

Segunda edición

J. W. Kane \ M. M. Sternheim

Física

EDITORIAL REVERTÉ

Las igualdades designadas mediante \equiv son exactas.

Longitud

- 1 metro \equiv 39,37 pulgadas \equiv 3,281 pies
- 1 pulgada \equiv 2,54 centímetros
- 1 pie \equiv 30,48 centímetros
- 1 kilómetro \equiv 10^3 metros \equiv 0,6214 millas
- 1 milla \equiv 5280 pies \equiv 1,609 kilómetros
- 1 angstrom \equiv 10^{-10} metros
- 1 nanometro \equiv 10^{-9} metros

Superficie

- 1 pulg² \equiv 6,4516 cm²
- 1 pie² \equiv 9,29 \equiv 10^{-2} m²
- 1 cm² \equiv 10^{-4} m² \equiv 0,155 pulg² \equiv $1,076 \times 10^{-3}$ pie²
- 1 m² \equiv 10^4 cm² \equiv 10,76 pie²

Volumen

- 1 pulg³ \equiv 16,39 cm³
- 1 pie³ \equiv $2,832 \times 10^{-2}$ m³
- 1 cm³ \equiv 10^{-6} m³ \equiv $6,102 \times 10^2$ pulg³ \equiv $3,531 \times 10^{-5}$ pie³
- 1 m³ \equiv 10^6 cm³ \equiv 35,31 pie³
- 1 litro \equiv 10^{-3} m³ \equiv 0,264 galones
- 1 galón \equiv 3,786 litros \equiv 231 pulg³

Tiempo

- 1 hora \equiv 60 minutos \equiv 3600 segundos
- 1 día \equiv 24 horas \equiv 1440 minutos \equiv $8,64 \times 10^4$ segundos
- 1 año \equiv 365,24 días \equiv $3,156 \times 10^7$ segundos

Masa

- 1 gramo \equiv 10^{-3} kilogramos \equiv $6,852 \times 10^{-5}$ slugs \equiv 6,024 $\times 10^{23}$ u
- 1 kilogramo \equiv 10^3 gramos \equiv $6,852 \times 10^{-2}$ slugs \equiv 6,024 $\times 10^{26}$ u
- 1 slug \equiv 14,59 kilogramos
- 1 u \equiv $1,66 \times 10^{-27}$ kilogramos

Densidad de masa

- 1 gm cm⁻³ \equiv 10^3 kg m⁻³ \equiv 1,94 slug pie⁻³
- 1 slug pie⁻³ \equiv 0,5153 gm cm⁻³
- \equiv $5,153 \times 10^2$ kg m⁻³

Velocidad

- 1 cm s⁻¹ \equiv 10^{-2} m s⁻¹ \equiv $3,6 \times 10^{-2}$ km h⁻¹
- 1 m s⁻¹ \equiv 3,6 km h⁻¹ \times 2,24 mi h⁻¹
- 1 pie s⁻¹ \equiv 30,48 cm s⁻¹ \equiv 0,3048 m s⁻¹
- \equiv 1,097 km h⁻¹
- 1 min h⁻¹ \equiv 0,447 m s⁻¹ \equiv 1,609 km h⁻¹
- \equiv 1,467 pie s⁻¹
- 1 km h⁻¹ \equiv 0,2778 m s⁻¹ \equiv 0,6214 mi h⁻¹

Ángulos y velocidades angulares

- 180 grados \equiv π radianes
- 1 radián \equiv 57,3 grados
- 1 grado \equiv $1,745 \times 10^{-2}$ radianes
- 1 rad s⁻¹ \equiv 0,159 rev s⁻¹ \equiv 9,549 rev min⁻¹
- 1 rev min⁻¹ \equiv 0,0167 rev s⁻¹ \equiv 0,1047 rad s⁻¹

Fuerza

- 1 libra \equiv 4,448 newtons \equiv $4,448 \times 10^5$ dinas
- 1 newton \equiv 10^5 dinas \equiv 0,2248 libras
- 1 dina \equiv 10^{-5} newtons \equiv $2,248 \times 10^{-6}$ libras

Presión

- 1 atmósfera \equiv $1,013 \times 10^5$ pascal \equiv 14,7 lb pulg⁻¹
- 1 pascal \equiv 10 dina cm⁻² \equiv $1,450 \times 10^{-4}$ lb pulg⁻²
- \equiv $7,501 \times 10^{-4}$ cm Hg
- 1 cm Hg \equiv $1,333 \times 10^4$ dina cm⁻²
- \equiv $1,316 \times 10^{-2}$ atmósfera \equiv $1,333 \times 10^3$ pascal
- 1 pulg H₂O \equiv 1,868 mm Hg \equiv 249,1 pascal
- 1 lb pulg⁻² \equiv $6,895 \times 10^3$ pascal
- \equiv $6,805 \times 10^{-2}$ atmósfera
- 1 lb pie⁻² \equiv 47,88 pascal
- 1 torr \equiv 1 mm Hg \equiv 133,3 pascal
- 1 bar \equiv 10^5 pascal

Viscosidad y resistencia al flujo

- 1 Pa s \equiv 10 poise
- 1 Pa s m⁻³ \equiv $0,750 \times 10^{-8}$ torr s cm⁻³

Energía

- 1 julio \equiv 10^7 ergs \equiv 0,2390 calorías \equiv 0,7376 pie lb
- 1 caloría \equiv 4,184 julio
- 1 kcal \equiv 10^3 calorías
- 1 julio \equiv $6,24 \times 10^{18}$ electronvoltio
- 1 electronvoltio \equiv 1602×10^{-19} julio
- 1 kWh \equiv $3,6 \times 10^6$ julio
- 1 Btu \equiv $1,054 \times 10^3$ julio
- 1 pie lb \equiv 1,356 julio

Conversión masa-energía

- 1 u \equiv 931×10^6 electronvoltio \equiv 931 MeV

Potencia

- 1 vatio \equiv 10^{-3} kilovatio \equiv 0,7376 pie lb s⁻¹
- \equiv $1,341 \times 10^{-3}$ caballos de vapor
- 1 caballo de vapor \equiv 550 pie lb s⁻¹ \equiv $7,457 \times 10^2$ vatio
- 1 kilovatio \equiv 10^3 vatio \equiv 1,341 caballos de vapor

Campo magnético

- 1 gauss \equiv 10^{-4} tesla

Prefijos utilizados para definir múltiplos de las unidades S.I. Pueden utilizarse con cualquiera de las unidades básicas de S.I. o con unidades derivadas de ella

<i>Fracción</i>	<i>Prefijo</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Ejemplo</i>
10^{-18}	atto	a	
10^{-15}	femto	f	
10^{-12}	pico	p	
10^{-9}	nano	n	1 nanosegundo = 1 ns = 10^{-9} segundos
10^{-6}	micro	μ	
10^{-3}	mili	m	1 milímetro = 1 mm = 10^{-3} metros
10^{-2}	centi	c	1 centímetro = 1 cm = 10^{-2} metros
10^{-1}	deci	d	
10	deca	da	
10^2	hecto	h	
10^3	kilo	k	1 kilogramo = 1 kg = 10^3 gramos
10^6	mega	M	
10^9	giga	G	
10^{12}	tera	T	

Alfabeto griego

A	α	alfa
B	β	beta
Γ	γ	gamma
Δ	δ	delta
E	ϵ	epsilon
Z	ζ	zeta
H	η	eta
Θ	θ	theta
I	ι	iota
K	κ	kappa
Λ	λ	lambda
M	μ	mu
N	ν	nu
Ξ	ξ	xi
O	\omicron	omicron
Π	π	pi
P	ρ	ro
Σ	σ	sigma
T	τ	tau
Υ	υ	upsilon
Φ	ϕ	phi
X	χ	chi
Ψ	ψ	psi
Ω	ω	omega

Movimiento con aceleración constante

$$v = v_0 + a \Delta t$$

$$\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$$

$$\bar{v} = \frac{1}{2} (v_0 + v)$$

$$\Delta x = \frac{1}{2} (v_0 + v) \Delta t$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x$$

Segunda edición

J. W. Kane \ M. M. Sternheim

Física



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

PHYSICS, Second Edition

Edición original en lengua inglesa publicada por

John Wiley & Sons, New York (NY) 1003, USA

Copyright © by John Wiley & Sons, Inc.

Todos los derechos reservados.

Traducción autorizada de la edición en lengua inglesa publicada por John Wiley & Sons, Inc.

Edición en papel

© Editorial Reverté, S. A., 1989, 2000, 2016

ISBN: 978-84-291-4318-8

Edición e-book (PDF)

© Editorial Reverté, S. A., 2020

ISBN: 978-84-291-9454-8

Versión española por

Dr. José Casas Vázquez

Catedrático de Terminología de la Universidad Autónoma de Barcelona

y

Dr. David Jou Mirabent

Profesor de la Universidad Autónoma de Barcelona

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona. ESPAÑA

Tel: (34) 93 419 33 36

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, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

1081

A mi familia.

JWK

A mi esposa Helen y a mis hijos Laura, Amy y
Jeffrey

MMS

PREFACIO A LA SEGUNDA EDICIÓN

La segunda edición de un libro de texto acompañado por el éxito proporciona a sus autores la rara ocasión de llevar a cabo lo que habían deseado hacer originalmente. Hemos aprovechado esta oportunidad para mejorar Física en muchos aspectos, secundarios pero significativos, así como para actualizar su material donde resultara apropiado. Excepto en unos pocos puntos que señalaremos a continuación, la organización del libro sigue siendo la misma, tal como lo sigue siendo nuestro propósito básico de presentar la física en una forma que la hiciera atractiva a una amplia diversidad de estudiantes, especialmente los que se inician en las ciencias de la vida.

Como en la primera edición, este libro contiene algo más de lo que se puede tratar en un curso habitual, ya que hemos incluido todos los temas cubiertos habitualmente en los cursos de física para estudiantes de primer ciclo de ciencias de la vida, más algún material poco usual. Hay ahora 31 capítulos divididos en nueve unidades. Dos capítulos cubren material que habitualmente no se trata en los textos de introducción a la física: el capítulo 18, conducción nerviosa, y el capítulo 31, radiación ionizante. Estos capítulos pueden omitirse o tratarse superficialmente sin que se produzcan por ello pérdidas importantes de continuidad; éste es también el caso de algunos capítulos más tradicionales, como el 8, propiedades elásticas de los materiales, el 25, relatividad especial y el 29, estructura de la materia. Por otra parte, la mayoría de los capítulos concluyen con una o más secciones suplementarias que versan ya sea sobre aplicaciones biológicas ya sea sobre temas más tradicionales algo secundarios. Esta disposición permite al profesor seleccionar lo que convenga tratar o subrayar, y ayuda al estudiante a distinguir los principios básicos de física del material relativamente periférico.

Algunos de los cambios más importantes son los siguientes. En mecánica, hemos simplificado la notación utilizada en cinemática. Hemos dado más relieve a las leyes de conservación y hemos alargado ligeramente su tratamiento. El capítulo 8 de la primera edición, la rotación de los sólidos rígidos, se ha combinado con otros dos: la dinámica de la rotación del sólido rígido se ha incluido en el movimiento circular (capítulo 5) de una partícula, y el momento angular se ha combinado con el ímpetu (capítulo 7). Hemos añadido nuevos ejemplos y problemas sobre energía solar, energía de las mareas y otras fuentes alternativas de energía. En la Unidad III, Calor, hemos añadido una sección sobre mezclas de gases ideales. El capítulo sobre termodinámica (capítulo 11) precede ahora al

dedicado a propiedades térmicas de la materia (capítulo 12), lo que permite un estudio más profundo de los calores específicos en este último. Hemos eliminado el capítulo sobre el sistema circulatorio de los mamíferos, distribuyendo casi todo su contenido en los otros capítulos de la Unidad IV, Fluidos. La introducción del potencial eléctrico se deja para la Unidad V, Electricidad y Magnetismo. En el capítulo 17 presentamos ahora una discusión más completa de las reglas de Kirchhoff, y en el capítulo 19 estudiamos la navegación magnética de los animales. En óptica, hemos ampliado el tratamiento de la polarización, de las aberraciones de las lentes y de la visión del color, hemos cambiado el convenio de signos en la fórmula del constructor de lentes y hemos simplificado la descripción del procedimiento para seleccionar las lentes de corrección de la vista. En la Unidad VII, hemos anticipado algo la introducción del fotón y en la Unidad VIII, el capítulo de la primera edición sobre resonancia magnética nuclear aparece ahora como un tema suplementario del capítulo 29, la estructura de la materia. Finalmente, hemos actualizado el tratamiento de los efectos de las radiaciones ionizantes y de diversas aplicaciones de la física nuclear, y hemos añadido una sección sobre los quarks.

A lo largo del libro, hemos introducido o ampliado diversas ayudas al estudio. Hemos alargado los resúmenes del final de los capítulos y hemos añadido en promedio unas doce cuestiones simples de repaso antes de los ejercicios. Presentamos también muchos nuevos ejercicios y problemas para ampliar el dominio de dificultad y los tipos de aplicaciones. Incluyendo las cuestiones de repaso, los ejercicios y los problemas suman unos 2.300, lo que representa un aumento de más del 50 por ciento. A ello se debe prácticamente todo el alargamiento del texto.

En la primera edición insistíamos en las unidades S.I., pero ocasionalmente mencionábamos o utilizábamos otras. Posteriormente, preparamos otra versión que no contenía unidades que no fueran del sistema S.I., o bien aceptadas por el mismo, tales como el electronvoltio, la unidad de masa atómica y la atmósfera estándar. Ello significó suprimir todas las unidades británicas y c.g.s., el angstrom, la micra, la caloría y otras varias. A grandes rasgos, creímos que estos cambios hacían el libro más manejable. Ello resultaba especialmente cierto en lo que concierne a los fenómenos térmicos, en los que la sustitución de la caloría por el julio simplificó los cálculos y dio mayor significado a ciertas respuestas; así resulta mucho más intuitivo decir que se gastan 100 vatios que la cantidad equivalente, 86 kcal h^{-1} . Por ello, en esta edición hemos utilizado las mismas unidades que en la versión S.I., excepto cierto uso muy restringido de unidades británicas en los ejemplos y problemas de cinemática de los primeros capítulos. Para que sirva como referencia, en el Apéndice C discutimos algunas unidades no pertenecientes al S.I. que aún resultan muy utilizadas, y recogemos los respectivos factores de conversión en la contracubierta anterior.

Al preparar esta nueva edición hemos tenido en cuenta nuestra propia experiencia de enseñar con el texto de la edición anterior, así como las valiosas sugerencias de nuestros colegas de la Universidad de Massachusetts y de otras varias. Además de las personas a quien ya manifestábamos nuestro agradecimiento en la primera edición, Hajime Sakai, James F. Walker y Kandula S.R. Sastry nos resultaron especialmente útiles al indicarnos ciertas posibles mejoras. J. G. Steele fue nuestro consultor en los cambios al S.I. J. N. Dodd nos proporcionó materiales que resultaron de gran utilidad en la sección sobre la visión del color. Margaret Silbar nos llamó la atención sobre una interesante faceta histórica. Helen Sternheim nos prestó una ayuda valiosísima en la preparación del texto, y Doris Atkins mecanografió expertamente las revisiones.

Joseph W. Kane
Morton M. Sternheim

DEL PREFACIO DE LA PRIMERA EDICIÓN

Física de las ciencias de la vida va dirigida a estudiantes de procedencia diversa y está basado en nuestra experiencia en un curso para estudiantes que se especializaban en varias áreas de las ciencias de la vida, entre las que figuraban zoología, estudios premédicos, botánica, tecnología médica, silvicultura y educación física, junto con un pequeño número de estudiantes que hacían su especialidad en campos ajenos a las ciencias de la vida. Generalmente se trataba de alumnos de segundo o tercer año que habían seguido cursos de nivel secundario en química, matemáticas y biología, pero algunos eran estudiantes de primero y unos pocos ya graduados. La mayoría no habían estudiado física en la escuela secundaria, muchos habían estado en contacto con el cálculo, pero pocos de ellos tenían confianza en su capacidad para manejarlo con seriedad.

Este libro difiere en varios aspectos de los textos convencionales de física escritos pensando en una especialización en ciencias. En primer lugar, la elección de los tópicos básicos a incluir o poner de relieve se ha determinado en función de los intereses y necesidades de la especialización en ciencias de la vida. Esto ha requerido la inclusión de algunos tópicos que ya no presentan un gran interés para los físicos, tales como la óptica geométrica, la mecánica de fluidos y la acústica, así como la reducción a un mínimo del material histórico y de aquellas áreas de la física contemporánea, tales como la física de altas energías y la astrofísica, que tienen un escaso impacto directo en la biología.

La segunda gran diferencia reside en que muchos ejemplos han sido tomados de los sistemas biológicos. Esto contrasta con el empleo habitual de ejemplos con sabor de ingeniería. De este modo, problemas de cuerpos rígidos se han tomado con frecuencia de la biomecánica, ejemplos de resistencia y capacidad proceden de la conducción nerviosa, ilustraciones del transporte de calor y del calor latente tienen su origen en el mantenimiento de la temperatura corporal, y así sucesivamente. La instrumentación empleada en el trabajo biomédico aparece tratada siempre que ilustre los principios físicos.

El tercer y quizás más significativo rasgo original de este libro es la inclusión de secciones y capítulos enteros dedicados a la aplicación detallada de la física a sistemas biológicos. Con ellos el estudiante se ve motivado a aprender física al demostrarle su relación con las ciencias de la vida, midiendo al mismo tiempo su comprensión de los principios físicos implicados. También constituyen una prueba de la completa unidad de la ciencia al emplear conceptos que proceden de la física, la biología y la química. Sin embargo, no se dan por sentados conocimientos específicos en biología o química.

Cada capítulo contiene una abundante colección de ejercicios. Relacionados con las secciones del libro, éstos sirven como test de la capacidad básica de comprensión del estudiante y de ayuda para adquirir confianza. También se incluyen problemas no relacionados con las distintas secciones, de los que unos pocos, señalados con un asterisco, presentan algo más de dificultad. Las secciones suplementarias también contienen ejercicios y problemas de modo que pueden utilizarse como parte integral del curso.

Aunque incluimos bastante material que no se encuentra habitualmente en los textos normales de física, presentamos la física básica en un orden y de un modo bastante convencionales. Esto se ha hecho así porque la distribución clásica parece manejarse mejor y porque permite al profesor elegir y organizar el material para adaptarlo a las necesidades y preferencias de cada uno. Si bien la mecánica debe tratarse al principio y la física moderna al final, el material intermedio (calor, fluidos, electricidad y magnetismo, y movimiento ondulatorio) puede redistribuirse sin mayores problemas. Esto es cierto aun cuando subrayemos la unidad de los conceptos físicos y señalemos sus interconexiones dondequiera que sea posible.

A todo lo largo de este libro, hacemos uso de la mínima cantidad de matemáticas formales consecuente con un tratamiento justo y preciso de la física que se discute. Esto quiere decir que empleamos el álgebra de manera bastante libre y algo de geometría. Como algunos estudiantes son relativamente flojos en estas cuestiones cuando empiezan a estudiar física, procedemos con bastante exactitud en los primeros capítulos y damos también un repaso a las matemáticas en el Apéndice B. La función derivada se introduce en el Cap. 1, y se emplea posteriormente en las definiciones. Las escasas deducciones que necesitan hacer uso del cálculo se han colocado al final de los capítulos para no interrumpir el material del texto. Evitamos por completo la integración, empleando en su lugar el procedimiento de adivinar y comprobar después por derivación las soluciones a problemas tales como la ley exponencial de desintegración de un radionúclido. El empleo del cálculo diferencial no precisa ejemplos, ejercicios o problemas.

Un importante aspecto del aprendizaje de la física es el desarrollo de ciertos esquemas de pensamiento. En consecuencia, insistimos en el empleo de modelos simples para sistemas complejos, de aproximaciones matemáticas, y del análisis dimensional. Estos resaltan mucho en las aplicaciones biológicas pero están presentes a todo lo largo del libro. También ponemos el acento en que la física es una ciencia experimental y no una disciplina intelectual abstracta. Sus consecuencias están en continua relación con la experiencia cotidiana así como con otros campos científicos.

Las unidades constituyen siempre un problema en un texto de introducción. Se da importancia a las unidades S. I., pero las unidades británicas y las cgs se emplean de vez en cuando para facilitar el contacto con magnitudes que resultan familiares y para ajustarse al uso convencional en diversas áreas de aplicación.

Este libro no podía haberse escrito sin la ayuda de un gran número de personas. Nuestra mayor deuda la tenemos contraída con los muchos estudiantes que nos han ayudado de diversas maneras a aprender lo que habría de ser un curso y un texto de física de ciencias de la vida, y los que soportaron los inconvenientes de tener que emplear como texto las versiones preliminares de este material. Norman C. Ford participó en las primeras etapas de diseño y redacción de este libro, pero se vio forzado a retirarse debido a otras obligaciones. Un colega, Stanley S. Hertzbach, dio un curso utilizando un primitivo borrador y de él recibimos consejos muy útiles. También resultaron provechosos los consejos recibidos de varios críticos, tales como Rubin Landau, Margaret McCarthy, Arnold Pickar, Harvey Picker, Arnold Strassenberg, John Weir, Robert Williamson y Steve Woods. Durante unos años, muchos licenciados y estudiantes de licenciatura nos hi-

cieron valiosas sugerencias tras la lectura o la enseñanza de partes del manuscrito o hallaron las soluciones a los ejercicios y problemas. Entre ellos contamos a James Ledwell, David Long, Caroline Markey, Robert Meyer, Francesc Roig, Ernest Seglie, Thomas Slavkovsky, David Vetter, J. C. Wang y Jonathan Wainer.

El original fue escrito a máquina por cuatro competentes y tolerantes mecanógrafas; la mayor parte fue mecanografiada por Kathleen Ryan y el resto por Lillian Camus, Linda Lisnerski y Doris Atkins. Helen Sternheim nos prestó su ayuda en varios aspectos de la preparación del manuscrito y nos dio consejo y aliento.

Joseph W. Kane
Morton M. Sternheim

PRÓLOGO:

LA FÍSICA Y EL ESTUDIANTE DE CIENCIAS DE LA VIDA

«¿Por qué he de estudiar física?». Planteada a veces con una insinuación emotiva que fluctúa entre la angustia y la cólera, ésta es una de las preguntas que con más frecuencia escuchan los que enseñan física. Parece apropiado, por lo tanto, dar comienzo a este libro haciendo un esfuerzo por hallar una respuesta.

Un motivo por el que esta cuestión se plantea tan a menudo es que mucha gente que no ha estudiado física —y algunos que sí lo han hecho— no tienen una noción clara de lo que es esta materia. Los diccionarios no suponen mucha ayuda. Una definición típica de diccionario pequeño dice que la física es la rama de la ciencia que trata de la materia, la energía y sus interacciones. Es una definición vaga y lo bastante general como para incluir lo que habitualmente se entiende por química; en cualquier caso, puede decirse que no da una sensación real de lo que la física lleva consigo. Artículos de diccionarios más completos desarrollan corrientemente la definición señalando que la física incluye campos tales como la mecánica, el calor, la electricidad, etc., pero no dicen nada de por qué ciertos campos de la ciencia aparecen dentro de ella y otros no.

Un modo mejor de enfocar la cuestión de definir la física es preguntarse acerca de lo que preocupa a los físicos. Los físicos tratan de comprender las reglas básicas o leyes que gobiernan el funcionamiento del mundo natural en el que vivimos. Como sus actividades e intereses evolucionan con el tiempo, la ciencia básica que llamamos física también cambia con el tiempo. Muchos de los más activos campos de la física de hoy no habían sido ni siquiera soñados hace una o dos generaciones. Por otro lado, partes de lo que ahora se considera química o ingeniería estuvieron una vez incluidos dentro de la física. Esto es debido a que los físicos abandonan a veces un campo una vez que se conocen los principios básicos, dejando a otros ulteriores desarrollos y aplicaciones prácticas.

El hecho de que la física se ocupe de las reglas básicas que gobiernan cómo funciona el mundo nos permite comprender por qué personas que sienten curiosidad por cosas diversas pueden encontrar el estudio de la física interesante y útil.

Por ejemplo, un historiador que quiere entender los orígenes de nuestra sociedad contemporánea encontrará significado en la historia del desarrollo de la física y su relación con otras actividades humanas. Del mismo modo, un filósofo interesado en los conceptos de espacio y tiempo sacará gran provecho de la comprensión de los revolucionarios avances de la física de este siglo. Sin embargo, como hemos escrito este libro ante

todo para estudiantes que se especializan en ciencias de la vida, no hemos puesto el acento en los aspectos históricos o filosóficos de la física. Más bien, hemos intentado hacer clara en cada capítulo la conexión entre la física y las ciencias de la vida.

Quizá el más evidente impacto de la física sobre la biología y la medicina es a nivel de la instrumentación. Un conocimiento de la física ayuda a un empleo inteligente de todo lo que se extiende desde los microscopios ordinarios y las centrifugadoras hasta los microscopios electrónicos y los complicados sistemas de detección de radiaciones utilizados en medicina nuclear. La física también interviene en la biología de un modo más fundamental. Las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de moléculas, átomos y núcleos atómicos constituyen la base de toda la química y la bioquímica. La fisiología ofrece muchos ejemplos de principios y procesos físicos: la difusión dentro de las células, la regulación de la temperatura corporal, el movimiento de fluidos en el sistema circulatorio y las señales eléctricas en las fibras nerviosas son unos pocos de ellos. En anatomía comparativa, la física asociada con un rasgo anatómico ayuda a menudo a clarificar el proceso evolucionario. Las actividades atléticas, que van desde la carrera y el salto hasta el kárate, pueden estudiarse y a veces mejorarse con la ayuda de principios físicos. A lo largo del desarrollo e ilustración de los principios básicos de la física discutiremos todas estas aplicaciones de las ciencias de la vida y muchas otras.

Puede resultar de utilidad hacer unos pocos comentarios acerca de cómo estudiar física. Más que ninguna otra ciencia, la física es una disciplina lógica y deductiva. En cualquiera de los campos de la física hay unos pocos conceptos fundamentales o leyes deducidos de medidas experimentales. Una vez que se dominan estas ideas básicas, las aplicaciones son en general directas desde un punto de vista conceptual, aun cuando los detalles puedan a veces llegar a ser complicados. En consecuencia, es importante fijar la atención en los principios básicos y evitar memorizar un conjunto de hechos y fórmulas.

La mayor parte de las leyes básicas de la física pueden expresarse de manera bastante concisa en forma de ecuaciones matemáticas. Esto es muy conveniente, puesto que una enorme cantidad de información aparece contenida implícitamente en una sola ecuación. Sin embargo, esto significa también que cualquier intento serio de aprender o aplicar la física requiere una buena disposición para emplear una cierta cantidad de matemáticas. El álgebra preuniversitaria más un poquito de geometría resultan adecuadas para seguir todo lo que cubre este libro, aunque se precisa un razonable nivel de destreza. Un estudiante que tenga estas habilidades matemáticas un tanto oxidadas puede necesitar el comenzar por el Apéndice B. La técnica matemática de la derivación se introduce en el primer capítulo. Sin embargo, excepto en las definiciones, su empleo se restringe a unas pocas deducciones localizadas en los temas suplementarios. Ninguno de los ejercicios o problemas precisa de este instrumento matemático.

En resumen, creemos que el estudiante de ciencias de la vida se beneficiará del estudio de la física de dos modos. Por un lado, el estudiante llegará a entender las leyes básicas que gobiernan todo lo que existe en nuestro mundo desde la escala subatómica a la cósmica y, por otro, también aprenderá mucho de lo que será importante en su trabajo en las ciencias de la vida. El estudio de la física como ciencia básica no es especialmente fácil, pero creemos que recompensa, en particular a aquellos estudiantes que piensan formarse posteriormente en ciencias afines. Esperamos que todos los que utilicen este libro estén de acuerdo.

J. W. K.
M. M. S.

ÍNDICE ANALÍTICO

Prefacio a la segunda edición	VII	CAPÍTULO 2	
Del prefacio de la primera edición	IX	MOVIMIENTO EN DOS DIMENSIONES	28
Prólogo: La Física y el estudiante de ciencias de la vida	XIII	2.1 Una introducción a los vectores	28
		2.2 Velocidad en dos dimensiones	31
		2.3 Aceleración en dos dimensiones	33
		2.4 Cálculo del movimiento de un objeto	33
		2.5 Projectiles	34
		Temas suplementarios	40
		2.6 Projectiles en Biomecánica	40
UNIDAD 1		CAPÍTULO 3	
LAS LEYES GENERALES DEL MOVIMIENTO	1	LAS LEYES DEL NEWTON DEL MOVIMIENTO	44
CAPÍTULO 1		3.1 Fuerza, peso y masa gravitatoria	44
MOVIMIENTO RECTILÍNEO	3	3.2 Densidad	46
1.1 Medidas, patrones, unidades y errores	3	3.3 Primera ley de Newton	46
1.2 Desplazamiento; velocidad media	7	3.4 Equilibrio	47
1.3 Velocidad instantánea	10	3.5 Tercera ley de Newton	48
1.4 Aceleración	12	3.6 Segunda ley de Newton	49
1.5 Cálculo del movimiento de un objeto	12	3.7 Importancia de las leyes de Newton del movimiento	50
1.6 La aceleración de la gravedad y la caída de los cuerpos	15	3.8 Algunos ejemplos de las leyes de Newton	50
Galileo Galilei	17	Sir Isaac Newton	51
1.7 Modelos de Física	18	3.9 Fuerzas gravitatorias	55
Temas suplementarios	24	3.10 Peso	56
1.8 Salto vertical	24	3.11 Peso efectivo	57
		3.12 Rozamiento	58

CAPÍTULO 4			
ESTÁTICA	70		
4.1 Momentos	71		
4.2 Equilibrio de cuerpos rígidos	74		
4.3 El centro de gravedad	76		
4.4 Estabilidad y equilibrio	79		
4.5 Palancas; ventaja mecánica	80		
4.6 Músculos	81		
4.7 Palancas en el cuerpo	82		
Temas suplementarios	89		
4.8 Las mandíbulas de los animales	89		
4.9 Centro de gravedad de los seres humanos	91		
4.10 Sistemas de poleas	93		
CAPÍTULO 5			
MOVIMIENTO CIRCULAR	96		
5.1 Aceleración centrípeta	96		
5.2 Ejemplos de movimiento circular	99		
5.3 Variables angulares	102		
5.4 Momento de una fuerza, aceleración angular y momento de inercia	105		
5.5 Cargas eléctricas: fuerzas fundamentales	108		
5.6 Ley de Coulomb Coulomb y Cavendish	109 110		
Temas suplementarios	118		
5.7 Satélites; mareas	118		
5.8 Efectos fisiológicos de la aceleración	120		
5.9 Percepción sensorial del movimiento angular	121		
5.10 Deducción de la fórmula de la aceleración radial	123		
UNIDAD 2			
TEMAS ADICIONALES DE MECÁNICA	127		
CAPÍTULO 6			
TRABAJO, ENERGÍA Y POTENCIA	129		
6.1 Trabajo	129		
6.2 Energía cinética	131		
6.3 Energía potencial y fuerzas conservativas	133		
6.4 Fuerzas disipativas	135		
6.5 Observaciones sobre el trabajo y la energía	136		
6.6 Resolución de problemas mediante trabajo y energía	137		
6.7 Energía potencial gravitatoria	140		
6.8 Energía potencial eléctrica	142		
6.9 Potencia	142		
6.10 Trabajo y energía en el movimiento de rotación	143		
6.11 El salto. Leyes de escala en Fisiología	144		
Temas suplementarios	156		
6.12 La carrera	156		
6.13 Deducción de la fórmula de la energía potencial gravitatoria	157		
CAPÍTULO 7			
ÍMPETU Y MOMENTO ANGULAR	159		
7.1 Impulso e ímpetu	159		
7.2 Conservación del ímpetu	161		
7.3 Movimiento del centro de masas	164		
7.4 Colisiones elásticas e inelásticas	165		
7.5 Momento angular de un sólido rígido	168		
7.6 Momento angular de una partícula	170		
Temas suplementarios	178		
7.7 Ímpetu y empleo del cuerpo	178		
7.8 Movimiento giroscópico	180		
CAPÍTULO 8			
PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LOS MATERIALES	183		
8.1 Aspectos generales de los esfuerzos y las deformaciones	183		
8.2 Módulo de Young	185		
8.3 Resistencia a la flexión	186		
8.4 Flexión lateral y diseño estructural en la naturaleza	190		
8.5 Momentos cortantes y de torsión	191		
Temas suplementarios	199		
8.6 Estructura y función	199		
8.7 Deducción de $l_{cr} = cr^{2/3}$	200		
CAPÍTULO 9			
MOVIMIENTO VIBRATORIO	203		
9.1 Movimiento armónico simple; un experimento	203		
9.2 Peso colgado de un muelle	205		
9.3 El péndulo físico	206		

9.4	Energía en el movimiento armónico simple	209	12.2	Capacidad calorífica	265
9.5	Oscilaciones amortiguadas	210	12.3	Cambios de fase	268
9.6	Oscilaciones forzadas y resonancia	211	12.4	Conducción de calor	270
	Temas suplementarios	217	12.5	Transmisión del calor por convección	272
9.7	Los efectos de la vibración sobre los seres humanos	217	12.6	Radiación	274
9.8	Deducción de las ecuaciones del movimiento armónico	219		Temas suplementarios	284
			12.7	Regulación de la temperatura en animales de sangre caliente	284
	UNIDAD 3			UNIDAD 4	
	CALOR	223		FLUIDOS	289
	CAPÍTULO 10			CAPÍTULO 13	
	TEMPERATURA Y COMPORTAMIENTO DE LOS GASES	225		LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS IDEALES	291
10.1	Escalas de temperatura	225	13.1	Principio de Arquímedes	292
10.2	Masas moleculares	226	13.2	La ecuación de continuidad; flujo estacionario	294
10.3	Presión	227	13.3	Ecuación de Bernoulli	295
10.4	La ley de los gases ideales	228	13.4	Consecuencias estáticas de la ecuación de Bernoulli	296
10.5	Mezclas de gases	229	13.5	El papel de la gravedad en la circulación	297
10.6	Temperatura y energías moleculares	230	13.6	Medidas de presión sanguínea mediante el esfigmomanómetro	299
10.7	Difusión	231	13.7	Consecuencias dinámicas de la ecuación de Bernoulli	300
10.8	Soluciones diluidas: presión osmótica	233	13.8	Medidores de flujo	300
	Temas suplementarios	239		Temas suplementarios	307
10.9	Deducción de la ley de los gases ideales a partir de un modelo científico	239	13.9	El vuelo de los animales y de los aviones	307
	CAPÍTULO 11			CAPÍTULO 14	
	TERMODINÁMICA	241		FLUJO DE FLUIDO VISCOSO	312
11.1	Trabajo mecánico	241	14.1	Viscosidad	312
11.2	Primera ley de la termodinámica	243	14.2	Flujo laminar en un tubo: análisis dimensional	313
11.3	Segunda ley de la termodinámica Mayer, Joule y Helmholtz	245	14.3	Flujo turbulento	316
11.4	El teorema de Carnot y la conversión de energía	246	14.4	Flujo en el sistema circulatorio	317
11.5	Implicaciones del teorema de Carnot	249		Temas suplementarios	324
11.6	Frigoríficos y bombas de calor	250	14.5	Fuerzas de arrastre viscosas	324
	Temas suplementarios	257	14.6	Fuerzas de arrastre a "altas velocidades"	326
11.7	Metabolismo humano	257	14.7	Centrifugación	327
	CAPÍTULO 12				
	PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA MATERIA	262			
12.1	Dilatación térmica	262			

CAPÍTULO 15		
FUERZAS DE COHESIÓN EN LÍQUIDOS	332	
15.1 Tensión superficial	332	
15.2 Ángulo de contacto y capilaridad	334	
15.3 Ley de Laplace	335	
15.4 Tensioactivos en los pulmones	337	
15.5 El corazón como una bomba	337	
15.6 El ascenso de la savia en los árboles; presiones negativas	338	
UNIDAD 5		
ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO	345	
CAPÍTULO 16		
FUERZAS, CAMPOS Y POTENCIALES ELÉCTRICOS	347	
16.1 Fuerzas eléctricas	347	
16.2 El campo eléctrico	348	
16.3 El campo eléctrico debido a distribuciones de carga	351	
16.4 Potencial eléctrico	353	
16.5 Superficies equipotenciales	356	
16.6 Dipolos eléctricos	356	
16.7 El osciloscopio	359	
16.8 Capacidad	359	
16.9 Efectos de los dieléctricos	361	
16.10 Energía almacenada en un condensador	363	
CAPÍTULO 17		
CORRIENTE CONTINUA	370	
17.1 Corriente eléctrica	370	
17.2 Resistencia	372	
17.3 Fuentes de energía en los circuitos	373	
17.4 Potencia en los circuitos eléctricos	376	
17.5 Resistencias en serie y en paralelo	377	
17.6 Voltímetros y amperímetros	378	
17.7 Circuitos con resistencia y capacidad	380	
17.8 Seguridad eléctrica	383	
Temas suplementarios	392	
17.9 Teoría atómica de la resistencia	392	
17.10 Aplicaciones de las medidas de resistencia	394	
17.11 Electroforesis	395	
17.12 Leyes de Kirchhoff en circuitos complejos	395	
17.13 Deducción de las fórmulas para la carga y la intensidad en un circuito RC	396	
CAPÍTULO 18		
CONDUCCIÓN NERVIOSA	399	
18.1 La estructura de las células nerviosas	399	
18.2 Resistencia y capacidad eléctrica de un axón	400	
18.3 Concentraciones iónicas y potencial de reposo	401	
18.4 Respuesta a estímulos débiles	404	
18.5 El potencial de acción	407	
18.6 Electroencefalógrafo y electrocardiógrafo	410	
CAPÍTULO 19		
MAGNETISMO	416	
19.1 Campos magnéticos	418	
19.2 Fuerza magnética sobre una carga en movimiento	419	
19.3 Medidores electromagnéticos de flujo	421	
19.4 Fuerza magnética sobre una corriente en un conductor	422	
19.5 Dipolos magnéticos	422	
19.6 Motores y galvanómetros	425	
19.7 Campos magnéticos producidos por corrientes	426	
19.8 Fuerza entre dos conductores paralelos	428	
Temas suplementarios	434	
19.9 Medida de la razón carga/masa	434	
19.10 Espectrómetro de masas	435	
19.11 Ciclotrones	436	
CAPÍTULO 20		
CAMPOS Y CORRIENTES INDUCIDOS	440	
20.1 Ley de Faraday	440	
20.2 Corrientes de Foucault	443	
20.3 Generadores eléctricos	444	
20.4 Transformadores	445	
20.5 Campos inducidos y ondas electromagnéticas	445	
Michael Faraday	446	
20.6 Materiales magnéticos	448	

20.7	Inductancia	449		
20.8	Energía almacenada en una autoinducción	450		
	Temas suplementarios	455		
20.9	Circuitos <i>RL</i> .	455		
20.10	Corriente alterna: valores eficaces o cuadráticos medios de la intensidad y el voltaje	456		
20.11	Reactancia	458		
20.12	Impedancia	460		
20.13	Potencia en circuitos de corriente alterna	462		
20.14	Equilibrado de impedancias	462		
20.15	Deducción de la FEM de un generador	464		
	UNIDAD 6			
	MOVIMIENTO ONDULATORIO	469		
	CAPÍTULO 21			
	DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO	470		
21.1	La representación de las ondas	470		
21.2	La velocidad de las ondas	472		
21.3	Interferencia de ondas y ondas estacionarias	473		
21.4	Efectos de los límites	475		
21.5	Ondas estacionarias resonantes	477		
21.6	Ondas complicadas y pulsaciones	478		
21.7	Energía e ímpetu en las ondas	479		
21.8	La polarización de las ondas transversales	480		
	Temas suplementarios	485		
21.9	Efecto Doppler	485		
	CAPÍTULO 22			
	EL SONIDO	491		
22.1	Naturaleza y velocidad del sonido	491		
22.2	Ondas sonoras estacionarias	493		
22.3	Intensidad de las ondas sonoras	495		
22.4	Fuentes sonoras	496		
22.5	Detectores de sonido	500		
22.6	Respuesta auditiva	501		
	Temas suplementarios	507		
22.7	Ultrasonidos	507		
	CAPÍTULO 23			
	PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ	515		
23.1	Índice de refracción	515		
23.2	Principio de Huygens	517		
23.3	Reflexión de la luz	518		
23.4	Refracción de la luz	519		
23.5	Reflexión interna total	521		
23.6	Experimento de interferencia de Young de doble rendija	522		
	Thomas Young	526		
23.7	Coherencia	527		
23.8	Red de difracción	528		
23.9	Difracción	531		
23.10	Polarización de la luz	534		
23.11	Difracción de rayos X y estructura de moléculas biológicas	537		
	Temas suplementarios	546		
23.12	Holografía	546		
23.13	Efectos de interferencia en películas delgadas	551		
	CAPÍTULO 24			
	ESPEJOS, LENTES E INSTRUMENTOS ÓPTICOS	555		
24.1	Espejos	555		
24.2	Lentes	556		
24.3	Formación de imágenes	559		
24.4	Potencia de una lente; aberraciones	562		
24.5	La lupa o lente de aumento	563		
24.6	El microscopio óptico de campo brillante	564		
24.7	El ojo humano	566		
	Temas suplementarios	573		
24.8	La cámara fotográfica	573		
24.9	Resolución y contraste en los microscopios	575		
24.10	Microscopios de polarización, interferencia y contraste de fase	576		
24.11	Defectos ópticos del ojo	578		
24.12	Percepción y medida del color	582		
	UNIDAD 7			
	FÍSICA MODERNA	589		

CAPÍTULO 25			
RELATIVIDAD ESPECIAL	591		
25.1 Los principios fundamentales de la relatividad especial	592		
25.2 Relojes en movimiento y dilatación temporal	593		
25.3 Contracción de la longitud	594		
25.4 Ímpetu y energía	595		
Albert Einstein	596		
Temas suplementarios	602		
25.5 El problema de los sucesos simultáneos	602		
25.6 Adición de velocidades	605		
CAPÍTULO 26			
PROPIEDADES CORPUSCULARES DE LA LUZ: EL FOTÓN	608		
26.1 El efecto fotoeléctrico	608		
26.2 El fotón	610		
26.3 Dualidad onda-corpúsculo	613		
26.4 Los fotones y la visión	613		
CAPÍTULO 27			
PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA MATERIA	618		
27.1 Fracasos de la física clásica	619		
27.2 La hipótesis ondulatoria de De Broglie	621		
27.3 El átomo de Bohr	624		
Niels Bohr	625		
27.4 El principio de incertidumbre	630		
UNIDAD 8			
ÁTOMOS Y MOLÉCULAS	639		
CAPÍTULO 28			
MECÁNICA CUÁNTICA Y ESTRUCTURA ATÓMICA	641		
28.1 Las líneas generales de la mecánica cuántica	642		
28.2 Números cuánticos del átomo de hidrógeno	642		
28.3 Funciones de onda para el átomo de hidrógeno	645		
28.4 Principio de exclusión de Pauli	647		
28.5 Estructura atómica y la tabla periódica	648		
28.6 Espectros atómicos de emisión y de absorción	651		
Temas suplementarios	654		
28.7 Máseres y láseres	654		
CAPÍTULO 29			
LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA	658		
29.1 Enlace iónico	658		
29.2 Enlace covalente	659		
Linus Pauling	661		
29.3 Enlace metálico	664		
29.4 Aisladores y semiconductores	666		
29.5 Enlaces más débiles	667		
Temas suplementarios	672		
29.6 Resonancia magnética nuclear	672		
29.7 El comportamiento de un dipolo en un campo magnético	672		
29.8 Medida de la frecuencia de precesión	674		
29.9 El aparato de RMN	675		
29.10 El corrimiento químico	676		
29.11 El desdoblamiento spin-spin	678		
UNIDAD 9			
EL NÚCLEO ATÓMICO	685		
CAPÍTULO 30			
FÍSICA NUCLEAR	687		
30.1 Radiactividad	687		
30.2 Semivida o período de semidesintegración	688		
30.3 Datación en Arqueología y Geología	691		
30.4 Tamaños nucleares	694		
30.5 Protones y neutrones	694		
30.6 Masas nucleares y energías de enlace	695		
30.7 Fuerzas nucleares	697		
30.8 Niveles nucleares de energía y estabilidad nuclear	697		
30.9 Desintegraciones radiactivas	699		
Enrico Fermi	702		
Temas suplementarios	708		
30.10 Fisión nuclear	708		
30.11 Reactores y explosivos de fisión	710		
30.12 Fusión nuclear	712		
30.13 Los quarks	712		
30.14 Deducción de la fórmula exponencial de desintegración	714		

CAPÍTULO 31			
RADIACIÓN IONIZANTE	718		
31.1 La interacción de la radiación con la materia	718		
31.2 Unidades de radiación	721		
31.3 Efectos perjudiciales de la radiación	723		
31.4 Exposición crónica a la radiación	725		
31.5 La radiación en Medicina	727		
31.6 Otras aplicaciones de la radiación	730		
Temas suplementarios	737		
31.7 Detección y medida de la radiación	737		
31.8 Deducción de la fórmula de la pérdida de la energía	739		
EPÍLOGO			
LA FÍSICA Y EL FUTURO	742		
APÉNDICE A			
TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS	744		
APÉNDICE B			
REPASO MATEMÁTICO	745		
B.1 Potencias y raíces	745		
B.2 Notación científica	746		
		B.3 Cifras significativas	746
		B.4 Solución de ecuaciones algebraicas	748
		B.5 Gráficas	750
		B.6 Geometría plana y funciones trigonométricas	751
		B.7 Desarrollos en serie	754
		B.8 Derivadas	755
		B.9 Áreas y volúmenes	755
		B.10 La función exponencial; logaritmos	755
		RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS DE REPASO DEL APÉNDICE B	757
		APÉNDICE C	
		SISTEMAS DE UNIDADES	759
		C.1 Tiempo, longitud y masa	759
		C.2 Unidades de fuerza, peso	760
		C.3 Otras unidades de la mecánica	760
		C.4 Unidades eléctricas	760
		C.5 Resumen	761
		RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS Y PROBLEMAS IMPARES	762
		ÍNDICE ALFABÉTICO	775

LAS LEYES GENERALES DEL MOVIMIENTO

En esta unidad y en la siguiente tratamos de la *mecánica*: el estudio de los movimientos de los objetos y de las fuerzas que afectan a dichos movimientos. Sus conceptos y principios aparecen, directa e indirectamente, en muchas áreas de las ciencias físicas y biológicas. Las leyes de la mecánica nos permiten hacer predicciones sobre fenómenos tan diferentes como los movimientos de los satélites, los movimientos de los animales y la fuerza y estructura tanto de sistemas vivos como artificiales. Las leyes de la mecánica aplicadas a los movimientos de gran número de átomos y moléculas dan una interpretación de los fenómenos del calor y la temperatura. Las propiedades de los fluidos —en reposo y en movimiento— se entienden en función de las mismas leyes; mediante ellas podemos comprender el vuelo de aviones y animales y el flujo de ríos y de la sangre. Finalmente, con algunas modificaciones del siglo XX, las mismas leyes mecánicas juegan un papel central en las actuales teorías de los fenómenos atómicos y nucleares.

Los dos primeros capítulos de esta parte se dedican a los conceptos que necesitamos para una descripción cuantitativa del movimiento: *posición*, *velocidad* y *aceleración*. En el capítulo 1 los encontramos en el estudio del movimiento rectilíneo; el capítulo 2 extiende las mismas ideas a la descripción del movimiento en más de una dimensión. Las leyes generales del movimiento formuladas por Newton y que relacionan los movimientos de los objetos con sus causas, se discuten en los capítulos que van del 3 al 5.

CAPÍTULO 1

MOVIMIENTO RECTILÍNEO

El resultado más básico y obvio de las interacciones físicas es el movimiento: los ladrillos caen, los timpanos vibran, las agujas de las brújulas se alinean con el campo magnético, las agujas de los aparatos de medida se mueven sobre una escala graduada, los núcleos radiactivos emiten partículas beta. La mayor parte de nuestra comprensión de la naturaleza se deduce de la observación de los movimientos y del esfuerzo para relacionarlos con sus causas. Por lo tanto empezamos el estudio de la física desarrollando las ideas que se necesitan para una discusión cuantitativa del movimiento, iniciando este capítulo con el caso de un objeto que se mueve en línea recta.

La física, así como muchas otras ciencias, se basa sobre todo en medidas cuantitativas. Dichas medidas se han de relacionar e interpretar de alguna manera; a menudo se comparan con predicciones teóricas. Si la teoría coincide con los resultados experimentales decimos que comprendemos el fenómeno en cuestión. Una discusión cuantitativa del movimiento requiere medidas de tiempos y distancias, de modo que en primer lugar hemos de tratar de los *patrones*, las *unidades* y los *errores* implicados en las medidas físicas.

1.1 | MEDIDAS, PATRONES, UNIDADES Y ERRORES

Las medidas físicas cuantitativas han de expresarse mediante comparación numérica con un sistema de patrones establecidos. Si decimos que una conferencia

duró 53 minutos, ello significa que duró el tiempo en que el reloj de pared hacía este número de señales. En este caso la magnitud medida tiene *dimensiones* de tiempo, la *unidad* de medida es el minuto y el reloj es el *patrón*. Este es un *patrón secundario*, puesto que el minuto no se define según las propiedades de dicho reloj. Todos los instrumentos de medida se calibran directa o indirectamente en función de *patrones primarios* de longitud, tiempo y masa establecidos por la comunidad científica internacional.

La definición de dichos patrones primarios va cambiando de vez en cuando al aumentar la precisión de las medidas. Por ejemplo, la unidad de longitud —el *metro*— se definió en 1889 como la longitud de una determinada barra de platino iridiado mantenida en unas condiciones fijas. Este patrón se descartó en 1960 debido a que la reproducción y conservación eran difíciles y sujetas a imprecisiones. La longitud patrón se basa ahora en la longitud de onda de la radiación rojo-anaranjada emitida por los átomos de kriptón 86 en un tubo de descarga eléctrica. También se han definido patrones para las unidades de tiempo y masa.

No es casual que se hayan establecido patrones para la longitud, el tiempo y la masa. Todas las magnitudes mecánicas pueden expresarse por medio de alguna combinación de estas tres magnitudes fundamentales, que representaremos por L , T y M , respectivamente. Por ejemplo, una velocidad es una distancia dividida por un tiempo y, por lo tanto, sus dimensiones son L/T .



Figura 1.1 En las instalaciones Clinton P. Anderson de Física de mesones de Los Alamos, una máquina de media milla de longitud situada en las montañas del norte de Nuevo Méjico, acelera un gran número de protones (núcleos de hidrógeno) a altas velocidades. Cuando estos protones chocan contra un blanco producen partículas de vida corta llamadas mesones, que se emplean en la investigación física y en la terapia del cáncer. Las medidas realizadas en esta «factoría de mesones» utilizan dispositivos electrónicos sofisticados, pero a pesar de ello están calibrados indirectamente en función de las unidades básicas de longitud, tiempo y masa. (Por cortesía de Los Alamos Scientific Laboratory.)

Sistemas de unidades | Las *unidades métricas* han sido utilizadas durante largo tiempo en todos los asuntos cotidianos en todos los países excepto los de lengua inglesa, donde se utilizan por norma las *unidades británicas*. Los países de la Commonwealth adoptaron recientemente el sistema métrico, y los Estados Unidos han empezado lentamente este complicado proceso. En el trabajo científico se emplean en todo el mundo unidades métricas. Por ello, en este texto utilizaremos principalmente el sistema métrico de unidades universalmente aceptado llamado *Sistema Internacional (SI)*. Sus unidades básicas para la longitud, la masa y el tiempo son, respectivamente, el *metro*, el *kilogramo* y el *segundo*. En los textos antiguos, una primera versión de este sistema se denominaba *m k s*. También en estos textos se utilizaban las unidades *c g s*: el centímetro es

0,01 metros y 1 gramo es 0,001 kilogramos. El centímetro y el gramo se consideran submúltiplos aceptables de las unidades SI básicas, pero la mayoría de las restantes unidades *c g s* son en la actualidad obsoletas. En este libro, mencionaremos de paso algunas unidades de este sistema que con frecuencia aparecen en la literatura. En los primeros capítulos, sin embargo, utilizaremos moderadamente algunas unidades británicas de longitud (pie, yarda, milla) y de fuerza (libra), todavía empleadas en los Estados Unidos y que pueden resultar ocasionalmente de algún interés para el lector. Algunas unidades que no pertenecen al SI pero que están considerablemente extendidas se definen en el Apéndice C.

En la tabla 1.1 y 1.2 se recogen longitudes y tiempos representativos de diversas magnitudes de interés. Los números aparecen como potencias de 10, es decir, en «notación científica», la cual se repasa en el Apéndice B.1. Obsérvese que muchas de las magnitudes de estas tablas parecen muy grandes o muy pequeñas. Por ello, utilizaremos a menudo múltiplos o submúltiplos de las unidades SI, construidos con la ayuda de los prefijos que aparecen tabulados en la contracubierta ante-

TABLA 1.1

Longitudes representativas en metros.

Núcleo atómico	10^{-15}
Diámetro del átomo de sodio	10^{-11}
Enlace C-C	$1,5 \times 10^{-10}$
Diámetro del DNA	2×10^{-9}
Grosor de un microfilamento	4×10^{-9}
Hemoglobina	7×10^{-9}
Membrana celular	10^{-8}
Diámetro de un virus pequeño	2×10^{-8}
Diámetro de una bacteria pequeña	2×10^{-7}
Longitud de onda de la luz visible	$4 - 7 \times 10^{-7}$
Diámetro de una mitocondria	$0,5 - 1 \times 10^{-6}$
Diámetro de una bacteria grande	10^{-6}
Diámetro de las células hepáticas de un mamífero	2×10^{-5}
Huevo de un erizo de mar	7×10^{-5}
Diámetro de una ameba gigante	2×10^{-4}
Crustáceo pequeño	10^{-3}
Diámetro de un huevo de avestruz	4×10^{-2}
Rata	10^{-1}
Hombre	$1 - 2 \times 10^0$
Ballena azul	3×10^1
Puente de Brooklyn	10^3
Diámetro de la Tierra	$1,3 \times 10^7$
Diámetro del Sol	$1,2 \times 10^9$
Distancia Tierra-Sol	$1,3 \times 10^{11}$
Diámetro de nuestra galaxia	10^{22}
Distancia a las galaxias más lejanas observadas por ahora	10^{28}

TABLA 1.2

Tiempos representativos en segundos

Fenómenos nucleares	$10^{-23} - 10^{-10}$
Fenómenos atómicos: absorción de luz, excitación electrónica	$10^{-15} - 10^{-9}$
Fenómenos químicos	$10^{-9} - 10^{-6}$
Cadenas de reacciones bioquímicas	$10^{-8} - 10^2$
Contracción rápida de un músculo estriado (parpadeo)	10^{-1}
División celular más rápida	5×10^2
Tiempo de generación de una bacteria típica	3×10^3
Tiempo de generación de un protozoo típico	10^5
Tiempo de generación de un mamífero pequeño	4×10^7
Vida media de un mamífero grande	$4 \times 10^8 - 4 \times 10^9$
Vida media de un lago	$10^{10} - 10^{12}$
Era de los mamíferos	3×10^{15}
Era de los vertebrados	10^{16}
Edad de la vida	$> 10^{17}$
Edad de la Tierra	2×10^{17}

rior del libro, para facilitar su consulta. Por ejemplo, la distancia entre dos ciudades se mide habitualmente en kilómetros, donde $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$. En cambio, resulta más conveniente expresar las dimensiones de este libro en centímetros que en metros, mientras que el grosor de una página es del orden de $0,1 \text{ milímetro}$ o 100 micrometros (o micras). ($1 \text{ milímetro} = 10^{-3} \text{ m}$; $1 \text{ micrometro} = 10^{-6} \text{ m}$.)

Conversión de unidades | Aunque por lo general utilizamos unidades SI, en ocasiones necesitamos pasar resultados de un sistema de unidades a otro. Es fácil hacerlo correctamente, incluso en casos complicados, mediante una pequeña argucia que consiste en «multiplicar por uno».

Para ver cómo se hace, supongamos que hemos de convertir 100 pies en su equivalente en metros (m). Según la lista de factores de conversión de la contracubierta anterior

$$1 \text{ pie} = 0,3048 \text{ m}$$

Dividimos ahora ambos miembros por 1 pie, tal como si la unidad fuera una cantidad algebraica

$$\frac{1 \text{ pie}}{1 \text{ pie}} = \frac{0,3048 \text{ m}}{1 \text{ pie}}$$

En la izquierda, los pies se simplifican y tenemos por lo tanto

$$1 = \frac{0,3048 \text{ m}}{1 \text{ pie}}$$

Si multiplicamos 100 pies por 1 no cambia nada, y hallamos

$$\begin{aligned} 100 \text{ pie} &= (100 \text{ pie})(1) \\ &= (100 \text{ pie}) \frac{(0,3048 \text{ m})}{1 \text{ pie}} \\ &= 30,48 \text{ m} \end{aligned}$$

Adviértase que las unidades pie en el numerador y denominador se simplifican, quedando la unidad deseada m. Este método de multiplicar por 1 elimina cualquier duda de si hemos de multiplicar o dividir por el factor de conversión. Por ejemplo, podemos dividir $1 \text{ pie} = 0,3048 \text{ m}$ por $0,3048 \text{ m}$, obteniendo

$$1 = \frac{1 \text{ pie}}{0,3048 \text{ m}}$$

Sin embargo, si multiplicamos 100 pie por este factor, las unidades no se simplifican de la manera adecuada.

A veces es necesario convertir las unidades de una magnitud que se mide en relación con dos o más dimensiones básicas. Por ejemplo, un volumen podría medirse en pies cúbicos o pie^3 , y una velocidad en millas por hora o mi h^{-1} . (Obsérvese que utilizamos exponentes negativos con las unidades, como lo haríamos con cantidades algebraicas, así $1 \text{ h}^{-1} = 1/\text{h}$). Este procedimiento se muestra en los ejemplos siguientes.

Ejemplo 1.1

Una pequeña piscina tiene 20 pies de largo, 10 pies de ancho y 5 pies de profundidad. Su volumen es el producto de estas longitudes, es decir: $(20 \text{ pie})(10 \text{ pie})(5 \text{ pie}) = 1000 \text{ pie}^3$. ¿Cuál es su volumen en metros cúbicos (m^3)?

Aquí hemos de convertir pies en metros tres veces, tal como corresponde a cambiar las unidades de la longitud, la anchura y la profundidad. Utilizando $1 \text{ pie} = 0,3048 \text{ m}$ o $1 = 0,3048 \text{ m pie}^{-1}$

$$\begin{aligned} 1000 \text{ pie}^3 (1)^3 &= 1000 \text{ pie}^3 \frac{(0,3048 \text{ m})^3}{(1 \text{ pie})^3} \\ &= 1000(0,3048)^3 \text{ m}^3 = 28,3 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Ejemplo 1.2

Pasar una velocidad de 60 mi h^{-1} (millas por hora) a pies por segundo (pie s^{-1}).

Para llevar a cabo este cambio necesitamos un factor unidad para pasar de horas a segundos y otro para pasar de millas a pies. Como $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$, dividiendo por 3600 s obtenemos

$$1 = \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

Asimismo, $1 \text{ mi} = 5280 \text{ pie}$, por lo cual

$$1 = 5280 \text{ pie mi}^{-1}$$

Multiplicando 60 mi h^{-1} por 1 dos veces se obtiene

$$\begin{aligned} (60 \text{ mi h}^{-1})(1)(1) &= (60 \text{ mi h}^{-1}) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) (5280 \text{ pie mi}^{-1}) \\ &= 60 \left(\frac{5280}{3600} \right) \text{ pie s}^{-1} = 88 \text{ pie s}^{-1} \end{aligned}$$

Tipos de errores | Tanto las medidas como las predicciones están sujetas a errores. Los errores de medida son de dos tipos, *casuales* y *sistemáticos*. El signi-