) cada lado de la ecuación por el mismo factor sin destruir la igualdad. En este caso, si dividimos ambos lados entre 8, tenemos

$$\begin{aligned} \frac{8x}{8} &= \frac{32}{8} \\ x &= 4 \end{aligned}$$

Luego, considere la ecuación

$$x + 2 = 8$$

En este tipo de expresión, podemos sumar o restar la misma cantidad de cada lado. Si restamos 2 de cada lado, obtenemos

$$\begin{aligned} x + 2 - 2 &= 8 - 2 \\ x &= 6 \end{aligned}$$

En general, si $x + a = b$, entonces, $x = b - a$.

Ahora considere la ecuación

$$\frac{x}{5} = 9$$

Si multiplicamos cada lado por 5, nos queda x del lado izquierdo y 45 en el lado derecho:

$$\begin{aligned} \left(\frac{x}{5}\right)(5) &= 9 \times 5 \\ x &= 45 \end{aligned}$$

En todos los casos, **siempre que se lleve a cabo una operación en el lado izquierdo de la igualdad, la misma debe realizarse en el lado derecho.**

Recuerde las siguientes reglas para la multiplicación, división, suma y resta de fracciones, donde a , b y c son tres números:

	Regla	Ejemplo
Multiplicación	$\left(\frac{a}{b}\right)\left(\frac{c}{d}\right) = \frac{ac}{bd}$	$\left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{4}{5}\right) = \frac{8}{15}$
División	$\frac{(a/b)}{(c/d)} = \frac{ad}{bc}$	$\frac{2/3}{4/5} = \frac{(2)(5)}{(4)(3)} = \frac{10}{12} = \frac{5}{6}$
Suma	$\frac{a}{b} \pm \frac{c}{d} = \frac{ad \pm bc}{bd}$	$\frac{2}{3} - \frac{4}{5} = \frac{(2)(5) - (4)(3)}{(3)(5)} = -\frac{2}{15}$

En Física, muy a menudo necesitamos manipular expresiones algebraicas simbólicas, un proceso que para la mayoría de los estudiantes debe ser poco familiar. Sin embargo, comprender este proceso es muy importante porque sólo sustituir números en una ecuación puede oscurecer demasiado los significados. Los dos ejemplos siguientes ilustran cómo se realizan estas clases de manipulaciones algebraicas.

■ EJEMPLO

Una bola cae desde la parte superior de un edificio de 50.0 m de altura. ¿Cuánto tiempo le toma a la bola caer a una altura de 25.0 m?

SOLUCIÓN Primero, escriba la ecuación para esta situación:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

Aquí, $a = -9.80 \text{ m/s}^2$ es la aceleración de la gravedad que causa la caída de la bola, $v_0 = 0$ es la velocidad inicial y $x_0 = 50.0 \text{ m}$ es la posición inicial. Sustituya sólo la velocidad inicial $v_0 = 0$ para obtener la siguiente ecuación:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + x_0$$

Esta ecuación debe ser resuelta para t . Reste x_0 de ambos lados de la ecuación:

$$x - x_0 = \frac{1}{2}at^2 + x_0 - x_0 = \frac{1}{2}at^2$$

Multiplique ambos lados por $2/a$:

$$\left(\frac{2}{a}\right)(x - x_0) = \left(\frac{2}{a}\right)\frac{1}{2}at^2 = t^2$$

Se acostumbra tener al valor deseado en el lado izquierdo, así que escribiremos a t de ese lado, después de sacar la raíz cuadrada de ambos lados:

$$t = \pm \sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)(x - x_0)}$$

donde sólo la raíz positiva tiene sentido. Ahora, puede sustituir los valores para obtener la respuesta final.

■ EJEMPLO

Un bloque de masa m se desliza sobre una superficie sin fricción en la dirección positiva de x . Se encuentra en un pedazo de tela rugosa que tiene un coeficiente de fricción cinética, μ_k . Si ella tela rugosa tiene longitud Δx , encuentre la rapidez del bloque después de abandonar la tela.

SOLUCIÓN Utilizando el teorema del trabajo y la energía, tenemos

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -\mu_k mg \Delta x$$

Sumando $\frac{1}{2}mv_0^2$ a ambos lados:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 - \mu_k mg \Delta x$$

(continúa)

Multiplicando ambos lados por $2/m$:

$$v^2 = v_0^2 - 2\mu_k g \Delta x$$

Finalmente, tomamos la raíz cuadrada de ambos lados. Como el bloque se está deslizando en la dirección positiva de x , se elige la raíz cuadrada positiva:

$$v = \sqrt{v_0^2 - 2\mu_k g \Delta x}$$

Ejercicios

En los ejercicios 1–4 resuelva para x :

1. $a = \frac{1}{1+x}$

2. $3x - 5 = 13$

3. $ax - 5 = bx + 2$

4. $\frac{5}{2x+6} = \frac{3}{4x+8}$

5. Resuelva la siguiente ecuación para v_1 :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Respuesta: $v_1 = \pm \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2 - P_1) + v_2^2}$

Respuestas

$x = \frac{1-a}{a}$

$x = 6$

$x = \frac{7}{a-b}$

$x = -\frac{11}{7}$

B. Potencias

Cuando se multiplican potencias de una cantidad dada x , se aplica la siguiente regla:

$$x^n x^m = x^{n+m} \quad \text{[A.3]}$$

Por ejemplo, $x^2 x^4 = x^{2+4} = x^6$.

Cuando se dividen las potencias de una cantidad dada, la regla es:

$$\frac{x^n}{x^m} = x^{n-m} \quad \text{[A.4]}$$

Por ejemplo, $x^8/x^2 = x^{8-2} = x^6$.

Una potencia fraccionaria, como $\frac{1}{3}$, corresponde a una raíz como sigue:

$$x^{1/n} = \sqrt[n]{x} \quad \text{[A.5]}$$

Por ejemplo, $4^{1/3} = \sqrt[3]{4} = 1.5874$. (Una calculadora científica es útil para cálculos como estos.)

Finalmente, cualquier cantidad x^n elevada a la m -ésima potencia es

$$(x^n)^m = x^{nm} \quad \text{[A.6]}$$

La tabla A.1 resume las reglas de los exponentes.

TABLA A.1 Reglas de los exponentes

$x^0 = 1$
$x^1 = x$
$x^n x^m = x^{n+m}$
$x^n/x^m = x^{n-m}$
$x^{1/n} = \sqrt[n]{x}$
$(x^n)^m = x^{nm}$

Ejercicios

Verifique lo siguiente:

1. $3^2 \times 3^3 = 243$

2. $x^5 x^{-8} = x^{-3}$

3. $x^{10}/x^{-5} = x^{15}$

4. $5^{1/3} = 1.709975$ (Use su calculadora).

5. $60^{1/4} = 2.783158$ (Use su calculadora).

6. $(x^4)^3 = x^{12}$

C. Factorización

Algunas fórmulas útiles para factorizar una ecuación son:

$$\begin{aligned} ax + ay + az &= a(x + y + z) && \text{factor común} \\ a^2 + 2ab + b^2 &= (a + b)^2 && \text{cuadrado perfecto} \\ a^2 - b^2 &= (a + b)(a - b) && \text{diferencia de cuadrados} \end{aligned}$$

D. Ecuaciones cuadráticas

La forma general de una ecuación cuadrática es:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad \text{[A.7]}$$

donde x es la cantidad desconocida y a , b y c , son factores numéricos que se conocen como coeficientes de la ecuación. Esta ecuación tiene dos raíces dadas por

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{[A.8]}$$

Si $b^2 - 4ac > 0$, las raíces serán reales.

■ EJEMPLO

La ecuación $x^2 + 5x + 4 = 0$ tiene las siguientes raíces que corresponden a los dos signos del término de la raíz cuadrada:

$$\begin{aligned} x &= \frac{-5 \pm \sqrt{5^2 - (4)(1)(4)}}{2(1)} = \frac{-5 \pm \sqrt{9}}{2} = \frac{-5 \pm 3}{2} \\ x_1 &= \frac{-5 + 3}{2} = -1 \quad x_2 = \frac{-5 - 3}{2} = -4 \end{aligned}$$

donde x_1 se refiere a la raíz correspondiente al signo positivo y x_2 a la raíz correspondiente al signo negativo.

■ EJEMPLO

Una bola se lanza hacia arriba a 16.0 m/s. Utilice la fórmula cuadrática para determinar el tiempo necesario para que alcance una altura de 8.00 m por arriba del punto de lanzamiento.

SOLUCIÓN Del estudio de balística en el capítulo 2, podemos escribir

$$(1) \quad x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

La aceleración se debe a la gravedad, dada por $a = -9.80 \text{ m/s}^2$; la velocidad inicial es $v_0 = 16.0 \text{ m/s}$; y la posición inicial en el punto de lanzamiento es $x_0 = 0$. Sustituya estos valores en la ecuación (1) con $x = 8.00 \text{ m}$, para obtener

$$x = -4.90t^2 + 16.00t = 8.00$$

donde se ha suprimido las unidades por razones de facilidad matemática. Reacomodando esta expresión en la forma estándar de la ecuación A.7:

$$-4.90t^2 + 16.00t - 8.00 = 0$$

La ecuación es cuadrática en t , con $a = -4.9$; $b = 16$ y $c = -8.00$. Sustituya estos valores en la ecuación A.8:

$$\begin{aligned} t &= \frac{-16.0 \pm \sqrt{16^2 - 4(-4.90)(-8.00)}}{2(-4.90)} = \frac{-16.0 \pm \sqrt{99.2}}{-9.80} \\ &= 1.63 \mp \frac{\sqrt{99.2}}{9.80} = 0.614 \text{ s}, 2.65 \text{ s} \end{aligned}$$

Ambas soluciones son válidas en este caso, ya que el punto de interés se alcanza en dos momentos: uno al subir y el otro al bajar.

Ejercicios

Resuelva las siguientes ecuaciones cuadráticas:

Respuestas

1. $x^2 + 2x - 3 = 0$ $x_1 = 1$ $x_2 = -3$
2. $2x^2 - 5x + 2 = 0$ $x_1 = 2$ $x_2 = \frac{1}{2}$
3. $2x^2 - 4x - 9 = 0$ $x_1 = 1 + \sqrt{22}/2$ $x_2 = 1 - \sqrt{22}/2$

4. Repita el ejemplo balístico para una altura de 10.0 m por encima del punto de lanzamiento.
 Respuestas: $t_1 = 0.842$ s $t_2 = 2.42$ s

E. Ecuaciones lineales

Una ecuación lineal tiene la forma

$$y = mx + b \quad \text{[A.9]}$$

donde m y b son constantes. Esta clase de ecuación se llama lineal porque el gráfico de y contra x es una línea recta, como se ve en la figura A.1. La constante b , llamada la intersección con y , representa el valor de y en el cual la línea recta corta al eje y . La constante m es igual a la pendiente de la línea recta. Si dos puntos en la línea recta son especificados por las coordenadas (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , como en la figura A.1, la pendiente de la línea recta puede ser expresada como

$$\text{Pendiente} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{[A.10]}$$

Observe que m y b pueden tener valores positivos o negativos. Si $m > 0$, la línea recta tiene una pendiente positiva, como en la figura A.1. Si $m < 0$, la línea recta tiene una pendiente negativa. En la figura A.1, m y b son positivos. Otras tres posibles situaciones se muestran en la figura A.2.

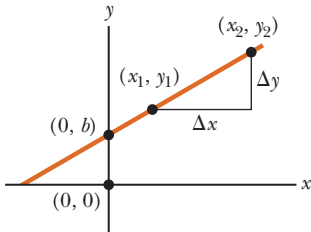


Figura A.1

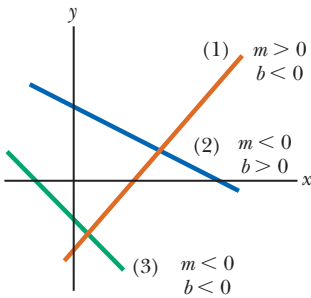


Figura A.2

EJEMPLO

Suponga que la resistencia eléctrica de un alambre de metal es 5.00Ω a una temperatura de 20.0°C y 6.14Ω a 80.0°C . Si se supone que la resistencia cambia linealmente, ¿cuál es la resistencia del alambre a 60.0°C ?

SOLUCIÓN Encuentre la ecuación de la línea recta que describe la resistencia R y después sustituya la nueva temperatura en él. Dos puntos en el gráfico de la resistencia contra temperatura, $(20.0^\circ\text{C}, 5.00 \Omega)$ y $(80.0^\circ\text{C}, 6.14 \Omega)$, permiten el cálculo de la pendiente:

$$(1) \quad m = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{6.14 \Omega - 5.00 \Omega}{80.0^\circ\text{C} - 20.0^\circ\text{C}} = 1.90 \times 10^{-2} \Omega/^\circ\text{C}$$

Ahora utilice la ecuación punto pendiente de una recta, con la pendiente m y $(20.0^\circ\text{C}, 5.00 \Omega)$:

$$(2) \quad R - R_0 = m(T - T_0)$$

$$(3) \quad R - 5.00 \Omega = (1.90 \times 10^{-2} \Omega/^\circ\text{C})(T - 20.0^\circ\text{C})$$

Finalmente, sustituya $T = 60.0^\circ\text{C}$ en la ecuación (3) y resuelva para R , obteniendo $R = 5.76 \Omega$.

Ejercicios

1. Dibuje las gráficas de las siguientes líneas rectas:
 a) $y = 5x + 3$ b) $y = -2x + 4$ c) $y = -3x - 6$
2. Encuentre las pendientes de las líneas rectas descritas en el ejercicio 1.
 Respuestas: a) 5 b) -2 c) -3

3. Encuentre las pendientes de las líneas rectas que pasan a través de los siguientes conjuntos de puntos: **a)** $(0, -4)$ y $(4, 2)$ **b)** $(0, 0)$ y $(2, -5)$ **c)** $(-5, 2)$ y $(4, -2)$.

Respuestas: **a)** $3/2$ **b)** $-5/2$ **c)** $-4/9$

4. Suponga que en un experimento se obtienen las medidas de los siguientes desplazamientos (en metros) del equilibrio de un resorte vertical debido a la adadura de cargas (en newtons): $(0.025 \text{ m}, 22.0 \text{ N})$, $(0.075 \text{ m}, 66.0 \text{ N})$. Encuentre la constante del resorte, que es la pendiente de la línea recta en la gráfica del peso contra el desplazamiento.

Respuesta: 880 N/m

F. Solución de ecuaciones lineales simultáneas

Considere la ecuación $3x + 5y = 15$, con dos incógnitas, x y y . Esta ecuación no tiene una solución única. Por ejemplo, observe que $(x = 0, y = 3)$, $(x = 5, y = 0)$ y $(x = 2, y = 9/5)$ son soluciones de esta ecuación.

Si un problema tiene dos incógnitas, una solución única es posible solamente si tenemos dos ecuaciones. Generalmente si un problema tiene n incógnitas, su solución requiere de n ecuaciones. Para resolver dos ecuaciones simultáneas que involucran dos incógnitas, x y y , resolvemos una de las ecuaciones para x en términos de y , y sustituimos esta expresión en la otra ecuación.

■ EJEMPLO

Resuelva las dos siguientes ecuaciones simultáneas:

$$(1) \quad 5x + y = -8 \quad (2) \quad 2x - 2y = 4$$

SOLUCIÓN De la ecuación (2) encontramos que $x = y + 2$. Sustituyendo en la ecuación (1) se obtiene

$$\begin{aligned} 5(y + 2) + y &= -8 \\ 6y &= -18 \\ y &= -3 \\ x = y + 2 &= -1 \end{aligned}$$

SOLUCIÓN ALTERNATIVA Multiplique cada término en la ecuación (1) por el factor 2 y sume el resultado a la ecuación (2):

$$\begin{array}{r} 10x + 2y = -16 \\ 2x - 2y = 4 \\ \hline 12x = -12 \\ x = -1 \\ y = x - 2 = -3 \end{array}$$

Dos ecuaciones lineales que contienen dos incógnitas también se pueden resolver por un método gráfico. Si las líneas rectas que corresponden a las dos ecuaciones se trazan en un sistema coordenado convencional, la intersección de las dos líneas representa la solución. Por ejemplo, considere las dos ecuaciones

$$\begin{aligned} x - y &= 2 \\ x - 2y &= -1 \end{aligned}$$

Estas ecuaciones se trazan en la figura A.3. La intersección de las dos rectas tiene las coordenadas $x = 5$, $y = 3$, que representa la solución de las ecuaciones. Usted debe comprobar esta solución por la técnica analítica discutida arriba.

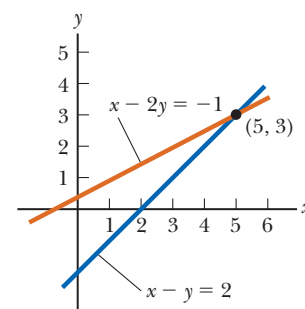


Figura A.3

EJEMPLO

Un bloque de masa $m = 2.00$ kg se desplaza en la dirección positiva de x a $v_i = 5.00$ m/s, mientras que un segundo bloque de masa $M = 4.00$ kg choca con el primer bloque viajando en la dirección x positiva a 2.00 m/s. La superficie es sin fricción. ¿Cuáles son las velocidades de los bloques después de la colisión, si ésta es perfectamente elástica?

SOLUCIÓN Como puede observar en el capítulo 6, una colisión perfectamente elástica implica las ecuaciones para la cantidad de movimiento y la energía. Con álgebra, la ecuación de la energía, que es cuadrática en v , se puede modificar como ecuación lineal. Las dos ecuaciones están dadas por

$$(1) \quad mv_i + MV_i = mv_f + MV_f$$

$$(2) \quad v_i - V_i = -(v_f - V_f)$$

Sustituya las cantidades conocidas $v_i = 5.00$ m/s y $V_i = 2.00$ m/s en las ecuaciones (1) y (2):

$$(3) \quad 18 = 2v_f + 4V_f$$

$$(4) \quad 3 = -v_f + V_f$$

Multiplique la ecuación (4) por 2 y sume a la ecuación (3):

$$18 = 2v_f + 4V_f$$

$$\underline{6 = -2v_f + 2V_f}$$

$$24 = 6V_f \quad \rightarrow \quad V_f = 4.00 \text{ m/s}$$

Sustituyendo la solución para V_f regresando a la ecuación (4) nos conduce a $v_f = 1.00$ m/s.

Ejercicios

Resuelva los siguientes pares de ecuaciones simultáneas que involucran dos incógnitas:

Respuestas

- | | |
|------------------------------------|----------------------|
| 1. $x + y = 8$
$x - y = 2$ | $x = 5, y = 3$ |
| 2. $98 - T = 10a$
$T - 49 = 5a$ | $T = 65.3, a = 3.27$ |
| 3. $6x + 2y = 6$
$8x - 4y = 28$ | $x = 2, y = -3$ |

G. Logaritmos y exponenciales

Suponga que una cantidad x está expresada como una potencia de alguna cantidad a :

$$x = a^y \quad \text{[A.11]}$$

El número a se llama **base**. El **logaritmo** de x con respecto a la base a es igual al exponente al cual debe elevarse la base a fin de satisfacer la expresión $x = a^y$:

$$y = \log_a x \quad \text{[A.12]}$$

Inversamente, el **antilogaritmo** de y es el número x :

$$x = \text{antilog}_a y \quad \text{[A.13]}$$

La expresión antilog es de hecho, idéntica a la expresión exponencial de la ecuación A.11, la cual es preferida por razones prácticas.

En la práctica, las dos bases de uso más frecuente son la base 10, llamada base del logaritmo **común**, y base $e = 2.718$. . . , llamada base *natural* de los logaritmos. Cuando se utilizan logaritmos comunes,

$$y = \log_{10} x \quad (\text{o } x = 10^y) \quad \text{[A.14]}$$

Cuando se utilizan logaritmos naturales

$$y = \ln x \quad (\text{o } x = e^y) \quad \text{[A.15]}$$

Por ejemplo, $\log_{10} 52 = 1.716$, así que $\text{antilog}_{10} 1.716 = 10^{1.716} = 52$. Asimismo, $\ln_e 52 = 3.951$, así que $\text{antiln}_e 3.951 = e^{3.951} = 52$.

En general, observe que usted puede hacer conversiones entre la base 10 y la base e con la igualdad

$$\ln x = (2.302\ 585)\log_{10} x \quad \text{[A.16]}$$

Finalmente, algunas propiedades útiles de los logaritmos son:

$$\begin{aligned} \log(ab) &= \log a + \log b & \ln e &= 1 \\ \log(a/b) &= \log a - \log b & \ln e^a &= a \\ \log(a^n) &= n \log a & \ln\left(\frac{1}{a}\right) &= -\ln a \end{aligned}$$

Los logaritmos en la física universitaria se utilizan frecuentemente en la definición del nivel de decibeles. La intensidad del sonido varía a través de varios órdenes de magnitud, dificultando la comparación de diversas intensidades. El nivel de decibeles se convierte a estas intensidades con una escala logarítmica más manejable.

■ EJEMPLO (Logs)

Suponga que un jet que prueba sus motores produce una intensidad de sonido $I = 0.750 \text{ W}$ en una cierta localización en un hangar. ¿Qué nivel de decibeles corresponde a esta intensidad de sonido?

SOLUCIÓN El nivel de decibeles β está definido por

$$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

donde $I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ es la referencia de intensidad estándar. Sustituya la información dada:

$$\beta = 10 \log\left(\frac{0.750 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2}\right) = 119 \text{ dB}$$

■ EJEMPLO (Antilog)

Una colección de cuatro máquinas idénticas crea un nivel de decibeles de $\beta = 87.0 \text{ dB}$ en una tienda de máquinas. ¿Qué intensidad de sonido sería creado por solamente una máquina?

SOLUCIÓN Utilizamos la ecuación del nivel de decibeles para encontrar la intensidad de sonido total de las cuatro máquinas, y después dividimos por 4. De la ecuación (1):

$$87.0 \text{ dB} = 10 \log\left(\frac{I}{10^{-12} \text{ W/m}^2}\right)$$

Dividimos ambos lados por 10 y tomamos el antilogaritmo de ambos lados, lo que significa, de manera equivalente, que la forma exponencial es:

$$\begin{aligned} 10^{8.7} &= 10^{\log(I/10^{-12})} = \frac{I}{10^{-12}} \\ I &= 10^{-12} \cdot 10^{8.7} = 10^{-3.3} = 5.01 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Hay cuatro máquinas, así que el resultado debe dividirse por 4 para obtener la intensidad de una máquina:

$$I = 1.25 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$$

■ EJEMPLO (Exponenciales)

La vida media del tritio es 12.33 años. (El tritio es el isótopo más pesado del hidrógeno, con un núcleo que consiste de un protón y dos neutrones.) Si una muestra contiene 3.0 g de tritio inicialmente, ¿cuánto permanece después de 20.0 años?

SOLUCIÓN La ecuación que da el número de núcleos de una sustancia radiactiva como función del tiempo es:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

donde N es el número de los núcleos restantes, N_0 es el número inicial de núcleos y n es el número de vida media. Observe que esta ecuación es una expresión exponencial con base de $\frac{1}{2}$. El número de vida media está dada por $n = t/T_{1/2} = 20.0 \text{ años}/12.33 \text{ años} = 1.62$. La cantidad fraccionaria de tritio que permanece después de 20.0 años es, por lo tanto

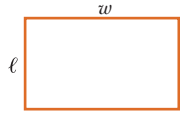
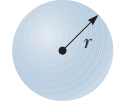
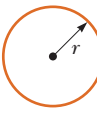
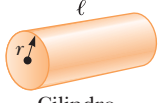
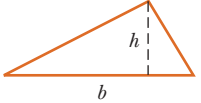
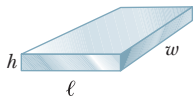
$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1.62} = 0.325$$

Por lo tanto, de los 3.00 g originales de tritio, permanecen $0.325 \times 3.00 \text{ g} = 0.975 \text{ g}$.

A.4 Geometría

La tabla A.2 da las áreas y los volúmenes para varias formas geométricas usadas a través de este texto. Estas áreas y volúmenes son importantes en numerosas aplicaciones de la física. Un buen ejemplo es el concepto de presión P , que es la fuerza por unidad de superficie. Como ecuación, se escribe $P = F/A$. También se deben calcular áreas en problemas que implican la razón de volumen de un fluido que pasa por un tubo, utilizando la ecuación de continuidad, la tensión de expansión ejercida sobre un cable por un peso, la razón de transferencia de energía térmica a través de una barra, y la densidad de corriente a través de un alambre. Hay otros numerosos usos. Los volúmenes son importantes en el cálculo de la fuerza de empuje ejercida por el agua sobre un objeto sumergido, en cálculo de densidades y en la determinación de la tensión volumétrica del líquido o del gas en un objeto, que afecta su volumen. Una vez más, hay otros numerosos usos.

TABLA A.2 Información útil en geometría

Forma	Área o volumen	Forma	Área o volumen
 Rectángulo	Área = ℓw	 Esfera	Área = $4\pi r^2$ Volumen = $\frac{4\pi r^3}{3}$
 Círculo	Área = πr^2 Circunferencia = $2\pi r$	 Cilindro	Área lateral = $2\pi r\ell$ Volumen = $\pi r^2\ell$
 Triángulo	Área = $\frac{1}{2}bh$	 Caja rectangular	Área = $2(\ell h + \ell w + hw)$ Volumen = ℓwh

A.5 Trigonometría

Algunos de los hechos básicos referentes a la trigonometría se presentan en el capítulo 1, y le sugerimos que estudie el material allí presentado si usted está teniendo dificultades con esta rama de las matemáticas. Los conceptos trigonométricos más importantes incluyen el teorema de Pitágoras:

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 \quad [\text{A.17}]$$

Esta ecuación establece que el cuadrado de la distancia a lo largo de la hipotenusa de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los catetos. También puede ser utilizado para encontrar distancias entre los puntos en coordenadas cartesianas y la longitud de un vector, donde Δx es sustituida por la componente x del vector y Δy es sustituido por la componente y del vector. Si el vector \vec{A} tiene componentes A_x y A_y , la magnitud A del vector satisface

$$A^2 = A_x^2 + A_y^2 \quad [\text{A.18}]$$

lo cual tiene una forma totalmente análoga a la del teorema de Pitágoras. También son altamente útiles las funciones coseno y seno porque relacionan la longitud de un vector con sus componentes x y y :

$$A_x = A \cos \theta \quad [\text{A.19}]$$

$$A_y = A \sin \theta \quad [\text{A.20}]$$

La dirección θ de un vector en un plano se puede determinar por medio de la función tangente:

$$\tan \theta = \frac{A_y}{A_x} \quad [\text{A.21}]$$

Una identidad obtenida del teorema de Pitágoras que también es con frecuencia muy útil:

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad [\text{A.22}]$$

Los detalles en los conceptos anteriores se pueden encontrar en las extensas discusiones de los capítulos 1 y 3. Las siguientes son algunas otras identidades trigonométricas que pueden a veces ser útiles:

$$\sin \theta = \cos(90^\circ - \theta)$$

$$\cos \theta = \sin(90^\circ - \theta)$$

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta$$

$$\sin(\theta \pm \phi) = \sin \theta \cos \phi \pm \cos \theta \sin \phi$$

$$\cos(\theta \pm \phi) = \cos \theta \cos \phi \pm \sin \theta \sin \phi$$

Las relaciones siguientes se aplican a cualquier triángulo, según se muestra en la figura A.4:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta \quad \text{ley de los cosenos}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} \quad \text{ley de los senos}$$

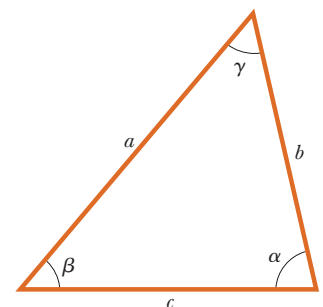


Figura A.4

■ Apéndice B

Tabla abreviada de isótopos

Número atómico Z	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) A	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) $T_{1/2}$
0	(Neutrón)	n		1*	1.008 665		10.4 min
1	Hidrógeno	H	1.007 94	1	1.007 825	99.988 5	12.33 años
				2	2.014 102	0.011 5	
				3*	3.016 049		
2	Helio	He	4.002 602	3	3.016 029	0.000 137	53.3 días
				4	4.002 603	99.999 863	
3	Litio	Li	6.941	6	6.015 122	7.5	19.3 s
				7	7.016 004	92.5	
				7*	7.016 929		
4	Berilio	Be	9.012 182	9	9.012 182	100	20.4 min
				10	10.012 937	19.9	
5	Boro	B	10.811	11	11.009 306	80.1	5 730 años
				10*	10.016 853		
				11*	11.011 434		
				12	12.000 000	98.93	
				13	13.003 355	1.07	
6	Carbono	C	12.010 7	14*	14.003 242		9.96 min
				13*	13.005 739		
				14	14.003 074	99.632	
				15	15.000 109	0.368	
7	Nitrógeno	N	14.006 7	15*	15.003 065		122 s
				16	15.994 915	99.757	
				18	17.999 160	0.205	
				19	18.998 403	100	
8	Oxígeno	O	15.999 4	20	19.992 440	90.48	2.61 años
				22	21.991 385	9.25	
				22*	21.994 437		
9	Flúor	F	18.998 403 2	23	22.989 770	100	14.96 h
				24*	23.990 963		
				24	23.985 042	78.99	
				25	24.985 837	10.00	
				26	25.982 593	11.01	
10	Neón	Ne	20.179 7	27	26.981 539	100	14.26 días
				28	27.976 926	92.229 7	
11	Sodio	Na	22.989 77	31	30.973 762	100	87.5 días
				32*	31.973 907		
				32	31.972 071	94.93	
12	Magnesio	Mg	24.305 0	35*	34.969 032		75.78
				24	23.985 042	78.99	
				25	24.985 837	10.00	
13	Aluminio	Al	26.981 538	37	36.965 903	24.22	99.600 3
				27	26.981 539	100	
14	Silicio	Si	28.085 5	40	39.962 383	99.600 3	93.258 1
				28	27.976 926	92.229 7	
15	Fosforo	P	30.973 761	39	38.963 707	93.258 1	1.28 × 10 ⁹ años
				31	30.973 762	100	
				40*	39.963 999	0.011 7	
16	Azufre	S	32.066	40	39.962 591	96.941	73.72
				32	31.972 071	94.93	
17	Cloro	Cl	35.452 7	45	44.955 910	100	
				35	34.968 853	75.78	
				37	36.965 903	24.22	
18	Argón	Ar	39.948	48	47.947 947	73.72	
				40	39.962 383	99.600 3	
19	Potasio	K	39.098 3	45	44.955 910	100	
				39	38.963 707	93.258 1	
20	Calcio	Ca	40.078	48	47.947 947	73.72	
				40	39.962 591	96.941	
21	Escandio	Sc	44.955 910	45	44.955 910	100	
22	Titanio	Ti	47.867	48	47.947 947	73.72	

Número atómico <i>Z</i>	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) <i>A</i>	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) <i>T</i> _{1/2}
23	Vanadio	V	50.941 5	51	50.943 964	99.750	
24	Cromo	Cr	51.996 1	52	51.940 512	83.789	
25	Manganeso	Mn	54.938 049	55	54.938 050	100	
26	Hierro	Fe	55.845	56	55.934 942	91.754	
27	Cobalto	Co	58.933 200	59	58.933 200	100	
				60*	59.933 822		5.27 años
28	Níquel	Ni	58.693 4	58	57.935 348	68.076 9	
				60	59.930 790	26.223 1	
29	Cobre	Cu	63.546	63	62.929 601	69.17	
				65	64.927 794	30.83	
30	Zinc	Zn	65.39	64	63.929 147	48.63	
				66	65.926 037	27.90	
				68	67.924 848	18.75	
31	Galio	Ga	69.723	69	68.925 581	60.108	
				71	70.924 705	39.892	
32	Germanio	Ge	72.61	70	69.924 250	20.84	
				72	71.922 076	27.54	
				74	73.921 178	36.28	
33	Arsénico	As	74.921 60	75	74.921 596	100	
34	Selenio	Se	78.96	78	77.917 310	23.77	
				80	79.916 522	49.61	
35	Bromo	Br	79.904	79	78.918 338	50.69	
				81	80.916 291	49.31	
36	Criptón	Kr	83.80	82	81.913 485	11.58	
				83	82.914 136	11.49	
				84	83.911 507	57.00	
				86	85.910 610	17.30	
37	Rubidio	Rb	85.467 8	85	84.911 789	72.17	
				87*	86.909 184	27.83	4.75 × 10 ¹⁰ años
38	Estroncio	Sr	87.62	86	85.909 262	9.86	
				88	87.905 614	82.58	
				90*	89.907 738		29.1 años
39	Ytrio	Y	88.905 85	89	88.905 848	100	
40	Circonio	Zr	91.224	90	89.904 704	51.45	
				91	90.905 645	11.22	
				92	91.905 040	17.15	
				94	93.906 316	17.38	
41	Niobio	Nb	92.906 38	93	92.906 378	100	
42	Molibdeno	Mo	95.94	92	91.906 810	14.84	
				95	94.905 842	15.92	
				96	95.904 679	16.68	
				98	97.905 408	24.13	

(continúa)

Número atómico <i>Z</i>	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) <i>A</i>	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) <i>T</i> _{1/2}
43	Tecnecio	Tc		98*	97.907 216		4.2 × 10 ⁶ años
				99*	98.906 255		2.1 × 10 ⁵ años
44	Rutenio	Ru	101.07	99	98.905 939	12.76	
				100	99.904 220	12.60	
				101	100.905 582	17.06	
				102	101.904 350	31.55	
				104	103.905 430	18.62	
45	Rodio	Rh	102.905 50	103	102.905 504	100	
46	Paladio	Pd	106.42	104	103.904 035	11.14	
				105	104.905 084	22.33	
				106	105.903 483	27.33	
				108	107.903 894	26.46	
47	Plata	Ag	107.868 2	107	106.905 093	51.839	
				109	108.904 756	48.161	
				110	109.905 152	11.72	
48	Cadmio	Cd	112.411	110	109.903 006	12.49	
				111	110.904 182	12.80	
				112	111.902 757	24.13	
				113*	112.904 401	12.22	9.3 × 10 ¹⁵ años
				114	113.903 358	28.73	
49	Indio	In	114.818	115*	114.903 878	95.71	4.4 × 10 ¹⁴ años
50	Estaño	Sn	118.710	116	115.901 744	14.54	
				118	117.901 606	24.22	
				120	119.902 197	32.58	
				121	120.903 818	57.21	
51	Antimonio	Sb	121.760	123	122.904 216	42.79	
				126	125.903 306	18.84	
52	Telurio	Te	127.60	128*	127.904 461	31.74	> 8 × 10 ²⁴ años
				130*	129.906 223	34.08	≤ 1.25 × 10 ²¹ años
				127	126.904 468	100	
53	Yodo	I	126.904 47	129*	128.904 988		1.6 × 10 ⁷ años
				129	128.904 780	26.44	
54	Xenón	Xe	131.29	131	130.905 082	21.18	
				132	131.904 145	26.89	
				134	133.905 394	10.44	
				136*	135.907 220	8.87	≥ 2.36 × 10 ²¹ años
				133	132.905 447	100	
55	Cesio	Cs	132.905 45	137	136.905 821	11.232	
56	Bario	Ba	137.327	138	137.905 241	71.698	
				139	138.906 349	99.910	
57	Lantano	La	138.905 5	140	139.905 434	88.450	
58	Cerio	Ce	140.116	142*	141.909 240	11.114	> 5 × 10 ¹⁶ años
				141	140.907 648	100	
59	Praseodimio	Pr	140.907 65	142	141.907 719	27.2	
60	Neodimio	Nd	144.24	144*	143.910 083	23.8	2.3 × 10 ¹⁵ años
				146	145.913 112	17.2	
				142	141.907 719	27.2	

Número atómico <i>Z</i>	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) <i>A</i>	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) <i>T</i> _{1/2}
61	Prometio	Pm		145*	144.912 744		17.7 años
62	Samario	Sm	150.36	147*	146.914 893	14.99	1.06 × 10 ¹¹ años
				149*	148.917 180	13.82	> 2 × 10 ¹⁵ años
				152	151.919 728	26.75	
				154	153.922 205	22.75	
63	Europio	Eu	151.964	151	150.919 846	47.81	
				153	152.921 226	52.19	
64	Gadolinio	Gd	157.25	156	155.922 120	20.47	
				158	157.924 100	24.84	
				160	159.927 051	21.86	
65	Terbio	Tb	158.925 34	159	158.925 343	100	
66	Disproseo	Dy	162.50	162	161.926 796	25.51	
				163	162.928 728	24.90	
				164	163.929 171	28.18	
67	Holmio	Ho	164.930 32	165	164.930 320	100	
68	Erbio	Er	167.6	166	165.930 290	33.61	
				167	166.932 045	22.93	
				168	167.932 368	26.78	
69	Tulio	Tm	168.934 21	169	168.934 211	100	
70	Iterbio	Yb	173.04	172	171.936 378	21.83	
				173	172.938 207	16.13	
				174	173.938 858	31.83	
71	Lutecio	Lu	174.967	175	174.940 768	97.41	
72	Hafnio	Hf	178.49	177	176.943 220	18.60	
				178	177.943 698	27.28	
				179	178.945 815	13.62	
				180	179.946 549	35.08	
73	Tantalio	Ta	180.947 9	181	180.947 996	99.988	
74	Tungsteno (Wolframio)	W	183.84	182	181.948 206	26.50	
				183	182.950 224	14.31	
				184*	183.950 933	30.64	> 3 × 10 ¹⁷ años
				186	185.954 362	28.43	
75	Renio	Re	186.207	185	184.952 956	37.40	
				187*	186.955 751	62.60	4.4 × 10 ¹⁰ años
76	Osmio	Os	190.23	188	187.955 836	13.24	
				189	188.958 145	16.15	
				190	189.958 445	26.26	
				192	191.961 479	40.78	
77	Iridio	Ir	192.217	191	190.960 591	37.3	
				193	192.962 924	62.7	
78	Platino	Pt	195.078	194	193.962 664	32.967	
				195	194.964 774	33.832	
				196	195.964 935	25.242	
79	Oro	Au	196.966 55	197	196.966 552	100	
80	Mercurio	Hg	200.59	199	198.968 262	16.87	
				200	199.968 309	23.10	
				201	200.970 285	13.18	
				202	201.970 626	29.86	

Número atómico Z	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) A	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) T _{1/2}				
81	Talio	Tl	204.383 3	203	202.972 329	29.524					
				205	204.974 412	70.476					
				(Th C'')	208*	207.982 005		3.053 min			
				(Ra C'')	210*	209.990 066		1.30 min			
82	Plomo	Pb	207.2	204*	203.973 029	1.4	≥ 1.4 × 10 ¹⁷ años				
				206	205.974 449	24.1					
				207	206.975 881	22.1					
				208	207.976 636	52.4					
				(Ra D)	210*	209.984 173		22.3 años			
				(Ac B)	211*	210.988 732		36.1 min			
				(Th B)	212*	211.991 888		10.64 h			
				(Ra B)	214*	213.999 798		26.8 min			
				83	Bismuto	Bi	208.980 38	209	208.980 383	100	
								(Th C)	211*	210.987 258	
84	Polonio	Po		210*	209.982 857		138.38 días				
				(Ra F)	214*	213.995 186		164 μs			
				(Ra C')	218*	218.008 682		1.6 s			
85	Astato	At		222*	222.017 570		3.823 días				
87	Francio	Fr		223*	223.019 731		22 min				
				(Ac K)	226*	226.025 403		1 600 años			
88	Radio	Ra		228*	228.031 064		5.75 años				
				(Ms Th ₁)	227*	227.027 747		21.77 años			
89	Actinio	Ac		228*	228.028 731		1.913 años				
90	Torio	Th	232.038 1	(Rd Th)	232*	232.038 050	100	1.40 × 10 ¹⁰ años			
				(Th)	231*	231.035 879		32.760 años			
				91	Protactinio	Pa	231.035 88	232*	232.037 146		69 años
92	Uranio	U	238.028 9					233*	233.039 628		1.59 × 10 ⁵ años
								(Ac U)	235*	235.043 923	0.720 0
93	Neptunio	Np		236*	236.045 562		2.34 × 10 ⁷ años				
				(UI)	238*	238.050 783	99.274 5	4.47 × 10 ⁹ años			
				237*	237.048 167		2.14 × 10 ⁶ años				
				94	Plutonio	Pu		239*	239.052 156		2.412 × 10 ⁴ años
242*	242.058 737		3.73 × 10 ⁶ años								
244*	244.064 198		8.1 × 10 ⁷ años								

Fuentes: Las masas atómicas químicas son de T. B. Coplen, "Atomic Weights of the Elements 1999", un informe técnico a la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, y publicado en *Pure and Applied Chemistry*, 73 (4), 667-683, 2001. Las masas atómicas de los isótopos son de C. Audi y A. H. Wapstra, "The 1995 Update to the Atomic Mass Evaluation", *Nuclear Physics*, A595, vol. 4, 409-480, 25 de diciembre de 1995. Los valores de los porcentajes de abundancia son de K. J. R. Rosman y P. D. P. Taylor, "Isotopic Compositions of the Elements 1999", un informe técnico a la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada, y publicado en *Pure and Applied Chemistry*, 70(1), 217-236, 1998.

Algunas tablas útiles

TABLA C.1 Símbolos matemáticos utilizados en el texto y su significado

Símbolo	Significado
=	es igual a
≠	no es igual a
≡	se define como
∝	es proporcional a
>	es mayor que
<	es menor que
>>	es mucho mayor que
<<	es mucho menor que
≈	es aproximadamente igual a
~	está en el orden de magnitud de
Δx	cambio en x o incertidumbre en x
$\sum x_i$	suma de todas las cantidades x_i
$ x $	valor absoluto de x (una cantidad siempre positiva)

TABLA C.2 Símbolos comunes para unidades

Símbolo	Unidad	Símbolo	Unidad
A	ampere	kcal	kilocaloría
Å	angstrom	kg	kilogramo
atm	atmósfera	km	kilómetro
Bq	bequerel	kmol	kilomol
Btu	unidad térmica Británica	L	litro
C	coulomb	lb	libra
°C	grado Celsius	ly	año luz
cal	caloría	m	metro
cm	centímetro	min	minuto
Ci	curie	mol	mol
d	día	N	newton
deg	grado (ángulo)	nm	nanómetro
eV	electronvolt	Pa	pascal
°F	grado Fahrenheit	rad	radián
F	farad	rev	revolución
ft	pie	s	segundo
G	Gauss	T	tesla
g	gramo	n	unidad de masa atómica
H	henry	V	volt
h	hora	W	watt
hp	caballo de fuerza	Wb	weber
Hz	hertz	yr	año
in.	pulgada	μm	micrómetro
J	joule	Ω	ohm
K	kelvin		

TABLA C.3 Alfabeto griego

Alfa	A	α	Nu	N	ν
Beta	B	β	Xi	Ξ	ξ
Gamma	Γ	γ	Omicrón	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Epsilon	E	ϵ	Rho	P	ρ
Zeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Theta	Θ	θ	Upsilon	Y	υ
Iota	I	ι	Phi	Φ	ϕ
Kappa	K	κ	Chi	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
Mu	M	μ	Omega	Ω	ω

TABLA C.4 Datos físicos usados con frecuencia^a

Distancia promedio Tierra-Luna	3.84×10^8 m
Distancia promedio Tierra-Sol	1.496×10^{11} m
Radio ecuatorial de la Tierra	6.38×10^6 m
Densidad del aire (20°C y 1 atm)	1.20 kg/m^3
Densidad del agua (20°C y 1 atm)	$1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Aceleración en caída libre	9.80 m/s^2
Masa de la Tierra	5.98×10^{24} kg
Masa de la Luna	7.36×10^{22} kg
Masa del Sol	1.99×10^{30} kg
Presión atmosférica normal	1.013×10^5 Pa

^a Estos son los valores de las constantes usados en este texto.

TABLA C.5 Algunas constantes fundamentales

Cantidad	Símbolo	Valor ^a
Unidad de masa atómica	u	1.660 538 782 (83) × 10 ⁻²⁷ kg 931.494 028 (23) MeV/c ²
Número de Avogadro	N _A	6.022 141 79 (30) × 10 ²³ partículas/mol
Magnetón de Bohr	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	9.274 009 15 (23) × 10 ⁻²⁴ J/T
Radio de Bohr	$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2 k_e}$	5.291 772 085 9 (36) × 10 ⁻¹¹ m
Constante de Boltzmann	$k_B = \frac{R}{N_A}$	1.380 650 4 (24) × 10 ⁻²³ J/K
Longitud de onda de Compton	$\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$	2.426 310 217 5 (33) × 10 ⁻¹² m
Constante de Coulomb	$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	8.987 551 788 ... × 10 ⁹ N·m ² /C ² (exacto)
Masa del deuterón	m _d	3.343 583 20 (17) × 10 ⁻²⁷ kg 2.013 553 212 724 (78) u
Masa del electrón	m _e	9.109 382 15 (45) × 10 ⁻³¹ kg 5.485 799 094 3 (23) × 10 ⁻⁴ u 0.510 998 910 (13) MeV/c ²
Electron volt	eV	1.602 176 487 (40) × 10 ⁻¹⁹ J
Carga elemental	e	1.602 176 487 (40) × 10 ⁻¹⁹ C
Constante de gases	R	8.314 472 (15) J/mol·K
Constante gravitacional	G	6.674 28 (67) × 10 ⁻¹¹ N·m ² /kg ²
Masa del neutrón	m _n	1.674 927 211 (84) × 10 ⁻²⁷ kg 1.008 664 915 97 (43) u 939.565 346 (23) MeV/c ²
Magnetón nuclear	$\mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p}$	5.050 783 24 (13) × 10 ⁻²⁷ J/T
Permeabilidad del espacio libre	μ ₀	4π × 10 ⁻⁷ T·m/A (exacto)
Permitividad del espacio libre	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$	8.854 187 817 ... × 10 ⁻¹² C ² /N·m ² (exacto)
Constante de Planck	h	6.626 068 96 (33) × 10 ⁻³⁴ J·s
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	1.054 571 628 (53) × 10 ⁻³⁴ J·s
Masa del protón	m _p	1.672 621 637 (83) × 10 ⁻²⁷ kg 1.007 276 466 77 (10) u 938.272 013 (23) MeV/c ²
Constante de Rydberg	R _H	1.097 373 156 852 7 (73) × 10 ⁷ m ⁻¹
Velocidad de la luz en el vacío	c	2.997 924 58 × 10 ⁸ m/s (exacto)

Nota: Estas constantes son los valores recomendados por CODATA en 2006, basados en ajustes de datos por mínimos cuadrados a partir de diferentes mediciones. Para una lista más completa ver P. J. Mohr y B. N. Taylor, "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2006". *Rev. Mod. Phys.* **80**: 2, 633-730, 2008.

^aLos números que están entre paréntesis para los valores siguientes representan los valores inciertos de los dos últimos dígitos.

Unidades SI

TABLA D.1 Unidades fundamentales SI

Cantidad fundamental	Unidad fundamental SI	
	Nombre	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	ampere	A
Temperatura	kelvin	K
Cantidad de una sustancia	mole	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

TABLA D.2 Unidades derivadas SI

Cantidad	Nombre	Símbolo	Expresión en términos de unidades fundamentales	Expresión en términos de otras unidades SI
Ángulo plano	radián	rad	m/m	
Frecuencia	hertz	Hz	s ⁻¹	
Fuerza	newton	N	kg · m/s ²	J/m
Presión	pascal	Pa	kg/m · s ²	N/m ²
Energía: trabajo	joule	J	kg · m ² /s ²	N · m
Potencia	watt	W	kg · m ² /s ³	J/s
Carga eléctrica	coulomb	C	A · s	
Potencial eléctrico (fem)	volt	V	kg · m ² /A · s ³	W/A, J/C
Capacitancia	farad	F	A ² · s ⁴ /kg · m ²	C/V
Resistencia eléctrica	ohm	Ω	kg · m ² /A ² · s ³	V/A
Flujo magnético	weber	wb	kg · m ² /A · s ²	V · s, T · m ²
Intensidad de campo magnético	tesla	T	kg/A · s ²	Wb/m ²
Inductancia	henry	H	kg · m ² /A ² · s ²	Wb/A

Vectores

■ EJEMPLO 1

Un caminante se dirige directo al norte a 4.00 kilómetros por hora de su campamento. Un oso, comenzando 3.00 kilómetros al este del campamento, camina a 7.00 kilómetros por hora en una dirección 30° al noroeste. Después de una hora, ¿qué tanto se apartaron?

SOLUCIÓN

Escriba las componentes del vector de posición del caminante después de una hora, eligiendo el campamento como origen:

$$H_x = 0 \quad H_y = 4.00 \text{ m}$$

El oso se desplaza a un ángulo de $30^\circ + 90^\circ = 120^\circ$ con respecto a la dirección este, donde esta dirección corresponde a la x positiva. Escriba las componentes del vector de posición del oso después de una hora, otra vez en relación con el campamento:

$$B_x = 3.00 \text{ km} + (7.00 \text{ km}) \cos 120^\circ = -0.500 \text{ km}$$

$$B_y = (7.00 \text{ km}) \sin 120^\circ = 6.06 \text{ km}$$

Reste el vector de posición del oso del caminante, lo que resultará en un vector \vec{R} que apunta del oso al caminante:

$$R_x = H_x - B_x = 0 - (-0.500 \text{ km}) = 0.500 \text{ km}$$

$$R_y = H_y - B_y = 4.00 \text{ km} - 6.06 \text{ km} = -2.06 \text{ km}$$

Calcule la magnitud del vector resultante, obteniendo la distancia entre el caminante y el oso:

$$R = (R_x^2 + R_y^2)^{1/2} = [(0.500 \text{ km})^2 + (-2.06 \text{ km})^2]^{1/2} = 2.12 \text{ km}$$

■ EJEMPLO 2

Dos vectores \vec{A} y \vec{B} no paralelos uno con relación al otro (no “antiparalelos” —que apuntan en dirección opuesta—). Si $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$, ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta para las magnitudes A , B y R ? a) $R > A + B$ b) $R = A + B$ c) $R < A + B$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Como los vectores \vec{A} y \vec{B} no son paralelos, pueden ser arreglados para formar dos lados de un triángulo. Por la ley geométrica de la adición de vectores, el vector resultante \vec{R} forma el tercer lado del mismo triángulo. La distancia más corta entre dos puntos es una línea recta, así que la distancia a lo largo de R es más corta que la suma de las longitudes de A y de B . Por lo tanto, la respuesta correcta es c).

Problemas de opción múltiple

1. Un automóvil viaja en dirección este a una distancia de 3 millas y después en dirección norte 4 millas adicionales antes de parar. ¿Cuál es la distancia en línea recta más corta entre el punto de comienzo y el punto final de este viaje? a) 3 millas b) 4 millas c) 5 millas d) 7 millas.
2. En el problema anterior, ¿cuál es el ángulo α de la trayectoria más corta en relación con el norte? a) $\alpha = \arccos 3/5$ b) $\alpha = \arcsin 5/3$ c) $\alpha = \arcsin 4/3$ d) $\alpha = \arctan 3/4$
3. Un vector \vec{A} forma un ángulo de 60° con el eje x de un sistema coordenado cartesiano. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera para las magnitudes indicadas? a) $A_x > A_y$ b) $A_y > A_x$ c) $A_a > A$ d) $A_x > A$
4. La fuerza es una cantidad vectorial medida en newtons, N. ¿Cuál debe ser el ángulo entre dos fuerzas concurrentes de 5 N y 3 N, respectivamente, si el vector resultante tiene una magnitud de 8 N? a) 0° b) 45° c) 90° d) 180°

5. Dos fuerzas actúan concurrentemente sobre un objeto. Ambos vectores tienen la misma magnitud de 10 N y actúan perpendicularmente uno con el otro. ¿Cuál es la estimación más cercana de la magnitud de su resultante? a) 0 N b) 14 N c) 20 N d) 100 N

RESPUESTAS

- c). Los dos catetos correspondientes al viaje son perpendiculares; por lo tanto, la distancia más corta está dada por la hipotenusa del triángulo rectángulo correspondiente. El valor está dado por el teorema de Pitágoras: $R = (3^2 + 4^2)^{1/2} = 5$ mi.
- d). El ángulo α que da la dirección de la hipotenusa concierne al eje y esta dado por $\tan \alpha = \text{lado opuesto/lado adyacente} = 3/4 \rightarrow \alpha = \text{arco tan } 3/4$
- b). Las opciones c) y d) pueden ser eliminadas inmediatamente porque la proyección de un vector puede nunca ser mayor que la magnitud del vector mismo. Mientras que el ángulo entre el vector y el eje aumenta hacia 90° , la magnitud de la proyección disminuye hacia cero. El ángulo entre el vector y el eje x es 60° , lo que significa que el ángulo entre el vector y el eje y debe ser 30° . Como el ángulo entre el vector y el eje y es más pequeño que el ángulo entre el vector y el eje x , la proyección sobre el eje y , A_y , debe ser mayor que la proyección sobre el eje x , A_x .
- a). La única manera que la suma de vectores correspondientes a fuerzas de 3 N y 5 N puede ser igual a 8 N es si ambas fuerzas actúan en la misma dirección. El ángulo entre ellos necesariamente es de cero grados.
- b). Los dos vectores forman los catetos de un triángulo rectángulo. El vector resultante es la hipotenusa. Las opciones a) y c) pueden ser eliminadas inmediatamente porque requieren que las dos fuerzas sean antiparalelas o paralelas respectivamente. La opción d) puede también ser eliminada porque es demasiado grande para ser la hipotenusa. La magnitud de la resultante se puede calcular con el teorema Pitágoras:

$$R = (10^2 + 10^2)^{1/2} = (200)^{1/2} = 10(2)^{1/2} = 10(1.41) \approx 14 \text{ N}$$

Movimiento

EJEMPLO 1

Un conductor que viaja a 24.0 m/s aplica de golpe los frenos hasta detenerse a los 6.00 s. ¿Cuál es la aceleración del coche, suponiendo que es constante, y hasta dónde llega el automóvil durante este tiempo?

SOLUCIÓN

Aplique la ecuación de la cinemática para la velocidad:

$$(1) \quad v = at + v_0$$

Resuelva la ecuación (1) para la aceleración a , y sustituya $v = 0$; $t = 6.00$ s y $v_0 = 24.0$ m/s:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{0 - 24.0 \text{ m/s}}{6.00 \text{ s}} = -4.00 \text{ m/s}^2$$

El desplazamiento puede entonces ser encontrado con la ecuación independiente del tiempo:

$$(2) \quad v^2 - v_0^2 = 2a \Delta x$$

Resuelva la ecuación (2) para Δx y sustituya valores:

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - (24.0 \text{ m/s})^2}{2(-4.00 \text{ m/s}^2)} = 72.0 \text{ m}$$

EJEMPLO 2

Un estudiante en la azotea de un edificio deja caer una roca desde el reposo. Cuando la roca está a la mitad del camino al suelo, deja caer una pelota de golf desde el reposo. Mientras que caen ambos objetos ¿la distancia entre ellos aumenta, disminuye o permanece igual?

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

En el instante que la pelota de golf se suelta la roca está viajando más rápidamente, por lo tanto viajará siempre más rápidamente antes de que alcance la tierra porque las velocidades de ambos objetos están cambiando en la misma razón. Como está cayendo la roca siempre más rápidamente, la distancia entre ella y la pelota de golf aumentará.

■ EJEMPLO 3

Un jugador del béisbol lanza una bola en ángulo θ con la horizontal y a una velocidad v_0 . Despreciando la fricción del aire, ¿cuál es la velocidad de la bola cuando regresa a la misma altura en la que fue lanzada? a) La velocidad de la bola será la misma. b) La rapidez de la bola será mayor. c) La velocidad de la bola será más menor.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La velocidad de la bola será la misma, así que la respuesta correcta es a). Como no hay aceleración en la dirección horizontal, la velocidad en la dirección x es constante, y solamente la dirección y necesita ser considerada. Por simetría, el tiempo que toma llegar a la altura máxima es el mismo tiempo que le toma caer de nuevo a la altura original. Si la velocidad de la bola en la dirección y cambia de v_{0y} a 0 en el rumbo a la altura máxima, entonces cambiará a partir de 0 a $-v_{0y}$, al volver a su altura original. Por lo tanto los componentes de la velocidad de la bola serán las mismas que antes, a excepción de un cambio de signo en la componente y , que no afecta la velocidad.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Sea $x = 0$, $y = 0$ el punto de lanzamiento. Utilice la ecuación del desplazamiento en la dirección de y igual a cero:

$$(1) \quad \Delta y = \frac{1}{2}at^2 + v_{0y}t = 0$$

Resuelva la ecuación (1) para obtener los tiempos $\Delta y = 0$ (es decir, al principio y al final de la trayectoria):

$$t = 0; t = \frac{-2v_{0y}}{a}$$

Sustituya estas dos soluciones en la ecuación para la velocidad en la dirección y :

$$v_y = at + v_{0y}$$

Caso 1: $t = 0$

$$v_y = a \cdot 0 + v_{0y} = v_{0y}$$

Caso 2: $t = \frac{-2v_{0y}}{a}$

$$v_y = a \cdot \left(\frac{-2v_{0y}}{a}\right) + v_{0y} = -v_{0y}$$

La velocidad en cualquier tiempo está dada por la expresión siguiente:

$$v = (v_{0x}^2 + v_{0y}^2)^{1/2}$$

Como la componente y es cuadrática, el signo negativo en el caso 2 no hace diferencia y la velocidad en los dos momentos en cuestión es la misma, dando otra vez, la respuesta a).

■ EJEMPLO 4

Un tiovivo tiene un radio de 2.00 m y da una vuelta cada 5.00 s. ¿Cuál es la magnitud la fuerza neta necesaria para sostener a un muchacho de 35.0 kg en el borde?

SOLUCIÓN

Primero, calcule la velocidad de un objeto en el borde, lo cual es la distancia alrededor del borde dividida por el tiempo para una rotación:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{2\pi r}{t} = \frac{2\pi(2.00 \text{ m})}{5.00 \text{ s}} = 2.51 \text{ m/s}$$

Un cuerpo desplazándose en un círculo a velocidad uniforme requiere de una aceleración centrípeta de $a_c = v^2/r$. La fuerza que produce esta aceleración puede encontrarse sustituyendo esta expresión en la segunda ley de Newton:

$$F = ma_c = m \frac{v^2}{r} = (35.0 \text{ kg}) \frac{(2.51 \text{ m/s})^2}{2.00 \text{ m}} = 1.10 \times 10^2 \text{ N}$$

Problemas de opción múltiple

1. Un pájaro vuela 4.0 m al norte en 2.0 s y después vuela 2.0 m al oeste en 1.0 s. ¿Cuál es la velocidad media del pájaro? a) 2.0 m/s b) 4.0 m/s c) 8.0 m/s d) $2\sqrt{5}/3$ m/s
2. La aplicación de los frenos a un coche que viaja a 45 kilómetros por hora proporciona una aceleración de 5.0 m/s^2 en la dirección opuesta. ¿Cuánto tiempo llevará el coche detenerse? a) 0.40 s b) 2.5 s c) 5.0 s d) 9.0 s
3. Una bola rueda hacia abajo a lo largo de un plano inclinado con una aceleración uniforme de magnitud 1.0 m/s^2 . Si su velocidad en un cierto instante de tiempo es 10 m/s, ¿cuál será su velocidad 5.0 segundos después? a) 5 m/s b) 10 m/s c) 15 m/s d) 16 m/s

4. Una bola rueda hacia abajo de un plano inclinado con una aceleración uniforme de 1.00 m/s^2 . Si su velocidad inicial es 1.00 m/s abajo de la pendiente, ¿hasta dónde viajará a lo largo de la pendiente en 10.0 s ? a) 10.0 m b) 12.0 m c) 60.0 m d) 1.00×10^2
5. Un objeto con una velocidad inicial de 25.0 m/s acelera uniformemente por 10.0 s a una velocidad final de 75.0 m/s . ¿Cuál es la magnitud de su aceleración? a) 3.00 m/s^2 b) 5.00 m/s^2 c) 25.0 m/s^2 d) 50.0 m/s^2
6. Una roca cae desde una altura de 19.6 m sobre el suelo. ¿Cuánto tiempo le toma a la roca para golpear la tierra? a) 2.0 s b) 4.0 s c) 4.9 s d) 9.8 s
7. Una nave espacial que permanece sobre la superficie de un planeta distante, lanza una punta de prueba para explorar la superficie del planeta. La punta de prueba cae libremente una distancia de 40.0 m durante los primeros 4.00 s después de su lanzamiento. ¿Cuál es la magnitud de la aceleración debida a la gravedad en este planeta? a) 4.00 m/s^2 b) 5.00 m/s^2 c) 10.0 m/s^2 d) 16.0 m/s^2
8. Una bola cae desde la azotea de un edificio muy alto. ¿Cuál es su velocidad después de caer por 5.00 s ? a) 1.96 m/s b) 9.80 m/s c) 49.0 m/s d) 98.0 m/s
9. Un *quarterback* lanza un balón con una velocidad de 7.00 m/s en un ángulo de 15.0° con la horizontal. ¿Qué tan lejos debe desplazarse el receptor para atrapar el balón con éxito? a) 1.25 m b) 2.50 m c) 5.00 m d) 6.25 m
10. Un bombardero vuela en trayectoria paralela a la tierra a una velocidad de 500 kilómetros por hora a una altitud de 1960 m cuando deja caer una bomba. ¿Cuánto tiempo le toma la bomba en llegar a la tierra? a) 0.500 s b) 20.0 s c) 50.0 s d) $2.00 \times 10^2 \text{ s}$
11. Una bola se lanza horizontalmente con una velocidad de 6.0 m/s . ¿Cuál es su velocidad después de 3.0 segundos de vuelo? a) 30.0 m/s b) 15.8 m/s c) 18 m/s d) 4.9 m/s
12. Una mujer de 70 kilogramos que está parada en el ecuador rota con la Tierra alrededor de su eje a una velocidad tangencial de cerca de $5 \times 10^2 \text{ m/s}$. Si el radio de la tierra es aproximadamente $6 \times 10^6 \text{ m}$, ¿cuál es la mejor estimación de la aceleración centrípeta que experimenta la mujer? a) $4 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ b) 4 m/s^2 c) 10^{-4} m/s^2 d) 24 m/s^2
13. Una bola rueda con velocidad uniforme alrededor de una pista plana, horizontal, circular. Si la velocidad de la bola se duplica, su aceleración centrípeta es a) cuadruplicada b) duplicada c) la mitad d) no cambia

RESPUESTAS

1. a). La velocidad media es la distancia total recorrida dividida por el tiempo transcurrido.

$$v = d/\Delta t = 6.0 \text{ m}/3.0 \text{ s} = 2.0 \text{ m/s}$$

2. b). $t = (v_f - v_i)/a$. La velocidad final es 0 kilómetros por hora, y la aceleración es -5.0 m/s^2 . (El signo negativo aparece porque la aceleración es antiparalela a la velocidad). No olvide convertir de kilómetros a metros y horas a segundos.

$$t = \frac{\Delta v}{a} = \frac{0 - (45 \text{ km/h})(10^3 \text{ m/1 km})(1 \text{ h}/3600 \text{ s})}{-5.0 \text{ m/s}^2} = 2.5 \text{ s}$$

3. c). $v_f = v_i + at = 10 \text{ m/s} + (1.0 \text{ m/s}^2)(5.0 \text{ s}) = 15 \text{ m/s}$
4. c). $d = v_i t + \frac{1}{2}at^2 = (1.00 \text{ m/s})(10.0 \text{ s}) + \frac{1}{2}(1.00 \text{ m/s}^2)(10.0 \text{ s})^2 = 60.0 \text{ m}$
5. b). $a = \Delta v/\Delta t = (75.0 \text{ m/s} - 25.0 \text{ m/s})/10.0 \text{ s} = 5.00 \text{ m/s}^2$
6. a). La roca está en caída libre con la velocidad inicial cero y la altura inicial $y_0 = 19.6 \text{ m}$. La ecuación de desplazamiento se convierte en $\Delta y = y - y_0 = -\frac{1}{2}gt^2$. Resolviendo para el tiempo t con $y = 0$ da

$$t = (2y_0/g)^{1/2} = (2 \times 19.6 \text{ m}/9.8 \text{ m/s}^2)^{1/2} = (4.0 \text{ s}^2)^{1/2} = 2.0 \text{ s}$$

7. b). Esta pregunta es un problema de caída libre. El objeto empieza a partir del reposo, $v_0 = 0$. Reacomode $\Delta y = -\frac{1}{2}gt^2$ y resuelva para la aceleración de la gravedad, g :

$$g = -2(y - y_0)/t^2 = -2(-40.0 \text{ m} - 0)/16.0 \text{ s}^2 = 5.00 \text{ m/s}^2$$

8. c). La velocidad en caída libre comenzando con una velocidad inicial de cero es $v = -gt = -(9.8 \text{ m/s}^2)(5.00 \text{ s}) = -49 \text{ m/s}$

9. **b).** La velocidad inicial en la dirección y es $v_{0y} = v_0 \sin \theta = (7.00 \text{ m/s}) \sin 15.0^\circ = 1.81 \text{ m/s}$. Se alcanza la altura máxima cuando la velocidad en la dirección y es cero: $v = 0 = -gt + v_{0y} \rightarrow 0 = -(9.80 \text{ m/s}^2)t + 1.81 \text{ m/s} \rightarrow t = 0.185 \text{ s}$. Duplicando este resultado, da el tiempo total de vuelo. El alcance es $\Delta x = (v_0 \cos \theta)t = (7.00 \text{ m/s}) (\cos 15.0^\circ)(0.370 \text{ s}) = 2.50 \text{ m}$.
10. **b).** Las componentes horizontal y vertical de la velocidad son independientes. La componente vertical es debida solamente a la aceleración de la gravedad:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \rightarrow t = (2y/g)^{1/2}$$

$$t = [2(1960 \text{ m})/(9.80 \text{ m/s}^2)]^{1/2} = (4.00 \times 10^2 \text{ s}^2)^{1/2} = 20.0 \text{ s}$$

11. **a).** La componente horizontal de la velocidad es $v_x = 6.00 \text{ m/s}$ y la componente vertical es $v_y = gt = (9.80 \text{ m/s}^2)(3.00 \text{ s}) = 29.4 \text{ m/s}$, así que

$$v = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2} = [(6.00 \text{ m/s})^2 + (29.4 \text{ m/s})^2]^{1/2} = 30.0 \text{ m/s}$$

12. **a).** La mujer se está moviendo con igual velocidad constante a la rotación de la Tierra en su eje en una circunferencia igual al radio de la tierra. La aceleración centrípeta es

$$a_c = v^2/R = (500 \text{ m/s})^2/6 \times 10^6 \text{ m} = (25 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}^2)/6 \times 10^6 \text{ m} \approx 4 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

13. **a).** $a_c = v^2/R$. La aceleración y el cuadrado de la velocidad son directamente proporcionales. Como la velocidad es cuadrática, al duplicar la velocidad se cuadruplica la aceleración.

Fuerza

EJEMPLO 1

Una fuerza neta F acelera a un objeto de masa m a 6 m/s^2 . La misma fuerza neta se aplica a un cuerpo de $3m$. ¿Cuál es la aceleración del cuerpo de mayor masa?

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Según la segunda ley del Newton, la aceleración impartida a un objeto por una fuerza es inversamente proporcional a la masa del objeto. La aceleración de un objeto de tres veces más masa es por lo tanto $\frac{1}{3}(6 \text{ m/s}^2) = 2 \text{ m/s}^2$.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la segunda ley de Newton para cada uno de los objetos:

$$(1) \quad ma_m = F$$

$$(2) \quad Ma_M = F$$

$$(3) \quad \frac{Ma_M}{ma_m} = \frac{F}{F} = 1$$

Divida la ecuación (2) por la ecuación (1):

Sustituya $M = 3m$ en la ecuación (3) y resuelva para a_M :

$$\frac{(3m)a_M}{ma_m} = 1 \rightarrow a_M = \frac{1}{3}a_m = \frac{1}{3} \cdot (6 \text{ m/s}^2)$$

$$a_M = 2 \text{ m/s}^2$$

EJEMPLO 2

Un bloque de masa m está unido por una cuerda horizontal de masa insignificante, al lado izquierdo de un segundo bloque de masa M , con $m < M$. Una segunda cuerda se une al lado derecho de la masa M , y el sistema es jalado en la dirección x positiva por una fuerza constante F si la superficie es sin fricción, ¿qué se puede decir sobre la tensión en la cuerda que conecta los dos bloques? a) $T = F$ b) $T < F$ c) $T > F$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La respuesta es **b)**. La aceleración del bloque m es igual que la del sistema de ambos, que tiene masa total $m + M$. La tensión T debe acelerar solamente a la masa m , mientras que la fuerza F debe proporcionar la misma aceleración a un sistema de la mayor masa, $m + M$. Por lo tanto $F > T$.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

En este problema la componente y de la segunda ley del Newton da solamente las fuerzas normales que actúan sobre los bloques en términos de la fuerza de gravedad. Como no hay fricción, estas fuerzas no afectan la aceleración. Escriba la componente x de la segunda ley de Newton para el sistema:

$$(1) \quad (m + M)a = F$$

Escriba la componente x de la segunda ley de Newton para el bloque de menor masa:

$$(2) \quad ma = T$$

Divida la ecuación (1) por la ecuación (2), cancelando la aceleración, que es la misma para ambos:

$$(3) \quad \frac{(m + M)a}{ma} = \frac{F}{T} \rightarrow \frac{(m + M)}{m} = \frac{F}{T}$$

Revisando la ecuación (3), es claro que $F > T$ porque $m + M > m$, y otra vez la respuesta es **b**).

EJEMPLO 3

Un bloque con masa m empieza a moverse desde la parte superior de una pendiente con coeficiente de fricción cinética μ_k y se deja resbalar hacia la parte de abajo. Un segundo bloque con masa $M = 2m$ también se le permite resbalar por la pendiente. Si, μ_k es el mismo para ambos bloques, ¿cómo se compara la aceleración a_M del segundo bloque con la aceleración a_m del primer bloque? a) $a_M = 2a_m$ b) $a_M = a_m$ c) $a_M = \frac{1}{2}a_m$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Las aceleraciones son iguales porque la fuerza de la gravedad, la fuerza de fricción y el lado ma de la segunda ley de Newton, cuando está aplicada en este contexto físico, son todas proporcionales a la masa. Por lo tanto, una masa diferente no debe afectar la aceleración del cuerpo, y la respuesta es **b**).

EJEMPLO 4

El planeta A tiene dos veces la masa y dos veces el radio del planeta B. ¿En qué planeta un astronauta tendría un mayor peso? a) El planeta A b) el planeta B c) el peso del astronauta no sería afectado.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El peso como medición en un planeta dado es la magnitud de la fuerza gravitacional en la superficie de ese planeta. En la ley de Newton de la gravitación, la fuerza gravitacional es directamente proporcional a la masa de cada uno de dos cuerpos pero inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. Por lo tanto, considerando solamente las masas, el planeta A ejerce dos veces la fuerza gravitacional del planeta B. El planeta A también tiene dos veces el radio del planeta B, sin embargo, el cuadrado inverso de 2 es $\frac{1}{4}$. Total, por lo tanto, el planeta A tiene una aceleración gravitacional más débil en su superficie que el planeta B por un factor de una mitad, y el peso de un astronauta será mayor en el planeta B [respuesta **b**].

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la ley de Newton de la gravitación para el peso de un astronauta de masa m sobre el planeta A:

$$(1) \quad w_A = \frac{mM_A G}{r_A^2}$$

Escriba la misma ley para el peso del astronauta sobre el planeta B:

$$(2) \quad w_B = \frac{mM_B G}{r_B^2}$$

Divida la ecuación (2) por la ecuación (1):

$$\frac{w_B}{w_A} = \frac{\frac{mM_B G}{r_B^2}}{\frac{mM_A G}{r_A^2}} = \frac{M_B r_A^2}{M_A r_B^2}$$

Ahora sustituya $r_A = 2r_B$ y $M_A = 2M_B$:

$$\frac{w_B}{w_A} = \frac{M_B (2r_B)^2}{(2M_B) r_B^2} = 2$$

Resuelva para w_B :

$$w_B = 2w_A \text{ [respuesta b)]}$$

Problemas de opción múltiple

- ¿Cuál de los siguientes resultará de la aplicación de una fuerza neta no cero sobre un objeto? a) La velocidad del objeto seguirá siendo constante. b) La velocidad del objeto seguirá siendo constante, pero la dirección en la cual se mueve el objeto cambiará. c) La velocidad del objeto cambiará. d) Ninguna de las anteriores.
- El cuerpo A tiene una masa dos veces más grande que la del cuerpo B. Si una fuerza que actúa en el cuerpo A es la mitad del valor de una fuerza que actúa en el cuerpo B, ¿cuál declaración es verdadera? a) La aceleración de A será dos veces la de B. b) La aceleración de A será la mitad de la de B. c) La aceleración de A será igual a la B. d) La aceleración de A será un cuarto de la B.
- ¿Cuál de las siguientes es una afirmación de la segunda ley de Newton del movimiento? a) Para cada acción hay una reacción igual y opuesta. b) Fuerza y aceleración son directamente proporcionales, con la masa como constante de proporcionalidad. c) Un cuerpo en reposo tiende a permanecer en ese estado a menos que actúe sobre él una fuerza. d) Ninguno de éstos.
- Si un cuerpo tiene una aceleración cero, ¿qué declaración es más cierta? a) El cuerpo debe estar en reposo. b) El cuerpo puede estar en reposo. c) El cuerpo debe retrasarse. d) El cuerpo puede acelerarse.
- ¿Cuál es el peso de un cuerpo de 2.00 kilogramos sobre o cerca de la superficie de la Tierra? a) 4.90 N b) 16.0 libras c) 19.6 N d) 64.0 kg m/s²
- Dos objetos de masa igual son separados por una distancia de 2 m. Si la masa de un objeto se duplica, la fuerza de gravedad entre los dos objetos será a) la mitad más grande b) dos veces más grande c) un cuarto más grande d) cuatro veces más grande
- La distancia entre una nave espacial y el centro de la Tierra aumenta de un radio de la Tierra a tres radios de la Tierra. ¿Qué sucede con la fuerza de gravedad que actúa en la nave espacial? a) Resulta 1/9 más grande. b) Resulta 9 veces más grande. c) Resulta 1/3 más grande. d) Resulta 3 veces más grande.
- Un astronauta de 100 kg aterriza en un planeta con un radio tres veces el de la Tierra y una masa nueve veces la de la Tierra. La aceleración debida a la gravedad, g , experimentada por el astronauta es a) nueve veces el valor de g en la Tierra. b) Tres veces el valor de g en la Tierra. c) El mismo valor de g que en la Tierra. d) La mitad del valor de g en la Tierra.
- El peso medido de una persona que está parada en una báscula y que monta en un elevador será más grande cuando a) el elevador suba con una velocidad constante. b) el elevador acelere hacia arriba. c) el elevador baje a una velocidad constante. d) ninguno de éstos, porque el peso es constante.
- Un bloque con masa de 25.0 kg está en reposo sobre una superficie llana áspera. Una fuerza horizontal de 1.50×10^2 N se aplica sobre él, y le proporciona una aceleración de 4.00 m/s². ¿Cuál es la magnitud de la fuerza de la fricción que actúa en el bloque? a) 25.0 N b) 1.00×10^2 N c) 75.0 N d) 50.0 N

RESPUESTAS

- c). La fuerza produce la aceleración, lo que da lugar a un cambio de velocidad.
- d). Obtenga el cociente de las aceleraciones de la segunda ley de Newton, $F = ma$:

$$\frac{m_A a_A}{m_B a_B} = \frac{F_A}{F_B} \rightarrow \frac{(2m_B) a_A}{m_B a_B} = \frac{(\frac{1}{2}F_B)}{F_B} \rightarrow \frac{a_A}{a_B} = \frac{1}{4}$$

- b). La opción a) es una declaración de la tercera ley, y la opción c) es una declaración de la primera ley.
- b). Las opciones c) y d) pueden ser eliminadas inmediatamente porque la velocidad que cambia (su magnitud o dirección) requiere del uso de una fuerza. La opción a) puede ser eliminada porque la primera ley se aplica a ambos cuerpos en reposo y a los que se mueven con velocidad uniforme.

5. c). $w = F = mg = (2.00 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) = 19.6 \text{ N}$
6. b). En la ley de la gravitación universal, la fuerza gravitacional es directamente proporcional al producto de las masas. Duplicar una de las masas duplica su producto y por lo tanto duplica la fuerza.
7. a). Las opciones b) y d) pueden ser eliminadas porque la fuerza de la atracción gravitacional debe disminuir con el aumento de distancia. Como $F_{\text{grav}} = Gm_1m_2/r^2$, la fuerza disminuye por un factor de 9 cuando se triplica r .
8. c). Vea el ejemplo 4. La fuerza gravitacional es proporcional a la masa e inversamente proporcional al cuadrado del radio, así que nueve veces la masa y tres veces el radio dan un factor de $9/3^2 = 1$. No hay diferencia perceptible en peso porque los dos efectos se cancelan mutuamente.
9. b). El peso medido en la báscula es esencialmente la magnitud de la fuerza normal. Aplique la segunda ley de Newton al pasajero y resuelva para la fuerza normal:

$$ma = n - mg \rightarrow n = ma + mg$$

Examinando la ecuación para la fuerza normal, está claro que una aceleración positiva da lugar a una fuerza normal más grande, por lo tanto una lectura más grande en la báscula.

10. d). Utilice la segunda ley de Newton:

$$\begin{aligned} ma &= F_{\text{ap}} - F_{\text{fric}} \\ (25.0 \text{ kg})(4.00 \text{ m/s}^2) &= 1.50 \times 10^2 \text{ N} - F_{\text{fric}} \\ F_{\text{fric}} &= 50.0 \text{ N} \end{aligned}$$

Equilibrio

■ EJEMPLO 1

Una viga de acero uniforme con longitud L y masa $M = 60.0 \text{ kg}$ descansa en dos pivotes. El primer pivote está situado en el extremo izquierdo de la viga y ejerce una fuerza normal n_1 en ese punto. Un segundo pivote está dos tercios de la distancia del extremo izquierdo al extremo derecho. ¿Cuál es la fuerza normal n_2 ejercida en la viga por el segundo pivote? a) 441 N b) 264 N c) 372 N d) 188 N

ESTRATEGIA

En equilibrio, la suma de los torques es cero. Sea τ_{n_1} el torque ejercido por la fuerza normal n_1 asociada al primer pivote, τ_{n_2} , el torque ejercido por la fuerza normal n_2 asociado con el segundo pivote y τ_M el torque ejercido por la fuerza de gravedad sobre la viga. Elija el pivote en el extremo izquierdo como el punto alrededor del cual se han de calcular los torques. Utilice $\tau = rF \sin \theta$ para cada torque, donde θ es el ángulo que está entre el vector de posición \vec{r} y la fuerza \vec{F} . El signo de un torque dado es positivo si la fuerza tiende a rotar la viga a la izquierda y negativo si la fuerza tiende a rotar la viga a la derecha.

SOLUCIÓN

En equilibrio, la suma de los torques es cero:

$$(1) \quad \sum \tau_i = \tau_{n_1} + \tau_{n_2} + \tau_M = 0$$

El torque debido a la fuerza normal n_1 es cero porque su brazo de palanca es cero. El peso de la viga uniforme se puede considerar que actúa en el centro de ésta, su centro de gravedad. La ecuación (1) se convierte:

$$(2) \quad n_2(2L/3) \sin 90^\circ - Mg(L/2) \sin 90^\circ = 0$$

Note que para n_2 , el torque es positivo, mientras que el torque gravitacional es negativo (véase la estrategia). Cancele los factores de L en la ecuación (2) y resuélvalos para n_2 :

$$\begin{aligned} n_2 &= \frac{3}{4}Mg = \frac{3}{4}(60.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \\ &= 441 \text{ N} \quad [\text{respuesta a)}] \end{aligned}$$

■ EJEMPLO 2

Una patinadora de hielo A tiene una masa M y está en reposo sobre una charca congelada, llevando en la espalda una mochila de masa m . Ella lanza la mochila a una patinadora B, que también tiene masa M y que inicialmente está en reposo. Si la

(continúa)

superficie de la charca se considera sin fricción, ¿cuál patinador tiene la velocidad subsecuente más grande? (Los cambios de la cantidad de movimiento en la dirección vertical se pueden ignorar aquí.) a) La patinadora A. b) La patinadora B. c) Ambas patinadoras tienen la misma velocidad subsecuente.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Por la conservación de la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento final de la patinadora A es igual y opuesta a la cantidad de movimiento de la mochila. La patinadora B adquiere este mismo ímpetu cuando **toma** la mochila, pero también aumenta su masa de m a $M + m$. Como la cantidad de movimiento es proporcional a la masa y la velocidad, la patinadora B, con mayor masa, tiene una velocidad más pequeña. Así, la respuesta es **a**).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Aplique la conservación de la cantidad de movimiento de la patinadora A. La cantidad de movimiento inicial es igual a la cantidad de movimiento final:

$$p_i = p_f$$

La cantidad de movimiento total inicial es cero. La cantidad de movimiento final de la patinadora A es MV_A , mientras que la mochila tiene una cantidad de movimiento mv .

$$0 = MV_A + mv$$

Resuelva para la velocidad V_A de la patinadora A:

$$(1) \quad V_A = -\frac{mv}{M}$$

Aplique la conservación de la cantidad de movimiento a la patinadora B. La cantidad de movimiento inicial de la mochila, mv , es igual a la cantidad de movimiento final del sistema patinadora-mochila:

$$mv = (m + M)V_B$$

Resuelva para la velocidad V_B del sistema mochila-patinadora B:

$$(2) \quad V_B = \frac{mv}{m + M}$$

Divida la magnitud de la ecuación (1) por la ecuación (2):

$$(3) \quad \frac{|V_A|}{|V_B|} = \frac{\left| -\frac{mv}{M} \right|}{\left| \frac{mv}{m + M} \right|} = \frac{m + M}{M} > 1$$

Por la ecuación (3), $|V_A|/|V_B| > 1$, así que $|V_A| > |V_B|$ [respuesta **a**].

Problemas de opción múltiple

- Una barra no uniforme de 8.00 m de largo se coloca en un pivote a 2.00 m del extremo derecho de la barra, que es también el extremo más ligero. El centro de gravedad de la barra se localiza a 2.00 m del extremo izquierdo más pesado. Si un peso de $W = 5.00 \times 10^2$ N en el extremo derecho balancea la barra, ¿cuál debe ser el peso W de la barra? a) 1.25×10^2 N b) 2.50×10^2 N c) 5.00×10^2 N d) 1.00×10^3 N
- Una barra de masa insignificante tiene 10 m de longitud. Si un objeto de 30 kilogramos se suspende del extremo izquierdo de la barra y un objeto de 20 kilogramos del extremo derecho, ¿dónde se debe poner el punto pivote para asegurar el equilibrio? a) 4 m del objeto de 30 kilogramos b) 4 m del objeto de 20 kilogramos c) 8 m dentro del objeto de 30 kilogramos d) 5 m del objeto de 20 kilogramos
- Un coche con una masa de 8.00×10^2 kilogramos se atasca en un camino. Un camión con una masa de 1200 kilogramos viene alrededor de una curva a 20.0 m/s y golpea el coche. Los dos vehículos siguen trabados juntos después de la colisión. ¿Cuál es su velocidad combinada después de impacto? a) 3.0 m/s b) 6.0 m/s c) 12 m/s d) 24 m/s
- Un coche de masa 1.00×10^3 kilogramos que viaja a 5.00 m/s alcanza y choca con un camión de masa 3.00×10^3 kilogramos que viaja en la misma dirección a 1.00 m/s. Durante la colisión, los dos vehículos permanecen en contacto y continúan moviéndose como una unidad. ¿Cuál es la velocidad de los vehículos juntos justo después del impacto? a) 2.00 m/s b) 4.00 m/s c) 5.00 m/s d) 6.00 m/s
- Una pistola con una masa de 0.20 kilogramos dispara una bala de 0.50 gramos con una velocidad inicial de 1.0×10^2 m/s. ¿Cuál es la magnitud de la velocidad del retroceso de la pistola? a) 0.25 m/s b) 0.50 m/s c) 1.0 m/s d) 10 m/s

6. Una bola de 0.20 kilogramos se rebota contra una pared. Golpea la pared con una velocidad de 20.0 m/s y rebota en una colisión elástica. ¿Cuál es la magnitud del cambio en la cantidad de movimiento de la bola? a) 0 kg · m/s b) 4.0 kg · m/s c) 8.0 kg · m/s d) 10 kg · m/s
7. Una pelota de tenis se golpea con una raqueta y el cambio en la cantidad de movimiento de la bola es 4.0 kg · m/s. Si el momento de la colisión de la bola y la raqueta es 0.01 s, ¿cuál es la magnitud de la fuerza ejercida por la bola sobre la raqueta? a) 2.5 × 10⁻³ N b) 4 × 10⁻² N c) 4.0 N d) 400 N
8. Un carro de 30 kilogramos que viaja al norte a 5 m/s choca con un carro de 50 kilogramos que se venía moviendo al sur. Ambos carros inmediatamente se reclinan después de la colisión. ¿Cuál debe haber sido la velocidad del carro del que se dirigía al sur? a) 3 m/s b) 5 m/s c) 6 m/s d) 10 m/s

RESPUESTAS

1. b) En equilibrio

$$(1) \quad \sum \vec{\tau}_i = \vec{\tau}_p + \vec{\tau}_B + \vec{\tau}_W = 0$$

El torque $\vec{\tau}_p$ ejercido por el pivote es cero porque los torques se calculan alrededor de ese punto, significando un brazo de palanca cero para la fuerza ejercida por el pivote. El centro de gravedad está a 4.00 m del punto pivote, y la fuerza gravitacional ejerce un torque $\vec{\tau}_B$ en sentido contrario a las manecillas del reloj sobre la barra como si toda la masa fuera concentrada en ese punto. El esfuerzo de torsión debido al peso de la barra es por lo tanto igual a $+rF = +(4.00 \text{ m})w_B$. El peso W en el lado derecho da un torque en el sentido de las manecillas del reloj $\vec{\tau}_W = 2(2.00 \text{ m})W$. Por lo tanto, de la ecuación (1),

$$0 + w_B(4.00 \text{ m}) - (5.00 \times 10^2 \text{ N})(2.00 \text{ m}) = 0 \quad \rightarrow \quad w_B = 2.50 \times 10^2 \text{ N}$$

2. a). El punto pivote debe estar más cercano al peso mayor; si no, los torques debido a los pesos no podían ser iguales en magnitud y contrarios en dirección. Dada esta información, las opciones b) y c) se pueden eliminar inmediatamente. La opción d) puede también ser eliminada porque pone el pivote en el centro de la barra, que daría solamente equilibrio si los dos pesos fueran idénticos. La opción debe ser a), que se puede confirmar usando la segunda condición del equilibrio. Si x es la distancia del pivote de la masa de 30 kilogramos, entonces $10 - x$ es la distancia del pivote a la masa de 20 kilogramos. Aplique la segunda condición del equilibrio, $\sum \tau_i = 0$:

$$(30 \text{ kg})g(x) - (20 \text{ kg})g(10 - x) = 0 \quad \rightarrow \quad x = 4 \text{ m}$$

3. c). La conservación de la cantidad de movimiento se asegura de que la cantidad de movimiento total después de la colisión debe ser igual a la cantidad de movimiento total antes de la colisión. Si A es el coche de masa $8.00 \times 10^2 \text{ kg}$ y B es el camión de 1200 kilogramos, entonces

$$m_A v_{A \text{ inicial}} + m_B v_{B \text{ inicial}} = m_A v_{A \text{ final}} + m_B v_{B \text{ final}}$$

Como se atasca el coche, su velocidad inicial es cero y $m_A v_{A \text{ inicial}}$ es cero. Después de la colisión de los vehículos se ensamblan y $v_{A \text{ final}} = v_{B \text{ final}} = v_{\text{final}}$. La ecuación se convierte

$$m_B v_{B \text{ inicial}} = (m_A + m_B) v_{\text{final}}$$

Resolver para v_{final} :

$$v_{\text{final}} = m_B v_{B \text{ inicial}} / (m_A + m_B) = (1200 \text{ kg})(20.0 \text{ m/s}) / (1200 \text{ kg} + 8.00 \times 10^2 \text{ kg}) = 12 \text{ m/s}$$

4. a). La conservación de la cantidad de movimiento ímpetu da $p_{\text{antes}} = p_{\text{después}}$. La cantidad de movimiento total antes de que la colisión es la suma de las cantidades de movimiento para los dos vehículos. Después de la colisión, p es la cantidad de movimiento asociado a sus masas acopladas:

$$(1.00 \times 10^3 \text{ kg})(5.00 \text{ m/s}) + (3.00 \times 10^3 \text{ kg})(1.00 \text{ m/s}) = (4.00 \times 10^3 \text{ kg})v_{\text{final}}$$

$$v_{\text{final}} = (5.00 \times 10^3 + 3.00 \times 10^3)(\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}) / (4.00 \times 10^3 \text{ kg}) = 2.00 \text{ m/s}$$

5. a). Se conserva la cantidad de movimiento porque no hay fuerzas externas que actúan en el sistema de la pistola-bala durante el disparo. La cantidad de movimiento inicial, sin embargo, es cero. La cantidad de movimiento final es la suma de la cantidad de movimiento de la bala y de la cantidad de movimiento del retroceso de la pistola:

$$p_{\text{antes}} = p_{\text{después}} \quad \rightarrow \quad 0 = m_{\text{pistola}} v_{\text{pistola}} + m_{\text{bala}} v_{\text{bala}}$$

$$v_{\text{pistola}} = -(0.50 \text{ g})(1.0 \times 10^2 \text{ m/s}) / 0.20 \times 10^3 \text{ g} = -0.25 \text{ m/s}$$

6. c). El cambio en la cantidad de movimiento está dado por $\Delta p = mv_f - mv_i$, donde v_i es la velocidad inicial y v_f es la velocidad del rebote. Como la colisión es elástica, la bola rebota en la dirección opuesta pero con la misma velocidad con la cual golpeó la pared. Por lo tanto, $v_f = 2v_i$ y el cambio en cantidad de movimiento es

$$\Delta p = m(-v_i) - mv_i = -2mv_i = -2(0.20 \text{ kg})(20.0 \text{ m/s}) = -8.0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

La magnitud de un número es su valor absoluto: $|-8.0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}| = 8.0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

7. d). La fuerza está relacionada con la cantidad de movimiento por la ecuación impulso-cantidad de movimiento, $F \Delta t = \Delta p$. Por lo tanto

$$F = \Delta p / \Delta t = (4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) / 0.01 \text{ s} = 400 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 400 \text{ N}$$

8. a). Se conserva la cantidad de movimiento. Como ambos carros vienen unificados, la cantidad de movimiento total después de la colisión debe ser cero, lo que significa que la cantidad de movimiento total antes de la colisión era también cero. Si los dos carros se etiquetan A y B, entonces

$$m_A v_A = m_B v_B \rightarrow v_B = (30 \text{ kg})(5 \text{ m/s}) / 50 \text{ kg} = 3 \text{ m/s}$$

Trabajo

EJEMPLO 1

Un coche que viaja con rapidez v puede parar una distancia d debido a la fricción cinética. A dos veces la velocidad ¿qué distancia se requiere para detenerse? a) d b) $2d$ c) $4d$ d) $8d$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La respuesta es c). La respuesta a) puede ser eliminada inmediatamente porque en el doble de velocidad, la energía del coche debe ser mayor que antes y por lo tanto la distancia a la que para debe ser mayor. Como la energía cinética es proporcional a v^2 , al duplicar la velocidad se cuadruplica la energía. El trabajo hecho por la fricción es lineal en la distancia d , así que se requiere cuatro veces la distancia. Este resultado puede verse más fácilmente con una proporción.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Aplique el teorema del trabajo y la energía:

$$(1) \quad W = \Delta EC = EC_f - EC_i$$

Suponga que el coche está viajando en la dirección positiva de x . Sustituya las expresiones para el trabajo hecho por una fuerza de fricción cinética de magnitud F_k realizada sobre un desplazamiento Δx y para una energía cinética, considerando que $EC_f = 0$:

$$(2) \quad -F_k \Delta x = 0 - \frac{1}{2}mv^2$$

Multiplique ambos lados por -1 y haga cero al término:

$$(3) \quad F_k \Delta x = \frac{1}{2}mv^2$$

Denote los dos posibles diferentes desplazamientos por d_1 y d_2 , las dos velocidades por v_1 y v_2 . Sustituya en la ecuación (3), creando una ecuación para el primer caso y una ecuación similar para el segundo caso:

$$(4) \quad F_k d_1 = \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$(5) \quad F_k d_2 = \frac{1}{2}mv_2^2$$

Ahora divida la ecuación (5) por la ecuación (4), cancelando los términos F_k , m y $\frac{1}{2}$:

$$\frac{F_k d_2}{F_k d_1} = \frac{\frac{1}{2}mv_2^2}{\frac{1}{2}mv_1^2} \rightarrow \frac{d_2}{d_1} = \frac{v_2^2}{v_1^2} = \frac{(2v)^2}{v^2} = 4$$

Se sigue entonces, que la respuesta c) es la correcta:

$$d_2 = 4d_1$$

EJEMPLO 2

Un camión de masa M y un coche de masa m están viajando a la misma velocidad. Ambos accionan de golpe los frenos, trabándolos y patinándose a lo largo del camino, que tiene un coeficiente de fricción μ_k . El coche para después de una distancia d . Suponiendo que μ_k es igual para ambos vehículos, ¿cuál de lo siguiente es verdad de la distancia D que el camión viaja antes de parar? a) $D = d$ b) $D > d$ c) $D < d$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La energía cinética es directamente proporcional a la masa, y como el camión tiene mayor masa que el coche, su energía cinética es mayor y por lo tanto puede pensarse que se requeriría una mayor distancia para frenar. La fuerza de fricción, como siempre, es también directamente proporcional a la masa, así que la fuerza de fricción es proporcionalmente mayor para el camión que para el coche. En igualdad de circunstancias, el camión y el coche paran en la misma distancia, $D = d$, que es la respuesta **a)**.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la expresión para la fuerza de fricción, donde n es la fuerza normal:

$$(1) \quad F_k = \mu_k n = \mu_k mg$$

Ahora, utilice la ecuación (4) del ejemplo 1:

$$(2) \quad \frac{F_{k,\text{camión}} D}{F_{k,\text{coche}} d} = \frac{\frac{1}{2} M v^2}{\frac{1}{2} m v^2}$$

Sustituya la expresión para la fuerza de fricción cinética de la ecuación (1):

$$\frac{(\mu_k M g) D}{(\mu_k m g) d} = \frac{\frac{1}{2} M v^2}{\frac{1}{2} m v^2} \rightarrow \frac{MD}{md} = \frac{M}{m} \rightarrow \frac{D}{d} = 1$$

La respuesta es **a)**, como se esperaba:

$$D = d$$

EJEMPLO 3

Un coche experimenta una aceleración uniforme a partir del reposo. ¿Qué se puede decir sobre la potencia instantánea entregada por el motor? a) Hay aumentos instantáneos de potencia con el aumento de velocidad. b) La potencia instantánea sigue siendo igual. c) La potencia instantánea disminuye con el aumento de velocidad.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La respuesta correcta es **a)**. Puesto que la aceleración es uniforme, la fuerza es constante. La potencia instantánea está dada por $P = Fv$, así que con el aumento de velocidad la potencia entregada debe también aumentar.

EJEMPLO 4

Un cirquero experto es lanzado hacia arriba desde un cañón. Si la resistencia del aire es insignificante, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera acerca de su energía mecánica total en la subida? a) Aumenta. b) Sigue siendo igual. c) Disminuye.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

En ausencia de fuerzas no conservativas, la energía mecánica se conserva, así que seguirá siendo igual, y la respuesta **b)** es la correcta.

APLICACIÓN

Si el cirquero tiene masa 65.0 kg y su velocidad inicial es 8.00 m/s, encuentre la altura máxima alcanzada.

SOLUCIÓN

Aplique la conservación de la energía mecánica:

$$\Delta EC + \Delta EP = 0$$

$$\frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2 + m g h_f - m g h_i = 0$$

La velocidad final es cero, y la altura inicial puede tomarse como cero:

$$0 - \frac{1}{2} m v_i^2 + m g h_f - 0 = 0$$

Resuelva para h_f y sustituya valores:

$$h_f = \frac{v_i^2}{2g} = \frac{(8.00 \text{ m/s})^2}{2(9.80 \text{ m/s}^2)} = 3.27 \text{ m}$$

Problemas de opción múltiple

- Si la velocidad a la que un coche está viajando es triplicada, ¿por qué factor aumenta su energía cinética? a) $3^{1/2}$ b) 3 c) 6 d) 9
- ¿Cuál es la magnitud de la fuerza ejercida por el aire sobre un avión si son necesarios 500 kilovatios de potencia para mantener una velocidad constante de 100 metros por segundo? a) 5 N b) 50 N c) 500 N d) 5000 N

3. ¿Qué sucede con la velocidad de un cuerpo si se duplica su energía cinética? a) Aumenta en un factor de $2^{1/2}$. b) Se duplica. c) Se parte en dos. d) Aumenta en un factor de 4.
4. Una bola con una masa de 1.0 kg se asienta en la parte superior de un plano inclinado de pendiente 30° y que tiene 20.0 metros de largo. Si la energía potencial de la bola en relación con el fondo de la pendiente, es 98 J en la cima, ¿cuál es su energía potencial una vez que rueda a la mitad de la pendiente? a) 0 J b) 49 J c) 98 J d) 196 J
5. ¿Cuánto trabajo es hecho por una fuerza horizontal de 20.0 N cuando es aplicada a una masa de 0.500 kilogramos en una distancia de 10.0 m? a) 5.00 J b) 10.0 J c) 49.0 J d) 2.00×10^2 J
6. Un cuerpo localizado a 10.0 metros sobre la superficie de la Tierra tiene una energía potencial gravitacional de 4.90×10^2 J relativa a esta superficie. ¿Cuál es la nueva energía potencial gravitacional si el cuerpo cae desde una altura de 7.00 m sobre la Tierra? a) 70.0 J b) 147 J c) 281 J d) 343 J
7. Un carro A tiene una masa de 1.0 kilogramo y una velocidad constante de 3.0 m/s. Un carro B tiene una masa de 1.5 kilogramos y una velocidad constante de 2.0 m/s. ¿Cuál de las declaraciones siguientes es verdadera? a) El carro A tiene mayor energía cinética. b) El carro B tiene mayor energía cinética. c) El carro A tiene la mayor aceleración. d) El carro B tiene la mayor aceleración.
8. El trabajo hecho en levantar un cuerpo debe: a) Aumentar la energía cinética del cuerpo. b) Disminuir la energía mecánica total del cuerpo. c) Disminuir la energía interna del cuerpo. d) Aumentar la energía potencial gravitacional.
9. ¿Cuál es la potencia de salida promedio de una mujer de 50.0 kilogramos que sube una escalera de 2.00 m a una velocidad constante en 10.0 segundos? a) 10.0 W b) 49.0 W c) 98.0 W d) 2.50×10^2 W

RESPUESTAS

1. **d).** La energía cinética es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad. Si se triplica la velocidad, su cuadrado se convierte en $(3v)^2 = 9v^2$ y la *EC* debe aumentar en un factor de nueve.
2. **d).** La potencia instantánea es el producto de la fuerza que actúa en el avión y la velocidad, $P = Fv$. Resolviendo para la fuerza requerida da

$$F = P/v = 500 \times 10^3 \text{ W}/(100 \text{ m/s}) = 5 \times 10^3 \text{ N}$$

3. **a).** Sea *EC*, la energía cinética inicial, y *EC_f* la energía cinética final. Haga una proporción:

$$\frac{EC_f}{EC_i} = \frac{\frac{1}{2}mv_f^2}{\frac{1}{2}mv_i^2} \rightarrow \frac{(2EC_i)}{EC_i} = \frac{\frac{1}{2}mv_f^2}{\frac{1}{2}mv_i^2} \rightarrow 2 = \frac{v_f^2}{v_i^2}$$

Resuelva para v_f para obtener $v_f = \sqrt{2}v_i$.

4. **b).** Como la altura está disminuyendo, la energía potencial gravitacional está disminuyendo y debe tener un valor menor que su lectura inicial de 98 J. La opción d) se puede eliminar porque su valor es más alto que el valor inicial de la energía potencial, al igual que la opción c) porque su valor es igual que el valor inicial de la energía potencial. La opción a) puede ser eliminada porque, por la declaración del problema, la energía potencial gravitacional es cero en el fondo de la rampa. Esto deja b) como la única opción.

Cuantitativamente: $EP = mgh = (1.0 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)[(10.0 \text{ m}) \cdot \text{sen}(30^\circ)] = 49 \text{ J}$

5. **d).** $W = F\Delta s = (20.0 \text{ N})(10.0 \text{ m}) = 2.00 \times 10^2 \text{ J}$
6. **d).** La energía potencial gravitacional y la altura del cuerpo sobre la Tierra son directamente proporcionales: $EP = mgh$. La reducción de la altura por un factor de 7/10 debe reducir la energía potencial gravitacional por el mismo factor: $(4.90 \times 10^2 \text{ J})(0.700) = 343 \text{ J}$.
7. **a).** Puesto que la velocidad es constante, la aceleración debe ser cero por lo que podemos eliminar las opciones c) y d). Resolviendo $EC = \frac{1}{2}mv^2$ para las dos carros

$$EC_A = \frac{1}{2}(1.0 \text{ kg})(3.0 \text{ m/s})^2 = 4.5 \text{ J} \quad EC_B = \frac{1}{2}(1.5 \text{ kg})(4.0 \text{ m/s})^2 = 3.0 \text{ J}$$

- 8. d). Por definición, la energía potencial gravitacional cambia con la altura de un cuerpo sobre la tierra.
- 9. c). La potencia media es el trabajo hecho sobre un objeto dividido por la longitud del intervalo del tiempo, $P = W/\Delta t$. El trabajo hecho aquí está contra la gravedad. Del periodo bajo consideración, la mujer debe aumentar su energía mecánica en una cantidad igual a su cambio en la energía potencial gravitacional,

$$P = mgh/\Delta t = (50.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ m})/10.0 \text{ s} = 98.0 \text{ W}$$

Materia

EJEMPLO 1

Un tanque A se llena de agua y, en un tanque idéntico B, la mitad inferior se llena de agua y la mitad superior con aceite. ¿Para qué tanque la presión en el fondo de éstos es más grande? a) tanque A b) tanque B c) la presión en ambos tanques es igual.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El aceite en el tanque B flota encima del agua porque es menos denso que el agua. El peso total del líquido en el tanque B debe, por lo tanto, ser menor que un volumen igual de agua solamente. Por lo tanto, el peso del fluido por unidad de área es mayor en el fondo del tanque A, y la respuesta es a).

EJEMPLO 2

Un cable de acero con área de sección transversal A y longitud L se estira una longitud ΔL_1 , al suspenderle un peso dado. Una sección de cable de acero con mitad del área de sección transversal y tres veces la longitud se utiliza para apoyar el mismo peso, y estira por una cantidad ΔL_2 . ¿Cuál es la razón $\Delta L_2/\Delta L_1$? a) 2 b) 4 c) 6 d) 8

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El esfuerzo de tensión, una fuerza por unidad de área, es proporcional a la deformación por tensión, que es el cambio fraccionario en longitud de un objeto o el cambio en la longitud dividida por la longitud original. La cantidad de estiramiento del cable es así, inversamente proporcional al área de sección transversal y directamente proporcional a la longitud. Por lo tanto, el segundo cable, siendo tres veces más largo, debe estirar tres veces más lejos de la carga dada. Con solamente la mitad del área de sección transversal, debe estirar más lejos por un factor de $(\frac{1}{2})^{-1}$, o 2. Tomados juntos, el segundo cable debe estirar seis veces más lejos que el primer cable más corto y más grueso, así que $\Delta L_2/\Delta L_1 = 6$, por lo que la respuesta es c).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la ecuación que relaciona la tensión y la tensión de extensión para el primer cable:

$$(1) \quad \frac{F_1}{A_1} = Y \frac{\Delta L_1}{L_1}$$

Reescriba la ecuación (1) para el segundo cable, notando que Y , módulo de Young, es constante para un material dado:

$$(2) \quad \frac{F_2}{A_2} = Y \frac{\Delta L_2}{L_2}$$

Divida la ecuación (2) por la ecuación (1), cancelando Y :

$$(3) \quad \frac{\frac{F_2}{A_2}}{\frac{F_1}{A_1}} = \frac{\frac{\Delta L_2}{L_2}}{\frac{\Delta L_1}{L_1}} \rightarrow \frac{F_2 A_1}{F_1 A_2} = \frac{\Delta L_2 L_1}{\Delta L_1 L_2}$$

Cancele F_2 y F_1 en la ecuación (3) porque son iguales en este caso, reacomodando la ecuación, y sustituyendo $L_2 = 3L_1$ y $A_2 = \frac{1}{2}A_1$.

$$\frac{\Delta L_2}{\Delta L_1} = \frac{A_1 L_2}{A_2 L_1} = \frac{A_1}{\frac{1}{2}A_1} \frac{3L_1}{L_1} = \frac{3}{\frac{1}{2}} = 6$$

La respuesta es c) como se esperaba.

■ EJEMPLO 3

Un objeto flota con tres cuartos de su volumen sumergido en agua. ¿Cuál es su densidad? ($\rho_{\text{agua}} = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) a) $1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ b) $8.70 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ c) $7.50 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ d) $1.25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La opción d) puede ser eliminada inmediatamente porque el objeto se hundiría si fuera más denso que el agua. Si la opción a) fuera verdad, el objeto estaría flotando pero sumergido totalmente. Estas consideraciones dejan solamente las opciones b) y c). La fuerza de empuje depende de la cantidad de líquido desplazado, y esta fuerza debe balancear exactamente a la fuerza gravitacional, o peso. Puesto que el objeto está solamente tres cuartos sumergido, su peso debe ser solamente tres cuartos el de un volumen similar de agua. Se sigue entonces que la densidad del objeto debe ser tres cuartos el del agua, que es la respuesta c).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Despreciando la fuerza de empuje del aire, dos fuerzas actúan sobre el objeto: la fuerza de empuje, que es igual al peso del líquido desplazado, y la fuerza gravitacional:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_B + \vec{F}_{\text{grav}} = 0$$

Sustituya la expresión para las fuerzas de empuje y gravitacional:

$$(1) F_B - mg = 0$$

Por definición, la masa del objeto está dada por $m = \rho_{\text{objeto}} V$, donde ρ_{objeto} es la densidad del objeto y V su volumen. La fuerza de empuje es el peso del agua desplazada: $F_B = \rho_{\text{objeto}} V_{\text{sub}} g$ donde V_{sub} es el volumen del agua desplazada. Sustituya estas expresiones en la ecuación (1):

$$(2) \rho_{\text{agua}} V_{\text{sub}} g - \rho_{\text{objeto}} V g = 0$$

Resuelva la ecuación (2) para ρ_{objeto} , obteniendo la respuesta c):

$$\begin{aligned} \rho_{\text{obj}} &= \frac{V_{\text{sub}}}{V} \rho_{\text{agua}} = (0.750)(1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \\ &= 7.50 \times 10^2 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

■ EJEMPLO 4

En el punto 1, el agua fluye suavemente a velocidad v_1 a través de un tubo horizontal con radio r_1 . Después, el tubo se angosta a la mitad de ese radio en el punto 2. ¿Qué puede decirse de la velocidad v_1 del agua en el punto 1 comparado con su velocidad v_2 en el punto 2? a) $v_1 = v_2$ b) $v_1 > v_2$ c) $v_1 < v_2$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El volumen de flujo es proporcional a la velocidad y al área de sección transversal del tubo. Un radio más grande en el punto 1 significa un área de sección transversal más grande. Puesto que el agua es esencialmente incompresible, el caudal debe ser igual en ambas secciones del tubo, así que la sección representativa más grande en el punto 1 conduce a una menor velocidad del líquido y la respuesta es c).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Aplice la ecuación de continuidad para un fluido incompresible:

$$(1) A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Sustituya una expresión para el área en cada lado de la ecuación (1):

$$(2) \pi r_1^2 v_1 = \pi r_2^2 v_2$$

Resuelva la ecuación (2) para v_1 , y sustituya $r_2 = \frac{1}{2} r_1$ para obtener la respuesta c).

$$v_1 = \frac{r_2^2}{r_1^2} v_2 = \frac{r_2^2}{(2r_2)^2} v_2 = \frac{1}{4} v_2$$

Problemas de opción múltiple

1. Un buzo está nadando 10.0 m debajo de la superficie del agua en un depósito. No hay corriente, el aire tiene una presión de 1.00 atmósfera, y la densidad del agua es 1.00×10^3 kilogramos por metro cúbico. ¿Cuál es la presión según lo medido por el buzo? a) 1.10 atmósferas b) $1.99 \times 10^5 \text{ Pa}$ c) 11.0 atmósferas d) $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$
2. La aorta de un hombre de 70.0 kilogramos tiene un área de sección transversal de 3.00 cm^2 y lleva sangre con una velocidad de 30.0 cm/s. ¿Cuál es el caudal promedio? a) 10.0 cm³/s b) 33.0 cm³/s c) 10.0 cm²/s d) 90.0 cm³/s

3. A 20.0°C la densidad del agua es 1.00 g/cm³. ¿Cuál es la densidad de un cuerpo que tiene un peso de 0.980 N en el aire, pero registra un peso aparente de sólo 0.245 N sobre una báscula de resorte completamente inmersa en el agua? a) 0.245 g/cm³ b) 0.735 g/cm³ c) 1.33 g/cm³ d) 4.00 g/cm³
4. Dos cuerpos insolubles, A y B, aparentan perder la misma cantidad de peso cuando se sumergen en alcohol. ¿Cuál de las siguientes declaraciones es más aplicable? a) Ambos cuerpos tienen la misma masa de aire. b) Ambos cuerpos tienen el mismo volumen. c) Ambos cuerpos tienen la misma densidad. d) Ambos cuerpos el mismo peso en el aire.
5. La planta de cada pie de un hombre de 80 kilogramos tiene un área de cerca de 400 cm². ¿Cuál es el efecto de sus raquetas para nieve que usa con un área de cerca de 0.400 m²? a) La presión ejercida en la nieve se convierte en 10 veces más grande. b) La presión ejercida en la nieve se convierte en 1/10 más grande. c) La presión ejercida en la nieve sigue siendo igual. d) La fuerza ejercida en la nieve es 1/10 más grande.
6. En una prensa hidráulica, la superficie del pistón de entrada es 10 cm² y el del pistón de salida es 3 000 cm². ¿Cuál es el trabajo hecho si una fuerza de 100 N aplicada al pistón de entrada levanta el pistón de salida por 2.0 m? a) 20 kJ b) 30 kJ c) 40 kJ d) 60 kJ
7. El módulo de Young para el acero es 2.0×10^{11} N/m². ¿Cuál es la tensión en una barra de acero de 100 centímetros de largo y 20 milímetros de diámetro cuando es estirado por una fuerza de 6.3×10^3 N? a) 2.01×10^7 N/m² b) 12.6×10^{12} N/m² c) 3.15×10^8 N/m² d) 4.0×10^{11} N/m²

RESPUESTAS

1. b). El líquido está en reposo (sin corrientes), así que este problema es un cálculo de presión hidrostática. En unidades SI, 1 atmósfera = 1.01×10^5 Pa. La opción d) puede ser eliminada porque la presión debajo del agua debe ser mayor que la presión en la superficie.

$$P_{\text{buzo}} = P_{\text{atm}} + \rho gh = (1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) + (1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)(10.0 \text{ m}) = 1.99 \times 10^5 \text{ Pa}$$

2. d). La respuesta sigue de la definición:

$$\text{Caudal} = vA = (30 \text{ cm/s})(3 \text{ cm}^2) = 90 \text{ cm}^3/\text{s}$$

3. c). Este problema es una aplicación del principio de Arquímedes. La aparente pérdida de peso de un cuerpo sumergido es igual al peso del líquido desplazado. El peso w del agua desplazada es $w = 0.980 \text{ N} - 0.245 \text{ N} = 0.735 \text{ N}$. Utilizando la definición de densidad $\rho_{\text{agua}}g = w/V$, así que el volumen ocupado por este peso de agua es $V = 0.735 \text{ N}/\rho_{\text{agua}}g$. El volumen del cuerpo debe ser igual al volumen del agua desplazada. La densidad del cuerpo es $\rho = m/V = (0.980 \text{ N}/0.735 \text{ N})\rho_{\text{agua}} = 1.33 \text{ g/cm}^3$.
4. b). Según el principio de Arquímedes, la pérdida aparente de peso es igual al peso del líquido desplazado; por lo tanto, ambos deben tener el mismo volumen porque el volumen del líquido es igual al volumen del cuerpo.
5. b). La fuerza ejercida por el hombre es su peso y se supone constante, lo que elimina la opción d). Para una fuerza constante, la presión y el área son inversamente. El área de las raquetas es 10 veces el área del pie, así que la presión asociada con las raquetas es el recíproco de 10, o 1/10 de la presión ejercida por el pie.
6. d). Por el principio de Pascal, la presión en los pistones de la entrada y de la salida es la misma, así que

$$\frac{F_{\text{entrada}}}{A_{\text{entrada}}} = \frac{F_{\text{salida}}}{A_{\text{salida}}} \rightarrow F_{\text{salida}} = \frac{A_{\text{salida}}}{A_{\text{entrada}}} F_{\text{entrada}} = \left(\frac{3000 \text{ cm}^2}{10 \text{ cm}^2} \right) 100 \text{ N} = 3 \times 10^4 \text{ N}$$

El trabajo es fuerza por desplazamiento:

$$W = F\Delta s = (3 \times 10^4 \text{ N})(2 \text{ m}) = 6 \times 10^4 \text{ J} = 60 \text{ kJ}$$

7. a). La tensión es fuerza por unidad de superficie, así que ni el módulo de Young ni la longitud de la barra son necesarios para solucionar el problema.

$$\text{Tensión} = F/A = (6.30 \times 10^3 \text{ N}) / \pi (1 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 2.01 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

Ondas

EJEMPLO 1

Una onda transversal viaja a la velocidad v_1 y tiene dos veces la frecuencia y un cuarto de la longitud de onda de una segunda onda transversal. (Podrían ser ondas en dos diferentes cuerdas, por ejemplo.) ¿Cómo se compara velocidad v_1 de la primera onda con la velocidad v_2 de la segunda onda? a) $v_1 = v_2$ b) $v_1 = 2v_2$ c) $v_1 = \frac{1}{2}v_2$

SOLUCIÓN

La velocidad de una onda es proporcional a la frecuencia y la longitud de onda:

$$(1) \quad v = f\lambda$$

Plantee la razón v_2 a v_1 utilizando la ecuación (1) y sustituya $f_1 = 2f_2$ y $\lambda_1 = \lambda_2/4$:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{f_1\lambda_1}{f_2\lambda_2} = \frac{(2f_2)(\lambda_2/4)}{f_2\lambda_2} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

Resuelva para v_1 , para obtener la respuesta c):

$$v_1 = \frac{1}{2}v_2$$

EJEMPLO 2

Un bloque de la masa m oscila en el extremo de un resorte horizontal en una superficie sin fricción. En la extensión máxima, un bloque idéntico cae de sobre la tapa del primer bloque y se le pega. ¿Cómo es el nuevo periodo T_{nuevo} comparado al periodo original, T_0 ? a) $T_{\text{nuevo}} = \sqrt{2} T_0$ b) $T_{\text{nuevo}} = T_0$ c) $T_{\text{nuevo}} = 2 T_0$ d) $T_{\text{nuevo}} = \frac{1}{2}T_0$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Una masa creciente aumentaría la inercia del sistema sin aumentar la energía mecánica, así que una masa de $2m$ debe moverse más lentamente que una masa m . Eso alternadamente alargaría el periodo, eliminando las opciones b) y d). El periodo es proporcional a la raíz cuadrada de la masa, así que duplicar los incrementos de la masa incrementa el periodo por un factor de la raíz cuadrada de 2, que es la respuesta a).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Aplique la ecuación para el periodo de un sistema masa-resorte:

$$(1) \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Utilizando la ecuación (1), plantee la razón del nuevo periodo T_{nuevo} al viejo periodo, T_0 , cancelando los términos comunes y sustituyendo $m_{\text{nuevo}} = 2m_0$:

$$(2) \quad \frac{T_{\text{nuevo}}}{T_0} = \frac{2\pi\sqrt{\frac{m_{\text{nuevo}}}{k}}}{2\pi\sqrt{\frac{m_0}{k}}} = \frac{\sqrt{m_{\text{nuevo}}}}{\sqrt{m_0}} = \sqrt{\frac{2m_0}{m_0}} = \sqrt{2}$$

Resuelva la ecuación (2) para el nuevo periodo T_{nuevo} para caer en la respuesta a):

$$T_{\text{nuevo}} = \sqrt{2} T_0 \quad [\text{respuesta a)]}$$

EJEMPLO 3

Un péndulo simple en movimiento de vaivén oscila 36 veces en 68 s. ¿Cuál es su longitud si la aceleración local de la gravedad es de 9.80 m/s^2 ? a) 0.0677 m b) 0.356 m c) 1.25 m d) 0.887 m

SOLUCIÓN

Primero, calcule el periodo T del movimiento:

$$T = \frac{68 \text{ s}}{36} = 1.89 \text{ s}$$

Escriba la ecuación para el periodo de un péndulo y resuelva para la longitud L , para obtener la respuesta d):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \rightarrow L = \frac{gT^2}{4\pi^2} = \frac{(9.80 \text{ m/s}^2)(1.89 \text{ s})^2}{4\pi^2} = 0.887 \text{ m} \quad [\text{respuesta d)]}$$

Problemas de opción múltiple

1. Un péndulo simple tiene un periodo de 4.63 s en un lugar en la Tierra donde la aceleración de la gravedad es 9.82 m/s^2 . En una diferente localización, el periodo aumenta a 4.64 s .

- ¿Cuál es el valor del g en este segundo punto? a) 9.78 m/s^2 b) 9.82 m/s^2 c) 9.86 m/s^2 d) no puede ser determinada sin saber la longitud del péndulo.
- ¿Cuál es la longitud de onda de una onda transversal que tiene una velocidad de 15 m/s y una frecuencia de 5.0 hertz ? a) 3.0 m b) 10 m c) 20 m d) 45 m
 - ¿Cuál es la diferencia óptima en la fase para interferencia destructiva máxima entre dos ondas de la misma frecuencia? a) 360° b) 270° c) 180° d) 90°
 - Se pueden formar ondas estacionarias si ondas coincidentes tienen a) la misma dirección de propagación. b) la misma frecuencia. c) diferentes amplitudes. d) diferentes longitudes de onda.
 - Un péndulo simple con una longitud L tiene un periodo de 2 s . Para que el péndulo tenga un periodo de 4 s , debemos a) partir en dos la longitud. b) un cuarto de la longitud. c) duplicar la longitud. d) cuadruplicar la longitud.
 - Si un péndulo simple de largo 12 m tiene una frecuencia de 0.25 hertzios , ¿cuál será el periodo de un segundo péndulo en la misma localización si su longitud es 3.0 m ? a) 2.0 s b) 3.0 s c) 4.0 s d) 6.0 s
 - Un reloj de péndulo moviéndose lentamente (es decir, atrasando el tiempo). ¿Cuál de las siguientes propuestas podría rectificar el problema? a) El peso de la lenteja debe ser disminuido de modo que pueda moverse más rápidamente. b) La longitud del alambre que sostiene la lenteja debe ser acortada. c) La amplitud de oscilación debe ser reducida de modo que la trayectoria cubierta sea más corta. d) Ninguno de los anteriores.
 - Un objeto de 20.0 kg puesto en un piso sin fricción se une a una pared por un resorte. Una fuerza 5.00 N desplaza horizontalmente el objeto 1.00 m de su posición del equilibrio. ¿Cuál es el periodo de la oscilación del objeto? a) 2.00 s b) 6.08 s c) 12.6 s d) 46.4 s

RESPUESTAS

- a). La respuesta puede ser determinada sin hacer una solución numérica. Cambie $T = 2\pi(L/g)^{1/2}$ a $Tg^{1/2} = \text{constante}$. El periodo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la aceleración debida a la gravedad. Puesto que T ha aumentado, $g^{1/2}$, g debe disminuir. La opción a) es el único valor de g que es menor que los 9.82 m/s^2 originales. Cuantitativamente:

$$g_2 = (T_1^2 g_1 / T_2^2) = (4.63 \text{ s})^2 (9.82 \text{ m/s}^2) / (4.64 \text{ s})^2 = 9.78 \text{ m/s}^2$$

- a). La longitud de onda es la velocidad dividida por la frecuencia. La fórmula no depende del tipo de onda implicado.

$$\lambda = v/f = (15 \text{ m/s}) / 5.0 \text{ s}^{-1} = 3.0 \text{ m}$$

- c). Dos ondas están totalmente fuera de fase cuando coinciden sus antinodos de modo que cada cresta en una onda coincide con un valle en la otra. Esta situación ocurre cuando las ondas se diferencian en fase por 180° .
- b). En ondas estacionarias, los nodos son estacionarios, que pueden ser acoplados cuando dos ondas con la misma frecuencia viajan en direcciones opuestas.
- d). En un péndulo el periodo y la raíz cuadrada de la longitud son directamente proporcionales:

$$T = 2\pi(L/g)^{1/2} \text{ así que } T/L^{1/2} = \text{constante}$$

Para duplicar el periodo, usted debe duplicar la raíz cuadrada de la longitud. Para duplicar la raíz cuadrada de la longitud, usted debe cuadruplicar la longitud:

$$(4L)^{1/2} = 4^{1/2} L^{1/2} = 2L^{1/2}$$

- a). La frecuencia es el recíproco del periodo, $f = 1/T$, así que el primer péndulo tiene periodo $T_1 = 4.0 \text{ s}$. Para los péndulos, el periodo y la raíz cuadrada de la longitud son directamente proporcionales, así que el cociente de los dos periodos es

$$T_2/T_1 = (L_2/L_1)^{1/2} = (12/3)^{1/2} = (4.0)^{1/2} = 2.0$$

Por lo que sigue que $T_2 = 2.0 \text{ s}$.

7. **b).** El periodo de un péndulo se relaciona directamente con la raíz cuadrada de la longitud de la cuerda que sostiene la lenteja. Es independiente de la masa y de la amplitud.
8. **c).** La constante de la fuerza es $k = F/\Delta x = 5.0 \text{ N}/1.0 \text{ m} = 5.0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. El periodo es

$$T = 2\pi(m/k)^{1/2} = 2\pi(20.0 \text{ kg}/5.00 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})^{1/2} = 12.6 \text{ s}$$

Sonido

EJEMPLO 1

Cuando una intensidad de sonido dada se duplica ¿por cuánto se incrementa el nivel de intensidad de sonido (o nivel de decibeles)?

SOLUCIÓN

Escriba la expresión para una diferencia en nivel de decibeles $\Delta\beta$:

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 10 \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) - 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

Factorice y aplique la regla de logaritmos $\log a - \log b = \log(a/b) = \log(a \cdot b^{-1})$:

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= 10 \left[\log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) - \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \right] = 10 \log\left(\frac{I_2}{I_0} \cdot \frac{I_0}{I_1}\right) \\ &= 10 \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \end{aligned}$$

Sustituya $I_2 = 2I_1$ y evalúe la expresión:

$$\Delta\beta = 10 \log\left(\frac{2I_1}{I_1}\right) = 10 \log(2) = 3.01 \text{ dB}$$

EJEMPLO 2

Una onda acústica pasa del aire al agua. ¿Qué puede decirse de su longitud de onda en el agua comparada con la del aire?
a) Las longitudes de onda son iguales. b) La longitud de onda en aire es mayor que en agua. c) La longitud de onda en aire es menor que en agua.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La frecuencia del sonido no cambia al ir de un tipo de medio al siguiente porque es causado por variaciones periódicas de la presión al transcurrir el tiempo. La longitud de onda debe cambiar, sin embargo, como la velocidad del sonido cambia y durante un solo periodo la onda acústica viajará una diferente distancia, que corresponde a una sola longitud de onda. La velocidad del sonido en agua es mayor que en aire, así que en un solo periodo la onda acústica viajará una mayor distancia. Por lo tanto, la longitud de onda de una onda acústica dada es mayor en agua que en el aire, que es c). Este resultado puede ser cuantitativo usando $v = f\lambda$, donde v es la velocidad de la onda, f la frecuencia y λ la longitud de onda.

EJEMPLO 3

Una onda acústica emitida desde un aparato de sonar se refleja en un submarino que viaja lejos de la fuente del sonar. ¿Cómo es la frecuencia de la onda reflejada, f_R , comparada con la frecuencia de la fuente, f_s ? a) $f_R = f_s$ b) $f_R < f_s$ c) $f_R > f_s$

SOLUCIÓN

La onda reflejada tendrá una frecuencia más baja [respuesta **b**)]. Para ver por qué, considere los máximos de presión que afectan secuencialmente al submarino. El primer máximo de presión golpea al submarino y se refleja, pero el segundo alcanza al submarino cuando se ha alejado. La distancia entre los máximos consecutivos en las ondas reflejadas aumenta; por lo tanto la longitud de onda también aumenta. Puesto que $v = f\lambda$ y la velocidad no se afecta, la frecuencia debe disminuir.

Problemas de opción múltiple

- La sirena de niebla de un barco rebota como eco en un iceberg a la distancia. Si el eco se oye 5.00 segundos después de que la sirena se suena y la temperatura del aire es -15.0°C , ¿qué tan lejos está el iceberg? a) 224 m b) 805 m c) 827 m d) 930 m
- ¿Cuál es el nivel de sonido de una onda con una intensidad de $10^{-3} \text{ W}/\text{m}^2$? a) 30 dB b) 60 dB c) 90 dB d) 120 dB

- A 0°C, aproximadamente ¿cuánto tiempo lleva al sonido recorrer 5.00 kilómetros a través del aire? a) 15 s b) 30 s c) 45 s d) 60 s
- Si la velocidad de una onda transversal de una cuerda de violín es 12.0 m/s y la frecuencia tocada es de 4.00 hertz, ¿cuál es la longitud de onda del sonido en el aire? (Utilice 343 m/s para la velocidad del sonido.) a) 48.0 m b) 12.0 m c) 3.00 m d) 85.8 m
- Si dos ondas acústicas idénticas interactúan en fase, la onda que resulta tendrá a) un periodo más corto. b) una amplitud más grande. c) una frecuencia más alta. d) mayor velocidad.
- ¿Cuál es la velocidad de una onda acústica longitudinal en una barra de acero si el módulo de Young para el acero es $2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ y la densidad del acero es $8.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$? a) $4.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ b) $5.0 \times 10^3 \text{ m/s}$ c) $25 \times 10^6 \text{ m/s}$ d) $2.5 \times 10^9 \text{ m/s}$
- ¿Si dos frecuencias emitidas a partir de dos fuentes son 48 hertz y 54 hertz, cuántas pulsaciones por segundo se oyen? a) 3 b) 6 c) 9 d) 12
- La frecuencia registrada por un detector es más alta que la frecuencia emitida por la fuente. ¿Cuál de las siguientes declaraciones *debe* ser verdadera? a) La fuente debe estar alejándose del detector. b) La fuente debe moverse hacia el detector. c) La distancia entre la fuente y el detector debe disminuir. d) El detector debe alejarse de la fuente.

RESPUESTAS

- b).** La velocidad del sonido normal a 0°C en el aire es 331 m/s. La velocidad del sonido en el aire a las varias temperaturas está dada por

$$v = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{273 \text{ K} - 15.0 \text{ K}}{273 \text{ K}}} \\ = 322 \text{ m/s}$$

Calcule la distancia recorrida en la mitad de 5 segundos:

$$d = vt = (322 \text{ m/s})(2.50 \text{ s}) = 805 \text{ m}$$

- c).** Sustituya: $\beta = 10 \log I/I_0 = 10 \log (1 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/10^{-12} \text{ W/m}^2) = 90 \text{ dB}$.
- a).** A 0°C, la velocidad del sonido en el aire es 331 m/s, así que $t = (500 \times 10^3 \text{ m})/(331 \text{ m/s}) \sim 15 \text{ s}$.
- d).** La frecuencia es igual para la cuerda que para la onda acústica producida por la cuerda en el aire circundante, pero de diferente longitud de onda. La velocidad del sonido es igual al producto de la frecuencia y de la longitud de onda, así que $\lambda = v/f = (343 \text{ m/s})/4.00 \text{ s}^{-1} = 85.8 \text{ m}$.
- b).** Dos ondas están en fase si coinciden sus crestas y valles. La amplitud de la onda que resulta es la suma algebraica de las amplitudes de las dos ondas superpuestas en ese punto, así que se duplica la amplitud.
- b).** La solución requiere sustituir en una expresión para la velocidad del sonido a través de una barra de material sólido que tiene módulo de Young Y .

$$v = (Y/\rho)^{1/2} = (2.0 \times 10^{11} \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2)/(8.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)^{1/2} \\ = 25 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2)^{1/2} = 5.0 \times 10^3 \text{ m/s}$$

- b).** $f_{\text{pulsación}} = f_1 - f_2 = 54 - 48 = 6 \text{ pulsaciones}$
- c).** El movimiento de una fuente de sonido con relación a un observador da lugar al efecto Doppler. Como la frecuencia tiene un corrimiento a un valor más alto, la fuente y el detector deben, por consiguiente, estar más cerca, acortando la longitud de onda desde el punto de vista del observador. Esta observación elimina las opciones a) y d). La opción b) puede ser eliminada porque no es necesariamente verdad: la misma clase de efecto ocurre cuando la fuente se lleva a cabo constantemente y el detector se mueve hacia él.

Luz

EJEMPLO 1

¿Qué sustancia tendrá un ángulo crítico más pequeño para la reflexión interna total, el vidrio con índice de refracción de 1.50 o el diamante con índice de refracción de 2.42? a) el vidrio b) el diamante c) los ángulos críticos son iguales para ambos.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El índice de refracción más grande indica una velocidad de la luz más reducida dentro del material, que alternadamente significa un ángulo más grande de refracción, o una flexión más grande hacia la normal al entrar al material desde el aire y una flexión más lejos de la normal al pasar del material al aire. (Recuerde que una recta normal es perpendicular a la superficie del material). Para que la reflexión interna total ocurra, debe ser posible un ángulo de refracción de 90° , que ocurre siempre que el medio que refracta tenga índice de refracción más bajo que el medio del incidente. El diamante desvía más la luz más que el vidrio, así que el rayo incidente puede estar más cercano a la normal y todavía desviar suficiente el ángulo de refracción resultante de la reflexión interna total. Más cercano a la normal significa un ángulo crítico más pequeño, así que la respuesta es **b**).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la ley de Snell para la interface diamante-aire:

$$n_D \sin \theta_D = n_A \sin \theta_A$$

Calcule el ángulo crítico para el diamante, utilizando $n_A = 1.00$ para el aire y $\theta_A = 90^\circ$ junto con $n_D = 2.42$:

$$2.42 \sin \theta_D = 1.00 \rightarrow \theta_D = \sin^{-1} \left(\frac{1.00}{2.42} \right) = 24.4^\circ$$

Repita el cálculo para el vidrio:

$$1.50 \sin \theta_G = 1.00 \rightarrow \theta_G = \sin^{-1} \left(\frac{1.00}{1.50} \right) = 41.8^\circ$$

El cálculo muestra explícitamente que el diamante tiene un menor ángulo crítico que el vidrio [respuesta **b**].

EJEMPLO 2

La vista cercana de un paciente de un punto es 85.0 centímetros. ¿Qué prescripción de longitud focal para la lente permitirá que el paciente vea los objetos claramente a una distancia de 25.0 centímetros del ojo? Desprecie la distancia ojo-lente.

SOLUCIÓN

Utilice la ecuación para lentes delgadas:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

Un objeto a la distancia $p = 25.0$ centímetros debe formar una imagen en el paciente cerca de punto de 85.0 centímetros. La imagen debe ser virtual, así que $q = -85.0$ centímetros:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{25.0 \text{ cm}} + \frac{1}{-85.0 \text{ cm}} = 2.82 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

$$f = 35.4 \text{ cm}$$

EJEMPLO 3

Dos fotones que viajan en vacío tienen diversas longitudes de onda. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes es verdad? a) El fotón con una longitud de onda más pequeña tiene mayor energía. b) El fotón con mayor longitud de onda tiene mayor energía. c) La energía de todos los fotones es igual. d) El fotón con la mayor longitud de onda viaja a una poca velocidad.

SOLUCIÓN

La respuesta d) puede ser eliminada inmediatamente porque la velocidad de la luz en vacío es igual para todas las longitudes de onda de la luz. La energía de un fotón, o la partícula de luz, está dada por $E = hf$ y por lo tanto es proporcional a la frecuencia f e inversamente proporcional a la longitud de onda porque $f = c/\lambda$, donde c es la velocidad de la luz. Un fotón de longitud de onda más pequeña tiene una mayor frecuencia y por lo tanto una mayor energía, así que la respuesta **a**) es la correcta.

Problemas de opción múltiple

1. El vidrio tiene un índice de refracción de 1.50. ¿Cuál es la frecuencia de la luz que tiene una longitud de onda de 5.00×10^2 nanómetros en vidrio? a) 1.00 hertz b) 2.25 hertz c) 4.00×10^{14} hertz d) 9.00×10^{16} hertz.

2. El agua tiene índice de refracción de 1.33. Si un espejo plano se sumerge en agua, ¿qué puede decirse del ángulo de reflexión θ si la luz choca en el espejo con un ángulo incidente de 30° ? a) $\theta < 30^\circ$ b) $\theta = 30^\circ$ c) $30^\circ < \theta$ d) no se refleja ninguna luz porque 30° es el ángulo crítico para el agua.
3. El índice de refracción para el agua es 1.33 y para el cristal es de 1.50. Un rayo ligero cruza el límite del vidrio soluble con un ángulo del incidente de 30.0° en el lado del agua. ¿Cuál del siguiente es el ángulo de la refracción en el cristal? a) 26.3° b) 34.7° c) 30.0° d) 60.0°
4. La luz es incidente en un prisma en ángulo de 90° en relación con su superficie. El índice de refracción del material del prisma es 1.50. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es la más exacta sobre el ángulo de la refracción θ ? a) $0^\circ < \theta < 45^\circ$ b) $45^\circ < \theta < 90^\circ$ c) $\theta = 0^\circ$ d) $90^\circ < \theta$
5. Luz blanca incide en un interfaz aire-vidrio está partido dentro de un espectro en vidrio. ¿Qué color de la luz tiene el ángulo de refracción más grande? a) la luz roja b) la luz ámbar c) la luz violeta d) el ángulo es igual para todas las longitudes de onda.
6. Un objeto real se pone a 10.0 centímetros de una lente convergente que tiene una longitud focal de 6.00 centímetros. ¿Qué afirmación es más exacta? a) La imagen es real, derecha y agrandada. b) La imagen es real, invertida y agrandada. c) La imagen es real, derecha y reducida. d) La imagen es real, invertida y reducida.
7. ¿Cuál es la longitud focal de una lente que forma una imagen virtual a 30.0 centímetros de la lente cuando un objeto real se pone a 15.0 centímetros de la lente? a) 10.0 centímetros b) 15.0 centímetros c) 30.0 centímetros d) 45.0 centímetros
8. ¿Cuál es la ampliación de una lente que forma una imagen 20.0 centímetros a la derecha cuando un objeto real se pone 10.0 centímetros a su izquierda? a) 0.500 b) 1.00 c) 1.50 d) -2.00
9. El ojo humano puede responder a la luz con una energía total de tanto como 10^{-18} j. Si la luz roja tiene una longitud de onda de 600 nanómetros, ¿cuál es el número mínimo de fotones de luz roja que el ojo puede percibir? a) 1 b) 2 c) 3 d) 5
10. ¿Qué fenómeno ocurre para las ondas transversales pero no para las ondas longitudinales? a) reflexión b) refracción c) difracción d) polarización

RESPUESTAS

1. c). La velocidad de la luz en el vidrio se puede encontrar de la definición del índice de refracción, $n = c/v$; la longitud de onda y la frecuencia están relacionadas con la velocidad por la relación general de la onda, $v = f\lambda$. Por lo tanto

$$f = v/\lambda = c/n\lambda = (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})/(1.50)(5.00 \times 10^{-7} \text{ m}) = 4.00 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

2. b). La ley de la reflexión es independiente del medio implicado. El ángulo de reflexión es siempre igual al ángulo de la incidencia.
3. a). La ley de Snell está dada por $n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta$; por lo tanto, $1.33 \sin 30.0^\circ = 1.50 \sin \theta_2$. De esta expresión, vemos que $\sin \theta_2 < \sin 30.0^\circ$, así que θ_2 debe ser menor que 30.0° . Por lo tanto, a) es la única opción razonable.
4. c). La ley de Snell es $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Como los rayos del incidente son normales a la superficie del prisma, $\theta_1 = 0^\circ$ y $\sin 0^\circ = 0$. Por lo tanto, $0 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_2 = 0^\circ$.
5. b). Cuanto mayor es la frecuencia de la luz, es mayor su energía y más rápido su velocidad a través de cualquier medio material. De la ley de Snell, la velocidad y el $\sin \theta$ con respecto al normal son inversamente proporcionales. De las opciones, la luz violeta tiene la frecuencia más alta y, por lo tanto, la velocidad más alta y el ángulo de refracción más grande.
6. b). Por la ecuación de una lente delgada, $1/f = 1/p + 1/q$; por lo tanto, con $p = 10.0$ centímetros y $f = 6.00$ centímetros, la sustitución da lugar a $q = 15.0$ centímetros. La distancia de la imagen es positiva; por lo tanto, la imagen es real. La ampliación está dada por $M = -q/p = -15.0 \text{ cm}/10 = -1.50$. Como M es negativa, se invierte la imagen, mientras que $|M| > 1$ significa que la imagen está agrandada.

7. c). La longitud focal está dada por la ecuación de la lente delgada, $1/f = 1/p + 1/q$ porque la imagen formada es virtual, el signo de q es negativo. Por lo tanto

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{15.0 \text{ cm}} + \frac{1}{-30.0 \text{ cm}} = \frac{1}{30.0 \text{ cm}} \rightarrow f = 30.0 \text{ cm}$$

8. d). La ampliación se da por $M = -q/p = -20.0 \text{ cm}/10.0 \text{ cm} = -2.00$. El signo de q es positivo porque la imagen es real. El valor negativo de M significa que la imagen está invertida.
9. c). $E = hc/\lambda = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})/(6.00 \times 10^{-7} \text{ m}) = 3.31 \times 10^{-19} \text{ J}$. Este resultado es la energía de cada fotón rojo. El número de fotones necesario para producir un total de 10^{-18} J de energía es

$$(10^{-18} \text{ J})/(3.31 \times 10^{-19} \text{ J/fotones}) \sim 3 \text{ fotones}$$

10. d). La polarización puede ocurrir solamente con las ondas transversales porque el movimiento debe ser perpendicular a la dirección de la propagación.

Electrostática

EJEMPLO 1

Dos protones, cada uno de carga $q_p = e$, ejercen una fuerza eléctrica de magnitud F_{p-p} uno sobre el otro cuando están apartados una distancia r_p . Un par de partículas alfa, cada una de carga $q_\alpha = 2e$, ejerce una fuerza eléctrica $F_{\alpha-\alpha} = \frac{1}{4} F_{p-p}$ uno sobre la otra. ¿Cuál es la distancia entre las partículas alfa, r_α , en términos de la distancia entre los protones, r_p ? a) $r_\alpha = 4r_p$ b) $r_\alpha = 2r_p$ c) $r_\alpha = r_p$ d) Se necesita más información.

SOLUCIÓN

Utilice la ley de Coulomb para encontrar una expresión para la fuerza entre los protones:

$$(1) \quad F_{p-p} = \frac{k_e q_p q_p}{r_p^2} = \frac{k_e e^2}{r_p^2}$$

Utilice la ley del Coulomb para encontrar una expresión para la fuerza entre las partículas alfa:

$$(2) \quad F_{\alpha-\alpha} = \frac{k_e q_\alpha q_\alpha}{r_\alpha^2} = \frac{k_e (2e)^2}{r_\alpha^2} = \frac{4k_e e^2}{r_\alpha^2}$$

Divida la ecuación (2) por la ecuación (1) y cancele los términos comunes:

$$(3) \quad \frac{F_{p-p}}{F_{\alpha-\alpha}} = \frac{\frac{k_e e^2}{r_p^2}}{\frac{4k_e e^2}{r_\alpha^2}} = \frac{r_\alpha^2}{4r_p^2}$$

Ahora sustituya $F_{\alpha-\alpha} = \frac{1}{4} F_{p-p}$ y resuelva para F_α^2 :

$$\frac{r_\alpha^2}{4r_p^2} = \frac{F_{p-p}}{F_{\alpha-\alpha}} = \frac{F_{p-p}}{\frac{1}{4} F_{p-p}} = 4 \rightarrow r_\alpha^2 = 16r_p^2$$

Tome las raíces cuadradas, obteniendo r_α en términos de r_p : $r_\alpha = 4r_p$

La distancia entre las partículas alfa es cuatro veces la distancia entre los protones, que es la respuesta a).

EJEMPLO 2

Una esfera A tiene dos veces el radio de una segunda, muy distante esfera B . Sea el potencial eléctrico en el infinito considerado como cero. Si el potencial eléctrico en la superficie de la esfera A es igual que en la superficie de la esfera B , ¿qué puede decirse de la carga Q_A en la esfera A comparada con la carga Q_B sobre B ? a) $Q_A = 2Q_B$ b) $Q_A = Q_B$ c) $Q_A = Q_B/2$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Por la ley de Gauss, una distribución de carga esférica crea un campo eléctrico fuera de la esfera como si toda la carga estuviera concentrada en un punto en el centro de la esfera. El potencial eléctrico debido a una carga puntual es proporcional a la carga Q e inversamente proporcional a la distancia a esa carga. El radio reduce dos veces el potencial eléctrico en la superficie de A por un factor de una mitad. La carga de la esfera A debe ser dos veces la de B de modo que los potenciales eléctricos sean iguales para ambas esferas. Por lo tanto, la respuesta es a).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la ecuación para el potencial eléctrico de una carga puntual q :

$$(1) \quad V = \frac{k_e Q}{r}$$

Haga un cociente de la ecuación (1) para la carga A y para la carga B , respectivamente:

$$(2) \quad \frac{V_A}{V_B} = \frac{\frac{k_e Q_A}{r_A}}{\frac{k_e Q_B}{r_B}} = \frac{Q_A r_B}{Q_B r_A}$$

Sustituya $V_A = V_B$ y $r_A = 2r_B$ en la ecuación (2) y resuelva para Q_A , obteniendo otra vez la respuesta **a**):

$$1 = \frac{Q_A r_B}{Q_B (2r_B)} \rightarrow Q_A = 2Q_B \text{ [respuesta a]}$$

EJEMPLO 3

¿Cuánto trabajo se requiere para traer un protón con la carga 1.6×10^{-19} C y una partícula alfa con la carga 3.2×10^{-19} C del resto en una gran distancia (que tiende al infinito) a las posiciones de resto una distancia de 1.00×10^{-15} m lejos uno de otro?

SOLUCIÓN

Utilice el teorema del trabajo-energía:

$$W = \Delta EC + \Delta EP = EC_f - EC_i + EP_f - EP_i$$

Las velocidades son cero al inicio y al final, así que las energías cinéticas son cero. Sustituya los valores en la energía potencial y encuentre el trabajo necesario para montar la configuración:

$$\begin{aligned} W &= 0 - 0 + \frac{k_e q_p q_\alpha}{r} - 0 \\ &= \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^3/\text{C}^2 \cdot \text{s}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(3.20 \times 10^{-19} \text{ C})}{1.00 \times 10^{-15} \text{ m}} \\ &= 4.61 \times 10^{-13} \text{ J} \end{aligned}$$

EJEMPLO 4

Un campo eléctrico fijo, constante E acelera un protón desde el reposo un desplazamiento Δs . Un átomo completamente ionizado del litio con tres veces la carga del protón acelera a través del mismo campo eléctrico constante y desplazamiento. ¿Cuál de lo siguiente es verdadero para las energías cinéticas de las partículas? a) Las energías cinéticas de las dos partículas son iguales. b) La energía cinética del protón es más grande. c) La energía cinética del ion de litio es más grande.

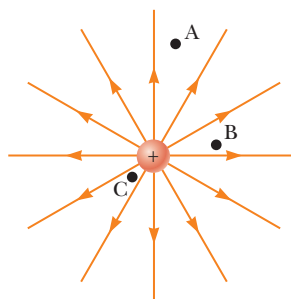
SOLUCIÓN

El trabajo hecho por el campo eléctrico sobre una partícula de carga q está dado por $W = F\Delta s = qE\Delta s$. El campo eléctrico E y el desplazamiento Δs son iguales para ambas partículas, así que el campo hace tres veces más trabajo sobre el ion de litio. El teorema del trabajo-energía para este contexto físico es $W = \Delta EC$, así que la energía cinética del ion de litio es tres veces que del protón y la respuesta es c).

Problemas de opción múltiple

- ¿Cuál es la diferencia potencial entre el punto A y el punto B si se requieren 10.0 J de trabajo para mover una carga de 4.00 C de un punto al otro? a) 0.400 V b) 2.50 V c) 14.0 V d) 40.0 V
- ¿Cuánto trabajo tendría que ser hecho por una fuerza no conservativa para mover un electrón con una diferencia potencial positiva de 2.0×10^6 V? Suponga que el electrón está en reposo inicialmente y en su posición final. a) 3.2×10^{-13} J b) -8.0×10^{-26} J c) 1.25×10^{-5} J d) -3.2×10^{-13} J
- Dos materiales eléctricamente neutros se frotan juntos. Uno adquiere una carga positiva neta. El otro debe tener a) electrones perdidos. b) electrones ganados. c) protones perdidos. d) protones ganados.
- ¿Cuál es la magnitud de la carga en un cuerpo que tiene un exceso de 20 electrones? a) 3.2×10^{-18} C b) 1.6×10^{-18} C c) 3.2×10^{-19} C d) 2.4×10^{-19} C
- Dos cargas puntuales, A y B , con cargas de 2.00×10^{-4} C y -4.00×10^{-4} C, respectivamente, están separadas por una distancia de 6.00 m. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza electrostática ejercida sobre la carga A ? a) 2.20×10^{-9} N b) 1.30 N c) 20.0 N d) 36.0 N

- Dos cargas puntuales, A y B, están separadas 10.0 m. Si la distancia entre ellos se reduce a 5.00 m, la fuerza ejercida sobre cada una a) disminuye la mitad de su valor original. b) aumenta dos veces su valor original. c) disminuye un cuarto de su valor original. d) aumenta cuatro veces su valor original.
- La esfera A con una carga neta de $+3.0 \times 10^{-3}$ C se toca a una segunda esfera B, que tiene una carga neta de -9.0×10^{-3} C. Las dos esferas, que son exactamente del mismo tamaño y composición, están entonces separadas. La carga neta en la esfera A ahora es a) $+3.0 \times 10^{-3}$ C b) -3.0×10^{-3} C c) -6.0×10^{-3} C d) -9.0×10^{-3} C
- Si la carga en una partícula en un campo eléctrico se reduce a la mitad de su valor original, la fuerza ejercida en la partícula por el campo es a) el doble. b) se divide en dos. c) cuadruplicado. d) sin cambio.
- En la figura de abajo, los puntos A, B y C están a varias distancias de una carga puntual dada.



¿Qué afirmación es la más exacta? La fuerza del campo eléctrico es a) más grande en el punto A. b) más grande en el punto B. c) más grande en el punto C. d) iguales en los tres puntos.

- La fuerza electrostática entre dos cargas puntuales es F . Si la carga de una carga puntual se duplica y el de la otra carga se cuadruplica, ¿en cuál de las siguientes fuerzas se convierte? a) $F/2$ b) $2F$ c) $4F$ d) $8F$

RESPUESTAS

- b).** La diferencia potencial entre dos puntos en un campo eléctrico es el trabajo por unidad de carga requerida para mover una carga entre los dos puntos:

$$\Delta V = W/q = 10.0 \text{ J}/4.00 \text{ C} = 2.50 \text{ V}$$

- d).** Si el único efecto sobre la partícula es un cambio de posición, debe hacerse trabajo negativo; si no, las cargas negativas ganan energía cinética moviéndose con una diferencia potencial positiva.

$$W = \Delta EC + q \Delta V = 0 + (-1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(2.0 \times 10^6 \text{ V}) = -3.2 \times 10^{-13} \text{ J}$$

- b).** Los protones están fijos en el núcleo y no se pueden transferir por fricción. Los electrones se pueden transferir por fricción. Por lo tanto, las cargas netas son debidas a la transferencia de electrones entre dos cuerpos. La conservación de la carga significa que si hay una carga positiva neta, un cuerpo debe haber perdido electrones y el otro cuerpo debe haber ganado los electrones.

- a).** La carga elemental $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, así que la carga total de 20 electrones tiene una magnitud de $20(1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 3.2 \times 10^{-18}$ C.

- c).** Aplique la ley de Coulomb, $F = k_e(q_A q_B)/r^2$:

$$F = (9.00 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2)(2.00 \times 10^{-4} \text{ C})(-4.00 \times 10^{-4} \text{ C})/(6.00 \text{ m})^2 = -20.0 \text{ N}$$

así que la magnitud de la fuerza es 20.0 N.

- d).** De la ley de Coulomb, $F = k_e(q_A q_B)/r^2$ y la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación de los puntos. Disminuir la distancia a la mitad de su valor original significa que la fuerza se cuadruplica.

- b).** Este problema es una aplicación de la ley de la conservación de la carga. La carga neta inicial es $(+3.0 \times 10^{-3} \text{ C}) + (-9.0 \times 10^{-3} \text{ C}) = -6.0 \times 10^{-3} \text{ C}$. La misma carga neta debe existir después del contacto. Los $-6.0 \times 10^{-3} \text{ C}$ se deben distribuir uniformemente entre las dos esferas porque son físicamente idénticas.

8. **b).** La fuerza del campo eléctrico es el cociente de la fuerza ejercida en una unidad de carga en el campo: $E = F/q$. Por lo tanto, F y q son directamente proporcionales y relacionadas linealmente.
9. **c).** De la ley de Coulomb, la fuerza varía inversamente con el cuadrado de la distancia de las cargas. La fuerza del campo eléctrico en un punto es el cociente de esta fuerza entre la carga: $E = k_e q/r^2$. Por lo tanto, E y r^2 son inversamente proporcionales. El valor más pequeño de r , el valor más pequeño de r^2 y el más grande valor de E .
10. **d).** De la ley de Coulomb, $F = k_e(q_A q_B)/r^2$, la fuerza es directamente proporcional al producto de las cargas. Si se duplica q_1 y se cuadruplica q_2 , el producto de las cargas se aumenta por ocho, así que es la fuerza.

Circuitos

EJEMPLO 1

Tres resistencias están conectadas juntas. ¿Cómo deben ser combinadas para reducir al mínimo la resistencia de la combinación? a) Deben ser conectadas en serie. b) Las dos resistencias más grandes se deben poner en paralelo, y la resistencia restante en serie con las dos primeras. c) Las tres resistencias se deben colocar en paralelo.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La resistencia es proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área de sección transversal de una resistencia. Poner las tres resistencias en paralelo reduce al mínimo con eficacia la resistencia total de las resistencias combinadas y maximiza el área de sección transversal efectiva, así que **c)** es la respuesta correcta.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Sea R_1 y R_2 , las dos resistencias más grandes. Calcule la resistencia R_S de las tres resistencias en serie:

$$(1) \quad R_S = R_1 + R_2 + R_3$$

Calcule la resistencia $R_{\text{combinada}}$ de un par paralelo en serie con una tercer resistencia:

$$R_{\text{combinada}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

Divida el numerador y el denominador del término de la resistencia en paralelo entre R_1 :

$$(2) \quad R_{\text{combinada}} = \frac{R_2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} + R_3$$

Calcule la resistencia R_p de las tres resistencias en paralelo:

$$R_p = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

Divida el numerador y el denominador por $R_1 R_2$:

$$(3) \quad R_p = \frac{R_3}{1 + \frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2}}$$

Note en la ecuación (2) que $R_{\text{combinada}}$ es menor que $R_2 + R_3$ porque el denominador del primer término es mayor que 1, que alternativamente significa que es menor que $R_S = R_1 + R_2 + R_3$. Finalmente, note en la ecuación (3) que R_p , es menor que R_3 , otra vez debido a un denominador más grande que 1, y así R_p es menor que $R_{\text{combinada}}$. La combinación puramente paralela por lo tanto rinde la menor resistencia, y la respuesta es **c)**.

EJEMPLO 2

Dos resistores disipan tanta energía como sea posible cuando una diferencia de potencial fija se pone a través de ellos. ¿Deben ser instalados en paralelo o en serie?

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

la energía disipada por un resistor es proporcional a la diferencia de potencial ajustada e inverso proporcional a la resistencia. La resistencia posible más pequeña por lo tanto dará lugar a la salida de la energía más grande. Por lo tanto, los dos resistores se deben colocar en el paralelo, que da lugar a la resistencia combinada más baja.

■ EJEMPLO 3

Cierta resistencia R tiene resistividad ρ . Suponga que es comercialmente deseable diseñar una nueva resistencia que tenga una tercera parte de la longitud y un cuarto del área de sección transversal de la resistencia existente, pero la misma resistencia total. ¿Cuál debería ser la resistividad ρ_n de la nueva resistencia, en términos de la resistividad ρ del dispositivo original?

SOLUCIÓN

Escriba una expresión para la resistencia R_n de la nueva resistencia en términos de su resistividad, área de sección transversal A , y su longitud L :

$$(1) \quad R_n = \frac{\rho_n L_n}{A_n}$$

Divida la ecuación (1) por la misma expresión para la resistencia original:

$$(2) \quad \frac{R_n}{R} = \frac{\frac{\rho_n L_n}{A_n}}{\frac{\rho L}{A}} = \frac{\rho_n L_n A}{\rho L A_n}$$

Sustituya $A_n = A/4$, $R_n = R$ y $L_n = L/3$ en la ecuación (2):

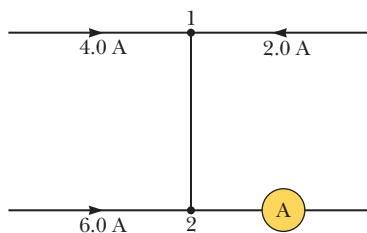
$$(3) \quad 1 = \frac{\rho_n (L/3) A}{\rho L (A/4)} = \frac{4\rho_n}{3\rho}$$

Resuelva la ecuación (3) para la nueva resistividad, ρ_n :

$$\rho_n = \frac{3}{4} \rho$$

Problemas de opción múltiple

- Tres resistencias de 1.0Ω , 2.0Ω y 3.0Ω , respectivamente, están en serie. Si se aplica una diferencia potencial de 12 V a través de la combinación, ¿cuál es la corriente resultante en el circuito? a) 0.50 A b) 2.0 A c) 6.0 A d) 12 A
- Si la longitud de un alambre conductor con resistencia R se duplica, ¿cuál será la resistencia del alambre más largo? a) $R/4$ b) $R/2$ c) $2R$ d) $4R$
- ¿Si una resistencia de 2.0Ω y una resistencia de 6.0Ω están conectadas en paralelo, cuál es su resistencia combinada? a) 1.5Ω b) 4.0Ω c) 8.0Ω d) 12Ω
- Si todos los componentes de un circuito eléctrico están conectados en serie, ¿cuál de las siguientes cantidades físicas debe ser la misma en todos los puntos del circuito? a) el voltaje b) la corriente c) la resistencia d) la potencia
- La corriente en un conductor es de 3.0 A cuando está conectado a través de una batería de 6.0 V . ¿Cuánta potencia se entrega al conductor? a) 0.50 W b) 2.0 W c) 9.0 W d) 18 W
- Una resistencia de 12Ω está conectado a través de una fuente de 6.0 V . ¿Cuánta potencia se entrega a la resistencia en media hora? a) $1.5 \times 10^{-3} \text{ kWh}$ b) $2.0 \times 10^{-3} \text{ kWh}$ c) $3.0 \times 10^{-3} \text{ kWh}$ d) $12 \times 10^{-3} \text{ kWh}$
- Una batería con un fem de 6.20 V lleva una corriente de 20.0 A . Si la resistencia interna de la batería es 0.01Ω , ¿cuál es el voltaje terminal? a) 1.24 V b) 6.00 V c) 6.40 V d) 31.0 V
- Los dispositivos A y B están conectados en paralelo con una batería. Si la resistencia R_A del dispositivo A es cuatro veces más grande que el R_B de la resistencia del dispositivo B, ¿cuál es la corriente real de I_A y I_B en los dispositivos A y B? a) $I_A = 2I_B$ b) $I_A = I_B/2$ c) $I_A = 4I_B$ d) $I_A = I_B/4$
- Un alambre tiene resistencia R . ¿Cuál es la resistencia de un alambre de la misma sustancia que tiene la misma longitud pero dos veces el área de sección transversal? a) $2R$ b) $R/2$ c) $4R$ d) $R/4$
- ¿Cuál debe ser la lectura en el amperímetro A para la sección de circuito mostrada?



- a) 0 A b) 6.0 A c) 8.0 A d) 12 A

11. ¿Cuál es la corriente en un alambre si 5.00 C de carga pasa a través del alambre en 0.500 s? a) 1.00 A b) 2.50 A c) 5.00 A d) 10.0 A

RESPUESTAS

1. **b).** Las tres resistencias están conectadas en serie, así que $R_{\text{total}} = \Sigma R = 6.0 \Omega$. De la ley de Ohm, $V_{\text{total}}/R_{\text{total}} = I_{\text{total}} = 12 \text{ V}/6.0 \Omega = 2.0 \text{ A}$.
2. **c).** La resistencia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área de sección transversal del conductor. Si el área permanece constante, duplicando la longitud se duplica la resistencia.
3. **a).** Las resistencias están en paralelo:

$$R_{\text{eq}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 12 \Omega^2 / 8.0 \Omega = 1.5 \Omega$$

De hecho, la resistencia equivalente de resistencias en paralelo es siempre menor que la resistencia más pequeña de la combinación, que significa que las respuestas b), c) y d) se habrían podido eliminar inmediatamente.

4. **b).** Un circuito en serie tiene solamente una trayectoria para la corriente, así que debe ser la misma en todos los puntos en el circuito.
5. **d).** $P = I \Delta V = 18 \text{ W}$.
6. **a).** La energía usada por una carga es el producto de la potencia que utiliza por unidad de tiempo y el lapso de tiempo de operación:

$$\begin{aligned} E = W = P \Delta t &= (\Delta V)^2 \Delta t / R = (6.0 \text{ V})^2 (0.50 \text{ h}) / 12 \Omega \\ &= 1.5 \text{ Wh} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ kWh} \end{aligned}$$

Observe la conversión de watts-hora a kilowatts-hora.

7. **b).** El producto Ir es la caída de potencial que ocurre dentro de la batería: $Ir = (20.0 \text{ A})(0.01 \Omega) = 0.20 \text{ V}$. Puesto que la batería está produciendo la corriente y no está siendo recargada, el voltaje terminal será menor que la fem por la caída potencial interna, lo que elimina las opciones c) y d) inmediatamente. Así pues, $\Delta V = \mathcal{E} - Ir = 6.20 \text{ V} - 0.20 \text{ V} = 6.00 \text{ V}$.
8. **d).** Se tiene más corriente en el circuito con menor resistencia. Utilice la ley de bucles de Kirchhoff alrededor del bucle que consiste en las dos resistencias paralelas y $R_A = 4R_B$:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta V_i = 0 &\rightarrow I_A R_A - I_B R_B = 0 \rightarrow \\ \frac{I_A}{I_B} &= \frac{R_B}{R_A} = \frac{R_B}{4R_B} = \frac{1}{4} \end{aligned}$$

por lo tanto, una cuarta parte de la corriente pasa a través del resistor A.

9. **b).** La resistencia es inversamente proporcional al área; duplicar el área reduce la resistencia a la mitad.
10. **d).** La regla de Kirchhoff dice que la corriente que entra en cualquier nodo debe ser igual a la corriente que sale de ese nodo. La corriente que entra en el cruce 1 es 6.0 A, la que subsecuentemente se incorpora al cruce 2, así que la corriente total que entra al cruce 2 es 12 A, y la que sale después del cruce 2 y que entra en el amperímetro es 12 A.
11. **d).** Por definición, la corriente es la cantidad de carga que pasa por un punto en el circuito está dado por: $I = Q/\Delta t = 5.00 \text{ C}/0.500 \text{ s} = 10.0 \text{ A}$.

Átomos

■ EJEMPLO 1

El tritio es un isótopo del hidrógeno con una vida media de $t_{1/2} = 12.33$ años. ¿Cuánto tiempo le llevaría a 1.60×10^2 g de tritio para decaer a 20.0 g? a) 6.17 años b) 26.7 años c) 37.0 años d) 74.0 años

(continúa)

SOLUCIÓN

Calcule el número n de vidas medias requerido. La ecuación puede resolverse por inspección (puede necesitar logaritmos):

$$\left(\frac{1}{2}\right)^n = \frac{20.0 \text{ g}}{1.60 \times 10^2 \text{ g}} = \frac{1}{8.00} \rightarrow n = 3$$

Multiplique el número de vidas medias por la longitud de vida media para encontrar el intervalo necesario de tiempo en cuestión, verificando que la respuesta es c):

$$\Delta t = nt_{1/2} = 3(12.33 \text{ años}) = 37.0 \text{ años}$$

EJERCICIO 2

¿Cuál es el número de masa de un átomo de carbón que tiene 6 protones y 8 neutrones? a) 6 b) 8 c) 14

SOLUCIÓN

No confunda el número de masa con el número atómico, Z , que es el número de protones en el núcleo. El número de masa A es el número de nucleones en el núcleo. Para calcular el número de masa, sólo sume el número de protones y de neutrones: $6 + 8 = 14$, que es la respuesta c).

EJEMPLO 3

¿Cuál de las siguientes partículas están dadas por A_ZX en la reacción siguiente? a) ${}^7_3\text{Li}$ b) ${}^7_4\text{Be}$ c) ${}^{14}_7\text{N}$ d) ${}^{10}_6\text{C}$



SOLUCIÓN

Igualé la suma del número de masa a ambos lados de la reacción:

$$1 + A = 4 + 4 = 8 \rightarrow A = 7$$

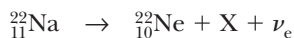
Por conservación de la carga, el número de protones debe, también, ser el mismo para ambos lados:

$$1 + Z = 2 + 2 = 4 \rightarrow Z = 3$$

Basado en estos dos resultados, la respuesta correcta es a), ${}^7_3\text{Li}$.

Problemas de opción múltiple

1. En la reacción nuclear de abajo, ¿qué partícula representa X?



a) una partícula α b) una partícula β c) un positrón d) un fotón γ

2. ¿Cuál es el número atómico del nucleído hijo en la reacción siguiente?



a) 14 b) 16 c) 30 d) 31

3. Si ${}^{13}_7\text{N}$ tiene una vida media de cerca de 10.0 minutos, ¿cuánto tiempo tomará para 20 g del isótopo decaer a 2.5 g? a) 5 minutos b) 10 minutos c) 20 minutos d) 30 minutos

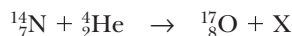
4. Cierta radionúclido decae emitiendo una partícula α . ¿Cuál es la diferencia entre los números atómicos del padre y los nucleídos del hijo? a) 1 b) 2 c) 4 d) 6

5. ¿Cuál es la diferencia en número de masa entre el padre y los nucleídos del hijo después de proceso de decaimiento? a) -1 b) 0 c) 1 d) 2

6. Un átomo del nitrógeno tiene 7 protones y 6 neutrones. ¿Cuál es su número de masa? a) 1 b) 6 c) 7 d) 13

7. ¿Cuál del siguiente es un isótopo de ${}^{182}_{63}\text{X}$? a) ${}^{182}_{64}\text{X}$ b) ${}^{182}_{64}\text{X}$ c) ${}^{180}_{63}\text{X}$ d) ${}^{180}_{62}\text{X}$

8. En la siguiente ecuación nuclear, ¿cuál es X?



- a) un protón b) un positrón c) partícula β d) una partícula α
9. ¿Cuál es el número de neutrones en ${}^{140}_{54}\text{X}$? a) 54 b) 86 c) 140 d) 194
10. El radon-222 tiene una vida media de cerca de 4 días. Si una muestra de gas ${}^{222}\text{Rn}$ en un envase se duplica inicialmente, la vida media será a) dividida en dos. b) duplicada. c) cuadruplicada. d) sin cambios.
11. Un radionúclido decae totalmente. En el frasco de la reacción, el único gas que se encuentra que es helio, que no estaba presente cuando el frasco fue sellado. El proceso del decaimiento fue probablemente a) un decaimiento β . b) Un decaimiento α . c) un decaimiento γ . d) una emisión de positrón.
12. ¿Cuál es el periodo de un radionúclido si 1/16 de su masa inicial está presente después de 2 h? a) 15 minutos b) 30 minutos c) 45 minutos d) 60 minutos
13. La vida media de ${}^{22}_{11}\text{Na}$ es 2.6 años. Si X gramos de este isótopo de sodio está inicialmente presente, ¿cuánto queda después de 13 años? a) $X/32$ b) $X/13$ c) $X/8$ d) $X/5$

RESPUESTAS

1. c). Note que el número de masa no tiene cambios, mientras que el número atómico ha sido reducido por 1, lo que implica que un protón ha cambiado a un neutrón. La partícula que emite debe tener una carga igual a un protón pero un número de masa atómica cero. El positrón es la única opción que tiene ambos atributos.
2. a). El número atómico es Z. La conservación de la carga significa que $15 = Z + 1$. Allí delante, $Z = 14$.
3. d). Primero, encuentre el número de vidas medias y después multiplique por el valor de la vida media para obtener el tiempo transcurrido:

$$\frac{2.5 \text{ g}}{20 \text{ g}} = \frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3 \rightarrow n = 3$$

$$\Delta t = nt_{1/2} = 3(10 \text{ min}) = 30 \text{ min}$$

4. b). Una partícula α es un núcleo de helio. En un decaimiento α , dos protones son efectivamente removidos.
5. b). Un decaimiento β emite un electrón de alta energía, ${}^0_{-1}\text{e}$. En el proceso, un neutrón decae en un protón más el electrón emitido y un antineutrino. El número de nucleones permanece sin cambios, con el protón sustituyendo el neutrón en la suma de nucleones.
6. d). El número de masa es la suma de neutrones y de protones: $6 + 7 = 13$ nucleones.
7. c). Los isótopos de un elemento tienen el mismo número atómico pero diferente número de neutrones, así que sus números de masa son diferentes. El número atómico de X es 63.
8. a). Los números de masa deben ser los mismos en ambos lados de la reacción. Si A es el número de masa de X, entonces $14 + 4 = 17 + A$, así que $A = 1$. En cuanto a número atómico, $7 + 2 = 8 + Z$. Por lo tanto, $Z = 1$, que describe un protón, ${}^1_1\text{H}$.
9. b). El número de neutrones es el número de masa menos el número atómico: $A - Z = 140 - 54 = 86$.
10. d). La vida media es una constante que depende de la identidad del nucleído, no en la cantidad presente del nucleído.
11. b). La partícula α es un núcleo del helio. Cada partícula α entonces adquiere dos electrones para formar un átomo neutral de helio.
12. b). En cada vida media, la masa disminuye a la mitad de su valor anterior: $1/16 = 1/2^4$. Le toma cuatro vidas medias para decaer abajo de 1/16 de la masa original. Cada una deben estar en 30 minutos porque el proceso entero toma dos horas.
13. a). En 13 años, habrá 5 vidas medias de 2.6 años cada una ($5 \times 2.6 = 13$). El isótopo disminuye a $1/2^5$ a $1/32$ de su cantidad original.

■ Respuestas a los exámenes rápidos, preguntas de ejemplo, preguntas impares, preguntas de opción múltiple, preguntas conceptuales y problemas

CAPÍTULO 15

Preguntas rápidas

1. b)
2. b)
3. c)
4. a)
5. c) y d)
6. a)
7. c)
8. b)
9. d)
10. b) y d)

Preguntas de ejemplo

1. $\frac{1}{4}$
2. a)
3. Cuarto cuadrante
4. La gotita suspendida aceleraría hacia abajo al doble de la aceleración de la gravedad.
5. El ángulo ϕ aumentaría.
6. c)
7. La carga sobre la superficie interior sería negativa.
8. Cero

Preguntas de opción múltiple

1. b)
3. a)
5. b)
7. d)
9. e)
11. e)
13. a)

Preguntas conceptuales

1. Los electrones se removieron del objeto. La carga negativa se ha quitado de la barra inicialmente neutra, lo que resulta en una carga neta positiva en la barra. Los protones no se pueden quitar de la barra; los protones no se mueven porque están dentro de los núcleos de los átomos de la barra.
3. No. La carga sobre la esfera metálica reside sobre su superficie exterior, de modo que la persona puede tocar la superficie sin causar alguna transferencia de carga.
5. No. La vida no sería diferente si los electrones fueran cargados + y los protones cargados -. Las cargas opuestas se atraen todavía y las cargas iguales se repelen. El nombramiento de cargas + y - no es más que una convención.
7. Mueva un objeto A con una carga positiva neta de modo que esté cerca, más no en contacto, de un objeto metálico neutro B que esté aislado del suelo. La presencia de A polarizará a B , lo que hará que un exceso de carga negativa exista en el lado más cercano de A y un exceso de carga positivo de igual magnitud exista en el lado más lejano de A . Mientras A todavía esté cerca de B , toque B con su mano. Entonces electrones adicionales fluirán de tierra, a través de su cuerpo y hacia B . Con A todavía cerca, mas no en contacto con B , quite su mano de B , lo que por lo tanto atrapa los

electrones en exceso en B . Cuando ahora quite A , B quedará con exceso de electrones o una carga negativa neta. Mediante repulsión mutua, esta carga negativa ahora se dispersará de manera uniforme sobre toda la superficie de B .

9. Ella no se conmociona. Ella se convierte en parte de la cúpula del generador Van de Graaff, y las cargas fluyen en su cuerpo. Estas no saltan a su cuerpo a través de una chispa, sin embargo, no se conmociona.
11. El papel seco es inicialmente neutro. El peine atrae el papel porque su campo eléctrico hace que las moléculas del papel se polaricen, el papel como un todo no puede ser polarizado, ya que es un aislante. Cada molécula está polarizada, por lo que su lado sin carga está más cerca del peine cargado que su lado con carga, por lo que la molécula experimenta una fuerza neta atractiva hacia el peine. Una vez que el papel entra en contacto con el peine, como la carga puede ser transferida desde el peine al papel, y si una cantidad suficiente de esta carga se transfiere, el papel cargado es entonces rechazado por el peine.
13. El efecto de blindaje eléctrico de los conductores depende del hecho de que hay dos tipos de carga: positiva y negativa. Como resultado, las cargas se pueden mover dentro del conductor de modo que la combinación de cargas positiva y negativa establece un campo eléctrico que cancela exactamente el campo externo dentro del conductor y cualquier cavidad dentro del conductor. Sin embargo, sólo hay un tipo de carga de gravitación, porque no hay masa negativa. Como resultado, el blindaje gravitacional no es posible. Una habitación no puede blindarse gravitacionalmente porque la masa siempre es positiva o cero, nunca negativa.
15. Sólo puede concluir que la carga neta dentro de la superficie gaussiana es positiva.

Problemas

1. a) 8.7×10^{-8} N b) La fuerza es repulsiva
3. a) 2.36×10^{-5} C b) Las cargas inducen cargas opuestas en las mamparas, pero la carga inducida en la mampara cerca de la bola B es mayor debido a la mayor carga de la bola B . Por lo tanto, el sistema se mueve lentamente hacia la mampara más cercana a la bola B .
5. a) 36.8 N b) 5.54×10^{27} m/s²
7. 49.3 N/m
9. a) 2.2×10^{-5} N (atracción) b) 9.0×10^{-7} N (repulsión)
11. 1.38×10^{-5} N a 77.5° abajo del eje x negativo
13. 0.437 N a -85.3° del eje $+x$.
15. 7.2 nC
17. 2.07×10^3 N/C abajo
19. 3.15 N (hacia el norte)
21. a) $\frac{mg}{|Q|} \sin \theta$ b) 3.19×10^3 N/C abajo de la rampa
23. a) 6.12×10^{10} m/s² b) $19.6 \mu\text{s}$ c) 11.8 m
d) 1.20×10^{-15} J
25. $E_x = (1 - \sqrt{2})k_e \frac{Q}{d^2}$, $E_y = \sqrt{2}k_e \frac{Q}{d^2}$
27. 1.8 m a la izquierda de la carga de $-2.5 \mu\text{C}$
29. cero
35. a) 0 b) $5 \mu\text{C}$ adentro, $-5 \mu\text{C}$ afuera c) 0 adentro, $-5 \mu\text{C}$ afuera
d) 0 adentro, $-5 \mu\text{C}$ afuera

37. $1.3 \times 10^{-3} \text{ C}$
 39. a) $2.54 \times 10^{-15} \text{ N}$ b) $1.59 \times 10^4 \text{ N/C}$ radialmente hacia afuera
 41. a) $858 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ b) 0 c) $657 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$
 43. $-Q/\epsilon_0$ para S_1 ; 0 para S_2 ; $-2Q/\epsilon_0$ para S_3 ; 0 para S_4
 45. a) 0 b) $k_e q/r_2$ hacia afuera
 47. a) -7.99 N/C b) 0 c) 1.44 N/C d) 2.00 nC en la superficie interior; 1.00 nC en la superficie exterior
 49. 115 N
 51. 24 N/C en la dirección x positiva
 53. a) $E = 2k_e qb(a^2 + b^2)^{-3/2}$ en la dirección x positiva
 b) $E = k_e Qb(a^2 + b^2)^{-3/2}$ en la dirección x positiva
 55. $F_x = (0.354)k_e \frac{Q^2}{d^2}$; $F_y = (1.65)k_e \frac{Q^2}{d^2}$
 57. $4.4 \times 10^5 \text{ N/C}$
 59. $1.14 \times 10^{-7} \text{ C}$ en una esfera $5.69 \times 10^{-8} \text{ C}$ en la otra
 61. a) 0 b) $7.99 \times 10^7 \text{ N/C}$ (hacia afuera) c) 0
 d) $7.34 \times 10^6 \text{ N/C}$ (hacia afuera)
 63. a) $1.00 \times 10^3 \text{ N/C}$ b) $3.37 \times 10^{-8} \text{ s}$ c) acelera a $1.76 \times 10^{14} \text{ m/s}^2$ en la dirección opuesta a la del campo eléctrico

CAPÍTULO 16

Preguntas rápidas

- b)
- a)
- b)
- d)
- d)
- c)
- a)
- c)
- a) C disminuye. b) Q permanece igual. c) E permanece igual. d) ΔV aumenta. e) La energía almacenada aumenta.
- a) C aumenta. b) Q aumenta. c) E permanece igual. d) ΔV permanece igual. e) La energía almacenada aumenta.
- a)

Preguntas ejemplo

- Verdadero
- Verdadero
- Falso
- a)
- Tres
- Cada respuesta se reduciría por un factor de un medio.
- Un cuarto
- La caída de voltaje es la más pequeña a través del capacitor de $24 \mu\text{F}$ y más grande a través del capacitor de $3.0 \mu\text{F}$.
- El capacitor de $3.0 \mu\text{F}$
- c)
- b)
- $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$

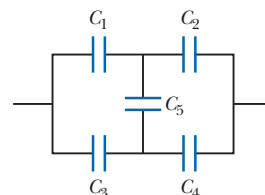
Preguntas de opción múltiple

- b)
- d)
- b)
- a)
- a)
- c)

Preguntas conceptuales

- a) El protón se mueve en una línea recta con aceleración constante en dirección del campo eléctrico. b) Conforme su velocidad aumenta, su energía cinética aumenta y la energía potencial eléctrica asociada con el protón disminuye.

- El trabajo realizado al separar más las placas del capacitor se transfiere en energía eléctrica adicional almacenada en el capacitor. La carga es constante y la capacitancia disminuye, pero la diferencia de potencial entre las placas aumenta, lo que resulta en un aumento en la energía eléctrica almacenada.
- Si la línea de transmisión tiene contacto eléctrico con el metal del automóvil, elevará el potencial del automóvil a 20 kV . También elevará el potencial de su cuerpo a 20 kV , porque usted está en contacto con el automóvil. En sí mismo, este no es el problema. Sin embargo, si se baja del automóvil, su cuerpo a 20 kV hará contacto con el suelo, que está a cero volts. Como resultado, una corriente pasará a través de su cuerpo y probablemente se lesionará. Por ende, es mejor permanecer en el auto hasta que llegue ayuda.
- Si dos puntos en un objeto conductor estuviesen a diferentes potenciales, entonces las cargas libres en el objeto se moverían y usted no tendría condiciones estáticas, en contradicción con la suposición inicial. (Las cargas positivas libres migrarían de las posiciones de más alto a las posiciones de más bajo potencial. Los electrones libres se moverían rápidamente desde las posiciones de menor a las posiciones de más alto potencial.) Todas las cargas continuarían moviéndose hasta que el potencial se volviera igual en todas partes en el conductor.
- a) Con frecuencia el capacitor permanece cargado mucho después de que se desconecta la fuente de voltaje. Esta carga residual puede ser letal. b) El capacitor se puede manejar con seguridad después de descargar las placas mediante un cortocircuito del dispositivo con un conductor, como un destornillador con un mango aislante.
- $D > C > B > A$
- No todas las conexiones son simples combinaciones de circuitos en serie y paralelo. Como ejemplo de un circuito tan complejo, tenga en cuenta la red de cinco condensadores, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 y C_5 se muestra a continuación



Esta combinación no puede ser reducida a una simple combinación equivalente por las técnicas de capacitores en serie y en paralelo.

Problemas

- a) $1.92 \times 10^{-18} \text{ J}$ b) $-1.92 \times 10^{-18} \text{ J}$ c) $2.05 \times 10^6 \text{ m}$ en la dirección x negativa
- $1.4 \times 10^{-20} \text{ J}$
- $1.7 \times 10^6 \text{ N/C}$
- a) $1.13 \times 10^5 \text{ N/C}$ b) $1.80 \times 10^{-14} \text{ N}$ c) $4.37 \times 10^{-17} \text{ J}$
- a) El resorte se estira 4.36 cm .
 b) Equilibrio: $x = 2.18 \text{ cm}$; $A = 2.18 \text{ cm}$ c) $\Delta V = -\frac{2kA^2}{Q}$
- a) $-5.75 \times 10^{-7} \text{ V}$ b) $-1.92 \times 10^{-7} \text{ V}$, $\Delta V = 3.84 \times 10^{-7} \text{ V}$
 c) No. A menos que esté fijo en su lugar, el electrón se movería en la dirección opuesta, lo que aumenta su distancia de los puntos A y B y reduce la diferencia de potencial entre ellos.
- a) $2.67 \times 10^6 \text{ V}$ b) $2.13 \times 10^6 \text{ V}$
- a) 103 V b) $-3.85 \times 10^{-7} \text{ J}$; se debe realizar trabajo positivo para separar las cargas.
- -11.0 kV
- a) $3.84 \times 10^{-14} \text{ J}$ b) $2.55 \times 10^{-13} \text{ J}$ c) $-2.17 \times 10^{-13} \text{ J}$
 d) $8.08 \times 10^6 \text{ m/s}$ e) $1.24 \times 10^7 \text{ m/s}$
- a) 0.294 J b) 271 m/s
- $2.74 \times 10^{-14} \text{ m}$
- a) $1.1 \times 10^{-8} \text{ F}$ b) 27 C

27. a) 1.36 pF b) 16.3 pC c) 8.00×10^3 V/m
 29. a) 11.1 kV/m hacia la placa negativa b) 3.74 pF
 c) 74.8 pC y -74.8 pC
 31. a) 5.90×10^{-10} F b) 3.54×10^{-9} C c) 2.00×10^3 N/C
 d) 1.77×10^{-8} C/m² e) Todas las respuestas se reducen.
 33. a) 10.7 μ C en cada capacitor b) 15.0 μ C sobre el capacitor de 2.50 μ F y 37.5 μ C sobre el capacitor de 6.25 μ F
 35. a) 2.67 μ F b) 24.0 μ C sobre cada capacitor de 8.00 μ F, 18.0 μ C sobre el capacitor de 6.00 μ F, 6.00 μ C sobre el capacitor de 2.00 μ F c) 3.00 V a través de cada capacitor
 37. a) 3.33 μ F b) 180 μ C sobre los capacitores de 3 μ F y 6 μ F, 120 μ C sobre los capacitores de 2.00 μ F y 4.00 μ F c) 60.0 V a través de los capacitores de 3 μ F y 2 μ F, 30.0 V a través de los capacitores de 6 μ F y 4 μ F
 39. $Q_1 = 16.0$ μ C, $Q_5 = 80.0$ μ C, $Q_8 = 64.0$ μ C, $Q_4 = 32.0$ μ C
 41. a) $Q_{25} = 1.25$ mC, $Q_{40} = 2.00$ mC b) $Q'_{25} = 288$ μ C, $Q'_{40} = 462$ μ C c) $\Delta V = 11.5$ V
 43. $Q'_1 = 3.33$ μ C, $Q'_2 = 6.67$ μ C
 45. 3.24×10^{-4} J
 47. a) 54.0 μ J b) 108 μ J c) 27.0 μ J
 49. a) $\kappa = 3.4$. El material probablemente es nylon (véase la tabla 16.1). b) El voltaje yacería en alguna parte entre 25.0 y 85.0 V.
 51. a) 8.1 nF b) 2.4 kV
 53. a) volumen 9.09×10^{-16} m³, área 4.54×10^{-10} m²
 b) 2.01×10^{-13} F c) 2.01×10^{-14} C, 1.26×10^5 cargas electrónicas
 59. 0.188 m²
 61. 6.25 μ F
 63. 4.47 kV
 65. 0.75 mC en C_1 , 0.25 mC en C_2
 67. Esfera A: 0.800 μ C; esfera B: 1.20 μ C

CAPÍTULO 17

Preguntas rápidas

- d)
- b)
- c), d)
- b)
- b)
- b)
- a)
- b)
- a)
- c)

Preguntas de ejemplo

- No. Tal corriente corresponde al paso de un electrón cada 2 segundos. Sin embargo, la corriente promedio puede tener cualquier valor.
- Verdadero
- Más alto
- b)
- a)
- c)

Preguntas de opción múltiple

- c)
- a)
- d)
- c)
- b)
- c)
- c)

Preguntas conceptuales

- En el caso en que las cargas electrostáticas son estacionarias, el campo eléctrico dentro de un conductor debe ser cero. Un campo distinto de cero produce una corriente (mediante la interacción con los electrones libres del conductor), lo que violaría la condición de equilibrio estático. En este capítulo nos ocupamos de los conductores que transportan corriente, una situación no electrostática. La corriente surge a causa de una diferencia de potencial aplicada entre los extremos del conductor, lo que produce un campo eléctrico interno.
- Debido a que hay tantos electrones en un conductor (aproximadamente 10^{28} electrones/m³), la velocidad media de las cargas es muy lenta. Cuando se conecta un cable a una diferencia de potencial, se establece un campo eléctrico en todo el alambre de manera casi instantánea, para que los electrones comiencen a moverse por todas partes al mismo tiempo.
- Se concluiría que el conductor es no óhmico.
- Un voltaje no es algo que "recorra" un circuito completo. Un voltaje es una diferencia de potencial que se aplica a través de un dispositivo o un circuito. Sería más correcto decir "1 ampere de electricidad recorrió el cuerpo de la víctima". Aunque esta cantidad de corriente tendría resultados desastrosos sobre el cuerpo humano, un valor de 1 (ampere) no suena tan excitante para un artículo periodístico como 10 000 (volts). Otra posibilidad es escribir "10 000 volts de electricidad se aplicaron a través del cuerpo de la víctima", lo cual todavía no suena muy excitante.
- Una vez que el interruptor se cierra, el voltaje de línea se aplica a través del foco. Cuando el voltaje se aplica a través del filamento frío cuando se enciende por primera vez, la resistencia del filamento es baja, la corriente es alta y una cantidad de potencia relativamente grande se aplica al foco. Conforme el filamento se calienta, su resistencia se eleva y la corriente disminuye. El gran pico de corriente al comienzo de la operación del foco es la razón por la que éstos con frecuencia fallan justo después de que se encienden.

Problemas

- 3.00×10^{20} electrones b) se mueven en la dirección opuesta a la corriente.
- 1.05 mA
- 0.678 mm
- 27 años
- a) 55.85×10^{-3} kg/mol b) 1.41×10^5 mol/m³
 c) 8.49×10^{28} átomos de hierro/m³ d) 1.70×10^{29} electrones de conducción/m³ e) 2.21×10^{-4} m/s
- 32 V es 200 veces mayor que 0.16 V
- a) 13.0 Ω b) 17.0 m
- a) 30 Ω b) 4.7×10^{-4} $\Omega \cdot$ m
- plata ($\rho = 1.59 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot$ m)
- 256 Ω
- 2.0 A
- 2.71 M Ω
- 26 mA
- a) 3.0 A b) 2.9 A
- a) 1.2 Ω b) 8.0×10^{-4} (un aumento de 0.080%)
- a) 8.33 A b) 14.4 Ω
- a) 2.1 W b) 3.42 W c) El alambre de aluminio no es tan seguro. Si está rodeado de aislamiento térmico, sería más propicio que un alambre de cobre.
- 11.2 min
- a) $R_A = 576$ Ω ; $R_B = 144$ Ω b) 4.80 s. c) La carga es la misma. Está en un lugar que es inferior en potencial. d) 0.040 0 s e) la energía entra en el foco por transmisión eléctrica y se escapa por calor y radiación electromagnética. f) \$1.98

41. 1.6 cm
 43. $15.0 \mu\text{W}$
 45. a) 116 V b) 12.8 kW
 47. $\frac{d_A}{d_B} = \sqrt{3}$
 49. $2.16 \times 10^5 \text{ C}$
 51. a) 1.50Ω b) 6.00 A
 53. 1.1 km
 55. $1.47 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; difiere en 2.0% del valor en la tabla 17.1
 57. a) \$3.06 b) No. El circuito debe poder manejar al menos 26 A.
 59. a) 17.3 A b) 22.4 MJ c) \$0.684
 61. $3.77 \times 10^{28}/\text{m}^3$
 63. 37 M Ω
 65. 0.48 kg/s

CAPÍTULO 18

Preguntas rápidas

- Verdadero
- Debido a resistencia interna, la potencia se entrega al material de la batería, lo que eleva su temperatura.
- b)
- a)
- a)
- b)
- Paralelo: a) no cambia b) no cambia c) aumenta d) disminuye
- Serie: a) disminuye b) disminuye c) disminuye d) aumenta
- c)

Preguntas de ejemplo

- Debido a que la resistencia se calienta, su resistencia aumenta, reduce la corriente.
- b)
- El resistor de 8.00Ω
- Las respuestas serían negativas, pero tendrían la misma magnitud que antes.
- Sí
- a)
- a)

Preguntas de opción múltiple

- b), c)
- c)
- a)
- e)
- d)
- b), e)
- d)
- a), d)

Preguntas conceptuales

- No. Cuando una batería funciona como fuente y suministra corriente a un circuito, la corriente convencional fluye a través de la batería desde la terminal negativa hasta la positiva. Sin embargo, cuando una fuente con fem más grande que la batería se usa para cargar la batería, la corriente convencional se fuerza a fluir a través de la batería desde la terminal positiva hasta la negativa.
- La cantidad total de energía que entrega la batería será menor que W . Recuerde que una batería se puede considerar como una batería ideal sin resistencia, en serie con la resistencia in-

terna. Cuando la batería se carga, la energía que se le entrega incluye la energía necesaria para cargar la batería ideal, más la energía que se usa para elevar la temperatura de la batería debido a calentamiento $I^2 r$ en la resistencia interna. Esta última energía no está disponible durante la descarga de la batería, cuando parte de la energía disponible reducida de nuevo se transforma en energía interna en la resistencia interna, que reduce aún más la energía disponible bajo W .

- Conectar baterías en paralelo no aumenta la fem. Un dispositivo de alta corriente conectado a dos baterías en paralelo puede extraer corrientes de ambas baterías. Por ende, conectar las baterías en paralelo aumenta la posible salida de corriente y, por lo tanto, la posible salida de potencia.
- El arranque de un automóvil extrae una corriente relativamente grande de la batería. Esta gran corriente causa una significativa caída de voltaje a través de la resistencia interna de la batería. Como resultado, el voltaje en terminales de la batería se reduce y los faros se apagan en concordancia.
- El ave descansa sobre un alambre de potencial fijo. Para electrocutarse, se requiere una gran diferencia de potencial entre los pies del ave. La diferencia de potencial entre los pies del ave es muy pequeña para dañarla.
- No se electrocutará si se sostiene sólo de un alambre de alta tensión, porque no completa un circuito. No hay diferencia de potencial a través de su cuerpo en tanto cuelgue de un solo alambre. Sin embargo, debe soltar el alambre inmediatamente después de que se rompe, porque se convertirá en parte de un circuito cerrado cuando llegue al suelo o entre en contacto con otro objeto.
- La regla del nodo es un enunciado de la conservación de la carga. Dice que la cantidad de carga que entra a un nodo en algún intervalo debe ser igual a la carga que sale del nodo en dicho intervalo. La regla de la malla es un enunciado de la conservación de la energía. Dice que el aumento y la disminución en potencial alrededor de una malla cerrada en un circuito debe sumar cero.

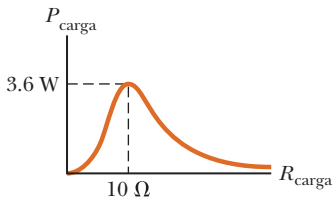
Problemas

- 4.92 Ω
- a) Su diagrama del circuito consistirá de dos resistores de 0.800Ω en serie con la resistencia de 192Ω del foco. b) 73.8 W
- a) 17.1 Ω b) 1.99 A para 4.00Ω y 9.00Ω , 1.17 A para 7.00Ω , 0.820 A para 10.0Ω
- 470 Ω y 220 Ω
- a) 5.68 V b) 0.227 A
- 55 Ω
- 0.43 A
- a) Conecte dos resistores de 50Ω en paralelo y luego conecte esta combinación en serie con un resistor de 20Ω . b) Conecte dos resistores de 50Ω en paralelo, conecte dos resistores de 20Ω en paralelo y luego conecte estas dos combinaciones en serie una con otra.
- 0.714 A, 1.29 A, 12.6 V
- 50.0 mA de a a e
- a) $I_1 = 1.00 \text{ A}$ hacia arriba en 200Ω ; $I_4 = 4.00 \text{ A}$ hacia arriba en 70.0Ω ; $I_2 = 3.00 \text{ A}$ hacia arriba en 80.0Ω ; $I_3 = 8.00 \text{ A}$ hacia abajo en 20.0Ω ; b) 200 V
- a) 0.385 mA, 3.08 mA, 2.69 mA b) 69.2 V, con e en el potencial más alto
- a) No. La única simplificación es observar que los resistores de 2.0Ω y 4.0Ω están en serie y suman una resistencia de 6.0Ω . Del mismo modo, los resistores de 5.0Ω y 1.0Ω están en serie y suman una resistencia de 6.0Ω . El circuito no se puede simplificar más, debe usar reglas de Kirchhoff para analizar el circuito. b) $I_1 = 3.5 \text{ A}$, $I_2 = 2.5 \text{ A}$, $I_3 = 1.0 \text{ A}$

27. a) No. El circuito multimalla no se puede simplificar más, debe usar reglas de Kirchhoff para analizar el circuito. b) $I_{30} = 0.353 \text{ A}$ se dirige a la derecha, $I_5 = 0.118 \text{ A}$ se dirige hacia la derecha, $I_{20} = 0.471 \text{ A}$ se dirige a la izquierda
29. $\Delta V_2 = 3.05 \text{ V}$, $\Delta V_3 = 4.57 \text{ V}$, $\Delta V_4 = 7.38 \text{ V}$, $\Delta V_5 = 1.62 \text{ V}$
31. (a) 1.88 s (b) $1.90 \times 10^{-4} \text{ C}$
33. (a) 5.00 s (b) $150 \mu\text{C}$ (c) $4.06 \mu\text{A}$
35. (a) 0.432 s (b) $6.00 \mu\text{F}$
37. 48 focos
39. (a) 6.25 A (b) 750 W
41. (a) $1.2 \times 10^{-9} \text{ C}$, 7.3×10^9 iones K^+ . No grande, sólo $1e/(290 \text{ \AA})^2$. (b) $1.7 \times 10^{-9} \text{ C}$, 1.0×10^{10} iones Na^+ (c) 0.83 mA (d) $7.5 \times 10^{-12} \text{ J}$
43. 11 nW
45. a) 4.00 V b) El punto *a* está en el potencial más alto
47. a) 15Ω b) $I_1 = 1.0 \text{ A}$, $I_2 = I_3 = 0.50 \text{ A}$, $I_4 = 0.30 \text{ A}$ e $I_5 = 0.20 \text{ A}$ c) $(\Delta V)_{ac} = 6.0 \text{ V}$, $(\Delta V)_{ce} = 1.2 \text{ V}$, $(\Delta V)_{ed} = (\Delta V)_{fd} = 1.8 \text{ V}$, $(\Delta V)_{cd} = 3.0 \text{ V}$, $(\Delta V)_{db} = 6.0 \text{ V}$ d) $P_{ac} = 6.0 \text{ W}$, $P_{ce} = 0.60 \text{ W}$, $P_{ed} = 0.54 \text{ W}$, $P_{fd} = 0.36 \text{ W}$, $P_{cd} = 1.5 \text{ W}$, $P_{db} = 6.0 \text{ W}$
49. 6.00Ω , 3.00Ω

51. a) $R_{\text{abierto}} = 3R$, $R_{\text{cerrado}} = 2R$ b) $P = \frac{\mathcal{E}^2}{3R}$, $P = \frac{\mathcal{E}^2}{2R}$
- c) Las lámparas A y B aumentan en brillo, la lámpara C se apaga.
53. a) 1.02 A abajo b) 0.364 A abajo c) 1.38 A arriba d) 0 e) $66.0 \mu\text{C}$
55. a) $R_x = R_2 - \frac{1}{4}R_1$ b) $R_x = 2.8 \Omega$ (aterrizaje inadecuado)

59.
$$P = \frac{(144 \text{ V}^2)R}{(R + 10.0 \Omega)^2}$$



61. a) $6.0 \times 10^2 \text{ W}$ b) 1.2 J (c) 37 m
63. 0.395 A; 1.50 V
65. a) $2.41 \times 10^{-5} \text{ C}$ b) $1.61 \times 10^{-5} \text{ C}$ c) $1.61 \times 10^{-2} \text{ A}$

CAPÍTULO 19

Preguntas rápidas

1. b)
2. c)
3. c)
4. a)
5. a), c)
6. b)

Preguntas ejemplo

1. La fuerza sobre el electrón es opuesta a la dirección de la fuerza sobre el protón y la aceleración del electrón es mucho más grande que la aceleración sobre el protón debida a la menor masa del electrón.
2. Un campo magnético siempre ejerce una fuerza perpendicular a la velocidad de una partícula cargada, de modo que puede cambiar la dirección de la partícula mas no su velocidad.
3. Cero
4. Conforme el ángulo tiende a 90° , la magnitud de la fuerza aumenta. Después de ir más allá de 90° , disminuye.
5. La magnitud de la cantidad de movimiento permanece constante. La dirección de la cantidad de movimiento cambia, a menos que la velocidad de la partícula sea paralela o antiparalela al campo magnético.
6. 20 m
7. a) a la izquierda b) a la derecha.

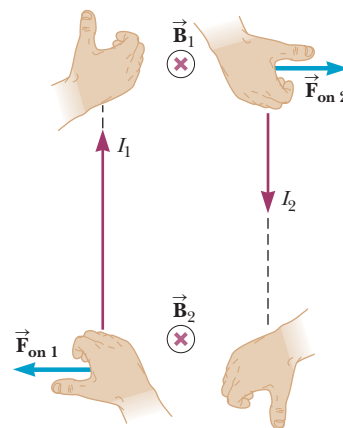
8. El campo magnético de la Tierra es extremadamente débil, de modo que la corriente que porta el automóvil tendría que ser correspondientemente muy grande. Tal corriente sería impráctica para generarse y, si se generara, calentaría y fundiría los alambres que la portan.
9. El protón aceleraría hacia abajo debido a la gravedad mientras avanza en círculos.

Preguntas de opción múltiple

1. a)
3. c)
5. e)
7. e)
9. c) y e)
11. a)
13. b)
15. a)
17. c)

Preguntas conceptuales

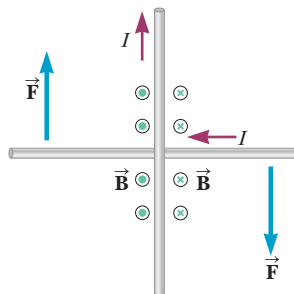
1. El conjunto debe orientarse de tal modo que el haz se mueva o hacia el este o hacia el oeste.
3. La fuerza magnética sobre una partícula cargada en movimiento siempre es perpendicular a la dirección de movimiento de la partícula. No hay fuerza magnética sobre la carga cuando se mueve paralela a la dirección del campo magnético. Sin embargo, la fuerza sobre una partícula cargada que se mueve en un campo eléctrico nunca es cero y siempre es paralela a la dirección del campo. Por lo tanto, al proyectar la partícula cargada en diferentes direcciones, es posible determinar la naturaleza del campo.
5. En la figura, el campo magnético creado por el alambre 1 en la posición del alambre 2 está en el papel. Por lo tanto, la fuerza magnética sobre el alambre 2 está en la dirección (corriente abajo) \times (campo en el papel) = (fuerza hacia la derecha), lejos del alambre 1. Ahora el alambre 2 crea un campo magnético en la página en el lugar de alambre de 1, por lo que el alambre 1 siente la fuerza de alambre (corriente arriba) \times (campo en el papel) = (fuerza hacia la izquierda), lejos del alambre 2.



7. Tal levitación no podría ocurrir jamás. En el polo norte, donde el campo magnético de la Tierra se dirige hacia abajo, hacia el equivalente de un polo sur enterrado, un ataúd se repelería si su polo magnético sur se dirigiera hacia arriba. Sin embargo, el equilibrio sólo sería transitorio, pues cualquier ligera perturbación alteraría el equilibrio entre la fuerza magnética y la fuerza gravitacional.
9. Una brújula no detecta corrientes en alambres cercanos a los interruptores eléctricos, por dos razones. La primera es que, puesto que el cable al interruptor contiene dos alambres, uno que porta corriente al interruptor y el otro que la aparta alejándose del mismo, el campo magnético neto sería muy pequeño y caería rápidamente con la distancia creciente. La segunda razón es que la corriente es alterna a 60 Hz. Como resultado,

el campo magnético también oscila a 60 Hz. Esta frecuencia sería muy rápida para que la brújula la siguiera, de modo que el efecto sobre la lectura de la brújula promediaría cero.

11. Si usted se moviera junto con los electrones, mediría una corriente cero para los electrones, de modo que no produciría un campo magnético de acuerdo con sus observaciones. Sin embargo, las cargas positivas fijas en el metal ahora se moverían hacia atrás en relación con usted, lo que crearía una corriente equivalente al movimiento hacia adelante de los electrones cuando usted estuviera estacionario. Por ende, mediría el mismo campo magnético como cuando usted está estacionario, pero se debería a las cargas positivas que se presume se mueven desde su punto de vista.
13. Cada espira del Slinky[®] se convertirá en un imán, porque una espira actúa como un circuito de corriente. El sentido de rotación de la corriente es la misma en todas las espiras, de modo que cada bobina se convierte en un imán con la misma orientación de polos. Por ende, todas las espiras se atraen y el Slinky[®] se comprimirá.
15. No hay fuerza neta sobre los alambres, pero sí hay un torque. Para entender esta distinción, imagine un alambre vertical fijo y un alambre horizontal libre (véase la figura siguiente). El alambre vertical porta una corriente hacia arriba y crea un campo magnético que se mueve en círculos en torno al alambre vertical, él mismo. A la derecha, el campo magnético del alambre vertical apunta hacia la página, mientras que en el lado izquierdo apunta afuera de la página, como se indica. Cada segmento del alambre horizontal (de longitud ℓ) porta corriente que interactúa con el campo magnético de acuerdo con la ecuación $F = B\ell \sin \theta$. Aplique la regla de la mano derecha en el lado derecho: apunte los dedos de su mano derecha en la dirección de la corriente horizontal y enróllelos hacia la página en la dirección del campo magnético. Su pulgar apunta hacia abajo, la dirección de la fuerza sobre el lado derecho del alambre. Repetir el proceso en el lado izquierdo da como resultado una fuerza hacia arriba sobre el lado izquierdo del alambre. Las dos fuerzas son iguales en magnitud y opuestas en dirección, de modo que la fuerza neta es cero, pero crean un torque neto en torno al punto donde los alambres se cruzan.



17. Si están proyectadas en la misma dirección en el mismo campo magnético, las cargas tienen signo opuesto.

Problemas

1. a) oeste b) deflexión cero c) arriba d) abajo
3. a) hacia la página b) hacia la derecha c) hacia la parte inferior de la página
5. a) 1.44×10^{-12} N b) 8.62×10^{14} m/s² c) Sobre el electrón se ejercería una fuerza que tiene la misma magnitud que la fuerza sobre un protón, pero en la dirección opuesta debido a su carga negativa. d) La aceleración del electrón sería mucho mayor que la del protón porque la masa del electrón es mucho menor.
7. 2.83×10^7 m/s oeste
9. 48.9° o 131°
9. $F_g = 8.93 \times 10^{-30}$ N (hacia abajo), $F_e = 1.60 \times 10^{-17}$ N (hacia arriba), $F_m = 4.80 \times 10^{-17}$ N (hacia arriba)
13. 8.0×10^{-3} T en la dirección $+z$
15. a) hacia la página b) hacia la derecha c) hacia la parte inferior de la página
17. 7.50 N

19. 0.131 T (hacia abajo)
21. a) La fuerza magnética y la fuerza de gravedad actúan ambas sobre el alambre. Cuando la fuerza magnética es hacia arriba equilibra la fuerza descendente de la gravedad, la fuerza neta sobre el alambre es cero y el alambre se puede mover hacia arriba con velocidad constante. b) 0.20 T afuera de la página. c) Si el campo supera 0.20 T, la fuerza magnética ascendente supera la fuerza descendente de la gravedad, de modo que el alambre acelera hacia arriba.
23. $ab: 0$, $bc: 0.040$ N en la dirección $-x$, $cd: 0.040$ N en la dirección $-z$, $da: 0.056$ N paralelo al plano xz y a 45° en ambas direcciones, $+x$ y $+z$.
25. $118 \mu\text{N} \cdot \text{m}$
27. 9.05×10^{-4} N \cdot m, que tiende a hacer que el lado izquierdo se mueva hacia usted y el lado derecho se aleje.
29. a) 0.56 A b) 0.064 N \cdot m
31. a) 3.97° b) 3.39×10^{-3} N \cdot m
33. a) 8.51×10^5 m/s b) 2.06×10^{-5} m
37. 1.77 cm
39. $r = 3R/4$
41. a) 2.08×10^{-7} kg/C b) 6.66×10^{-26} kg c) Calcio
43. $20.0 \mu\text{T}$
45. 2.0×10^{-10} A
47. 2.4 mm
49. $20.0 \mu\text{T}$ hacia la parte inferior de la página
51. 0.167 mT afuera de la página
53. a) 4.00 m b) 7.50 nT c) 1.26 m d) cero
55. a) 3.50×10^{-5} N/m b) repulsiva
57. 4.5 mm
59. 31.8 mA
61. a) 920 vueltas b) 12 cm
63. a) $2.8 \mu\text{T}$ b) 0.89 mA
65. a) $5.24 \mu\text{T}$ b) hacia la página c) 7.20 cm
67. a) $0.500 \mu\text{T}$ afuera de la página b) $3.88 \mu\text{T}$ paralelo al plano xy y a 59.0° en sentido de las manecillas del reloj desde la dirección $+x$
69. a) 1.33 m/s b) el signo de la fem es independiente de la carga.
71. $53 \mu\text{T}$ hacia la parte inferior de la página, $20 \mu\text{T}$ hacia el fondo de la página, y 0
73. a) -8.00×10^{-21} kg \cdot m/s b) 8.90°
75. 1.41×10^{-6} N

CAPÍTULO 20

Preguntas rápidas

1. b, c, a
2. c)
3. b)
4. a)
5. b)
6. b)

Preguntas de ejemplo

1. Falso
2. 5.06×10^{-3} V; la corriente estaría en la dirección opuesta.
3. a), e)
4. Sobre la barra se ejercerá una fuerza magnética dirigida hacia la derecha.
5. Duplicar la frecuencia duplica la fem inducida máxima.
6. b)
7. a)
8. 72.6 A
9. b)
10. Falso

Preguntas de opción múltiple

1. c)
3. d)

5. c)
7. b)
9. b)
11. a)

Preguntas conceptuales

- Conforme la nave espacial se mueve a través del espacio, aparentemente se mueve desde una región de una intensidad de campo magnético a una región con una intensidad diferente de campo magnético. El campo magnético variable a través de la bobina induce una fem y una corriente correspondiente en la bobina.
- De acuerdo con la ley de Faraday, se induce una fem en una espira de alambre si el flujo magnético a través de la espira cambia con el tiempo. En esta situación, se puede inducir una fem o al girar la espira en torno a un eje arbitrario, o al cambiar la forma de la espira.
- Si la barra se mueve hacia la izquierda, la fuerza magnética sobre las cargas negativas en la barra sería hacia arriba, lo que causa una acumulación de carga negativa en la parte superior y cargas positivas en la parte inferior. Por lo tanto, el campo eléctrico en la barra también sería hacia arriba.
- Si, por alguna razón, el campo magnético cambiara rápidamente, en el brazalet se podría inducir una gran fem. Si el brazalet no fuese una banda continua, esta fem generaría arcos de alto voltaje en cualquier brecha de la banda. Si el brazalet fuese una banda continua, la fem inducida produciría una gran corriente inducida y resultaría en calentamiento por resistencia del brazalet.
- Conforme la placa de aluminio se mueve hacia el campo, se inducen corrientes parásitas en el metal al cambiar el campo magnético en la placa. El campo magnético del electroimán interactúa con esta corriente, lo que produce una fuerza retardadora sobre la placa que la frena. En forma similar, conforme la placa deja el campo magnético, se induce una corriente y una vez más hay una fuerza hacia arriba para frenar la placa.
- La corriente de oscilación en el solenoide produce un campo magnético siempre cambiante. El flujo vertical a través del anillo, alternativamente, aumenta y disminuye, produciendo una corriente en él con una dirección que es alternativamente en sentido horario y antihorario. La corriente a través de la resistencia del anillo convierte la energía transmitida eléctricamente en energía interna con la tasa I^2R .

Problemas

- $4.8 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2$
- a) 0.177 T b) 0
- a) $\Phi_{B,\text{neto}} = 0$ b) 0
- a) $3.1 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2$ b) $\Phi_{B,\text{neto}} = 0$
- a) cero, ya que el flujo a través del circuito A no cambia b) hacia la izquierda para el circuito B c) hacia la derecha en el circuito C
- 94 mV
- 33 mV
- a) de izquierda a derecha b) de derecha a izquierda
- a) La corriente es cero, debido a que el flujo magnético, producido por la corriente a través del lado derecho del circuito (en la página) es opuesto al flujo a través de la parte izquierda del circuito (de la página), el flujo neto a través del circuito es siempre cero. b) en sentido horario, debido a que el flujo producido por el cable largo a través del circuito de la página y la corriente inducida en el circuito debe ser hacia la derecha para compensar el creciente flujo externo.
- a) $3.77 \times 10^{-3} \text{ T}$ b) $9.42 \times 10^{-3} \text{ T}$ c) $7.07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
d) $3.99 \times 10^{-6} \text{ Wb}$ e) $1.77 \times 10^{-5} \text{ V}$; la fem inducida promedio es igual a la instantánea en este caso porque la corriente aumenta de manera estable. f) La fem inducida es pequeña, de modo que la corriente en la bobina de 4 espiras y su campo magnético también será pequeña.
- $10.2 \mu\text{V}$

- 13.1 mV
- 2.6 mV
- a) hacia el este b) $4.58 \times 10^{-4} \text{ V}$
- 2.80 m/s
- a) 81.9 mV b) 105 mA
- $1.9 \times 10^{-11} \text{ V}$
- a) 60 V b) 57 V c) 0.13 s
- a) $18.1 \mu\text{V}$ b) 0
- 4.0 mH
- a) 2.0 mH b) 38 A/s
- a) 5.33 A b) 2.67 s c) 8.00 s
- a) 2.4 V b) 75 mH c) 5.1 A d) $\Delta V_R = -1.5 \text{ V}$
e) $\Delta V_L = -0.9 \text{ V}$
- 1.92 V
- a) 0.208 mH b) 0.936 mJ
- a) 18 J b) 7.2 J
- sentido antihorario
- a) $F = N^2 B^2 w^2 v / R$ a la izquierda b) 0 c) $F = N^2 B^2 w^2 v / R$ a la izquierda
- a) 20.0 ms b) 37.9 V c) 1.52 mV d) 51.8 mA
- a) 0.500 A b) 2.00 W c) 2.00 W
- 115 kV
- a) 0.157 mV (el extremo B es positivo) b) 5.89 mV (el extremo A es positivo)
- a) 9.00 A b) 10.8 N c) b está al potencial más alto d) No
- b) Una resistencia mayor haría la corriente menor, por lo que el circuito debe alcanzar una mayor velocidad antes de que la magnitud de la fuerza magnética sea igual a la fuerza de la gravedad. c) La fuerza magnética es proporcional al producto del campo y la corriente, mientras que la corriente es proporcional al campo. Si B se reduce a la mitad, la velocidad debe ser cuatro veces mayor para compensar y producir una fuerza magnética con una magnitud igual a la de la fuerza gravitatoria.

CAPÍTULO 21

Preguntas rápidas

- c)
- b)
- b)
- a)
- a)
- b)
- b), c)
- b), d)

Preguntas de ejemplo

- Falso
- Falso
- Verdadero
- Verdadero
- La potencia promedio será cero si el ángulo de fase es 90° o -90° ; esto es, cuando $R = 0$.
- Falso
- d)
- Sí. Cuando el techo es perpendicular a los rayos del Sol la cantidad de energía interceptada por el techo es un máximo. A otros ángulos la cantidad es menor.
- c)

Preguntas de opción múltiple

- d)
- b)
- a)
- b)
- a)
- e)
- c)
- c) y d)

Preguntas conceptuales

- Diferentes estaciones tienen antenas de transmisión en diferentes lugares. Para una mejor recepción alinee su antena de conojo perpendicular a la trayectoria en línea recta desde el televisor a la antena transmisora. Las señales transmitidas son polarizadas. La dirección de polarización de la onda puede cambiar por la reflexión de las superficies, incluyendo la atmósfera, y a través de la rotación de Kerr, un cambio en el eje de polarización cuando pasa a través de una sustancia orgánica. En su casa, el plano de polarización está determinado por su entorno, por lo que las antenas deben ser ajustadas para alinearse con la polarización de la onda.
- La fuente fundamental de una onda electromagnética es una carga acelerada. Por ejemplo, en una antena transmisora de una estación de radio, las cargas deben moverse arriba y abajo en la frecuencia de la emisora de radio. Estas cargas en movimiento crean campos eléctricos y magnéticos, las ondas electromagnéticas, en el espacio alrededor de la antena.
- a) El destello de la luz de acuerdo con el código Morse es una drástica modulación de amplitud (AM): la amplitud cambia de un máximo a un cero. En este sentido, es similar al código binario encendido-apagado que se usa en las computadoras y discos compactos. b) La frecuencia portadora (carrier) es la de la luz, en el orden de 10^{14} Hz. c) La frecuencia de la señal depende de la habilidad del operador, pero está en el orden de un solo hertz, mientras la luz destella y se apaga. d) La antena de transmisión para esta señal modulada es el filamento de la bombilla en la fuente de la señal. e) La antena receptora es el ojo.
- La vela debe ser tan reflejante como sea posible, de modo que el reflejo de la luz solar transfiera a la vela la máxima cantidad de movimiento.
- No. El alambre emitirá ondas electromagnéticas sólo si la corriente varía en el tiempo. La radiación es el resultado de las cargas en aceleración, lo que sólo puede ocurrir cuando la corriente no es constante.
- Las fotografías creadas utilizando luz infrarroja hacen más brillantes las zonas cálidas de la cara; las fotografías con luz visible captan la luz del entorno principalmente y no son afectadas por la temperatura. En consecuencia, las áreas brillantes con la luz infrarroja no lo serían necesariamente con la luz visible. Las pupilas, por ejemplo, son muy brillantes con luz infrarroja, pero oscuras con luz visible.
- Es mucho más económico transmitir potencia a un alto voltaje que a un bajo voltaje porque la pérdida I^2R en la línea de transmisión es significativamente más baja a alto voltaje. La transmisión de electricidad a alto voltaje permite el uso de transformadores de bajada para poner a disposición del usuario final "bajos" voltajes y altas corrientes.
- La frecuencia resonante está determinada por la inductancia y la capacitancia en el circuito. Si tanto L como C se duplican, la frecuencia resonante se reduce por un factor de dos.

Problemas

- a) 193Ω b) 145Ω
- 14.6 Hz
- 6.76 W
- a) $f > 41.3 \text{ Hz}$ b) $X_C < 87.5 \Omega$
- $4.0 \times 10^2 \text{ Hz}$
- 100 mA
- 3.14 A
- a) 0.042 H b) 942 rad/s
- $0.450 \text{ T} \cdot \text{m}^2$
- a) 0.361 A b) 18.1 V c) 23.9 V d) -53.0°
- a) $1.43 \text{ k}\Omega$ b) 0.0979 A c) 51.1° d) el voltaje adelanta a la corriente
- a) 17.4° b) el voltaje
- 1.88 V
- a) 47.1Ω b) 637Ω c) $2.40 \text{ k}\Omega$ d) $2.33 \text{ k}\Omega$ e) -14.2°
- a) 103 V b) 150 V c) 127 V d) 23.6 V

- a) 208Ω b) 40.0Ω c) 0.541 H
- 8.00 W
- a) $1.8 \times 10^2 \Omega$ b) 0.71 H
- 1.82 pF
- $C_{\text{mín}} = 4.9 \text{ nF}$, $C_{\text{máx}} = 51 \text{ nF}$
- 3.60 kHz
- 721 V
- Se pierde 0.18%
- a) $1.1 \times 10^3 \text{ kW}$ b) $3.1 \times 10^2 \text{ A}$ c) $8.3 \times 10^3 \text{ A}$
- 1000 km ; siempre habrá un mejor uso para el dinero de los impuestos.
- a) $6.30 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ b) La presión atmosférica es 1.60×10^{10} veces mayor que la presión de la radiación.
- $f_{\text{red}} = 4.55 \times 10^{14} \text{ Hz}$, $f_{\text{IR}} = 3.19 \times 10^{14} \text{ Hz}$,
 $E_{\text{máx},f}/E_{\text{máx},i} = 0.57$
- $B_{\text{máx}} = 3.39 \times 10^{-6} \text{ T}$, $E_{\text{máx}} = 1.02 \times 10^3 \text{ V/m}$
- $2.94 \times 10^8 \text{ m/s}$
- a) 6.00 pm b) 7.50 cm
- a) 188 m a 556 m b) 2.78 m a 3.4 m
- $5.2 \times 10^{13} \text{ Hz}$, $5.8 \mu\text{m}$
- $4.29999984 \times 10^{14} \text{ Hz}$; la frecuencia disminuye $1.6 \times 10^7 \text{ Hz}$.
- $5.31 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$
- 1.7 centavos
- 99.6 mH
- a) $6.7 \times 10^{-16} \text{ T}$ b) $5.3 \times 10^{-17} \text{ W/m}^2$ c) $1.7 \times 10^{-14} \text{ W}$
- a) 0.536 N b) $8.93 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ c) 33.9 días

CAPÍTULO 22

Preguntas rápidas

- a)
- Los haces 2 y 4 se reflejan; los haces 3 y 5 se refractan.
- b)
- c)

Preguntas de ejemplo

- a)
- b)
- Falso
- c)
- b)
- b)

Preguntas de opción múltiple

- c)
- e)
- b)
- b)
- c)

Preguntas conceptuales

- El espectro de la luz enviada de nuevo hacia usted desde una gota en la parte superior del arco iris llega de tal manera que la luz roja (desviada en un ángulo de 42°) salta a la vista, mientras que la luz violeta (desviada en un ángulo 40°) pasa por encima de su cabeza. Por lo tanto, la parte superior del arco iris se ve rojo. En la parte inferior del arco iris, el violeta llega a su ojo y la luz roja se desvía hacia el suelo. Por lo tanto, la parte inferior del arco iris aparece violeta.
- $n_a > n_c > n_b$
- Por un lado, una bola cubierta con espejos destella al reflejar la luz de su superficie. Por otra parte, un diamante facetado que se ilumina en la parte superior, refleja dicha luz mediante reflexión interna total en la mitad inferior y la saca a través de la parte superior nuevamente. Debido a su alto índice de refracción, el ángulo crítico para el diamante en aire, para reflexión interna total, a saber $\theta_c = \text{sen}^{-1}(n_{\text{aire}}/n_{\text{diamante}})$, es pequeño.

Por ende, los rayos de luz entran a través de un área grande y salen a través de un área muy pequeña con una intensidad mucho mayor. Cuando un diamante se sumerge en disulfuro de carbono, el ángulo crítico aumenta a $\theta_c = \sin^{-1}(n_{\text{disulfuro de carbono}}/n_{\text{diamante}})$. Como resultado, la luz se emite desde el diamante a través de un área más grande y parece menos intensa.

7. No hay dependencia del ángulo de reflexión en la longitud de onda, porque la luz no entra profundamente en el material durante la reflexión: se refleja de la superficie.
9. El color que viaja más despacio se dobla más. Por lo tanto, X se desplaza más lentamente en el prisma de vidrio.
11. Los rayos de luz procedentes de las partes del lápiz bajo el agua se desvían alejándose de la normal a medida que surgen en el aire por encima. Los rayos penetran en el ojo (o cámara) en ángulo más cercano a la horizontal, por lo que las partes del lápiz bajo el agua aparecen más cerca de la superficie de lo que realmente son, por lo que el lápiz parece doblado.
13. La luz viaja a través del vacío con una velocidad de 3×10^8 m/s. Por lo tanto, la imagen que usted ve de una estrella o galaxia distante debió generarse hace algún tiempo. Por ejemplo, la estrella Altair está a 16 años luz de distancia; si observa una imagen de Altair en la actualidad, sólo sabe cómo se veía Altair hace 16 años. Al principio, esto puede no parecer significativo; sin embargo, los astrónomos que observan otras galaxias pueden tener una idea de cómo se veían las galaxias cuando eran mucho más jóvenes. Por lo tanto, no tiene sentido hablar de “mirar hacia atrás en el tiempo”.

Problemas

1. 3.00×10^8 m/s
3. a) 2.07×10^3 eV b) 4.14 eV
5. a) 2.25×10^8 m/s b) 1.97×10^8 m/s c) 1.24×10^8 m/s
7. a) 29.0° b) 25.7° c) 32.0°
9. 19.5° sobre la horizontal
11. a) 1.52 b) 416 nm c) 4.74×10^{14} Hz d) 1.97×10^8 m/s
13. 110.6°
15. a) 1.56×10^8 m/s b) 329.1 nm c) 4.74×10^{14} Hz
17. cinco veces del espejo derecho y seis veces del espejo izquierdo
19. $\theta = 30.4^\circ$, $\theta' = 22.3^\circ$
21. a) 4.84 cm b) 67.5°
23. b) 4.73 cm
25. $\theta = \tan^{-1}(n_g)$
27. 3.39 m
29. a) $\theta_{\text{azul}} = 47.79^\circ$ b) $\theta_{\text{rojo}} = 48.22^\circ$
31. $\theta_{\text{rojo}} - \theta_{\text{violeta}} = 0.32^\circ$
33. a) $\theta_{1i} = 30^\circ$, $\theta_{1r} = 19^\circ$, $\theta_{2i} = 41^\circ$, $\theta_{2r} = 77^\circ$ b) Primera superficie: $\theta_{\text{reflección}} = 30^\circ$; segunda superficie: $\theta_{\text{reflección}} = 41^\circ$
35. a) 66.1° b) 63.5° c) 59.7°
37. a) 40.8° b) 60.6°
39. 1.414
41. a) 10.7° b) aire c) El sonido que cae sobre la pared desde la mayoría de las direcciones se refleja 100í .
43. 27.5°
45. 22.0°
47. a) 1.07 m b) 1.65 m
49. a) 38.5° b) 1.44
53. 24.7°
55. 1.93
57. a) 1.20 b) 3.39 ns
59. a) 53.1° b) $\theta_1 \geq 38.7^\circ$
61. 15.9°

CAPÍTULO 23

Preguntas rápidas

1. En C
2. c)
3. a) Falso b) Falso c) Verdadero

4. b)
5. Una infinidad
6. a) Falso b) Verdadero c) Falso

Preguntas de ejemplo

1. No
2. b)
3. Verdadero
4. b)
5. a)
6. c)
7. La pantalla debe colocarse a un punto focal de distancia de la lente.
8. No. La amplificación más grande debe ser 1, de modo que una lente divergente no sería una buena lupa.
9. Vertical
10. Sí, es posible que un espejo tenga un objeto virtual. Utilizando el actual sistema de espejos y lentes, coloque el objeto a la derecha de la lente fuera de la distancia focal. La distancia de la imagen se puede hacer tan grande como se desee, moviendo el objeto hacia el punto focal, por lo que en algún momento la imagen de la lente se encuentra a la izquierda del espejo. Esta imagen detrás del espejo forma un objeto virtual para el espejo.

Preguntas de opción múltiple

1. b), c), e)
3. c)
5. d)
7. d), e)
9. c)
11. b)

Preguntas conceptuales

1. No podrá enfocar sus ojos sobre la fotografía y su imagen al mismo tiempo. Para enfocar sobre la fotografía, debe ajustar sus ojos de modo que un objeto a varios centímetros de distancia (la pintura) esté en foco. Por ende, enfoca sobre la superficie del espejo. Pero su imagen en el espejo está tan lejos detrás del espejo como usted lo está enfrente de él. En consecuencia, debe enfocar sus ojos más allá del espejo, el doble de lejos que la fotografía para llevar la imagen a foco.
3. Un solo espejo plano forma una imagen virtual de un objeto debido a dos factores. Primero, los rayos de luz del objeto necesariamente son divergentes del objeto y segundo, la falta de curvatura del espejo plano no pueden convertir los rayos divergentes en rayos convergentes. Si primero se usa otro elemento óptico para convergir los rayos de luz, entonces el espejo plano se puede colocar en la región donde se presentan los rayos convergentes y cambiará la dirección de los rayos de modo que la imagen real se forme en una ubicación diferente. Por ejemplo, si una imagen real se forma mediante una lente convexa y el espejo plano se coloca entre la lente y la posición de la imagen, la imagen formada por el espejo será real.
5. Se produce un efecto similar a un espejismo, excepto que el “espejismo” se ve flotando en el aire. Luces fantasma en el cielo se han visto en los cuerpos de agua por este efecto.
7. Considere los dos árboles como los dos objetos separados. El árbol lejano es un objeto que está más lejos de la lente que el árbol cercano. En consecuencia, la imagen del árbol lejano estará más cerca de la lente que la imagen del árbol cercano. La pantalla debe moverse más cerca de la lente para poner el árbol lejano en foco.
9. Este es un escenario posible. Cuando la luz cruza una frontera entre aire y hielo, refractará en la misma forma que lo hace cuando cruza una frontera de la misma forma entre aire y vidrio. Por lo tanto, una lente convergente puede hacerse de hielo y de vidrio. Sin embargo, el hielo es un retenedor tan fuerte de la radiación infrarroja que es improbable que pueda comenzar un fuego con una lente de hielo pequeña.

11. Si una lente convergente se coloca en un líquido que tenga un índice de refracción mayor que el del material de la lente, la dirección de refracción en las superficies de la lente estará invertida y la lente divergirá la luz. Un espejo sólo depende de la reflexión, que es independiente del material circundante, de modo que un espejo convergente será convergente en cualquier líquido.
13. La longitud focal de un espejo se determina mediante la ley de reflexión de la superficie del espejo. La ley de reflexión es independiente del material del cual esté hecho el espejo y del medio circundante. Por lo tanto, la longitud focal sólo depende del radio de curvatura y no del material. La longitud focal de una lente depende de los índices de refracción del material de la lente y del medio circundante. En consecuencia, la longitud focal de una lente depende del material de la lente.
15. Porque cuando observa АІОНА.ІІВМА en su espejo retrovisor, la aparente inversión de izquierda a derecha claramente muestra el nombre de la AMBULANCIA detrás de usted.

Problemas

1. a) más joven b) en el orden de 10^{-9} s
3. 10.0 pies, 30.0 pies, 40.0 pies
5. a) $p_1 + h$, detrás del espejo inferior b) virtual c) vertical d) 1.00 e) no
7. a) El objeto podría colocarse a 30.0 cm enfrente del espejo b) 0.333
9. a) El objeto está a 10.0 cm delante del espejo b) 2.00
11. 5.00 cm
13. 1.0 m
15. 8.05 cm
17. a) 26.8 cm detrás del espejo b) vertical c) 0.026 8
19. a) cóncavo con longitud focal $f = 0.83$ m b) El objeto debe estar 1.0 m enfrente del espejo.
21. 38.2 cm abajo de la superficie superior del hielo
23. 3.8 mm
25. $n = 2.00$
27. a) La imagen está 0.790 m de la superficie exterior del panel de vidrio, dentro del tanque de agua. b) Con un panel de vidrio de grosor despreciable, la imagen está 0.750 m dentro del tanque. c) Mientras más grueso sea el vidrio, más grande es la distancia entre la imagen final y la superficie exterior del vidrio.
29. 20.0 cm
31. a) 20.0 cm más allá de la lente; real, invertida, $M = -1.00$ b) No se forma imagen. De la lente salen rayos paralelos. c) 10.0 cm enfrente de la lente; virtual, derecha, $M = +2.00$
33. i) a) 13.3 cm enfrente de la lente, b) virtual, c) vertical, d) +0.333 ii) a) 10.0 cm enfrente de la lente, b) virtual, c) vertical, d) +0.500 iii) a) 6.67 cm enfrente de la lente, b) virtual, c) vertical, d) +0.667
35. a) 9.63 cm o 3.27 cm b) 2.10 cm
37. a) 39.0 mm b) 39.5 mm
39. 40.0 cm
41. 30.0 cm a la izquierda de la segunda lente, $M = -3.00$
43. 7.47 cm enfrente de la segunda lente; 1.07 cm; virtual, derecha
45. de 0.224 m a 18.2 m
47. imagen real, 5.71 cm enfrente del espejo
49. a) -34.7 cm b) -36.1 cm
51. 160 cm a la izquierda de la lente, invertida, $M = -0.800$
53. $q = 10.7$ cm
55. a) 32.0 cm a la derecha de la segunda superficie b) imagen real
57. a) 20.0 cm a la derecha de la segunda lente; $M = -6.00$ b) invertida c) 6.67 cm a la derecha de la segunda lente; $M = -2.00$; invertida
59. a) 1.99 b) 10.0 cm a la izquierda de la lente c) invertida
61. a) 5.45 m a la izquierda de la lente b) 8.24 m a la izquierda de la lente c) 17.1 m a la izquierda de la lente d) al rodear la lente con un medio que tenga un índice de refracción mayor que el del material de la lente.
63. a) 263 cm b) 79.0 cm
65. 8.57 cm

CAPÍTULO 24

Preguntas rápidas

1. c)
2. c)
3. c)
4. b)
5. b)
6. El disco compacto

Preguntas de ejemplo

1. Falso
2. La película jabonosa es más gruesa en la región que refleja luz roja.
3. El recubrimiento debe ser más delgado.
4. La longitud de onda es menor en agua que en aire, de modo que la distancia entre bandas oscuras también es menor.
5. Falso
6. Puesto que la longitud de onda se vuelve menor en agua, los ángulos a los primeros máximos se vuelven menores, lo que resulta en un máximo central más pequeño.
7. La separación entre máximos principales será mayor.
8. El polarizador adicional debe formar un ángulo de 90° con respecto al polarizador previo.

Preguntas de opción múltiple

1. d)
3. b)
5. b)
7. c)
9. e)
11. b)

Preguntas conceptuales

1. No verá un patrón de interferencia de los faros del automóvil, por dos razones. La primera es que los faros no son fuentes coherentes y por lo tanto son incapaces de producir interferencia sostenida. Además, los faros están muy separados en comparación con las longitudes de onda emitidas que, incluso si se convirtieran en fuentes coherentes, los máximos y mínimos de interferencia estarían muy cercanamente espaciados para ser observables.
3. El resultado de la doble rendija es redistribuir la energía que llega a la pantalla. Aunque no hay energía en la posición de una franja oscura, hay cuatro veces tanta energía en la posición de una franja brillante como la hay sólo con una sola rendija estrecha. La cantidad de energía total que llega a la pantalla es el doble de la que llega con una sola rendija, como debe ser de acuerdo con la ley de conservación de la energía.
5. Uno de los materiales tiene un mayor índice de refracción que el agua, y el otro tiene un índice más bajo. El material con el índice más alto aparecerá negro conforme se aproxime a grosor cero. Habrá un cambio de fase de 180° para la luz reflejada de la superficie superior, mas no tal cambio de fase para la luz reflejada de la superficie inferior, porque el índice de refracción para el agua en el otro lado es menor que el de la película. Por lo tanto, las dos reflexiones estarán fuera de fase e interferirán de manera destructiva. El material con índice de refracción más bajo que el agua tendrá un cambio de fase para la luz reflejada de las superficies superior e inferior, de modo que la reflexión de la película de grosor cero de nuevo estará en fase y la película parecerá brillante.
7. Puesto que la luz que se refleja en la superficie inferior de la película experimenta un cambio de fase de 180° , mientras que la luz reflejada de la superficie superior de la película no experimenta tal cambio, la mancha central (donde la película tiene grosor casi cero) será oscura. Si los anillos observados no son circulares, la superficie curva de la lente no tiene una verdadera forma esférica.

9. Para comunicación regional en la superficie de la Tierra, las ondas de radio por lo general se transmiten de corrientes oscilatorias en altas torres verticales. La luz se origina de las vibraciones de los átomos o transiciones electrónicas dentro de los átomos, lo que representa oscilaciones en todas las direcciones posibles. Por ende, la luz por lo general no está polarizada.
11. Sí. Para hacer esto, primero mida la reflectividad del radar del metal de su avión. Luego elija un material ligero y duradero que tenga aproximadamente la mitad de la reflectividad de radar del metal en su avión. Mida su índice de refracción y coloque en el metal un recubrimiento igual en grosor a un cuarto de 3 cm, dividido por dicho índice. Venda el avión rápidamente y luego puede vender al supuesto enemigo nuevos radares que operen a 1.5 cm, que el metal recubierto reflejará con extra-alta eficiencia.
13. Si quiere realizar un experimento de interferencia, necesita luz coherente monocromática. Para obtenerla, primero debe pasar luz de una fuente ordinaria a través de un prisma o rejilla de difracción para dispersar diferentes colores en diferentes direcciones. Use una sola rendija estrecha, seleccione un solo color y haga que la luz se difracte para cubrir ambas rendijas para un experimento de Young. El procedimiento es mucho más simple con un láser porque su salida ya es monocromática y coherente.

Problemas

1. 632 nm
3. a) 2.6 mm b) 2.62 mm
5. a) 36.2° b) 5.08 cm c) 5.08×10^{14} Hz
7. a) 55.7 m b) 124 m
9. 662 nm
11. 11.3 m
13. 148 m
15. 75.0 m
17. 85.4 nm
19. 511 nm
21. 0.500 cm
23. a) 238 nm b) λ aumentará c) 328 nm
25. $78.4 \mu\text{m}$
27. $4.75 \mu\text{m}$
29. 617 nm, 441 nm, 343 nm
31. a) 8.10 mm b) 4.05 mm
33. a) 1.1 m b) 1.7 mm
35. 462 nm
37. 1.20 mm, 1.20 mm
39. a) 479 nm, 647 nm, 698 nm b) 20.5° , 28.3° , 30.7°
41. 5.91° en primer orden; 13.2° en segundo orden, y 26.5° en tercer orden
43. $1.81 \mu\text{m}$
45. 514 nm
47. 9.17 cm
49. a) 3.53×10^3 surcos/cm b) 11 máximos
51. a) 1.11 b) 42.0°
53. a) 56.7° b) 48.8°
55. a) 55.6° b) 34.4°
59. 6.89 unidades
61. a) 413.7 nm, 409.7 nm b) 8.6°
63. Una rendija de 0.12 mm de ancho. El máximo central es el doble del ancho de los otros máximos.
65. 0.156 mm
67. 2.50 mm
69. a) 16.6 m b) 8.28 m
71. 127 m
73. 0.350 mm

CAPÍTULO 25

Preguntas rápidas

1. c)
2. a)

Preguntas ejemplo

1. Verdadero
2. Verdadero
3. Una longitud focal más pequeña proporciona una mayor amplificación y se debe seleccionar
4. Verdadero
5. Sí. Aumentar la longitud focal del espejo aumenta la amplificación. Aumentar la longitud focal del ocular disminuye la amplificación.
6. Ojos más espaciados aumentan el poder de resolución visual al aumentar efectivamente el tamaño de apertura, D , en la ecuación 25.10. En consecuencia, el ángulo de resolución limitante disminuye, lo que significa poder resolver detalles más finos de objetos distantes.
7. La resolución es mejor en el extremo violeta del espectro visible.
8. Verdadero

Preguntas de opción múltiple

1. c)
3. c)
5. c)
7. d)
9. b)
11. c)

Preguntas conceptuales

1. El observador *no* usa la lente como un amplificador simple. Para que una lente se use como amplificador simple, la distancia del objeto debe ser menor que la longitud focal de la lente. Además, un amplificador simple produce una imagen virtual en el punto cercano normal del ojo o a una distancia de imagen de aproximadamente $q = -25$ cm. Con una gran distancia de objeto y una distancia de imagen relativamente corta, la magnitud de la amplificación por la lente sería considerablemente menor que uno. Muy probablemente, la lente en este ejemplo es parte de una combinación de lentes que se utilice como telescopio.
3. La imagen formada en la retina por el cristalino y la córnea ya está invertida.
5. Para que una lente opere como una lupa simple, el objeto debe ser ubicado dentro del punto focal de la lente. Si la potencia de la lente es +20.0 dioptrías, su distancia focal es

$$f = (1.00 \text{ m})/P = (1.00 \text{ m})/+20.0 = 0.0500 \text{ m} = 5.00 \text{ cm}$$
 El objeto se debe colocar un poco menos de 5.00 cm por delante de la lente.
7. Quiere una imagen real formada en el lugar del papel. Para formar una imagen así, la distancia del objeto debe ser mayor que la longitud focal de la lente.
9. Para que alguien vea un objeto a través de un microscopio, la longitud de onda de la luz en el microscopio debe ser menor que el tamaño del objeto. Un átomo es mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz en el espectro visible, de modo que un átomo nunca se puede ver con el uso de luz visible.
11. hipermétrope; convergente
13. a) El patrón de difracción de un cabello es el mismo que el patrón de difracción producido por una rendija de la misma anchura. b) El máximo central está flanqueado por mínimos. Mida la anchura $2y$ del máximo central entre las cotas mínimas. Debido a que el ángulo es pequeño, puede utilizar

$$\text{sen } \theta_{\text{osc.}} \approx \tan \theta_{\text{osc.}}$$

$$m\lambda/a \approx y/L$$
 para encontrar el ancho de uno de los cabellos.

Problemas

1. 7.0
3. 177 m
5. $f/1.4$
7. 8.0
9. a) 42.9 cm b) +2.33 dioptrías
11. 23.2 cm
13. a) -2.00 dioptrías b) 17.6 cm
15. +17.0 dioptrías
17. -2.50 dioptrías, una lente divergente
19. a) 5.8 cm b) $m = 4.3$
21. a) 4.07 cm b) $m = +7.14$
23. a) $|M| = 1.22$ b) $\theta/\theta_0 = 6.08$
25. 2.1 cm
27. 12.7
29. 3.38 min
31. a) 2.53 cm b) 88.5 cm
33. b) $-fh/p$ c) -1.07 mm
35. a) 1.50 b) 1.9
37. 492 km
39. 0.40 μrad
41. 5.40 mm
43. 9.8 km
45. No. Se necesita un poder de resolución de 2.0×10^5 , y sólo hay disponibles 1.8×10^5 .
47. 1.31×10^3
49. 50.4 μm
51. 40
53. a) 8.00×10^2 b) La imagen es invertida.
55. 15.4
57. a) +2.67 dioptrías b) 0.16 dioptría muy baja
59. a) +44.6 dioptrías b) 3.03 dioptrías
61. a) $m = 4.0$ b) $m = 3.0$

CAPÍTULO 26

Preguntas rápidas

1. Falso: la velocidad de la luz es c para todos los observadores.
2. a)
3. Falso
4. No. Desde su perspectiva usted está en reposo con respecto a la cabina, de modo que se medirá a usted mismo como poseedor de su longitud normal, y requerirá una cabina de tamaño normal.
5. i) a), e); ii) a), e)
6. Falso
7. a) Falso b) Falso c) Verdadero d) Falso

Preguntas de ejemplo

1. 9.61 s
2. c)
3. a)
4. $-0.946c$
5. a)
6. Muy poco de la masa se convierte en otras formas de energía en dichas reacciones, porque el número total de neutrones y protones no cambia. La energía liberada sólo es la energía asociada con sus interacciones.

Preguntas de opción múltiple

1. d), e)
3. b), c)
5. c)
7. e)
9. d)
11. b)

Preguntas conceptuales

1. Un elipsoide. La dimensión en la dirección de movimiento medirá menos que D .
3. No. El principio de relatividad implica que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz en el *vacío*, que es igual a 3.00×10^8 m/s.
5. A medida que el objeto se aproxima a la velocidad de la luz, su energía cinética aumenta sin límite. Se necesitaría una inversión infinita de trabajo para acelerar el objeto a la velocidad de la luz.
7. Para una maravillosa exploración ficticia de esta cuestión, consiga un libro de "Mr. Tompkins" de George Gamow. Todos los efectos relativistas serían obvios en su vida. Ocurrirían la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud. Para llegar rápido a casa, usted pisaría el acelerador no para aumentar tu velocidad, sino para acortar los bloques. Grandes corrimientos Doppler en las frecuencias de las ondas harían que las luces rojas parecieran verdes conforme se aproxime a ellas y harían inútiles las sirenas y los radios. La transportación a alta velocidad sería muy costosa, pues requeriría enormes compras de combustible, así como peligrosas, pues un auto en aceleración podría derribar un edificio. Cuando llegara a casa, hambriento, descubriría que perdió la cena; habría una demora de cinco días en el tránsito cuando observara un programa de televisión en vivo originado en Australia. Finalmente, no podría ver la Vía Láctea, pues la bola de fuego del Big Bang lo rodearía a la distancia de Rigel o Deneb.
9. Un fotón transporta energía. La equivalencia relativista de masa y energía significa que es suficiente para darle cantidad de movimiento.
11. Supongamos que un tren se está moviendo más allá de usted. Una manera de medir su longitud es la siguiente: marcar las pistas del quita vacas que forman la parte delantera de la máquina en movimiento a las 9:00:00 a.m., mientras que al mismo tiempo, su asistente marca las pistas en la parte posterior del furgón de cola. A continuación, encuentre la distancia entre las marcas en las pistas con una cinta métrica. Usted y su asistente deben hacer las marcas de forma simultánea en el marco de referencia, de lo contrario, el movimiento del tren hará su longitud diferente de la distancia entre las marcas.

Problemas

1. a) 1.38 años b) 1.31 años luz
3. $0.103c$
5. a) 1.3×10^{-7} s b) 38 m c) 7.6 m
7. a) 1.55×10^{-5} s b) 7.09 c) 2.19×10^{-6} s d) 649 m
e) Desde el punto de vista del tercer observador, el muón viaja más rápido, así que, de acuerdo con el tercer observador, la vida del muón es más larga que la medida por el observador en reposo con respecto a Tierra.
9. $0.950c$
11. Sí, con 19 m para dispersar
13. a) $\frac{2\sqrt{2}}{3}c = 0.943c = 2.83 \times 10^8$ m/s b) el resultado puede ser igual.
15. $0.285c$
17. $0.54c$ hacia la derecha
19. $0.357c$
21. $0.998c$ hacia la derecha
23. a) $0.999997c$ b) 3.74×10^5 MeV
25. $0.786c$
27. a) 8.65×10^{22} J b) 9.61×10^5 kg
31. a) 3.91×10^4 b) 7.67 cm
33. a) $0.979c$ b) $0.0652c$ c) $0.914c$
35. $0.917c$
37. a) $v/c = 1 - 1.13 \times 10^{-10}$ b) 5.99×10^{27} J
c) $\$2.16 \times 10^{20}$
39. a) $0.800c$ b) 7.50×10^3 s c) 1.44×10^{12} m d) $0.385c$

41. $0.80c$
 43. a) $v = 0.141c$ b) $v = 0.436c$
 45. a) $7.0 \mu\text{s}$ b) 1.1×10^4 muones
 47. 5.5 años; Valento es más viejo
 49. a) 17.4 m b) 3.30° con respecto a la dirección de movimiento

CAPÍTULO 27

Preguntas rápidas

- Verdadero
- b)
- c)
- Falso
- c)

Preguntas de ejemplo

- Falso
- Falso
- Parte de la energía del fotón se transfiere al electrón.
- Duplicar la velocidad de una partícula duplica su cantidad de movimiento, lo que reduce la longitud de onda de la partícula por un factor de un medio. Esta respuesta ya no es cierta cuando la velocidad duplicada es relativista.
- Verdadero

Preguntas de opción múltiple

- b)
- b)
- a) y c)
- e)
- b)
- a)

Preguntas conceptuales

- La forma de un objeto normalmente se determina al observar la luz que se refleja de su superficie. En un horno, el objeto estará muy caliente y brillará rojo. La radiación emitida es mucho más intensa que la radiación reflejada y la radiación térmica emitida sólo es ligeramente dependiente del material del que está hecho el objeto. A diferencia de la luz reflejada, la luz emitida llega de todas las superficies con igual intensidad, de modo que el contraste se pierde y la forma del objeto es más difícil de distinguir.
- La “negritud” de un cuerpo negro se refiere a su propiedad ideal de absorber toda la radiación que incide sobre él. Si un objeto a temperatura ambiente que usted observa en la vida cotidiana absorbe toda la radiación, lo describe como (visiblemente) negro. Sin embargo, la apariencia negra se debe al hecho de que los ojos son sensibles sólo a luz visible. Si pudiera detectar luz infrarroja con sus ojos, vería el objeto que emite radiación. Si la temperatura del cuerpo negro se eleva, la ley de Wien dice que la radiación emitida se moverá hacia el rango visible del espectro. Por lo tanto, el cuerpo negro podría parecer rojo, blanco o azul, dependiendo de su temperatura.
- Todos los objetos radian energía, pero a temperatura ambiente esta energía principalmente está en la región infrarroja del espectro electromagnético, que los ojos no pueden detectar. (Las serpientes de cuevas tienen órganos sensoriales que son sensibles a la radiación infrarroja; por ende, pueden buscar a sus presas de sangre caliente en lo que se consideraría oscuridad absoluta.)
- La luz de mayor frecuencia se puede representar como un torrente de fotones de mayor energía. En una colisión, un fotón puede ceder toda su energía a un solo electrón. La energía cinética de tal electrón se mide mediante el potencial de frenado. El voltaje inverso (voltaje de frenado) requerido para detener la corriente es proporcional a la frecuencia de la luz entrante. La luz más intensa consiste en más fotones que golpean un área unitaria cada segundo, pero los átomos son tan peque-

ños que un electrón emitido nunca consigue una “patada” de más de un fotón. Aumentar la intensidad de la luz por lo general aumenta el tamaño de la corriente, pero no cambiará la energía de los electrones individuales que expulsa. Por lo tanto, el potencial de frenado permanece constante.

- La teoría ondulatoria predice que el efecto fotoeléctrico debe ocurrir a cualquier frecuencia, siempre que la intensidad de la luz sea suficientemente alta. Sin embargo, como se ve en los experimentos fotoeléctricos, la luz debe tener frecuencia suficientemente alta para que ocurra el efecto.
- a) Los electrones se emiten sólo si la frecuencia del fotón es mayor que la frecuencia de corte.
- No. Suponga que la frecuencia de la luz incidente a la que observa primero el efecto fotoeléctrico está por arriba de la frecuencia de corte del primer metal, pero es menor que la frecuencia de corte del segundo metal. En este caso, el efecto fotoeléctrico no se observaría en absoluto en el segundo metal.
- Un electrón tiene las características clásicas de onda y de partícula. En la difracción de una y de doble rendija y los experimentos de interferencia, los electrones se comportan como ondas clásicas. Un electrón tiene masa y carga. Lleva la energía cinética y el momento en lotes de tamaño definido, como hacen las partículas clásicas. Al mismo tiempo, tiene una longitud de onda y frecuencia. A pesar de que un electrón presenta las características clásicas de onda y partícula, no es una onda, ni una partícula clásicas. Se acostumbra a llamar una partícula cuántica, pero otro término inventado en 1920, como “wavicle” (una mezcla de *wave*-onda- y *particle*-partícula-) podría servir igual de bien.

Problemas

- a) $\approx 3\,000\text{ K}$ b) $\approx 20\,000\text{ K}$
- $9.47\ \mu\text{m}$, el cual está en la región infrarroja del espectro
- a) $2.49 \times 10^{-5}\text{ eV}$ b) 2.49 eV c) 249 eV
- a) 2.57 eV b) $1.28 \times 10^{-5}\text{ eV}$ c) $1.91 \times 10^{-7}\text{ eV}$
- a) 2.24 eV b) 555 nm c) $5.41 \times 10^{14}\text{ Hz}$
- a) $1.02 \times 10^{-18}\text{ J}$ b) $1.53 \times 10^{15}\text{ Hz}$ c) 196 nm
d) 2.15 eV e) 2.15 V
- $4.8 \times 10^{14}\text{ Hz}$, 2.0 eV
- $1.2 \times 10^2\text{ V}$ y $1.2 \times 10^7\text{ V}$, respectivamente
- 17.8 kV
- 0.078 nm
- 0.281 nm
- 70.0°
- a) $1.18 \times 10^{-23}\text{ kg} \cdot \text{m/s}$ b) 478 eV
- a) 1.46 km/s b) $7.28 \times 10^{-11}\text{ m}$
- $3.58 \times 10^{-13}\text{ m}$
- a) 15 keV b) $1.2 \times 10^2\text{ keV}$
- $\sim 10^6\text{ m/s}$
- Dentro de 1.16 mm para el electrón, $5.28 \times 10^{-32}\text{ m}$ para la bala
- $3 \times 10^{-29}\text{ J}$
- a) $2.21 \times 10^{-32}\text{ kg} \cdot \text{m/s}$ b) $1.00 \times 10^{10}\text{ Hz}$
c) $4.14 \times 10^{-5}\text{ eV}$
- 2.5×10^{20} fotones
- a) $5\,200\text{ K}$ b) claramente, una luciérnaga no está a dicha temperatura, de modo que esta no puede ser radiación de cuerpo negro.
- 1.36 eV
- 2.00 eV
- a) $0.022\,0c$ b) $0.999\,2c$

CAPÍTULO 28

Preguntas rápidas

- b)
- a) 5 b) 9 c) 25
- d)

Preguntas de ejemplo

1. La energía asociada con el número cuántico n aumenta con el número cuántico m creciente y tiende a cero en el límite de n arbitrariamente grande. Por tanto, una transición de un nivel de energía muy alto al estado base resulta en la emisión de fotones que se aproximan a una energía de 13.6 eV, la misma que la energía de ionización.
2. La diferencia de energía en el átomo de helio será cuatro veces la de la misma transición en hidrógeno. Los niveles de energía en los átomos hidrogenoides son proporcionales a Z^2 , donde Z es el número atómico.
3. Los números cuánticos n y ℓ nunca son negativos.
4. No. La capa M está a una mayor energía; por lo tanto, las transiciones de la capa M a la capa K siempre resultarán en más fotones energéticos que cualquier transición de la capa L a la capa K.

Preguntas de opción múltiple

1. b)
3. e)
5. c)
7. c)
9. c)
11. a)
13. c)

Preguntas conceptuales

1. Si la energía del átomo de hidrógeno fuese proporcional a n (o cualquier potencia de n), entonces la energía se volvería infinita conforme n crece al infinito. Pero la energía del átomo es inversamente proporcional a n^2 . Por ende, conforme n crece al infinito, la energía del átomo tiende a un valor que está por arriba del estado base por una cantidad finita, a saber, la energía de ionización 13.6 eV. Conforme el electrón cae de un estado enlazado a otro, su pérdida de energía siempre es menor que la energía de ionización. La energía y la frecuencia de cualquier fotón emitido son finitos.
3. Los rayos X característicos se originan de transiciones dentro de los átomos del blanco, tal que un electrón de la capa L realiza una transición a una vacante en la capa K. La vacante se provoca cuando un electrón acelerado en el tubo de rayos X suministra energía al electrón de la capa K para expulsarlo del átomo. Si la energía de los electrones bombarderos aumentara, el electrón de la capa K se expulsará del átomo con más energía cinética restante. Pero la diferencia de energía entre las capas K y L no cambia, de modo que el rayo X emitido tiene exactamente la misma longitud de onda.
5. Es posible un espectro continuo sin rayos X característicos. A una baja diferencia de potencial aceleradora, posiblemente el electrón no tenga suficiente energía para expulsar un electrón de un átomo blanco. Como resultado, no habrá rayos X característicos. El cambio en rapidez del electrón conforme ingresa al blanco resultará en el espectro continuo.
7. El holograma es un patrón de interferencia entre la luz que se dispersa del objeto y el haz de referencia. Si algo se mueve una distancia comparable a la longitud de onda de la luz (o más), el patrón se deslazará. El efecto es como si se pusieran a vibrar las rendijas en el experimento de Young, lo que haría que las franjas de interferencia vibraran salvajemente, de modo que una fotografía de la pantalla sólo mostraría la intensidad promedio en todas partes.
9. Si el principio de exclusión de Pauli no fuese válido, los elementos y su comportamiento químico serían enormemente diferentes, pues todo electrón terminaría en el nivel de energía más bajo del átomo. En consecuencia, toda la materia sería casi parecida en su química y composición, pues las estructuras de capas de cada elemento serían idénticas. La mayoría de los materiales tendría una densidad mucho mayor y los espectros de los átomos y moléculas serían muy simples, lo que resultaría en la existencia de menos color en el mundo.

11. Los tres elementos tienen configuraciones electrónicas similares, con capas interiores llenas más un solo electrón en un orbital s . Dado que los átomos por lo general interactúan a través de sus capas exteriores no llenas y puesto que las capas exteriores de dichos átomos son similares, las interacciones químicas de los tres átomos serían similares.
13. Cada uno de los ocho electrones debe tener al menos un número cuántico diferente de cada uno de los otros. Pueden diferir (en m_s) por ser espín arriba o espín abajo. Pueden diferir (en ℓ) en cantidad de movimiento angular y en la forma general de la función de onda. Aquellos electrones con $\ell = 1$ pueden diferir (en m_ℓ) en orientación de la cantidad de movimiento angular.
15. La emisión estimulada es la razón por la que la luz láser es coherente y tiende a viajar en un haz paralelo bien definido. Cuando un fotón que pasa por un átomo excitado estimula dicho átomo para emitir un fotón, el fotón emitido está en fase con el fotón original y viaja en la misma dirección. Conforme este proceso se repite muchas veces, se produce un intenso haz paralelo de luz coherente. Sin emisión estimulada, los átomos excitados regresarían al estado base al emitir fotones en momentos aleatorios y en direcciones aleatorias. La luz resultante no tendría las útiles propiedades de la luz láser.

Problemas

1. a) 121.5 nm, 102.5 nm, 97.20 nm b) Ultravioleta lejano
3. a) 2.3×10^{-8} N b) -14 eV
5. a) 1.6×10^6 m/s b) No. $v/c = 5.3 \times 10^{-3} \ll 1$
c) 0.45 nm d) Sí. La longitud de onda es aproximadamente del mismo tamaño que el átomo.
7. a) 0.212 nm b) 9.95×10^{-25} kg · m/s c) 2.11×10^{-34} J · s
d) 3.40 eV e) -6.80 eV f) -3.40 eV
11. $E = -1.51$ eV ($n = 3$) a $E = -3.40$ eV ($n = 2$)
13. a) 2.86 eV b) 0.472 eV
15. a) 1.89 eV b) 658 nm c) 3.02 eV d) 412 nm
e) 366 nm
17. a) 488 nm b) 0.814 m/s
19. a) 3 b) 520 km/s
21. a) 0.476 nm b) 0.997 nm
23. a) 0.026 5 nm b) 0.017 6 nm c) 0.013 2 nm
25. a) 1.31 μ m b) 164 nm

n	ℓ	m_ℓ	m_s
3	2	2	$\frac{1}{2}$
3	2	2	$-\frac{1}{2}$
3	2	1	$\frac{1}{2}$
3	2	1	$-\frac{1}{2}$
3	2	0	$\frac{1}{2}$
3	2	0	$-\frac{1}{2}$
3	2	-1	$\frac{1}{2}$
3	2	-1	$-\frac{1}{2}$
3	2	-2	$\frac{1}{2}$
3	2	-2	$-\frac{1}{2}$

29. Quince posibles estados, como se resume en la tabla siguiente:

n	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ℓ	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
m_ℓ	2	2	2	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-2
m_s	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0

31. aluminio
33. a) $n = 4$ y $\ell = 2$ b) $m_\ell = (0, \pm 1, \pm 2)$, $m_s = \pm 1/2$
c) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{25} 5s^2 = [\text{Kr}] 4d^{25} 5s^2$
35. a) 14 keV b) 8.9×10^{-11} m
37. Capa L: 11.7 keV; capa M: 10.0 keV; capa N: 2.30 keV
39. a) 10.2 eV b) 7.88×10^4 K
41. a) 5.40 keV b) 3.40 eV c) 5.40 keV
43. a) 4.24×10^{15} W/m² b) 1.20×10^{-12} J

CAPÍTULO 29

Preguntas rápidas

1. Falso
2. c)
3. c)
4. a) y b)
5. b)

Preguntas de ejemplo

1. El tritio tiene la mayor energía de enlace. A diferencia del tritio, el helio tiene dos protones que ejercen una fuerza electrostática repulsiva mutua. En consecuencia, el núcleo de helio-3 no está tan firmemente enlazado como el núcleo de tritio.
2. Duplicar la masa inicial del material radiactivo duplica la actividad inicial. Duplicar la masa no tiene efecto sobre la vida media.
3. $7.794 \times 10^{-13} \text{ J}$, $4.60 \times 10^{11} \text{ J}$
4. La energía de enlace del carbono-14 debe ser mayor que el nitrógeno-14 porque el nitrógeno tiene más protones en su núcleo. La repulsión mutua de los protones significa que el núcleo de nitrógeno requeriría menos energía para romper que el núcleo de carbono.
5. No
6. Las reacciones entre helio y berilio se pueden encontrar en el Sol.

Preguntas de opción múltiple

1. d)
3. e)
5. c)
7. a)
9. c), e)
11. b)

Preguntas conceptuales

1. Una partícula alfa contiene dos protones y dos neutrones. Puesto que el núcleo de hidrógeno sólo contiene un protón, no puede emitir una partícula alfa.
3. Los isótopos de un elemento dado corresponden a núcleos con diferente número de neutrones. Esto resultará en una variedad de diferentes propiedades físicas para los núcleos, incluidos obviamente los de masa. Sin embargo, el comportamiento químico está gobernado por los electrones del elemento. Todos los isótopos de un elemento dado tienen el mismo número de electrones y por lo tanto el mismo comportamiento químico.
5. El núcleo Y será más inestable. El núcleo con la mayor energía de unión requiere más energía para ser separado en sus partes constituyentes y tiene menos energía disponible para liberar en un decaimiento.
7. En el decaimiento alfa, sólo hay dos partículas finales: la partícula alfa y el núcleo hijo. También existen dos principios de conservación: de energía y de cantidad de movimiento. Como resultado, la partícula alfa debe expulsarse con una energía discreta para satisfacer ambos principios de conservación. Sin embargo, el decaimiento beta es un decaimiento de tres partículas: la partícula beta, el neutrino (o antineutrón) y el núcleo hijo. Como resultado, la energía y la cantidad de movimiento se pueden compartir en varias formas entre las tres partículas mientras satisfagan los dos principios de conservación. Esto permite un rango continuo de energías para la partícula beta.
11. La mayor energía en reposo del neutrón significa que un protón libre en el espacio no decaerá espontáneamente en un neutrón y un positrón. No obstante, cuando el protón está en el núcleo, la pregunta importante es la de la energía en reposo total del núcleo. Si es energéticamente favorable que el núcleo tenga un protón menos y un neutrón más, entonces ocurrirá el proceso de decaimiento para lograr esta menor energía.

13. La datación con carbono por lo general no se puede usar para estimar la edad de una piedra, porque la piedra no estaba viva para captar carbono del entorno. La datación con carbono sólo se puede usar para estimar la edad de los objetos que alguna vez estuvieron vivos.

Problemas

1. a) 1.5 fm b) 4.7 fm c) 7.0 fm d) 7.4 fm
3. $1.8 \times 10^2 \text{ m}$
5. a) 27.6 N b) $4.16 \times 10^{27} \text{ m/s}^2$ c) 1.73 MeV
7. a) $1.9 \times 10^7 \text{ m/s}$ b) 7.1 MeV
9. a) 8.26 MeV/nucleón b) 8.70 MeV/nucleón
11. 3.54 MeV
13. a) 0.210 MeV/nucleón mayor para $^{23}_{11}\text{Na}$ b) atribuible a menos repulsión de protones
15. 2.29 g
17. a) $6.95 \times 10^5 \text{ s}$ b) $9.97 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ c) 1.9×10^4 decaimiento /s d) 1.9×10^{10} núcleos e) 5, 0.200 mCi
19. 8.06 días
21. a) $5.58 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$, 12.4 h b) 2.39×10^{13} núcleos c) 1.9 mCi
23. a) $^{208}_{81}\text{Tl}$ b) $^{95}_{37}\text{Rb}$ c) $^{144}_{60}\text{Nd}$
25. decaimiento $e^+ \text{ } ^{56}_{27}\text{Co} \rightarrow \text{}^{56}_{26}\text{Fe} + e^+ + \nu$
27. a) no puede ocurrir espontáneamente b) puede ocurrir espontáneamente
29. 18.6 keV
31. 4.22×10^3 años
33. a) $^{21}_{10}\text{Ne}$ b) $^{144}_{54}\text{Xe}$ c) $X = e^+$, $X' = \nu$
35. a) $^{13}_6\text{C}$ b) $^{10}_5\text{B}$
37. a) $^{197}_{79}\text{Au} + n \rightarrow \text{}^{198}_{80}\text{Hg} + e^- + \bar{\nu}$ b) 7.89 MeV
39. a) El producto del núcleo es $^{19}_9\text{B}$. b) -2.79 MeV
41. 18.8 J
43. 24 d
45. a) 8.97×10^{11} electrones b) 0.100 J c) 100 rad
47. a) $3.18 \times 10^{-7} \text{ mol}$ b) 1.91×10^{17} núcleos c) $1.08 \times 10^{14} \text{ Bq}$ d) $8.92 \times 10^6 \text{ Bq}$
49. 46.5 d
51. a) 4.0×10^9 años b) No podría ser más vieja. c) La roca podría ser más joven si algo de ^{87}Sr estuviera presente inicialmente.
53. $54 \mu\text{Ci}$
55. 5.9 miles de millones de años

CAPÍTULO 30

Preguntas rápidas

1. a)
2. b)

Preguntas de ejemplo

1. 1 mg/años
2. $1.77 \times 10^{12} \text{ J}$
3. Verdadero
4. No. Dicha reacción viola la conservación del número bariónico.

Preguntas de opción múltiple

1. d)
3. b)
5. d)
7. b)
9. c) y d)
11. a), c) y d)

Preguntas conceptuales

1. El experimento descrito es una buena analogía del experimento de dispersión de Rutherford. En el experimento de Rutherford, de los átomos se dispersaban partículas alfa y la dispersión era consistente con una pequeña estructura en el átomo que contenía la carga positiva.

3. La mayor carga de quark es $2e/3$, de modo que una combinación de sólo dos partículas, un quark y un antiquark que forman un mesón, podría no tener una carga eléctrica de $+2e$. Sólo las partículas que contienen tres quarks, cada una con una carga de $2e/3$, pueden combinarse para producir una carga total de $2e$.
5. Hasta aproximadamente 700 000 años después del Big Bang, la temperatura del Universo era lo suficientemente alta como para que cualquier átomo formado se ionizara con radiación ambiente. Una vez que la energía de radiación promedio cayó por debajo de la energía de ionización del hidrógeno, de 13.6 eV, los átomos de hidrógeno se pudieron formar y permanecer como átomos neutros durante un periodo relativamente largo.
7. En el modelo de quarks, todos los hadrones están compuestos de unidades más pequeñas llamadas quarks. Los quarks tienen una carga eléctrica fraccional y un número bariónico de $1/3$. Existen seis "sabores" de quarks: arriba (u), abajo (d), extraño (s), encanto (c), cima (t) y fondo (b). Todos los bariones contienen tres quarks y todos los mesones contienen un quark y un antiquark. La sección 30.12 tiene una discusión más detallada del modelo de quarks.
9. Bariones y mesones son hadrones, e interactúan principalmente a través de la fuerza fuerte. No son partículas elementales, pues están compuestos de o tres quarks (bariones) o un quark y un antiquark (mesones). Los bariones tienen un número bariónico distinto de cero con espín $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{2}$. Los mesones tienen un número bariónico de cero y un espín 0 o 1.
11. Todas las partículas estables distintas de protones y neutrones tienen número bariónico cero. Dado que el número bariónico debe conservarse, y los estados finales del decaimiento de kaón no contienen protones o neutrones, el número bariónico de todos los kaones debe ser *cero*.
13. Los reactores de fisión no emiten gases de efecto invernadero como subproductos de la quema de combustibles fósiles, el único medio ambiental necesario de descarga es el calor. Los costos involucrados en la producción de material fisible es comparable con el costo de bombeo, transporte y refinación de combustibles fósiles. El costo por kilovatio hora de energía nuclear es menor que la de carbón, y mucho menos que la de petróleo o de agas, que con el tiempo es mayor que los costos de las centrales nucleares. Además, el combustible nuclear gastado se puede reciclar en reactores, mientras que cuando los combustibles fósiles se agotan, los residuos vierten en la atmósfera. Finalmente, las reservas mundiales de uranio, si se usa en los reactores, tendrán una duración mucho más larga que el suministro mundial de combustibles fósiles.

La desventaja es que algunos de los productos de una reacción de fisión son radiactivos y algunos de ellos tienen vida

media larga. Habrá un punto en el que se gasta el combustible suficiente para que las barras de combustible no suministren energía económica y deben ser reemplazados o reciclados. Las barras de combustible siguen siendo radiactivas después de la eliminación. Tanto los residuos y las barras de combustible "gastado" representan serios riesgos de salud y ambientales que pueden durar decenas de miles de años, si no se manejan adecuadamente o son reciclados en los reactores productores. Los riesgos ambientales de los residuos de los reactores nucleares son probablemente mucho menores que los debidos a la quema de combustibles fósiles.

Problemas

1. 1.1×10^{16} fisiones
3. 126 MeV
5. a) 16.2 kg b) 117 g
7. a) $3/a$ b) $3.72/a$ c) La relación superficie-volumen es más baja en la esfera, por lo tanto, la esfera tiene la mejor forma para que las fugas sean mínimas.
9. 1.01 g
11. a) ${}^4_8\text{Be}$ b) ${}^{12}_6\text{C}$ c) 7.27 MeV
13. 4.03 MeV
15. 14.1 MeV
17. a) 4.53×10^{23} Hz b) 0.662 fm
19. 67.5 MeV, $67.5 \text{ MeV}/c$, 1.63×10^{22} Hz
21. a) conservación de número leptónico electrónico y conservación de número leptónico muónico b) conservación de carga c) conservación de número bariónico d) conservación de número bariónico e) conservación de carga
23. a) viola la conservación del número bariónico (no permitido). b) Esta reacción puede ocurrir a través de la interacción fuerte. c) Esta reacción puede ocurrir a través de la interacción débil solamente. d) Esta reacción se puede producir por la interacción débil solamente. e) Esta reacción puede ocurrir a través de la interacción electromagnética.
25. a) no se conserva b) se conserva c) se conserva d) no conserva e) no se conserva f) no se conserva
27. 3.34×10^{26} electrones, 9.36×10^{26} quarks arriba, 8.70×10^{26} quarks abajo
29. a) Σ^+ b) π^- c) K^0 d) Ξ^-
31. un neutrón, udd
33. 18.8 MeV
35. a) K^+ b) Ξ^0 c) π^0
37. 26
39. b) 12 días
41. 29.8 MeV
43. 3.60×10^{38} protones/s

Nota: Los números de página seguidos de *f* y *t* se refieren a figuras y tablas, respectivamente.

A

- Abejas, navegación en, 847
- Aberración cromática, 814, 814*f*, 816
- Aberraciones esféricas, en vidrio y espejos, 794, 794*f*, 814, 814*f*, 816, 870
- Abertura
circular, resolución de, 872, 872*f*, 878
de la cámara, 814, 860, 860*f*
una sola rendija, resolución de, 871–872, 871*f*, 872*f*, 878
- Absorción estimulada, 949, 949*f*, 951
- Absorción selectiva, polarización de ondas de luz por parte de, 843–845, 843*f*, 844*f*
- AC. Véase *entradas en* Corriente alterna
- Aceite de silicón
constante dieléctrica, 575*t*
en capacitores, 574
rigidez dieléctrica, 575*t*
- Acrílico, índice de refracción, 771*f*
- Actinio (Ac), series radiactivas, 971, 971*t*
- Actividad. Véase también Índice de decaimiento
- Actividad óptica, 847, 847*f*
- Actividad óptica del plástico, 847, 848*f*
- Adenina, 920
- ADN, la estructura de, la determinación, 919–920, 919*f*, 920*f*
- Agua
constante dieléctrica, 575*t*, 578
interferencia, reflexión y difracción en, 826, 826*f*, 828, 828*f*
ondas, color de, 764
índice de refracción, 767*t*
rigidez dieléctrica, 574, 575*t*
- Aislantes
carga inducida en, 516, 517*f*
definición, 515, 539
- Ajuste del circuito de la radio, 736
- Alcohol etílico
índice de refracción, 767*t*
- Aleación de acero, 649
- Alfabeto griego, A.19*t*
- Álgebra, repaso de, A.4–A.12
- Almacenamiento de ácaros (*Lepidoglyphus destructor*), 911*f*
- Alojamiento, 861, 862–863
- Alpher, Ralph, 999*f*
- Altura de la imagen, 791, 815. Véase también Ampliación, lateral
- Altura del objeto, 791, 815. Véase también Ampliación, lateral
- Aluminio (Al)
coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
como conductor, 515
como superconductor, 604, 604*t*
como sustancia paramagnética, 674
configuración de estado base, 946*f*
función de trabajo, 915*t*
resistividad, 598*t*
- Ampère (A), 591, 608
- Ampère, André-Marie, 665, 666*f*
- Amperímetro, 595, 725, 750
- Ampliación máxima angular, 865–866, 877
- Ampliación. Véase también Microscopios, telescopios angular
de la lupa simple, 865–866, 877
del microscopio, 867
del telescopio, 869, 878
convención de signos para, 796*t*
de microscopio, 867, 868
del microscopio compuesto, 877
lateral
de la lente delgada, 806, 816
de la superficie de refracción esférica, 794, 801, 816
de microscopio, 867
del espejo, 791, 815
lupas sencillas, 865–866, 865*f*, 877
- Amplificación angular
de la lupa simple, 865–866, 877
de microscopio, 867
del telescopio, 869, 878
- Amplificación lateral
de espejo, 791, 815
de la lente delgada, 806, 816
de la superficie de refracción esférica, 794, 801, 816
de microscopio, 867
- Analizador, 843*f*, 844, 844*f*
- Anderson, Carl, 990
- Angstrom (Å), 747
- Ángulo(s)
crítico, en la reflexión interna total, 777, 777*f*, 781
- Ángulo crítico, 777, 777*f*, 781
- Ángulo de Brewster, 846
- Ángulo de buzamiento, 650
- Ángulo de desviación (δ), 771, 771*f*
- Ángulo de incidencia
crítico, en la reflexión interna total, 777, 777*f*, 781
en la reflexión, 764, 764*f*, 780
en la refracción, 766, 766*f*
- Ángulo de polarización (θ_p), 845–846, 846*f*, 850
- Ángulo de reflexión, 764, 764*f*, 780
- Ángulo de refracción, 765–766, 766*f*, 768–769, 771, 771*f*, 780
- Anillo dividido, conmutadores, 661, 661*f*, 702, 702*f*
- Anillos de Newton, 831–832 y 831*f*
- Antena, la producción de ondas electromagnéticas, 741–742, 741*f*, 742*f*, 743*f*
- Antilogaritmos, A.10–A.11
- Antimateria, 662, 900
- Antineutrinos, 968, 977
- Antipartículas, 962, 968, 990, 991*t*, 1004
- Antiquarks, 996, 996*t*, 997
- Apertura circular, la resolución de, 872, 872*f*, 878
- Aproximadamente igual (\approx), A.1, A.19*t*
- Arco iris, 761*f*, 774–775, 774*f*
- Área
de formas geométricas comunes, A.12*t*
- Argón (Ar)
como gas noble, 946
configuración del estado base, 946*t*, 947
- Armas de riel, 698–699, 698*f*
- Armas nucleares
bomba atómica, 921*f*, 984, 989*f*
bomba de hidrógeno, 987
- Armónica(s)
y calidad (timbre) de sonido, 500–501, 501*f*
- ARN, la estructura de, la determinación, 919
- Arquitectura
modelos de esfuerzo en, 847, 848*f*
- Astigmatismo, 863
- Astronomía y astrofísica. Véase también Luna; Planetas; Sol; telescopios; Universo; *planetas específicos*
agujero negro, 905
corrimiento cosmológico al rojo, 750
curvatura del espacio-tiempo, 904–905
estrellas
color, 912–913
temperatura de la superficie de las, 912–913
galaxia(s)
centro de, 905
la energía oscura, 1001–1002, 1001*f*
la materia oscura, 1000–1001, 1001*f*
Nebulosa del Cangrejo, 749, 749*f*
preguntas cosmológicas sin respuesta, 1000–1003
púlsares, 258*f*
radiación de microondas de fondo, 1000, 1000*f*, 1004
refracción atmosférica, 804–805, 804*f*
Sistema Solar
polvo en, el tamaño de, 744
teoría del Big Bang, 999–1000, 999*f*, 1004
- Atmósfera. Véase también Aire
refracción de la luz, 804–805, 804*f*
- Átomo(s)
del estado fundamental de configuración, 945, 946*t*
diagrama de energía de nivel, 939, 939*f*
estado cuántico energías, 938–939, 939*f*, 951
mecánica cuántica modelo de, 942–945, 951
modelo de Bohr, 937–941, 937*f*, 938*f*, 939*f*, 951
niveles de energía, 938–939, 939*f*
serie de Balmer, 939–940, 939*f*
- Átomo(s). Véase también Núcleo atómico
absorción estimulada, 949, 949*f*, 951
característica de los rayos X, 947–948, 947*f*, 951
efectos magnéticos producidos por, 673, 673*f*
emisión espontánea, 949, 949*f*, 951
emisión estimulada, 949–950, 950*f*, 951
espectros de absorción de, 935, 936*f*
espectros de emisión de, 935–937, 936*f*
estructura de, 514–515
Bohr modelo de, 937–941, 937*f*, 938*f*, 939*f*, 951

- capas y subcapas, 942, 942*t*, 945, 945*t*, 951
 modelo de la mecánica cuántica, 942–948, 951
 primeros modelos, 934–935 y 935*f*
 principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945*t*, 951
 y propiedades químicas, 946–947
 la historia del concepto, 934–935, 935*f*, 958, 958*f*
 MCAT guía de estudio para, A.49–A.51
- Auriculoventricular (AV), 605*f*, 606
 Aurora austral, 937
 Aurora boreal, 648*f*, 937
 Autoinducción, 705–707, 705*f*, 712
 Automóvil (es). *Véase también* Motor de combustión interna
 diferencia de potencial en la batería, 553–554
 el relámpago, la seguridad de los ocupantes de, 531
 espejos laterales, los 797–798, la 798*f*
 espejos retrovisores, 792–793 y 792*f*
 híbrido gas-eléctrico, 661*f*
 limpiaparabrisas e intermitentes, 630
 luces de carretera, 631
 luces, la reflexión de la superficie de la carretera, 764, 764*f*
 motor(es)
 vigilancia radiactiva de los, 975
- Aves, la navegación magnética, 651
 Aviones. *Véase también* Helicópteros
 fem inducida en, 699–700
- Axon, 636, 636*f*
 Azufre (S)
 configuración del estado base, 946*t*
 resistividad, 598*t*
- B**
- Bacterias
 navegación magnética en, 651–652
 tiempo de duplicación, 630
- Balmer, Johann, 936
- Baquelita
 constante dieléctrica, 575*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
- Barión (es), 991, 991*t*, 995, 995*f*, 996, 996*t*, 997, 997*f*, 1004
- Barras, de los ojos, 861
- Base logaritmo natural, A.10–A.11
- Batería
 en el automóvil, 553–554
 historia de, 590
 potencia entregada a dispositivo, 601–604
 resistencia interna, 617, 617*f*
 símbolo para circuito, 565, 565*f*
 voltaje en los terminales, 638
- Becquerel (Bq), 964
- Becquerel, Antoine Henri, 962, 962*f*
- Bednorz, J. Georg, 604
- Benceno
 índice de refracción, 767*t*
- Berilio (Be)
 configuración del estado base, 946*t*
- Biología. *Véase* Medicina y biología
- Bobina de altavoz, 657, 657*f*
- Bocinas, en el sistema de sonido, 657, 657*f*
- Bohr, Niels, 935, 937, 938*f*
- Bohr modelo de átomo, 937–941, 937*f*, 938*f*, 939*f*, 951
- Bohr principio de correspondencia, 941, 951
- Bomba
 electromagnética, 657, 657*f*
- Bomba atómica, 921*f*, 984, 989*f*
- Bomba de hidrógeno, 987
- Bombas electromagnéticas, 657, 657*f*
- Boro (B), configuración del estado base del, 946*t*
- Bose, Satyendra Nath, 885*f*
- Bosón de Higgs, 998
- Bosones, 989, 990*t*, 995, 997–998
- Bosones W, 989, 990*t*, 997–998
- Bosones Z, 989, 990*t*, 997–998
- Bradicardia, 607, 608*t*
- Bragg, W. L., 919
- Bremsstrahlung, 917
- Brewster, Sir David, 846
- Bromo (Br), configuración del estado base, 946*t*
- Brújulas, 649–650, 650–651, 652
- Bunsen, Robert, 627*f*
- Busca travesaños, 576, 576*f*
- C**
- Cable a tierra, en los aparatos de consumo, 634–635, 635*f*
- Cable coaxial, campo magnético de, 666–667
- Calcio (Ca)
 como sustancia paramagnética, 674
 configuración del estado base del, 946*t*
- Calefacción, electricidad, uso de energía por, 603–604
- Cámaras, 859–860, 860*f*, 877
 apertura de, 814, 860, 860*f*
 digital, 859, 860*f*
 flash adjunto, 564
 número *f*, 860, 877
- Cámaras digitales, 859, 860*f*
- Cambio cosmológico al color rojo, 750
- Cambio de franja, 876–877
- Cambio en el símbolo de (Δ), 26, A.2, A.19*t*
- Campo de inflación, 1003
- Campo eléctrico, 522–526, 539
 atmosférico, la medición de, 528, 528*f*
 de Gauss de la superficie (la ley de Gauss), 533, 535–538
 de un conductor aislado, 529, 529*f*
 definición de, 521
 dirección, 522–523, 522*f*, 523*f*, 539
 estrategias para resolver problemas, 524–525
 magnitud de, 522–523, 522*f*, 539
 principio de superposición, 523, 525–526
 superficies equipotenciales, 559–560, 560*f*, 580
 unidades SI de, 522, 553
- Campo eléctrico atmosférico, medición de, 528, 528*f*
- Campo(s) magnético(s) (\vec{B}), 652–655
 de alambre largo y recto, 664–667, 664*f*, 665*f*, 676
 de la Tierra, 650–652, 651*f*, 653, 657–658, 690
 de lazos de corriente, 669–673, 669*f*, 670*f*, 676
 de un solenoide, 670–673, 670*f*, 671*f*, 673*f*, 674, 676
 del inductor, la energía almacenada en, 711–712, 713
 dirección de
 derecho de regla de la mano derecha (#2), 665, 665*f*, 692–695
 determinación, con brújula, 649–650, 650*f*
 notación para, 656
 magnitud de, definición, 652–653
 partícula cargada de movimiento en, 661–664, 662*f*, 675–676
 torque sobre el lazo de corriente en el, 658–661, 659*f*, 675
 unidades SI de, 653, 675, A.21
 de fotones, 900, 920–921, 923
- de las ondas electromagnéticas, 743–746, 752
 relativista
 expresión para, 897, 905
 y energía total, 900–901, 906
- Capa
 atómica 942, 942*t*
 nivel de energía de hidrógeno, 938–939, 939*f*
 principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945*t*, 951
 delgada, no conductora, 536–537
- Capacitancia (*C*)
 condensador de placas paralelas
 con dieléctrico, 573–574, 574*f*, 576–578, 581
 sin dieléctrico (aire), 564–565
 definición de, 563, 580
 equivalente
 para capacitores en paralelo, 566–567, 580
 para capacitores en serie, 568–569, 580
 estrategias para resolver problemas, 569–570
 unidades SI de, 563, 580, A.21
- Capacitor(es)
 aplicaciones, 564, 564*f*, 572–573, 575, 576, 606–607
 con dieléctricos, 573–579, 574*f*, 575*f*, 581
 de placas paralelas, 538, 538*f*, 563–565, 563*f*, 564*f*, 580
 definición de, 562–563, 562*f*, 580
 electrolítico, 574–575, 575*f*
 en circuitos de CA, 727–728, 727*f*, 751
 ángulo de fase, 732*t*
 circuitos RC, 732*t*
 circuitos RLC en serie, 730–734, 730*f*, 731*f*, 732*t*, 751
 impedancia, 732*t*
 en circuitos de CC
 aplicaciones, 630–631
 en paralelo, 565–567, 566*f*, 580
 en serie, 567–569, 568*f*, 580
 estrategias para resolver problemas, 569–570
 RC circuitos, 629–633, 629*f*, 638
 energía almacenada en, 571–573, 571*f*, 580–581
 estructura comercial, de, 574–575, 575*f*
 variable, 574, 575, 575*f*, 576*f*
 voltaje máximo de funcionamiento, 572
- Capacitores de placas paralelas, 538, 538*f*, 563–565, 563*f*, 564*f*, 580
- Capacitores electrolíticos, 574–575, 575*f*
- Capas delgadas, no conductoras, 536–537
- Carbón, como combustible, 986
- Carbono (C)
 coeficiente de temperatura de resistividad, 598*t*
 configuración del estado base, 946*t*
 de carbono-14, la desintegración radiactiva de, 969, 970
 isótopos de, 958
 resistividad, 598*t*
- Carga
 por conducción, 516, 516*f*
 por inducción, 516, 517*f*
- Carga del electrón (*e*), A.20
- Carga eléctrica
 a tierra, definición, 516
 carga por conducción, 516, 516*f*
 carga por inducción, 516, 517*f*
 conservación de, 515, 515*f*, 626, 638
 cuantificación de, 515, 531–532
 de las partículas atómicas, 514–515, 518, 518*t*, 958
 negativa, 514, 514*f*
 polarización de, 516
 positiva, 514, 514*f*
 propiedades de, 514–515, 514*f*, 515*f*, 539

- transferencia de, 514, 516, 530, 530f
 unidad fundamental de la (e), 515, 531–532, 539
 unidades SI de, 515, 517, 667, A.21
- Carga eléctrica negativa, 514, 514f
 Carga eléctrica positiva, 514, 514f
 Carga primaria. *Véase también* Volumen de carga
- Carlson, Chester, 561
- Catapulta espacial, 698
- Caucho
 como aislante, 515
 constante dieléctrica, 575t
 resistividad, 598t
 rigidez dieléctrica, 575t
- CCD. *Véase* Dispositivo de carga acoplada
- CD. *Véase* Discos compactos
- Celdas solares, recubrimientos no reflejantes, 833
- Célula(s)
- Células musculares, ondas de despolarización en, 605–606, 605f
- Centrales nucleares, 900, 984–986, 985f, 1004
- Centro de curvatura, de espejo esférica, 793, 793f
- Cepillo (de motor/generador eléctrico), 661, 661f, 702, 702f
- Cerebro
 imágenes de, 990
- Chadwick, Robert, 972
- Challenger investigación, 989f
- Charm, conservación de, 1004
- Charmonio, 996
- Cheney, Dick, 607
- Choque, eléctrico, 634
- Ciclo protón-protón, 986–987
- Ciclotrón (acelerador), 671, 998f
- Ciencia forense, huellas dactilares, 650
- Circón, índice de refracción, 767t
- Circuito(s). *Véase también* Circuitos de corriente alterna (AC); Circuitos eléctricos de corriente directa (DC); Circuitos
- Circuito de corriente eléctrica
 campo magnético de un, 669–673, 669f, 670f, 676
 en el campo magnético, torque en, 658–661, 659f, 675
- Circuito transmisor, 740, 740f
- Circuitos de corriente alterna (AC), 723–737
 capacitores, 727–728, 727f, 732t, 751
 ángulo de fase, 732t
 circuitos RC, 732t
 circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 732t, 751
 impedancia, 732t
 circuitos RC, 732t
 circuitos RL, 732t
 circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 751
 impedancia, 732t
 potencia media entregada en, 734–735, 752
 resonancia en, 735–737, 735f, 752
- inductores en, 728–729, 728f, 729f, 751
 ángulo de fase, 732t
 circuitos RL, 732t
 circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 751
 impedancia, 732t
 potencia media entregada en, 734–735, 752
 resistencias en, 723–727, 724f, 725f, 750–751
 ángulo de fase, 732t
 circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 732t, 751
 impedancia, 732t
 RC circuitos, 732t
 RL circuitos, 732t
- Circuitos domésticos, 623, 633–634, 634f
- Circuitos eléctricos. *Véase también* Circuitos de corriente alterna (CA); Circuitos de corriente directa (DC)
 circuitos del hogar, 623, 633–634, 634f
 definición de, 595
 flujo de electrones en, 593–595, 593f, 608
 MCAT guía de estudio para, A.47–A.49
 símbolos
 alambres, 565, 565f
 batería, 565, 565f
 capacitor, 565
 foco, 565, 565f
 fuente de alimentación CA, 724
 inductor, 708
 resistencia, 565, 565f, 597
 tierra, 601, 601f
 transferencia de energía en, 601–602
- Circuitos RC
 de corriente alterna
 ángulo de fase, 732t
 impedancia, 732t
 de corriente continua, 629–633, 629f, 638
 aplicaciones, 630–631
- Circuitos RL
 ángulo de fase, 732t
 de corriente alterna, 732t
 de corriente continua, 707–710, 708f, 712–713
- Circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 732t, 751–752
 aplicaciones, 736
 estrategias para resolver problemas, 733
 potencia media entregada en, 734–735, 752
 resonancia en, 735–737, 735f, 752
- Cirugía con láser, 834
- Citosina, 920
- Cloro (Cl)
 configuración del estado fundamental, 946t
- Cloruro de sodio (NaCl)
 difracción de rayos X por, 918–919
 estructura de, 918, 918f
 índice de refracción, 767t
- CMOS. *Véase* Semiconductor complementario de óxido metálico
- Cobalto (Co)
 como sustancia ferromagnética, 673, 674
 configuración del estado base, 946t
- Cobre (Cu)
 coeficiente de temperatura de resistividad, 598t
 como conductor, 515, 591
 configuración del estado base, 946t
 función de trabajo, 915t
 resistividad, 598t
- Coefficiente de temperatura de resistividad (α), 598t, 599–601, 609
- Colibríes, el color en las plumas, 824f
- Colisiones elásticas
- Color (carga de color), de los quarks, 997, 997f, 1004
- Compton cambio, 920–922, 921f, 928–929
- Compton, Arthur H., 920, 921f
- Comunicaciones, fibra óptica en, 779–780, 780f
- Condensado Bose-Einstein, 885f
- Condición subcrítica, de un reactor nuclear, 985
- Condición supercrítica, de un reactor nuclear, 985
- Conducción. *Véase* Conducción eléctrica; Conducción térmica
- Conducción eléctrica
 carga por, 516, 516f
 en el sistema nervioso, 635–637, 636f, 637f
 incremento de la resistencia en, y la temperatura, 601
- Conductores. *Véase también* Conductores eléctricos
- Conductores eléctricos
 alambre recto largo
 campo magnético de, 664–667, 664f, 665f, 676
 ley circuital de Ampère para, 665–667, 666f, 676
 de forma irregular, carga acumulada en, 529–530, 530f
 de transporte de corriente
 fuerza magnética sobre, 655–658, 656f, 657f, 675
 potencial eléctrico en, 592
 definido, 515, 539
 en equilibrio electrostático (aislados)
 las propiedades de 529–531, 529f, 530f
 potencial eléctrico en, 558–559, 559f
 fuerza paralela, magnético entre, 667–668, 667f, 676
 resistencia eléctrica. *Véase también* Resistencia
- Conexión a tierra, 634–635, 635f
- Confinamiento electrostático, 564
- Conmutadores, 661, 661f, 702, 702f
- Conocimiento, límites del, 1003
- Conos, de los ojos, 861
- Conservación
 en cambio de la energía potencial eléctrica, 549–552
 en los circuitos eléctricos, 626, 638
 de la carga eléctrica, 515, 515f, 626, 638
 de la fuerza de Coulomb, 549
 del número bariónico, 992–993, 1004
 del número de leptones, 993–994
- Constante cosmológica, en la teoría de la relatividad general, 1001–1002
- Constante de Coulomb (k_e), 517, 539, A.20
- Constante de decaimiento (λ), 963–964, 976
- Constante de Euler (e), 629
- Constante de reproducción (K), 985, 1004
- Constante de Rydberg (R_H), 936, 939, A.20
- Constante de tiempo (τ)
 Circuitos RC, 630, 638
 Circuitos RL, 708–709, 713
- Constante dieléctrica (κ), 573–574, 575t, 581
- Contaminación del aire, la eliminación de la materia particulada, 560–561, 561f
- Convergente (positiva) lentes delgadas, 805–806 y 805f, 807–809, 807f, 816f
- Conversión de/a de electrón-volts, 901
- Conversiones
 electrón-voltio a/de joules, 901
 Gauss a/de tesla, 652
 unidades de masa atómica a/de energía en reposo, 901
- Corazón
 actividad eléctrica de, 605–608, 605f, 606f
 artificial, 657
 descargas eléctricas y, 634
 fibrilación de, 606, 606f, 607–608
- Córnea, 860, 861f
- Coroides, 861f
- Corriente. *Véase también* Corriente eléctrica
- Corriente alterna (AC) transformadores, 737–739, 737f, 752
- Corriente directa (DC), los circuitos, 616–637
 capacitores
 en paralelo, 565–567, 566f, 580
 en serie, 567–569, 568f, 580
 estrategias para resolver problemas, 569–570
 RC circuitos, 629–633, 629f, 638
 aplicaciones, 630–631
 circuitos RL, 707–710, 708f, 712–713

- estrategias de resolución de problemas
 capacitores, 569–570
 reglas de Kirchhoff, 626–627
 resistencias, 624
- fuentes de Fem, 616–617, 617*f*, 638
 RC circuitos, 629–633, 629*f*, 638
 aplicaciones, 630–631
 reglas de Kirchhoff, 625–629, 626*f*, 638
 resistencias en paralelo, 620–625, 621*f*, 638
 resistencias en serie, 617–620, 618*f*, 638
- Corriente eléctrica, 590–592, 591*f*
 definición de, 590
 dirección de, 591, 608
 en comparación con el flujo de agua, 596
 en un circuito RL , 708–710, 708*f*, 713
 inducida, 691
 instantánea (I), 591, 608
 ley de Ohm, 597, 608, 726, 751
 medición de, 595–596, 595*f*
 promedio (I_{prom}), 591, 608
 regla del nodo, 625–629, 626*f*, 638
 rms, 724–726, 750–751
 unidad SI a/de, 667, A.21
 vista microscópica de, 593–595, 593*f*, 608
- Corriente eléctrica instantánea (I), 591, 608
 Corriente eléctrica promedio (I_{prom}), 591, 608
 Corriente inducida, 691
 Corriente rms, 724–726, 750–751
 Corrimiento hacia el rojo, cosmológico, 750
 Cosmología, preguntas sin respuesta en,
 1000–1003
- Coulomb (C), 515, 517, 667
 Coulomb, Charles, 517, 518*f*
 Crick, F. H. C., 920
 Cristalino, 860, 861, 861*f*
 Criterio de Lawson, 988, 1004
 Criterio de Rayleigh, 871–872, 878
- Cromo (Cr)
 como trazador radioactivo, 975
 configuración del estado fundamental, 946*t*
- Cromodinámica cuántica (QCD), 997, 998, 1004
- Cuantización
 de energía. *Véase también* Física cuántica
 de la carga eléctrica, 515, 531–532
 de las ondas electromagnéticas, 915
- Cuanto de flujo magnético (ϕ_0), A.20
- Cuarzo
 constante dieléctrica, 575*t*
 cristales, 278*f*
 índice de refracción, 767*t*, 771*f*
 módulo elástico para, 283*t*
 resistividad, 598*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
- Cubo de hielo experimento (Faraday), 530, 530*f*
- Curie (Ci), 964
 Curie, Marie, 962, 962*f*
 Curie, Pierre, 962, 962*f*
 Curvatura del espacio-tiempo, 904–905,
- D**
- DAI. *Véase* Desfibrilador automático implantado
- Daño genético de la radiación, 974
 Daño somático por radiación, 974
 Datación por carbono, 969, 970
- De Broglie, Louis, 922–923, 923*f*, 929
- Decaimiento alfa (α), 962–963, 962*f*, 965–967,
 976, 977
- Decaimiento beta (β), 962–963, 962*f*, 967–968,
 968*f*, 976, 977
- Decaimiento exponencial, 963, 963*f*
 Declinación magnética, 651
- Delta (Δ), A.2, A.19*t*
- Dendritas, 636, 636*f*
 Desconocido, definición, A.4
- Desfibrilador automático implantado (DAI), 607,
 607*f*, 608*t*
- Desfibriladores
 automáticos implantados (DAI), 607, 607*f*, 608*t*
 externo, 572–573
- Desigualdades, A.1, A.19*t*
- Desintegración espontánea (transmutación), 966
- Despolarización de onda, 605–606, 605*f*
- Detectores de humo, 969, 969*f*
 Detectores de metales, 736, 736*f*
- Detención de potencial, en el efecto fotoeléctrico,
 914, 914*f*
- Deuterio
 como combustible de fusión, 986–987, 1004
 como isótopo, 958
 energía de enlace, 960–961
- Deuterón de masa (e_m), A.20
- Diagrama de circuito, 595, 595*f*
- Diagrama de Feynman, 989, 989*f*
- Diagramas de fasores, 730–731, 730*f*, 731*f*
- Diagramas de nivel de energía, 939, 939*f*
- Diagramas de rayos
 de espejos, 795–798, 797*f*
 para las lentes delgadas, 807–808, 807*f*, 816*f*
- Diamante
 destello de, 778
 índice de refracción, 767*t*
- Dieléctrico(s), 573–579, 581
 de la capacitancia, 573–574, 574*f*, 576–578, 581
 definición de, 573
 descripción atómica de, 578–579, 578*f*, 579*f*
- Diferencia en, el símbolo (Δ), A.2, A.19*t*
- Difracción
 de las ondas de luz, 836–837, 836*f*
 de una sola ranura de difracción, 837–839,
 837*f*, 838*f*, 850
 difracción de Fraunhofer, 837, 837*f*
 historia de la investigación sobre, 762
 rejillas de difracción, 839–842, 839*f*, 840*f*, 850,
 874–875, 878
 y resolución de 871–875, 871*f*, 872*f*
- de las ondas sonoras, 838
 de rayos X de cristales, 917, 917*f*, 918–920, 918*f*,
 919*f*, 928
- Difracción de Fraunhofer, 837, 837*f*
- Difracción una sola rendija, 837–839, 837*f*, 838*f*, 850
- Dinámica Newtoniana Modificada (MOND), 1001
- Diodo, un dispositivo no óhmico, 597
- Dioptrías, 863, 877
 índice de refracción, 767*t*
- Dipolo eléctrico
 líneas del campo eléctrico de, 527, 527*f*
 potencial eléctrico, 555–556, 555*f*
- Dirac ecuación, 943
- Dirac, Paul A. M., 943, 990, 991*f*
- Disco óptico, 861*f*
- Discos compactos (CD)
 lectura de, 835–836, 835*f*
 superficie multicolor de, 841
 mecanismo de seguimiento, 841–842, 841*f*
- Dispersión de la luz, 771–775, 771*f*, 772*f*, 773*f*, 774*f*,
 781
- Dispersión, polarización de las ondas de luz por,
 846–847, 846*f*
- Dispositivo de carga acoplada (CCD), 859, 860*f*
- Distancia de la imagen, 790, 791*f*, 794, 815
- Distancia de objetos, 790, 791*f*, 794, 815
- Disulfuro de carbono, índice de refracción, 767*t*
- Divergente (negativa) lentes delgadas, 805–806,
 805*f*, 807–808, 807*f*, 810–811, 816*f*
- Doble hélice del ADN, 920, 920*f*
- Domios magnéticos, 673–674, 674*f*
- Dosis de radiación absorbida (rad), 974
- DVD (videodiscos digitales), la lectura de, 770, 770*f*,
 835–836, 835*f*
- E**
- e (unidad fundamental de carga eléctrica), 515,
 531–532, 539
- ECG (electrocardiograma), 605–606, 606*f*
- Ecuación de onda de Schrödinger, 925–926
- Ecuación de Rydberg, 936
- Ecuación del ciclotrón, 662–664
- Ecuación del espejo, 794–795, 815
- Ecuación para construir lentes, 807
- Ecuaciones cuadráticas, repaso de, A.7–A.8
- Ecuaciones lineales
 repaso de, A.8–A.9
 resolución de ecuaciones simultáneas, A.9–A.10
- Efecto Doppler
 ondas electromagnéticas, 750
- Efecto fotoeléctrico, 762, 913–916, 914*f*, 915*f*, 928
- Efecto Zeeman, 942, 942*f*
- Eficacia biológica relativa (RBE) factor de, 974, 974*t*
- Eficiencia. *Véase también* Eficiencia térmica
- Einstein, Albert, 762, 888, 888*f*, 899–900, 903–904,
 903*f*, 915, 928, 949, 1001–1002
- Eje de transmisión, de material polarizante, 843
- Eje principal, del espejo esférico, 793, 793*f*
- El ángulo de fase (ϕ), 730–733, 730*f*, 732*t*, 752
- El arsénico (As), configuración del estado base, 946*t*
- El hombre invisible, la visión de, 864
- El lado posterior
 de un espejo, definido, 795–796, 796*f*
 de una lente delgada, definida, 807, 807*f*
 de una superficie refractante esférica, definida,
 801
- El radón (Rn), 946, 970–971
- El reloj atómico, 905
- Electricidad
 la utilización humana de, 513, 590
 los primeros experimentos con, 513, 590
 seguridad, 634–635, 635*f*
 transmisión a través de largas distancias, 738
 y la función del corazón, 605–608, 605*f*, 606*f*
- Electrocardiógrafos, 605
- Electrocardiogramas (ECG), 605–606, 606*f*
- Electroimán. *Véase también* Solenoide
- Electrón(es)
 antipartícula, 962, 968
 como leptones, 991*t*, 992
 como portadores de carga, 591–595, 591*f*, 593*f*,
 596–597, 599
 de carga, 514, 515, 518, 518*t*, 532, 958
 en la estructura atómica, 514–515
 en los circuitos eléctricos, la velocidad de la deriva,
 593–595, 593*f*, 608
 energía en reposo, 901
 energías, típicas, 559
 masa, 3*t*, 518*t*, 958, 958*t*, A.20
 nubes electrónicas, 944–945, 944*f*, 945*f*
 número de, en un gramo de materia, 514
 spin, 673, 673*f*, 943–944, 943*f*
- Electrón-volts (eV), 560, A.20
 conversión a/de joules, 901
- Electrostática, guía de estudio para el MCAT,
 A.44–A.47
- Elemento(s)
 espectros de emisión de, 935–937, 936*f*
 propiedades químicas, 946–947
 tabla abreviada de los isótopos, A.14–A.18
 tabla periódica, 946–947, 951

- Elemento de circuito, potencia entregada a, 591–592
- Emisión espontánea, 949, 949f, 951
- Energía estimulada, 949–950, 950f, 951
- En fase, definición, 724
- Energía
 - conservación de. *Véase también* Conservación
 - cuantización de. *Véase también* Física cuántica
 - de fisión, 983–984
 - de fotones, 762, 780, 915, 920–922
 - de fusión, 987–988
 - de los rayos X característicos, 947–948
 - de masa equivalente, 900, 902–903, 958
 - en el inductor, 711–712, 713
 - en un capacitor, 571–573, 571f, 580–581
 - en un circuito, transferencia de, 601–602
 - reposo, 899, 906
 - conversión de unidades de masa atómica de/a, 901
 - de electrones, 901
 - total, 899–900, 901, 906
 - y el impulso relativista, 900–901, 906
 - transferencia de transportada por ondas electromagnéticas, 743–746, 752
 - expresión relativista, 899–900, 906
- Energía de enlace, 960–962, 961f, 976
- Energía de ionización, 939, 946t
- Energía en reposo, 899, 906
 - conversión de unidades de masa atómica de/a, 901
 - del electrón, 901
- Energía oscura, 1001–1002, 1001f
- Energía potencial eléctrica (EP_d), 548–552, 549f
 - cambio en, en el campo eléctrico constante, 549–552, 579
 - debido a cargas puntuales, 555–558, 555f, 556f, 580
 - frente a la energía potencial gravitatoria, 550, 550f
 - y potencia, 601–602
 - frente a la energía potencial eléctrica, 550, 550f
- Energía total, 899–900, 901, 906
 - y el impulso relativista, 900–901, 906
- Enfoque de Newton, 870
- Equilibrio
 - conductores en
 - potencial eléctrico en, 558–559, 559f
 - propiedades de, 529–531, 529f, 530f, 539
 - definición de, 529
 - electrostático
 - mecánico
 - MCAT guía de estudio para, A.29–A.32
- Equilibrio electrostático
 - conductores en
 - potencial eléctrico en, 558–559, 559f
 - propiedades de, 529–531, 529f, 530f, 539
 - definición de, 529
- Equipotencial(es), 559–560, 560f
- Equivalencia (\equiv), A.1–A.2, A.19t
 - principio de (en la relatividad general), 904
- Equivalente roentgen en el hombre (Rem), 974
- Escandio (Sc), configuración del estado base, 946t
- Esclerótica, 861f
- Espectro
 - electromagnético, 746–749, 747f, 753
 - efecto Zeeman en el, 942, 942f
 - visible, 771, 771f, 772f
 - electromagnético, 746–749, 747f, 753
 - efecto Zeeman en el, 942, 942f
 - visible, 771, 771f, 772f
- Espectro de rejilla de difracción, 840, 840f
- Espectrómetros de masas, 663–664
- Espectros de absorción, 936, 936f
- Espectros de emisión, 935–937, 936f
 - de hidrógeno, 936, 936f
 - de mercurio, 936f
 - de neón, 936f
 - estructura fina, 943
- Espejismo(s), 804, 804f
- Espejo(s)
 - aberraciones en, 814, 814f, 816, 870
 - ampliación lateral, 791, 815
 - automóviles, espejos laterales, 797–798, 798f
 - cóncavo, 793–795, 793f, 794f, 795f, 796, 797f, 798–799
 - aplicaciones, 797
 - convención de signos para, 795–796, 796f, 796t
 - convexo, 795–796, 795f, 796, 797f, 798, 800, 815
 - aplicaciones, 797–798, 798f
 - diagrama de rayos, 795–798, 797f
 - dieléctrico, 834
 - ecuación del espejo, 794–795, 815
 - esférico (*Véanse también* Espejos cóncavos; Espejos convexos)
 - aberración esférica en, 794, 794f, 814, 814f, 816, 870
 - definición de, 793
 - parabólico, 814, 869
 - perfecto, 834
 - plano, 790–793, 791f, 815
 - reflejo de telescopios, 868–871, 870f
 - retrovisores de automóviles, espejos, 792–793, 792f
- Espejo de Lloyd, 829, 829f
- Espejos cóncavos, 793–795, 793f, 794f, 795f, 796, 797f, 798–799
 - aplicaciones de, 797
- Espejos convexos y 795–796, 795f, 796, 797f, 798, 800, 815
 - aplicaciones de, 797–798, 798f
- Espejos dieléctricos, 834
- Espejos divergentes. *Véase también* Espejos convexos
- Espejos esféricos. *Véase también* Espejos cóncavos; Espejos convexos
 - aberración esférica en, 794, 794f, 814, 814f, 816, 870
 - definición de, 793
- Espejos parabólicos, 814
- Espejos planos, 790–793, 791f, 815
- Estado base, 939, 939f
- Estado crítico, de un reactor nuclear, 985
- Estado cuántico, 913
 - energías de, 938–939, 939f, 951
- Estado metaestable, 949
- Estados excitados, 949, 949f, 951
- Estaño
 - como superconductor, 604, 604t
- Esterilización, con radiación, 975
- Estrategias para resolver problemas. campo eléctrico, 524–525
 - circuitos de corriente
 - capacitores, 569–570
 - reglas de Kirchhoff, 626–627
 - resistencias, 624
 - circuitos *R.L.C.*, 733
 - combinaciones de capacitores, 569–570
 - fuerza eléctrica, 524–525
 - interferencia de película fina, 832
 - potencial eléctrico, 556
 - reglas de Kirchhoff, 626–627
 - resistencias, 624
- Estrellas
 - color de, 912–913
 - temperatura de la superficie de las, 912–913
- Estructura fina de los espectros de emisión, 943
- Eta (η), 991t
- Éter, luminoso, 887–888, 887f, 888f
- Exclusión principio (Pauli), 945–946, 945t, 951
- Experimento de Davisson-Germer, 923
- Experimento de la doble rendija de Young, 825–829, 826f, 827f, 849
- Experimento de la gota de aceite de Millikan, 531–532, 531f, 532f
- Experimento del cubo de hielo de Faraday, 530, 530f
- Experimento Michelson-Morley, 887–888, 888f, 889
- Explorador Cósmico de Fondo (COBE), 1000, 1000f, 1004
- Exponente(s)
 - definición, A.3
 - logaritmos y, A.10–A.11
 - reglas para, A.6
- Extrañeza(s), la conservación de, 991t, 994, 1004
- F**
- Factor de potencia, 734–735
- Factorización, repaso de, A.7
- Farad (F), 563, 580
- Faraday, Michael, 87, 522, 526, 530, 688, 689f
- Farnsworth, Philo, 988
- Fasor(es), 730–731, 730f, 731f
- Fem
 - de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
 - fuentes de, 616–617, 617f, 638
 - inducida
 - aplicaciones, 695–697, 695f, 696f, 697f, 698–700, 698f
 - definición de, 688–689, 689f
 - dirección de la (ley de Lenz), 692–695, 692f, 694f, 695f, 698
 - en los generadores, 701–705
 - fem autoinducida, 705–707, 705f, 712
 - fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
 - fem de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
 - ley de Faraday de la inducción magnética, 691–694, 692f, 695, 697, 712
 - ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
 - de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
- Fem inducida
 - aplicaciones, 695–697, 695f, 696f, 697f, 698–700, 698f
 - auto-inducida, 705–707, 705f, 712
 - de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
 - definición de, 688–689, 689f
 - dirección de la (ley de Lenz), 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
 - en los generadores, 701–705
 - fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
 - ley de Faraday de la inducción magnética, 691–694, 692f, 695, 697, 712
 - ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
- Fem de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
- Fem inducida
 - aplicaciones, 695–697, 695f, 696f, 697f, 698–700, 698f
 - auto-inducida, 705–707, 705f, 712
 - de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
 - definición de, 688–689, 689f
 - dirección de la (ley de Lenz), 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
 - en los generadores, 701–705
 - fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
 - ley de Faraday de la inducción magnética, 691–694, 692f, 695, 697, 712
 - ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
- Femómetro (FM), 959
- Fermi (fm), 959
- Fermi, Enrico, 968, 969f, 984
- Fermiones, 995
- Ferritas, 649
- Feynman, Richard, 912, 989, 989f
- Fibra OmniGuide, 834
- Fibra óptica, 779–780, 779f, 780f, 781
- Fibrilación auricular, 606, 606f
- Fibrilación ventricular, 606f, 607
- Fibrilación, de corazón, 606, 606f, 607–608
- Física cuántica, 911–927
 - concordancia con la física clásica, 940
 - corrimiento Compton, 920–922, 921f, 928–929

- Einstein y, 888f
 función de onda (Ψ), 925–926, 929, 945–946
 historia de, 912
 materia, la naturaleza dual de, 922–925, 928
 modelo del átomo, 942–948, 951
 principio de incertidumbre, 926–928, 926f, 929
 radiación de cuerpo negro y, 911–913, 912f, 928
 rayos X, difracción de cristales de, 917, 917f,
 918–920, 918f, 919f, 928
 tubo de rayos X, espectro emitido por, 916–918,
 917f, 928
 y el efecto fotoeléctrico, 913–916, 914f, 915f,
 928
- Física de partículas, preguntas abiertas en, 1003
 Fisión, 900, 902–903, 982–986, 983f, 1004
 Fisión nuclear, 900, 902–903, 982–986, 983f, 1004
 Flujo. *Véase también* Flujo eléctrico; Flujo magnético;
 Dinámica de fluidos
 Flujo eléctrico (Φ), 533–535, 533f
 ley de Gauss, 533, 535–538
 líneas de flujo, el signo de, 534
 Flujo magnético (Φ), 689–691, 690f, 712
 campo magnético de la Tierra, 690
 fem inducida
 aplicaciones, 695–697, 695f, 696f, 697f,
 698–700, 698f
 auto-inducido, 705–707, 705f, 712
 de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
 definición de, 688–689, 689f
 dirección, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698
 en generadores, 701–705
 fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
 ley de Faraday de la inducción magnética,
 691–694, 692f, 695, 697, 712
 ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698,
 712
 unidades SI, 689, A.21
 Flúor (F), configuración del estado base, 946t
 Fluorita, índice de refracción, 767t
- Focos
 circuito de símbolo para, 565, 565f
 de tres vías, 623–624, 624f
 defecto de, 602
 intermitente, 631
 luces de Navidad en serie, 618–619
 oscurecimiento de, con la edad, 598
 resistencia en, 599f
- Forma óctuple, 995, 995f
- Formas geométricas, áreas comunes, y los volúmenes,
 A.12t
- Fósforo (P), configuración del estado base, 946t
- Fotocélulas, 913–914, 914f, 916
- Fotoconductores, en xerografía, 561–562, 562f
- Fotocopiadoras, 561–562, 562f
- Fotocopiadoras (xerográficas), los 561–562, la 562f
- Fotoelectrones, 913, 914, 928
- Fotografías, los ojos rojos en, 764
- Fotón(es)
 absorción estimulada, 949, 949f, 951
 como cuanto, 915, 928
 como partícula de campo, 989, 990t
 como partícula fundamental, 989
 emisión espontánea, 949, 949f, 951
 emisión estimulada, 949–950, 950f, 951
 emitido por el cambio de órbita del hidrógeno,
 939–940, 951
 en la teoría electrodébil, 998, 998f
 energía de, 762, 780, 900, 915, 920–922
 historia del concepto, 762
 impulso de, 900, 920–921, 923
 rayos gamma (γ), 747f, 748–749, 962–963, 962f, 968
 virtual, 989, 989f
- Fotones virtuales, 989, 989f
- Fóvea, 861f
- Fracciones, operaciones matemáticas con, A.5
- Fragmentos de fisión, 982
- Franjas
 brillante
 condiciones para, 826–827, 826f, 849
 en películas delgadas, 830–831, 849–850
 posición de, 828, 849
 definición, 825–826, 826f
 oscura
 condiciones para, 826–827, 826f, 849
 de difracción de una sola ranura, 850
 en películas delgadas, 830–831, 849–850
 posición de, 828, 849
- Franjas brillantes
 condiciones para, 826–827, 826f, 849
 en películas delgadas, 830–831, 849–850
 posición de, 828, 849
- Franjas oscuras
 condiciones para, 826–827, 826f, 849
 de difracción de una sola ranura, 850
 en películas delgadas, 830–831, 849–850
 posición de, 828, 849
- Franklin, Benjamin, 514, 514f, 531
- Franklin, Rosalinda, 919, 919f
- Frecuencia (f). *Véase también* Frecuencia angular
 de corte, en efecto fotoeléctrico, 914
 de la radiación emitida por el cambio de hidróge-
 no órbita, 937, 939–940, 951
 de ondas de materia, 923, 929
- Frecuencia de corte (f_c), en el efecto fotoeléctrico,
 914, 915f
- Frecuencia de resonancia
 en circuitos LC, 740
 en circuitos RLC en serie, 735–736, 735f, 752
- Frecuencia-tensión proporción de Josephson, A.20
- Frente de onda
 de onda de luz, 763, 763f
 principio de Huygens, 775–777, 775f, 776f,
 781
- Fresnel punto brillante, 836f, 837
- Fresnel, Augustin, 837
- Fuente de alimentación de corriente alterna (AC)
 corriente eficaz, 724–726, 750–751
 símbolo de circuito, 724
 voltaje rms, 725–726, 750–751
- Fuente de luz coherente, definición de, 825
- Fuente de luz incoherente, definición de, 825
- Fuerza(s)
 color, 997, 1004
 Big Bang y, 999, 999f
 características de los, 989, 990t, 992, 994,
 1004
 como fuerza fundamental, 989
 electrodébil y la teoría, 997–998
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 electrodébil, 998, 999, 999f, 1004
 electrostática, 517
 fuerte
 Big Bang y, 999, 999f
 características de los, 989, 990t, 991, 994,
 1004
 como fuerza de color, 997
 como fuerza fundamental, 989
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 fundamental, 989, 990t, 999, 999f, 1004
 MCAT guía de estudio para, A.26–A.29
 nuclear, 959, 989, 997
- Fuerza de color, 997, 1004
- Fuerza de Coulomb, 518. *Véase también* Ley de conser-
 vación de Coulomb, 549
- Fuerza débil
 Big Bang y, 999, 999f
 características de la, 989, 990t, 992, 994, 1004
 como fuerza fundamental, 989
 electrodébil y la teoría, 997–998
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
- Fuerza eléctrica (F_e)
 estrategias para resolver problemas, 524–525
 frente a la fuerza gravitacional, 518–519
 ley de Coulomb, 517–522, 518f
 propiedades de, 517
 superposición principio para, 519–522
- Fuerza electrodébil, 998, 999, 999f, 1004
- Fuerza electromagnética
 características de, 994
 como fuerza fundamental, 989, 990t, 998, 998f,
 1004
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 y el Big Bang, 999, 999f
- Fuerza fuerte
 Big Bang y, 999, 999f
 características de la, 989, 990t, 991, 994, 1004
 como el color de la fuerza, 997
 como fuerza fundamental, 989
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
- Fuerza gravitatoria (F_g)
 como fuerza fundamental, 989, 990t, 1004
 constante de la gravitación universal (G), A.20
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 en la relatividad general, 903–905
 frente a la fuerza eléctrica, 518–519
 ley de la gravitación universal (Newton), 1001
 y el Big Bang, 999, 999f
 y el tiempo, 904
 y la luz, curvatura de, 904–905, 904f
- Fuerza magnética
 aplicaciones, 657, 657f
 conductor de corriente, 655–658, 656f, 657f, 675
 dirección de (regla #1 de la mano derecha),
 653–654, 653f, 657, 675
 entre dos conductores paralelos, 667–669, 667f,
 676
 sobre una partícula cargada, 652–655, 675
 torque sobre el lazo de corriente, 658–661, 659f,
 675
- Fuerza nuclear, 959, 989, 997
- Fuerzas electrostáticas, 517
- Fuerzas fundamentales, 989, 990t, 999, 999f, 1004
- Función de onda (Ψ), 925–926, 929, 945–946
- Función de trabajo, 915, 915t, 928
- Fusibles, 623
- Fusión de confinamiento electrostático inercial,
 988
- Fusión nuclear, 986–988, 1004
- Fusión por confinamiento inercial, 988
- Fusión, la energía nuclear, 986–988, 1004
- ## G
- Gafas de sol
 Polaroid, 846
 protección UV en, 747f
- Galaxia(s)
 centro de, 905
- Galio (Ga), configuración del estado base, 946t
- Gamma (γ) desintegración, 962–963, 962f,
 968–969, 976, 977
- Gamma (γ) rayos, 747f, 748–749, 962–963, 962f,
 968, 977, 987
- Gamow, George, 999f
- Gas(es). *Véase también* Gas ideal
 análisis espectral de, 772, 772f
- Gases nobles, 946

Gato, ojo, resolución de, 873
 Gauss (G), 653, 675
 conversión de/a Tesla, 653
 Gauss (CGS) sistema de unidades
 campo magnético, 653
 Gauss, Karl Friedrich, 533
 Gaussiana, superficie, 535–536
 Geiger, Hans, 934–935, 935f
 Gell-Mann, Murray, 995, 995f
 Generador Van de Graaff, 530, 532–533, 532f, 548f
 Generadores, 701–705
 de corriente alterna (CA), 701–702, 701f, 702f, 703–704, 712
 de corriente directa (CD), 702–703, 702f
 Van de Graaff, 530, 532–533, 532f, 548f
 Generadores de corriente alterna (AC), 701–702, 701f, 702f, 703–704, 712
 Generadores de corriente directa (CD), 702–703, 702f
 Germanio (Ge)
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598t
 como semiconductor, 515
 configuración del estado base, 946t
 resistividad, 598t
 Glicerina, índice de refracción, 767t
 Gluones, 989, 990t, 997, 998, 998f
 Goepfert-Mayer, María, 959f
 Goudsmit, Samuel, 943
 Gran Colisionador de Hadrones, 998f
 Gran teoría unificada (GUT), 999–1000
 Gravitación universal, ley de Newton de, 1001
 Gravitación, la ley de Newton de, 1001
 Gravitones, 989, 990t, la 998f
 Grecia, la antigua
 estudio de la electricidad en, 513
 Grimaldi, Francesco, 762
 Guanina, 920
 Guitarra eléctrica, producción de sonido en, 696, 696f
 GUT. Véase Gran teoría unificada
 Guth, Alan, 1003

H

Haces de partículas cargadas, la creación de, 671
 Hadrones, 990–991, 991t, 1004
 modelo de quark, 996–997, 996t
 Hahn, Otto, 902
 Halógenos, 947
 Heisenberg, Werner, 925, 926, 926f, 941
 como gas noble, 946
 configuración del estado base, 946, 946t
 láser de helio-neón, 950, 950f
 Henry (H), 706, 712
 Henry, Joseph, 688, 706f
 Heridas, terapia con láser para, 749
 Herman, Robert, 999f
 Herschel, William, 747
 Hertz, Heinrich Rudolf, 740–741, 740f, 746–747, 752, 762, 913
 Hidrógeno
 energía de ionización, 939
 espectro de emisión, 936, 936f, 937
 fusión de, en el Sol, 986–987
 isótopos, 957, 958
 Hielo
 índice de refracción, 767t
 Hierro (Fe)
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598t
 configuración del estado base, 946t
 función de trabajo, 915t
 resistividad, 598t
 y magnetismo, 648, 649, 650, 673–674

HIFU. Véase Ultrasonido focalizado de alta intensidad
 Hilbert, David, 888f
 Horizonte de eventos, 905
 Hubble, Edwin, 1001
 Huellas dactilares, para quitar el polvo de, 650
 Hueso
 Humor acuoso, 860, 861f
 Humor vítreo, 861f
 Huygens, Christian, 761, 762f, 775

I

Imagen
 apenas resuelta, 871–872, 872f
 definición de, 790
 real, 790, 793, 801, 815
 recién resuelta, 871, 872f, 878
 resuelta, 871–872, 871f, 872f
 sin resolver, 871–872, 871f, 872f
 virtual, 790–791, 791f, 795, 796, 815
 Imagen apenas resuelta, 871–872, 872f
 Imagen resuelta, 871–872, 871f, 872f
 Imagen virtual, 790–791, 791f, 795, 796, 815
 Imágenes reales, 790, 793, 801, 815
 Imán(es), 648–650, 649f
 monopolo, 649, 1002–1003
 permanente, 673–674
 polos de, 648–649
 superconductor, 605, 605f, 653
 Imanes monopolo, 649, 1002–1003
 Imanes permanentes, 673–674
 Imanes superconductores, 653
 Impedancia (Z), 731–732, 732t, 751
 Impresoras láser, 562, 562f
 Índice de refracción, 766–767, 767t, 769, 771, 771f, 780–781
 Indio, como superconductor, 604
 Inducción, 688–689, 689f
 aplicaciones, 695–697, 695f, 696f, 697f, 698–700, 698f
 carga por, 516, 517f
 eliminación de carga de las casas, 530–531
 dirección de la fem inducida, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698
 en los generadores, 701–705
 fem autoinducida, 705–707, 705f, 712
 fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
 fem de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
 ley de Faraday de, 691–694, 692f, 695, 697, 712
 ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
 Inductancia (L), 706, 713
 del solenoide, 705–707, 713
 Inductor(es)
 definición de, 707
 en circuitos CD RL, 707–710, 708f, 712–713
 en circuitos de CA, 728–729, 728f, 729f, 751
 ángulo de fase, 732t
 impedancia, 732t
 RL circuitos, 732t
 RLC circuitos en serie, 730–734, 730f, 731f, 751
 energía almacenada en el campo magnético de, 711–712, 713
 símbolo de circuito para, 708
 Intensidad (I)
 de las ondas electromagnéticas, 743–746, 752
 Interferencia
 de ondas de luz, 762 (Véase también Difracción)
 anillos de Newton, 831–832, 831f
 cambio de fase debido a la reflexión, 829–830, 829f
 condiciones para, 824–828, 826f, 830–831, 849
 en películas delgadas, 849–850
 posición de, 828, 849
 en el interferómetro de Michelson, 876–877
 en películas delgadas, 830–834, 830f, 831f, 849–850
 estrategias para resolver problemas, 832
 experimento de la doble rendija de Young, 825–829, 826f, 827f, 849
 de ondas sonoras, 488–489, 488f, 504
 Interferencia constructiva
 de ondas de luz
 condiciones para, 826–827, 826f, 830–831, 849
 en películas delgadas, 849–850
 posición de, 828, 849
 Interferencia destructiva, 461–462, 462f, 463f, 464, 488, 504
 de ondas de luz
 condiciones para, 826–827, 826f, 830–831, 849
 difracción de una sola ranura, 837–838, 838f, 850
 en películas delgadas, 849–850
 posición de, 828, 849
 Interferómetro de Michelson, 876–877, 876f, 887, 888f
 Intermitentes, 631
 Interneuronas, 636, 636f
 Interruptores, 623, 633–634, 634f
 Interruptores de falla a tierra (IF_T), 635, 695–696, 696f
 Inversión de población, 949
 Iones, en la función de las neuronas, los 636–637
 Iridiscencia, 824f
 Iris, 860–861, 861f
 IRM (imágenes por resonancia magnética), 975–976, 976f
 Isótopos, 958, 976
 abreviada de la tabla, A.14t–A.18t

J

Jensen, Hans, 959f
 Júpiter
 campo magnético de, 651

K

Kaones (K), 991t, 996t
 Kilowatt-hora (kWh), 602–604
 Kirchhoff, Gustav, 627f
 Kriptón (Kr)
 como gas noble, 947
 configuración del estado base, 946t

L

La constante de Planck (h), 762, 780, 913, 928, A.20
 La hipermetropía (hipermetropía), 862, 862f, 863–864, 877
 Lambda (Λ), 991t, 996t
 Lámparas incandescentes, 598, 599f
 Land, E. H., 843
 Láser(es), 949–950, 950f, 951
 Lente bicóncava, 805f, 806
 Lente biconvexa, 805f
 Lente convexo-cóncava, 805f

- Lente ocular, de un microscopio, 866–867, 867f
- Lente plano-cóncava, 805f
- Lentes delgadas, 805–813, 816
- aberraciones en, 814f, 816
 - ampliación angular de, 865–866, 877
 - ampliación lateral de, 806, 816
 - combinaciones de, 811–812, 812f
 - convención de signos, 806–807, 807f, 807t
 - convergente (positiva), 805–806, 805f, 807–809, 807f
 - diagramas de rayos para, 807–808, 807f, 816f
 - divergentes (negativas), 805–806, 805f, 807–808, 807f, 810–811
 - ecuación de lente delgada, 806, 808–811, 811–812, 816
 - fabricante de lentes de la ecuación, 807
 - formas, comunes, 805, 805f
 - punto focal, 805, 805f
- Lentes negativas. *Véase también* Divergentes (negativas) lentes delgadas
- Lentes positivas. *Véase también* Lentes delgadas convergentes (positivas)
- Leptón(es), 989, 990, 991t, 992, 998, 1003, 1004
- Letreros de neón, 935
- Ley de Bragg, 919, 928
- Ley de Brewster, 846, 850
- Ley de circuitos de Ampère
- para un alambre, 665–667, 666f, 676
 - para un solenoide, 672–673, 673f
- Ley de conservación de la extrañeza, 994
- Ley de conservación de número leptónico, 993–994
- Ley de conservación del número bariónico, 992–993, 1004
- Ley de Coulomb, 517–522, 518f, 539
- Ley de equilibrio. *Véase también* Ley cero de la termodinámica
- Ley de Faraday de la inducción magnética, 691–694, 692f, 695, 697, 712
- Ley de Gauss
- para el flujo eléctrico, 533, 535–538
- Ley de la gravitación universal (Newton), 1001
- Ley de la refracción de Snell, 767–771, 776, 776f, 781
- Ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
- Ley de Malus, 844–845
- Ley de Ohm, 597, 608, 726, 751
- Leyes de Newton
- ley de la gravitación universal, 1001
- Limpiadores electrostáticos de aire, 561
- Limpiaparabrisas intermitentes, 630
- Línea de estabilidad, 960f
- Líneas de campo magnético, 650, 650f
- Líneas eléctricas de campo, 526–528, 527f, 528f, 539
- equipotenciales, 559–560, 560f
- Líneas espectrales, 772
- Linternas, reflectores parabólicos de, 814
- Litio (Li), configuración del estado base, 946, 946t
- Logaritmo en base común, A.10–A.11
- Logaritmos, repaso de, A.10–A.11
- Longitud (L)
- adecuada, 895, 905
 - contracción de, en la relatividad especial, 895–896, 895f, 905
 - unidades de, 959, A.21
- Longitud adecuada, 895, 905
- Longitud de onda (λ)
- Compton, 921
 - de la luz
 - de corte, en efecto fotoeléctrico, 915
 - determinación de rejilla de difracción, 840
 - en el medio, 830, 849
 - espectros de absorción, 936, 936f
 - espectros de emisión, 935–937, 936f
 - medición de, 827–828, 874–875, 876–877
 - y las limitaciones de resolución, 868, 871
 - de la materia (de longitud de onda de De Broglie), 923–924, 929
 - de rayos X
 - característica de los rayos X, 947–948, 947f
 - corrimiento Compton, 920–922, 921f, 928–929
 - emitida por el tubo de rayos X, 916–917, 917f, 928
 - Longitud de onda Compton ($h/m_e c$), 921, A.20
 - Longitud de onda de corte (γ_c), en el efecto fotoeléctrico, 915
 - Longitud de onda de De Broglie, 923–924, 929, 937
 - Longitud focal (f)
 - de espejo esférico, 795, 800, 815
 - de la lente delgada, 805, 805f, 807, 807t
 - Los metales alcalinos, 947
 - Luces de carreteras, 631
 - Luces de Navidad en serie, 618–619
 - Luna
 - Lupas simples, 865–866, 865f, 877
 - Luz linealmente polarizada, 843, 843f. *Véase también* Polarización
 - Luz no polarizada, 842–843, 843f
 - Luz visible, 747f, 748, 749f
- M**
- Magnesio (Mg), configuración del estado base, 946t
- Magnetismo, 648–674. *Véanse también* entradas de Aplicaciones
- campo magnético de la Tierra, 650–652, 651f, 653, 657–658, 690
 - imanes, 648–650, 649f
 - monopolo, 649, 1002–1003
 - permanente, 673–674
 - polos de, 648–649
 - superconductor, 605, 605f, 653
 - inducida (magnetización), 649, 673–674
 - magnéticas, 648, 657, 657f
 - materiales magnéticos blandos, 649, 673–674
 - materiales magnéticos duros, 649, 673
 - monopolos magnéticos, 649, 1002–1003
 - tipos de materiales magnéticos, 649, 674
 - vista microscópica de, 673, 673f, 673f, 674f
- Magnetita, 649
- Magnetización, 649, 673–674
- Magnetón de Bohr, A.20
- Magnetón nuclear (μ_n), A.20
- Manganeso (Mn), configuración del estado base, 946t
- Máquinas de diálisis, 657
- Marcapasos cardíaco, 606–607
- Marcos de referencia. *Véase también* Relatividad
- absoluta, 887–888
 - inercial, 885–886, 886f
- Marcos de referencia. *Véase también* Marcos de referencia
- Marsden, Ernest, 934–935, 935f
- Martillo (hueso del oído), 502, 502f, 503
- Masa (m), 2, 89, 112. *Véase también* Centro de masa de las partículas atómicas, 518t, 958, 958t
- en la relatividad general, 903–904, 903f, 904f
 - energía equivalente de, 900, 902–903, 958
 - unidad de masa unificada (u), 958
 - unidades de, 901, 958, A.20, A.21
 - valores de la muestra de, A.19t
 - y la fuerza de la gravedad, 903–904, 903f, 904f
- Masa atómica
- de elementos seleccionados, A.14–A.18
- Máscaras de buceo
- con visión de corrección de lente, 808
 - y la visión bajo el agua, 802
- Matemáticas, la revisión de, A.1–A.13
- Materia
- MCAT guía de estudio para, A.35–A.37
 - naturaleza dual de la, 922–925, 929
 - oscura, 1000–1001, 1001f
- Materia oscura, 1000–1001, 1001f
- Material diamagnético, 674, 675f
- Materiales magnéticos blandos, 649, 673–674
- Materiales magnéticos duros, 649, 673–674
- Materiales óhmicos, 597, 597f
- Materiales no óhmicos, 597, 597f
- Maximo, 836
- de difracción de una sola ranura, 838, 838f
 - para la red de difracción, 839, 839f, 842, 850
- Máximo de orden cero, 827
- Máximo de segundo orden, 840
- Máximos secundarios, 836
- Maxwell, James Clerk, 739–740, 739f, 746–747, 752, 762
- Mayor que ($>$), A.1, A.19t
- MCAT Skill Builder Guía de Estudio, A.22–A.51
- Mecánica
- newtoniana, 885
 - relativista, 889–896
- Mecánica newtoniana, 885
- Medicina y biología
- ADN, la estructura de, determinación, 919–920, 919f, 920f
 - bacterias
 - navegación magnética en, 651–652
 - tiempo de duplicación de, 630
 - células musculares, ondas de despolarización en, 605–606, 605f
 - cerebro
 - imágenes de, 990
 - cirugía con láser, 834
 - comida
 - irradiación de, 975
 - corazón
 - actividad eléctrica de, 605–608, 605f, 606f, 607f
 - artificial, 657
 - descargas eléctricas y, 634
 - fibrilación de, 606, 606f, 607–608
 - daño de la radiación, 973–975, 974t
 - desfibriladores
 - externo, 572–573
 - implantados desfibrilador automático (DAI), 607, 607f, 608t
 - diagnóstico por imagen, y exposición a la radiación, 974
 - fibra óptica, alcance de visión, 779
 - heridas, terapia con láser para, 749, 749f
 - hueso
 - imágenes por resonancia magnética (IRM), 975–976, 976f
 - iones, en función de las neuronas, 636
 - láser en, 950
 - máquinas de diálisis renal, 657
 - marcapasos cardíaco, 606–607
 - neuronas
 - conducción de la señal eléctrica en, 635–637, 636f, 637f
 - estructura de, 636, 636f
 - tipos de, 636
 - ojo, 860–865, 861f
 - alojamiento, 861, 862–863
 - anatomía, 860–861, 861f
 - condiciones de, 861–865, 862f, 877

- corrección de la visión, 862–864, 862f
 de ojos rojos en las fotografías, 764
 formación de la imagen en, 861
 gafas de sol de protección UV, 747f
 longitud de onda de sensibilidad, 749
 máscaras de buceo, 802, 808
 visión bajo el agua, 802
 proteínas, estructura, determinación de, 919
 radiactividad, aplicaciones de, 973–976, 976f, 990
 riñones
 sistema nervioso, conducción de la señal eléctrica en, 635–637, 636f, 637f
 tomografía por emisión de positrones (PET), 990
 tratamiento del cáncer, terapia de campo eléctrico, 726–727
- Medición.** *Véase también* Sistema de unidades de Gauss (cgs); SI (Sistema Internacional) de unidades; Unidades; Unidades habituales de Estados Unidos.
 corriente eléctrica, 595–596, 595f
 temperatura, 600
 voltaje, 595–596, 595f
- Meitner, Lise,** 902
Mendeléiev, Dmitry, 946
Menor que (<), A.1, A.19t
Mercurio (Hg)
 como superconductor, 604, 604t
 espectro de emisión, 936f
- Mesones,** 991, 991t, 995, 995f, 996, 996t, 997, 997f, 1004
- Metal(es)**
 alcalino, 947
 características de los rayos X, 917f, 947–948, 947f, 951
 efecto fotoeléctrico, 913–916, 914f, 915f, 928
 funciones de trabajo, 915, 915t, 928
- Michelson, Albert A.,** 876, 887
- Microonda(s),** 747f, 748
 polarización de, 844
- Microscopios**
 compuesto, 866–868, 867f, 877
 electrones, 924–925, 924f
 limitaciones ópticas, de, 867–868
 resolución de, 873 (*Véase también* Resolución)
- Microscopios compuestos,** 866–868, 867f, 877
- Microscopios electrónicos,** 671, 924–925, 924f
- Mínimo,** 836
- Miopía,** 862, 862f, 864, 877
- Miopía (visión corta),** 862, 862f, 864, 877
- Miopía axial,** 862
- Miopía refractiva,** 862
- Modelo de Bohr parecido a los átomos hidrógeno,** 941–941, 951
- Modelo estándar,** 998, 998f
- Modelo inflacionario del Universo,** 1003
- Moderador, de un reactor nuclear,** 985, 985f
- Moléculas**
 cristalización de, 919
 polarización de, en dieléctrico, 578, 578f
- Molino de campo,** 528, 528f
- Momento magnético ($\vec{\mu}$),** 659–660, 675
- MOND (Dinámica Newtoniana Modificada),** 1001
- Monitores de apnea,** 697, 697f
- Monopolos magnéticos,** 649, 1002–1003
- Morley, Edward W.,** 887
- Moseley, Henry G. J.,** 948
- Motores de corriente alterna (AC),** 661
- Motores de corriente directa (CD),** 661, 661f
- Motores eléctricos**
 estructura y función, 661, 661f, 704
- fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
 en la relatividad especial, 898–899, 905
- MCAT guía de estudio para,** A.23–A.26
- Müller, K. Alex,** 604
- Multímetro digital,** 595–596, 595f
- Multipliación**
 en notación científica, A.3
- Muón neutrino (ν_μ),** 991t
- Muon número leptónico, la conservación de,** 993
- Muones (μ),** 892–893, 893f, 991, 991t, 992
- Músculo ciliar,** 861, 861f, 862
- N**
- Naves espaciales, las velas solares para,** 745–746
- Nebulosa del Cangrejo,** 258, 258f, 749, 749f
- Necman, Yuval,** 995
- Neón (Ne)**
 como gas noble, 946
 configuración del estado base, 946, 946t
 espectro de emisión, 936f
 láser de helio-neón, 950, 950f
- Neptunio (Np), serie radiactiva,** 971, 971t
- Nervio óptico,** 861, 861f
- Neuronas**
 conducción de la señal eléctrica en, 635–637, 636f, 637f
 estructura, 636, 636f
 tipos de, 636
- Neuronas motoras,** 636, 636f
- Neuronas sensoriales,** 636, 636f
- Neutrino electrón (ν_e),** 991t
- Neutrino tau (ν_τ),** 991t
- Neutrinos,** 968, 977, 987, 991t, 992, 1001
- Neutrón(es)**
 carga, 514, 515, 518t, 958
 como bariones, 991, 991t
 descubrimiento de, 972
 en la estructura atómica, 4f, 514, 957–958
 masa, 518t, 958, 958t, A.20
 quark composición, 996t
- Newton, Isaac,** 761, 832
- Nicromo,** 603
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598t
 resistividad, 598–599, 598t
- Niobio (Nb), como superconductor,** 604t
- Níquel (Ni)**
 como sustancia ferromagnética, 649, 673, 674
 configuración del estado base, 946t
- Nitrógeno (N)**
 configuración del estado base, 946t
- Nivel de energía, de hidrógeno,** 938–939, 939f
- Nodo AV (atrioventricular),** 605f, 606
- Nodo sinoatrial (SA),** 605–606, 605f
- Notación**
 núcleo atómico, 957, 975
 símbolos matemáticos, A.1–A.3, A.19t
- Notación científica,** A.3–A.4
- Notación matemática, repaso de,** A.1–A.3, A.19t
- Núcleo atómico**
 decaimiento de, 962 (*Véase también* Radiactividad)
 densidad de, 959, 959f
 energía de enlace, 960–962, 961f, 976
 estabilidad de, 959–960, 960f
 estructura, 514–515
 hija, núcleo, 965
 historia del concepto, 935, 958, 958f
 padre, 965
 propiedades, 957–959, 976
 símbolos para, 957, 976
 tamaño de, 958–959, 976
- Núcleo hijo,** 965
- Nucleones,** 957, 959f. *Véase también* Neutrón(es); Protón(es)
- Núcleos padres,** 965
- Número atómico (Z),** 946t, 947–948, 948f, 957–958, 976
- Número bariónico, conservación de,** 992–993, 1004
- Número cuántico de spin magnético (m_s),** 943–944, 951
- Número cuántico magnético orbital (m_l),** 942, 942t, 945, 951
- Número cuántico orbital (l),** 942, 942t, 945, 951
- Número cuántico principal (n),** 913, 928, 938–939, 939f, 942, 942t, 945, 951
- Número de Avogadro (N_A),** A.20
- Número de base,** A.10
- Número de leptones, conservación de,** 993–994, 1004
- Número de masa (A),** 957–958, 976
- Número de neutrones (N),** 957–958
- Número de orden, de la franja,** 827, 849
- Número f**
 de la cámara, 860, 877
 rango, del ojo, 861
- Número leptónico electrónico, la conservación de,** 993
- Número leptónico tau, la conservación de,** 993
- Números cuánticos**
 extrañeza (S), 991t, 994
 magnético de espín (m_s), 943–944, 951
 orbital (l), 942, 942t, 945, 951
 orbitales magnéticos (m_l), 942, 942t, 945, 951
 principal (n), 913, 928, 938–939, 939f, 942, 942t, 945, 951
 y el principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945t, 951
- Nylon**
 constante dieléctrica, 575t
 rigidez dieléctrica, 575t
- 0**
- Objetivo(s).** *Véase también* Lentes delgadas
 aberraciones en, 814, 814f, 816, 869
 amplificación angular de, 865–866, 877
 del ojo, 860, 861, 861f
 recubrimientos no reflejantes, 833
- Objetivo de microscopio,** 866–867, 867f
- Observatorio de Kitt Peak (Arizona),** 513f
- Observatorio de Yerkes,** 870
- Ocular, de un microscopio,** 866–867, 867f
- Oersted, Hans Christian,** 664, 665f, 688
- Ohm (Ω),** 596, 608
- Ohm, Jorge Simón,** 597, 597f
- Ojo**
 gato, la resolución de, 873
 humano, 860–865, 861f
 alojamiento, 861, 862–863
 anatomía, 860–861, 861f
 condiciones del, 861–865, 862f, 877
 corrección de la visión, 862–864, 862f
 formación de la imagen en el, 861
 máscaras de buceo, 802, 808
 ojos rojos en las fotografías, 764
 sensibilidad de longitud de onda, 749
 visión artificial, 616f
 visión bajo el agua, 802
 y gafas de sol de protección UV, 747f
 pescado, vista desde debajo del agua, 778–779
- Ojos rojos, en fotografías,** 764
- Omega (Ω),** 991t, 995, 996f, 997
- agua
 interferencia, reflexión y difracción en, 826, 826f, 828, 828f
- MCAT guía de estudio para,** A.37–A.40

- Ondas de luz y la luz
 aproximación de rayos, 763, 763f
 de flexión gravitatoria, 904–905, 904f
 difracción. *Véase también* Difracción
 dispersión de, 771–775, 771f, 772f, 773f, 774f, 781
 en la teoría cuántica, 914–915, 928
 frentes de onda, 763, 763f
 principio de Huygens, 775–777, 775f, 776f, 781
 fuente coherente de, definición, 825
 incoherencia ordinaria, de, 825
 interferencia. *Véase* Interferencia
 longitud de onda. *Véase* Longitud de onda
 MCAT guía de estudio para, A.41–A.44
 naturaleza de, 743, 752, 761–762, 780, 922–923
 polarización. *Véase* Polarización
 primeras investigaciones sobre, 761–762
 principio de Huygens, 775–777, 775f, 776f, 781
 reflexión de la, 762–763, 763–765, 763f, 764f, 780
 ángulo de reflexión, 764, 764f, 780
 cambio de fase debido a la, 829–830, 829f
 en arcoiris, 774–775 y 774f
 por polarización, 845–846, 846f
 principio de Huygens y, 775–776, 776f
 reflexión interna total, 777–780, 777f, 778f, 781
 refracción de. *Véase* Refracción
- Ondas de materia, 922–925
 función de onda de, 925–926
- Ondas de radio, 3*t*, 747f, 748, 749f
 difracción de, 838
 MCAT guía de estudio para, A.40–A.41
- Ondas electromagnéticas
 cuantificación de, 915 (*Véase también* Física cuántica)
 efecto Doppler en, 750
 espectro de, 746–749, 747f, 753
 efecto Zeeman en el, 942, 942f
 frecuencia y la longitud de onda, 747
 impulso de, 743–746, 752
 investigación de Hertz en las, 740–741, 740f, 741f, 752
 predicciones de Maxwell con respecto a, 75*w*, 739–740
 producción por la antena, 741–742, 741f, 742f, 743f
 propiedades de, 742–746, 752–753
 velocidad de, 742, 747
- Ondas infrarrojas, 747f, 748
- Ondas transversales, 742
- Onnes, H. Kamerlingh, 604
- Óptica
 de onda, 824 (*Véase también* Difracción, Interferencia; Polarización)
 geométrica, 824
- Óptica de onda, 824. *Véase también* Difracción; Interferencias; Polarización
- Óptica geométrica, 824
- Oro (Au)
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 resistividad, 598*t*
- Oxígeno (O)
 configuración del estado base, 946*t*
- P**
- Palomas, navegación, búsqueda de objetivos en, 847
- Pantallas de cristal líquido (LCD), 847–849, 848f
- Pantallas LCD. *Véase también* Pantallas de cristal líquido
- Papel
 constante dieléctrica, 575*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
- Paradoja de los gemelos, 894–895, 894f
- Pararrayos, 530–531
- Parte frontal
 de la lente delgada, 807, 807f
 de la superficie de refracción esférica, 801
 del espejo, definición, 795–796, 796f
- Partícula(s). *Véase también* Partículas específicas, antipartículas, 962, 968, 990, 991*t*, 1004
 campo, 989, 990*t*
 cargada
 aceleración, la energía radiada por, 741, 742
 almacenamiento de, 662
 fuerza magnética sobre, 652–655, 675
 movimiento en el campo magnético, 661–664, 662f, 675–676
 clasificación de, 990–992, 991*t*, 1004
 De Broglie longitud de onda de, 923–924, 929
 forma óctuple, 995, 995f
 función de onda (Ψ), 925–926, 929, 945–946
 fundamental, 989
 hadrones, 990–991, 991*t*, 1004
 leptones, 990, 991*t*, 992, 1004
 leyes de conservación, 992–995, 1004
 Partícula masiva de interacción débil (WIMP), 1001
- Partículas alfa (α), 934–935, 935f, 958, 958f, 962–963, 962f, 965–966
- Partículas beta (β), 962–963 y 962f
- Partículas de campo, 989, 990*t*
- Partículas extrañas, 994, 994f
- Partículas fundamentales, 989
- Patrón de Laue, 918, 918f
- Pauli, Wolfgang, 943, 945, 945f, 968
- Peces
 profundidad aparente de, 803–804, 803f
 vista desde debajo del agua, 778–779, 778f
- Películas. *Véase también* Películas delgadas
- Películas delgadas, la interferencia de las ondas de luz en, 830–834, 830f, 831f, 849–850
 estrategias para resolver problemas, 832
- Penzias, Arno A., 1000, 1000f
- Pérdida I^2R , 602
- Periscopios submarinos, 778
- Perlmutter, Saúl, 1001
- Permeabilidad de espacio libre (μ_0), 665, 676, A.20
- Permitividad del espacio libre (ϵ_0), 535, 539, 563, A.20
- Pinturas, vistas por rayos X, 918
- Piones (π), 989, 991, 991*t*, 996*t*
- Pista
 marcas en, 652
- Planck, Max, 912f, 913, 928
- Plano de la luz polarizada, 843, 843f. *Véase también* Polarización
- Plano de polarización, 843
- Plantas de energía
 nuclear (reactores de fisión), 900, 984–985, 985f, 1004
 reactores de fusión, 987–988, 1004
 reactores reproductores, 986
- Plasma de iones densidad (n), 987–988, 1004
- Plata (Ag)
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 como conductor, 515
 función de trabajo, 915*t*
 resistividad, 598*t*
- Platino (Pt)
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 como sustancia paramagnética, 674
 función de trabajo, 915*t*
 resistividad, 598*t*
- Plomo (Pb)
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 como superconductor, 604, 604*t*
 función de trabajo, 915*t*
 resistividad, 598*t*
- Poder de resolución, de una red de difracción, 875, 878
- Polarización
 de carga eléctrica, 516
 de moléculas, en un dieléctrico, 578, 578f
 de ondas luminosas, 842–849, 850
 aplicaciones, 847–849, 848f
 intensidad del haz polarizado, 844–845, 844f, 850
 por absorción selectiva, 843–845, 843f, 844f
 por dispersión, 846–847, 846f
 por reflexión, 845–846, 846f
 sustancias ópticamente activas, 847, 848f
- Polarización inducida, de moléculas, en dieléctrico, 578, 578f
- Polarizador, 843–844, 843f, 844f
- Polaroid, 843
- Poliestireno
 constante dieléctrica, 575*t*
 índice de refracción, 767*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
- Polo Norte
 de la Tierra, 650–651, 651f
 de un imán, 648–649
- Polo Sur
 de la Tierra, 650–651, 651f
 de un imán, 648–649
- Polonio (Po), 962, 962f
- Polos, de un imán, 648–649
- Polución
 aire, eliminación de, 560–561, 561f
- Portadores de carga
 definición de, 592
 vista microscópica de, 593–595, 593f, 608
 y resistencia, 596–597
- Positrón(es) (e^+), 962, 968, 977, 987, 990
- Potasio (K)
 configuración del estado base, 946*t*
 iones, en función de las neuronas, 636–637
- Potencia (P)
 de la lente, en dioptrías, 863, 877
 entregado a la resistencia/dispositivo, 602–604, 609
 entregado al elemento de circuito, 591–592
 fem de salida total de la fuente, 617
 entregada en un circuito *RLC* en serie, 734–735, 752
 unidades comerciales de (kilowatt-hora), 602–604
 unidades SI de, 602, A.21
 entregada en un circuito *RLC* en serie, 734–735, 752
- Potencial eléctrico (voltaje, V)
 aplicaciones, 560–562
 debido a las cargas puntuales, 555–558, 555f, 556f, 580
 diferencia en (ΔV)
 definición de, 552–553, 579
 en el campo eléctrico uniforme, 579
 en comparación con el flujo de agua, 596
 en conductores cargados, 558–559 y 559f
 en conductores que transportan corriente, 592
 estrategias de resolución de problemas, 556
 ley de Ohm, 597, 608, 726, 751
 medición de, 595–596, 595f
 principio de superposición, 555–558, 555f













- regla de circuito, 625–629, 626*f*, 638
superficies equipotenciales, 559–560, 560*f*, 580
voltaje rms, 725–726, 750–751
- Potenciales de acción, 635–637, 637*f*
- Potencias de diez
reglas para, A.6
- Precipitadores electrostáticos, 560–561, 561*f*
- Premio Nobel, 318, 532, 604, 902, 915, 920, 921*f*,
923*f*, 926*f*, 935*f*, 945*f*, 958*f*, 959*f*, 962*f*, 969*f*,
989*f*, 991*f*, 995*f*
- Presbicia, 862–863
- Presión atmosférica, A.19*t*
- Presión de radiación, de la luz, 743–744
- Primer orden máximo, 827, 840
- Principio de correspondencia (Bohr), 941, 951
- Principio de equivalencia (en la relatividad general),
904
- Principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945*t*, 951
- Principio de Huygens, 775–777, 775*f*, 776*f*, 781
- Principio de incertidumbre, 926–928, 926*f*, 929
de fuerza eléctrica, 519–522
para el campo eléctrico, 523, 525–526
para el potencial eléctrico, 555–558, 555*f*
- Prismas, 771–774, 771*f*, 772*f*, 781
espectrómetro de prisma, 772, 772*f*
redirección de la luz con, 778, 778*f*
- Probabilidad, función de onda (Ψ) y, 925–926, 929,
945–946
- Problema de la planitud, 1002, 1003
- Problema del horizonte, 1002, 1003
- Problema del monopolio, 1002–1003
- Profundidad de campo, de la cámara, 860
- Proporcionalidad (\propto), A.1, A.19*t*
- Proteínas, la estructura, la determinación de, 919
- Protón(es)
como bariones, 991, 991*t*
de carga, 514, 515, 518, 518*t*, 958
en la estructura atómica, 514–515, 957–958
masa, 518*t*, 958, 958*t*, A.20
número de, en gramo de materia, 514
quark composición, 996*t*
vida media de, 992, 999
- Puente de conexión, 619, 619*f*
- Punto cercano, alojamiento de los ojos, 861
- Punto de la imagen de espejo esférico, 793–794,
793*f*, 794*f*
- Punto focal (F)
de espejo cóncavo, 795
de la lente delgada, 805–806, 805*f*, 806*f*
- Punto lejano, del alojamiento de los ojos, 861
- Pupila, 860, 861*f*
- Purkinje, fibras, 605*f*, 606
- Q**
- Quark bottom (b), 996, 996*t*
- Quark down (d), 996, 996*t*
- Quark encantado (c), 996, 996*t*
- Quark extraño (s), 996, 996*t*
- Quark top (t), 996, 996*t*
- Quark up (u), 996, 996*t*
- Quarks, 515, 989, 990, 991, 995–997, 996*t*, 1003, 1004
- R**
- Radiación. *Véase también* Radiación electromagnética;
Radiactividad; Radiación térmica
- Radiación de cuerpo negro y la teoría cuántica,
911–913, 912*f*, 913*f*, 928
- Radiación de microondas de fondo, 1000, 1000*f*, 1004
y la teoría cuántica, 910–913, 912*f*, 913*f*, 928
- Radiación ultravioleta (UV), 747*f*, 748
- Radiactividad, 962–971, 976
aplicaciones de, 969–970, 973–976, 976*f*, 990
artificial, 971
constante de desintegración, 963–964, 976
daño de la radiación, 973–975, 974*t*
descubrimiento de, 962, 962*f*
desintegración alfa (α), 962–963, 962*f*, 965–967,
976, 977
desintegración beta (β), 962–963, 962*f*, 967–968,
968*f*, 976, 977
desintegración espontánea (transmutación), 966
desintegración gamma (γ), 962–963, 962*f*,
968–969, 976, 977
límites de exposición, 974–975
natural, 971, 971*f*, 971*t*
natural de fondo, 974
tasa de desintegración (actividad), 963–965,
963*f*, 976
unidades de, 964
vida media ($T_{1/2}$), 963–965, 966, 976
de elementos seleccionados, A.14–A.18
- Radiactividad artificial, 971
- Radiactividad natural, 971, 971*f*, 971*t*
- Radio
antenas de transmisión, 741
sintonización del circuito de, 736
- Radio (Ra)
descubrimiento de, 962, 962*f*
desintegración radiactiva de, 964–965, 966, 966*f*
serie radiactiva, 971, 971*f*
- Radio de Bohr (a_0), 938, 938*f*, A.20
- Radio de curvatura (R), de espejo esférica, 793, 793*f*
- Radio de Schwarzschild, 905
- Radiotelescopio de Arecibo, 723*f*
- Radiotelescopios, 723*f*, 874
- Raíz cuadrada media (RMS) de voltaje, 725–726,
750–751
- Raíz cuadrada media (RMS) en curso, 724–726,
750–751
- Rayo, 513*f*
automóviles, la seguridad de los ocupantes de, 531
desviación por el campo magnético de la Tierra,
657
- Rayos X
aplicaciones, 749, 749*f*, 918
característica, 947–948, 947*f*, 951
corrimiento Compton, 920–922, 921*f*, 928–929
daños en el tejido de, 974, 974*t*
descubrimiento de, 916
difracción por los cristales, 917, 917*f*, 918–920,
918*f*, 919*f*, 928
en el espectro electromagnético, 747*f*, 748
espectro emitido por el tubo de rayos X,
916–918, 917*f*, 928
- Rayos X característicos, 917*f*, 947–948, 947*f*,
951
- Reacción en cadena auto-sostenida, 984–985,
985*f*
- Reacción en cadena, energía nuclear, 985, 985*f*
- Reacciones nucleares, 971–973, 977
endotérmica, 973, 977
exotérmica, 972, 977
fisión, 900, 902–903, 982–986, 983*f*, 1004
fusión, 986–988, 1004
umbral de energía, 973, 977
valores Q , 972–973, 977
- Reacciones nucleares endotérmicas, 973, 977
- Reacciones nucleares exotérmicas, 972, 977
- Reacciones termonucleares de fusión, 987
- Reactancia capacitiva (X_C), 727–728, 751
- Reactancia inductiva (X_L), 728–729, 751
- Reactores (de fisión) nuclear, 900, 984–986, 985*f*,
1004
- Reactores de fusión, 987–988, 1004
- Reactores reproductores, 986
- Recubrimientos no reflejante, 833
- Reflexión
de la luz, 762–763, 763–765, 763*f*, 764*f*, 780
ángulo de reflexión, 764, 764*f*, 780
cambio de fase debido a la, 829–830, 829*f*
en arcoiris, 774–775, 774*f*
por la polarización, 845–846, 846*f*
principio de Huygens y, 775–776, 776*f*
reflexión interna total, 777–780, 777*f*, 778*f*,
781
- Reflexión difusa, 763–764, 763*f*, 764*f*
- Reflexión especular, 763–764, 763*f*, 764*f*
- Reflexión total interna, 777–780, 777*f*, 778*f*, 781
- Refracción de la luz, 762–763, 765–771, 766*f*, 767*f*,
768*f*, 780
ángulo de refracción, 765–766, 766*f*, 780
atmosférica, 804–805, 804*f*
dispersión, 771–775, 771*f*, 772*f*, 773*f*, 774*f*, 781
en lentes delgadas, 805
frecuencia y longitud de onda en, 767–768, 767*f*,
768*f*
- imágenes formadas por
convención de signos, 800, 801*t*
superficie esférica, 801–802, 801*f*, 815–816
superficie plana, 801, 801*f*, 803–804, 803*f*
- índice de refracción, 766–767, 767*t*, 769, 771,
771*f*, 780–781
- ley de Snell, 767–771, 776, 776*f*, 781
principio de Huygens y, 775–776, 776*f*
- Regla de la malla, 625–629, 626*f*, 638
- Regla de la mano derecha
para el campo magnético (regla número 2 de la
mano derecha), 665, 665*f*, 692–695
para el momento magnético, 659
para la fuerza magnética (regla número 1 de la
mano derecha), 653–654, 653*f*, 657, 675
para la propagación de ondas electromagnéticas,
742
- Regla de los nodos, 625–629, 626*f*, 638
- Reglas de Kirchhoff, 625–629, 626*f*, 638
estrategias para resolver problemas, 626–627
- Rejillas de difracción, 839–842, 839*f*, 840*f*, 850
resolución de, 874–875, 878
- Relatividad especial, 888*f*
contracción de la longitud, 895–896, 895*f*, 905
dilatación del tiempo en el, 890–895, 891*f*, 894*f*,
905
energía cinética, la expresión relativista para,
899–900, 901, 906
energía en reposo, 899, 905
conversión de unidades de masa atómica
de/a, 901
de electrones, 901
energía total, 899–900, 901, 906
y el impulso relativista, 900–901, 906
impulso, relativista
expresión para, 897, 905
y la energía total, 900–901, 906
paradoja de los gemelos, 894–895, 894*f*
postulados de la, 888–889, 905
relatividad del tiempo en, 889–890, 890*f*
velocidad relativa en, 898–899, 905
- Relatividad galileana, 885–886, 886*f*
- Relatividad general, 888*f*, 903–905, 903*f*, 904*f*,
1001–1002
- Relojes
atómico, 905
- Resistencia (R)
carga, 617
definición de, 596–597, 608
equivalente









- para resistencias en paralelo, 620–622, 624–625
- para resistencias en serie, 617–620, 618f, 624–625, 638
- estrategias para resolver problemas, 624
- ley de Ohm, 597, 608, 726, 751
- materiales óhmicos y no óhmicos, 597, 597f
- propiedades conductoras y, 597–599, 608
- superconductores y, 604–605, 604f, 604t, 605f
- unidades SI de, 596, 608, A.21
- variación de la temperatura, 599–601, 609
- vista microscópica de, 596–597
- Resistencia(s), 597f
- circuito de símbolo para, 565, 565f, 597
- definición de, 597
- en circuitos de CA, 723–727, 724f, 725f, 750–751
- ángulo de fase, 732t
- impedancia, 732t
- RC circuitos, 732t
- RL circuitos, 732t
- RLC serie de circuitos, 730–734, 730f, 731f, 732t, 751
- en circuitos de CD
- en paralelo, 620–625, 621f, 638
- en serie, 617–620, 618f, 638
- estrategias para resolver problemas, 624
- potencia suministrada a, 602–604, 609
- RC circuitos, 629–633, 629f, 638
- RL circuitos, 707–710, 708f, 712–713
- Resistividad (ρ), 597–599, 598t, 608
- Resistividad eléctrica, 597
- Resolución, 871–875, 878
- de abertura de una sola rendija, 871–872, 871f, 872f, 878
- de apertura circular, 872, 872f, 878
- de rejilla de difracción, 874–875, 878
- Resolución apertura de una rendija, 871–872, 871f, 872f, 878
- Resonadores, en la radiación de cuerpo negro, 913
- en circuitos RLC en serie, 735–737, 735f, 752
- Resonancia magnética nuclear, 975
- energía nuclear, 975
- Retina, 861, 861f
- Retroreflexión, 764
- Riess, Adam, 1001
- Rigidez dieléctrica, 574, 575t
- Riñón (es)
- diálisis, 657
- Roentgen (R), 973
- Röntgen, Wilhelm, 916
- Ruptura de la simetría, 998
- Ruptura dieléctrica, 548f, 574, 574f
- Rutherford, Ernest, 934–935, 935f, 958–959, 958f, 969, 971
- S**
- Schmidt, Brian, 1001
- Schrödinger, Erwin, 925, 925f, 941
- Schwinger, Julián S., 989f
- Seguridad eléctrica, 634–635, 635f
- Seguridad, electricidad, 634–635, 635f
- Selenio (Se)
- configuración del estado base, 946t
- fotoconductividad de, 561, 562f
- Semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS), 859, 860f
- Semiconductores
- coeficiente de temperatura de la resistividad, 600
- propiedades, 515
- Serie de Balmer, 936, 936f, 939–940, 939f, 951
- Serie de Lyman, 936, 939f, 951
- Serie de Paschen, 936, 939f, 951
- SIDS. Véase Síndrome de muerte súbita del lactante
- Sigma (Σ), 991t, 996t
- Signo igual (=), A.1, A.19t
- Silicio (Si)
- coeficiente de temperatura de la resistividad, 598t
- como semiconductores, 515
- configuración del estado base, 946t
- resistividad, 598t
- Símbolos de los elementos del circuito. Véase también Circuitos eléctricos, símbolos
- Simultaneidad, la relatividad especial y, 889–890, 890f
- Síndrome de muerte súbita infantil (SIDS), apnea monitor para, 697, 697f
- Singularidades, 905
- Sinusal (SA), nodo, 605–606, 605f
- Sistema de coordenadas rectangulares. Véase también Sistema cartesiano de coordenadas
- Sistema de sonido, altavoces, 657, 657f
- Sistema nervioso, conducción de la señal eléctrica en, 635–637, 636f, 637f
- Sistema solar. Véanse también Planetas, planetas específicos
- polvo en, tamaño de, 744
- Snell, Willebrord, 768
- Soddy, Frederick, 969
- Sodio (Na)
- configuración del estado base, 946t
- función de trabajo, 915t
- iones, en función de las neuronas, 637
- Sol
- atmósfera, identificación de los gases en, 936
- fusión en, 986–987
- masa de, A.19t
- polarización de la luz a partir de, 846
- producción de energía en, 900
- y el ojo humano, la sensibilidad de longitud de onda de, 749
- Solenoides (electromagnético)
- aplicaciones de, 671, 671f
- campo magnético de, 670–673, 670f, 671f, 673f, 674, 676
- inductancia de, 705–707, 712
- Sólidos
- difracción de rayos X por, 917, 917f, 918–920, 918f, 919f, 928
- difracción de rayos X por, 917, 917f, 918–920, 918f, 919f, 928
- Sólo la imagen resuelta, 871, 872f, 878
- Spin, del electrón, 673, 673f, 943–944, 943f
- Subcapas, atómicas, 942, 942t
- nivel de energía de hidrógeno, 938–939, 939f
- principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945t, 951
- Suma (Σ), A.2, A.19t
- Superconductores, 604–605, 604f, 604t, 605f
- Superficie cerrada, definición de, 533
- Superficie esférica, las imágenes formadas por refracción en, 801–802, 801f, 801t, 802–803, 815–816
- Superficie plana, imágenes formadas por la refracción de, 801, 801f, 803–804, 803f
- Superficies equipotenciales, 559–560, 560f, 580
- Sustancias ferromagnéticas, 673, 674, 674f
- Sustancias paramagnéticas, 674
- T**
- Tabla periódica, 946–947, 951
- Taquicardia, 607, 608t
- Tasa de decaimiento (actividad, R), 963–965, 963f, 976
- Tau (τ^-), 991t, 992
- Teclas de la computadora, condensadores de, 564, 564f
- Teflón
- constante dieléctrica, 575t
- rigidez dieléctrica, 575t
- Telescopio espacial Hubble, 750, 869f, 870–871, 870f
- Telescopio Hale, 870f, 874
- Telescopios, 868–871, 878
- ampliación angular de, 869, 878
- de reflexión, 868–871, 870f
- de refracción, 868–869, 869f
- espacio y polvo, 874
- espejos parabólicos en, 814
- radio, 874
- resolución de, 874 (Véase también Resolución)
- telescopio espacial Hubble, 750, 869f, 870–871, 870f, 874
- telescopio Hale, 870f, 874
- telescopios Keck, 870
- Telescopios de reflexión, 868–871, 870f
- Telescopios de refracción, 868–869, 869f
- Telescopios Keck, 859f, 870
- Televisión
- interferencia, desde aviones que pasan, 828
- tubo de imagen, 671, 671f
- y resistencia eléctrica, 599–601, 609
- Temperatura crítica, de superconductor, 604, 604f, 604t
- Teoría de cuerdas, 1003
- Teoría de la Quinta esencia, 1003
- Teoría del Big Bang, 999–1000, 999f, 1002, 1004
- Teoría del campo unificado, 888f. Véase también Teoría de la gran unificación
- Teoría electrodébil, 997–998
- Teoría electromagnética, los conflictos con la relatividad galileana, 886–887
- Terapia de campo eléctrico para el cáncer, 726–727
- de resistencia, 600
- Tesla (T), 653, 675
- conversión a/de Gauss, 652
- Tesla, Nikola, 732f
- Tetracloruro de carbono, índice de refracción, 767t
- Thomson, Joseph John, 934–935, 935f
- Tiempo (t)
- adecuado, 892, 905
- en la relatividad especial
- dilatación de, 890–895, 891f, 894f, 905
- relatividad de los intervalos de tiempo, 889–890, 890f
- en la relatividad general, 904, 905
- la gravedad y, 904, 905
- unidades de, A.21
- Tiempo adecuado, 892, 905
- Tiempo de confinamiento de plasma (t), 987–988, 1004
- Tierra, eléctrica
- definición, 516
- símbolo de, 601, 601f
- Tierra. Véase también Atmósfera
- campo magnético de, 650–652, 651f, 653, 657–658, 690
- como depósito de electrones, 516
- distancia a la Luna desde, A.19t
- distancia al Sol desde la, A.19t
- masa de, A.19t
- radio de, A.19t
- Tierras raras, 649
- Timina, 920
- Titanato de estroncio

- constante dieléctrica, 575*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
 Titanio (Ti), configuración del estado fundamental, 946*t*
 Tokamaks, 671, 671*f*, 988, 988*f*
 Tomografía por emisión de positrones (PET), 990
 Tomonaga, Shinichiro, 989*f*
 Tóner, en la xerografía, 562, 562*f*
 Torio (Th), serie radiactiva, 971, 971*t*
 dirección de
 lazo de corriente en el campo magnético, 658–661, 659*f*, 675
 MCAT guía de estudio para, A.32–A.35
 para cargar un capacitor, 571–572, 571*f*
 unidades de, A.21
 y la energía potencial eléctrica, 548–552, 549*f*
 Trampa de Penning, 662
 Transformadores
 CA, 737–739, 737*f*, 752
 ideal 737
 Transformadores elevadores, 737, 752
 Transformadores ideales, 737
 Transformadores reductores, 737, 752
 Transición microscopio electrónico, 924–925, 924*f*
 Transistor, como dispositivo de no óhmico, 597
 Transmutación (decaimiento espontáneo), 966
 Tratamiento del cáncer, la terapia de campo eléctrico, 726–727
 Trazadores radiactivos, 975
 Trigonometría, A.13
 Tritio, 958, 1004
 Trueno, causa de, 513*f*
 Tubo de imagen, de la televisión, 671, 671*f*
 Tubos de rayos catódicos, 671*f*
 Tubos de rayos X, espectro emitido por, 916–917, 917*f*, 928
 Tunelización cuántica, 986
 Tungsteno
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 resistividad, 598*t*
- U**
- Uhlenbeck, George, 943
 Umbral de energía, de una reacción nuclear, 973, 977
 Umbral de voltaje, emisión de rayos X, 917
 Unidad de masa unificada (u), 958
 Unidad fundamental de carga eléctrica (e), 515, 531–532, 539
 conversión de, a energía en reposo, 901
 Unidades. *Véase también* Sistema de unidades
 gaussiano (cgs); SI (Sistema Internacional) de unidades de Estados Unidos; Unidades usuales
 de exposición a la radiación, 974, 974*t*
 símbolos para, A.19*t*
 Unidades de masa atómica (u), A.20
 conversión de, a energía en reposo, 901
 Unidades SI (Sistema Internacional), A.21
 actividad (tasa de decaimiento), 964
 cambio en la energía potencial eléctrica, 549
 campo eléctrico, 522, 553
 campo magnético, 653, 675, A.21
 capacitancia, 563, 580, A.21
 carga eléctrica, 515, 517, 667, A.21
 corriente eléctrica, 667, A.21
 instantánea, 591
 promedio, 591
 diferencia de potencial eléctrico, 552, 580
 energía, A.21
 fem, 616
 flujo eléctrico, 533
 flujo magnético, 689, A.21
 fuerza, A.21
 inductancia, 706, 712, A.21
 intensidad luminosa, A.21
 longitud, 959, A.21
 masa, 901, 958, A.20, A.21
 potencia, 602, A.21
 potencial eléctrico, 553, A.21
 presión, A.21
 resistencia, 596, 608, A.21
 resistividad, 598, 608
 temperatura, A.21
 tiempo, A.21
 trabajo, A.21
- Universo
 destino de, 1002, 1002*f*
 expansión de, 750, 1000, 1001
 geometría plana de, 1002, 1002*f*
 modelo inflacionario de, 1003
 origen de, 999–1000, 999*f*, 1002
 radiación de microondas de fondo, 1000, 1000*f*, 1004
- Uranio (U)
 como combustible nuclear, 984–985, 985*f*
 fisión de, 900, 902–903, 982–984, 983*f*
 serie radiactiva, 971
- Urano
- UV. *Véase* Ultravioleta (UV)
- V**
- Valor absoluto ($||$), A.2, A.3, A.19*t*
 Valores Q , 972–973, 976
 Vanadio (V), del estado fundamental de configuración, 946*t*
 Varillas de control, de un reactor nuclear, 985, 985*f*
 Vector(es)
 MCAT guía de estudio para, A.22–A.23
 normal, 533
 Vector de campo eléctrico (\vec{E}), 526
 Vector normal, 533
 Velocidad
 angular ($\vec{\omega}$)
 en la relatividad especial, 898–899, 905
 Velocidad de deriva, 593–595, 593*f*, 608
 Velocidad de la luz, de (c), A.20
 como una constante, 888–889, 905
 Experimento Michelson-Morley, 887–888, 888*f*, 889
 sistemas inerciales de referencia, 886–887, 887*f*
 teoría del viento de éter, 887–888, 887*f*, 888*f*
 en la relatividad especial, 898–899, 905
 como constante, 888–889, 905
 experimento Michelson-Morley, 887–888, 887*f*, 888*f*
 y la teoría del viento de éter, 887–888, 887*f*, 888*f*
 y los sistemas inerciales de referencia, 886–887, 887*f*
 Venus
 campo magnético de, 651
 Viajes espaciales
 catapulta espacial, 698
 velas solares, 745–746
 y la mecánica relativista, 892, 894–895, 894*f*, 899
 Vida media ($T_{1/2}$), 963–965, 966, 976
 de los elementos seleccionados, A.14–A.18
 Vidrio
 ángulo de Brewster para, 846
 como aislante, 515
 índice de refracción, 767*t*, 771*f*
 resistividad, 598*t*
 Vidrio Pyrex
 constante dieléctrica, 575*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
 Viento de éter, 887–888, 887*f*, 888*f*
 Volta, Alessandro, 590
 Voltaje eficaz, 725–726, 750–751
 Voltaje en los bornes de la batería, 638
 Voltaje. *Véase también* Potencial eléctrico
 Voltímetro, 725, 750
 Volts (V), 553, 580, 616
 Volumen (V)
 de las formas geométricas comunes, A.12*t*
 Von Laue, Max, 916
- W**
- Watson, J.D., 920
 Watt (W), 602
 Wavelets, 775
 Weber (Wb), 689
 Weber por metro cuadrado (Wb/m²), 653, 675
 Wilkins, Maurice, 920
 Wilson, Charles, 921*f*
 Wilson, Robert W., 1000, 1000*f*
 WIMP (partícula masiva de interacción débil), 1001
- X**
- Xenón (Xe), como gas noble, 946
 Xerografía, 561–562, 562*f*
 Xi (Ξ), 991, 991*t*, 996*t*
- Y**
- Yodo (I), como trazador radiactivo, 975
 Young, Thomas, 762
- Z**
- Zinc (Zn)
 como superconductor, 604, 604*t*
 configuración del estado base, 946*t*
 función de trabajo, 915*t*
 Zona de aceptación, de cable fibra óptica, 780
 Zónulas, 861
 Zwicky, Fritz, 1000












CARTA PEDAGÓGICA DE COLOR









Mecánica y termodinámica

Vectores desplazamiento y de posición	
Desplazamiento y posición de los vectores de componentes	
Vectores velocidad lineal (\vec{v}) y angular ($\vec{\omega}$)	
Vectores componentes de velocidad	
Vectores fuerza (\vec{F})	
Vectores componentes de fuerza	
Vectores aceleración (\vec{a})	
Vectores componentes de aceleración	
Flechas de transferencia de energía	
	
	
Proceso de la flecha	






Vectores cantidad de movimiento lineal (\vec{p}) y angular (\vec{L})	
Momento lineal y angular de vectores de componentes	
Vectores torque ($\vec{\tau}$)	
Vectores componentes torque	
Esquema lineal o direcciones de rotación de movimiento	
Flecha de rotación dimensional	
Ampliación de la flecha	
Resortes	
Poleas	





Electricidad y magnetismo

Campos eléctricos	
Vectores de campo eléctrico	
Vectores de campo eléctrico de componentes	
Campos magnéticos	
Vectores de campo magnético	
Vectores de campo magnético de componentes	
Cargas positivas	
Cargas negativas	
Resistores	
Baterías y otros suministros de potencia CD	
Interruptores	

Capacitores	
Inductores (bobinas)	
Voltímetros	
Amperímetros	
Fuentes CA	
Bombillas	
Símbolo de tierra	
Corriente	

Luz y óptica

Rayos de luz	
Rayo de luz focal	
Rayo de luz central	
Lente convergente	
Lente divergente	

Espejo	
Espejo curvo	
Objetos	
Imágenes	

▪ FACTORES DE CONVERSIÓN

Longitud

$$1 \text{ m} = 39.37 \text{ pulg} = 3.281 \text{ pies}$$

$$1 \text{ pulg} = 2.54 \text{ cm (exacto)}$$

$$1 \text{ km} = 0.621 \text{ mi}$$

$$1 \text{ mi} = 5\,280 \text{ pies} = 1.609 \text{ km}$$

$$1 \text{ año luz (a-l)} = 9.461 \times 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ angstrom (\AA)} = 10^{-10} \text{ m}$$

Masa

$$1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g} = 6.85 \times 10^{-2} \text{ slug}$$

$$1 \text{ slug} = 14.59 \text{ kg}$$

$$1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

Tiempo

$$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$$

$$1 \text{ h} = 3\,600 \text{ s}$$

$$1 \text{ día} = 24 \text{ h} = 1.44 \times 10^3 \text{ min} = 8.64 \times 10^4 \text{ s}$$

$$1 \text{ año} = 365.242 \text{ días} = 3.156 \times 10^7 \text{ s}$$

Volumen

$$1 \text{ L} = 1\,000 \text{ cm}^3 = 0.035\,3 \text{ pies}^3$$

$$1 \text{ pies}^3 = 2.832 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ gal} = 3.786 \text{ L} = 231 \text{ pulg}^3$$

Ángulo

$$180^\circ = \pi \text{ rad}$$

$$1 \text{ rad} = 57.30^\circ$$

$$1^\circ = 60 \text{ min} = 1.745 \times 10^{-2} \text{ rad}$$

Rapidez

$$1 \text{ km/h} = 0.278 \text{ m/s} = 0.621 \text{ mi/h}$$

$$1 \text{ m/s} = 2.237 \text{ mi/h} = 3.281 \text{ pies/s}$$

$$1 \text{ mi/h} = 1.61 \text{ km/h} = 0.447 \text{ m/s} = 1.47 \text{ pies/s}$$

Fuerza

$$1 \text{ N} = 0.224\,8 \text{ lb} = 10^5 \text{ dinas}$$

$$1 \text{ lb} = 4.448 \text{ N}$$

$$1 \text{ dina} = 10^{-5} \text{ N} = 2.248 \times 10^{-6} \text{ lb}$$

Trabajo y energía

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 0.738 \text{ pies} \cdot \text{lb} = 0.239 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1 \text{ pies} \cdot \text{lb} = 1.356 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 1.054 \times 10^3 \text{ J} = 252 \text{ cal}$$

$$1 \text{ J} = 6.24 \times 10^{18} \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.60 \times 10^6 \text{ J}$$

Presión

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ (o Pa)} = 14.70 \text{ lb/pulg}^2$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1.45 \times 10^{-4} \text{ lb/pulg}^2$$

$$1 \text{ lb/pulg}^2 = 6.895 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

Potencia

$$1 \text{ hp} = 550 \text{ pies} \cdot \text{lb/s} = 0.746 \text{ kW}$$

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 0.738 \text{ pies} \cdot \text{lb/s}$$

$$1 \text{ Btu/h} = 0.293 \text{ W}$$

■ CONSTANTES FÍSICAS

Cantidad	Símbolo	Valor	Unidad SI
Número de Avogadro	N_A	6.02×10^{23}	partículas/mol
Radio de Bohr	a_0	5.29×10^{-11}	m
Constante de Boltzmann	k_B	1.38×10^{-23}	J/K
Constante de Coulomb, $1/4\pi\epsilon_0$	k_e	8.99×10^9	$N \cdot m^2/C^2$
Longitud de onda Compton de electrón	$h/m_e c$	2.43×10^{-12}	m
Masa de electrón	m_e	9.11×10^{-31} 5.49×10^{-4} $0.511 \text{ MeV}/c^2$	kg u
Carga elemental	e	1.60×10^{-19}	C
Constante gravitacional	G	6.67×10^{-11}	$N \cdot m^2/kg^2$
Masa de la Tierra	M_E	5.98×10^{24}	kg
Masa de la Luna	M_M	7.36×10^{22}	kg
Volumen molar de gas ideal a TPE	V	22.4 2.24×10^{-2}	L/mol m^3/mol
Masa de neutrón	m_n	$1.674\,93 \times 10^{-27}$ 1.008 665 $939.565 \text{ MeV}/c^2$	kg u
Permeabilidad de espacio libre	μ_0	1.26×10^{-6} $(4\pi \times 10^{-7} \text{ exacto})$	$T \cdot m/A$
Permitividad del espacio libre	ϵ_0	8.85×10^{-12}	$C^2/N \cdot m^2$
Constante de Planck	h $\hbar = h/2\pi$	6.63×10^{-34} 1.05×10^{-34}	J · s J · s
Masa de protón	m_p	$1.672\,62 \times 10^{-27}$ 1.007 276 $938.272 \text{ MeV}/c^2$	kg u
Radio de la Tierra (en el ecuador)	R_E	6.38×10^6	m
Radio de la Luna	R_M	1.74×10^6	m
Constante de Rydberg	R_H	1.10×10^7	m^{-1}
Rapidez de la luz en el vacío	c	3.00×10^8	m/s
Aceleración estándar de caída libre	g	9.80	m/s^2
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5.67×10^{-8}	$W/m^2 \cdot K^4$
Constante universal de gas	R	8.31	J/mol · K

Los valores que se presentan en esta tabla son los que se usan en los cálculos del texto. Por lo general, las constantes físicas se conocen con mucha mejor precisión.

Grupo I		Grupo II		Elementos de transición																		Grupo III	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI	Grupo VII	Grupo VIII																																																																
H 1 1.007 9 1s	Li 3 6.941 2s ¹	Be 4 9.012 2 2s ²	B 5 10.811 2p ¹	C 6 12.011 2p ²	N 7 14.007 2p ³	O 8 15.999 2p ⁴	F 9 18.998 2p ⁵	Ne 10 20.180 2p ⁶	Na 11 22.990 3s ¹	Mg 12 24.305 3s ²	Al 13 26.982 3p ¹	Si 14 28.086 3p ²	P 15 30.974 3p ³	S 16 32.066 3p ⁴	Cl 17 35.453 3p ⁵	Ar 18 39.948 3p ⁶	K 19 39.098 4s ¹	Ca 20 40.078 4s ²	Sc 21 44.956 3d ¹ 4s ²	Ti 22 47.867 3d ² 4s ²	V 23 50.942 3d ³ 4s ²	Cr 24 51.996 3d ⁵ 4s ¹	Mn 25 54.938 3d ⁵ 4s ²	Fe 26 55.845 3d ⁶ 4s ²	Co 27 58.933 3d ⁷ 4s ²	Ni 28 58.693 3d ⁸ 4s ²	Cu 29 63.546 3d ¹⁰ 4s ¹	Zn 30 65.41 3d ¹⁰ 4s ²	Ga 31 69.723 4p ¹	Ge 32 72.64 4p ²	As 33 74.922 4p ³	Se 34 78.96 4p ⁴	Br 35 79.904 4p ⁵	Kr 36 83.80 4p ⁶	Rb 37 85.468 5s ¹	Sr 38 87.62 5s ²	Y 39 88.906 4d ¹ 5s ²	Zr 40 91.224 4d ² 5s ²	Nb 41 92.906 4d ⁴ 5s ¹	Mo 42 95.94 4d ⁵ 5s ¹	Tc 43 (98) 4d ⁵ 5s ²	Ru 44 101.07 4d ⁷ 5s ¹	Rh 45 102.91 4d ⁸ 5s ¹	Pd 46 106.42 4d ¹⁰	Ag 47 107.87 4d ¹⁰ 5s ¹	Cd 48 112.41 4d ¹⁰ 5s ²	In 49 114.82 5p ¹	Sn 50 118.71 5p ²	Sb 51 121.76 5p ³	Te 52 127.60 5p ⁴	I 53 126.90 5p ⁵	Xe 54 131.29 5p ⁶	Cs 55 132.91 6s ¹	Ba 56 137.33 6s ²	Hf 72 178.49 5d ² 6s ²	Ta 73 180.95 5d ³ 6s ²	W 74 183.84 5d ⁴ 6s ²	Re 75 186.21 5d ⁵ 6s ²	Os 76 192.22 5d ⁶ 6s ²	Pt 77 195.08 5d ⁹ 6s ¹	Au 79 196.97 5d ¹⁰ 6s ¹	Hg 80 200.59 5d ¹⁰ 6s ²	Tl 81 204.38 6p ¹	Pb 82 207.2 6p ²	Bi 83 208.98 6p ³	Po 84 (210) 6p ⁴	At 85 (222) 6p ⁵	Rn 86 (222) 6p ⁶	Fr 87 (223) 7s ¹	Ra 88 (226) 7s ²	Rf 104 (261) 6d ² 7s ²	Db 105 (262) 6d ³ 7s ²	Sg 106 (266) 6d ⁴ 7s ²	Bh 107 (264) 6d ⁵ 7s ²	Hs 108 (277) 6d ⁶ 7s ²	Mt 109 (268) 6d ⁷ 7s ²	Ds 110 (271) 6d ⁸ 7s ²	Rg 111 (272) 6d ⁹ 7s ²	La 57 138.91 5d ¹ 6s ²	Ce 58 140.12 5d ¹ 4f ¹ 6s ²	Pr 59 140.91 4f ³ 6s ²	Nd 60 144.24 4f ⁴ 6s ²	Pm 61 (145) 4f ⁵ 6s ²	Sm 62 150.36 4f ⁶ 6s ²	Eu 63 151.96 4f ⁷ 6s ²	Gd 64 157.25 4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	Tb 65 158.93 4f ⁹ 5d ¹ 6s ²	Er 66 162.50 4f ¹⁰ 6s ²	Ho 67 164.93 4f ¹¹ 6s ²	Yb 68 173.04 4f ¹⁴ 6s ²	Lu 71 174.97 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²

Símbolo — **Ca** 20 — Número atómico
 Masa atómica† — 40.078
 Configuración electrónica — 4s²

*Serie de lantánidos

**Serie de actínidos

Nota: Los valores de masa atómica dados se promedian sobre isótopos en los porcentajes en los que existen en la naturaleza.

† Para un elemento inestable, entre paréntesis se proporciona el número de masa del isótopo conocido más estable.

‡ Los elementos 114, 116 y 117 todavía no tienen nombre.

††† Para una descripción de los datos atómicos, visite physics.nist.gov/PhysRefData/elements/por_text.html

Mientras que la física puede parecer difícil, su verdadera calidad es la simplicidad de las teorías físicas fundamentales, las teorías y conceptos que pueden enriquecer la perspectiva del mundo que te rodea. *Fundamentos de Física*, volumen 2, novena edición, ofrece una estrategia clara para la conexión de esas teorías con una constante de resolución de problemas, cuidando reforzar esta metodología a lo largo del texto y la conexión a ejemplos del mundo real.

Características

- Ejemplos resueltos. Para esta novena edición, se han revisado todos los ejemplos prácticos, las mejoras realizadas, y se añadieron o revisaron ejemplos finales, preguntas y ejercicios. Las preguntas por lo general requieren una respuesta conceptual o determinación, pero también incluir los conocimientos que requieren estimaciones de las relaciones entre conceptos. Las respuestas a las preguntas de ejemplo se pueden encontrar en la parte final del libro.
- Estrategias de resolución de problemas. Una estrategia general para resolver problemas a seguir por el estudiante se describe al final del capítulo 1. Esta estrategia ofrece a los estudiantes un proceso estructurado para resolver problemas. En la mayoría de los capítulos hay más estrategias y sugerencias específicas que se incluyen para la solución de los tipos de problemas que aparecen en ambos ejemplos resueltos y en los problemas de final de capítulo. Esta característica ayuda a los estudiantes a identificar los pasos esenciales en la solución de problemas y aumenta sus habilidades para este fin.
- Los últimos hallazgos en la investigación y educación de la Física se han integrado a lo largo del texto, poniendo más énfasis en el pensamiento crítico y conceptual. Los *Exámenes rápidos* dan a los estudiantes oportunidades para probar su comprensión del concepto físico presentado en el texto. Recuadros con *TIPs* o consejos ayudan a los estudiantes a evitar malentendidos comunes. Secciones de *Física aplicada* analizan principios clave sin cálculos de modo que los estudiantes pueden esbozar fácilmente conexiones al mundo real.
- Muchos de los capítulos incluyen secciones y problemas que tienen la intención de exponer al estudiante a las diversas aplicaciones prácticas e interesantes de principios físicos. Temas y problemas relacionados con la conexión de la Física a las ciencias de la vida se identifican con un icono **BIO** para ayudar a motivar a los estudiantes a dominar el contenido.

