Física

para la ciencia
y la tecnología

Tipler | Mosca

6ª edición

Física moderna
Mecánica cuántica, relatividad y estructura de la materia

EDITORIAL REVERTÉ

Abreviaturas de unidades

A	ampère	H	henry	nm	nanómetro (10^{-9} m)
Å	ángstrom (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

Longitud

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 $c \cdot$ a = 9,461 × 10^{15} m

1 in = 2,540 cm

Volumen

1 L = 10^{3} cm^3 = 10^{-3} m^3 = 1,057 qt

Tiempo

1 h = 3600 s = 3,6 ks

1 a = 365,24 d = 3,156 × 10^{7} s

Velocidad

1 km/h = 0,278 m/s = 0,6214 mi/h

1 ft/s = 0,3048 m/s = 0,6818 mi/h

Ángulo y velocidad angular

1 rev = 2π rad = 360°

1 rad = 57,30°

1 rev/min = 0,1047 rad/s

Fuerza–presión

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

Masa

1 u = $[(10^{-3}\ \text{mol}^{-1})/N_A]$ kg = 1,661 × 10^{-27} kg

1 tonelada = 10^{3} kg = 1 Mg

1 slug = 14,59 kg

1 kg ≈ 2,205 lb

Energía–Potencia

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

Conductividad térmica

1 W/(m · K) = 6,938 Btu · in/(h · ft^2 · °F)

Campo magnético

1 T = 10^{4} G

Viscosidad

1 Pa · s = 10 poise

SEXTA EDICIÓN

FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

FÍSICA MODERNA

Mecánica cuántica, relatividad y estructura de la materia

SEXTA EDICIÓN

FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

FÍSICA MODERNA

Mecánica cuántica, relatividad y estructura de la materia

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, 2011, 2012, 2015, 2016

Edición en papel
© Editorial Reverté, S. A., 2010, 2011, 2012, 2015, 2016
ISBN 978-84-291-4426-0 Volumen Física moderna
ISBN: 978-84-291-4428-4 Obra completa

Edición e-book (PDF)
© Editorial Reverté, S. A., 2021
ISBN: 978-84-291-9595-8

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.

1341

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

Física moderna

Prefacio xi
Acerca de los autores xxii

* Materias opcionales

Capítulo R
RELATIVIDAD ESPECIAL / R.1

R.1 El principio de relatividad y la constancia de la velocidad de la luz R.2
R.2 Barras en movimiento R.4
R.3 Relojes en movimiento R.5
R.4 Más sobre barras en movimiento R.8
R.5 Relojes lejanos y simultaneidad R.9
R.6 Momento relativista, masa y energía R.12
Resumen R.15
Problemas R.16

PARTE VI MECÁNICA CUÁNTICA, RELATIVIDAD Y ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Capítulo 34
DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA Y FÍSICA CUÁNTICA / 1173

34.1 Ondas y partículas 1174
34.2 La luz: de Newton a Maxwell 1174
34.3 La naturaleza corpuscular de la luz: fotones 1175
34.4 Cuantización de la energía en los átomos 1180
34.5 Electrones y ondas materiales 1181
34.6 Interpretación de la función de onda 1185
34.7 Dualidad onda-partícula 1187
34.8 Una partícula confinada en una caja 1189
34.9 Valores esperados 1193
34.10 Cuantización de la energía en otros sistemas 1196
Resumen 1198
Problemas 1199

Capítulo 35
APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE SCHRÖDINGER / 1203

35.1 Ecuación de Schrödinger 1204
35.2 Una partícula en un pozo rectangular finito 1206
35.3 Oscilador armónico 1208
35.4 Reflexión y transmisión de las ondas electrónicas: penetración de una barrera 1211
35.5 La ecuación de Schrödinger en tres dimensiones 1217
35.6 La ecuación de Schrödinger para dos partículas idénticas 1220
Resumen 1223
Problemas 1224

Capítulo 36

ÁTOMOS / 1227

36.1 El átomo 1228
36.2 Modelo de Bohr del átomo de hidrógeno 1229
36.3 Teoría cuántica de los átomos 1234
36.4 Teoría cuántica del átomo de hidrógeno 1236
36.5 Efecto espín–órbita y estructura fina 1241
36.6 La tabla periódica 1244
36.7 Espectros ópticos y espectros de rayos X 1251
Resumen 1255
Problemas 1257

Capítulo 37

MOLÉCULAS / 1261

37.1 Enlace 1261
*37.2 Moléculas poliatómicas 1269
37.3 Niveles energéticos y espectros de moléculas diatómicas 1271
Resumen 1278
Problemas 1279

Capítulo 38

SÓLIDOS / 1281

38.1 La estructura de los sólidos 1282
38.2 Imagen microscópica de la conducción 1286
38.3 Electrones libres en un sólido 1289
38.4 Teoría cuántica de la conducción eléctrica 1296
38.5 Teoría de bandas de los sólidos 1297
38.6 Semiconductores 1299
*38.7 Uniones y dispositivos semiconductores 1301
38.8 Superconductividad 1305
38.9 La distribución de Fermi-Dirac 1309
Resumen 1313
Problemas 1315

Capítulo 39

RELATIVIDAD / 1319

39.1 Relatividad newtoniana 1320
39.2 Postulados de Einstein 1321
39.3 La transformación de Lorentz 1322
39.4 Sincronización de relojes y simultaneidad 1330
39.5 Transformación de velocidades 1336
39.6 Momento lineal relativista 1340
39.7 Energía relativista 1341
39.8 Relatividad general 1348
Resumen 1351
Problemas 1352

Capítulo 40

FÍSICA NUCLEAR / 1357

40.1 Propiedades de los núcleos 1357
40.2 Radiactividad 1362
40.3 Reacciones nucleares 1370
40.4 Fisión y fusión 1372
Resumen 1383
Problemas 1384

Capítulo 41

LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES Y EL ORIGEN DEL UNIVERSO / 1389

41.1 Hadrones y leptones 1390
41.2 Espín y antipartículas 1393
41.3 Leyes de conservación 1396
41.4 Quarks 1400
41.5 Partículas de campo 1403
41.6 Teoría electrodébil 1404
41.7 El modelo estándar 1404
41.8 La evolución del universo 1406
Resumen 1409
Problemas 1410

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

NUEVO!

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: $\vec{a}_m = \dfrac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$
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 3.7*a*), y tracemos el diagrama de suma vectorial (figura 3.7*b*) 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. Sustituya los resultados anteriores para determinar la aceleración media: $\vec{a}_m = \dfrac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t} = \dfrac{60\ \text{km/h}\ \hat{j} - 60\ \text{km/h}\ \hat{i}}{5{,}0\ \text{s}}$
5. Convierta 60 km/h a metros por segundo: $60\ \text{km/h} \times \dfrac{1\ \text{h}}{3600\ \text{s}} \times \dfrac{1000\ \text{m}}{1\ \text{km}} = 16{,}7\ \text{m/s}$
6. Exprese la aceleración en metros por segundo al cuadrado: $\vec{a}_m = \dfrac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t} = \dfrac{16{,}7\ \text{m/s}\ \hat{j} - 16{,}7\ \text{m/s}\ \hat{i}}{5{,}0\ \text{s}} = \boxed{-3{,}4\ \text{m/s}^2\ \hat{i} + 3{,}4\ \text{m/s}^2\ \hat{j}}$

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.

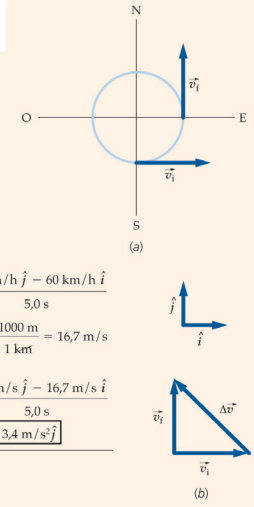


FIGURA 3.7

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.

NUEVO!

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 (^{60}Co) es 5,27 años. A $t = 0$ se tiene una muestra de ^{60}Co de masa 1,20 mg. ¿Cuánto tiempo t (en años) habrá de transcurrir para que 0,400 mg de la muestra de ^{60}Co 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 ^{60}Co 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 el tiempo que tarda el condensador en descargarse hasta e^{-1} (o sea 0,368) veces su carga a $t = 0$. Si $\tau = 1$ s para un condensador, ¿cuánto tiempo t (en segundos) habrá de transcurrir para descargarse hasta el 50% de su carga inicial?
28. Si la población de coyotes en un determinado lugar está creciendo a un ritmo del 8,0% por década y continúa creciendo al mismo ritmo indefinidamente, ¿en cuántos años se alcanzará 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, t_2 y se escribe

$$\int f\,dt = \text{área}_i = \lim_{\Delta t_i \to 0} \sum_i f_i \Delta t_i \qquad \text{M.74}$$

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 in-

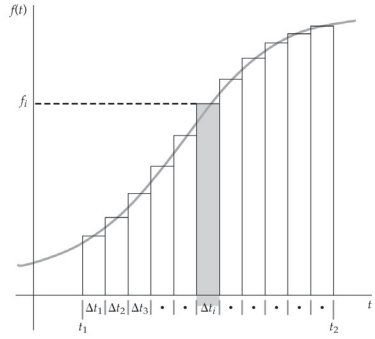


FIGURA M.27 Función general $f(t)$. El área del elemento sombreado es aproximadamente $f_i\,\Delta t_i$, en donde f_i se calcula para un punto cualquiera del intervalo.

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

Véase el
Apéndice de matemáticas
para más información sobre
Cálculo diferencial

NUEVO!

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.

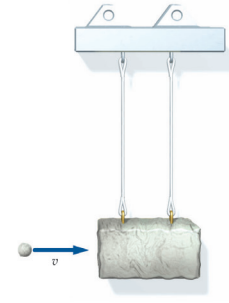


FIGURA 8.20

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.

- 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_6, 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_6 y (*b*) en el instante t_9.

donde U_0, 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.

NUEVO!

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.

Temas de actualidad en Física

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 minas[1] 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 hacer 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 propulsadas 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]

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

[1] Agricola, Georgius, *De Re Metallic.* (Herbert and Lou Henry Hoover, Transl.) Reprint Mineola, NY: Dover, 1950, 200–203.
[2] Conally, Abe, and Conally, Josie, "Wind Powered Generator," *Make*, Feb. 2006, Vol. 5, 90–101.
[3] "Why Four Generators May Be Better than One," *Modern Power Systems*, Dec. 2005, 30.
[4] Gorban, A. N., Gorlov, A. M., and Silantyev, V. M., "Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow." *Journal of Energy Resources Technology*, Dec. 2001, Vol. 123, 311–317.
[5] Roy, S. B., S. W. Pacala, and R. L. Walko. "Can Large Wind Farms Affect Local Meteorology?" *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, Oct. 16, 2004, 109, D19101.
[6] Gorban, A. N., Gorlov, A. M., and Silantyev, V. M., "Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow." *Journal of Energy Resources Technology*, December 2001, Vol. 123, 311–317.
[7] Wilde, Matthew, "Colwell Farmers Take Advantage of Grant to Produce Wind Energy." *Waterloo-Cedar Falls Courier*, May 1, 2006, B1+.

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. Pompi
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'Donughue
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 Pompi
The State University of New York at Binghamton

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

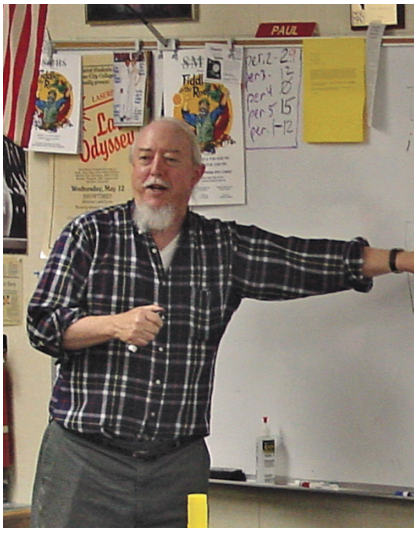
Es obvio que nuestro trabajo no termina nunca; por ello, esperamos recibir comentarios y sugerencias de nuestros lectores para poder mejorar el texto y corregir cualquier error. Si usted cree que ha hallado un error, o tiene cualquier otro comentario, sugerencia o pregunta, envíenos una nota a **produccion@reverte.com**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

CAPÍTULO

R

A BORDO DEL TRANSBORDADOR ESPACIAL ORBITER, LOS ASTRONAUTAS DESCANSAN EN LITERAS Y NO REQUIEREN COLCHONES BLANDOS. DUERMEN ATADOS A ELLAS CON CORREAS Y ASÍ NO VAN FLOTANDO POR LA CABINA. CUANDO EL TRANSBORDADOR RECORRE SU ÓRBITA MÁS CERCANA A LA TIERRA, DA UNA VUELTA COMPLETA CADA 90 MINUTOS A UNA VELOCIDAD DE UNOS 7 km/s, LO QUE REPRESENTA UNA PEQUEÑA FRACCIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ, $3{,}0 \times 10^5$ km/s. *(NASA.)*

Relatividad especial

R.1 El principio de relatividad y la constancia de la velocidad de la luz

R.2 Barras en movimiento

R.3 Relojes en movimiento

R.4 Más sobre barras en movimiento

R.5 Relojes lejanos y simultaneidad

R.6 Momento relativista, masa y energía

? Si un astronauta en una nave espacial que viaja a una velocidad de 0,6*c* respecto a la Tierra duerme una siesta de una hora, ¿dura también una hora dicha siesta para un observador terrestre? (Véase el ejemplo R.1.)

La teoría de la relatividad consta de dos teorías bien diferenciadas: la teoría especial y la teoría general. La teoría especial, desarrollada por Einstein y otros autores en 1905, se ocupa de la comparación de medidas hechas desde distintos sistemas de referencia inerciales que se mueven con velocidades constantes los unos respecto a los otros. Sus consecuencias, que pueden deducirse con un mínimo de matemáticas, son aplicables a una gran variedad de situaciones que se dan tanto en física como en ingeniería. Una aplicación de la teoría especial puede verse en el desarrollo del GPS (*Global Positioning System*), dispositivo capaz de darnos las coordenadas de nuestra posición (longitud, latitud y altitud) con una precisión de pocos metros. El sistema consiste en una constelación de 24 satélites, cada uno provisto de un reloj atómico y de una emisora que emite señales horarias que pueden ser captadas por cualquier receptor GPS con el que esté en visión directa. Las diferencias en los tiempos de recepción de las señales procedentes de distintos satélites, junto con el conocimiento de la posición de cada uno de ellos, permiten calcular al receptor cuales son sus coordenadas de posición. Según la teoría especial, cuanto mayor sea la velocidad con la que vemos pasar un reloj, tanto más lentamente veremos avanzar sus manecillas (sección R.3). Los satélites orbitan a unos 3,9 km/s y el retraso que a esta velocidad experimentan los

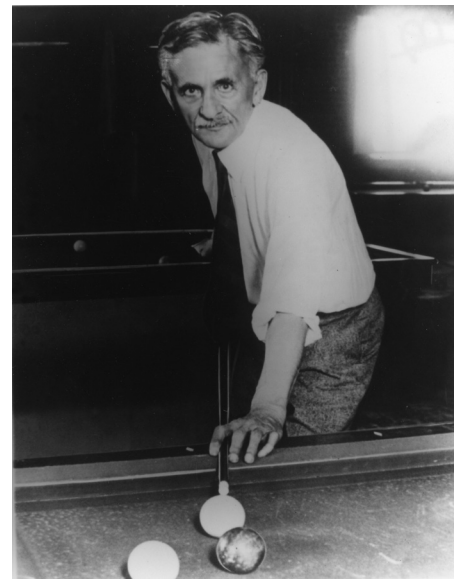
relojes no es despreciable. Por ello, en el diseño del GPS se tiene en cuenta el retraso de los relojes en órbita. (Además, de acuerdo con la teoría general, un reloj se adelanta al estar sometido a un potencial gravitatorio mayor (sección 39.8). El diseño también tiene en cuenta el adelanto de los relojes que están a mayor altitud.) El GPS funciona correctamente sólo si se tienen en cuenta estos efectos de la teoría especial y general de la relatividad sobre los ritmos distintos que observamos en los distintos relojes.

En este capítulo, nos centramos en la teoría especial de la relatividad (llamada también relatividad especial o restringida). Veremos cómo dicha teoría desafía nuestra experiencia cotidiana acerca del tiempo y las distancias, cuando describamos la ralentización de los relojes en movimiento, el acortamiento de las barras móviles, la relatividad de la simultaneidad de sucesos alejados, la relatividad del momento lineal y la relación entre masa y energía.

R.1 EL PRINCIPIO DE RELATIVIDAD Y LA CONSTANCIA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

El principio de relatividad puede enunciarse así:

> Es imposible diseñar un experimento que establezca si uno se halla en reposo o en movimiento uniforme.
>
> POSTULADO I, EL PRINCIPIO DE RELATIVIDAD



Albert Michelson.
(AIP Emilio Segre Visual Archives.)

Movimiento uniforme es el que se realiza a velocidad constante respecto a un sistema de referencia inercial. Por ejemplo, supongamos que estamos sentados en un avión que viaja a una velocidad uniforme muy elevada respecto a la superficie terrestre. Si soltamos un tenedor, éste caerá hacia el suelo del avión de manera exactamente igual a como lo haría si el avión se encontrara aparcado en la pista. Cuando el avión está volando, podemos considerar que nosotros mismos y el avión estamos conjuntamente en reposo y que es la superficie de la Tierra que tenemos debajo la que se mueve. No hay nada que permita discernir si somos nosotros y el avión los que nos movemos y la superficie terrestre está en reposo, o viceversa.

Todo sistema de referencia en el que una partícula sobre la que no actúa fuerza alguna se mueve con velocidad constante es, por definición, un sistema de referencia inercial.* La superficie de la Tierra es un sistema de referencia inercial, en buena aproximación. El avión también lo es, siempre y cuando viaje a velocidad constante respecto a la superficie terrestre. Mientras permanezcamos sentados (o quietos y en pie) en el avión, tanto podemos considerar que somos nosotros mismos y el avión los que estamos en reposo y la superficie terrestre se mueve, como que nos movemos nosotros con el avión y que la superficie terrestre está en reposo.

Durante el siglo XIX, fue ampliamente aceptada la existencia de un sistema de referencia que podía considerarse en reposo. Se pensaba que este sistema de referencia era el del *éter*, el medio que rellenaba todo el espacio y a través del cual se suponía que se propagaba la luz. (Se creía entonces que las ondas luminosas necesitaban de un medio a través del cual propagarse, tal y como hoy creemos que pasa con el sonido, que requiere del aire o de otro medio material para su propagación.) El éter se consideraba el mejor sistema de referencia, "en reposo".

Edward Morley.
(AIP Emilio Segre Visual Archives.)

En 1887, Albert Michelson y Edward Morley realizaron una serie de medidas cuidadosamente diseñadas para determinar la velocidad orbital de la Tierra respecto al éter. Este trabajo de medición suponía un gran reto dado que la velocidad

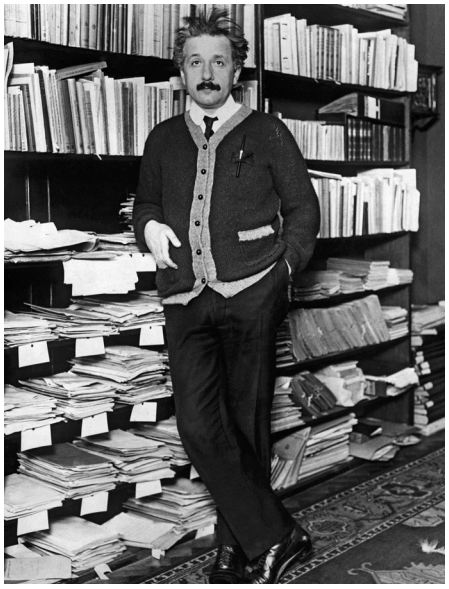
* En los capítulos 2 y 4, se amplía el estudio de sistemas de referencia.

orbital de la Tierra es un poco inferior a una diezmilésima parte de la velocidad de la luz en el vacío. Con gran sorpresa para la inmensa mayoría, las medidas siempre indicaban que la velocidad relativa entre Tierra y éter era nula. Albert Einstein formuló entonces una teoría consistente con estas medidas. Su explicación fue que la luz era capaz de propagarse en el espacio vacío y que el éter era un concepto innecesario y que no existía. Además, Einstein postuló:

> La velocidad de la luz es independiente de la velocidad de la fuente emisora.
>
> POSTULADO II

Por *velocidad de la luz* entendemos la velocidad con la que la luz se propaga a través del espacio vacío.

Una consecuencia del Postulado II y del principio de relatividad (Postulado I) es que todos los observadores inerciales miden el mismo valor para la velocidad de la luz. (Un observador inercial es aquel que permanece en reposo en un sistema de referencia inercial.) Para comprobar que todos los observadores inerciales determinan el mismo valor de la velocidad de la luz, consideremos los observadores inerciales A y B, que se mueven uno con relación al otro. El principio de relatividad afirma que es imposible diseñar un experimento para establecer si un observador inercial está en reposo o moviéndose uniformemente. Si el observador A midiera un valor para la velocidad de la luz distinto del medido por el observador B, entonces, dichos observadores A y B no podrían considerarse ambos en reposo: una conclusión que contradice claramente el principio de relatividad. Así pues, una consecuencia conjunta del principio de relatividad y del Postulado II (que la velocidad de la luz es independiente de la velocidad de la fuente emisora) es la **constancia de la velocidad de la luz**:



Albert Einstein.
(Underwood & Underwood/Corbis.)

> La velocidad de la luz c es la misma en cualquier sistema de referencia inercial.
>
> CONSTANCIA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Además, cualquier móvil (y no sólo la luz) que viaje a velocidad c respecto a un sistema de referencia inercial, viaja también a la misma velocidad c respecto a cualquier otro sistema de referencia inercial.

Supongamos que estamos en el patio de nuestra casa y que Luis viaja en una nave espacial que se aleja de nosotros a la mitad de la velocidad de la luz ($\frac{1}{2}c$) (figura R.1). Enfocamos una linterna en la dirección de Luis y la encendemos. La luz sale de la linterna, viajando a velocidad c (relativa a la linterna), y pasa cerca de Alicia, que se encuentra en la azotea de la casa de al lado. Alicia mide la velocidad de la luz y determina el valor c. Al cabo de unos minutos, la luz alcanza a Luis y su nave. Al igual que Alicia, Luis mide también la velocidad de la luz y determina el mismo valor c. Esto le sorprende, porque Luis esperaba que la luz que viajaba tras él lo hacía, no a velocidad c, sino más bien a $\frac{1}{2}c$ (después de todo, Luis se mueve a velocidad $\frac{1}{2}c$ respecto a la fuente luminosa, la linterna que tenemos en el patio). Al igual que muchos, Luis considera contraria a la intuición esta constancia de la velocidad de la luz. Esto le crea un dilema, ¿ha de confiar en sus aparatos de medida o ha de confiar en su intuición? Resulta que es la intuición de Luis, y no sus instrumentos, lo que habrá que reajustar. Luis debe cambiar tanto sus conceptos de espacio como de tiempo.

Supongamos que en lugar de apuntar con un haz de luz lo hacemos en la misma dirección con un emisor de partículas que viajan, unas tras otras, a altísima velocidad, entendiendo como tal una velocidad muy cercana a la de la luz c. (Una partícula como un electrón o un protón no puede viajar a la velocidad de la luz, pero puede hacerlo a velocidades extremadamente cercanas a ésta.) Si Alicia mide que las partículas que pasan por su lado viajan a la velocidad de $0{,}9999c$ (relativa a ella), ¿qué velocidad medirá Luis para las partículas que pasan junto a él? La intuición de Luis le dice que, dado que él se aleja del foco emisor de partículas, éstas

FIGURA R.1

pasarán por su lado más lentamente, a una velocidad de 0,4999*c*. Pero no es así. Cuando Luis mide la velocidad de las partículas (relativa a sí mismo), obtiene un valor muy cercano a 0,9999*c*. (De hecho, su velocidad es 0,9997*c*.)*

Solemos pensar que las distancias entre ciudades son invariables. Pero esto tampoco es así. Según cierto mapa de carreteras, entre Baltimore y Philadelphia hay 160 km. Sin embargo, si viajáramos de Baltimore a Philadelphia a una velocidad cercana a la velocidad de la luz, la distancia entre estas dos ciudades sería más corta de lo que es si viajamos a 100 km/h. Para quien conduzca a 100 km/h, la distancia entre Baltimore y Philadelphia es muy cercana a 160 km. Pero para alguien que viajara a una velocidad de 0,866*c* (relativa a la superficie terrestre), la distancia sería de sólo 80 km, y para quien viajara a 0,9999*c*, la distancia sería solamente de 2,2 km.

La máxima velocidad respecto a la Tierra que ha alcanzado jamás un ser humano (se alcanzó durante la misión Apolo a la Luna) es solamente de unos 10 km/s = $3{,}3 \times 10^{-5}c$. Frente a la velocidad de la luz, esta velocidad es tan pequeña que para alguien que viaje a esa velocidad de Baltimore a Philadelphia, la distancia entre estas ciudades se acortaría en menos del diámetro de un cabello humano. En las tres secciones siguientes, se exponen los razonamientos que nos llevan a estas conclusiones.

R.2 BARRAS EN MOVIMIENTO

Vamos a comprobar que si una barra se mueve en la dirección perpendicular a su propia longitud, esta longitud no cambia. Lo hacemos mostrando que cualquier aumento o disminución de la longitud estaría en contradicción con el principio de relatividad. Puede parecer intrascendente comprobar que una barra no cambia su longitud. Lo hacemos, sin embargo, porque una de las consecuencias inmediatas de ello será que los relojes en movimiento ralentizan su marcha y atrasan respecto a un reloj inmóvil.

Supongamos que disponemos de dos reglas idénticas de un metro, regla A y regla B. Comprobamos que las reglas son idénticas colocándolas una junto a otra en un sistema de referencia en que ambas estén en reposo y las examinamos visualmente. Damos después la regla B a Berta que se la lleva en su nave espacial. Durante el viaje, Berta se asegura de mantener su regla B formando un ángulo recto con la velocidad que tiene la nave respecto a la Tierra. La regla A se queda en la Tierra con nosotros. Mientras dura el viaje, ¿es la regla B más corta que la A?

Para responder a esta pregunta vamos a realizar mentalmente un experimento. Fijamos dos rotuladores a la regla A, uno en la marca de los 20 cm y el otro en la de los 80 cm. Entonces, Berta ejecuta una pasada rasante con su nave manteniendo su regla B asomada a una ventanilla y formando un ángulo recto con la velocidad de la nave. Durante esta pasada, sostenemos nuestra regla A manteniéndola paralela a la regla B. Cuando las dos reglas se cruzan quedan trazadas dos señales en la regla B (figura R.2). Berta aterriza con su regla B, las dos reglas se vuelven a colocar una al lado de la otra (figura R.3) y se compara la distancia entre las dos señales de la regla B con la distancia entre los dos rotuladores fijados a la regla A. Supongamos que una regla que se mueve perpendicularmente a su dirección fuera más corta que una regla idéntica en reposo. En este caso, la distancia entre rotuladores sería inferior a la distancia entre señales (figura R.3) —una evidencia clara de que durante el vuelo la regla móvil (regla B) era más corta que la regla en reposo. Sin embargo, de acuerdo con el principio de relatividad, es igualmente válido pensar que era la regla B la que estaba en reposo y la regla A la que se movía. Desde este punto de vista, la anterior comparación (figura R.3) demostraría que la regla en movimiento (ahora, la regla A) era más larga que la que quedó en reposo. Por lo tanto, nuestra suposición de que una regla que se mueve perpendicularmente a su longitud es más corta que otra regla idéntica en reposo, lleva a una contradicción y debe ser rechazada. La suposición de que una regla que se mueve perpendicularmente a su longitud es más larga

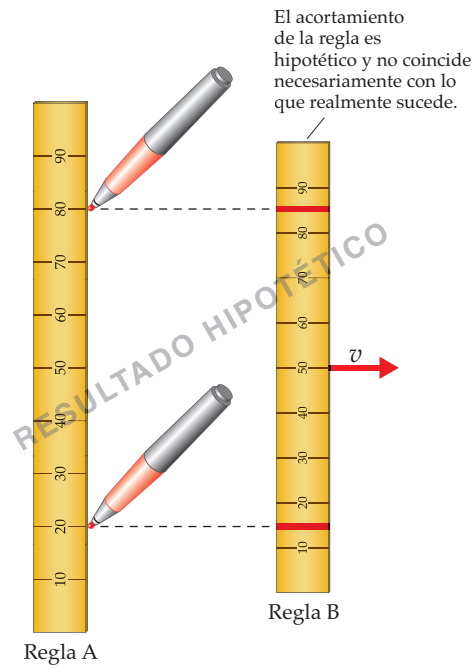


FIGURA R.2 Si la regla en movimiento se acortara, los rotuladores fijados a la regla A trazarían señales como éstas sobre la regla B al pasar junto a ella.

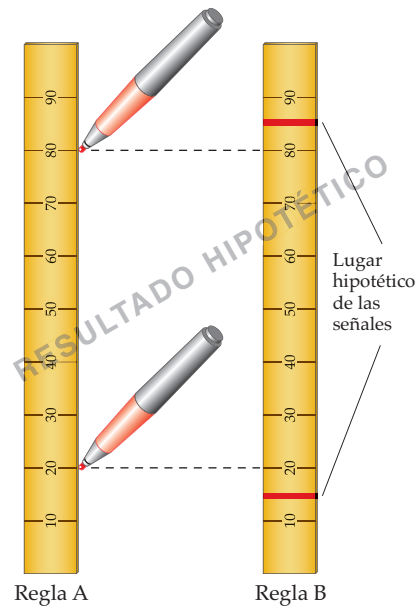


FIGURA R.3 Si la distancia entre señales fuera mayor que la distancia entre rotuladores, esto demostraría que, cuando se hicieron las señales, la regla B era más corta que la regla A.

* La velocidad relativa en relatividad especial se estudia en el capítulo 39.

que otra regla idéntica en reposo lleva también a contradicción, como veríamos usando un razonamiento análogo. Concluimos, por lo tanto, que:

> Una regla que se mueve con velocidad perpendicular a la propia regla tiene la misma longitud que otra regla idéntica en reposo.

Esta conclusión se ha alcanzado sin hacer referencia alguna al material con el que se construyó la regla. La conclusión, por lo tanto, no refleja una propiedad de las reglas. Refleja, en cambio, una propiedad del espacio.

El sistema de referencia en el que la regla está en reposo recibe el nombre de **sistema propio** o **sistema en reposo** de la regla, y la longitud de la regla en su sistema propio se denomina **longitud propia** o **longitud en reposo**.

R.3 RELOJES EN MOVIMIENTO

Los relojes sirven para medir tiempos. En este apartado, vamos a demostrar que los relojes en movimiento que observamos se atrasan respecto a nuestros propios relojes. Así pues, si una nave espacial muy rápida pasa frente a nosotros, observaremos que cada uno de los relojes de la nave avanza más lentamente que nuestros propios relojes. Sin embargo, la gente de la nave puede considerar que son ellos quienes están en reposo y nosotros quienes nos movemos, y observarían que son nuestros relojes los que avanzan más lentamente que los suyos. Examinemos cómo estas dos observaciones son consistentes con la constancia de la velocidad de la luz y el principio de relatividad.

Construimos un reloj, llamémosle *reloj de luz*, usando una barra de longitud propia L_0 y dos espejos (figura R.4). Los dos espejos están frente a frente y un flash de luz va y viene reflejándose en ellos. Cada vez que el flash se refleja en un espejo, digamos el superior, consideramos que el reloj hace "tic", y al regresar y reflejarse en el inferior hace "tac", completando así un "tictac". Entre dos tac sucesivos el flash de luz viaja una distancia $2L_0$ en el sistema de referencia propio del reloj. Por lo tanto, el tiempo entre tac y tac, T_0, está relacionado con L_0 por

$$2L_0 = cT_0 \qquad \text{R.1}$$

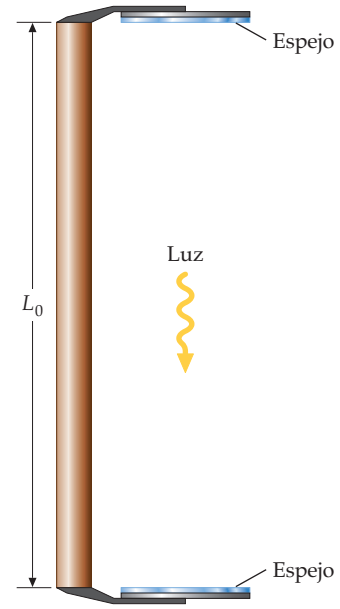


FIGURA R.4 El reloj de luz completa un "tictac" cada vez que el flash se refleja en el espejo inferior.

A continuación, consideramos el tiempo T entre tac y tac del mismo reloj de luz, pero esta vez lo observamos desde un sistema de referencia en el que el reloj se mueve con velocidad v perpendicular a la barra (figura R.5). En este sistema de referencia, entre tac y tac, el reloj recorre una distancia vT y el flash de luz lo hace una distancia cT. La distancia que recorre el flash de luz al viajar desde el espejo inferior al superior es $\sqrt{L_0^2 + (\frac{1}{2}vT)^2}$. Y es también la misma distancia que recorre desde el espejo superior al inferior. Por lo tanto,

$$2\sqrt{L_0^2 + (\tfrac{1}{2}vT)^2} = cT \qquad \text{R.2}$$

Ya que la velocidad de la luz es la misma en cualquier sistema de referencia inercial, hemos usado el mismo símbolo c para la velocidad de la luz en las ecuaciones R.1 y R.2. Despejando L_0 en la ecuación R.1 y sustituyendo el resultado en la ecuación R.2, obtenemos

$$\sqrt{(\tfrac{1}{2}cT_0)^2 + (\tfrac{1}{2}vT)^2} = \tfrac{1}{2}cT \qquad \text{R.3}$$

Despejando T, nos da

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \qquad \text{R.3}$$

DILATACIÓN DEL TIEMPO

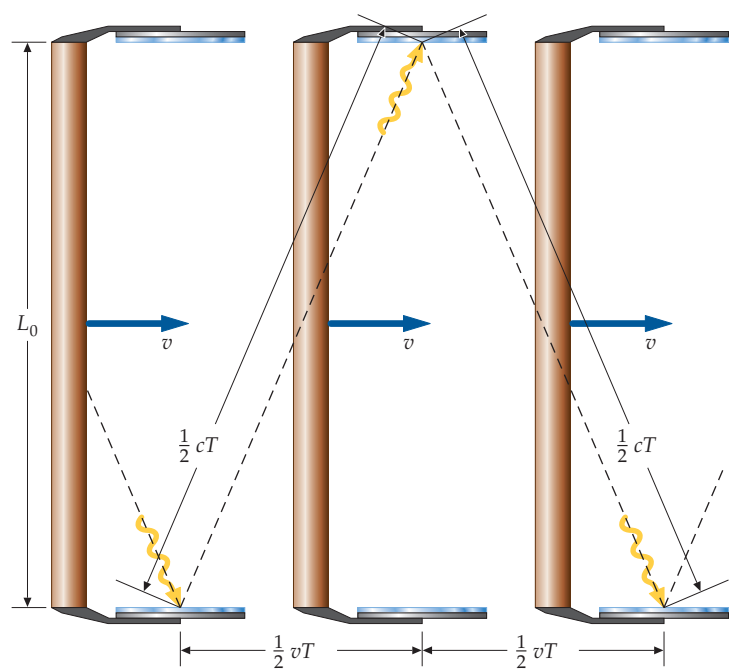


FIGURA R.5 El reloj de luz se mueve con velocidad v.

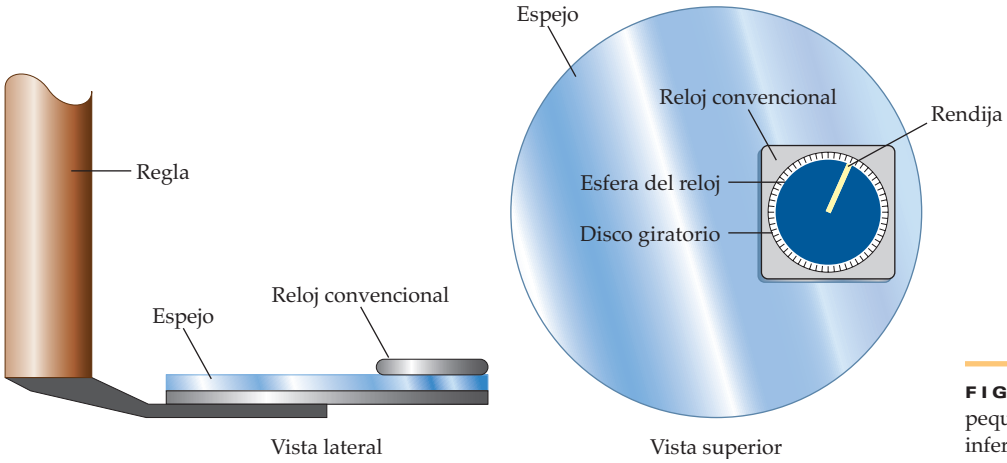


FIGURA R.6 Hemos colocado un pequeño reloj convencional en el espejo inferior del reloj de luz.

De acuerdo con esta ecuación R.3, el tiempo entre tac y tac en el sistema de referencia en el cual el reloj se mueve con velocidad v es mayor que el tiempo entre tac y tac en el sistema de referencia propio del reloj.

Esto nos lleva a la siguiente pregunta: ¿Atrasan también otros relojes al moverse con velocidad v de acuerdo con la ecuación R.3 o es esta ecuación válida sólo para relojes de luz? Para responder esta pregunta, fijamos un reloj convencional (con un mecanismo convencional de relojería) al espejo inferior del reloj de luz (figura R.6). Al reloj convencional le hemos suprimido la manecilla horaria y el minutero. En lugar de la manecilla que señala los segundos, el segundero, tiene un disco opaco con una estrecha rendija a lo largo de un radio que va girando y marca así el paso del tiempo. La esfera del reloj dispone de 60 señales (llamémoslas señales de tac) distribuidas uniformemente a lo largo de su perímetro, una para cada segundo. El reloj hace tac cada vez que la rendija pasa por encima de una señal de tac. Ajustamos la longitud L_0 de la barra del reloj de luz, de tal manera que el intervalo de tiempo entre tac y tac de ambos relojes sea el mismo en el sistema de referencia propio de los relojes. A continuación, sincronizamos los relojes, de modo que cada tac del reloj de luz se produzca simultáneamente con el tac del reloj convencional. Finalmente, nos preguntamos: "Si el tac de un reloj y el del otro ocurren simultáneamente en el sistema de referencia propio de los relojes, ¿ocurrirán simultáneamente también en un sistema de referencia en el que los relojes se muevan a velocidad v?"

La respuesta es afirmativa. Para comprender el porqué, consideremos el experimento siguiente. En el sistema de referencia de los relojes, hagamos que el intervalo entre tac y tac de ambos relojes sea de un segundo. Coloquemos una película sensible a la luz en la esfera del reloj convencional, detrás del disco opaco giratorio. Cada vez que el flash de luz sea reflejado por el espejo inferior, queda impresionada la estrecha franja de la película fotosensible que se encuentra justo debajo de la rendija. Estas franjas impresionadas apuntarán radialmente a cada una de las señales de tac, como muestra la figura R.7, y todos los observadores deberán estar de acuerdo con lo que así queda permanentemente registrado.

En el sistema de referencia A, en el que ambos relojes se mueven, el flash de luz impresiona la película fotosensible que hay detrás de la rendija cada vez que dicho flash es reflejado por el espejo inferior. Puesto que el reloj de luz está en movimiento, el intervalo de tiempo entre reflexiones es superior a 1 s, de acuerdo con la ecuación R.3. Cuando una observadora del sistema de referencia A vea que las franjas impresionadas en la película quedan alineadas con las señales de tac, quedará convencida de que, observados desde su sistema de referencia A, los relojes convencionales atrasan exactamente de la misma manera en que atrasa el reloj de luz, es decir, de acuerdo con la ecuación R.3. Por lo tanto, llegamos a la conclusión de que, observados desde el sistema A, todos los relojes móviles avanzan más despacio, exactamente de la misma manera en que lo hace un reloj de luz. Por este motivo, concluimos que es el tiempo en sí el que se observa pasar más lentamente, un fenómeno que conocemos como **dilatación temporal**.

A algo que ocurre en un instante específico de tiempo y en un lugar específico del espacio lo llamamos **suceso espacio-temporal** o, simplemente, **suceso**. Cada reflexión

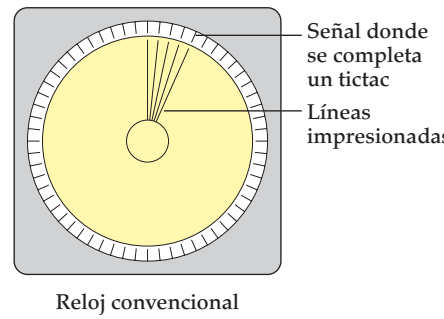


FIGURA R.7 La luz que incide en el reloj convencional y atraviesa la rendija impresiona la película fotosensible que hay detrás de la rendija.