

Física

para la ciencia
y la tecnología

6ª edición

Tipler | Mosca

Volumen 2A

Electricidad y magnetismo

EDITORIAL REVERTÉ

Abreviaturas de unidades

A	ampère	H	henry	nm	nanómetro (10 ⁻⁹ m)
Å	ångström (10 ⁻¹⁰ m)	h	hora	pt	pinta
atm	atmósfera	Hz	hertz	qt	quart
Btu	unidad térmica inglesa	in	pulgada	rev	revolución
Bq	becquerel	J	joule	R	roentgen
C	coulomb	K	kelvin	Sv	sievert
°C	grados centígrados	kg	kilogramo	s	segundo
cal	caloría	km	kilómetro	T	tesla
Ci	curie	keV	kilo-electronvolt	u	unidad de masa unificada
cm	centímetro	lb	libra	V	volt
dyn	dina	L	litro	W	watt
eV	electronvolt	m	metro	Wb	weber
°F	grados Fahrenheit	MeV	mega-electronvolt	y	año
fm	femtometro, fermi (10 ⁻¹⁵ m)	Mm	megametro (10 ⁶ m)	yd	yarda
ft	pie	mi	milla	μm	micrometro (10 ⁻⁶ m)
Gm	gigametro (10 ⁹ m)	min	minuto	μs	microsegundo
G	gauss	mm	milímetro	μC	microcoulomb
Gy	gray	ms	milisegundo	Ω	ohm
g	gramo	N	newton		

Factores de conversión

<i>Longitud</i> 1 m = 39,37 in = 3,281 ft = 1,094 yd 1 m = 10 ¹⁵ fm = 10 ¹⁰ Å = 10 ⁹ nm 1 km = 0,6214 mi 1 mi = 5280 ft = 1,609 km 1 año-luz= 1 c · a = 9,461 × 10 ¹⁵ m 1 in = 2,540 cm	<i>Fuerza–presión</i> 1 N = 10 ⁵ dina = 0,2248 lb 1 lb = 4,448 N 1 atm = 101,3 kPa = 1,013 bar = 76,00 cmHg = 14,70 lb/in ²
<i>Volumen</i> 1 L = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³ = 1,057 qt	<i>Masa</i> 1 u = [(10 ⁻³ mol ⁻¹)/N _A] kg = 1,661 × 10 ⁻²⁷ kg 1 tonelada = 10 ³ kg = 1 Mg 1 slug = 14,59 kg 1 kg ≈ 2,205 lb
<i>Tiempo</i> 1 h = 3600 s = 3,6 ks 1 a = 365,24 d = 3,156 × 10 ⁷ s	<i>Energía–Potencia</i> 1 J = 10 ⁷ erg = 0,7376 ft · lb = 9,869 × 10 ⁻³ atm · L 1 kW · h = 3,6 MJ 1 cal = 4,184 J = 4,129 × 10 ⁻² atm · L 1 atm · L = 101,325 J = 24,22 cal 1 eV = 1,602 × 10 ⁻¹⁹ J 1 Btu = 778 ft · lb = 252 cal = 1054 J 1 caballo de vapor = 550 ft · lb/s = 746 W
<i>Velocidad</i> 1 km/h = 0,278 m/s = 0,6214 mi/h 1 ft/s = 0,3048 m/s = 0,6818 mi/h	<i>Conductividad térmica</i> 1 W/(m · K) = 6,938 Btu · in/(h · ft ² · °F)
<i>Ángulo y velocidad angular</i> 1 rev = 2π rad = 360° 1 rad = 57,30° 1 rev/min = 0,1047 rad/s	<i>Campo magnético</i> 1 T = 10 ⁴ G
	<i>Viscosidad</i> 1 Pa · s = 10 poise

SEXTA EDICIÓN

FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

VOLUMEN 2A

Electricidad y magnetismo

SEXTA EDICIÓN

FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

VOLUMEN 2A

Electricidad y magnetismo

Paul A. Tipler
Gene Mosca



**EDITORIAL
REVERTÉ**

Barcelona • Bogotá • Buenos Aires • México

Título de la obra original:

Physics for Scientists and Engineers, Sixth Edition.

Edición original en lengua inglesa publicada por

W. H. FREEMAN AND COMPANY, New York and Basingstoke

41 Madison Avenue, New York (NY) – U.S.A.

Copyright © 2008 by W. H. Freeman and Company. All Rights Reserved

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A., 2010, 2012, 2015, 2019, 2020

Edición en papel

© Editorial Reverté, S. A., 2010, 2012, 2015, 2019, 2020

ISBN: 978-84-291-4424-6 Volumen 2A

ISBN: 978-84-291-4428-4 Obra completa

Edición e-book (PDF)

© Editorial Reverté, S. A., 2021

ISBN: 978-84-291-9601-6

Versión española:

COORDINADOR Y TRADUCTOR

Dr. José Casas-Vázquez

Catedrático de Física de la Materia Condensada

TRADUCTORES

Dr. Albert Bramon Planas

Catedrático de Física Teórica

Dr. Josep Enric Llebot Rabagliati

Catedrático de Física de la Materia Condensada

Dr. Fernando M. López Aguilar

Catedrático de Física Aplicada

Dr. Vicenç Méndez López

Profesor Agregado de Física de la Materia Condensada

Departamento de Física

Universidad Autónoma de Barcelona

España

MAQUETACIÓN: REVERTÉ-AGUILAR

CORRECCIÓN DE ESTILO: CARLOS CISTUÉ SOLÁ

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

Tel: (34) 93 419 33 36

08029 Barcelona. ESPAÑA

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

PT: Para Claudia

GM: Para Vivian

Índice abreviado de la obra completa

VOLUMEN 1

Volumen 1A

PARTE I MECÁNICA

- | | |
|----|---|
| 1 | Medida y vectores / 1 |
| 2 | El movimiento en una dimensión / 27 |
| 3 | Movimiento en dos y tres dimensiones / 63 |
| 4 | Leyes de Newton / 93 |
| 5 | Aplicaciones adicionales de las leyes de Newton / 127 |
| 6 | Trabajo y energía cinética / 173 |
| 7 | Conservación de la energía / 201 |
| 8 | Conservación del momento lineal / 247 |
| 9 | Rotación / 289 |
| 10 | Momento angular / 331 |
| 11 | Gravedad / 363 |
| 12 | Equilibrio estático y elasticidad / 397 |
| 13 | Fluidos / 423 |



Thinkstock/Alamy

Volumen 1B

PARTE II OSCILACIONES Y ONDAS

- | | |
|----|---|
| 14 | Oscilaciones / 457 |
| 15 | Movimiento ondulatorio / 495 |
| 16 | Superposición y ondas estacionarias / 533 |

Volumen 1C

PARTE III TERMODINÁMICA

- | | |
|----|--|
| 17 | Temperatura y teoría cinética de los gases / 563 |
| 18 | Calor y primer principio de la termodinámica / 591 |
| 19 | Segundo principio de la termodinámica / 629 |
| 20 | Propiedades y procesos térmicos / 665 |
| R | Relatividad especial / R.1 |

VOLUMEN 2

Volumen 2A

PARTE IV ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

21	Campo eléctrico I: distribuciones discretas de carga / 693
22	Campo eléctrico II: distribuciones continuas de carga / 727
23	Potencial eléctrico / 763
24	Capacidad / 801
25	Corriente eléctrica y circuitos de corriente continua / 839
26	El campo magnético / 887
27	Fuentes del campo magnético / 917
28	Inducción magnética / 959
29	Circuitos de corriente alterna / 995
30	Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas / 1029

Volumen 2B

PARTE V LUZ

31	Propiedades de la luz / 1055
32	Imágenes ópticas / 1097
33	Interferencia y difracción / 1141

FÍSICA MODERNA

R	Relatividad especial / R.1
---	----------------------------

PARTE VI MECÁNICA CUÁNTICA, RELATIVIDAD Y ESTRUCTURA DE LA MATERIA

34	Dualidad onda-partícula y física cuántica / 1173
35	Aplicaciones de la ecuación de Schrödinger / 1203
36	Átomos / 1227
37	Moléculas / 1261
38	Sólidos / 1281
39	Relatividad / 1319
40	Física nuclear / 1357
41	Las partículas elementales y el origen del universo / 1389

APÉNDICES Y RESPUESTAS

Apéndice A	Unidades SI y factores de conversión / AP.1
Apéndice B	Datos numéricos / AP.3
Apéndice C	Tabla periódica de los elementos / AP.6
Apéndice de matemáticas	/ M.1
Respuestas de los problemas impares del final de los capítulos	/ A.1

Índice analítico

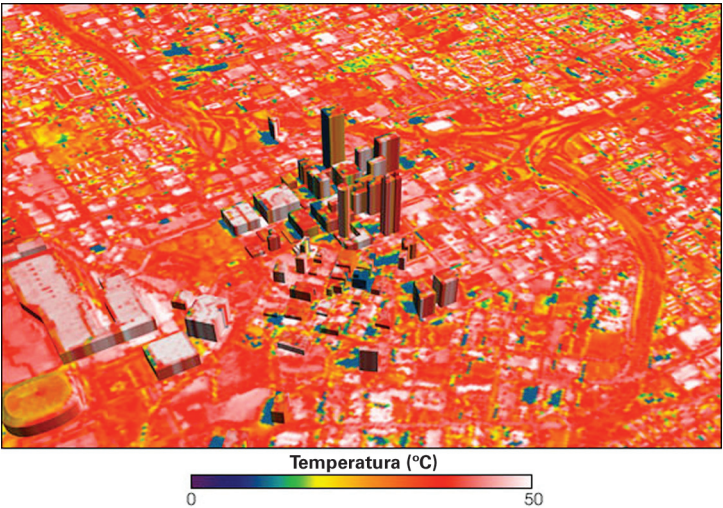
Volumen 2A

Prefacio	xiii
Acerca de los autores	xxii
* Materias opcionales	

PARTE IV ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Capítulo 21 CAMPO ELÉCTRICO I: DISTRIBUCIONES DISCRETAS DE CARGA / 693

21.1	Carga eléctrica	694
21.2	Conductores y aislantes	697



NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

21.3	Ley de Coulomb	699
21.4	El campo eléctrico	704
21.5	Líneas de campo eléctrico	711
21.6	Acción del campo eléctrico sobre las cargas	714

Temas de actualidad en Física: Recubrimiento industrial con polvo electrostático / 719

Resumen	720
Problemas	721

Capítulo 22 CAMPO ELÉCTRICO II: DISTRIBUCIONES CONTINUAS DE CARGA / 727

22.1	Cálculo del campo eléctrico $\vec{E}$ mediante la ley de Coulomb	728
22.2	Ley de Gauss	738
22.3	Cálculo del campo eléctrico $\vec{E}$ con la ley de Gauss utilizando la simetría	742
22.4	Discontinuidad de E_n	749
22.5	Carga y campo en la superficie de los conductores	750
*22.6	Equivalencia de la ley de Gauss y la ley de Coulomb en Electrostática	753

Temas de actualidad en Física:

Distribución de carga—caliente y frío / 754	
Resumen	755
Problemas	756

Capítulo 23

POTENCIAL ELÉCTRICO / 763

23.1	Diferencia de potencial	764
23.2	Potencial debido a un sistema de cargas puntuales	767
23.3	Determinación del campo eléctrico a partir del potencial	772
23.4	Cálculo de V para distribuciones continuas de carga	773
23.5	Superficies equipotenciales	781
23.6	Energía potencial electrostática	787
Temas de actualidad en Física:		
Relámpagos—Campos de atracción / 791		
	Resumen	792
	Problemas	794

Capítulo 24

CAPACIDAD / 801

24.1	Capacidad	802
24.2	Almacenamiento de la energía eléctrica	806
24.3	Condensadores, baterías y circuitos	810
24.4	Dieléctricos	817
24.5	Estructura molecular de un dieléctrico	824
Temas de actualidad en Física:		
Cambios en Condensadores—Carga directa / 828		
	Resumen	829
	Problemas	831

Capítulo 25

CORRIENTE ELÉCTRICA Y CIRCUITOS DE CORRIENTE CONTINUA / 839

25.1	Corriente y movimiento de cargas	840
25.2	Resistencia y ley de Ohm	844
25.3	La energía en los circuitos eléctricos	849
25.4	Asociaciones de resistencias	854
25.5	Reglas de Kirchhoff	860
25.6	Circuitos RC	868
Temas de actualidad en Física:		
Sistemas eléctricos de los automóviles: innovación en la conducción / 874		
	Resumen	875
	Problemas	877

Capítulo 26

EL CAMPO MAGNÉTICO / 887

26.1	Fuerza ejercida por un campo magnético	888
26.2	Movimiento de una carga puntual en un campo magnético	892
26.3	Momentos de fuerza sobre espiras de corriente e imanes	900
26.4	Efecto Hall	904
Temas de actualidad en Física:		
Cambios en los magnetismos de la Tierra y el Sol / 908		
	Resumen	909
	Problemas	910

Capítulo 27

FUENTES DEL CAMPO MAGNÉTICO / 917

27.1	Campo magnético creado por cargas puntuales en movimiento	918
27.2	Campo magnético creado por corrientes eléctricas: ley de Biot y Savart	919
27.3	Ley de Gauss para el magnetismo	932
27.4	Ley de Ampère	933
27.5	El magnetismo en la materia	937
Temas de actualidad en Física:		
Aplicaciones del solenoide / 947		
	Resumen	948
	Problemas	950

Capítulo 28

INDUCCIÓN MAGNÉTICA / 959

28.1	Flujo magnético	960
28.2	Fem inducida y ley de Faraday	961
28.3	Ley de Lenz	965
28.4	Fem de movimiento	969
28.5	Corrientes de Foucault o turbillonarias	974
28.6	Inductancia	974
28.7	Energía magnética	977
*28.8	Circuitos RL	979
*28.9	Propiedades magnéticas de los superconductores	983

<u>Temas de actualidad en Física:</u>		
La promesa de los superconductores / 985		
Resumen	986	
Problemas	988	
Capítulo 29		
CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA / 995		
29.1	Corriente alterna en una resistencia	996
29.2	Circuitos de corriente alterna	999
*29.3	El transformador	1004
*29.4	Circuitos <i>LC</i> y <i>LCR</i> sin generador	1007
*29.5	Fasores	1010
*29.6	Circuitos <i>LCR</i> con generador	1011
<u>Temas de actualidad en Física:</u>		
La red eléctrica: energía para el público en general / 1019		
Resumen	1020	
Problemas	1022	
Capítulo 30		
ECUACIONES DE MAXWELL Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS / 1029		
30.1	Corriente de desplazamiento de Maxwell	1030
30.2	Ecuaciones de Maxwell	1033
30.3	La ecuación de ondas para las ondas electromagnéticas	1034
30.4	Radiación electromagnética	1040
<u>Temas de actualidad en Física:</u>		
Comunicación inalámbrica: espacio electromagnético compartido / 1049		
Resumen	1050	
Problemas	1051	
RESPUESTAS DE LOS PROBLEMAS IMPARES DEL FINAL DE LOS CAPÍTULOS / A.1		
ÍNDICE ALFABÉTICO / I.1		

Prefacio

La sexta edición de *Física para la ciencia y la tecnología* presenta un texto y herramientas *online* completamente integrados que ayudarán a los estudiantes a aprender de un modo más eficaz y que permitirá a los profesores adaptar sus clases para enseñar de un modo más eficiente.

El texto incluye un nuevo enfoque estratégico de resolución de problemas, un apéndice de matemáticas integrado y nuevas herramientas para mejorar la comprensión conceptual. Los nuevos temas de actualidad en física destacan temas innovadores que ayudan a los estudiantes a relacionar lo que aprenden con las tecnologías del mundo real.

CARACTERÍSTICAS CLAVE



ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

En la sexta edición destaca una nueva estrategia de resolución de problemas en la que los Ejemplos siguen un formato sistemático de **Planteamiento**, **Solución** y **Comprobación**. Este formato conduce a los estudiantes a través de los pasos implicados en el análisis del problema, la resolución del problema y la comprobación de sus respuestas. Los Ejemplos a menudo incluyen útiles secciones de **Observación** que presentan formas alternativas de resolución de problemas, hechos interesantes, o información adicional relativa a los conceptos presentados. Siempre que se considera necesario, los Ejemplos van seguidos de **Problemas Prácticos** para que los estudiantes puedan evaluar su dominio de los conceptos.

En esta edición, las etapas de resolución de problemas siguen contando con las ecuaciones necesarias al lado, de manera que a los estudiantes les resulte más fácil seguir el razonamiento.

Después de cada enunciado del problema, los estudiantes van al **Planteamiento** del problema. Aquí, el problema se analiza tanto conceptualmente como visualmente.

En la sección **Solución**, cada paso de la solución se presenta con un enunciado escrito en la columna de la izquierda y las ecuaciones matemáticas correspondientes en la columna de la derecha.

La **Comprobación** recuerda a los estudiantes que han de verificar que sus resultados son precisos y razonables.

La **Observación** sugiere una forma distinta de enfocar un ejemplo o da información adicional relevante para el ejemplo.

A la solución le sigue normalmente un **Problema Práctico**, lo que permite a los estudiantes comprobar su comprensión. Al final del capítulo se incluyen las respuestas para facilitar una comprobación inmediata.

Ejemplo 3.4 Tomando una curva

Un coche se mueve hacia el este a 60 km/h. Toma una curva y 5 s más tarde viaja hacia el norte a 60 km/h. Determinar la aceleración media del coche.

PLANTEAMIENTO Calculamos la aceleración media a partir de su definición, $\vec{a}_m = \Delta\vec{v}/\Delta t$. Primero calculamos $\Delta\vec{v}$ que es el vector que sumado a $\vec{v}_i$ nos da $\vec{v}_f$.

SOLUCIÓN

1. La aceleración media es el cociente entre la variación de velocidad y el intervalo de tiempo: $\vec{a}_m = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$
2. Para hallar $\Delta\vec{v}$, debemos especificar primero $\vec{v}_i$ y $\vec{v}_f$. Dibujemos $\vec{v}_i$ y $\vec{v}_f$ (figura 3.7a), y tracemos el diagrama de suma vectorial (figura 3.7b) correspondiente a $\vec{v}_f = \vec{v}_i + \Delta\vec{v}$:
3. El cambio de velocidad viene determinado por las velocidades inicial y final: $\vec{v}_f = \vec{v}_i + \Delta\vec{v}$
4. Sustituimos los resultados anteriores para determinar la aceleración media: $\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t} = \frac{60 \text{ km/h } \hat{j} - 60 \text{ km/h } \hat{i}}{5,0 \text{ s}}$
5. Convertimos 60 km/h a metros por segundo: $60 \text{ km/h} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 16,7 \text{ m/s}$
6. Expresamos la aceleración en metros por segundo al cuadrado: $\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t} = \frac{16,7 \text{ m/s } \hat{j} - 16,7 \text{ m/s } \hat{i}}{5,0 \text{ s}} = \boxed{-3,4 \text{ m/s}^2 \hat{i} + 3,4 \text{ m/s}^2 \hat{j}}$

COMPROBACIÓN La componente de la velocidad en dirección este disminuye de 60 km/h a cero, de tal forma que cabría esperar que la componente x de la aceleración fuese negativa. Así mismo, la componente de la velocidad en dirección norte aumenta de cero a 60 km/h, de forma que cabría esperar que la componente y de la aceleración fuese positiva. El resultado del apartado 6 concuerda con estas expectativas.

OBSERVACIÓN Obsérvese que el coche sigue acelerando aunque el módulo de su velocidad se mantenga constante.

PROBLEMA PRÁCTICO 3.1 Determinar el módulo y la dirección del vector aceleración media.

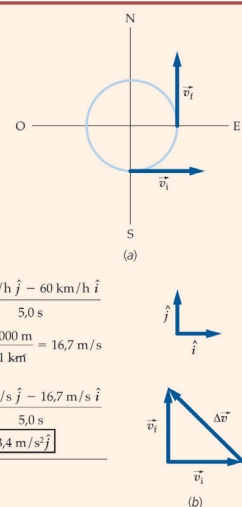


FIGURA 3.7

En casi todos los capítulos se incluye un recuadro llamado **Estrategia de resolución de problemas** para reforzar el formato **Planteamiento, Solución y Comprobación** para solucionar satisfactoriamente los problemas.

ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS
Velocidad relativa
PLANTEAMIENTO El primer paso para la resolución de problemas de velocidad relativa es identificar y marcar los sistemas de referencia relevantes. Aquí les llamaremos sistema de referencia A y B.
SOLUCIÓN
1. Utilizando $\vec{v}_{PB} = \vec{v}_{PA} + \vec{v}_{AB}$ (ecuación 3.9), relacione la velocidad del objeto móvil (partícula p) relativa al sistema A con la velocidad de la partícula relativa al sistema B.
2. Trace un diagrama de suma vectorial para la ecuación $\vec{v}_{PB} = \vec{v}_{PA} + \vec{v}_{AB}$. Incluya ejes de coordenadas en el dibujo.
3. Calcule la incógnita en cuestión. Utilice la trigonometría cuando sea necesario.
COMPROBACIÓN Asegúrese de que obtiene la velocidad o posición del cuerpo respecto del sistema de referencia correcto.



APÉNDICE DE MATEMÁTICAS INTEGRADO

Esta edición ha mejorado el apoyo matemático a los estudiantes que estudian Matemáticas al mismo tiempo que introducción a la Física o a los estudiantes que requieren repasar las Matemáticas.

El **Apéndice de Matemáticas completo**

- revisa resultados básicos de álgebra, geometría, trigonometría y cálculo,
- relaciona conceptos matemáticos con conceptos físicos del libro,
- proporciona Ejemplos y Problemas Prácticos para que los estudiantes puedan comprobar su comprensión de los conceptos matemáticos.

Ejemplo M.13 **Desintegración radiactiva del cobalto-60**

El período de semidesintegración del cobalto-60 (⁶⁰Co) es 5,27 años. A $t = 0$ se tiene una muestra de ⁶⁰Co de masa 1,20 mg. ¿Cuánto tiempo t (en años) habrá de transcurrir para que 0,400 mg de la muestra de ⁶⁰Co se hayan desintegrado?

PLANTEAMIENTO En la deducción del período de semidesintegración pusimos $N/N_0 = 1/2$. En este ejemplo, hemos de hallar el tiempo de permanencia de dos tercios de la muestra, es decir, cuando la fracción N/N_0 sea de 0,667.

SOLUCIÓN
1. Expresar la fracción N/N_0 como una función exponencial:
$$\frac{N}{N_0} = 0,667 = e^{-\lambda t}$$

2. Obtener los valores recíprocos de ambos miembros:
$$\frac{N_0}{N} = 1,50 = e^{\lambda t}$$

3. Despejar t :
$$t = \frac{\ln 1,50}{\lambda} = \frac{0,405}{\lambda}$$

4. La constante de desintegración está relacionada con el período de semidesintegración por medio de $\lambda = (\ln 2)/t_{1/2}$ (ecuación M.70). Sustituir $(\ln 2)/t_{1/2}$ por λ y calcular el tiempo:
$$t = \frac{\ln 1,5}{\ln 2} t_{1/2} = \frac{\ln 1,5}{\ln 2} \times 5,27 \text{ años} = 3,08 \text{ años}$$

COMPROBACIÓN Para que la masa de una muestra de ⁶⁰Co decreciese hasta el 50% de su masa inicial habrían de transcurrir 5,27 años. Por lo tanto, es de esperar que la muestra tardase menos de 5,27 años para perder el 33,3% de su masa. Por tanto, el resultado obtenido (3,08 años), concuerda con lo esperado.

PROBLEMAS PRÁCTICOS

27. La constante de tiempo de descarga de un condensador en un circuito RC es $\tau = RC$. Si un condensador se descarga hasta e^{-1} (o sea 0,368) de su carga inicial, ¿cuánto tiempo t (en segundos) tardará en descargarse hasta el 50% de su carga inicial?
28. Si la población de coyotes en un determinado lugar está creciendo por década y continúa creciendo al mismo ritmo indefinidamente, ¿cuánto tiempo tardará en alcanzar una población 1,5 veces la actual?

M.12 CÁLCULO INTEGRAL

El **cálculo integral** se puede considerar el inverso del cálculo diferencial. Si una función $f(t)$ se integra, se obtiene una función $F(t)$, de forma que $f(t)$ es la derivada de $F(t)$ con respecto a t .

LA INTEGRAL COMO UN ÁREA BAJO UNA CURVA. ANÁLISIS DIMENSIONAL

La integración está relacionada con el problema de hallar el área bajo una curva. La figura M.27 muestra una función $f(t)$. El área del elemento sombreado es aproximadamente $f_i \Delta t_i$, en donde f_i se calcula en un punto cualquiera del intervalo Δt_i . Esta aproximación mejora si Δt_i es muy pequeño. Se halla el área total desde t_1 hasta t_2 sumando todos los elementos de área desde t_1 a t_2 y tomando el límite cuando Δt_i tiende a cero. Este límite se denomina la **integral** de f extendida al intervalo t_1 a t_2 y se escribe

$$\int_{t_1}^{t_2} f \, dt = \text{área} = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_i f_i \Delta t_i \tag{M.74}$$

Las dimensiones físicas de una integral de una función $f(t)$ se hallan multiplicando las dimensiones del integrando (la función que se ha de integrar) por las dimensiones de la variable de integración.

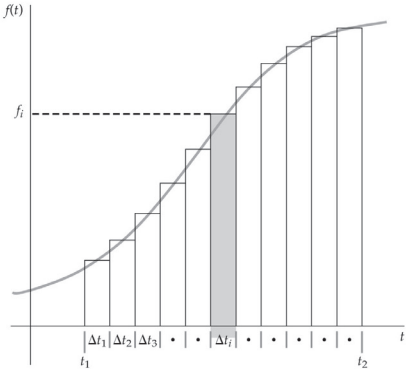


FIGURA M.27 Función general $f(t)$. El área del elemento sombreado es aproximadamente $f_i \Delta t_i$, en donde f_i se calcula en un punto cualquiera del intervalo.



Véase el
Apéndice de matemáticas
para más información sobre
Cálculo diferencial

Además, las notas al margen permiten a los estudiantes ver fácilmente la relación entre los conceptos físicos del texto y los conceptos matemáticos.



PEDAGOGÍA PARA ASEGURAR LA COMPRENSIÓN CONCEPTUAL

Se han añadido herramientas prácticas para los estudiantes para facilitar un mejor comprensión conceptual de la física.

- Se han introducido nuevos **Ejemplos conceptuales**, para ayudar a los estudiantes a comprender en profundidad conceptos físicos esenciales. Estos ejemplos utilizan la estrategia **Planteamiento, Solución y Comprobación**, de modo que los estudiantes no sólo obtienen una comprensión conceptual básica sino que tienen que evaluar sus respuestas.

Ejemplo 8.12 Colisiones con masilla

Conceptual

María tiene dos bolas de la misma masa, una bola de masilla y otra de goma. Lanza la bola de masilla contra un bloque suspendido por dos cuerdas como se muestra en la figura 8.20. La bola impacta contra el bloque y cae al suelo. Como consecuencia, el bloque asciende hasta una altura máxima h . Si hubiera lanzado la bola de goma con la misma velocidad, ¿el bloque habría ascendido a una altura mayor que h ? La goma, a diferencia de la masilla, es elástica y hubiera rebotado contra el bloque.

PLANTEAMIENTO Durante el impacto, el cambio de momento del sistema bola-bloque es cero. Cuanto mayor es el cambio de momento de la bola, mayor será el cambio de momento del bloque. ¿Aumenta más el cambio de momento de la bola si rebota en el bloque que si no lo hace?

SOLUCIÓN

La bola de masilla pierde una fracción importante de su momento inicial. La bola de goma perdería todo el momento inicial para ganar momento en la dirección opuesta. Por tanto, la bola de goma perdería mayor cantidad de momento que la bola de masilla.

El bloque ascendería hasta una mayor altura después de ser impactado con la bola de goma que si hubiese sido impactado por la bola de masilla.

COMPROBACIÓN El bloque ejerce un impulso hacia atrás sobre la bola de masilla hasta hacerla parar. El mismo impulso hace detener la bola de goma, pero además el bloque ejerce un impulso adicional que la hacer retroceder. Así, el bloque ejerce un mayor impulso sobre la bola de goma que sobre la de masilla. Según la tercera ley de Newton, el impulso de la bola sobre el bloque es igual y opuesto al impulso del bloque sobre la bola. Entonces, la bola de goma ejerce un impulso mayor sobre el bloque confiriéndole un mayor cambio de momento.

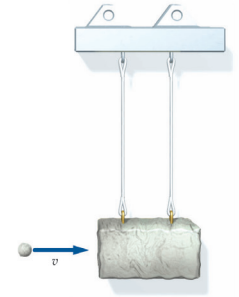


FIGURA 8.20

- Las nuevas **Comprobaciones de conceptos** facilitan a los estudiantes comprobar su comprensión conceptual de conceptos físicos mientras leen los capítulos. Las respuestas están situadas al final de cada capítulo para permitir una comprobación inmediata. Las comprobaciones de conceptos se colocan cerca de temas relevantes, de modo que los estudiantes puedan releer inmediatamente cualquier material que no comprendan del todo.
- Los nuevos **avisos de errores frecuentes**, identificados mediante signos de exclamación, ayudan a los estudiantes a evitar errores habituales. Estos avisos están situados cerca de los temas que habitualmente causan confusión, de manera que los estudiantes puedan resolver de inmediato cualquier dificultad.



COMPROBACIÓN CONCEPTUAL 3.1

La figura 3.9 es el diagrama del movimiento de la saltadora antes, durante y después del instante de tiempo t_0 , cuando se halla momentáneamente en reposo en el punto más bajo de su descenso. En la parte de su ascenso mostrada en el esquema, la velocidad de la saltadora aumenta. Utilice este diagrama para determinar la dirección de la aceleración de la saltadora (a) en el instante t_0 y (b) en el instante t_1 .

donde U_y la constante arbitraria de integración, es el valor de la energía potencial para $y = 0$. Como sólo definimos la variación de energía potencial, el valor real de U no es importante. Por ejemplo, si a la energía potencial gravitatoria del sistema Tierra-esquiador se le asigna un valor igual a cero cuando el esquiador está en el fondo de la pista, su valor a la altura h sobre este nivel es mgh . También podemos asignar el valor cero de energía potencial al momento en que el esquiador está en un punto P a medio camino de la pendiente, en cuyo caso su valor en cualquier otro punto sería mgy , donde y es la distancia del esquiador respecto al punto P .

Tenemos libertad para dar a U el valor cero en cualquier punto de referencia.



TEMAS DE ACTUALIDAD EN FÍSICA

Los **temas de actualidad en Física**, que aparecen al final de ciertos capítulos, tratan de aplicaciones actuales de la Física y relacionan estas aplicaciones con conceptos descritos en los capítulos. Estos temas van desde un parque eólico hasta termómetros moleculares y motores de detonación pulsar.

Soplando aire cálidos

Los parques eólicos están desperdigados por la costa danesa, las planicies del alto medio-oeste de EE.UU. y las montañas desde California hasta Vermont. El aprovechamiento de la energía cinética del viento no es nada nuevo. Durante siglos, los molinos de viento se han utilizado para bombear agua, ventilar minas¹ y moler el grano.

En la actualidad, las turbinas de viento hacen funcionar generadores eléctricos. Esas turbinas transforman energía cinética en energía electromagnética. Las turbinas modernas tienen precios, tamaños y rendimientos muy variados. Algunas de ellas son pequeñas y sencillas máquinas que cuestan unos 500 dólares y producen unos 100 watts de potencia.² Otras son gigantes y complejas y cuestan unos 2 millones de dólares pero generan hasta 2,5 MW por turbina.³ Todas ellas funcionan gracias a una fuente de energía fácilmente disponible —el viento.

La teoría que hay detrás de la conversión de energía cinética en electromagnética es simple. Las moléculas de aire golpean sobre las aspas de la hélice y hacen girar la turbina. Las aspas hacen girar unos engranajes que hacen aumentar la velocidad de rotación que a su vez hace girar el rotor generador. El generador envía energía electromagnética a cables que soportan alta tensión.

Sin embargo, la conversión de la energía cinética del viento en energía electromagnética no es perfectamente eficiente; de hecho, no puede ser 100% eficiente. Si las turbinas convirtieran completamente la energía cinética del viento en energía eléctrica, el aire saldría de las turbinas sin energía cinética. Es decir, las turbinas pararían el aire. Si la turbina parase completamente el aire, éste fluiría alrededor de la turbina en lugar de fluir a través de ella.

Así, la turbina debe ser capaz de capturar la energía cinética del aire en movimiento y de evitar el flujo de aire a su alrededor. Las turbinas impulsadas por hélices son las más comunes y su eficiencia teórica varía de 30% a 59%.⁴ (Las eficiencias teóricas varían en función de cómo el aire fluye alrededor de la turbina y a través de las hélices.)

En resumen, ni la más eficiente de las turbinas puede convertir el 100% de la energía disponible. ¿Qué sucede? Antes de llegar a la turbina el aire fluye de forma laminar mientras que al dejar atrás la turbina el aire se vuelve turbulento. La componente rotacional del movimiento del aire de detrás de la turbina, aumenta su energía aunque también hay alguna disipación debida a la viscosidad del aire. Si un determinado volumen de aire se mueve más lentamente, aparecerá un rozamiento entre este aire y el aire más veloz que fluye a su alrededor.⁵ Las hélices se calientan y el aire también. Los engranajes de la turbina también disipan energía debido al rozamiento. Las hélices vibran individualmente —la energía absorbida para producir estas vibraciones también hace disminuir la eficiencia. Finalmente, la turbina necesita corriente para hacer funcionar los motores que lubrican los engranajes y el motor que orienta la turbina en la dirección más apropiada para la captura del viento.

En definitiva, la mayoría de turbinas funcionan con una eficiencia de entre un 10 y un 20 por ciento,⁶ pero siguen siendo un recurso energético más limpio que el petróleo. Uno de los propietarios de turbinas eólicas decía, “Lo fundamental del negocio de las turbinas radica en que nos ayuda a controlar nuestro futuro”.⁷

Temas de actualidad en Física



Un parque eólico que convierte la energía cinética del aire en energía eléctrica. (Image Slate.)

MEDIOS DE DIFUSIÓN Y SUPLEMENTOS IMPRESOS

Todos los suplementos de la obra están disponibles en Internet en la página www.reverte.com/microsites/tipler6ed.

FLEXIBILIDAD PARA LOS CURSOS DE FÍSICA

Nos damos cuenta de que no todos los cursos de física son iguales. Para facilitar la utilización del libro, *Física para la ciencia y la tecnología* se halla disponible en las siguientes versiones:

- Volumen 1** *Mecánica/Oscilaciones y ondas/Termodinámica*
(Capítulos 1–20, R) 978-84-291-4429-1
- Volumen 2** *Electricidad y magnetismo/Luz*
(Capítulos 21–33) 978-84-291-4430-7
- Volumen 1A** *Mecánica* (Capítulos 1–13) 978-84-291-4421-5
- Volumen 1B** *Oscilaciones y ondas* (Capítulos 14–16) 978-84-291-4422-2
- Volumen 1C** *Termodinámica* (Capítulos 17–20) 978-84-291-4423-9
- Volumen 2A** *Electricidad y magnetismo* (Capítulos 21–30) 978-84-291-4424-6
- Volumen 2B** *Luz* (Capítulos 31–33) 978-84-291-4425-3
- Física moderna** *Mecánica cuántica, relatividad y estructura de la materia*
(Capítulos R, 34–41) 978-84-291-4426-0
- Apéndices y respuestas** 978-84-291-4427-7

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a los diversos profesores, estudiantes, colaboradores y amigos que han contribuido a esta edición y a las anteriores.

Anthony J. Buffa, profesor emérito en California Polytechnic State University en California, escribió muchos de los nuevos problemas que aparecen al final de los capítulos y editó las secciones de problemas del final de cada capítulo. Laura Runkle escribió los Temas de actualidad en Física. Richard Mickey revisó la Revisión de matemáticas de la quinta edición, que ahora constituye el Apéndice de matemáticas de la sexta edición. David Mills, profesor emérito en el College of the Redwoods en California, revisó a fondo el Manual de Soluciones. Para redactar este libro y para comprobar la precisión y exactitud del texto y los problemas hemos contado con la ayuda inestimable de los siguientes profesores:

Thomas Foster
Southern Illinois University

Karamjeet Arya
San Jose State University

Mirley Bala
Texas A&M University—Corpus Christi

Michael Crivello
San Diego Mesa College

Carlos Delgado
Community College of Southern Nevada

David Faust
Mt. Hood Community College

Robin Jordan
Florida Atlantic University

Jerome Licini
Lehigh University

Dan Lucas
University of Wisconsin

Laura McCullough
University of Wisconsin, Stout

Jeannette Myers
Francis Marion University

Marian Peters
Appalachian State University

Todd K. Pedlar
Luther College

Paul Quinn
Kutztown University

Peter Sheldon
Randolph-Macon Woman's College

Michael G. Strauss
University of Oklahoma

Brad Trees
Ohio Wesleyan University

George Zober
Yough Senior High School

Patricia Zober
Ringgold High School

Muchos profesores y estudiantes han realizado revisiones exhaustivas y útiles de uno o más capítulos de esta edición. Cada uno de ellos ha contribuido de un modo fundamental a mejorar la calidad de esta revisión, y merecen por ello nuestro agradecimiento. Nos gustaría dar las gracias a los siguientes revisores:

Ahmad H. Abdelhadi
James Madison University

Edward Adelson
Ohio State University

Royal Albridge
Vanderbilt University

J. Robert Anderson
University of Maryland, College Park

Toby S. Anderson
Tennessee State University

Wickram Ariyasinghe
Baylor University

Yildirim Aktas
University of North Carolina, Charlotte

Eric Ayars
California State University

James Battat
Harvard University

Eugene W. Beier
University of Pennsylvania

Peter Beyersdorf
San Jose State University

Richard Bone
Florida International University

Juliet W. Brosing
Pacific University

Ronald Brown
California Polytechnic State University

Richard L. Cardenas
St. Mary’s University

Troy Carter
University of California, Los Angeles

Alice D. Churukian
Concordia College

N. John DiNardo
Drexel University

Jianjun Dong
Auburn University

Fivos R Drymiotis
Clemson University

Mark A. Edwards
Hofstra University

James Evans
Broken Arrow Senior High

Nicola Fameli
University of British Columbia

N. G. Fazleev
University of Texas at Arlington

Thomas Furtak
Colorado School of Mines

Richard Gelderman
Western Kentucky University

Yuri Gershtein
Florida State University

Paolo Gondolo
University of Utah

Benjamin Grinstein
University of California, San Diego

Parameswar Hari
University of Tulsa

Joseph Harrison
University of Alabama—Birmingham

Patrick C. Hecking
Thiel College

Kristi R. G. Hendrickson
University of Puget Sound

Linnea Hess
Olympic College

Mark Hollabaugh
Normandale Community College

Daniel Holland
Illinois State University

Richard D. Holland II
Southern Illinois University

Eric Hudson
Massachusetts Institute of Technology

David C. Ingram
Ohio University

Colin Inglefield
Weber State University

Nathan Israeloff
Northeastern University

Donald J. Jacobs
California State University, Northridge

Erik L. Jensen
Chemeketa Community College

Colin P Jessop
University of Notre Dame

Ed Kearns
Boston University

Alice K. Kolakowska
Mississippi State University

Douglas Kurtze
Saint Joseph’s University

Eric T. Lane
University of Tennessee at Chattanooga

Christie L. Larochelle
Franklin & Marshall College

Mary Lu Larsen
Towson University

Clifford L. Laurence
Colorado Technical University

Bruce W. Liby
Manhattan College

Ramon E. Lopez
Florida Institute of Technology

Ntungwa Maasha
Coastal Georgia Community Collegee
and University Center

Jane H MacGibbon
University of North Florida

A. James Mallmann
Milwaukee School of Engineering

Rahul Mehta
University of Central Arkansas

R. A. McCorkle
University of Rhode Island

Linda McDonald
North Park University

Kenneth McLaughlin
Loras College

Eric R. Murray
Georgia Institute of Technology

Jeffrey S. Olafsen
University of Kansas

Richard P. Olenick
University of Dallas

Halina Opyrchal
New Jersey Institute of Technology

Russell L. Palma
Minnesota State University—Mankato

Todd K. Pedlar
Luther College

Daniel Phillips
Ohio University

Edward Pollack
University of Connecticut

Michael Politano
Marquette University

Robert L. Pompei
SUNY Binghamton

Damon A. Resnick
Montana State University

Richard Robinett
Pennsylvania State University

John Rollino
Rutgers University

Daniel V. Schroeder
Weber State University

Douglas Sherman
San Jose State University

Christopher Sirola
Marquette University

Larry K. Smith
Snow College

George Smoot
University of California
at Berkeley

Zbigniew M. Stadnik
University of Ottawa

Kenny Stephens
Hardin-Simmons University

Daniel Stump
Michigan State University

Jorge Talamantes
California State University,
Bakersfield

Charles G. Torre
Utah State University

Brad Trees
Ohio Wesleyan University

John K. Vassiliou
Villanova University

Theodore D. Violett
Western State College

Hai-Sheng Wu
Minnesota State University—Mankato

Anthony C. Zable
Portland Community College

Ulrich Zurcher
Cleveland State University

También estamos en deuda con los revisores de ediciones anteriores. Por lo que nos gustaría dar las gracias a los siguientes revisores, quienes nos proporcionaron un apoyo imprescindible mientras realizábamos la cuarta y la quinta ediciones:

Edward Adelson

The Ohio State University

Michael Arnett

Kirkwood Community College

Todd Averett

The College of William and Mary

Yildirim M. Aktas

University of North Carolina at Charlotte

Karamjeet Arya

San Jose State University

Alison Baski

Virginia Commonwealth University

William Bassichis

Texas A&M University

Joel C. Berlinghieri

The Citadel

Gary Stephen Blanpied

University of South Carolina

Frank Blatt

Michigan State University

Ronald Brown

California Polytechnic State University

Anthony J. Buffa

California Polytechnic State University

John E. Byrne

Gonzaga University

Wayne Carr

Stevens Institute of Technology

George Cassidy

University of Utah

Lay Nam Chang

Virginia Polytechnic Institute

I. V. Chivets

Trinity College, University of Dublin

Harry T. Chu

University of Akron

Alan Cresswell

Shippensburg University

Robert Coakley

University of Southern Maine

Robert Coleman

Emory University

Brent A. Corbin

UCLA

Andrew Cornelius

University of Nevada at Las Vegas

Mark W. Coffey

Colorado School of Mines

Peter P. Crooker

University of Hawaii

Jeff Culbert

London, Ontario

Paul Debevec

University of Illinois

Ricardo S. Decca

Indiana University-Purdue University

Robert W. Detenbeck

University of Vermont

N. John DiNardo

Drexel University

Bruce Doak

Arizona State University

Michael Dubson

University of Colorado at Boulder

John Elliott

University of Manchester, England

William Ellis

University of Technology — Sydney

Colonel Rolf Enger

U.S. Air Force Academy

John W. Farley

University of Nevada at Las Vegas

David Faust

Mount Hood Community College

Mirela S. Fetea

University of Richmond

David Flammer

Colorado School of Mines

Philip Fraundorf

University of Missouri, Saint Louis

Tom Furtak

Colorado School of Mines

James Garland

Retired

James Garner

University of North Florida

Ian Gatland

Georgia Institute of Technology

Ron Gautreau

New Jersey Institute of Technology

David Gavenda

University of Texas at Austin

Patrick C. Gibbons

Washington University

David Gordon Wilson

Massachusetts Institute of Technology

Christopher Gould

University of Southern California

Newton Greenberg

SUNY Binghamton

John B. Gruber

San Jose State University

Huidong Guo

Columbia University

Phuoc Ha

Creighton University

Richard Haracz

Drexel University

Clint Harper

Moorpark College

Michael Harris

University of Washington

Randy Harris

University of California at Davis

Tina Harriott

Mount Saint Vincent, Canada

Dieter Hartmann

Clemson University

Theresa Peggy Hartsell

Clark College

Kristi R.G. Hendrickson

University of Puget Sound

Michael Hildreth

University of Notre Dame

Robert Hollebeek

University of Pennsylvania

David Ingram

Ohio University

Shawn Jackson

The University of Tulsa

Madya Jalil

University of Malaya

Monwhea Jeng

University of California — Santa Barbara

James W. Johnson

Tallahassee Community College

Edwin R. Jones

University of South Carolina

Ilon Joseph

Columbia University

David Kaplan

University of California — Santa Barbara

William C. Kerr

Wake Forest University

John Kidder

Dartmouth College

Roger King

City College of San Francisco

James J. Kolata

University of Notre Dame

Boris Korsunsky

Northfield Mt. Hermon School

Thomas O. Krause

Towson University

Eric Lane

University of Tennessee, Chattanooga

Andrew Lang (graduate student)

University of Missouri

David Lange

University of California — Santa Barbara

Donald C. Larson

Drexel University

Paul L. Lee

California State University, Northridge

Peter M. Levy

New York University

Jerome Licini

Lehigh University

Isaac Leichter

Jerusalem College of Technology

William Lichten

Yale University

Robert Lieberman

Cornell University

Fred Lipschultz

University of Connecticut

Graeme Luke

Columbia University

Dan MacIsaac

Northern Arizona University

Edward McCliment

University of Iowa

Robert R. Marchini

The University of Memphis

Peter E. C. Markowitz

Florida International University

Daniel Marlow

Princeton University

Fernando Medina

Florida Atlantic University

Howard McAllister

University of Hawaii

John A. McClelland

University of Richmond

Laura McCullough

University of Wisconsin at Stout

M. Howard Miles

Washington State University

Matthew Moelter

University of Puget Sound

Eugene Mosca

U.S. Naval Academy

Carl Mungan

U.S. Naval Academy

Taha Mzoughi

Mississippi State University

Charles Niederriter

Gustavus Adolphus College

John W. Norbury

University of Wisconsin at Milwaukee

Aileen O'Donoghue

St. Lawrence University

Jack Ord

University of Waterloo

Jeffry S. Olafsen

University of Kansas

Melvyn Jay Oremland

Pace University

Richard Packard

University of California

Antonio Pagnamenta

University of Illinois at Chicago

George W. Parker

North Carolina State University

John Parsons

Columbia University

Dinko Pocanic

University of Virginia

Edward Pollack

University of Connecticut

Robert Pompei

The State University of New York at Bingham-
ton

Bernard G. Pope

Michigan State University

John M. Pratte

Clayton College and State
University

Brooke Pridmore

Clayton State College

Yong-Zhong Qian

University of Minnesota

David Roberts

Brandeis University

Lyle D. Roelofs

Haverford College

R. J. Rollefson

Wesleyan University

Larry Rowan

University of North Carolina at Chapel Hill

Ajit S. Rupaal

Western Washington University

Todd G. Ruskell

Colorado School of Mines

Lewis H. Ryder

University of Kent, Canterbury

Andrew Scherbakov

Georgia Institute of Technology

Bruce A. Schumm

University of California, Santa Cruz

Cindy Schwarz

Vassar College

Mesgun Sebhatu

Winthrop University

Bernd Schuttler

University of Georgia

Murray Scureman

Amdahl Corporation

Marllin L. Simon

Auburn University

Scott Sinawi

Columbia University

Dave Smith

University of the Virgin Islands

Wesley H. Smith

University of Wisconsin

Kevork Spartalian

University of Vermont

Zbigniew M. Stadnik

University of Ottawa

G. R. Stewart

University of Florida

Michael G. Strauss

University of Oklahoma

Kaare Stegavik

University of Trondheim, Norway

Jay D. Strieb

Villanova University

Dan Styer

Oberlin College

Chun Fu Su

Mississippi State University

Jeffrey Sundquist

Palm Beach Community College — South

Cyrus Taylor

Case Western Reserve University

Martin Tiersten

City College of New York

Chin-Che Tin

Auburn University

Oscar Vilches

University of Washington

D. J. Wagner

Grove City College

Columbia University

George Watson

University of Delaware

Fred Watts

College of Charleston

David Winter

John A. Underwood

Austin Community College

John Weinstein

University of Mississippi

Stephen Weppner

Eckerd College

Suzanne E. Willis

Northern Illinois University

Frank L. H. Wolfe

University of Rochester

Frank Wolfs

University of Rochester

Roy C. Wood

New Mexico State University

Ron Zammit

California Polytechnic State University

Yuriy Zhestkov

Columbia University

Dean Zollman

Kansas State University

Fulin Zuo

University of Miami

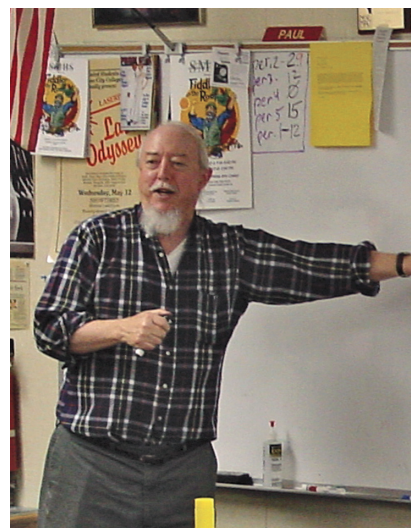
Es obvio que nuestro trabajo no termina nunca; por ello, esperamos recibir comentarios y sugerencias de nuestros lectores para poder mejorar el texto y corregir cualquier error. Si usted cree que ha hallado un error, o tiene cualquier otro comentario, sugerencia o pregunta, envíenos una nota a producción@reverte.com. Incorporaremos las correcciones en el texto en posteriores reimpresiones.

Por último, nos gustaría agradecer a nuestros amigos de W. H. Freeman and Company su ayuda y aliento. Susan Brennan, Clancy Marshall, Kharissia Pettus, Georgia Lee Hadler, Susan Wein, Trumbull Rogers, Connie Parks, John Smith, Dena Digilio Betz, Ted Szczepanski y Liz Geller, quienes fueron muy generosos con su creatividad y duro trabajo en cada etapa del proceso.

También estamos agradecidos por las contribuciones y ayuda de nuestros colegas Larry Tankersley, John Ertel, Steve Montgomery y Don Treacy.

Acerca de los autores

Paul Tipler nació en la pequeña ciudad agrícola de Antigo, Wisconsin, en 1933. Realizó sus estudios medios en Oshkosh, Wisconsin, en donde su padre era superintendente de las Escuelas Públicas. Recibió el título de Bachelor of Science en la Universidad de Purdue en 1955 y obtuvo su Ph.D. en la Universidad de Illinois, en donde estudió la estructura del núcleo. Impartió la enseñanza durante un año en la Wesleyan University de Connecticut mientras redactaba su tesis. Después se trasladó a la Universidad de Oakland en Michigan, donde fue uno de los primeros miembros del Departamento de Física, y desempeñó un papel importante en el desarrollo de los planes de estudio. Durante los siguientes 20 años, enseñó casi todas las disciplinas de la física y escribió la primera y segunda ediciones de sus ampliamente difundidos textos *Física Moderna* (1969, 1978) y *Física* (1976, 1982). En 1982, se mudó a Berkeley, California, donde ahora reside y donde escribió *Física preuniversitaria* (1987) y la tercera edición de *Física* (1991). Además de la física, sus aficiones incluyen la música, excursionismo y camping. Es un excelente pianista de jazz y un buen jugador de póker.



Gene Mosca nació en la ciudad de Nueva York y se crió en Shelter Island, en el Estado de Nueva York. Estudió en la Universidad de Villanova, en la Universidad de Michigan y en la Universidad de Vermont, donde obtuvo su Ph.D. en física. Recientemente jubilado, Gene Mosca ha sido profesor en la U.S. Naval Academy, donde fue el impulsor de numerosas mejoras en la enseñanza de la Física, tanto en los laboratorios como en las aulas. Proclamado por Paul Tipler como "el mejor crítico que he tenido", Mosca se ha convertido en coautor del libro a partir de su quinta edición.





Campo eléctrico I: distribuciones discretas de carga

- 21.1 Carga eléctrica
- 21.2 Conductores y aislantes
- 21.3 Ley de Coulomb
- 21.4 El campo eléctrico
- 21.5 Líneas de campo eléctrico
- 21.6 Acción del campo eléctrico sobre las cargas

Hoy en día, nuestra vida diaria depende extraordinariamente de la electricidad, mientras que hace un siglo sólo disponíamos de alguna lámpara eléctrica. Sin embargo, aunque el uso generalizado de la electricidad es muy reciente, su estudio tiene una larga historia que comienza mucho antes de que apareciese la primera lámpara eléctrica. Las primeras observaciones de la atracción eléctrica fueron realizadas por los antiguos griegos. Éstos observaron que al frotar el ámbar, éste atraía pequeños objetos como pajitas o plumas. Ciertamente, la palabra “eléctrico” procede del vocablo griego asignado al ámbar, *elektrón*.

EL COBRE ES UN CONDUCTOR CUYAS PROPIEDADES SON ÚTILES PORQUE HACEN POSIBLE EL TRANSPORTE DE LA ELECTRICIDAD.
(Brooks R. Dillard/www.yuprocks.com)



¿Cuál es la carga total de los electrones de una moneda?
(Véase el ejemplo 21.1.)

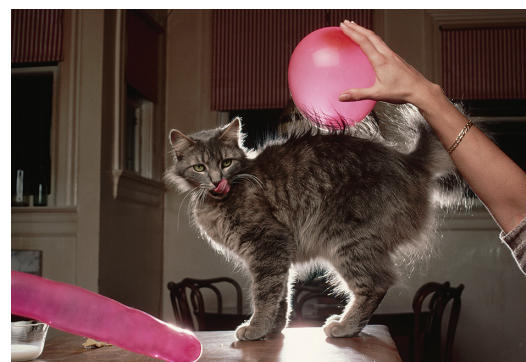
Actualmente, la electricidad está en un proceso continuo de estudio, de investigación y de búsqueda de nuevos usos. Los ingenieros eléctricos mejoran la tecnología existente en materia eléctrica, incrementando el rendimiento y eficacia de diferentes dispositivos eléctricos, tales como automóviles híbridos, plantas de producción eléctrica, etc. Pinturas de fijación electrostática se utilizan en la industria de la automoción, en diversas partes del motor y de la estructura general del automóvil. Los procesos electrostáticos de cromación y de fijación de la pintura permiten realizar recubrimientos más duraderos, y de forma más ecológica y cuidadosa del medio ambiente que los que utilizan pinturas líquidas, dado que no utilizan ningún tipo de disolvente.

En este capítulo, se inicia el estudio de la electricidad con la electrostática, que trata de las cargas eléctricas en reposo. Después de introducir el concepto de carga eléctrica, analizaremos brevemente el concepto de conductores y aislantes y la forma en que un conductor puede adquirir una carga. A continuación, estudiaremos la ley de Coulomb, que describe la fuerza ejercida por una carga eléctrica sobre otra. Posteriormente, introduciremos el concepto de campo eléctrico y veremos cómo puede describirse mediante las líneas de campo, las cuales indican el módulo y la dirección del campo, del mismo modo en que describíamos el campo de velocidades de un fluido en movimiento mediante líneas de corriente (capítulo 13). Por último, abordaremos el comportamiento de las cargas puntuales y los dipolos en campos eléctricos.

21.1 CARGA ELÉCTRICA

Consideremos una barra de caucho que se frota con un trozo de piel y se suspende de una cuerda que puede girar libremente. Si aproximamos a esta barra una segunda barra de caucho, frotada también con una piel, observaremos que las barras se repelen entre sí (figura 21.1a). El mismo resultado se obtiene si repetimos el mismo experimento con dos barras de vidrio que han sido frotadas con seda (figura 21.1b). Sin embargo, si utilizamos una barra de caucho frotada con piel y una varilla de vidrio frotada con seda, observaremos que las barras se atraen entre sí (figura 21.1c).

Al frotar una barra, ésta se carga eléctricamente. Repitiendo el experimento con diversos tipos de materiales, vemos que todos los objetos cargados pueden clasificarse en dos grupos: aquellos que se cargan como la barra de plástico frotada con un trozo de piel y los que se cargan como la varilla de vidrio frotada con un paño de seda. Los objetos de un mismo grupo se repelen entre sí, mientras que los de grupos diferentes se atraen. Benjamín Franklin propuso un modelo de electricidad para explicar este fenómeno. Sugirió que todo objeto posee una cantidad *normal* de electricidad y que cuando dos objetos están muy próximos, por ejemplo cuando se frotan entre sí, parte de la electricidad se transfiere de un cuerpo al otro: así pues, uno tiene un exceso de carga y el otro una deficiencia de carga de valor igual. Franklin describió las cargas resultantes con los signos más y menos. Al tipo de carga adquirida por una barra de vidrio frotada con un paño de seda le llamó positiva, lo cual significaba que el paño de seda adquiría una carga negativa de igual magnitud.



Un gato y un globo hinchado. (Roger Ressmeyer/CORBIS.)

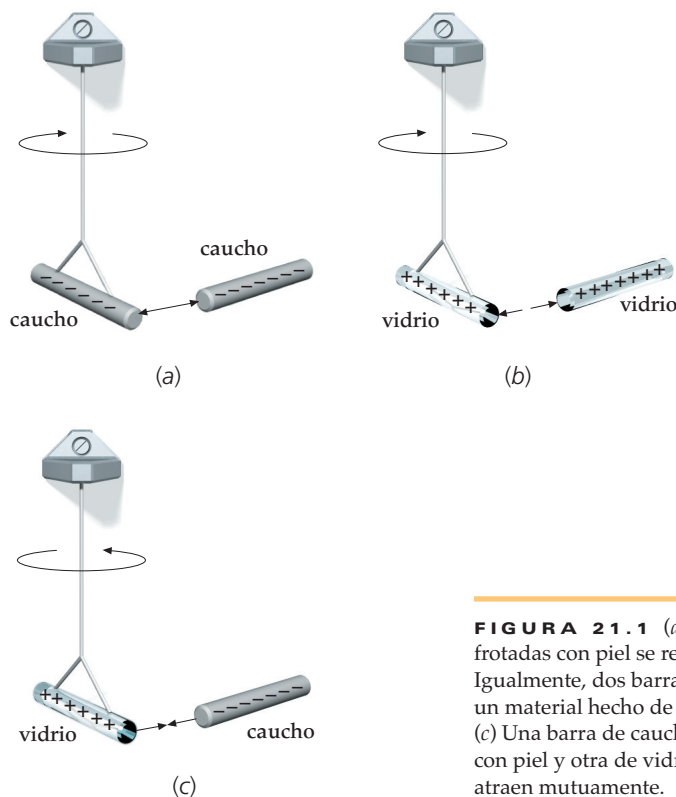


FIGURA 21.1 (a) Dos barras de caucho frotadas con piel se repelen mutuamente. (b) Igualmente, dos barras de vidrio frotadas con un material hecho de seda, se repelen entre sí. (c) Una barra de caucho que ha sido frotada con piel y otra de vidrio frotada con seda se atraen mutuamente.

Según esta elección de Franklin, el plástico frotado con una piel adquiere una carga negativa y la piel adquiere una carga positiva de igual magnitud. Dos objetos que portan el mismo tipo de carga se repelen entre sí, mientras que si portan cargas opuestas se atraen mutuamente (figura 21.1).

Actualmente, es bien conocido que cuando un vidrio se frota con un trozo de seda, se transfieren electrones del vidrio al pedazo de seda. De acuerdo con la convención de Franklin, todavía en uso, la seda está cargada negativamente, y, consecuentemente, decimos que los electrones tienen carga negativa. La tabla 21.1 corresponde a una versión reducida de una **serie triboeléctrica** (en griego *tribos* significa rozamiento). En esta serie, cuanto más baja es la ubicación de un material, mayor es su afinidad por captar electrones. Si dos materiales se ponen en contacto mediante rozamiento, se transfieren electrones del de la zona superior al de la inferior. Por ejemplo, electrones del nailon son transferidos al teflón cuando ambos se frotan entre sí.

CUANTIZACIÓN DE LA CARGA

La materia está formada por átomos eléctricamente neutros. Cada átomo posee un pequeño, pero masivo, núcleo que contiene protones y neutrones. Los protones están cargados positivamente, mientras que los neutrones no poseen carga. El número de protones en el núcleo es el número atómico Z del elemento. Rodeando al núcleo existe un número igual de electrones negativamente cargados, de modo que el átomo posee una carga neta cero. La masa del electrón es aproximadamente 2000 veces menor que la del protón. Sin embargo, sus cargas son exactamente iguales pero de signo contrario. La carga del protón es e y la del electrón $-e$, siendo e la **unidad fundamental de carga**. La carga de un electrón o protón es una propiedad intrínseca de la partícula; del mismo modo, la masa y el espín de estas partículas son también propiedades intrínsecas de las mismas.

Todas las cargas observables se presentan en cantidades enteras de la unidad fundamental de carga e . Es decir, la carga está cuantizada. Toda carga Q presente en la naturaleza puede escribirse en la forma $Q = \pm Ne$, siendo N un número entero.* Sin embargo, en los objetos ordinarios, N es habitualmente un número muy grande y la carga parece ser continua, del mismo modo que el aire parece ser un medio continuo aunque realmente consta de muchas moléculas discretas. Por ejemplo, al cargar una barra de plástico frotándola con un trozo de piel se transfieren del orden de 10^{10} electrones a la barra.

CONSERVACIÓN DE LA CARGA

Cuando dos objetos se frotan entre sí, uno de ellos queda con un exceso de electrones y, por lo tanto, cargado negativamente, y el otro queda con un déficit de electrones y, en consecuencia, cargado positivamente. La carga total, suma de la de los dos objetos, no cambia. Es decir, la *carga se conserva*. La **ley de conservación de la carga** es una ley fundamental de la naturaleza. En ciertas interacciones entre partículas elementales puede ocurrir que los electrones se creen o destruyan. Sin embargo, en todos estos procesos, se producen o destruyen cantidades iguales de cargas negativas y positivas, de manera que la carga del universo no varía.

La unidad de carga del SI es el coulomb, el cual se define en función de la unidad de corriente o intensidad eléctrica, el ampere (A).† El **coulomb** (C) es la cantidad de carga que fluye a través de un cable conductor en un segundo cuando la intensidad de corriente en el cable es de un ampere. La unidad fundamental de carga eléctrica e está relacionada con el coulomb por

$$e = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ C} \approx 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

21.1

UNIDAD FUNDAMENTAL DE CARGA

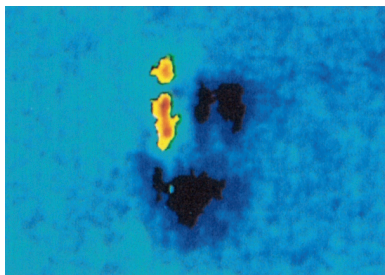
Tabla 21.1

Serie triboeléctrica

+ Extremo positivo de la serie
Amianto
Vidrio
Nailon
Lana
Plomo
Seda
Aluminio
Papel
Algodón
Acero
Caucho (goma dura)
Níquel y cobre
Latón y plata
Goma sintética
Fibra acrílica
Plástico flexible
Polietileno
Teflón
Goma de silicona
– Extremo negativo de la serie

* En el modelo estándar de partículas elementales, los protones, neutrones y otras partículas elementales están constituidas por partículas aún más fundamentales y primigenias llamadas *quarks*, las cuales poseen cargas de $\pm \frac{1}{3}e$ o $\pm \frac{2}{3}e$. Los quarks no se han observado como partículas individuales. Sólo se han observado combinaciones de estas partículas elementales que constituyen una carga neta de $\pm Ne$, siendo N un número entero.

† El ampere (A) es la unidad de corriente eléctrica.



Carga por contacto. Una muestra de plástico de anchura 0,02 mm fue cargada mediante contacto con una pieza de níquel. Aunque el plástico posee una carga neta positiva, se aprecian regiones de carga negativa (oscuras) y regiones de carga positiva (amarillo). La fotografía se tomó barriendo una aguja cargada, de anchura 10^{-7} m, sobre la muestra y midiendo la fuerza electrostática sobre la aguja. (Bruce Terris/IBM Almaden Research Center.)

PROBLEMA PRÁCTICO 21.1

Una carga de 50 nC ($1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$) puede producirse en el laboratorio simplemente frotando entre sí dos objetos. ¿Cuántos electrones deben ser transferidos para producir esta carga?

Ejemplo 21.1

¿Cuánta carga hay en una moneda?

Una moneda de cobre* ($Z = 29$) tiene una masa de 3,10 g. ¿Cuál es la carga total de todos los electrones contenidos en la moneda?

PLANTEAMIENTO La carga total de los electrones contenidos en una moneda viene dada por el número de éstos, N_e , multiplicado por la carga de uno de ellos, $-e$. Por tanto, el número de electrones será 29 veces el número de átomos de cobre, N_{at} . Para determinar N_{at} hay que tener en cuenta que un mol de cualquier sustancia tiene un número de moléculas igual al número de Avogadro ($N_A = 6,02 \times 10^{23}$) y el número de gramos de un mol es la masa molecular M , que para el cobre es 63,5 g/mol. Como la molécula de cobre es monoatómica, determinaremos el número de átomos por gramo dividiendo el N_A (átomos por mol) por el peso molecular M (gramos por mol).

SOLUCIÓN

1. La carga total es el número de electrones multiplicado por la carga electrónica: $Q = N_e(-e)$
2. El número de electrones es el número atómico Z multiplicado por el número de átomos de cobre, N_{at} : $N_e = ZN_{\text{at}}$
3. Calcular el número de átomos de cobre en 3,10 g de este metal: $N_{\text{at}} = (3,10 \text{ g}) \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}}{63,5 \text{ g/mol}} = 2,94 \times 10^{22} \text{ átomos}$
4. Calcular el número de electrones, N_e : $N_e = ZN_{\text{at}} = (29 \text{ electrones/átomo})(2,94 \times 10^{22} \text{ átomos}) = 8,53 \times 10^{23} \text{ electrones}$
5. Utilizar este valor de N_e para determinar la carga total: $Q = N_e \times (-e) = (8,53 \times 10^{23} \text{ electrones})(-1,60 \times 10^{-19} \text{ C/electrón}) = -1,37 \times 10^5 \text{ C}$

COMPROBACIÓN Hay $29 \times (6,02 \times 10^{23})$ electrones en 63,5 g de cobre. Por lo tanto, en 3,5 gramos de este material hay $(3,10/63,5) \times 29 \times (6,02 \times 10^{23}) = 8,53 \times 10^{23}$ electrones, lo cual está de acuerdo con el paso 4 del resultado del ejercicio.

PROBLEMA PRÁCTICO 21.2 Si cada habitante de los EE.UU. (aproximadamente 300 millones de habitantes) recibiera un millón de electrones, ¿qué porcentaje del número de electrones contenido en la moneda representaría?

* Desde 1793 hasta 1837, el penique estaba compuesto del 100% de cobre. En 1982, se cambió la composición pasando de 5% de cinc y 95% de cobre a una composición de 97,5% de cinc y 2,5% de cobre.

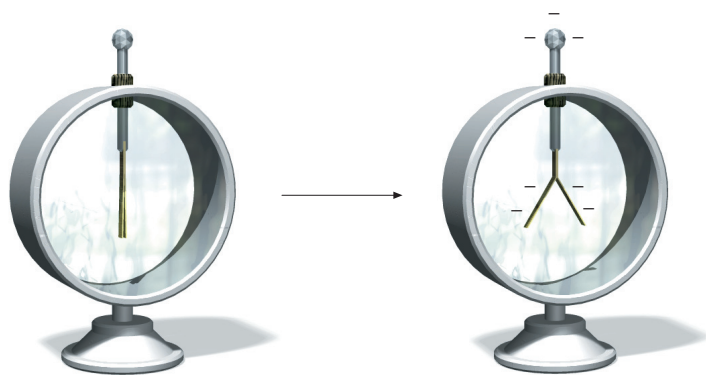


FIGURA 21.2 Electroscopio. Dos hojas de oro se conectan a una barra metálica terminada en la parte superior por una esfera de metal. Asimismo, las hojas están aisladas del recipiente. Cuando no están cargadas, las hojas cuelgan en dirección vertical, juntas. Cuando se toca la esfera con una barra de plástico cargada negativamente, se transfieren algunas cargas negativas de la barra a la esfera, y de ésta son conducidas a las hojas de oro, las cuales se separan entre ellas debido a la repulsión de sus respectivas cargas negativas. Si se toca la esfera con una barra de vidrio cargada positivamente, las hojas también se separan. (Poniendo en contacto la bola con una barra de vidrio cargada positivamente, las hojas de oro deberían separarse. En este caso, la barra de vidrio cargada positivamente atrae electrones de la esfera de metal, dejando una carga neta positiva en la bola, en la barra y en las hojas.)

21.2 CONDUCTORES Y AISLANTES

En muchos materiales, tales como el cobre y otros metales, parte de los electrones pueden moverse libremente en el seno del material. Estos materiales se denominan **conductores**. En otros materiales, tales como la madera o vidrio, todos los electrones están ligados a los átomos próximos y ninguno puede moverse libremente. Estos materiales se denominan **aislantes**.

En un átomo de cobre aislado, existen 29 electrones ligados al núcleo por atracción electrostática entre los electrones cargados negativamente y los núcleos cargados positivamente. Los electrones más externos están ligados más débilmente que los más internos a causa de su mayor distancia al núcleo y a la repulsión de los electrones más internos. Cuando un gran número de átomos de cobre se combinan en una pieza de cobre metálico, el enlace de los electrones de cada átomo individual se reduce debido a las interacciones con los átomos próximos. Uno o más de los electrones externos de cada átomo queda en libertad para moverse por todo el metal, del mismo modo que una molécula de gas se mueve en el interior de una caja. El número de electrones libres depende del metal de que se trate, pero generalmente es de alrededor de un electrón por átomo. Cuando a un átomo se le quita o se le añade un electrón, apareciendo una carga neta, se convierte en un **ion**. En el cobre metálico, los iones de cobre se distribuyen regularmente formando una *red*. Normalmente, un conductor es eléctricamente neutro porque existe un ion en la red portador de una carga positiva $+e$ por cada electrón libre portador de una carga negativa $-e$. La carga neta de un conductor puede variar por adición o extracción de electrones. Un conductor con una carga neta negativa tiene un exceso de electrones libres, mientras que un conductor con una carga neta positiva tiene un déficit de los mismos.

CARGA POR INDUCCIÓN

La conservación de la carga puede ilustrarse mediante un método simple de cargar un conductor llamado **carga por inducción**, que se muestra en la figura 21.3. Dos esferas metálicas sin carga están en contacto. Al acercarse a una de las esferas una barra cargada, los electrones fluyen de una esfera a la otra, acercándose a la barra si ésta se encuentra positivamente cargada o alejándose si su carga es negativa. Si la barra está cargada positivamente (figura 21.3a), atrae a los electrones y la esfera más próxima a la barra adquiere electrones de la otra. La esfera más próxima adquiere carga ne-

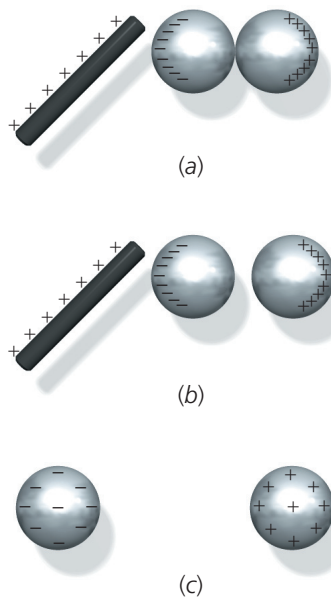


FIGURA 21.3 Carga por inducción. (a) Los dos conductores esféricos en contacto adquieren cargas opuestas cuando la barra cargada positivamente atrae a los electrones hacia la esfera de la izquierda. (b) Si las esferas se separan sin mover la barra de su posición, éstas retienen sus cargas iguales y opuestas. (c) Si la barra se retira y las esferas se separan, éstas quedan uniformemente cargadas con cargas iguales y opuestas.



COMPROBACIÓN CONCEPTUAL 21.1

Una esfera conductora con carga $+Q$ se pone en contacto con otra esfera, también conductora e idéntica de tamaño a la anterior y con carga inicial nula. (a) ¿Cuál será la carga de cada esfera después de que se establezca el contacto? (b) Estando las esferas en contacto, una barra cargada positivamente se aproxima a una de estas esferas, causando una redistribución de las cargas de las dos esferas, de forma que la que está más próxima a la barra tiene una carga $-Q$. ¿Cuál es la carga de la otra esfera?

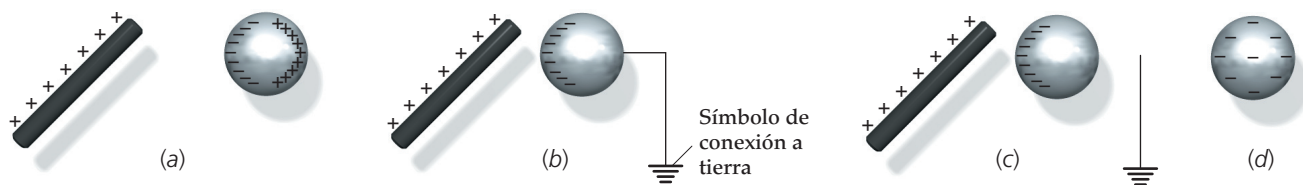


FIGURA 21.4 Inducción por conexión a tierra. (a) La carga libre sobre una esfera conductora se polariza mediante la barra cargada positivamente, que atrae las cargas negativas de la esfera. (b) Si la esfera se conecta a un conductor muy grande, tal como la Tierra, por medio de un alambre, los electrones del suelo

neutralizan la carga positiva del lado más alejado de la barra y la esfera queda negativamente cargada. (c) La carga negativa permanece si el cable se desconecta antes de separar la barra. (d) Al quitar la barra, la esfera queda cargada negativamente de forma uniforme.

gativa y la más alejada queda con una carga neta igual, pero positiva. Cuando un conductor tiene cargas *separadas* iguales y opuestas se dice que está **polarizado**. Si las esferas se separan antes de retirar la barra, quedarán con cantidades iguales de cargas opuestas (figura 21.3b). Un resultado semejante se obtiene con una barra cargada negativamente; los electrones pasarían de la esfera más próxima a la más alejada.

La propia Tierra constituye un conductor que para muchos propósitos puede considerarse infinitamente grande y con un suministro de carga libre abundante. Cuando un conductor se pone en contacto con el suelo se dice que está **conectado a tierra**. Esto se representa esquemáticamente mediante un cable de conducción que termina en unas pequeñas líneas paralelas, como indica la figura 21.4b. La figura 21.4 muestra cómo puede inducirse una carga en un conductor simple transfiriendo electrones desde el suelo y, a continuación, interrumpiendo la conexión a tierra. (En la práctica, una persona que estuviera en el suelo tocando con sus manos la esfera podría servir como ejemplo de la demostración electrostática descrita aquí.)



COMPROBACIÓN CONCEPTUAL 21.2

Se cargan dos esferas idénticas conductoras mediante inducción electrostática y seguidamente se separan a gran distancia una de la otra; la esfera 1 tiene carga $+Q$ y la esfera 2, carga $-Q$. Se dispone de una tercera esfera idéntica a las otras dos e inicialmente descargada. Si las esferas 3 y 1 se ponen en contacto y, seguidamente, se separan, y luego se ponen en contacto la 3 y la 2 y se separan, ¿cuál será la carga final de cada una de las tres esferas?



El pararrayos de este edificio está conectado a tierra para conducir los electrones desde el suelo a las nubes cargadas positivamente a fin de neutralizarlas. (© Grant Heilman.)



Estas damas utilizan sombreros con cadenas metálicas que arrastran por el suelo, supuestamente para protegerse contra los rayos. (Ann Roman Picture Library.)