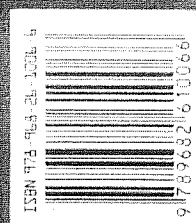


# FÍSICA SIN MATEMÁTICAS

CLARENCE E. BENNETT

CLARENCE E. BENNETT **FÍSICA SIN MATEMÁTICAS**

**PATRIA**

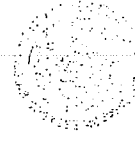


[www.editorialpatria.com.mx](http://www.editorialpatria.com.mx)





# Física sin Matemáticas



PROF. DR. JOSÉ L. GARCÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS

## ACERCA DEL AUTOR

El profesor Clarence E. Bennett fue jefe del Department of Physics de la University of Maine desde 1939 hasta 1967. Anteriormente fue miembro de las facultades de la Brown University y del Massachusetts Institute of Technology y posee el grado de Ph. D. de la Brown University.

Es socio de la American Association for the Advancement of Science y de la American Physical Society y miembro de la American Association of Physics Teachers, Optical Society of America, American Society for Engineering Education, Phi Beta Kappa, Phi Kappa Phi, Tau Beta Pi, Sigma Xi, y Sigma Pi Sigma. El profesor Bennett ha contribuido con varios artículos en revistas científicas y es autor de *Física y Problemas de Física* de la Serie de Compendios Científicos, y de un libro de texto: *Física para Primer Año*.

# FISICA SIN MATEMATICAS

*Traducción de la Edición Revisada:*

CLARENCE E. BENNETT

Professor of Physics University of Maine

VIGÉSIMA OCTAVA REIMPRESIÓN  
MÉXICO, 2000

COMPañÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V.  
MÉXICO

Para establecer comunicación  
con nosotros puede hacerlo por:



correo:  
Renacimiento 180, Col. San Juan  
Tlhuaca, Azcapotzalco,  
02400, México, D.F.



fax pedidos:  
(015) 561 4063 • 561 5231



e-mail:  
[info@patriacultural.com.mx](mailto:info@patriacultural.com.mx)



home page:  
<http://www.patriacultural.com.mx>

Titulo original de la obra:

PHYSICS WITHOUT MATHEMATICS

Traducción autorizada por: Barnes and Noble, Inc.

Copyright © by Barnes and Noble, Inc.

Traducción:

Arturo J. Velasco

Ingeniero químico

IPNAIM

Título en español:

Física sin matemáticas

Derechos reservados de la edición en español:

© 1973, Clarence E. Bennet/Barnes and Noble, Inc.

© 1973, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.

© 2000, GRUPO PATRIA CULTURAL, S.A. DE C.V.

Bajo el sello de Compañía Editorial Continental

Renacimiento 180, Colonia San Juan Tlhuaca,

Delegación Azcapotzalco, C.P. 02400, México, D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial

Registro núm. 43

ISBN 968-26-1006-0

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido  
de la presente obra en cualesquiera formas, sean electrónicas o mecánicas,  
sin el consentimiento previo y por escrito del editor.

Impreso en México

Printed in Mexico

Cámara edición: 1973

Segunda edición: 1999

Octava edición: 2000

## PREFACIO

Es indiscutible que el actual estudiante de humanidades está interesado en el mundo físico que lo rodea, y que comprende la importancia del conocimiento científico. Los muchos cursos de orientación y cursos panorámicos que se llevan en muchos colegios y universidades son testigos de ello. Sin embargo, es dudoso que el problema de introducir en el campo de la física a un estudiante serio, pero no profesional de la ciencia, se haya resuelto de modo adecuado. El autor del presente texto ha llegado a percibir que la respuesta no está en eliminar gran parte de los temas técnicos, sino en separar, tanto como sea posible la física de la aritmética; ya que la parte numérica de la física es la que hace temblar al estudiante no científico con el comentario de que él nunca ha podido "ver" las matemáticas. Por otra parte, existe una cantidad sorprendente de temas en un curso elemental de física que no es necesario tratar numéricamente. La experiencia ha demostrado al autor que un curso semestral "no aritmético", que insista en los conceptos, el vocabulario y la definición de términos técnicos, no sólo es positivo, sino conveniente para aquellos estudiantes que probablemente no continúan estudiando física; el autor ha encontrado que de esta manera puede desarrollarse una verdadera apreciación de los diversos temas de la física, la que no debe ser confundida con un falso sentido de comprensión.

Desde luego, la aritmética no puede eliminarse por completo, pero puede ser reducida a casi nada; esto sacrifica, hasta cierto punto, lo conciso y el rigor que deben caracterizar apropiadamente un curso de física general, pero sin llegar a un grado exagerado. Aunque el lenguaje de la física es, en cierta medida, el de las matemáticas, debido a que el físico aprecia su forma abreviada y simbólica de expresión, de esto no se infiere que el estudiante que no sabe matemáticas no pueda apreciar una gran parte de los fundamentos de la ciencia, que juegan una parte tan importante en el mundo en que vive. Además, el físico debe sentir como obligación ayudar a sus colegas no científicos

se obtener una clara representación del mundo físico y estar dispuesto a proceder, cuando sea necesario, sin la sutileza del lenguaje matemático. (Este sentimiento ha motivado la preparación de este libro.)

En este texto, el orden en que se han desarrollado los diversos temas, es un desarrollo lógico diseñado para hacer hincapié en la unidad de la física. Las relaciones entre cada concepto y los que le preceden están cuidadosamente indicados y de este modo todos los temas están relacionados a partir de consideraciones fundamentales. El vocabulario técnico no se evita, sino que se insiste en él para estimular su uso correcto: solamente la aritmética ha sido reducida.

La edición presente de este texto es una revisión completa de la edición anterior. Además de una alteración y nuevo arreglo del material, se han agregado bastantes temas de lo que corrientemente se llama *física moderna*. Este tema se ha presentado desde el punto de vista de que sólo puede ser apreciado después de comprender muchos de los conceptos y leyes de la física clásica. No es intención de este libro alucinar al estudiante no científico, explorando los llamativos aspectos de la electrónica y la nucleónica, sino más bien ayudarlo a desarrollar una perspectiva apropiada de toda la física, donde la naturaleza del átomo es sólo una parte.

Es de esperarse que un curso basado en este texto sea de conferencias con una atención muy considerable a los experimentos demostrativos. La física presenta una ventaja sobre otras materias: se presta al tipo de presentación por conferencias, debido al casi ilimitado equipo de demostración y de material audiovisual disponible. El conferencista encontrará innumerables oportunidades de extender el material de este texto, de acuerdo con el equipo de que disponga. Estas páginas no intentan reemplazar a la palabra hablada, sino más bien servir como guía a las lecturas del estudiante y como un complemento de los temas desarrollados por el profesor.

Para facilitar el desarrollo de un curso semestral, los temas de este libro se han dividido en capítulos, cada uno de los cuales puede desarrollarse, aproximadamente, en una semana. Las preguntas están listadas después de cada capítulo y las preguntas de repaso se insertan en los lugares apropiados, para exámenes de una hora de duración. Estas últimas son del tipo de "opción múltiple" y pueden ser resueltas basándose en el

texto, pero han sido intencionalmente redactadas para que su dificultad sea suficiente para comprobar un genuino conocimiento de los temas tratados.

El estudiante debe evitar leer con rapidez y sin cuidado los capítulos de este texto; al no emplear la aritmética, las palabras llevan un mayor significado y han de leerse cuidadosamente, y aun despacio, para captar todo su sentido. El estudiante debe permitirse algún tiempo para reflexionar.

# CONTENIDO

CAP.	PÁG.
Prefacio .....	5
1. Introducción: El Método Científico; Conceptos Fundamentales; Medidas y Unidades Básicas .....	11
2. Consideraciones Históricas: Física Antigua y Medieval; El Nuevo Despertar de la Física; Física Clásica; Física Moderna .....	25
3. Consideraciones Mecánicas: Fuerza y Movimiento; Naturaleza Vectorial de la Fuerza; Equilibrio; Leyes del Movimiento; Impetu .....	41
4. Consideraciones Mecánicas. ( <i>Continuación</i> ): Trabajo; Energía y Fricción .....	63
5. Consideraciones Elásticas: Elasticidad; Vibraciones y Fluidos .....	79
6. Ondas y Sonido .....	93
7. Consideraciones sobre la Materia: Constitución de la Materia; Propiedades de los Gases; Fenómenos de Superficie .....	109
8. Consideraciones Térmicas: La Naturaleza del Calor; Termometría; Dilatación; Calorimetría; Cambios de Estado .....	125
9. Consideraciones Térmicas. ( <i>Continuación</i> ): La Naturaleza de la Transmisión del Calor; La Teoría Cuántica y Algunas Consideraciones Filosóficas .....	141
10. Consideraciones Eléctricas: Electricidad Estática; Cargas; Potencial; Capacitancia .....	155
11. Magnetismo .....	169
12. Consideraciones Eléctricas. ( <i>Continuación</i> ): Corriente Eléctrica .....	179

11. Consideraciones Electrónicas y Fenómenos Atómicos y Nucleares: Introducción a la Física Moderna; Descarga Eléctrica en Gases; Rayos X; Electrónica; Radiactividad; Física Nuclear y el Estado Sólido .....	195
12. Consideraciones Ópticas: Fotometría Leyes de la Óptica Geométrica; Aparatos Ópticos .....	217
13. Consideraciones Ópticas: (Continuación): Óptica Física: Dispersión; Espectroscopia; Interferencia; Difracción y Polarización .....	235
Apéndice: Cuestionario Final de Repaso .....	253
Índice .....	261

## Capítulo 1

### INTRODUCCION

#### EL METODO CIENTIFICO; CONCEPTOS FUNDAMENTALES; MEDIDAS Y UNIDADES BASICAS

Para muchos, la física es un tema muy difícil y profundo que emplea en gran proporción las matemáticas, por lo cual su estudio sólo debe ser emprendido por quienes tengan habilidad especial para ellas, y debe ser evitado por todos los demás. Aunque ciertamente, la física es, quizá, la rama de la ciencia más organizada en la actualidad, y requiere un profundo análisis matemático para su completa comprensión, es también verdad que se encuentra íntimamente relacionada con casi toda actividad de la vida cotidiana, por lo que algún conocimiento de sus leyes y conceptos debe formar parte de cualquier persona que pretenda ser culta. Además, contrariamente a la creencia popular, una comprensión verdadera de la naturaleza del mundo físico puede obtenerse sin el empleo de un lenguaje muy matemático. Naturalmente, el físico profesional es refinente, o quizá incapaz, de prescindir de la útil herramienta y de la concisa expresión analítica que es proporcionada en forma exclusiva por la matemática; pero el lector que pretenda poseer un grado razonable de curiosidad científica no debe creer que las maravillas de esta ciencia fundamental le están negadas, si, teniendo habilidad de razonar lógicamente, está dispuesto a emprender el cultivo de un vocabulario técnico. Por supuesto, ésta no es una empresa trivial y debe necesitar concentración.

**Alcance de la física.** El ámbito de este estudio comprende, en general, los siguientes temas: fuerza, trabajo, movimiento,



energía, fluidos, ondas, sonido, calor, electricidad, magnetismo, radio, átomos, electrones, lentes, prismas, instrumentos ópticos, color y luz polarizada. Sin embargo, estos tópicos son considerados no como una serie de cosas sin relación, sino más bien como una parte de un solo tema —la Física—, o sea, el estudio del mundo físico donde vivimos. Todos estos temas están caracterizados por términos técnicos y uno de los propósitos de este estudio es desarrollar una apreciación de estos términos, aprendiendo sus definiciones correctas, así como adquirir familiaridad con ciertas relaciones fundamentales que la experiencia ha demostrado que existen entre ellos. Sólo así puede obtenerse un panorama de la física teniendo en cuenta el alto grado de organización al que la ciencia ha llegado.

**Definición de términos.** La mayoría de los términos usados en física son vocablos definidos, lo que quiere decir que toman su preciso significado técnico debido a un común acuerdo. En consecuencia, es necesario reconocer desde ahora que la definición de nuevos términos es una condición indispensable para el éxito de nuestro programa. Quizá no es exagerado decir que una introducción a la física es principalmente el estudio de un concepto tras otro, cada uno de los cuales es cuidadosamente definido en términos de conceptos más fundamentales que él mismo. En este sentido la introducción a la física es esencialmente un estudio de vocabulario. De este modo se desarrolla una estructura de conceptos relacionados, basados en algunos de ellos que se consideran fundamentales e incapaces de definirse en términos de otros conceptos. No es fácil darse cuenta de todo el significado de lo que acaba de decirse, pero cuando el estudiante encuentre que todos los conceptos mecánicos derivan de sólo tres conceptos fundamentales —longitud, masa y tiempo— empieza a apreciar la unidad de la física. Antes de considerar detalladamente estos tres conceptos fundamentales, serán considerados varios aspectos generales.

**Razonamiento inductivo contra razonamiento deductivo.** Las referencias anteriores al desarrollo lógico, desde consideraciones fundamentales a conceptos más complejos, puede llevarnos posiblemente a la impresión de que los razonamientos físicos son un ejemplo de razonamiento deductivo. Por otra parte, la expresión "Método Científico" implica "razonamiento inductivo". Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el razonamiento in-

ductivo caracteriza la fase de investigación de una ciencia. Después que una porción de información se ha descubierto y organizado apropiadamente, es a menudo más efectivo comunicarlo a las generaciones futuras de estudiantes por un proceso deductivo. Este tipo de razonamiento fue llevado a gran altura por los filósofos griegos, pero el solo razonamiento deductivo fue incapaz de adelantar el estudio de la física más allá de ciertos límites, ya que falsas premisas llevan a conclusiones equivocadas, pese a un razonamiento correcto. Por ejemplo, Aristóteles,<sup>1</sup> el famoso filósofo griego, razonaba que los cuerpos pesados caen más rápidamente que los ligeros y esta conclusión fue aceptada como verdadera durante muchos siglos sólo por la autoridad que había detrás de ella. Hasta la época de Galileo (1564-1642) se probó experimentalmente aquella conclusión y se encontró que era falsa. Galileo es llamado a menudo el padre de la física experimental, porque fue el primero en propugnar que las conclusiones deben basarse en hechos experimentales, más bien que exclusivamente en el razonamiento deductivo.

**El método científico.** Este método, como fue iniciado por Galileo, es inductivo, y, por lo general, comprende las etapas siguientes. En primer lugar, se hacen *observaciones*; luego se postula una *hipótesis* en cuyos términos sean compatibles los fenómenos observados —una hipótesis con éxito se convierte en la base de una *teoría*, la que no sólo "explica", sino que sugiere observaciones posteriores en la forma de *experimentación*; y, finalmente, una teoría satisfactoria lleva al establecimiento de una *ley científica*. De este modo la ciencia avanza por medio de la observación y el razonamiento inductivo, pero sería incorrecto inferir que en esto consiste el método científico. En realidad, los hombres de ciencia no siguen paso a paso el procedimiento descrito, sino que a menudo acuden a procedimientos indirectos y tortuosos y, aun siguiendo sus corazonadas; pero retrospectivamente consideradas, por lo general aparece que las etapas del método científico han sido más o menos seguidas. Con estos procedimientos se "descubrieron" las leyes del movimiento de los cuerpos pesados.

Téngase en cuenta, particularmente, el papel que tuvo la observación en el método científico. El sólo razonamiento,

<sup>1</sup> Véase el Cap. 2 para un resumen histórico sobre los desarrollos en física.

sin importar lo correcto que se haga, no es suficiente para establecer una ley o un principio científico. Los fenómenos observables son indiferentes al método que los explica, por lo que la física es esencialmente una ciencia experimental; sin embargo, el estudiante no necesita seguir el mismo camino que siguieron los primeros exploradores científicos. En este texto el estudiante no necesitará "descubrir" por sí mismo, pero tenemos la esperanza que desarrollará una real apreciación de lo que ha sido "descubierta" por otros.

**Naturaleza de las explicaciones.** En este punto tal vez sea oportuno decir algunas palabras en relación con la naturaleza de las explicaciones. Una explicación de cualquier cosa es siempre relativa y consiste en lograr que parezca razonable a alguien, en función de sus experiencias anteriores. Se reconocen diferentes grados de apreciación; así lo que constituye una explicación para un estudiante avanzado, será sólo verosímil, o bastante inaceptable, o hasta incomprensible, para un principiante. Como ya se ha dicho, para un estudiante avanzado, la matemática es esencial para la explicación de los fenómenos físicos, pero para el no iniciado, las explicaciones en términos matemáticos se vuelven a menudo poco satisfactorias. Para el principiante el vocabulario es más interesante que las relaciones matemáticas, aun cuando algunos de los conceptos físicos son matemáticos por su propia naturaleza; sin embargo, existe un amplio material en física elemental que es cualitativo y descriptivo y que permite al principiante obtener una idea cabal de su naturaleza. Aunque las explicaciones y las definiciones en este texto parezcan prolifas; si se comparan con las normas del físico profesional, son, no obstante, adecuadas para nuestro propósito.

**Observaciones cuantitativas—Medidas.** Puesto que el método científico no requiere solamente habilidad en el razonamiento, sino también observaciones cuidadosas, se infiere que las medidas juegan un importante papel en física; pues una observación es tanto cualitativa como cuantitativa. Así, la pregunta "cuánto" debe siempre responderse antes, si la observación es una base para conclusiones teóricas. Esto no significa que el lector deba entrar en detalles aritméticos, pero sí significa que el físico experimental debe prestar un gran cuidado a sus herramientas (que consisten en todos los instrumentos de medi-

ción), así como el físico teórico lo da a las leyes y procesos de lógica y de análisis matemático. A menudo se hace una distinción entre los físicos experimentales y los físicos teóricos o matemáticos, pero es importante hacer notar que el físico teórico se encuentra limitado por el material que le proporcionan los experimentadores.

**Medidas directas e indirectas.** Se hacen medidas de todas clases, pero en física es notable que no todas las medidas se hacen en forma directa. Así, la determinación del tamaño de un átomo o de la velocidad de la luz son medidas indirectas, lo que es nuevamente un resultado del alto grado de organización de la física. Las leyes físicas y sus relaciones necesitan que ciertas cosas deban ser así, para que ciertas otras sean verdaderas. Por ejemplo, dos sencillas medidas de longitud dan el área de un rectángulo; análogamente, una medida de longitud y una de tiempo son suficientes para determinar la velocidad con una aproximación comparable a la de dichas medidas. Además, una determinación de longitud, una de masa y otra de tiempo habilitan al físico para medir la energía cinética de un cuerpo, o su ímpetu, o cualquiera de las muchas cantidades que posteriormente serán definidas. En resumen: se necesitan no más de tres clases de medidas directas para determinar cualquier característica mecánica de un cuerpo físico, lo que solamente es otro modo de decir nuestra aseveración anterior, de que todos los conceptos de la mecánica son derivados que pueden expresarse en función de tres fundamentales: longitud, masa y tiempo. Así, es fácil ver que las medidas directas en física, al menos en el campo de la mecánica, están restringidas a medir aquellas cosas fundamentales que comúnmente se refieren, en la longitud, a una lectura en una escala; en el tiempo, a la lectura de un reloj; y en la masa, a la lectura de un índice.

**Naturaleza de la medida.** Si nos detenemos a pensar llegaremos a la conclusión de que una medida como, por ejemplo, de longitud, no es otra cosa que una comparación con una longitud patrón, la que a su vez no es sino una unidad determinada por común acuerdo. Así, un pizarrón se dice que tiene 2 metros de largo sólo porque su longitud coincide exactamente con la de una cinta métrica colocada a lo largo del pizarrón. En forma análoga, el largo de una mesa o de una alfombra

puede determinarse con respecto a una regla, una cinta métrica, etc., que esté marcada con cualquier conveniente unidad de longitud. En consecuencia, la longitud es algo que puede ser medido en términos de unidades de longitud, pero que de otro modo no tiene significado, excepto como un concepto básico para el desarrollo de otros; o dicho de otro modo, un concepto básico, como la longitud, no puede ser definido en función de cualquier otro más sencillo, sino sólo puede medirse comparándolo con una unidad. Análogamente la masa y el tiempo son cantidades que se especifican comparándolas con sus respectivas unidades determinadas por un acuerdo. Por tanto, es evidente que la primera tarea al estudiar física es conocer cómo se especifican las magnitudes en función de las unidades de longitud, masa y tiempo para poder medirlas, ya que todas ellas dependen de estas unidades. \*

Incidentalmente, hay que hacer notar que sólo por costumbre la longitud, la masa y el tiempo se consideran magnitudes básicas para desarrollar la mecánica; en principio, cualesquier otras tres magnitudes podrían emplearse, pero aquéllas son quizá las que se prestan a un desarrollo más natural y más sencillo.

Sin mayor demora procederemos a la especificación de las unidades generalmente aceptadas de longitud masa y tiempo, teniendo en cuenta que los conceptos mecánicos son expresables en términos de unidades, cada una de ellas relacionada de alguna manera con las unidades de las tres fundamentales. La situación se complica un poco ya que no hay un acuerdo universal, por lo que existen dos sistemas de unidades, el llamado sistema métrico y el conocido como sistema inglés, empleado en los Estados Unidos.

El patrón métrico de longitud es el metro internacional, originalmente definido como la distancia entre dos barras grabada en una barra de platino e iridio preservada cerca de París, Francia; pero en 1960 se volvió a definir en función de onda de la luz de un cierto isótopo del gas noble kriptón, cuando es excitado por una descarga eléctrica (los términos longitud de onda e isótopo se definirán después), de tal manera que el metro patrón contiene 1 650 763.7 longitudes de tales ondas. Originalmente se intentó que el metro representara  $1/4000000$  de la circunferencia de la Tierra, aunque continuas medidas de esta cantidad descubrieron errores en la

determinación original, pero esto de ninguna manera afecta el acuerdo de que el metro es el patrón aceptado. Una centésima parte del metro es el centímetro que durante mucho tiempo fue empleado como norma de longitud en trabajos científicos.

El patrón estadounidense de longitud es la yarda, que se define legalmente como la  $3600/3937$  parte del metro internacional; una yarda tiene 3 pies y un pie 12 pulgadas; una pulgada es igual a 2.54 centímetros.

Es importante hacer notar que la Comisión Internacional de Unidades trabaja constantemente para mantener y mejorar el estado legal de las unidades para propósitos comerciales.

★ **Unidades de masa.** Para comprender cómo se define la unidad de masa, debemos asegurarnos de tener claro el concepto de masa, ya que no es familiar como el de longitud. La masa se define como medida de la inercia; la inercia, por definición, es una propiedad de la materia, por virtud de la cual un cuerpo tiende a resistir cualquier cambio en su movimiento (el reposo se considera un caso especial de movimiento igual a cero).

Posteriormente se aprenderá que una fuerza es necesaria para cambiar el movimiento de un cuerpo, por lo que la inercia es una propiedad relacionando la fuerza y el movimiento; sin embargo, para el propósito de esta discusión, se puede imaginar a una fuerza simplemente como un empuje o una tracción tendiendo a cambiar el movimiento de un cuerpo.

★ **El peso no es lo mismo que la masa.** Una de las fuerzas más comunes que reciben los cuerpos es la de la gravedad, esto es, la fuerza de atracción de la Tierra. Todos los cuerpos que estén en su superficie o cerca de ella están siempre bajo su influencia. Técnicamente, el peso de un cuerpo es la atracción de la gravedad sobre él (véase la Fig. 1.1). Así, por ejemplo, se dice que un hombre pesa 70 kilopondios (o kilogramos peso) porque la Tierra lo atrae con una fuerza de 70 kilopondios. Aun en una astronave la Tierra atrae al astronauta; debe notarse que la condición de ingravedad que experimenta es un nombre un poco inapropiado; más correctamente debía decirse que el astronauta está aparentemente ingravido con respecto a la astronave. La Tierra atrae tanto al astronauta como a la astronave para mantenerlos en su órbita circular, pero con una magnitud que disminuye cuando aumenta la distancia a la Tierra. Si el

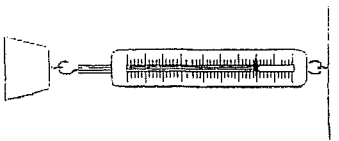


Fig. 1.1. El peso de un cuerpo puede determinarse por medio de un dinamómetro o balanza de resorte

astronauta se dirige hacia la Luna alcanzará una distancia a la Tierra donde la atracción de ésta se equilibra exactamente con la de la Luna; más allá de esta distancia, y en la superficie de la Luna, la atracción de ésta oculta completamente la de la Tierra. Así, el peso en la Luna es una cosa y el peso en la Tierra es otra, siendo esta última seis veces mayor que en la primera.

Debe hacerse notar que la unidad común y familiar de fuerza es el *kilopondio* o kilogramo peso. En el sistema métrico la unidad de fuerza es el *newton*, aproximadamente a la décima parte del peso del kilogramo patrón. El kilogramo es la unidad de masa, un concepto muy diferente del peso; la confusión proviene de emplear el mismo nombre para dos conceptos diferentes, pero esta dificultad puede evitarse teniendo cuidado en el empleo del lenguaje técnico; en las Págs. 54-56 se discutirá más ampliamente este tema.

Evidentemente, un cuerpo sin masa deberá carecer de peso (en realidad este cuerpo no existe), aunque la masa y el peso son conceptos diferentes. La masa es considerada por los físicos como el concepto más fundamental y se define arbitrariamente como la masa de un cierto cuerpo de platino iridiado, preservado cerca de París. La milésima parte de esta masa se llama *gramo*. El kilogramo peso o kilopondio se define como la atracción de la gravedad, al nivel del mar y a 45° de latitud, sobre

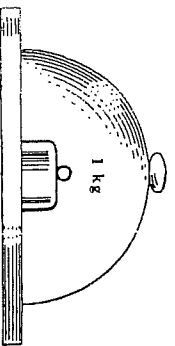


Fig. 1.2. El kilogramo patrón está guardado bajo un capelo de vidrio, cerca de París

el kilogramo masa. En realidad, la atracción de la gravedad sobre un cuerpo (su peso) varía ligeramente de un punto a otro de la superficie terrestre, siendo mayor en los polos que en el ecuador, porque los polos están más cerca del centro de la Tierra; pero al nivel del mar y a 45° de latitud los patrones de masa y de fuerza se definen simultáneamente en términos de una pieza de platino iridiado.

En los Estados Unidos la *libra* se define legalmente como una cierta fracción del kilogramo patrón (véase más adelante).

El sistema métrico es un sistema decimal aceptado universalmente en trabajos científicos por ser más conveniente. Por otra parte, los ingenieros emplean los llamados sistemas gravitacionales que por lo general son más familiares a la gente. En estos sistemas, kilogramo significa kilogramo peso o kilopondio, y libra, libra peso. Estas diferencias ilustran una distinción importante entre la ciencia y la ingeniería; mientras que la ciencia trata de modo principal con verdades sistemáticamente organizadas en un conjunto de conocimientos, con la lógica llevada hasta sus últimas consecuencias con respecto a las unidades, la ingeniería trata más bien con las aplicaciones de la ciencia a fines prácticos y comerciales, por lo que se hacen compromisos a menudo con las costumbres y usos aceptados por la gente en la región considerada. Por supuesto y en último análisis, hay mucha sobreposición entre la ciencia y la ingeniería, sin que haya una estrecha distinción entre ellas, especialmente porque la ingeniería se vuelve cada vez más científica.

**Unidad de tiempo.** Terminaremos esta discusión de las unidades fundamentales con la unidad de tiempo. A menudo el tiempo se define como la medida de una duración, pero la duración puede solamente definirse como una medida de tiempo: el tiempo es un concepto básico que no puede ser definido, sino sólo medido en unidades. Es casi universal la práctica de medir el tiempo por medio de relojes que han sido calibrados para dar lecturas en función de tiempo necesario para que la Tierra dé una vuelta alrededor de su eje al seguir su órbita alrededor del Sol. El día solar medio es la unidad aceptada, de la cual el segundo solar medio es la 1/86400 parte. La duración del día solar medio se encuentra promediando su duración durante un año. Esta unidad se emplea universalmente y así no toma parte en la confusión creada por otras unidades (véase

la Fig. 1.3). En 1967 se adoptó un nuevo patrón de tiempo basado en la frecuencia natural de vibración de un cierto isótopo del cesio; así, el segundo es el tiempo necesario para que se realicen 9 192 637 770 de dichas vibraciones.

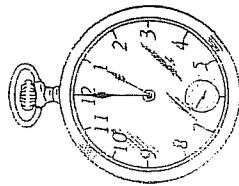


Fig. 1.3. Los intervalos de tiempo se miden con los relojes

**Sistemas de unidades.** Brevemente, a continuación se han compendiado las unidades básicas en tres sistemas:

El sistema llamado M.K.S., donde las unidades fundamentales son el metro, el kilogramo y el segundo; éste sistema es un compromiso entre los nombres de ciencia y los ingenieros y su mérito descansa, principalmente, en las unidades eléctricas, acerca de las cuales trataremos después.

El sistema C.G.S., es el que tiene por unidades el centímetro, el gramo y el segundo; éste era el sistema empleado científicamente.

El sistema M.K.S. gravitacional o técnico es el que tiene las unidades metros, kilogramos fuerza o kilopondios y segundos (véase el Cap. 3 para otras consideraciones relativas a la fuerza y a la masa).

En términos de estos sistemas de unidades, los físicos anotan las medidas directas, con las cuales sus conclusiones son alcanzadas y probadas.

**Instrumentos de medida.** En último análisis, las medidas directas se reducen a leer una escala de longitud, a medir el tiempo en un reloj y a la lectura de un índice para la determinación de la masa (véanse las Figs. 1.4 y 1.5). La lectura

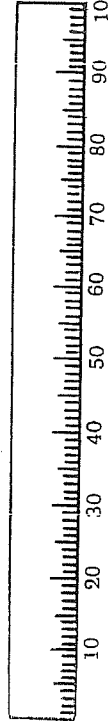


Fig. 1.4. Las longitudes se miden generalmente con reglas, cintas métricas, etc.

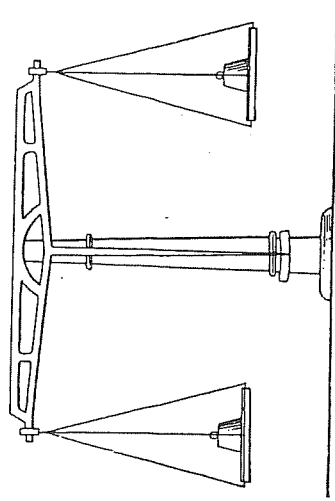


Fig. 1.5. La masa se mide por medio de la balanza de brazos iguales

del índice para la masa se obtiene con una balanza, donde la tendencia de un cuerpo, colocado en un platillo, a ser empujado hacia abajo por la gravedad, es equilibrada por medio de una cantidad equivalente de masas conocidas colocadas en otro platillo, que está conectado con el primero por medio de una barra descansando sobre el filo de una cuchilla colocada en el centro de dicha barra. En el curso de su trabajo, los físicos han inventado ingeniosos aparatos para facilitar estas medidas, incluyendo el vernier y el calibrador micrométrico (véanse las Figs. 1.6 y 1.7), el microscopio de medida, formas especiales de balanzas e intrincados relojes. Fundamentalmente, sin embargo, lecturas de longitud, masa y tiempo constituyen todas las observaciones cuantitativas directas.

**Valor relativo de las consideraciones cuantitativas.** Para que el principiante no tenga la impresión de que en esta discusión de las unidades fundamentales parece enfatizarse el aspecto

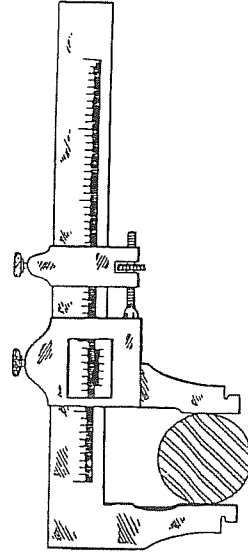


Fig. 1.6. El calibrador de Vernier se emplea para hacer medidas aproximadas de longitudes relativamente pequeñas

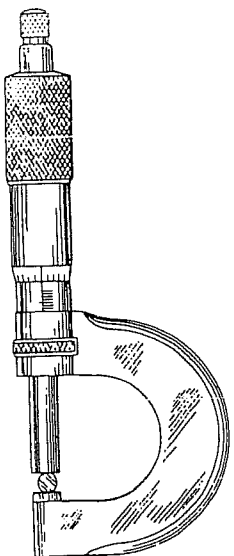


Fig. 17 El calibrador micrométrico se emplea para hacer medidas aproximadas de longitudes muy cortas

numérico de la física, a pesar de la promesa de que en este libro se reducirán al mínimo las consideraciones cuantitativas, debe recordarse que gran parte de la belleza que tiene la física para el físico, se encuentra en el grado muy alto de organización que suministran sus estrictas definiciones. Al estudiar estos temas, aunque los aspectos cuantitativos o numéricos no se lleven hasta el último límite, vale la pena hacer notar la importancia que tiene para el físico de que la primera sea lo primero. Sólo así obtiene la orientación apropiada para apreciar los aspectos más complicados—y tal vez más fascinantes—de la historia que será desarrollada en los siguientes capítulos de este libro.

**Resumen.** La física puede ser considerada como un grupo de conceptos lógicamente organizados para ser comprendidos en función de términos unívocamente definidos. Las conclusiones inferidas con respecto a estos conceptos se encuentran por medio de un razonamiento inductivo basado en las observaciones. Estas conclusiones deben estar sometidas a posterior observación y experimentación para ser probadas. Aunque el razonamiento inductivo es supremo en las fases de investigación de una ciencia—lo que es tan cierto ahora como antes—, el método deductivo es ventajosamente empleado para transmitir los resultados de una generación a la siguiente.

En este capítulo la importancia de las mediciones se ha acentuado, porque las observaciones deben ser tanto cuantitativas como cualitativas. Los físicos emplean instrumentos de medición—así como el instrumento de su mente—al hacer sus observaciones, expresando sus resultados en términos de unidades convenientes, de las cuales tres son más fundamentales que el resto.

Los capítulos futuros tratarán acerca de algunos de los resultados de las medidas, y aunque, naturalmente, las medidas tienen números, éstos serán reducidos al mínimo para que no interfieran con la descripción de los conceptos físicos. Sin embargo, antes de entrar en una discusión detallada de ellos, trataremos en el siguiente capítulo el lugar de la física en nuestra civilización, por medio de un breve tratamiento de su historia. Este resumen histórico constituirá una vista panorámica antes de entrar en consideraciones detalladas de sus varias partes; será una relación cronológica más bien que un desarrollo lógico.

### PREGUNTAS

1. ¿Qué significa "método científico"? ¿Es éste un método específico?
2. Distinga entre metro, centímetro, milímetro, yarda, pie.
3. ¿Para qué se emplea el calibrador de vernier?
4. ¿Cuál es la diferencia entre razonamiento "inductivo" y "deductivo"?
5. Distinga entre newton, kilopondio, kilogramo y libra.

## CONSIDERACIONES HISTORICAS

### FISICA ANTIGUA Y MEDIEVAL; EL NUEVO DESPERTAR DE LA FISICA; FISICA CLASICA; FISICA MODERNA

En un panorama descriptivo de la física es apropiado considerar, antes de quedar absorbido en sus detalles, un tema de naturaleza general, tal como su desarrollo histórico. Por este procedimiento el estudiante tiene la oportunidad, no sólo de apreciar cómo ha crecido la ciencia, sino también de valorar su importancia en, y para la moderna civilización. Después de todo, ésta es una edad científica y es ciertamente un tema de interés para el estudiante serio el conocer cómo la física ha contribuido al mundo en que vive y, también, lo que el mundo ha contribuido para el desarrollo de la física; este punto se vuelve más significativo cuando se tiene en cuenta que la física es una de las más antiguas y una de las más organizadas de todas las ciencias, cuyo desarrollo ha sido notablemente afectado por las condiciones políticas y económicas de la gente. Nótese que la bomba-atómica fue el resultado de un estado de guerra y fue producida por un país capaz de gastar más de dos mil millones de dólares en el esfuerzo de lograrlo. La ciencia hizo posible para el hombre llegar a la Luna con un costo, según se cree, de más de 20 mil millones de dólares. Los descubrimientos científicos que hicieron posible estos logros nunca hubieran podido llevarse a cabo por una sociedad económicamente atrasada. La bomba atómica fue motivada por la presión de una guerra política.

Ciertamente, a través de las edades, la contribución de la física al bienestar cultural y económico de la humanidad ha

sido muy grande, tanto en tiempo de paz como en tiempo de guerra. Es propósito de este capítulo esbozar algunos de los más importantes desarrollos científicos y asociarlos con quienes los iniciaron, pues a menudo el estudiante de ciencia o tecnología pasa por alto que la física concierne tanto a las personas como a las cosas. El descubrimiento de las leyes naturales fueron hechos por personas cuyas propias vidas, así como las de otros, fueron afectadas por dichos descubrimientos. Por lo tanto, es apropiado que este esbozo histórico se desarrolle alrededor de los nombres y épocas en que vivieron los físicos famosos. El estudiante deberá ensayar la asociación de las fechas con los eventos mundiales que le pueden ser familiares fuera del dominio de la ciencia; quizá se encuentren algunas conexiones entre sucesos de gran importancia social y descubrimientos científicos, los que no serían notados de no haber previamente atraído su atención.

**Cuatro periodos de la física.** Parece natural considerar este panorama histórico en cuatro subdivisiones principales que llamaremos periodos de la física, a saber: *Física Antigua y Medieval* (aproximadamente del año -3000 al 1500); *El Nuevo Despertar de la Física* (1500 a 1700); *Física Clásica* (1700 a 1890); *Física Moderna* (de 1890 al presente). Estas fechas deben ser consideradas sólo aproximadas. El primero y último de estos periodos los subdividiremos después. Debe hacerse una distinción entre el periodo antiguo y el medieval, aunque las contribuciones que se hicieron en este último periodo, que se extiende desde el año 500 al 1500 fueron tan pocas que tal distinción tiene poca importancia. Además, los adelantos que se hicieron en el periodo llamado moderno fueron tan numerosos que es justificable hacer una división alrededor del año 1925. Tal vez la bomba atómica en 1945 sea para los historiadores del futuro el inicio de una nueva era. Sin embargo, ahora no es el tiempo de valorar el progreso de la física con-temporánea y parece mejor en este panorama agrupar todas las realizaciones llevadas a cabo desde 1890 en un solo periodo llamado de la física moderna.

**Primer periodo. Física antigua y medieval (año -3000 al año 1500).** Los anales indican que los antiguos babilonios y egipcios, tan anteriormente como en el año -3000, estaban familiarizados en algunos de los principios fundamentales de la física,

especialmente los relacionados con la medida de tierras. Existen también evidencias de que los principios de la astronomía eran conocidos con alguna extensión por esos pueblos primitivos; pero nada definido en un sentido científico parece haberse obtenido de esto. Por supuesto, debe reconocerse la realización de ingeniería representada por las pirámides de Egipto, pero la astronomía no era sino el conjunto de cosas que ahora conocemos como astrología. También parece cierto que los chinos estaban familiarizados con la brújula tan tempranamente como el año -1000; pero aquí de nuevo las crónicas no son muy extensas.

**LA PARTE GRIEGA DEL PRIMER PERIODO.** Desde, aproximadamente, el año -700 al 150, muy definidos avances en física fueron llevados a cabo por los griegos. *Thales* (-640? a -546), una figura bastante borrosa, parece que haya reconocido ciertos aspectos de lo que ahora se conoce como electricidad estática. Los historiadores de la ciencia también le acreditan, y al grupo asociado con él conocido como la Escuela de Jonia, la idea de que el *fuego*, *el agua* y *la tierra*, eran las sustancias fundamentales: esto ciertamente representa una reconocible iniciación del pensamiento científico.

Otros antiguos nombres encontrados en los anales son *Pitágoras* (-580 a -500) y *Demócrito* (-460 a -370). Al primero se recuerda como el fundador de la escuela pitagórica de filósofos y su más importante contribución fue probablemente el teorema de geometría que lleva su nombre: el cuadrado de la hipotenusa de un triángulo rectángulo, es igual a la suma de los cuadrados de los dos catetos. A Demócrito se le acredita haber postulado un punto de vista atomístico de la materia; aunque actualmente este punto de vista atomístico se conserva, no se considera a Demócrito como su iniciador, ya que parece que tenía muy poca base científica para postularlo: sería más apropiado considerarlo más bien como una especulación ociosa, que como un postulado científico.

En seguida mencionaremos a *Platón* (-427? a -347) y su discípulo *Aristóteles* (-384 a -322). Platón fue, indudablemente, uno de los más grandes filósofos griegos, pero su contribución a la física fue relativamente escasa. Sin embargo, su famoso discípulo Aristóteles fue el mayor organizador del conocimiento científico de su tiempo; se le acredita el haber escrito el primer libro de texto de física, habiendo contribuido tanto a esta



ciencia, que por muchos siglos fue supremo su influjo. A pesar de su grandeza, se critica actualmente a Aristóteles que el fundamento de sus famosas teorías no se basaba en su evidencia experimental, pues aunque a menudo se refiere al valor de los hechos observados en el desarrollo de una teoría, parece que no seguía su propio consejo. Gran parte de su trabajo se basa en argumentos abstractos no comprobados por la observación; a menudo se dice que Aristóteles más bien explicaba el "por qué" de las cosas que "cómo" se comporta la naturaleza. Por supuesto, la ciencia actual se basa en el último punto de vista con un énfasis considerable en las mediciones cuantitativas realizadas con la mayor exactitud posible. Para las normas actuales, Aristóteles fue ciertamente, un filósofo de escritorio cuyas conclusiones eran más deductivas que inductivas. Aunque sus observaciones no estaban enteramente equivocadas, Aristóteles poseía más bien una curiosidad pasiva no acompañada de un propósito definido de experimentación. A pesar de todo, Aristóteles fue indudablemente uno de los más grandes científicos, si no el mayor, en el periodo científico de Grecia.

Otro griego de importancia fue *Euclides* (-450? a -374). Aunque hizo contribuciones a la óptica geométrica, su fama es mucho mayor en el campo de la matemática que en el de la física.

Finalmente, en el periodo griego nos encontramos con *Arquímedes* (-287? a -212) de la escuela de Alejandría. Por sus aplicaciones a la práctica, Arquímedes es tal vez el mejor conocido de todos los físicos griegos. Ahora se le llamaría ingeniero o ingeniero físico, en virtud de las muchas aplicaciones que hizo de los principios físicos a propósitos tanto de paz como de guerra. También se le podría llamar el fundador de la física matemática debido a su capacidad para aplicar la matemática a los problemas físicos. Solamente su trabajo en hidrostática lo convierte en uno de los más famosos de los científicos antiguos, pero también hizo notables contribuciones a la óptica, a la mecánica, a la hidráulica y a otros campos de la física. Al contrario de Aristóteles se interesaba en asuntos prácticos o, como se diría ahora, mantenía sus pies en el suelo.

En resumen el periodo griego en conjunto estuvo caracterizado por un razonamiento deductivo más bien que inductivo, siendo la observación en su mayor parte más bien superficial que crítica, con más curiosidad pasiva que experimentación

activa y más especulaciones de escritorio que hallazgos de hechos. No es sorprendente de que así haya sucedido, pues hay que recordar que en física la experimentación es un proceso manual y que el estado social de los ciudadanos griegos nacidos libres, prohibían el trabajo manual, que sólo llevaban a cabo los esclavos. Mientras que el impacto de la ciencia sobre la sociedad por lo general se reconoce, no se presenta aquí un impacto definido de la sociedad en la ciencia, pero es indudablemente cierto que si la actividad manual no hubiera sido despreciada en este periodo, los griegos hubieran realizado mucho más avance científico. En cambio, la física avanzó sólo un poco durante un periodo de varios siglos, comparada con los enormes adelantos que se han realizado en la actualidad en relativamente unos pocos años.

LA ULTIMA PARTE DEL PRIMER PERIODO. Aunque el primer periodo continuó hasta alrededor del año 1500, prácticamente ningún avance en física se hizo entre el año -50 y el de 1550. Este periodo abarca el ascenso y la caída del Imperio Romano, coincidiendo con la declinación de la cultura griega y con la invasión del antiguo mundo occidental por los bárbaros. Los romanos gradualmente absorbieron la cultura griega, pero por el año 600 toda Europa había sido despojada de la oportunidad de valerse por sí misma de ella, pues los romanos carecían de inclinación científica. Prácticamente todos los manuscritos griegos quedaron entre los árabes, quienes los preservaron para la posteridad, aunque ellos mismos agregaron muy poco; sin embargo, introdujeron el llamado sistema de números arábigos. *Alhazen* (965?-1039?) produjo un trabajo en óptica, pero, generalmente hablando, la ciencia griega no mejoró apreciablemente por su traducción al árabe; los árabes se basaban también en la autoridad de Aristóteles.

Entre el año 700 y el 1100 se hizo un intento para el restablecimiento del saber en Europa, pues grandes universidades se desarrollaron bajo el amparo de la iglesia. Al desarrollarse el comercio, tanto los manuscritos griegos como los árabes empezaron a ser conocidos en Europa; las cruzadas ayudaron a este proceso. Como la Iglesia sobrevivió al estado romano y se había vuelto todopoderosa, fue natural que el restablecimiento de la instrucción, y de la ciencia en particular, estuvieran colocadas bajo su influencia. Muchos de los manuscritos científicos fueron traducidos del griego y del latín por los monjes

de los monasterios, donde los mercaderes y los caballeros llevaban tesoros de oriente—incluyendo los escritos de Aristóteles— y donde a menudo buscaban resguardo de los ataques de bandas errantes, de piratas y forajidos. Estos eruditos aparentemente quedaron satisfechos con hacer unas traducciones exactas por lo que la ciencia que ellos transmitieron al mundo a través de la Iglesia fue la versión original aristotélica inalterada por cualquier experimentación que hubiesen llevado a cabo. De este modo, la autoridad de Aristóteles fue cuidadosamente preservada. En este periodo los eruditos se adhirieron a los números griegos y romanos, dejando los números arábigos al comercio. Esta fue otra razón que produjo un estancamiento de unos 1 500 años, durante los cuales prácticamente no se hizo ningún avance con relación a la ciencia griega.

Alrededor del año de 1500, la ciencia había justamente regresado al estado que tenía hacia unos 1 500 años. No obstante, la Iglesia había restablecido la ciencia en grandes universidades, pero se encontraban bajo su control. Es fácil ver que la dominación de la Iglesia era para su propia satisfacción. Las doctrinas de Aristóteles llegaron a tener el brazo de la ley detrás de ellas. En aquel tiempo no podía descubrirse la verdad sino que era dictada por la Iglesia y era un crimen de primer orden aun dudar de los puntos de vista de Aristóteles apadrinados por la Iglesia, que nada sugerían respecto a que la experimentación es el mejor camino para establecer la verdad. Naturalmente, la ciencia degeneró bajo este sistema en el que las doctrinas eclesiásticas estaban tan entrelazadas con los hechos científicos que éstos no podían ser separados de los dictados religiosos. El tiempo todavía no estaba maduro para la nueva era, la cual amaneció por 1550.

#### Segundo periodo. El nuevo despertar de la física (1500-1700).

Al transcurrir el tiempo y desarrollarse el comercio aumentó la abundancia, lo que llevó al desarrollo, apoyado por opulentos mercaderes, de universidades para el estudio e investigación fuera del ámbito de la Iglesia. Este movimiento nutrió un desarrollo creciente en relación a la autoridad en la ciencia. Por 1550 aparecieron escépticos de Aristóteles, con pruebas experimentales de sus puntos de vista, es decir, los escépticos empezaron a expresarse con toda libertad, pues probablemente siempre los había habido, pero fueron suprimidos con éxito. Dos siglos antes, Roger Bacon (1214? a 1294) enseñó que las

creencias deben estar basadas en la observación y en la experimentación más que en la autoridad, pero estas ideas hicieron que prácticamente pasara la última tercera parte de su vida en prisión. Roger Bacon fue un hombre que vivió al menos dos siglos adelante de su época.

En Italia se encontraba Leonardo da Vinci (1452-1519), pero a pesar de los grandes conocimientos de este hombre en casi todos los campos de las artes y de las ciencias, su influencia fue prácticamente nula; sus manuscritos han llegado a ser apreciados hasta ahora; actualmente se ha comprendido que fue uno de los más grandes científicos de todos los tiempos.

El periodo del nuevo amanecer realmente comienza con Copérnico (1473-1543), Galileo (1564-1642), Tycho Brahe (1546-1601), Kepler (1571-1630) y Gilbert (1540-1603), que facilitaron el camino al gran Isaac Newton (1642-1727). Copérnico desarrolló la teoría heliocéntrica del Universo; Galileo, Tycho Brahe y Kepler establecieron las ideas fundamentales de la mecánica celeste moderna, basada primero en la observación antes de teorizar, revolucionando así el pensamiento científico. Galileo, en particular, extendió la idea de la experimentación controlada a tal grado, que ahora se le reconoce como el padre del moderno método científico, basado más bien en el aprendizaje inductivo que en el deductivo, aunque él, así como otros, pagó el precio de propagar ideas revolucionarias, permaneciendo en prisión varios periodos de su vida.

Galileo llevó la observación a la etapa cuantitativa, al hacer medidas aproximadas; insistió en el "cómo" ( y aun en el "cuánto") como contraste con el "por qué" de Aristóteles. Por sus observaciones cuantitativas de los cuerpos cayendo y de otros movimientos mecánicos—ayudado por instrumentos de su propia invención para mejorar la aproximación de sus medidas—, estableció los fundamentos para los descubrimientos de Newton, quien nació el mismo año en que aquél murió. El trabajo de Galileo no estuvo limitado a la mecánica, pues sus contribuciones en otros campos, incluyendo la óptica, fueron numerosos.

Sir Isaac Newton es considerado por muchos como el más grande genio científico que el mundo ha producido, habiendo resumido el conocimiento científico de su época en unos pocos enunciados fundamentales aceptados actualmente como leyes de la naturaleza, que incluyen las tres famosas leyes del movi-

mético y la ley de gravitación, sólo en el campo de la mecánica. Además, inventó el cálculo e hizo contribuciones importantes en el campo de la óptica. Su papel fue fundamentalmente el de un coordinador de información o un sistematizador del conocimiento, habiendo formulado la pauta que sirvió para organizar el conocimiento científico en el gran periodo clásico que siguió a su época y que no se ha vuelto anticuado, aunque actualmente ha sido suplementado (no reemplazado) por nuevas —y a veces contradictorias— ideas en el dominio de la física atómica. Por el año de 1690 gran parte de la mecánica conocida entraba en el arreglo newtoniano.

Los contemporáneos de Newton fueron *Huygens* (1629-1695), que propuso la teoría ondulatoria de la luz en oposición a la de Newton; *Boyle* (1627-1691), bien conocido por la ley de los gases; *Hooke* (1635-1703), cuyos trabajos en elasticidad son famosos; *Pascal* (1623-1662) se recuerda por su ley de la presión en los fluidos.

Así, el segundo gran periodo de la física termina por el año de 1700 cuando las ideas de Galileo, Bacon y otros, habían destacado las insuficiencias y las conclusiones erróneas de Aristóteles. Además, los hombres de ciencia estaban cansados por las intervenciones de la Iglesia para obligarlos a apoyar la doctrina religiosa, preparando y abriendo así una grande y nueva era. Fue ciertamente un periodo de nuevo amanecer, que facilitó el camino para los físicos de los siglos xviii y xix en cuyo tiempo nuevos descubrimientos, hechos en rápida sucesión, parecieron confirmar la amplia estructura de la ciencia legada por Newton.

**Tercer periodo. Siglos xviii y xix: periodo clásico o newtoniano (1700-1890).** No es fácil en este panorama histórico enumerar todas las realizaciones de los siglos xviii y xix. La Física verdaderamente acumuló ímpetu en esa época, volviéndose muy complicada y creció lo suficiente para que sus subdivisiones se volvieron significativas. Se hicieron avances en los campos de la mecánica, el calor, la luz y la electricidad, como si cada rama fuera más o menos independiente, pero el trabajo de Newton proveyó el método de integrar todos estos conocimientos. En cierto modo, este periodo puede describirse como aquel donde los puntos de vista fundamentales de Newton fueron gradualmente apreciados y establecidos. Una gran abundancia de material cuantitativo estuvo acumulándose, pero todo este

materia parecía entrar en el marco newtoniano. Ciertamente el éxito de la física newtoniana fue tan grande, que al final de este periodo casi parecía que el final de los conocimientos físicos estaba a la vista. Casi todo parecía establecido; de aquí la designación de "periodo clásico".

Más bien que intentar el desarrollar este periodo en un orden cronológico, como en el caso de los dos periodos precedentes, consideraremos separadamente las diferentes ramas de la física y apenas haremos algo más que una lista de nombres destacados, fechas y eventos en este periodo. Como ya se hizo notar, hacemos esto con la esperanza de que el estudiante no científico pueda asociar los nombres, las fechas y los eventos científicos con los correspondientes nombres, fechas y eventos de significado social o cultural. Desde luego, muchas de las palabras empleadas y del vocabulario técnico se explicará posteriormente en el lugar apropiado (que es lo que realmente se hace en este texto).

Empezando con la mecánica, haremos notar el trabajo de *Bernoulli* (1700-1782) en hidrodinámica y teoría de los gases; *D'Alembert* (1717-1783), *Euler* (1707-1783), *Lagrange* (1736-1813) y *Laplace* (1749-1827) en mecánica teórica.

En el campo del calor, el periodo de 1600 a 1800 vio el desarrollo de los termómetros y de las escalas de temperatura por Galileo, *Fahrenheit* (1686-1736) y otros. Además se introdujeron los conceptos de calor latente y de calor específico por *Black* (1728-1799) y se desarrolló la máquina de vapor por *Watt* (1736-1819). En el siglo xix el concepto de calor se ajustó en la representación newtoniana por medio de los trabajos de *Rumford* (1753-1814), *Joule* (1818-1889) y *Rowland* (1848-1901). Estos hombres establecieron el punto de vista de que el calor es solamente una forma de energía. *Carnot* (1796-1832), *Mayer* (1814-1878), *Helmholtz* (1821-1894), *Kelvin* (1824-1907), *Clausius* (1822-1888) y otros establecieron las leyes fundamentales de la termodinámica, en donde el concepto básico de energía sirvió para unificar los conceptos del calor con los de la mecánica. Finalmente haremos notar el trabajo de *Gibbs* (1839-1903) en termodinámica química y posteriormente en mecánica estadística, que están íntimamente relacionadas con el tema del calor.

También en el campo de la luz se hicieron muchos adelantos en estos dos siglos y, de nuevo, la influencia unificadora

de los métodos newtonianos fue muy aparente. Galileo intentó medir la velocidad de la luz, llegando a la conclusión de que era demasiado grande para permitirle una determinación precisa. *Roemer* (1644-1710) y *Bradley* (1693-1762) tuvieron éxito, llegando a valores no muy diferentes al aceptado actualmente, unos 300 000 kilómetros por segundo. *Foucault* (1819-1868) y *Fizeau* (1819-1896) precisaron las medidas por 1850, pero el resultado final fue encontrado por *Michelson* (1852-1931).

Los postulados ondulatorios de Huygens fueron revividos por el trabajo de *Young* (1773-1829) y *Fresnel* (1788-1827). *Malus* (1775-1812) descubrió el fenómeno de la polarización de la luz por reflexión, cuyo trabajo fue complementado por *Brewster* (1781-1868). *Fraunhofer* (1787-1826), *Kirchhoff* (1824-1887) y *Bunsen* (1811-1899) pusieron la base de la espectroscopia moderna.

La coronación de este periodo en el campo de la luz fue la solución a la vieja cuestión de la naturaleza de la luz —corpuscular u ondulatoria— encontrada por el gran *Maxwell* (1831-1879), cuya teoría electromagnética de la luz satisfizo a todas las partes en controversia. En realidad, Maxwell es considerado por muchos como el físico teórico más grande del siglo XIX como resultado de su extraordinaria unificación de los campos de la luz y de la electricidad.

El último tema que debemos considerar en este periodo de la física es el de la electricidad, o más bien, de la electricidad y el magnetismo, pues se encontró en este periodo que estos dos campos son realmente uno. Probablemente se dio más atención a la electricidad que a cualquier otra rama de la física durante el siglo XVIII. *Gray* (1670-1736), *Du Fay* (1698-1739), *Franklin* (1706-1790), *Cavendish* (1731-1810) y *Columb* (1736-1806) llevaron a cabo significativos trabajos en electrostática, *Galvani* (1737-1798) y *Volta* (1745-1827) fueron los descubridores de la corriente eléctrica. En la última parte de este periodo los más destacados físicos en el campo de la electricidad fueron *Faraday* (1791-1867), *Oersted* (1777-1851), *Ohm* (1789-1854), *Henry* (1797-1878) y *Maxwell* (1831-1879), aunque ellos tuvieron muchos contemporáneos, incluyendo a *Ampère* (1775-1836), *Wheatstone* (1802-1875), *Lenz* (1804-1865), *Kelvin* (1824-1907), *Kirchhoff* (1824-1887) y *Hertz* (1857-1894). Faraday fue el más destacado

físico experimental de su época y Maxwell, como ya se dijo, fue probablemente el más notable físico teórico de este periodo. En el campo de la física, como en casi todo lo demás, este lapso terminó en medio de un gran sentimiento de satisfacción porque la física se encontraba por fin bien organizada e integrada. Los físicos teóricos, especialmente Maxwell, realizaron notables generalizaciones por medio de los métodos de Newton y con el muy satisfactorio concepto de energía. Este fue verdaderamente el periodo clásico de la física. Tan completo parecía el cuadro y tan satisfechos estaban los físicos de sus realizaciones, que, por 1890, se tenía la creencia —aunque es difícil determinar su origen preciso— de que la física como ciencia estaba casi concluida y que probablemente ya no se harían más descubrimientos fundamentales y de que las futuras generaciones de físicos deberían contentarse con sólo extender la precisión de las informaciones conocidas, tal vez al siguiente decenio. Pero esto no sucedió en la historia de la física moderna cuyo periodo se inició justamente por 1890, cuando los físicos fueron sacudidos en forma abrupta de su letargo por varios notables descubrimientos: el electrón, los rayos X y la radiactividad.

**El cuarto periodo: física moderna (desde 1890 a la fecha).** Las grandes generalizaciones y correlaciones encontradas en física teórica y los refinamientos de las mediciones en física experimental durante el siglo XIX, especialmente en su última parte, colocaron a la ciencia en una posición estratégica con respecto a la actividad tecnológica e industrial que entonces comenzaba. La economía mundial estaba destinada a recibir su impacto, pues aun ahora la industria no ha llegado a agotar las aplicaciones de la física clásica, aun teniendo en cuenta de que la física moderna ocupa un lugar muy importante en la escena tecnológica. Por supuesto, nos referimos a la electrónica, la televisión, la energía atómica, etc., todas ellas descubiertas antes de 1890.

La física clásica o física newtoniana es, sin embargo, la que constituye la parte principal de los programas de física en los colegios actuales especialmente en aquellos donde los estudiantes llevan una carrera en alguna de las ramas de la ingeniería. Esto se debe a que la llamada física nueva, desarrollada en el cuarto periodo no puede comprenderse sin un conocimiento profundo de la física clásica. Por consiguiente, este texto es,

por necesidad, principalmente clásico, pero sin excluir los conceptos atómicos y nucleares.

Aunque las realizaciones del siglo XIX fueron destacadas, no debe creerse que se había llegado a la perfección: existían algunas brechas aquí y allá y también ciertas incongruencias. Por ejemplo, la teoría electromagnética de la luz era magnífica, pero para que existieran ondas electromagnéticas era necesario postular la presencia de un medio, el éter luminífero. Desgraciadamente nadie pudo encontrar una evidencia tangible de la existencia de este medio. El estudio de la radiación del calor tampoco estaba bien fundamentado. Por otra parte, descubrimientos recientes en electricidad —como el efecto fotoeléctrico donde por la acción de la luz se produce una corriente eléctrica— eran incompatibles con la teoría de la luz de Maxwell. Sin embargo, todas estas dificultades se consideraban como de poca importancia comparadas con el éxito general de la física newtoniana. Se creía que más pronto o más tarde todo se arreglaría y que la física era semejante a un rompecabezas completo, excepto por unas pocas piezas.

En realidad, las dificultades se volvieron enormes cuando los físicos concentraron su atención en ellas, viéndose finalmente obligados a tomar puntos de vista completamente nuevos, como los utilizados en la teoría cuántica y en la relatividad; pero esto no sucedió hasta que una serie de descubrimientos se realizaron: el aislamiento del electrón, el descubrimiento de la radiactividad y de los rayos X y la formulación del concepto de la estructura eléctrica de la materia, que fueron todos explicados por los nuevos puntos de vista.

Crookes (1832-1919) descubrió los rayos catódicos en 1878 y J. J. Thomson (1856-1940) explicó su naturaleza, formada por partículas cargadas-eléctricamente con signo negativo, llamadas electrones. Como esto aconteció entre 1890 y 1897, estas fechas se toman como el principio de la era electrónica, aunque Stoney (1826-1911) sugirió el nombre "electrón", tan temprano como 1874; Lorentz (1853-1928) en 1895 formuló una teoría electrónica de la materia, que postulaba que los electrones en vibración originaban las radiaciones electromagnéticas predichas por Maxwell y descubiertas en 1888 por Hertz (1857-1894).

También en 1895, Roentgen (1845-1923) descubrió los rayos X y en 1896 Becquerel (1852-1908) descubrió la radiac-

tividad. Estos descubrimientos fueron seguidos en 1898 por el aislamiento del polonio y del radio por P. Curie (1859-1906) y M. Curie (1867-1934).

El año de 1900 se señala por la introducción de la teoría cuántica por Planck (1858-1947), seguida por la teoría de la relatividad en 1905 por Einstein (1879-1955). Estas dos teorías fueron la base para muchos adelantos, porque dieron nuevos puntos de vista para explicar los fenómenos naturales.

Estas teorías conmovieron en sus cimientos a la filosofía de la física y dieron la llave para la solución de varios problemas propuestos en el período precedente. La teoría cuántica explicó la radiación del calor y el efecto fotoeléctrico casi inmediatamente. La teoría de la relatividad fue más allá que la mecánica newtoniana en la explicación de ciertos fenómenos asociados con la materia —tales como electrones, átomos y moléculas—, moviéndose a muy grandes velocidades; también dio una explicación de la falla del experimento de Michelson-Morely (1887) para determinar la velocidad con que se mueve la Tierra con relación al éter luminífero. Aunque estas teorías fueron recibidas por los físicos con muy poco interés, gradualmente se establecieron a pesar de alterar tanto su modo de pensar, que sólo un par de generaciones atrás confesaban su imposibilidad para reconciliar algunos de sus postulados con la física clásica o aun con el sentido común. En realidad, gran parte de las nuevas teorías físicas sólo pueden expresarse matemáticamente, pero la mayoría de los físicos actuales consideran razonables los resultados de la teoría cuántica y de la teoría de la relatividad.

Por 1911 se prestó mucho interés al campo de la física conocido como física atómica. Rutherford (1871-1937), con la ayuda de muchos colaboradores trabajando durante varios años, estableció finalmente el concepto del átomo nuclear. Bohr (1885-1962) ideó un modelo del átomo en 1913 semejante al sistema solar, y a sus planetas. Este átomo planetario, consistiendo en un núcleo cargado positivamente, rodeado de electrones con carga negativa, es bastante conocido. Aunque en la actualidad esta representación se ha reemplazado más o menos por otra matemática, en la mente de los físicos teóricos muchos de los lineamientos del átomo de Bohr aún son útiles, especialmente en las explicaciones elementales de los fenómenos atómicos.

Para el no iniciado esta última frase puede parecer extraña, preguntándose quizá cómo puede aceptarse una representación si no es correcta. Este es un ejemplo del moderno punto de vista de la física y de su relación con el sentido común. La física cuántica y la relativista han preparado a la mente de los físicos para apreciar cuan compleja es en realidad la naturaleza y cuan lejos del sentido común se encuentra el mundo de los átomos y de los electrones. Recordaremos que las explicaciones son sólo relativas a los conocimientos del estudiante; así lo que para un estudiante elemental es una explicación perfectamente satisfactoria, no es apropiada para el estudiante adelantado; o dicho de otro modo: hay muchas maneras de explicar cualquier cosa. No se trata de saber cuál es la correcta, sino más bien cuál es la mejor para el propósito deseado, es decir, será la mejor explicación cuando necesite un mínimo de suposiciones. Así quizá se aclare por qué la nueva física ha confundido a las viejas generaciones.

Muchos nombres deben ser mencionados en relación con la física atómica, pero en este breve sumario sólo unos pocos parecen adecuados. W. H. Bragg (1862-1942), Aston (1877-1945), C. T. R. Wilson (1869-1959), y Millikan (1868-1953) fueron físicos que adquirieron fama antes de 1920. Por supuesto, no haremos distinción entre la física atómica y la electrónica; además esta lista dis a mucho de estar completa.

Durante la década de 1920 se hicieron grandes adelantos en la electrónica, en espectroscopía y en física nuclear, aunque en todos los campos la investigación aumentó extraordinariamente después de la Primera Guerra Mundial. A. H. Compton (1892-1962) prácticamente quitó las últimas dudas sobre la teoría cuántica en 1923 con sus experimentos con rayos X. De Broglie (1892- ) introdujo el concepto de mecánica ondulatoria en 1924; Heisenberg (1901- ), Dirac (1902- ) y Schrödinger (1887-1961) desarrollaron este campo entre 1921 y 1926. Davison (1881-1958), en los Estados Unidos, y G. P. Thomson (1892- ), en Inglaterra, encontraron la evidencia experimental de la naturaleza ondulatoria del electrón en 1927 y 1928.

En 1932, Chadwick (1891- ) descubrió el neutrón, una partícula fundamental que no tiene carga eléctrica, y Anderson (1905- ) descubrió el electrón positivo llamado positrón. Lawrence (1901-1958) inventó el ciclotrón en ese mismo

año. Joliot (1900- ) y su esposa Irene Curie-Joliot (1897-1956) descubrieron en 1934 la radiactividad artificial. Fermi (1901-1954) y otros produjeron la radiactividad artificial por captura de neutrones. Hahn (1879- ) en 1938 descubrió la fisión del uranio, la cual fue el fundamento de la bomba atómica de 1945.

Actualmente la investigación no se lleva a cabo por físicos aislados; ésta es la edad de la investigación en equipos y en muchos de los descubrimientos anotados anteriormente sólo los que encabezan la investigación han sido mencionados; seguramente centenares de otras personas han contribuido sin que nunca hayan recibido reconocimiento por su trabajo.

De esta manera hemos mencionado algunos de los más importantes descubrimientos de la física. Como ya se dijo, la lista de nombres y fechas está lejos de ser completa; además no es posible que el estudiante pueda apreciar por completo lo que hemos dicho en esta etapa de su estudio; sin embargo, se ha incluido para mantener la continuidad de nuestra exposición.

Esperamos que el lector retroceda a este capítulo de tiempo en tiempo, conforme encuentre, en los capítulos siguientes el desarrollo de los conceptos descritos.

En este capítulo se ha tratado de comprender los avances de la física desde casi en la época prehistórica hasta la actualidad; resulta evidente que estos adelantos se han llevado a cabo de modo acelerado, excepto en el periodo oscuro entre los años -50 y 1500. Actualmente la física progresa con tal rapidez que sólo podemos conjeturar: ¿Qué podrá descubrirse en el futuro y qué consecuencias tendrán esos descubrimientos en nuestra vida? Ciertamente, la bomba atómica ha indicado cuan íntimamente los acontecimientos históricos están relacionados con el desarrollo de la física en el laboratorio. Debemos esperar que el hombre aprenda a entender a sus semejantes con la misma rapidez con que descubre los secretos de la naturaleza, pues de lo contrario puede perder el control y aniquilarse a sí mismo.

En cierto modo este capítulo ha sido un resumen de la física, desarrollado cronológica más bien que lógicamente. En los siguientes capítulos trataremos con ese mismo material, pero desarrollado con más amplitud y en un orden diferente.

## PREGUNTAS

1. ¿Cómo puede el periodo griego de física, ser brevemente caracterizado?
2. ¿Por qué los puntos de vista de Aristóteles fueron aceptados tan posteriormente como el siglo XVI?
3. ¿Qué quiere decirse con el enunciado de que los árabes mantuvieron a la ciencia griega en "refrigeración"?
4. ¿Por qué se considera a Galileo como el padre de la ciencia moderna?
5. A menudo el periodo clásico de la física se dice que es periodo newtoniano. ¿Por qué?
6. Diga cuáles son las partes importantes que caracterizan a la física moderna.
7. Haga una lista de varios puntos de contacto entre la ciencia y la sociedad.

## Capítulo 3

## CONSIDERACIONES MECANICAS

FUERZA Y MOVIMIENTO  
NATURALEZA VECTORIAL DE LA FUERZA;  
EQUILIBRIO; LEYES DEL MOVIMIENTO; IMPETU

Regresaremos ahora al propósito primordial de este libro, esto es, al desarrollo lógico de los diversos conceptos de la física. En este capítulo discutiremos los conceptos muy importantes de fuerza y de movimiento, porque éstos constituyen un punto de partida lógico, ya que todos los demás están relacionados con ellos. Estos dos conceptos se considerarán simultáneamente, pues ninguno de ellos tiene, aislado, un significado físico, debido a que la fuerza se interpreta como un *empuje* o *tirón*, que tiende a *cambiar* el *movimiento* de un cuerpo. El movimiento en sentido abstracto no es un concepto físico; solamente el movimiento de un cuerpo material es lo que cuenta, lo mismo que la fuerza necesaria para producir cambio en dicho movimiento.

Aunque el movimiento en sentido abstracto no es un concepto físico, una breve consideración de él, con el título de *cinemática*, es conveniente con objeto de desarrollar el vocabulario empleado en un estudio posterior de la materia en movimiento, rama de la física llamada *dinámica*.

Al mismo tiempo se tiene la oportunidad para desarrollar la apreciación de un aspecto muy importante de muchas magnitudes físicas, a saber, el aspecto direccional. La dirección en física es a menudo tan importante como el valor de la magnitud, y ese concepto tiende a disminuir el aspecto puramente

numérico del estudio, puesto que la dirección es un concepto más bien geométrico que aritmético.

**Naturaleza vectorial de las fuerzas.** La acción de una fuerza sobre un cuerpo es una experiencia familiar; todos nos damos cuenta de la diferencia entre una fuerza grande y una pequeña, pero el hecho de que la fuerza tiene dirección no siempre se aprecia. Así, por ejemplo, una fuerza de muchos newtons empujando hacia el norte a un cierto cuerpo, no produce sobre él ningún efecto en dirección oriente (Fig. 3.1). La fuerza afecta al movimiento del cuerpo solamente hacia el norte. Además, este efecto puede ser completamente anulado por una fuerza del mismo valor apuntando hacia el sur, es decir, en sentido opuesto (Fig. 3.2). Este ejemplo sirve para

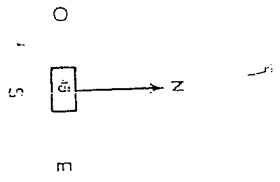


Fig. 3.1. No hay efecto en dirección este-oeste

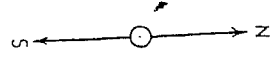


Fig. 3.2. No hay efecto neto

ilustrar el hecho muy importante de que cuando dos fuerzas de igual valor, o magnitud, actúan simultáneamente sobre un cuerpo, esto es, se suman, el resultado no es necesariamente una fuerza de doble valor, sino que puede llegar incluso a valer cero, dependiendo de las direcciones consideradas. El resultado es una fuerza doble sólo cuando las dos fuerzas apuntan en el mismo sentido (Fig. 3.3). Cuando la dirección de dos fuerzas de igual magnitud hacen entre sí un ángulo de 120° (un ángulo de 120° es la tercera parte de toda la circunferencia) puede



Fig. 3.3. Efecto duplicado

demonstrarse, tanto por cálculo como por experimento, que la fuerza resultante —es decir, la fuerza que debe producir el mismo efecto que las otras dos combinadas— tiene la misma

magnitud que cada una de ellas, aunque, por supuesto, con diferente dirección (véase la Fig. 3.4). Otro caso especial es aquel en donde las dos fuerzas hacen entre sí un ángulo de 90°, es decir, un ángulo recto. En este caso, la fuerza resultante es como un 50% mayor que las fuerzas componentes, teniendo una dirección intermedia entre las dos (véase la Fig. 3.5).

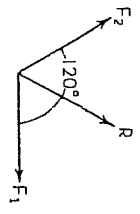


Fig. 3.4. R tiene la misma magnitud que  $F_1$  o que  $F_2$

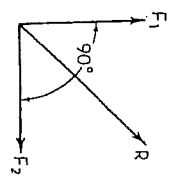


Fig. 3.5. La magnitud de R es, aproximadamente, 1,4 veces la de  $F_1$  o la de  $F_2$

**Composición y resolución de fuerzas.** Seguramente el lector estará interesado en saber cómo se han obtenido estos resultados. Por supuesto, estos resultados son ciertos como puede comprobarse experimentalmente; pero también pueden determinarse sin acudir a un experimento (excepto para comprobar el resultado) lo que es muy importante. La manera más sencilla de determinar la resultante consiste en representar cada fuerza gráficamente por medio de una flecha dibujada a escala, de modo que su largo indique el valor de la fuerza, cuya posición sea la de la dirección que tenga y apunte en el sentido prescrito. Si ahora se hace una figura con el origen de la segunda flecha en el extremo de la primera, también con la dirección y sentido apropiados, la flecha dibujada desde el origen de la primera al extremo de la segunda, indicará con su longitud y dirección (empleando la misma escala) la magnitud y direc-

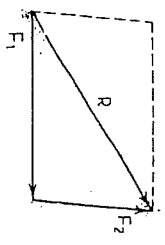


Fig. 3.6. Adición vectorial

ción de la resultante (Fig. 3.6); dicha resultante es, evidentemente, la diagonal de un paralelogramo que tiene como lados el par de las flechas; estas flechas se llaman **vectores**. La fuerza



es una magnitud vectorial, lo que significa que requiere la especificación de una dirección, así como de una magnitud, para su determinación completa. Las magnitudes vectoriales, de las cuales hay muchas en física, pueden ser sumadas (o compuestas) por un método gráfico, tal como el descrito que, desde luego, no se limita sólo a dos vectores. Además, existen reglas de la física matemática para restar, multiplicar, etc., a los vectores, pero estas reglas no necesitamos considerarlas aquí.

Por consiguiente, las fuerzas pueden ser combinadas o sumadas, para producir fuerzas resultantes; entonces podríamos preguntarnos si una fuerza cualquiera podría considerarse como una resultante de varias fuerzas componentes, es decir, ¿no podría una fuerza tener ciertas componentes en las cuales conviniere descomponerse? La respuesta es afirmativa y muy importante en la práctica. Por ejemplo, una fuerza  $F$ , apuntando hacia el nordeste (véase la Fig. 3.7), puede considerarse que es la resultante de una fuerza  $F_N$  apuntando hacia el norte, com-

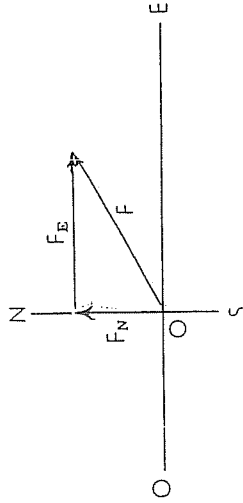
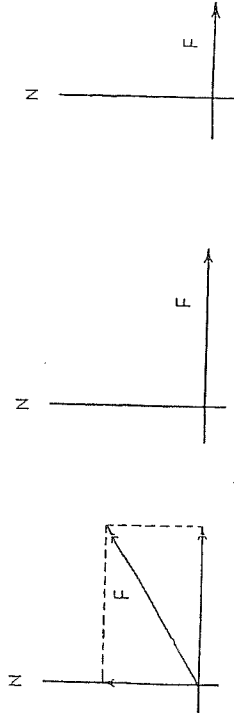


FIG. 3.7.  $F$  puede ser considerada como la resultante de las fuerzas  $F_N$  y  $F_E$

binada con una fuerza  $F_E$ , apuntando hacia el oriente, y teniendo una magnitud encontrada de acuerdo con el procedimiento gráfico que se ha indicado. De este modo una fuerza puede ser descompuesta en cualquier número de componentes. La componente proyectada de una fuerza en su misma dirección es la misma fuerza, mientras que la componente proyectada de una fuerza en ángulo recto a sí misma, vale cero (véase la Fig. 3.8).

Debe tomarse en cuenta que a menudo no conviene, o no es posible, ejercer una fuerza en una dirección tal, que sea completamente aprovechada; por ejemplo, es probablemente preferible remolcar un lanchón a lo largo de un canal por medio



$F$  tiene componentes hacia el norte y hacia el oriente

La componente de  $F$  hacia el oriente es la misma  $F$

La componente de  $F$  en dirección norte vale cero

FIG. 3.8

de una cuerda oblicua con respecto a la orilla, que remolcarla directamente con otro lanchón (Fig. 3.9). También es seguramente más conveniente para una persona de gran estatura, jalar un trineo por medio de una cuerda que hace un ángulo apreciable con el piso, aunque el aprovechamiento concreto de la fuerza se lleve a cabo sólo si se jalara horizontalmente. En

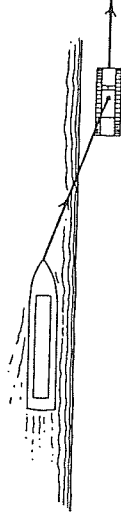


FIG. 3.9. Remolcando un lanchón por medio de una fuerza que hace un ángulo con la dirección en la que se mueve el lanchón

estos casos sólo se aprovecha una de las componentes de la fuerza. Por otra parte, en el caso de un velero es posible hacerlo navegar casi directamente contra el viento, porque la vela puede colocarse en un ángulo tal que la fuerza del viento perpendicular a ella tenga una componente en la dirección del movimiento del barco; el resto de la fuerza del viento se disipa indirectamente por medio de la quilla de la nave (Fig. 3.10).

En estos casos sencillos hemos desarrollado el punto de vista de que no es necesario utilizar todo el valor de una fuerza. Para que no se tenga la falsa impresión de que las componentes de una fuerza son siempre pequeñas al comparlas con las resultantes, consideraremos otros casos. Cuando el ángulo  $\theta$  entre dos fuerzas de igual magnitud, que actúan en un punto, es mayor que  $120^\circ$ , la magnitud de la fuerza resultante es menor

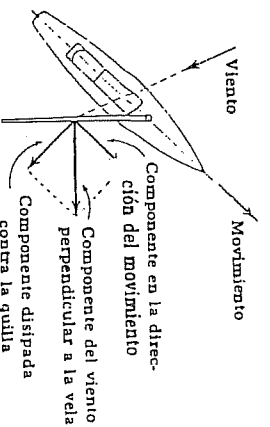


Fig. 3.10. Navegando contra el viento. El movimiento se debe a la pequeña componente de la fuerza sobre la vela, paralela al movimiento; esta fuerza es una componente pequeña de la fuerza del viento. Cuando el viento sopla oblicuamente sobre una vela, la vela sólo recibe la componente perpendicular a ella, es decir, el viento puede empujar una vela sólo perpendicularmente.

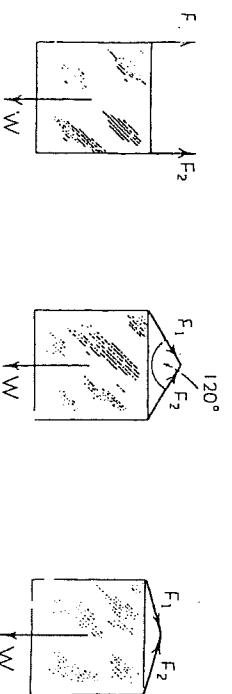
que cualquiera de las dos fuerzas componentes (Fig. 3.11). Nótese que  $F_1$  sumada a  $F_2$  produce la resultante  $R$ , pero que también la resultante  $R$  es la diagonal de un paralelogramo cuyos lados son  $F_1$  y  $F_2$ , los que hacen entre sí el ángulo  $\theta$ . Conforme este ángulo crece, la resultante decrece en magnitud; en el límite, cuando las dos fuerzas actúan en la misma dirección, pero con sentido opuesto (haciendo un ángulo entre sí de  $180^\circ$ ), como en el ejemplo considerado anteriormente en éste capítulo, la resultante vale cero.



Fig. 3.11. En este caso  $R$  es más pequeña que las componentes  $F_1$  o  $F_2$ .

Cuando el ángulo entre dos fuerzas es casi  $180^\circ$ , una pequeña fuerza actuando como resultante, tiene componentes de mucho mayor magnitud que la fuerza misma.

Esto se puede probar fácilmente por medio de un experimento. Si un paquete pesado de forma cúbica se levanta por medio de una cuerda enrollada a su alrededor, la cuerda quizá se reviente si se enrolló en forma apretada. Por otra parte, si la cuerda está floja de manera que haga un pequeño ángulo en el punto donde la cuerda se levanta, ésta no se reventará fácilmente. Cuando la cuerda hace un ángulo de casi  $180^\circ$  en el punto donde es sujeta para levantarla como en el caso de la



$F_1$  y  $F_2$  tiene cada una la mitad del valor del peso de la caja

$F_1$  y  $F_2$  son iguales entre sí teniendo la misma magnitud que el peso de la caja

$F_1$  y  $F_2$  son mayores que el peso de la caja

Fig. 3.12

cuerda enrollada en forma apretada, la componente de la fuerza a lo largo de la cuerda se vuelve muy grande (Fig. 3.12). Por esa misma razón ninguna fuerza es lo bastante grande para que la cuerda de donde pende una red de tenis, quede completamente horizontal (véase la Fig. 3.13).

**Equilibrio de fuerzas. Primera condición de equilibrio.** El caso de la fuerza resultante cero, cuando su componente que apunta hacia el norte tiene la misma magnitud que la que apunta hacia el sur, aclara otra dificultad que generalmente encuentra el principiante. Es a veces difícil comprender (si aceptamos la definición de que una fuerza es un empuje o una tracción que tiende a cambiar el movimiento de un cuerpo)

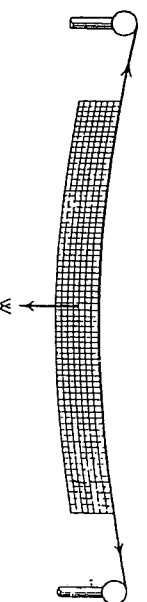


Fig. 3.13. La tensión en una red de tenis se aproxima al infinito conforme la cuerda se aproxima a la horizontal

que un cuerpo puede estar en reposo encima de una mesa, es decir que no esté sometido a fuerzas, cuando sabemos que la fuerza de la gravedad siempre actúa. La solución es, por supuesto, que la mesa también actúa sobre el cuerpo, y que la resultante de la fuerza actuando hacia arriba, combinada con el peso del cuerpo actuando hacia abajo, es igual a cero, por

lo que la tendencia *net*a que tiene el cuerpo a moverse también vale cero (Fig. 3.14). Si la mesa no lo soportara, el cuerpo caería moviéndose hacia abajo. Un cuerpo en reposo sobre una mesa representa una condición llamada *equilibrio*, caracterizada en parte, porque la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es igual a cero. Si, para simplificar, restringimos nuestras consideraciones sobre las fuerzas componentes a aquellas que apuntan hacia arriba, hacia abajo, hacia la derecha y hacia la izquierda, diremos que para que haya equilibrio, todas las fuerzas componentes apuntando hacia

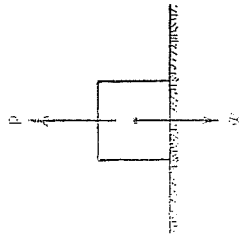


Fig. 3.14. La fuerza que la mesa ejerce sobre el cuerpo equilibra la fuerza de la gravedad sobre el cuerpo

arriba deben estar equilibradas por todas las componentes actuando hacia abajo, y que todas las componentes actuando hacia la derecha deben estar equilibradas por todas las componentes apuntando hacia la izquierda, (véase la Fig. 3.15). Esto es lo que quiere decirse con el enunciado de que la suma vectorial

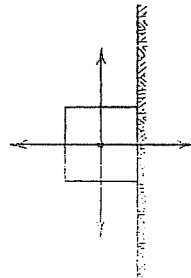


Fig. 3.15. La primera condición de equilibrio requiere que las fuerzas hacia arriba se equilibren con las fuerzas hacia abajo, y que las fuerzas a la derecha se equilibren con las fuerzas hacia la izquierda

debe ser igual a cero. La realización de esto hace posible que un ingeniero pueda calcular previamente las fuerzas que reciben las diversas partes de puentes y otras estructuras, cuando están sometidas a las cargas que se sabe deben recibir. El principio físico fundamental detrás de sus cálculos es, sencillamente, este principio de equilibrio.

Este principio se utiliza también en la determinación de masas por medio de una balanza de cruz, pero en este caso debe

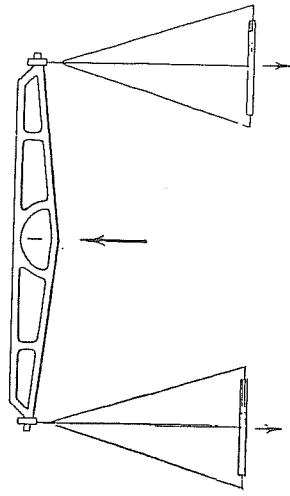


Fig. 3.16. Balanza de cruz

aplicarse también una segunda condición de equilibrio (Fig. 3.16).

Un poco de reflexión muestra que existen dos tipos generales de movimientos que puede tomar un cuerpo sometido a la acción de una fuerza; uno de ellos es el llamado *movimiento de traslación*, que se define como aquel movimiento donde cada línea recta del cuerpo se mueve siempre paralela a sí misma; otro es el *movimiento de rotación*, que se define como aquel movimiento en que cada punto del cuerpo describe una circunferencia alrededor de un eje. En este último caso la efectividad de la fuerza se encuentra que es directamente proporcional a la distancia perpendicular entre el eje y la línea de acción de la fuerza, es decir, la efectividad de la fuerza se duplica, se triplica, se reduce a la mitad, etc., conforme dicha distancia se duplica, se triplica, se reduce a la mitad, etc. Esta distancia recibe el nombre de *brazo de palanca de la fuerza*. (Fig. 3.17.) Si la línea de acción pasa por el eje, no se produce tendencia a girar porque entonces el brazo de palanca vale cero. Por consiguiente, la tendencia a girar depende de dos cantidades, la

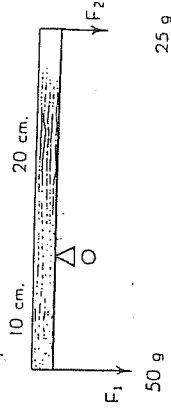


Fig. 3.17. 50 g con un brazo de palanca de 10 cm, equilibra a 25 g con un brazo de palanca de 20 cm.  $F_1$  tiende a producir una rotación en sentido contrario a las manecillas del reloj, con relación al fulcro O.  $F_2$  tiende a producir una rotación, con respecto al fulcro O, en el mismo sentido de las manecillas del reloj

fuerza y el brazo de palanca, las que originan el concepto llamado *torca* (o torque) que se define, con respecto a un eje determinado, como el producto de la fuerza y su brazo de palanca. La torca recibe también el nombre de *momento de la fuerza*. Las rotaciones a favor o en contra de las manecillas del reloj, se producen por la acción de torcas a favor o en contra de la rotación de las manecillas del reloj.

**Segunda condición de equilibrio.** Se enuncia del modo siguiente: la suma de todas las torcas, con respecto a cualquier eje, debe ser igual a cero; es decir, todas las torcas que provocan rotaciones en un sentido deben estar balanceadas por torcas en sentido contrario. Cuando se emplea una balanza de cruz, el peso del cuerpo colocado en un platillo actuando con un cierto brazo de palanca con relación al fulcro, se equilibra por el peso de las masas conocidas colocadas en el otro platillo, actuando sobre su brazo de palanca.

Nótese que si el brazo de palanca de un platillo se duplica, únicamente la mitad de la fuerza se necesita para mantener la misma torca, es decir, para producir la misma tendencia a la rotación. Esto es lo que significa el decir que una fuerza es más efectiva con respecto al movimiento de rotación, al aumentar su brazo de palanca con relación al eje que sirve como fulcro. De este modo las palancas y otros artefactos mecánicos pueden proyectarse para facilitar ciertas tareas. Una discusión más completa de estos temas la efectuaremos hasta haber desarrollado los conceptos de trabajo y de energía.

**Importancia del estudio del movimiento.** Hasta ahora, en la discusión de fuerzas hemos considerado el punto de vista vectorial, sin embargo, es evidente, como se hizo notar desde el principio, que una apreciación completa del concepto de fuerza no puede tenerse hasta que se desarrolle el vocabulario del movimiento, ya que la tendencia a cambiar el movimiento es una parte inherente de la definición de fuerza. Por otro lado, el movimiento es un concepto sin sentido hasta que se establece el de posición.

**Posición y desplazamiento.** La posición es una cosa relativa en el universo tridimensional en que vivimos, los cuerpos quedan bien localizados mediante distancias especificadas a tres direcciones mutuamente perpendiculares (Fig. 3.18). Por ejemplo, tantos pasos al norte (o al sur), seguidos de tantos

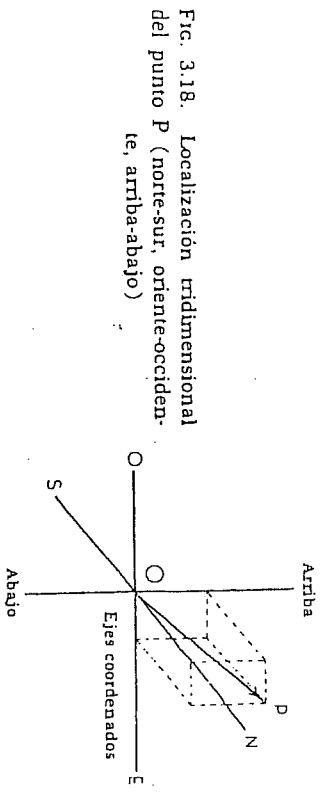
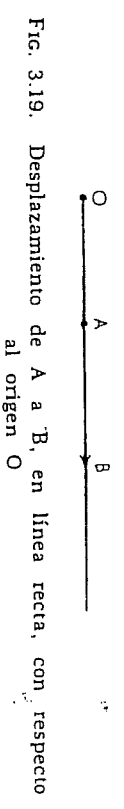


Fig. 3.18. Localización tridimensional del punto P (norte-sur, oriente-occidente, arriba-abajo)

pasos al oriente (o al occidente) y después tantos metros hacia arriba (o hacia abajo) a partir de un punto dado O, deben ser suficientes para localizar cualquier otro punto del espacio, como el punto P. Un cambio de posición significa un desplazamiento desde una posición primera a una segunda posición—por ejemplo, de O a P—. Por consiguiente, un desplazamiento es evidentemente una magnitud direccional. El concepto de cambio de posición en una cierta dirección se llama *desplazamiento*, y, también como la fuerza, es una magnitud vectorial (Fig. 3.19). Esto significa que debe hacerse una distinción entre distancia y desplazamiento. Por ejemplo, un carro que se dejó en un estacionamiento puede encontrarse posteriormente a 10 m a la derecha de su posición original; es correcto decir entonces que el carro ha sufrido un desplazamiento de 10 m



a la derecha, aunque haya recorrido una distancia de muchos kilómetros por la ciudad y fuera del estacionamiento, habiendo regresado a él, siendo estacionado 10 m a la derecha de su localización original. Así, el desplazamiento es un concepto fundamental en el estudio del movimiento.

**Velocidad.** El siguiente concepto que será considerado es el de *velocidad* o rapidez con que tiene lugar un desplazamiento, y nuevamente la naturaleza fundamental de la longitud y del tiempo deben ser tomadas en cuenta. Cuando tiene lugar un desplazamiento en un cierto lapso de tiempo, la relación del

desplazamiento entre el tiempo transcurrido, se llama la *velocidad media* del cuerpo que recibió el desplazamiento; por ejemplo, un automóvil que se mueve 20 km hacia el norte en una hora, se dice que tiene una velocidad media de 20 km/h hacia el norte. Por consiguiente, la velocidad es una magnitud vectorial y está sujeta a las leyes de la combinación de vectores. La dirección de la velocidad es un concepto importante, si se toma en cuenta el ejemplo de un bote de remos cruzando un río cuya corriente es apreciable. Resulta evidente que para alcanzar un punto dado de la ribera opuesta en un lapso dado de tiempo, la dirección en la que el remero debe apuntar su bote es tan importante como la rapidez con que rema. La *rapidez* se define, a veces, como el valor de la velocidad, es decir, sin considerar su dirección.

Hasta ahora no hemos hablado de la constancia de la velocidad. Aunque un automóvil pueda desplazarse 20 km en una cierta dirección, durante una hora y conservar una velocidad media de 20 km/h, es sabido que la velocidad puede haber sido variable. Por consiguiente, debe hacerse una distinción entre la velocidad media y la *velocidad instantánea*. Esta última magnitud implica hacer la medición en un lapso de tiempo infinitesimalmente pequeño, para que, durante el cual el cambio de velocidad sea despreciable. Por ejemplo, en un microsegundo (un millonésimo de segundo) es inconcebible que cambie mucho la velocidad de un cuerpo. Por tanto, la velocidad media durante este pequeño intervalo de tiempo se acepta que es casi igual a la velocidad instantánea. Si este intervalo no fuera suficientemente corto para este propósito, se consideraría un intervalo de un billonésimo de segundo, y así sucesivamente. Puede verse que la velocidad instantánea es en realidad un concepto abstracto a pesar de que se ha convertido en un término común en esta edad del automóvil. La velocidad instantánea es un valor límite de la relación entre el desplazamiento y el lapso de tiempo, conforme este último se vuelve infinitamente pequeño. Estrictamente hablando, el taquímetro de un automóvil no mide su velocidad, sino únicamente su valor, sin que indique la dirección.

**Aceleración.** La *aceleración* es la rapidez con que cambia la velocidad y también es un concepto vectorial, porque un cambio en una dirección no es igual a un cambio en cualquier otra dirección. La velocidad puede cambiar de varias maneras:

en valor, en dirección o en ambas cosas simultáneamente. Aunque el cambio de su valor es una experiencia común, no debe pasarse por alto el que un cambio en dirección, aun manteniéndose constante el valor, constituye una aceleración. Un carro recorriendo una pista circular recibe una aceleración aunque sea constante el valor de su velocidad; en este caso la dirección de la aceleración es radial, apuntando hacia el centro del círculo.

Con esta muy breve introducción a la cinemática, el estudiante, si tiene disposición hacia la aritmética, podrá apreciar ciertas relaciones numéricas, aunque ya se ha dicho que en este estudio son de importancia secundaria. Por ejemplo, el producto de una velocidad constante y el tiempo que dure el movimiento es el desplazamiento total. En forma análoga, si la velocidad cambia de modo uniforme, es decir, si el movimiento es uniformemente acelerado, la relación anterior entre velocidad, tiempo y desplazamiento se mantiene, siempre que se use la velocidad media. En función de los valores inicial y final, el promedio de dos cantidades es la mitad de su suma. Por ejemplo, un automóvil que empieza a caminar a partir del reposo (velocidad inicial cero) y que adquiere una velocidad final de 72 km/h (20 m/seg), tiene una velocidad media de 36 km/h (10 m/seg). En 10 seg se habrá desplazado 100 m si la aceleración es uniforme.

**Caída de los cuerpos.** Trataremos ahora por primera vez un fenómeno físico que incluye el movimiento. Por observación se sabe que cualquier cuerpo no sostenido cae en línea recta con aceleración constante, excepto a muy altas velocidades a las que la resistencia del aire se vuelve muy grande (Fig. 3.20). Esto significa que en el vacío, todos los cuerpos que no estén sostenidos por otros están animados de una aceleración constante vertical y con sentido hacia abajo, la cual mide, aproximadamente, 9.8 m/seg/seg (metros por segundo por segundo) —esto es, aumentan su velocidad 9.8 m por segundo en cada segundo—. De este modo la fuerza de la gravedad (el peso) solamente cambia el movimiento de un cuerpo por una cantidad constante en cada segundo, es decir, con una aceleración constante. Este fenómeno no siempre fue conocido y su descubrimiento constituyó un notable logro científico. La aceleración no es fácilmente medible por experimento directo, porque un cuerpo cae, a partir del reposo, unos 5 m en el primer segundo, y como 20 m en el siguiente segundo, y como un

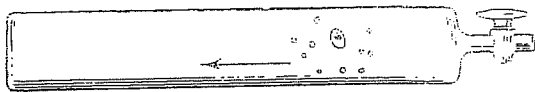


Fig. 3.50. En un tubo donde se ha hecho el vacío, una moneda y unos confetis caen simultáneamente, demostrando que la resistencia del aire es la que, por lo general, obliga a estos cuerpos a caer con diferentes velocidades. La aceleración de la gravedad es la misma en todos los cuerpos en un lugar determinado de la superficie terrestre

segundo es un lapso bastante corto del tiempo, no es fácil hacer medidas directas. Pero como ya se ha dicho, los físicos, empujando con Galileo, han logrado encontrar medios indirectos de medir muy grandes y muy pequeñas cantidades: así que ahora la aceleración de la gravedad se conoce con mucha aproximación. Como ya se ha dicho (Pág. 18), la aceleración de la gravedad varía ligeramente de un lugar a otro de la superficie terrestre; esto significa también que el peso de un cuerpo no es constante, sino que varía conforme varía la aceleración de la gravedad (véase también la Pág. 55).

El fenómeno de que la fuerza de la gravedad haga que todos los cuerpos tengan la misma aceleración al caer, no fue reconocido sino hasta la época de Galileo. Aristóteles pensaba que los cuerpos pesados caen más rápido que los ligeros, y aunque Galileo demostró la falacia de la conclusión aristotélica, dejando caer cuerpos desde la cima de la torre inclinada de Pisa, no todos se convencieron. Aun en la época de Galileo no se comprendía claramente que el movimiento que adquiere un cuerpo es el resultado de la fuerza que actúa sobre él.

**Leyes del movimiento de Newton.** La fuerza y el movimiento fueron finalmente relacionados por Sir Isaac Newton (1642-1727) en la forma de tres generalizaciones conocidas actualmente como las leyes del movimiento. Representaban un des-

cubrimiento que ha resistido la prueba experimental desde la época de Newton. De modo simplificado pueden enunciarse como sigue:

- 1) Un cuerpo continúa en reposo o en movimiento uniforme, excepto que reciba una fuerza.
- 2) Si una fuerza actúa sobre un cuerpo, éste recibe una aceleración en dirección a la fuerza y proporcional a ella, pero inversamente proporcional a la masa del cuerpo.
- 3) Asociada con cada fuerza existe otra igual y opuesta, llamada fuerza de reacción.

**Significado de la primera ley.** Consideremos ahora el significado de este breve, pero importante enunciado, aceptado como una ley natural. Lo primero que hace es aclarar que no se necesita fuerza para que un cuerpo siga moviéndose con velocidad constante en línea recta, sino que más bien se necesita una fuerza para detener el movimiento del cuerpo o para alterarlo de cualquier manera. En otras palabras, se implica que todos los cuerpos poseen una propiedad llamada *inercia*, definida como la propiedad del cuerpo por virtud de la cual se necesita una fuerza para cambiar el movimiento del cuerpo. La medida de la inercia es lo que en física se conoce como *masa*. Además, el reposo debe ser imaginado como un caso especial del movimiento uniforme con velocidad cero. Así, se ve —excepto por la necesidad de vencer la fricción y la resistencia del aire— que no se necesita fuerza para mantener un automóvil a 60 km/h cuando recorre una carretera recta y nivelada; quizá los conductores de automóviles con "rueda libre" hayan llegado a apreciarlo, aunque únicamente de un modo limitado.

**Impetu.** La expresión de que un automóvil se mueve por su impetu es una versión de una ley importante. Esta expresión es físicamente correcta si se toma en cuenta la definición de *impetu*, que es el producto de la masa y la velocidad del cuerpo en cuestión. El impetu es una magnitud vectorial y puede representarse con flechas. A menudo Newton se refería al impetu como cantidad de movimiento, haciendo así hincapié en que la materia en movimiento es más importante que el movimiento en sentido abstracto. La primera ley también proporciona el fundamento teórico para las condiciones de equilibrio que ya se han discutido.

El ímpetu es un concepto muy importante en física debido a un principio de conservación que está asociado con él. En un sistema de cuerpos en donde no actúan fuerzas externas no equilibradas, es decir, en donde todas las fuerzas involucradas son internas, no puede haber cambio en el ímpetu total, es decir, que si hay un cambio en el ímpetu de un cuerpo del sistema, éste debe ser compensado por un cambio correspondiente en el ímpetu de otro cuerpo del sistema. Por ejemplo, si dos automóviles chocan en una carretera lisa (esto es, la carretera no ejerce fuerzas externas en los dos carros, considerados como un sistema) cualquier cambio de velocidad —en magnitud o en dirección— de uno de ellos será acompañado por un cambio de velocidad en el otro, de tal manera que tomando en cuenta las masas de cada uno, el ímpetu total del sistema permanece constante. Recuérdese que el ímpetu es un magnitud vectorial.

Otro ejemplo es el retroceso de un rifle. Empezando con ímpetu igual a cero, cuando se oprime el gatillo una bala de pequeña masa es proyectada a una velocidad relativamente grande. Considerando a la bala y al rifle como un sistema, para que el ímpetu se conserve, el rifle, de mucho mayor masa, deberá ser proyectado hacia atrás con una velocidad más pequeña.

Este principio se aplica también a la propulsión de aviones, cohetes, etc. y al cambio de dirección de las cápsulas espaciales por la expulsión de chorros de gases en dirección opuesta a la del movimiento deseado.

**Significado de la segunda ley.** Esta ley explica cómo cambia de movimiento un cuerpo al aplicarle una fuerza. En otras palabras, indica qué fuerza es necesaria para vencer la inercia. La expresión matemática de la segunda ley dice que esa fuerza es igual a la masa del cuerpo multiplicada por la aceleración que recibe. Por esta razón, en la Pág. 18 se dijo que el peso de un cuerpo varía ligeramente de lugar en la superficie terrestre, con la correspondiente variación de la aceleración de la gravedad. Así se ve que la masa no es lo mismo que el peso y que la unidad de fuerza (newton) es igual a la unidad de masa (kg) multiplicada por la unidad de aceleración (m/seg/seg). Por esta razón el kilogramo no puede usarse como unidad de peso (el kilopondio) y como unidad de masa simultáneamente

(véase la Pág. 18). Si la masa se expresa en kilogramos, la fuerza debe expresarse en newtons.

La segunda ley también nos indica claramente que el valor del esfuerzo necesario para cambiar un movimiento depende proporcionalmente de la aceleración provocada. La razón para que un automóvil tenga un motor potente es más bien para facilitar que sea capaz de acelerarse que para que pueda adquirir una gran velocidad. Esto significa que si dos cuerpos de la misma masa reciben fuerzas diferentes, el que reciba la fuerza mayor experimentará la mayor aceleración. Por otra parte, la misma fuerza actuando sobre masas diferentes, le producirá mayor aceleración al menos masivo de los dos cuerpos. Por esta razón los nuevos trenes rápidos se fabrican menos masivos que los antiguos, para que necesiten menos tiempo en detenerse y para ganar velocidad en las estaciones, al aplicarles fuerzas equivalentes a las empleadas en trenes más masivos.

La segunda ley explica también a la *fuerza centrípeta*, la fuerza necesaria para obligar a un cuerpo a seguir una trayectoria circular con rapidez constante. La reacción a esta fuerza (véase a continuación la tercera ley), se llama *fuerza centrífuga*. Solamente que la fricción entre las ruedas y el piso sea suficiente para suministrar una fuerza centrípeta apropiada para una velocidad dada, un automóvil no se deslizará en una dirección perpendicular al radio de la trayectoria circular en el punto en cuestión (Fig. 3.21). En estos casos la aceleración producida por una fuerza es, generalmente, el resultado únicamente de un cambio de dirección. La fuerza centrípeta se ejerce

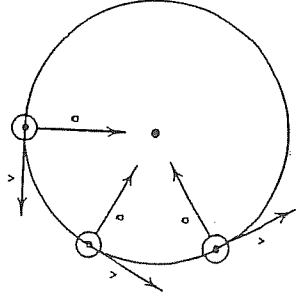


Fig. 3.21. Un cuerpo que recorre una trayectoria circular, manteniendo constante el valor de su velocidad, tiene una aceleración apuntada hacia el centro del círculo, debido a un cambio continuo en la dirección de la velocidad

sobre el cuerpo que gira mientras que la fuerza centrífuga la ejerce el cuerpo que gira sobre algún otro.

**Significado de la tercera ley.** La tercera ley expresa el fenómeno observable de que una fuerza nunca existe sola, siendo imposible ejercer una fuerza sin que exista una fuerza de reacción. Esto significa que si una fuerza actúa sobre un cuerpo, este cuerpo debe ejercer una fuerza de igual valor y de la misma dirección, pero de sentido contrario, sobre otro cuerpo. Un poco de reflexión convence de que el juego del cable con una sola persona es una imposibilidad: no es posible ejercer una fuerza sin oposición (Fig. 3.22). El más potente automóvil del mundo se encuentra desvalido en un piso congelado donde las ruedas no pueden ejercer tracción, es decir, donde el piso está suficientemente liso como para desarrollar una fuerza de fricción suficiente para empujar al carro; en realidad, este empuje del piso sobre las ruedas es el que obliga al carro a moverse.



Fig. 3.22. El juego del cable es imposible, excepto que  $F_1$  se oponga a  $F_2$ , y viceversa

El principio de la conservación del ímpetu, ya discutido, es una consecuencia de la primera y la tercera ley de Newton, aplicadas conjuntamente.

**Naturaleza de una ley científica.** Recordaremos que estas leyes se aceptan actualmente como verdades científicas, representando descubrimientos en sentido científico, esto es, de acuerdo a los métodos científicos ya descritos. Aceptándolas como verdades fundamentales, es posible explicar todos los fenómenos conocidos de la mecánica. Es posible, por supuesto, establecer un conjunto lógico de explicaciones de los fenómenos mecánicos en términos de otras verdades, pero la experiencia ha demostrado que, elementalmente hablando, estas suposiciones no son sólo las más razonables y naturales—ya que se basan en nuestra experiencia—sino que además, son relativamente sencillas.

El físico contemporáneo no intenta explicar las leyes del movimiento de Newton: le es suficiente explicar otros fenó-

menos en términos de ellas. El que la física clásica pueda ser así explicada es una de las maravillas de la ciencia misma. Es cierto que no toda la física atómica moderna se adapta a este hermoso molde, pero al menos aproximadamente puede decirse que las leyes del movimiento de Newton constituyen uno de los más importantes progresos científicos. En la actualidad se consideran teorías más generales, pero que no excluyen a las leyes de Newton.

**Ley de la gravitación de Newton.** Ahora mencionaremos otra sobresaliente contribución de Newton, la ley de la gravitación universal. En relación con las leyes del movimiento se hizo necesario asociar la aceleración de la gravedad con la fuerza llamada peso, es decir, la fuerza de atracción entre la Tierra y un cuerpo libre, que debe ejercerse sobre éste para explicar la aceleración que toma hacia el centro de la Tierra. Newton descubrió que la atracción universal entre todos los cuerpos del universo, con la ayuda de sus leyes del movimiento, explicaba el movimiento de los cuerpos celestes, justificando así su existencia; por lo que ahora es una ley aceptada. Esta ley dice que cada cuerpo en el universo atrae a cualquier otro cuerpo con una fuerza que es proporcional al producto de sus masas, y que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos; por esto se le llama una ley de inversa de cuadrados. El factor de proporcionalidad, llamado actualmente la constante de gravitación, fue encontrado con bastante aproximación por Lord Cavendish al final del siglo XVIII en Inglaterra—y posteriormente por P. R. Heyl en la oficina de normas de Washington—por medio de esferas grandes y pesadas—y métodos—muy—precisos—para—medir fuerzas atractivas muy débiles.

Ahora deberemos hacer notar que una de las metas de la física es, en último análisis, explicar todos los fenómenos en términos de las suposiciones más sencillas posibles, y expresar estas explicaciones del modo más comprensible. Las leyes de Newton—tres breves enunciados—y la ley de la gravitación universal contienen un caudal de información para aquellos que las entiendan. Por supuesto, debe siempre recordarse que la física, como cualquier otra ciencia, nunca intenta explicar el último "por qué" de los fenómenos, sino más bien "cómo"



uenen lugar. Otra ley general es la de la conservación de la energía que será considerada posteriormente, pero después de haber desarrollado los conceptos de trabajo y energía que serán tratados en los capítulos siguientes.

### CUESTIONARIO

1. ¿Qué cosa es una magnitud vectorial?
2. Explique cómo representar con una flecha un viento dirigido hacia el sur y uno dirigido hacia el norte. ¿En qué difieren estas dos representaciones?
3. Represente con una flecha un viento dirigido hacia el oeste.
4. Diga en qué se distingue la representación de una fuerza de 30 N apuntando hacia arriba de otra de 50 N, apuntando hacia abajo.
5. Si un cuerpo recibe tres fuerzas, ¿cómo se procede para encontrar la fuerza resultante?
6. Un alambre, del cual pende un cuadro, está unido a éste en dos puntos relativamente próximos. Si esos dos puntos se alejan, ¿por qué puede llegar a romperse el alambre?
7. Una caja pesada se arrastra con movimiento uniforme a lo largo de una acera horizontal y a continuación a lo largo de una acera inclinada. ¿En qué caso se necesita ejercer probablemente una fuerza mayor? Explique la respuesta.
8. Diga si el taquímetro de un automóvil registra su velocidad o sólo el valor de dicha velocidad.
9. Un cuerpo que cuelga de un dinamómetro indica un peso de 50 N. Diga si este peso aumenta o disminuye si la medida se hace
  - a) a mayor altitud,
  - b) a menor altitud,
  - c) a mayor latitud,
  - d) en el polo norte,
  - e) en el ecuador.
10. Si una balanza de brazos iguales se equilibra en la cima de una montaña, ¿quedará equilibrada al nivel del mar?
11. Enuncie las tres leyes del movimiento de Newton.
12. ¿Por qué no intentan los físicos probar las leyes del movimiento de Newton?

13. ¿Cuál es la diferencia entre fuerza centrípeta y fuerza centrífuga?
14. Haga una distinción entre la cinemática y la dinámica.
15. ¿Qué cosa es el ímpetu? ¿Por qué es importante?
16. Cuando un automóvil se mueve con una rapidez constante, ¿tendrá aceleración?

## CONSIDERACIONES MECANICAS (Continuación)

### TRABAJO; ENERGIA Y FRICCION

**El concepto de trabajo.** En física, este concepto no significa lo mismo que en su acepción popular donde parece implicar un esfuerzo fisiológico. En realidad, es difícil decir con precisión lo que significa el término "trabajo" en lenguaje común, en vista de que existen muchos argumentos sobre lo que es y lo que no es el trabajo. En su significación técnica, empleada aquí, tiene un significado muy preciso. Cuando un cuerpo se mueve, el cuerpo puede estar o no sometido a una fuerza, dependiendo si el cuerpo está acelerado o si tiene movimiento uniforme. Si la fuerza que recibe el cuerpo, cuando éste se mueve, tiene la dirección del desplazamiento, se dice que se ha dado *trabajo* al cuerpo. Si la dirección de la fuerza es perpendicular al desplazamiento, o si no hay desplazamiento, entonces, técnicamente hablando, no existe trabajo. El *trabajo* es un concepto abstracto que se define como el producto de la fuerza multiplicado por el desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza, en la dirección de la fuerza (Fig. 4.1). Esto

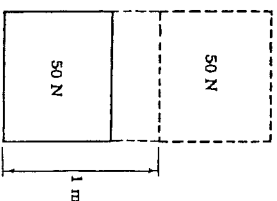


Fig. 4.1. 50 newtons-metro de trabajo deben suministrarse para elevar un peso de 50 newtons a un metro de altura

es equivalente al producto del desplazamiento por la componente de la fuerza en la dirección del desplazamiento. En cualquier caso, las dos cantidades que deben ser multiplicadas para obtener el trabajo, deben apuntar en la misma dirección; además, es necesario que tenga lugar un desplazamiento para que el trabajo pueda efectuarse.

De lo anterior es evidente que, por ejemplo, una persona cargada de una rama durante mucho tiempo no ejecuta trabajo en el sentido técnico porque no hay movimiento, aunque el proceso produzca una considerable fatiga muscular. Más aún, no se ejecuta trabajo al "empujar" un pesado baúl con velocidad constante sobre un piso perfectamente liso y sin fricción (si tal cosa fuera posible), teniendo en cuenta que, en ausencia de fricción, las únicas fuerzas que recibe el baúl (la fuerza de la gravedad y la reacción del piso) actúan en ángulo recto al desplazamiento (Fig. 4.2). Esto significa, por supuesto, que es imposible empujar cualquier cosa (a velocidad constante) a lo largo de una superficie lisa porque no existe una fuerza de reacción. Aunque esta condición sin rozamiento nunca puede ser alcanzada, puede aproximarse, por ejemplo, en una superficie de hielo; entonces la fuerza aplicada es en realidad muy pequeña.

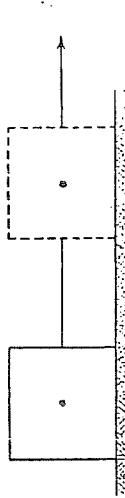


FIG. 4.2. Si el suelo es liso, no se suministra trabajo al mover el baúl con velocidad constante, ya que no se necesita ejercer una fuerza

El trabajo es un concepto muy especial, cuya importancia aún no puede ser apreciada por el lector. Se mide en kilonewton-metro, en dinas-centímetro o en newtons-metro. Una dinacentímetro se llama *erg* o *ergio*. La dina es una unidad muy pequeña de fuerza, a saber, la que hay que suministrar a un gramo masa, para acelerarlo un centímetro por segundo por segundo. Un *newton-metro*, se llama *joule* o *julio*.

**Energía cinética y energía potencial.** La capacidad de dar trabajo es aún más importante que el concepto de trabajo y se llama *energía*. Cualquier cuerpo capaz de suministrar un

trabajo se dice que está dotado de energía, de la que se conocen muchas variedades, por ejemplo, la energía debida al movimiento, llamada energía cinética (Fig. 4.3). Esta energía la tiene un automóvil en movimiento como lo indica el daño que resulta si choca de frente con otro automóvil. Puede demostrarse que la energía cinética es igual al semiproducto de la masa por la segunda potencia de la velocidad.

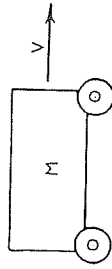


FIG. 4.3. La energía cinética es la que tiene un automóvil si éste está en movimiento

Una peña, en lo alto de un acantilado, también contiene energía porque la piedra, si cae, conforme desciende por el costado del acantilado (Fig. 4.4), es capaz de suministrar un trabajo. Esta energía se llama *energía potencial*. En el reloj del abuelo, las pesas se elevan y el reloj recibe energía potencial de la persona que le dio cuerda. Esta energía se libera conforme las pesas van cayendo gradualmente, el mecanismo se mueve y un trabajo se suministra, convirtiéndose así la energía potencial en cinética. El carbón, la gasolina y la dinamita, un resorte comprimido y la bomba atómica, también contienen

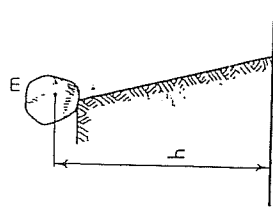


FIG. 4.4. La peña tiene energía potencial en relación al nivel inferior

energía potencial porque son capaces de suministrar un trabajo. Así, esta abstracta capacidad de suministrar un trabajo, se convierte en un concepto práctico de considerable importancia.

**Significado del concepto de energía.** Conforme se medita en el concepto de energía, uno se da cuenta de que toda realidad es más comprensible, si todo el mundo físico se imagina como un mundo de energía. La energía potencial almacenada en la

hierra en la forma de carbón, petróleo, etc., por el Sol —la fuente de casi toda energía en este planeta—, es gradualmente transformada en la energía cinética del movimiento, en la energía química de las plantas y de los explosivos, en la energía de la radio, la electricidad, la luz y el sonido, etc. En verdad, cada rama de la física puede decirse apropiadamente que es sólo el estudio de una diferente manifestación de la energía. Este concepto abstracto asociado con el producto de una fuerza por un desplazamiento, no debe ser confundido con la noción popular de la energía contenida en las píldoras de vitaminas.

**Conservación de la energía.** El concepto de energía, además, proporciona un concepto general aplicable a toda la física debido al principio muy importante que dice que *la energía contenida en el universo se conserva, o sea, que el universo no puede ganar o perder su capacidad de suministrar trabajo; esta capacidad puede ser transformada de una clase a otra de energía, pero no puede perderse.* La implicación es que la energía adquiere una especie de significado material, de tal manera que las varias ramas de la física sólo representan diferentes manifestaciones de aquélla. En ninguna parte pueden aumentar la energía almacenada sin una disminución correspondiente en otra parte. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que la energía en realidad carece de existencia material, por lo menos en esta discusión. Es solamente un concepto útil en cuyos términos se hacen posibles ciertas explicaciones y que suministran, con el principio de conservación, el fundamento para una generalización brillante. Esta generalización es de tan trascendentes consecuencias que tiene tanta importancia como las leyes del movimiento de Newton y suministra un método muy útil de análisis tanto al físico teórico como al técnico que diseña maquinaria, aun cuando el trabajo dado por una máquina es a menudo menos importante que la rapidez con que lo suministra.

**Potencia.** La rapidez con que se suministra el trabajo se llama *potencia*. Una máquina grande da más potencia que una pequeña sólo porque puede suministrar el mismo trabajo en menos tiempo. La potencia de una persona, una máquina o un animal no debe confundirse con el trabajo que sea capaz de suministrar. Por ejemplo, un caballo de raza, tirando velozmente de una calesa ligera, puede suministrar el mismo trabajo en un cierto lapso que un caballo de tiro jalando lentamente

una pesada carga. La unidad de potencia es el *watt* o *vatio*, que es igual al trabajo de un joule, ejecutado en un segundo; el kilovatio es igual a mil watts. Otra unidad usual de potencial es el *caballo de vapor*, que es igual a 735 watts.

El significado del concepto de potencia se indica claramente por los métodos actuales para pagar el trabajo por hora. Cualquiera se hace cargo de que la labor manual de un hombre es más valiosa que la de un muchacho, por lo que recibe más pago por hora. Por otro lado, un muchacho trabajando la mitad de rápido que el hombre y recibiendo la mitad de pago por hora puede llevar a cabo el mismo trabajo total, y recibir el mismo pago total, pero en doble lapso de tiempo. Sin embargo, algunas tareas requieren una velocidad mayor de suministro de energía que la que un hombre pueda proporcionar, necesitando entonces un aparato más potente.

**Máquinas.** Una máquina se define como un dispositivo para transmitir y multiplicar una fuerza. Por el uso de una máquina una gran fuerza resistente puede a menudo ser vencida aplicándole otra fuerza mucho mayor. Teniendo en cuenta la discusión anterior, es fácil de comprender cómo es esto posible. El trabajo que debe suministrarse a la máquina nunca es menor que el trabajo que suministra —en realidad, siempre es mayor debido a la fricción—; pero, puesto que el trabajo es producto de la fuerza y el desplazamiento, la fuerza puede ser reducida si el desplazamiento se hace correspondientemente mayor (Fig. 4.5). De este modo la fuerza puede ser reducida a la mitad si el desplazamiento se duplica, porque el producto de las dos permanece constante. Con un polipasto, por ejemplo, puede ser necesario tirar 5 m de la cuerda para elevar un metro a la carga (Fig. 4.6). En este caso, no tomando en cuenta la fricción, será necesario ejercer un quinto de la fuerza necesaria si se elevara directamente la carga. Así, se adquiere *ventaja mecánica*, que se define como la relación entre la fuerza vencida y la fuerza aplicada. A veces la única ventaja que se gana con la máquina es un cambio en la dirección de la fuerza (Fig. 4.7).

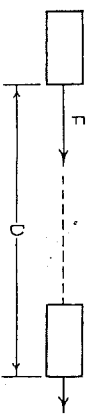


Fig. 4.5. El trabajo aquí es la fuerza  $F$ , multiplicada por el desplazamiento  $D$ .  $T = F \times D$ . Una fuerza  $F$  más pequeña recorriendo una mayor distancia  $D$ , debe dar el mismo resultado

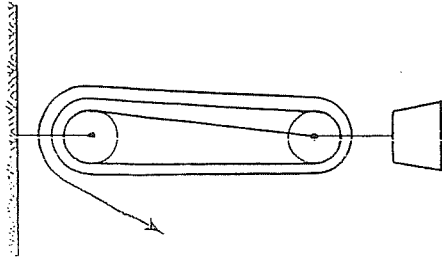


FIG. 4.6. Un polipasto con una ventaja de 5 veces

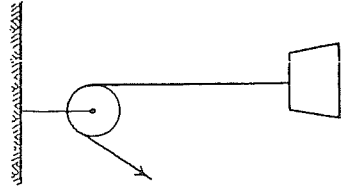


FIG. 4.7. Aquí sólo se gana ventaja en la dirección de la fuerza aplicada a la polea

pero en todos los casos el producto de la fuerza aplicada multiplicada por la distancia que se mueve en su punto de aplicación, es igual al producto de la fuerza de resistencia (incluyendo la resistencia debida a la fricción), multiplicada por su desplazamiento.

En ausencia de fricción, la ventaja mecánica puede determinarse solamente considerando las distancias relativas a donde las fuerzas se aplican. En la Fig. 4.6, 5 m de cuerda deben ser recogidos del polipasto, por cada metro que se eleve la carga, ya que si la carga es levantada un metro, cada una de las cinco cuerdas que soportan la polea inferior debe acortarse un metro, pero como la cuerda es continua debe en total acortarse 5 m. Esta relación, que aquí es igual al número de cabos conectados a la polea móvil, se llama la *ventaja mecánica teórica*, en contraste con la ventaja mecánica real, que es la relación de fuerzas involucradas. La relación entre la ventaja mecánica real y la teórica es la *eficiencia* de la máquina. Para muchos dispositivos sólo se especifica la ventaja teórica, ya que ésta se determina con facilidad considerando el diseño del aparato; o dicho de otro modo, por lo general es posible imaginar cómo se mueve el punto a donde está la fuerza aplicada, comparándola con la distancia recorrida por la fuerza de resistencia, sin hacer funcionar realmente la máquina.

Otros ejemplos de máquinas. Otro ejemplo de una máquina es la *palanca* (Fig. 4.8). Se infiere de la demostración anterior de la polea, que por medio de una palanca se puede equilibrar una fuerza grande por la aplicación de una pequeña, sólo porque la pequeña actúa a lo largo de una distancia mayor. La llamada ley de la palanca —que se deriva de la ley de la conservación de la energía— dice que la fuerza aplicada, multiplicada

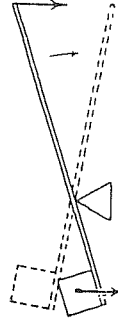


FIG. 4.8. La palanca es una máquina

por su brazo de palanca (ya definido), es igual a la fuerza que va a vencerse, multiplicado por su brazo de palanca. Con una palanca se requiere muy poco trabajo para vencer la fricción, esto es, la eficiencia es relativamente grande, debido a que la pequeña superficie de contacto entre el fulcro y la palanca, no permite a la fuerza de fricción que opere a lo largo de una gran distancia.

El *plano inclinado*. Funciona también bajo el mismo principio que la palanca y la polea (Fig. 4.9). Con este aparato la ventaja consiste en que la hipotenusa del triángulo rectángulo —el lado mayor del triángulo— es mayor que las longitudes de los otros lados, de acuerdo al tamaño de los ángulos que hacen

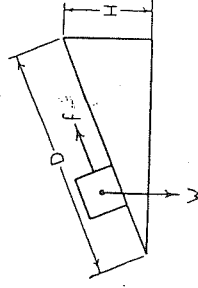


FIG. 4.9. El plano inclinado. Una pequeña fuerza  $f$ , actuando a lo largo de la distancia  $D$  reemplaza una fuerza mayor  $W$  actuando a lo largo de la distancia más pequeña  $H$

entre ellos; así, una carga pesada puede levantarse del piso a una mesa, deslizándola hacia arriba sobre un tablón tendido del piso a la mesa, formando el llamado plano inclinado. Si la longitud del plano inclinado es mayor que la altura de la mesa, menos fuerza (excepto por la fricción) se necesita para empujar al cuerpo en la dirección del plano que si se levantara directamente. Aun teniendo en cuenta que debe suministrarse un

trabajo adicional para vencer la fricción agregada al aumentar el largo del camino recorrido por el cuerpo, el plano inclinado hace posible a menudo elevar cargas que de otra manera sería imposible, debido a limitaciones tales como la impuesta por la fuerza humana.

Una modificación del plano inclinado es el *torrillo*; el desarrollo del filete produce una figura en forma de cuña, la que no es otra cosa que un plano inclinado (Fig. 4.10). Una fuerza relativamente pequeña puede ser suficiente para producir una vuelta completa del torrillo, el que habrá avanzado una distancia llamada técnicamente el paso, contra una oposición considerable. En forma análoga, una fuerza relativamente débil apli-

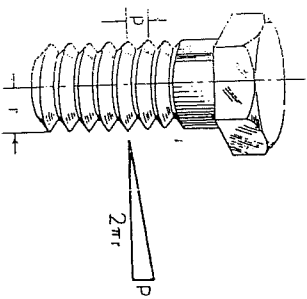


Fig. 4.10. En realidad, un torrillo es una serie de planos inclinados de circunferencia  $2\pi r$  y paso  $p$ .

cada al extremo plano de una cuña puede producir una gran fuerza perpendicular a sus caras y así grandes trozas pueden ser fácilmente rajadas introduciéndoles cuñas. La cuña es simplemente un plano inclinado.

En cada una de las máquinas alistadas anteriormente (y muchas más que podríamos mencionar), el principio fundamental es el mismo: una fuerza pequeña es aplicada a lo largo de una gran distancia, y una gran fuerza de resistencia es vencida a lo largo de una distancia más pequeña.

**Fricción.** La fuerza de fricción es una fuerza muy importante en física. Aunque a veces el ingeniero trata de minimizar sus efectos —por ejemplo, empleando lubricantes— para incrementar la eficiencia de una máquina, la fuerza de fricción es, sin embargo, un factor importante y deseable en nuestra vida diaria. Imaginemos cómo iniciaríamos el movimiento, aun del

más caro y poderoso automóvil, sobre una superficie lisa y sin fricción.

**Coefficiente de fricción.** La fuerza de fricción se caracteriza porque siempre actúa tangencialmente a las superficies de contacto de los dos cuerpos, siendo su valor siempre proporcional a la fuerza que comprime a las dos superficies entre sí (Fig. 4.11). La fuerza de tracción  $F$ , debida al paso del cuerpo cayendo, equilibra justamente —y, por lo tanto, mide— a la fuerza  $f$  de fricción cuando el cuerpo se mueve con velocidad constante. El factor de proporcionalidad se llama *coeficiente de fricción*, el que se define —para cualquier par de superficies— como la relación de la fuerza tangencial de fricción y la fuerza per-

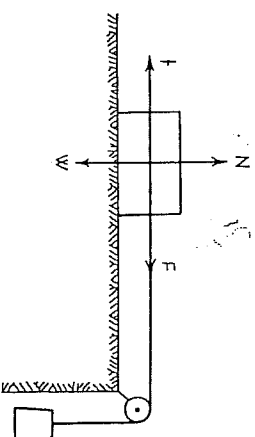


Fig. 4.11. La fuerza de fricción  $f$ , es proporcional a la fuerza normal  $N$ ; es decir,  $f/N =$  constante (el coeficiente de fricción)

pendicular que aprieta entre sí las dos superficies. La fuerza de fricción no depende, como se piensa comúnmente, del área de las superficies de contacto, pero, por supuesto, es diferente para cada par de superficies.

**Sumario.**—Hemos visto en los dos últimos capítulos cómo se encuentran íntimamente relacionados la fuerza y el movimiento. Hemos considerado la naturaleza vectorial de la fuerza, una característica que es compartida por otras muchas magnitudes físicas. El vocabulario del movimiento ha sido desarrollado hasta el punto que ha permitido conocer las leyes del movimiento de Newton. Los conceptos de trabajo y energía han sido explicados, dándose así su significado al principio de la conservación de la energía. Se ha visto también cómo pueden emplearse algunos aparatos mecánicos para multiplicar las fuerzas, obteniéndose así una comprensión mejor del funcionamiento de las má-

quinas. El trabajo, la energía, la fuerza y el movimiento forman la porción de la física comúnmente llamada mecánica. Aun con este breve panorama sobre estos temas, limitados casi a consideraciones de vocabulario, el estudiante debe haber adquirido una apreciación más completa de este aspecto del mundo físico en que vive, además de un respeto mayor para la habilidad de la mente humana de reunir conceptos descritos concisamente y sin ambigüedad.

**Nota:** Además de las preguntas al final de cada capítulo, se han agregado "preguntas de repaso" entre varios capítulos, siendo del tipo de "opción múltiple"; cada pregunta se acompaña de varias respuestas, siendo correcta sólo una de ellas.

### PREGUNTAS

1. Si una carga debe elevarse a 3 m de altura, ¿será preferible emplear una escalera vertical o arrastrarla a lo largo de un plano inclinado? ¿Cuándo se necesita una fuerza mayor? ¿En qué caso se necesitará un trabajo mayor? ¿Por qué?
2. Calcule el trabajo necesario para empujar un cuerpo de 25 kg. a velocidad constante, la distancia de 3 m sobre un plano horizontal sin fricción.
3. ¿Qué es lo que significa energía? ¿Por qué es importante?
4. ¿Por qué se dice que el carbón y la gasolina contienen energía?
5. Explique por qué una fuerza de 20 kp (kilopondios), puede mover un cuerpo de 200 kg a lo largo de un plano inclinado que se eleva un decímetro en un metro (despreciando la fricción).
6. ¿Qué es potencia? ¿Es posible que un motor de juguete y un motor industrial suministren la misma cantidad de trabajo?
7. ¿Qué significa la ventaja mecánica de una máquina?
8. ¿Por qué razón cuando lo que se corta es duro, se coloca cerca de él al gozne de las tijeras?
9. Una palanca se emplea para obtener una ventaja en la fuerza aplicada. ¿Podrá ser a veces conveniente obtener ventaja en la distancia?

18. El experimento de Cavendish se refería a: 1) la determinación de la fuerza centripeta; 2) la conservación del ímpetu en una colisión; 3) la atracción gravitacional entre los cuerpos; 4) la constancia del estiramiento de un resorte con relación a la fuerza que actúa sobre él; 5) la determinación de la aceleración de la gravedad dejando caer una bola en un platillo giratorio para que un lápiz trace una marca en un tambor giratorio ( )
19. Un cuerpo cayendo libremente recorre el primer segundo: 1) 10 m; 2) 10 cm; 3) 980 cm; 4) 5 m; 5) 20 m ( )
20. Para mantener un cuerpo de 10 kg moviéndose con la velocidad constante de 5 m por segundo, en línea recta, se necesita una fuerza de: 1) 50 N; 2) 10 N; 3) 20 N; 4) 2 N; 5) cero N ( )
21. La Segunda Ley del Movimiento de Newton llega a la siguiente conclusión: 1) las fuerzas aparecen en pares; 2) todos los cuerpos son atraídos hacia el centro de la Tierra; 3) la fuerza es igual a la masa multiplicada por la aceleración; 4) un cuerpo en reposo, permanece en reposo hasta que una fuerza actúe sobre él; 5) el peso es la fuerza de la gravedad ( )
22. La masa es la medida cuantitativa de: 1) la inercia; 2) la gravedad; 3) el peso; 4) el ímpetu; 5) el desplazamiento ( )
23. La velocidad tiene: 1) fuerza; 2) magnitud; 3) desplazamiento; 4) masa; 5) peso ( )
24. Galileo vivió cerca de la época de: 1) Aristóteles; 2) Demócrito; 3) Platón; 4) Newton; 5) Maxwell ( )
25. Un cuerpo recorre una circunferencia manteniéndose constante el valor de la velocidad; entonces: 1) está acelerado; 2) tiene velocidad constante; 3) no está acelerado; 4) no se mueve; 5) no es afectado por la gravedad ( )
26. Un cuerpo A es lanzado horizontalmente en el mismo instante que un cuerpo B se deja caer desde el mismo punto; si la resistencia del aire se desprecia: 1) B debe llegar primero al suelo; 2) A debe llegar primero al suelo; 3) A debe caer más lejos que B; ( )

- 4) A debe haberse desplazado menos que B; 5) el desplazamiento de A y B valen cero ..... (3)
27. La aceleración es: 1) la rapidez del desplazamiento; 2) la rapidez con que se recorre la distancia; 3) la rapidez con que cambia la velocidad; 4) la rapidez con que cambia el valor de la velocidad; 5) la rapidez con que cambia la fuerza ..... (4)
28. El trabajo se mide en: 1) joules; 2) caballos de vapor; 3) gramos; 4) joules por segundo; 5) kilopondios ..... (1)
29. El trabajo es el producto de la fuerza y la distancia: 1) sin importar la dirección; 2) no es eso; 3) cuando las dos son perpendiculares entre sí; 4) cuando las dos tienen la misma dirección; 5) sólo en la ausencia de fricción ..... (4)
30. El trabajo necesario para mover un cuerpo de 10 kg una distancia horizontal de 5 m, sin aceleración y sobre una superficie sin fricción, es: 1) 10 J; 2) 500 J; 3) cero; 4) 50 N m; 5) 500 N m ..... ( )
31. El trabajo para elevar a 10 m de altura a un cuerpo que pesa 50 N es: 1) 500 J; 2) cero; 3) 500 kgm; 4) 250 J; 5) 9.8 J ..... ( )
32. La capacidad de un cuerpo para suministrar trabajo se llama: 1) potencia; 2) energía; 3) ventaja mecánica; 4) ímpetu; 5) eficiencia ..... (2)
33. Una máquina de 2 CV, comparada con la de 1 CV, suministra: 1) el doble de trabajo; 2) trabajo con doble rapidez; 3) el doble de energía; 4) cuádruple energía; 5) trabajo tan rápido como una máquina de 1 CV ..... (5)
34. Un hombre de 800 N trepa en 20 seg una escalera de 6 m de altura, desarrollando aproximadamente: 1) 50 W; 2) 1 KW; 3) 240 W; 4) 125 W por minuto; 5) ¼ CV ..... ( )
35. Si se duplica la velocidad del cuerpo: 1) su energía cinética se cuadruplica; 2) su energía cinética se reduce a la mitad; 3) su energía potencial se duplica; 4) su energía potencial se reduce a la mitad; 5) su energía cinética no cambia ..... (4)
36. Empleando un plano inclinado para levantar un cuerpo pesado: 1) probablemente se hace más tra-

- bajo; 2) probablemente se hace menos trabajo; 3) se necesita mayor fuerza; 4) probablemente se hace el mismo trabajo; 5) probablemente se necesita hacer la misma fuerza que sin el uso del plano inclinado ..... (2)
37. La ventaja mecánica de cualquier máquina es: 1) la relación entre la fuerza vencida y la fuerza aplicada; 2) lo mismo que la eficiencia de la máquina; 3) la relación entre la fuerza aplicada y la fuerza que se vence; 4) siempre dos; 5) siempre cero ... (1)



## CONSIDERACIONES ELASTICAS

### ELASTICIDAD; VIBRACIONES; FLUIDOS

**El concepto de elasticidad.** En las consideraciones anteriores el concepto de fuerza se discutió en relación al movimiento, pero no se sugirió ningún método directo para medirla, excepto por un dinamómetro. Para comprender el fundamento de este método debemos conocer una importante propiedad de la materia llamada elasticidad. Hasta aquí se han considerado solamente a las fuerzas externas actuando sobre los cuerpos y la propiedad de la materia llamada inercia; las fuerzas también producen efectos internos que, por supuesto, no pueden comprenderse por completo hasta abordar un estudio de la estructura de la materia; aunque este estudio no es apropiado por ahora, algunas características sobresalientes de la materia servirán para aclarar este punto. Toda la materia, además de tener inercia, se deforma más o menos por la aplicación de fuerzas, caracterizándose, además, por su tendencia a recuperarse de dicha deformación, que puede ser un cambio de forma, de volumen, o de ambos. Esta propiedad se llama *elasticidad* y su ejemplo más sencillo es el estiramiento de un resorte. En otras palabras, la materia puede imaginarse como poseyendo ciertas propiedades: dos de éstas son la inercia y la elasticidad.

**El resorte estirado.** Cuando se cuelga un peso en el extremo de un resorte vertical, se ha encontrado por experimentación, que el resorte se estira una distancia que es directamente proporcional al valor de la fuerza aplicada; Esto significa que la fuerza de gravedad que recibe un cuerpo de doble masa que otro, debe estirar el resorte de donde está suspen-

didó, el doble de distancia que el cuerpo más ligero. Evidentemente, proporciona este fenómeno un medio muy sencillo de comparar fuerzas. En este principio se basa el dinamómetro (Fig. 5.1). Además, es importante notar que cuando se libera el resorte regresa a su estado original, excepto que se haya sobrecargado, en cuyo caso se produce una deformación permanente y entonces se dice que se ha excedido el límite elástico.

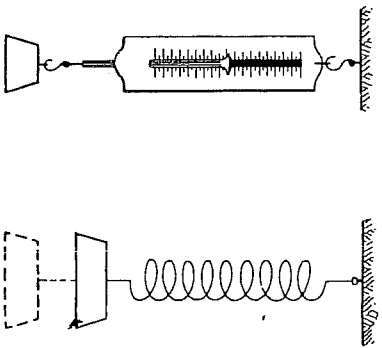


Fig. 5.1. El dinamómetro (o balanza de resorte) funciona por elasticidad. El alargamiento del resorte es proporcional a la fuerza aplicada.

**Ley de Hooke.** El que la deformación sea directamente proporcional a la fuerza aplicada, es un caso especial de una ley física fundamental llamada *ley de Hooke* en honor de Robert Hooke, su descubridor. En su forma más general, esta ley dice que cuando se produce una deformación en un cuerpo por la aplicación de una fuerza, la fuerza de restitución por unidad de área (*llamada esfuerzo*) —que desarrollan todos los cuerpos elásticos— es proporcional a la deformación fraccional (*llamada deformación unitaria*), siempre que no se exceda el límite elástico; es decir, dentro del límite elástico, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria.

**Movimiento armónico simple.** En un resorte estirado se tiene el ejemplo de una fuerza cuyo valor varía conforme se estira el resorte. O dicho de otra manera, la fuerza produce un desplazamiento directamente proporcional a sí mismo. Aplicando la Segunda Ley de Newton, se nota que esta fuerza actuando sobre un cuerpo dado debe producirle un movimiento en donde

la aceleración también varía directamente con el desplazamiento del cuerpo, medido a partir de la posición donde está en equilibrio. Este es el caso mostrado en el experimento siguiente. Un resorte del que cuelga un cuerpo masivo, queda con un cierto alargamiento; si ahora el resorte se estira más aún y entonces se suelta, el cuerpo oscila hacia arriba y hacia abajo (Fig. 5.2). Las medidas muestran que el movimiento del cuerpo se caracteriza justamente por la condición descrita, a saber, que la aceleración en cada punto es directamente proporcional al desplazamiento del punto a partir de la posición de equilibrio. En la posición de equilibrio, la velocidad, aunque alcanza su valor máximo, no está cambiando ( $a = 0$ ), mientras que

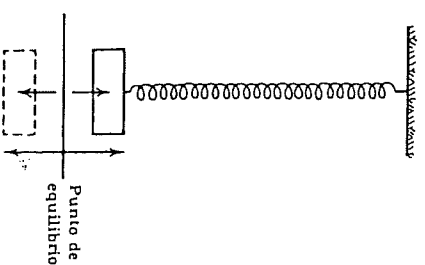


Fig. 5.2. Ejemplo de movimiento armónico simple

en cualquier posición extrema, donde la velocidad momentáneamente vale cero, la velocidad cambia más rápidamente ( $a = \text{máximo}$ ). Este movimiento es el que se llama *movimiento armónico simple* (Fig. 5.3). La importancia de esta clase de movimiento consiste en que se produce cuando un cuerpo elástico deformado es liberado de la fuerza deformadora y las vibraciones resultantes tienen lugar en línea recta. Por supuesto, existen tipos más complicados de vibración, pero todas las vibraciones rectilíneas de pequeña amplitud son, en primera aproximación, movimientos armónicos simples.

**Características de los movimientos vibratorios.** Una vibración armónica simple, por ser un movimiento periódico, se especifica a menudo por su *frecuencia*, definida como el nú-

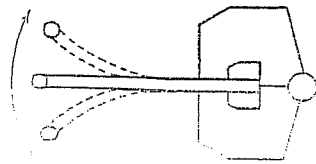


FIG. 5.3. Un fleje de acero está sujeto en un tornillo de banco; éste es otro ejemplo de movimiento armónico simple

mero de vibraciones completas que tiene lugar en el lapso de un segundo [una vibración por segundo se llama hertz (Hz)]; por ejemplo, si un muchacho, de pie en un trampolín, salta dos veces por segundo, su frecuencia es de dos vibraciones por segundo, o de dos Hz, lo que es equivalente a decir que se necesita medio segundo para una vibración. El lapso de tiempo necesario para que tenga lugar una vibración, se llama el *período* de ésta. Por consiguiente, el período es recíproco de la frecuencia, es decir, es la unidad dividida por la frecuencia. Estos dos conceptos, la frecuencia y el período, proporcionan generalmente los medios para especificar de modo cuantitativo, los movimientos vibratorios.

La *amplitud* de una vibración es el máximo desplazamiento medido a partir de la posición de equilibrio y no debe ser confundido con la distancia recorrida en un vaivén, que es el doble de la amplitud.

**Resonancia.** Todos los cuerpos tienen periodos naturales —o frecuencias— de vibración los cuales dependen de sus masas, sus características geométricas y del modo como fueron puestos en vibración, por lo que el fenómeno de *resonancia* es importante. Un cuerpo se pone muy fácilmente en vibración cuando recibe una fuerza que actúe periódicamente con la misma frecuencia natural del cuerpo. Un niño aprende fácilmente cómo hacer oscilar a un columpio, esto es, aprende que el movimiento del columpio puede adquirir una amplitud considerable si en instantes apropiados lo impulsa de acuerdo con el periodo natural del columpio. El clavavista en el trampolín también aprende a aprovechar la frecuencia de dicho trampolín para aumentar su velocidad inicial.

y *gases*, dependiendo de si presentan o no una superficie libre —por ejemplo, un recipiente puede contener sólo la mitad de su volumen de agua, pero con un gas es diferente; si el recipiente contiene sólo aire siempre estará completamente lleno, sea poco o sea mucho, porque el aire no presenta superficie libre (Fig. 5.6), sino que sólo cambia su presión (véase la Pág. 60 para la definición de presión en los fluidos).

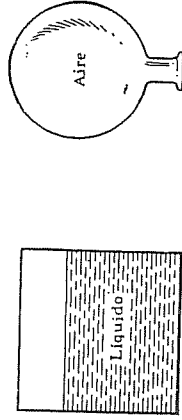


FIG. 5.6. Un recipiente parcialmente lleno de líquido presenta una superficie libre; pero un gas siempre lo llena por completo

Es claro que el estudio de los líquidos en reposo (*hidrostática*) —como, por ejemplo, el agua en estanques, columnas abiertas, pozos, tubos de ensayo, etc.— incluye sólo la fuerza de la gravedad sobre el líquido en conjunto, es decir, una sola fuerza externa que no incluye fuerzas internas de tipo tangencial, porque únicamente pueden aplicarse fuerzas perpendiculares a la superficie de un líquido; por consiguiente, la superficie libre de un líquido es horizontal y perpendicular al hilo de la plomada, la que, estrictamente hablando, indica la dirección de la fuerza de gravedad.

**Densidad.** El estudio de los fluidos requiere un vocabulario especial. El concepto de densidad, aunque no está restringido a los fluidos, es muy importante en el desarrollo de esta rama de la física, porque es uno de aquellos conceptos en función de los cuales se derivan otros. Por lo común, se está más familiarizado con el término "densidad", y por lo general se emplea para distinguir entre sustancias más o menos masivas. Por ejemplo, se aprecia fácilmente una distinción marcada entre el plomo y el aluminio en términos de masa, pero la definición técnica de *densidad* —masa por unidad de volumen— no es una noción común (Fig. 5.7). La *densidad* se define como la relación entre la masa de un cuerpo y su volumen (kilogramos

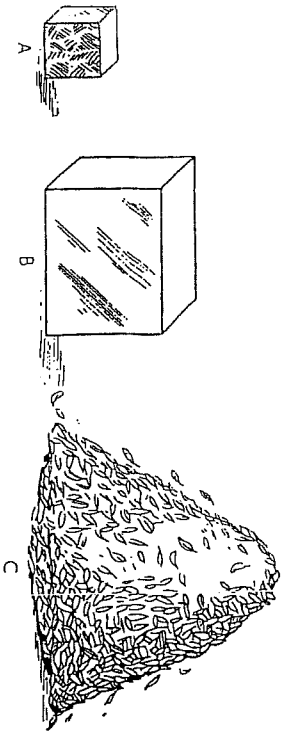


Fig. 5.7. Un kilogramo de (A) plomo, (B) aluminio y (C) plumas, ilustrando las diferencias en densidad

por metro cúbico, gramos por centímetro cúbico, etc.), es decir, es la masa por unidad de volumen.

El *peso específico* se define como el peso por unidad de volumen (newtons por metro cúbico, pondios por centímetro cúbico) y no debe confundirse con la densidad.

**Densidad relativa.** Este término significa la relación entre la densidad de una sustancia y la del agua y proporciona una manera de expresar la masa relativa de un cierto volumen de dicha sustancia con respecto al mismo volumen de agua; por consiguiente, es un número sin unidades. Los automovilistas a menudo se refieren a esta magnitud al medirla en el líquido de los acumuladores.

**Presión en los fluidos.** Este concepto, ya mencionado, será tratado a continuación. Como no puede ejercerse en un fluido una fuerza tangencial, se sigue que la única fuerza que puede recibir un fluido debe ser perpendicular a su superficie (recuérdese el velero del que se habló en la Pág. 45). Por consiguiente, las paredes del recipiente que contiene un fluido ejercen una fuerza contra él, pero sólo perpendicularmente. Además, la fuerza total recibida por el fluido evidentemente depende del área total sobre la que actúa. En términos de la fuerza perpendicular por unidad de área, la fuerza total se encuentra multiplicándola por el número de unidades de área. Esta fuerza por unidad de área perpendicular a la superficie se llama *presión hidrostática*. Por ejemplo, si la presión en un tubo de agua es de 80 N por centímetro cuadrado, esto significa que sobre cada centímetro cuadrado de superficie interior del tubo, actúa normalmente una fuerza de 80 N, independientemente

del tamaño del tubo. Una consecuencia interesante a la que no es fácil llegar, es que una fuerza de sólo una fracción de newton puede ser suficiente para detener un escape de líquido, si el área de la sección recta de la abertura es sólo una pequeña fracción de un centímetro cuadrado. Por consiguiente, debe hacerse una distinción cuidadosa entre el concepto de presión y el de fuerza total, si se razona inteligentemente en relación a estos temas.

Puede demostrarse que la presión en un punto colocado abajo de la superficie de un fluido depende de su profundidad. Así, es muy fácil calcular la presión del agua, por ejemplo, en la base de un tubo vertical; además, puesto que la presión en un punto dado depende sólo de la profundidad, se infiere que en dos recipientes abiertos, comunicados entre sí por el fondo y conteniendo el mismo líquido, el nivel de líquido en uno de ellos debe ser el mismo que en el otro, ya que la presión en el fondo por donde se comunican no puede tener diferentes valores, como sería si los niveles fueran diferentes; por eso se dice que los líquidos "buscan" su propio nivel bajo estas circunstancias (Fig. 5.8). Por esta razón a menudo se necesita instalar bombas en los sótanos de las casas, si el nivel del agua en el terreno alrededor de la casa es mayor que el de los cimientos.

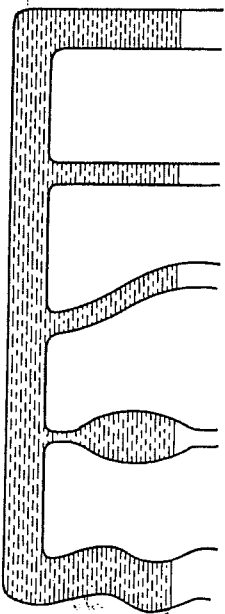


Fig. 5.8. Un líquido "busca su propio nivel" en los vasos comunicantes, cualquiera que sea la forma de éstos

**Flotación.** Es bien sabido que los cuerpos cuya densidad relativa es menor que la unidad, flotan en el agua (Fig. 5.9) Esto nos lleva al importante concepto llamado *flotación*, que se trata con el Principio Fundamental de Arquímedes. Cuando un cuerpo se sumerge total o parcialmente en un fluido, evidentemente una cierta porción del fluido es desplazado. Teniendo en cuenta la presión que el fluido ejerce sobre el cuerpo, se infiere



La madera flota en el agua, pues su densidad es menor que la del agua

El hierro flota en el mercurio

Fig. 5.9

que el efecto neto de las fuerzas de presión es una fuerza resultante apuntando verticalmente hacia arriba, la cual tiende, en forma parcial, a neutralizar a la fuerza de la gravedad, también vertical, pero apuntando hacia abajo. La fuerza ascendente se llama fuerza de empuje o fuerza de flotación y puede demostrarse que su magnitud es exactamente igual al peso del fluido desplazado. Por tanto, si el peso de un cuerpo es menor que el del fluido que desplaza al sumergirse, el cuerpo debe flotar en el fluido y hundirse si es más pesado que el mismo volumen del líquido donde está sumergido. El principio de Arquímedes es un enunciado de esta conclusión, del todo comprobada, que dice que todo cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido, está sometido a una fuerza igual al peso del fluido desalojado. Este principio explica el funcionamiento de un tipo de hidrómetro empleado universalmente en los talleres para determinar el peso específico del líquido de las baterías de los automóviles. Un flotador se hunde o no hasta cierta señal, dependiendo del peso específico de la solución en la que flota (Fig. 5.10). Así, el grado de carga eléctrica de la batería puede determinarse, pues depende del peso específico de la solución.

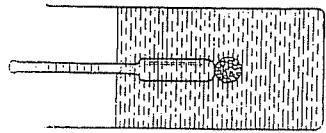


Fig. 5.10. Un hidrómetro mide el peso específico de un líquido

Gases. De acuerdo con la definición ya explicada, los gases son fluidos, por lo que las consideraciones anteriores se aplican al océano del aire que rodea a la Tierra y que constituye nuestra atmósfera. El aire tiene masa y, por consiguiente, densidad. Los globos flotan en el aire de acuerdo con el Principio de Arquímedes, justamente como los barcos flotan en el mar (Fig. 5.11). Variando su lastre, un globo puede hacerse que ascienda o descienda del mismo modo que un submarino puede hacerse que flote o se hunda.

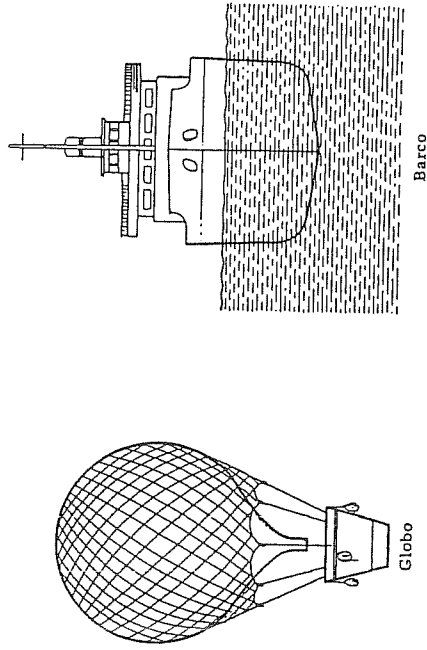


Fig. 5.11. Los globos flotan en el aire del mismo modo que los barcos flotan en el agua

La presión atmosférica y el barómetro. La superficie de la Tierra es el soporte de la atmósfera y sobre aquélla se presenta una presión hidrostática causada por peso del aire. La llamada presión atmosférica vale aproximadamente 1 kilopondio por centímetro cuadrado o 10 N por centímetro cuadrado y se mide fácilmente empleando varios tipos de barómetros ahora en uso. Se puede apreciar el valor de la presión atmosférica con el siguiente experimento: un tubo delgado de vidrio, como de 1 m de largo, se llena de mercurio, y tapándolo con un dedo se invierte, quitando el dedo después que el extremo se sumerge en un depósito de mercurio. El mercurio contenido en el tubo sale sólo parcialmente de éste (Fig. 5.12). Una columna de unos 76 cm de mercurio permanece en el tubo, con un espacio vacío encima, porque la presión en el fondo del tubo,

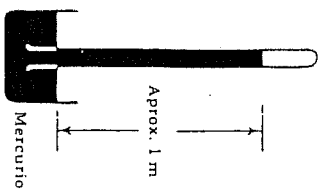


FIG. 5.12. Columna barométrica

que es el lugar donde éste se comunica con el depósito de aire (la atmósfera), es precisamente la que existe en un punto a 76 cm de profundidad en el Hg, un líquido cuya densidad vale entre 13 y 14 veces la del agua. Por consiguiente, una bomba aspirante no puede levantar una columna de agua de unos 10 m de altura, porque la acción de la bomba consiste solamente en remover el aire del tubo arriba del agua, para que la presión atmosférica obligue al agua a ascender.

**Medida de la altitud.** La presión de la atmósfera varía ligeramente casi de continuo, debido a las condiciones meteorológicas. Muchas predicciones sobre el clima se basan en buena proporción en las lecturas barométricas.

La altitud puede medirse también con el barómetro, porque la presión atmosférica disminuye al aumentar aquélla, lo que es evidente, ya que a grandes altitudes, el aire encima de un punto dado pesa menos que arriba de otro punto de menos altitud. Los aviadores emplean este fenómeno para medir su elevación. La altura de muchas montañas se ha obtenido observando el descenso del mercurio en el barómetro, cuando éste se ha transportado desde la base a la cima de la montaña.

**Principio de Pascal.** Regresando a la discusión de la presión que ejerce un líquido, se tiene otra interesante consecuencia derivada de consideraciones fundamentales. Si dos tubos verticales de diferente sección transversal se comunican entre sí y se llenan parcialmente con un líquido, de modo que presenten dos superficies libres al mismo nivel, la aplicación de una presión adicional a una de ellas, se transmite, sin pérdida, a la otra (Fig. 5.13). Este enunciado se conoce como *Principio*

A veces los efectos de resonancia son indeseables y deben ser evitados. A menudo se observa que a ciertas velocidades un automóvil vibra más fácilmente que en otras; esto se debe a la coincidencia entre las frecuencias de vibración producidas por las irregularidades de la carretera y las producidas por la rotación de un motor y otros componentes giratorios del automóvil, como neumáticos desbalanceados, ruedas girando, etc. Dos vibraciones de la misma frecuencia se dice que se encuentran en fase si ambas se inician simultáneamente. La resonancia tiene lugar cuando dos vibraciones semejantes se encuentran en fase, y no se produce cuando están fuera de fase o defasadas.

**El péndulo simple.** Otro movimiento vibratorio, que muy aproximadamente es un movimiento armónico simple, es el de péndulo simple. Este péndulo consiste sólo en una bola pequeña y pesada colgada de una cuerda flexible y relativamente larga, animada de un movimiento de vaivén (Fig. 5.4). Una interesante característica del movimiento pendular se supone que fue descubierta, en su sentido científico, por Galileo,

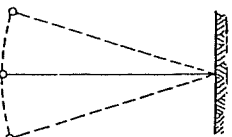


FIG. 5.4. El péndulo simple

quien encontró que el periodo de vibración de un péndulo depende de la raíz cuadrada de la relación entre su longitud y la aceleración de la gravedad en el lugar donde esté el péndulo:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

También descubrió que el periodo es el mismo, cualquiera que sea la amplitud de la oscilación, siempre que ésta no sea muy grande. El péndulo del reloj del abuelo, aunque realmente no es un péndulo simple—debido a que toda su masa no está concentrada en una bolita—ilustra estas características. El estudiante podrá inferir fácil y correctamente que un método de determinar la aceleración de la gravedad en un lugar deter-

minado de la Tierra consiste en medir (por supuesto con gran precisión) el periodo de un péndulo simple. Este método es empleado por las oficinas geodésicas para determinar, en diversos puntos de la superficie terrestre, la aceleración de la gravedad.

**El estudio de los líquidos, una parte de la elasticidad.** Antes de seguir adelante con el tema de las vibraciones y sus efectos en la materia, como una consecuencia de sus propiedades elásticas, una presentación estrictamente lógica de los fenómenos de la física requiere que ahora estudiemos otro grupo de fenómenos relacionados con elasticidad, a saber, los fenómenos relacionados con los líquidos.

La elasticidad fue definida como la propiedad que tiene la materia de recuperarse de las deformaciones. Si de las diversas clases de éstas se hace una lista, en ella deberán incluirse el alargamiento, la compresión lineal, la compresión o expansión total y la torsión o deslizamiento (Fig. 5.5). La última de ellas, el deslizamiento, en donde la fuerza se aplica tangencialmente a la superficie, desempeña un importante papel porque proporciona un medio de clasificar a la materia.

La materia se clasifica fácilmente en dos grupos principales llamados *sólidos* y *fluidos*, según presenten o no resistencia a una fuerza tangencial. Aunque no siempre es posible encontrar en cada caso una distinción clara, esta clasificación natural es útil. Un fluido no puede contrarrestar una fuerza transversal, por lo que es imposible torcer una columna líquida. Convencionalmente los fluidos se subdividen en dos grupos, *líquidos*

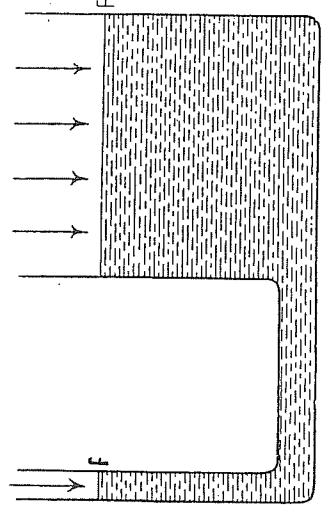


Fig. 5.13. Principio de Pascal. Una fuerza pequeña  $f$  actuando sobre el líquido del tubo menor, es capaz de equilibrar una fuerza grande  $F$  actuando sobre el líquido del tubo mayor en proporción a las respectivas áreas de la sección recta. Este principio se aplica a los frenos hidráulicos, elevadores, sillones de peluquería, etc.

de Pascal. Este principio se utiliza en muchos aparatos, incluyendo los frenos hidráulicos de los automóviles modernos.

Como una consecuencia de la transmisión sin pérdida de presión, la fuerza total sobre la superficie pequeña de la Fig. 5.13 es proporcional a la fuerza total sobre la superficie mayor, en la misma razón que dichas superficies lo son entre sí. Por ejemplo, debido al principio de Pascal, una fuerza de 10 N actuando sobre  $1 \text{ cm}^2$  se equilibra con una fuerza de 100 N actuando sobre una área de  $10 \text{ cm}^2$ ; en ambos casos la fuerza por unidad de área es la misma.

Las aplicaciones del principio de Pascal son evidentes. La prensa hidráulica funciona porque tiene dos cilindros de áreas diferentes conectadas entre sí. En el caso del pedal del freno de un automóvil al oprimirlo se ejerce una presión en un cilindro lleno de líquido; misma que se transmite por medio de tubos a pistones de mayor área, para que ejerzan grandes fuerzas de frenado. Los elevadores hidráulicos, como los empleados en las estaciones de servicio, representan otra aplicación.

**Sumario.** En este capítulo se ha visto que la materia presenta elasticidad. Esta propiedad explica los movimientos vibratorios, tales como los que pueden adquirir los resortes de todas clases. El movimiento armónico simple es el tipo más sencillo de movimiento vibratorio. La materia se divide en dos clases,

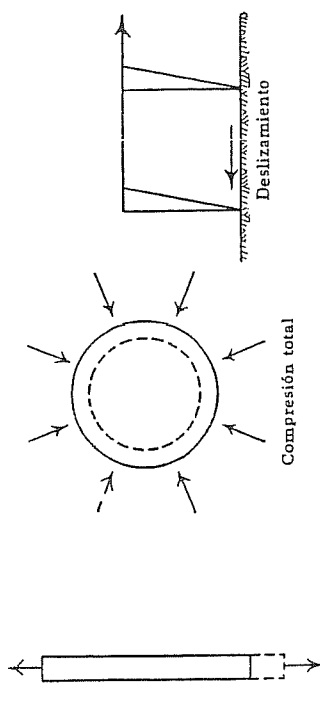


Fig. 5.5. Varios tipos de deformaciones

sólidos y fluidos, de acuerdo con sus propiedades elásticas. Los fluidos son los líquidos y los gases; unos y otros exhiben varias propiedades específicas, tales como ejercer fuerzas de empuje, transmitir presiones, etc. El principio de Arquímedes describe la relación entre la fuerza de empuje y el fluido desplazado. La atmósfera es un fluido que ejerce una presión sobre todos los cuerpos; dicha presión se mide por la columna barométrica y sirve también para medir la altitud. El principio de Pascal explica el funcionamiento de muchas máquinas, como los elevadores y los frenos hidráulicos. Por consiguiente, el estudio de los fluidos es una parte muy importante de la física.

## CUESTIONARIO

1. ¿Qué quiere decir elasticidad?
2. ¿Será el hule más o menos elástico que el acero? ¿Por qué?
3. Describese el funcionamiento del dinamómetro.
4. Distingase entre esfuerzo unitario y deformación unitaria.
5. Defina el periodo de vibración.
6. Defina la amplitud de vibración.
7. Describa cómo cambia el periodo de vibración de un auto-móvil cuando se le agrega una carga.
8. Describa cómo se mide, por medio de un péndulo, el valor de la aceleración de la gravedad.
9. ¿Cuál es la distinción entre un sólido y un fluido?
10. ¿Por qué se dice que el agua busca su propio nivel?
11. ¿Cómo funciona realmente la bomba aspirante?
12. La bomba aspirante ¿sirve para sacar agua de un nivel situado a 11 m abajo del nivel del piso? Explique su respuesta.
13. Si se mantiene constante la temperatura y se lleva un barómetro a una montaña, ¿se afecta la lectura de éste?
14. ¿Qué dice el principio de Pascal? Póngase un ejemplo.
15. ¿Por qué cuando existe una fuga de líquido en un pistón de un freno hidráulico, no funcionan los otros tres?

## Capítulo 6 ONDAS Y SONIDO

Todos los temas discutidos bajo el encabezado de elasticidad, incluyendo a los fluidos en reposo, se agrupan por lo general bajo el título *Estática de la Elasticidad*, que es una rama de la mecánica de los cuerpos deformables. Cuando la deformación se propaga a través de la materia—produciéndose las llamadas *ondas elásticas*—su estudio se llama *Dinámica de la Elasticidad*.

**Conceptos fundamentales.** Es sabido que las deformaciones pueden transmitirse a través de los medios materiales. Una pequeña deformación—por ejemplo, una compresión localizada o una deformación tangencial—se transmite fácilmente a lo largo de un resorte (Fig. 6.1). Además, todos sabemos que una piedra arrojada sobre la superficie del agua en reposo produce primero una depresión y después una sucesión de

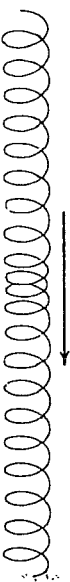


Fig. 6.1. Una compresión se transmite a lo largo de un resorte

elevaciones (crestas) y depresiones (valles) que se desplazan radialmente por toda la superficie del líquido, moviéndose del punto de origen hacia afuera con una velocidad definida (Fig. 6.2). Este fenómeno se llama *movimiento ondulatorio*. Técnicamente, el movimiento ondulatorio se define como la propagación de deformaciones a través de un medio deformable. Generalmente, las perturbaciones periódicas se producen por una fuente de vibración. El medio recibe una sucesión de vibraciones, moviéndose cada porción de él solamente a un lado y



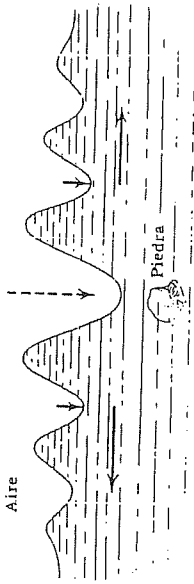


Fig. 6.2. Sección transversal de las elevaciones y depresiones que se propagan desde el punto en que cayó una piedra sobre la superficie del agua. El medio vibra alrededor de su posición de equilibrio

otro de su posición de equilibrio, pero la perturbación se mueve a lo largo del medio. Debe notarse que el medio mismo no se traslada; en realidad es más aproximado decir que lo que se traslada es solamente la energía.

**Características de la onda.** Las ondas tienen numerosas características, siendo una de ellas su velocidad. Por medio de un cronómetro y una regla se puede determinar fácilmente el tiempo que tarda en pasar una determinada onda a lo largo de una distancia conocida  $y$ , por tanto, determinar la velocidad de la onda. La distancia entre dos crestas sucesivas, o entre dos valles sucesivos, o más generalmente, entre dos configuraciones sucesivas semejantes, se llama la *longitud de onda* (Fig. 6.3). Por lo común, la longitud de onda se simboliza con la letra griega lambda ( $\lambda$ ).

Un tren de ondas en movimiento tiene también *frecuencia* —recibe este nombre el número de crestas que pasan por un punto dado en cada segundo—. Es claro que se tiene la siguiente relación: la distancia entre dos crestas sucesivas (longitud de onda), multiplicada por el número de crestas que pasan en un segundo (frecuencia), es igual a la velocidad del movi-

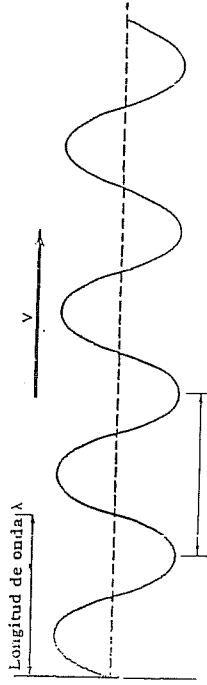


Fig. 6.3 La velocidad es igual a la longitud de onda multiplicada por la frecuencia

miento de la onda; probablemente ésta es la más fundamental de todas las relaciones. También es evidente que la frecuencia del movimiento ondulatorio es igual a la frecuencia de la perturbación que la produce. Por ejemplo, una lámina vibrando transmite un movimiento ondulatorio en el medio en que se encuentra —tal como el aire— con una frecuencia igual al número de veces en que verifica vibraciones completas en un segundo. La longitud de onda así producida depende de las características elásticas del medio, como su densidad y su rigidez, etc., la cual, generalmente, se expresa en términos de la velocidad  $v$ , misma que, como ya se ha dicho, depende directamente de la frecuencia  $f$  y de la longitud de onda  $\lambda$ :

$$v = f\lambda$$

Otro concepto fundamental es la *amplitud* de la onda, definida como el máximo desplazamiento a partir de la posición de equilibrio (Fig. 6.3).

**Tipos de ondas.** Las ondas pueden ser clasificadas del modo siguiente: *ondas transversales*, como las ondas ya mencionadas que se producen cuando una piedra se deja caer en un tanque de agua y que se caracterizan porque los desplazamientos del medio son siempre perpendiculares a la dirección de propagación (la superficie del agua se mueve de arriba hacia abajo, mientras que la propagación es horizontal), y las *ondas longitudinales*, que son aquellas en donde los desplazamientos son siempre de adelante hacia atrás, pero en la dirección de propagación. Las ondas sonoras en el aire son de este tipo; compresiones y rarefacciones del medio pasan de largo en una dirección paralela a la oscilación de las moléculas de aire. Estos son los dos tipos más comunes y a los que, por lo general, se limita elementalmente la discusión, pero en tratados más avanzados se estudian, entre otras, a las ondas torsionales, circulares, esféricas y elípticas.

**Representación de las ondas.** Mientras que la Fig. 6.3 sugiere la apariencia de un tren de ondas en el agua o, en general, de cualquier clase de onda transversal, ciertamente no ilustra la apariencia de una onda de compresión. Por otro lado, una gráfica de desplazamiento representada con relación al tiempo, independientemente del tipo de desplazamiento —ya sea transversal, longitudinal, torsional, etc.— produce una curva como

La de la Fig. 6.4, a la que matemáticamente se le llama una senoide, porque es la representación gráfica de un movimiento armónico simple (Pág. 73) que es, en primera aproximación, el tipo de movimiento que produce ondas elásticas. Por consiguiente, una gráfica como la de la Fig. 6.4 es muy conveniente para fines de representación.

**Otras consideraciones sobre la naturaleza de las ondas.** Como el movimiento ondulatorio ha llegado a ser un concepto de gran importancia en física por sus aplicaciones a las radiaciones electromagnéticas —que incluyen la luz, los rayos X, los rayos gamma, los de radio, radar y televisión, etc.— debe tenerse en cuenta que el concepto original de una onda elástica se ha extendido a otros campos. Como se definió anteriormente, la onda elástica necesita un medio que se mueva, pero las llamadas ondas electromagnéticas se mueven en el vacío. La representación de las ondas por medio de una "línea ondulada" (Fig. 6.4) sugiere una ecuación matemática de la onda, puesto que es solamente una representación gráfica de una función matemática del desplazamiento con respecto al tiempo. Actualmente cualquier variación observada que obedezca a la llamada

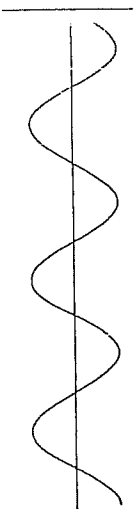


Fig. 6.4. Toda onda puede representarse diagramáticamente por la figura de una onda sencilla

ecuación de la onda, se trata como un movimiento ondulatorio. Estas observaciones incluyen las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos (que serán definidos posteriormente) así como variaciones en la probabilidad de que un electrón se encuentre en un punto dado, por lo que los átomos y la materia por lo general se describen en términos de ondas. Así, el concepto de onda se ha vuelto mucho más general que el original de la onda elástica, pero las características de la onda, sus propiedades y la terminología discutidas e ilustradas por las ondas elásticas se aplican a las ondas en general.

**Interferencia de ondas.** La representación ondulatoria ofrece, entre otras cosas, un modo sencillo de representar la superposición de varias ondas, que es un fenómeno común. Cuando dos ondas se superponen (como, por ejemplo, dos ondas en el agua) el resultado depende de las condiciones en que tuvo lugar el fenómeno; si dos ondas semejantes de igual amplitud se encuentran en fase —esto es, si una cresta coincide con una cresta y un valle con un valle— el resultado es una onda reforzada de doble amplitud que cualquiera de las ondas componentes. Si las dos ondas se encuentran fuera de fase —esto es, si las crestas de una coinciden con los valles de la otra— las ondas se anulan entre sí. También podrá haber condiciones en que la onda resultante es intermedia entre un refuerzo completo y una nulificación completa. Estos fenómenos generales se refieren como *interferencias* incluyendo tanto el tipo constructivo como el destructivo (Fig. 6.5).

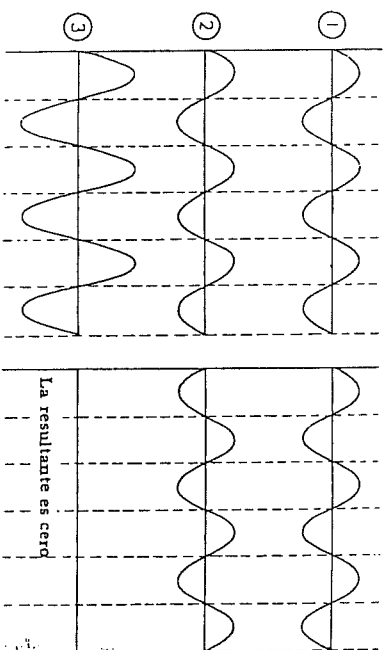


Fig. 6.5. Interferencia constructiva y destructiva de ondas; la onda 3 es la resultante de las ondas 1 y 2

**Pulsaciones.** Como ya se habrá deducido, el fenómeno de interferencia desempeña un papel muy importante en el estudio de las ondas. Cuando dos ondas continuas y semejantes de frecuencias ligeramente diferentes se superponen, en la onda resultante se alternan las interferencias constructivas y destructivas, presentándose el fenómeno de las *pulsaciones*, cuya frecuencia es igual a la diferencia entre las dos frecuencias originales (Fig. 6.6). Esto se percibe fácilmente en el caso de

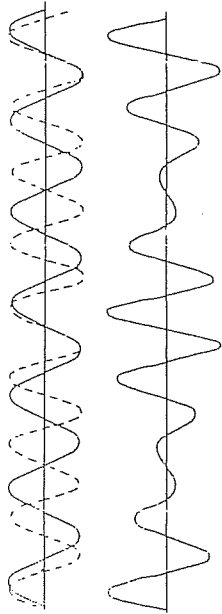


FIG. 6.6. Las pulsaciones se producen cuando dos ondas de casi la misma frecuencia se encuentran en fase sólo por algún tiempo.

las ondas sonoras, haciendo vibrar dos diapasones de aproximada, no exactamente, la misma frecuencia.

**Reflexión de ondas.** Las ondas se *reflejan* en el límite entre dos medios justamente como una bola de tenis puede rebotar en el piso, así las ondas en el agua pueden ser reflejadas por un obstáculo colocado en el medio en donde se originan. Un análisis completo de la reflexión no es aquí posible, pero diremos que incluye principalmente un estudio más avanzado de las propiedades elásticas de la materia.

**Refracción de ondas.** El cambio de velocidad que sufre una onda cuando pasa de un medio a otro se llama *refracción* (Fig. 6.7). Este es otro concepto importante que desarrollaremos más adelante, especialmente en el estudio de la óptica.

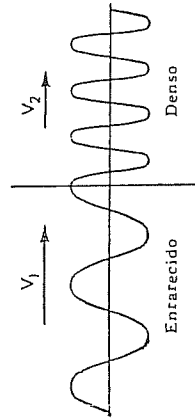


FIG. 6.7. Refracción de ondas. Las ondas sufren un cambio de velocidad —es decir, se refractan— cuando pasan de un medio a otro de diferentes características elásticas (rigidez y densidad). En consecuencia, la longitud de la onda también cambia.

**Ondas estacionarias.** Cuando una onda que recorre en una dirección un medio dado, interfiere con una onda semejante de la misma longitud y recorriendo el medio con la misma velocidad, pero en sentido opuesto, se desarrolla una situación

interesante. La onda resultante es un movimiento ondulatorio de un tipo muy especial: cada porción de la vibración resultante pasa por la posición de equilibrio en el mismo instante, es decir, hay ciertos puntos o regiones en el medio en vibración donde siempre existe equilibrio y otros puntos o regiones donde es máxima la perturbación. La configuración obtenida se llama *onda estacionaria* porque las ondas no avanzan, sino que permanecen en el mismo lugar. Los puntos o regiones de mínima perturbación se llaman *puntos nodales* o *nodos*, y los puntos o regiones de máxima perturbación se llaman *antinodos* o *vientres* (Fig. 6.8). Estas condiciones se llenan cuando una onda, moviéndose a lo largo de un medio, se encuentra con su propia reflexión regresando con la misma velocidad y longitud de onda. Evidentemente, los efectos de resonancia se perciben

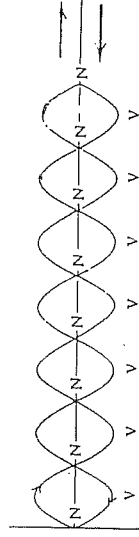


FIG. 6.8. Los nodos y los vientres de una onda estacionaria se producen por dos ondas de la misma longitud y amplitud, pero moviéndose simultáneamente con sentidos opuestos.

con facilidad bajo aquellas circunstancias donde la relación de fases es favorable. Debido a la existencia de las frecuencias naturales de vibración ya mencionadas, fácilmente se establecen en los cuerpos las ondas estacionarias. Así, es natural, para una cuerda de violín, fija en sus extremos, vibrar en una configuración de onda estacionaria con un vientre en el centro y con nodos en los extremos. De modo semejante, es fácil obligar a la columna de aire contenida en un tubo, abierto en cada extremo, que tome la configuración de la onda estacionaria con vientres en cada extremo y un nodo en el centro.

**Sobretonos.** Existen muchos modos naturales de vibración para una cuerda, para una columna de aire o para cualquier otro cuerpo. Considerando como natural para una cuerda —como una de violín— fija en cada extremo, el que vibre con un vientre en el centro, esto es, con un solo segmento, le es también natural vibrar en dos segmentos con un tercer nodo en el centro; también son posibles vibraciones formando tres o más

segmentos. En realidad, es posible para dicha cuerda o para una columna de aire vibrar formando cualquier número entero de segmentos (Fig. 6.9). Estos varios modos de vibración se llaman *sobretonos* con respecto a la vibración de un solo segmento, llamado el modo o vibración fundamental; la longitud de onda del modo fundamental es justamente el doble del largo del segmento. Bajo ciertas restricciones uno o más sobretonos pueden ser imposibles. A menudo es más fácil que un cuerpo

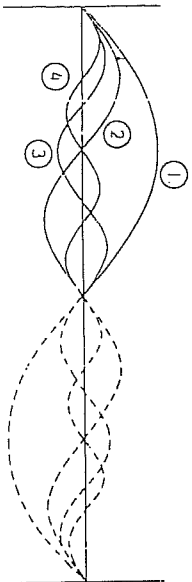


Fig. 6.9. Una cuerda vibrando en (1) un segmento, (2) dos segmentos, (3) tres segmentos, (4) cuatro segmentos, es decir, en su vibración fundamental y con las frecuencias que corresponden a su primero, segundo y tercer sobretonos

vibre con uno de sus sobretonos que en su modo fundamental, ya que por lo general éste requiere más energía que el primero. En general, una vibración es una combinación simultánea del modo fundamental con varios sobretonos, siendo estas vibraciones por lo común muy complicadas, necesitándose un análisis muy cuidadoso para determinar todas sus componentes. Es matemáticamente posible considerar cualquier vibración como una combinación de vibraciones armónicas simples, por lo que el estudio de una vibración sencilla adquiere una importancia adicional. Debemos tener presente que toda la materia se encuentra en un estado de continua vibración, debido a que vibran sus átomos y moléculas; por consiguiente, puede inferirse que las vibraciones y las ondas asociadas con ellas son, quizá, el más fundamental de todos los fenómenos naturales.

**Figuras de Chladni.** Las vibraciones de placas y de varillas pueden producir figuras, debidas a las ondas estacionarias, muy complicadas, pero que pueden ser muy fácilmente observadas espolvoreando sobre ellas arena fina cuando se encuentran en vibración. La arena se acumula en los nodos y se aleja de la vecindad de los vientres. Estos diseños de arena y placas en vibración se llaman *figuras de Chladni*. (Fig. 6.10.)

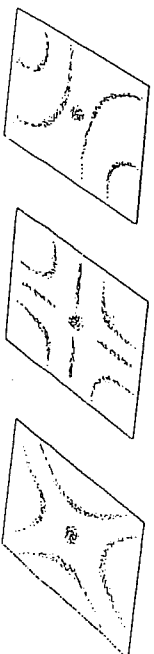


Fig. 6.10. Típicas figuras de Chladni producidas espolvoreando arena fina en las placas sujetas por su centro y luego frotadas con un arco de violín mientras la placa se sostiene en diferentes puntos

**Aparato de Kundt.** La configuración de una onda estacionaria en columnas de aire horizontales, puede observarse por medio de polvo fino de corcho esparcido uniformemente a lo largo del fondo de un tubo transparente horizontal. Cuando el aire es puesto en vibración, el polvo de corcho se acumula formando montones regularmente espaciados. Este aparato se llama *aparato de Kundt*. (Fig. 6.11.) Este aparato se emplea para medir la velocidad de las ondas sonoras en una columna de aire. La distancia entre los centros de dos montones suce-

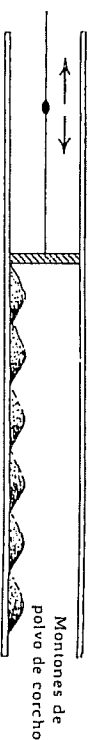


Fig. 6.11. Tubo de Kundt para determinar la velocidad del sonido por medio de las ondas estacionarias; el polvo de corcho forma montículos a lo largo del interior del tubo de vidrio cuando la varilla longitudinalmente

sivos de polvo de corcho, es la mitad de la longitud de onda de la vibración, porque los nodos están separados por media longitud de onda. La longitud de onda multiplicada por la frecuencia conocida de vibración, suministra la velocidad deseada.

**Aparato de Melde.** Las ondas estacionarias en una cuerda se demuestran fácilmente estirando ésta entre un punto fijo y el extremo de un diapason accionado eléctricamente, el que comunica la vibración deseada. Ajustando la tensión de la cuerda, puede hacerse vibrar en cualquiera de sus modos naturales. Este instrumento se llama *aparato de Melde* y se emplea para determinar la relación precisa entre la tensión, el número de segmentos, la masa de la cuerda y la frecuencia de vibración. (Fig. 6.12.)

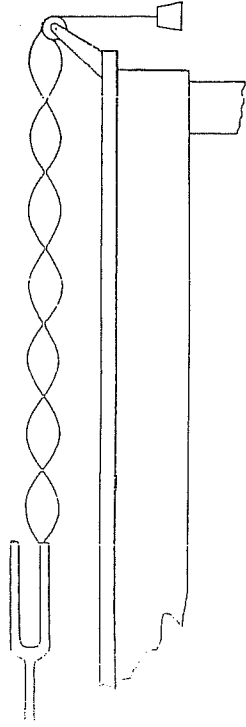


FIG. 6.12. El aparato de Melde consiste en una cuerda estirada, unida al extremo de un diapason en vibración. Se forman ondas estacionarias en la cuerda, según sea la tensión comunicada por el peso colgado de una polea

**Principio de Doppler.** Uno de los principios más sorprendentes asociados con el movimiento ondulatorio es el *principio de Doppler*, que consiste en el aparente cambio de frecuencia de un movimiento ondulatorio cuando la fuente del movimiento y el observador se mueven entre sí. Este fenómeno se observa fácilmente en las ondas sonoras como veremos a continuación. Cuando una fuente de ondas y un observador se aproximan entre sí, las ondas se acumulan produciendo el efecto de aumentar el número de ondas que pasan por un punto dado en un segundo, es decir, de aumentar la frecuencia. (Fig. 6.13.) Puesto que la velocidad depende del medio y es, por tanto, constante en un medio dado, la longitud de onda se acorta en correspondencia. El caso contrario también se presenta; es decir, la frecuencia aparente disminuye y la longitud de onda aumenta si la fuente y el observador se alejan entre sí. En el

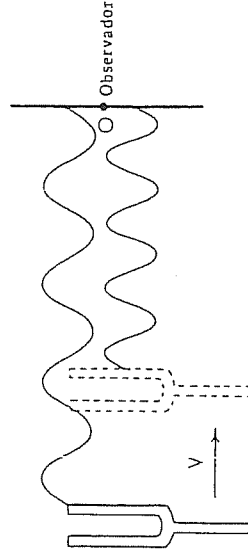


FIG. 6.13. Principio de Doppler. Conforme el diapason se mueve a la derecha con la velocidad  $V$ , las ondas se acumulan y llegan a O con mayor frecuencia que la que tendrían si el diapason no se moviera

caso del sonido el tono resulta más grave en este caso y más agudo en el primero.

Este principio, cuando se aplica a la luz, le sirve al astrónomo para determinar la velocidad de ciertas estrellas y planetas cuando su movimiento es de acercamiento o de alejamiento de la Tierra. Evidentemente, el sólo telescopio es insuficiente para suministrar la información necesaria, excepto cuando el movimiento es cruzando el cielo, esto es, perpendicular a la línea de visión.

**El sonido como un fenómeno ondulatorio.** Hemos hecho numerosas referencias a los fenómenos acústicos en esta discusión, porque el sonido es el más conocido de los fenómenos ondulatorios. El sonido no es sino un movimiento ondulatorio de la materia (por lo general, el aire) de un tipo puramente mecánico. Aunque por lo común se restringe a aquellas vibraciones elásticas capaces de estimular nuestro oído, no hay ninguna razón para ello: de modo generalizado, la palabra "sonido" se aplica a cualquier onda elástica que se propague en la materia; así, actualmente, se habla de "supersónica" donde se consideran vibraciones más allá del tramo audible.

El oído humano puede percibir sonido cuando éste es de unas 20 a 20 000 vibraciones por segundo. Se percibe un sonido audible cuando cualquier cuerpo vibra con una frecuencia entre los límites anteriores y con una intensidad apropiada en un medio capaz de soportar y propagar las vibraciones. Para producir un sonido, bastan impulsos transmitidos por el aire, independientemente del modo como se produzcan como, por ejemplo, por un chorro intermitente de aire obtenido al pasar por los agujeros de un disco giratorio, o por la vibración de lengüetas, campanas, columnas de aire, cuerdas o lo que sea. Para comprobar que el sonido es un movimiento ondulatorio elástico, se suprime el medio transmisor —tal como el aire— con una máquina neumática y entonces desaparece, por ejemplo, el sonido de un timbre eléctrico, aun cuando se vea al martillo vibrar si el aparato se monta dentro de una campana transparente. La velocidad del sonido en el aire es de 340 m/seg o 1 230 km/h.

**Cualidades del sonido.** El sonido tiene tres cualidades reconocibles por el oído, la intensidad, el tono y el timbre.

**INTENSIDAD.** Es lo fuerte o débil de un sonido. El control de volumen de un aparato de radio gobierna la intensidad del sonido que emite y, si fue apropiadamente diseñado, las demás cualidades no se afectan.

**Tono.** Es el efecto audible de la frecuencia sonora, pues el oído puede percibir pequeños cambios en ella. El tono es la característica que distingue a las notas altas (agudas) y a las notas bajas (graves) emitidas por un instrumento musical. La gama de frecuencias que hay entre una cierta frecuencia y la frecuencia doble, se llama *octava*. En un piano normal existen varias octavas en el teclado como, por ejemplo, la gama comprendida entre el do central (unas 256 vibraciones por segundo) y el do siguiente (unas 512 vibraciones por segundo), que constituye una octava. En los pianos modernos esta gama está comprendida entre 261 y 523 vibraciones por segundo.

En cuanto al tono, hay una ligera diferencia entre las notas de los músicos y las de los físicos; para éstos el do central es de 256 Hz y para aquéllos la nota la central es de 440 Hz. Lo que corresponde a un do de 261 Hz. En la escala científica la nota la es de 427 Hz. (No olvidar que un hertz es lo mismo que una vibración por segundo.)

El tono de la nota es el que se afecta por el movimiento relativo de la fuente sonora, de acuerdo con el ya mencionado principio de Doppler.

A veces es difícil que el oído humano distinga entre la intensidad y el tono. El límite inferior de intensidad, capaz de ser percibido por el oído promedio—o sea, el *umbral de audición*—varía considerablemente con el tono de la nota, necesiándose mayores intensidades para las bajas frecuencias que para las altas.

**TIMBRE.** Esta cualidad del sonido está determinada por los sobretonos, es decir, si no fuera por la configuración comunicada por ellos, una nota dada debiera escucharse idéntica tocada en el piano, en el violín, en la corneta o en cualquier otro instrumento musical. Despojadas de sus sobretonos, las mismas notas tocadas en esos instrumentos serían indistinguibles y esas notas puras carecerían de toda apariencia de calidad. La única razón por la que un violín Stradivarius genuino puede producir más bellas notas que un instrumento común, es la diferencia en la configuración dada por los sobre-

tonos, que son resultado de las propiedades elásticas de los materiales empleados en su construcción y en esta misma.

Los diapasones generalmente producen notas muy puras, es decir, vibraciones formadas casi enteramente del modo fundamental, libres de sobretonos y por esta razón se usan en los laboratorios como patrones de tono.

**Ondas estacionarias en tubos.** Las columnas de aire en vibración tienen la interesante característica que cuando se producen en tubos cerrados por un extremo y abiertos por el otro, carecen de todos los sobretonos correspondientes a los números enteros impares, considerando el tono fundamental como sobretono cero. Los tubos abiertos por ambos extremos no restringen sus sobretonos. (Fig. 6.14.) Por consiguiente, es justo decir que los tubos abiertos de un órgano son más ricos en calidad que los cerrados. (Fig. 6.15.)

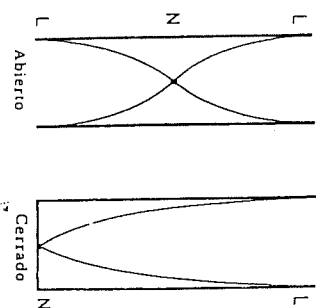


Fig. 6.14. La longitud de onda fundamental en el tubo abierto es el doble del largo del tubo; en el tubo cerrado la longitud de la onda fundamental es cuatro veces la longitud del tubo.

**Análisis de sonidos.** El timbre de una nota musical puede determinarse fácilmente por medio de instrumentos que son capaces de detectar los diversos componentes de un sonido complicado. Por supuesto, un oído entrenado puede también hacerlo en cierta medida, como puede comprobarse por la manera como pueden distinguirse entre sí los diversos instrumentos que tocan en una orquesta sinfónica, pero se han inventado aparatos eléctricos que llevan a cabo ese análisis más satisfactoriamente que el oído promedio.

**Sumario.** Se ha visto en este capítulo que el aspecto material de la música, es, en realidad, una parte de la física. El tema del sonido se ha considerado como parte del tema más general de las vibraciones y sus ondas asociadas, como conceptos fundamentales en este panorama descriptivo de la física.

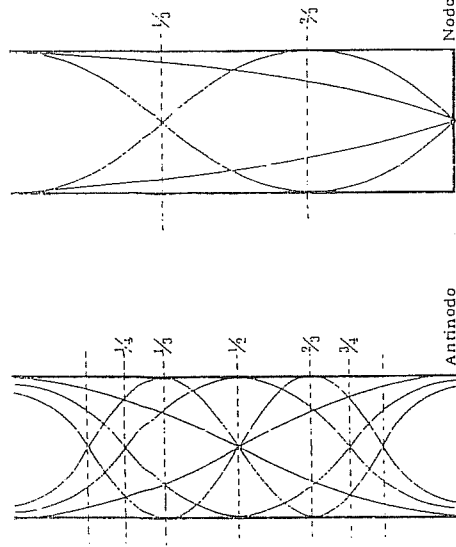


FIG. 6.15. Un tubo abierto (en ambos extremos) puede tener el doble de sobretonos armónicos que un tubo cerrado (un extremo cerrado y el otro abierto). En el tubo cerrado caben únicamente cuartos impares de la longitud de onda, mientras que en el abierto caben todos los cuartos de longitud de onda, tanto los pares como los impares; es decir, el doble de sobretonos.

Se ha encontrado que estos conceptos se encuentran lógicamente organizados y relacionados con los de masa, fuerza, energía, etc., discutidos en los capítulos anteriores. De nuevo se ha demostrado que la física es una ciencia muy desarrollada y organizada y que, para conocerla, el estudiante debe adquirir un vocabulario especial y usarlo con suma precisión.

### CUESTIONARIO

1. ¿En qué consiste el sonido?
2. ¿Influye la frecuencia en la velocidad con que se transmite el sonido? ¿Llegan al oyente las notas de alta frecuencia de una orquesta lejana, más pronto que las de baja frecuencia?
3. ¿Existe alguna porción de un gong que permanezca estacionaria?
4. Anote algunos factores que influyen en el timbre de un sonido.

5. De las tres cualidades —tono, intensidad y timbre—, ¿cuál es la que hace que se distinguan entre sí los diversos instrumentos de una orquesta?
6. ¿Qué sucede cuando dos ondas sonoras de la misma frecuencia están fuera de fase? ¿o cuándo están en fase?
7. ¿Qué sucede cuando dos sonidos de frecuencias ligeramente diferentes se combinan?
8. Cuando un violinista tensa una cuerda de su instrumento, ¿aumenta o disminuye el tono?
9. Cuando un diapason se apoya sobre una mesa, ¿aumenta la intensidad del sonido? ¿por qué?
10. Explique la formación de un eco.
11. Un diapason vibra con la frecuencia de 1 000 Hz. Calcular la frecuencia de otro diapason que, combinado con el primero, produzca 5 pulsaciones por segundo.
12. ¿Cómo se producen los sonidos?
13. ¿Cómo transporta energía el sonido?
14. Después de ver el relámpago, el trueno se inicia varios segundos después ¿por qué?
15. Explique cómo difieren entre sí los sonidos emitidos por tubos de órgano abiertos y cerrados.
16. El eco de un silbido reflejado en un cantil se oye tres segundos después. ¿A qué distancia se encuentra el cantil?
17. Las longitudes de onda de los sonidos, ¿son del orden de centímetros, decímetros, kilómetros o milímetros?
18. Explique por qué un salón lleno de gente, tiene mejor acústica que uno vacío.
19. ¿Puede haber demasiada absorción de sonido en un salón o en un auditorio para que haya una buena acústica?
20. ¿Qué significa umbral de audición? Este umbral ¿varía con la frecuencia? ¿A qué tramo de frecuencia es más sensible el oído?
21. Defina "movimiento ondulatorio" y "elasticidad".
22. ¿Qué significan los términos "onda estacionaria", "nodo" y "antinodo"?
23. ¿En qué consisten las pulsaciones?

## CONSIDERACIONES SOBRE LA MATERIA

### CONSTITUCION DE LA MATERIA; PROPIEDADES DE LOS GASES; FENOMENOS DE SUPERFICIE

Nuestro estudio de la física hasta ahora ha consistido esencialmente en considerar las dos propiedades fundamentales de la materia, a saber, la inercia y la elasticidad. Para avanzar más adelante y adquirir una apreciación adicional de las propiedades de la materia, es preciso considerar seriamente su estructura. Aunque este tema parezca estar en el campo de la química, los hombres de ciencia saben bien que no hay un límite definido entre la física y la química, debido, principalmente, a que los físicos y los químicos, trabajando juntos, han hecho, en el último siglo, considerables progresos en sus intentos de revelar los misterios de la materia. Únicamente por el empleo de las herramientas del físico —el espectroscopio, los rayos X, el bulbo electrónico, el espectrógrafo de masas, el generador de alto voltaje y otros demasiado especializados para ser mencionados— han avanzado la física y la química hasta su presente estado. Los físicos y los químicos juntos desarrollan teorías sobre la estructura de la materia alrededor de los conceptos de átomos, electrones, protones y otras numerosas partículas, suponiéndolas en un continuo estado de movimiento. Consideraremos estos conceptos en lo que sigue.

**Moléculas y átomos.** Se cree actualmente que todos los cuerpos están formados por *moléculas*, que se definen como las más pequeñas unidades conocidas de una sustancia química. Además, parece evidente que las moléculas, a su vez, están formadas de más pequeños componentes llamados *átomos*. En



función de sus propiedades químicas, sólo 92 átomos fundamentalmente diferentes se ha encontrado que ocurren naturalmente y es creible que toda materia es el resultado de la combinación de estas unidades elementales. Todavía a fines del siglo XIX se aceptaba el punto de vista de que el átomo era una entidad indivisible —que es lo que quiere decir "átomo"—, pero desde entonces el conocimiento sobre la estructura de la materia ha crecido enormemente. Ahora se sabe que el átomo tiene una estructura interna. Iniciándose con investigaciones a fines del siglo XIX y en lo que va del siglo, se ha encontrado que los átomos están formados principalmente por cargas eléctricas, concepto que será descrito a continuación. Una teoría muy apropiada fue encontrada en 1913 por el físico danés Niels Bohr, que representó al átomo como un sistema solar en miniatura con unidades de electricidad negativa girando en órbitas más o menos elípticas, alrededor de un núcleo central, cargado con unidades positivas, así como los planetas giran alrededor del Sol (Fig. 7.1). Aunque esta teoría ya se considera anticuada, muchos aspectos de la teoría atómica sobre la estructura de la materia son aún descritas popularmente en términos de electrones en órbita, porque cualquier explicación más aproximada se vuelve tan complicada que no puede ser descrita, excepto por ecuaciones matemáticas. Antes de seguir adelante, ¿qué significan las cargas eléctricas positivas y negativas?

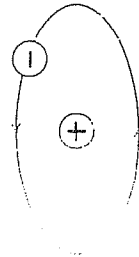


FIG. 7.1. Representación de Bohr de un átomo de hidrógeno, formado por un electrón negativamente cargado girando en una órbita elíptica alrededor de un núcleo con carga positiva (protón)

**Cargas positivas y negativas.** Los términos positivo y negativo, como se usan en electricidad, indican solamente una distinción entre dos clases opuestas de cargas eléctricas, como se determina por las fuerzas que ejercen sobre otras cargas, que pueden ser atractivas o repulsivas. Cuando una varilla de vidrio se frota con una tela de seda, o cuando una varilla de ebonita se frota con un pedazo de piel, cada uno de estos cuerpos adquiere la peculiar propiedad de atraer pedacillos de papel u otros cuerpos muy ligeros; esta extraña fuerza se llama *fuerza eléctrica* y se atribuye a la existencia de algo llamado *carga eléctrica*. Por otra parte, el vidrio y la seda se comportan

de modo distinto y una diferencia semejante se nota entre la ebonita y la piel, como si en cada par, uno exhibiera un exceso y el otro una deficiencia de la carga adquirida. La distinción se indicó originalmente postulando de manera arbitraria que existían dos clases de electricidad, llamadas, por conveniencia, positiva y negativa. (Fig. 7.2.) Pero, puesto que la mayoría de las manifestaciones eléctricas se explican fácilmente suponiendo la existencia de sólo una sola clase de electricidad, y considerando que un exceso de ella produce un efecto y que una deficiencia produce el efecto opuesto, no es necesario suponer que en realidad existen dos clases de electricidad. Los detalles de estas consideraciones deberán esperar hasta un capítulo posterior sobre electricidad. (Págs. 155 y siguientes.)

**Los bloques que forman a la materia son el electrón, el protón, el neutrón y el positrón.** La más pequeña unidad conocida de electricidad negativa es el *electrón* y la más pequeña carga positiva estable conocida es el *protón*. La teoría de Bohr sugiere que para la sustancia más simple conocida —el hidrógeno— el átomo consiste sencillamente de un protón sirviendo como núcleo y de un electrón girando alrededor —justamente como la Luna gira alrededor de la Tierra— en una órbita fija. (Fig. 7.1.) Los demás átomos están constituidos de modo semejante, pero son más complicados, variando el número de electrones, repartidos en varias órbitas y variando la constitución del núcleo conforme el átomo incrementa su complejidad desde el helio, la segunda sustancia en el sistema, hasta el uranio y el plutonio, las más complicadas. Esta representación es un poco anticuada en vista de la tremenda velocidad con que se lleva

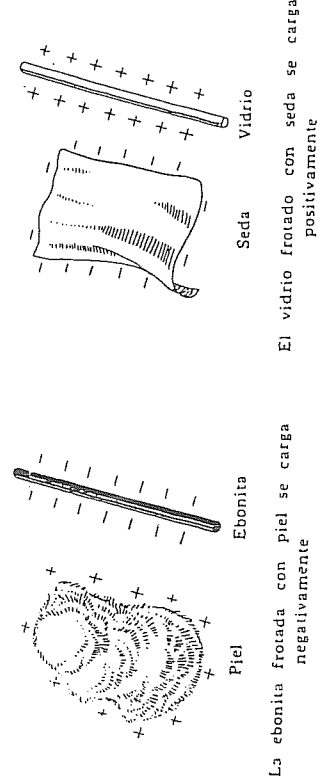


FIG. 7.2

acabo la investigación en las universidades y en laboratorios científicos, pero algo se veiene aun para aquellos que necesitan representaciones mentales para poderse explicar la estructura del átomo, puesto que las nuevas teorías son de naturaleza principalmente matemática.

Los descubrimientos recientes incluyen el *neutrón*, una partícula neutra, y el electrón positivamente cargado, el *positrón*, por lo que los bloques de construcción de los átomos ya no se encuentran restringidos a dos como se creyó por muchos años desde 1890. Actualmente, parece ser cierto que aun el núcleo de los átomos tiene una estructura, así que considerando que hasta hace poco tiempo se consideraba al átomo como la más pequeña e indivisible unidad de la materia, su estructura y los componentes de sus componentes conciernen ahora al físico y al químico. Estas consideraciones, junto con el desencadenamiento de la energía atómica y la bomba atómica de 1945, deberán esperar un capítulo posterior.

**Movimiento browniano.** La materia está formada de moléculas, átomos, electrones, etc.; pero es aún más importante el que estas partículas se encuentran en incesante movimiento; vivimos en un mundo cinético, es decir, un mundo de movimiento. (Una indicación de esto se encuentra en la observación del llamado *movimiento browniano*. Si se examina bajo el microscopio una gota de agua que contenga finas partículas de carbón (que no se disuelven en agua) en suspensión, se ven las partículas agitando en todas direcciones de manera aleatoria; este fenómeno fue observado primero por el botánico inglés Brown, de quien recibió su nombre (Fig. 7.3). Este movimiento se explica por el bombardeo de las partículas de carbón por las moléculas del agua, que al chocar con aquéllas originan el movimiento irregular y fortuito de las partículas, como se observa por el microscopio. Las moléculas son demasiado pequeñas para ser visibles, teniendo solamente unos pocos centillonésimos de centímetro; tendrían que ser muchos miles de veces más grandes para que fueran visibles observándolas con el más potente microscopio.

**Teoría cinética de la materia.** El movimiento browniano es uno de los orígenes de la teoría llamada *teoría cinética*. Esta teoría supone, en primera aproximación, que las moléculas son pequeñas partículas esféricas que, debido a su energía interna,

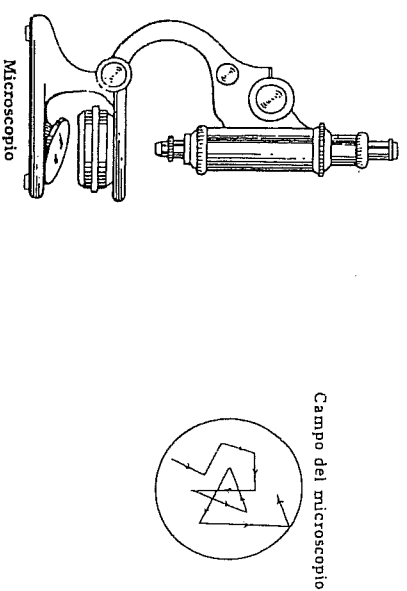


Fig. 7.3. Las partículas vistas a través del microscopio se observa que se encuentran en un estado de agitación. El fenómeno se llama movimiento browniano

están saltando de un lado para el otro muy rápidamente. En el estado gaseoso este movimiento es muy pronunciado y las moléculas presentan una amplia gama de velocidades, pero las moléculas de una sustancia determinada, a una temperatura también determinada, presentan una velocidad media característica que, por ejemplo, para el nitrógeno es de unos 500 m/seg—medio kilómetro por segundo—bajo condiciones normales de presión y temperatura. Las propiedades de los gases varían notablemente con la temperatura y la presión.

**Estados de la materia.** Ordinariamente, la materia existe en tres estados: gaseoso, líquido y sólido. Desde el punto de vista de la teoría cinética estos estados se distinguen por la proximidad de las moléculas y las correspondientes restricciones a su libertad de movimiento; gozan de más libertad en el estado gaseoso, pero en el estado sólido están tan apiñadas que están sometidas a grandes fuerzas intermoleculares que las obligan a vibrar en amplitudes muy pequeñas alrededor de sus posiciones de equilibrio. Las transiciones de un estado a otro se efectúan por medio de transformaciones de energía bastante complicadas. En los cursos elementales de física la discusión se limita generalmente al estado gaseoso porque es el estado más sencillo y también el más conocido, donde la teoría y el experimento concuerdan muy aproximadamente. Por esta razón la teoría se llama *teoría cinética de los gases*.

La ley de Boyle y la ley general de los gases. Un éxito notable de la teoría cinética es la explicación de la Ley de Boyle, descubierta por Roberto Boyle por 1662, que dice que una masa dada de gas, a temperatura constante, sufre una disminución de volumen cuando aumenta la presión, y viceversa. (Fig. 7.4.) Por consiguiente, cualquiera que sea la presión o el volumen del gas, el producto de la presión y el volumen de una cantidad dada de gas, es siempre el mismo. Una ampliación de esta ley, incluyendo el efecto de la temperatura, está dada por la ley de Charles y el efecto combinado de los tres factores (presión, volumen y temperatura) está regido por la ley general de los gases que dice que el volumen, multiplicado por la presión y dividido entre su temperatura absoluta, es siempre constante,

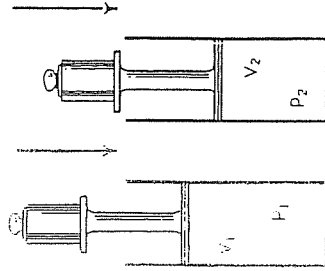


FIG. 7.4. Conforme disminuye el volumen de un gas, decrece su presión, y ocurre lo contrario si la temperatura y la masa dejan de ser constantes

para una masa dada de gas. (La temperatura absoluta, se definirá posteriormente.) Específicamente esta ley indica que si un factor permanece constante los otros dos son calculables: a presión constante, el volumen aumenta en razón directa de la elevación de temperatura; a volumen constante, la presión y la temperatura aumentan juntas; a temperatura constante, se tiene la ley de Boyle. Aunque éstos son resultados experimentales, es notable que puedan derivarse matemáticamente de la teoría cinética de los gases.

Ley y número de Avogadro. Esta teoría también verifica el postulado enunciado por el químico italiano Avogadro (1776-1856), que continuando el trabajo de Boyle (1627-1691), postuló que bajo las mismas condiciones de presión y temperatura, siempre hay el mismo número de moléculas en el mismo volumen de cualquier gas. El número de moléculas en un

centímetro cúbico de aire a la presión de una atmósfera y a la temperatura del hielo es enorme (en trabajos científicos, estas condiciones se denominan normales). El número se obtiene moviendo el punto decimal de 2.7 diecinueve lugares a la derecha, lo que es compatible con el diámetro de la molécula que vale sólo 2 o 3 cienmillonésimas de un centímetro. Si uno puede imaginar pequeñas esferas empaquetadas en un recipiente cúbico de 1 cm por lado, con cada esfera de sólo unas pocas cienmillonésimas de centímetro de diámetro, se dará cuenta que están lejos de estar apiñadas. En realidad, debe ser mayor el espacio vacío, que el ocupado por las moléculas. Esta situación es parecida a la de un gimnasio de  $30 \times 15 \times 15$  m conteniendo 50 bolas de basket-ball. En verdad, no diríamos que el gimnasio se encuentra lleno de bolas de basket-ball, si éstas están amortiguadas en una esquina del salón. Por otra parte, si todas estuvieran simultáneamente en el aire, el salón parecería lleno de pelotas, al grado que el lado lejano del salón quedaría parcialmente oculto por ellas. Este es el modo como las moléculas de aire se encuentran en cada centímetro cúbico del aire que nos rodea.

Naturaleza aproximada de la ley de los gases. Un examen cuidadoso de la ley de Boyle y de la ley general de los gases, indica que son leyes aproximadas. Experimentos precisos han demostrado ligeras desviaciones de estas leyes en todos los casos. Además, las desviaciones se vuelven cada vez mayores conforme se pasa de los gases simples, como el hidrógeno y el helio, a gases químicamente complejos y conforme se pasa a condiciones extremas de presión y temperatura.

Concepto de gas ideal. Los hombres de ciencia han encontrado una manera ingeniosa de enfrentarse a esta situación. Como todos los gases obedecen aproximadamente a la ley de los gases y como en ningún caso es relativamente muy grande la desviación, se ha inventado el concepto de un gas ideal; un gas ideal, se define como aquel que obedece rigurosamente a las leyes correspondientes. Los gases reales se tratan de acuerdo a su grado de desviación de la ley de los gases ideales, lo que es una manera apropiada de resolver el problema debido a la complejidad que surgiría si cada caso se considerara independientemente. Por otra parte, este concepto ha sido de valor inestimable para organizar de una manera general a los fenó-

menos conocidos con relación a los gases. Gran parte de la investigación actual se refiere a los detalles individuales, pero la parte principal de esta representación es esencialmente correcta.

La naturaleza de los conceptos ideales en la ciencia. El procedimiento anterior es un ejemplo de una característica del científico moderno. Empezando con un postulado muy simplificado, continúa corrigiendo y revisando conforme progresa la experimentación, llenando los detalles como se ha procedido. En algunos casos, lo que no deja de ser curioso, los detalles no se han acomodado tan fácilmente como era de esperarse, y a menudo se han hecho descubrimientos importantes por esta razón. Esta ha sido una característica particular de la llamada física moderna. Por 1890 se creía que en física todos los descubrimientos importantes ya se habían hecho y que sólo faltaba el trabajo de llenar los detalles por mediciones de mayor precisión. Actualmente se tiene el caso opuesto. En repetidas ocasiones el pulimento, por así decirlo, ha descubierto vastas áreas de territorio inexplorado, cuyo desarrollo no sólo ha agregado material al almacén del conocimiento, sino que ha cambiado completamente el punto de vista científico. Vivimos en una época en que científicos como Einstein, trabajando con los más abstractos tipos de matemáticas, han desarrollado puntos de vista en física completamente diferentes de los que se tenían sólo unas generaciones anteriores, lo que a veces hace difícil de creer que la física no se haya convertido en filosofía pura. Muchos de los conceptos de la física moderna son exclusivamente matemáticos e imposibles de transformar en representaciones mentales. No obstante, permanece mucho de lo antiguo y es creencia de algunos que muchas de las nuevas ideas son incapaces de ser inteligentemente comprendidas, si no se aprecian los defectos de los viejos y más naturales puntos de vista. Sin embargo, nunca debe olvidarse que la física del mundo práctico, el mundo de las máquinas y el hombre, es siempre la misma.

La presión de los gases y la teoría cinética. Volviendo de nuevo a la representación cinética, puede explicarse con facilidad el concepto de presión. Justamente como un chorro continuo de las balas de una ametralladora ejercen una fuerza continua sobre la diana que lo recibe (Fig. 7.5); así, el bom-

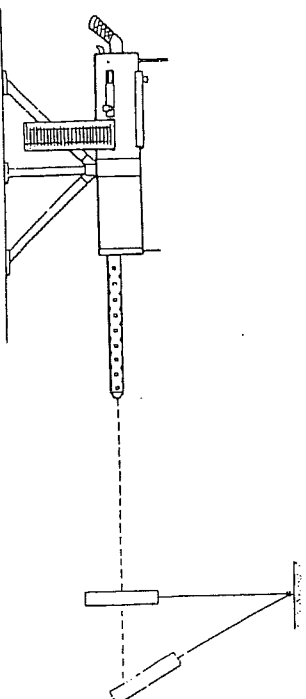


Fig. 7.5. La ametralladora de fuego continuo, desarrolla una presión constante sobre una diana

bardo continuo de las paredes del recipiente por las moléculas que rebotan en él produce una fuerza perpendicularmente dirigida, que al considerar que actúa sobre la unidad de área, se convierte en una presión en el sentido en que fue originalmente definido este término. Además, es claro que la presión debe aumentar si el volumen del recipiente se reduce: las moléculas deben acumularse acercándose mutuamente por lo que la frecuencia, y por consiguiente la fuerza de sus colisiones debe aumentar.

El cero absoluto de temperatura de acuerdo con la teoría cinética. Un postulado adicional de la teoría cinética es el de que la temperatura de un gas se encuentra directamente relacionada con la actividad molecular, lo que es evidente porque aumenta la presión al aumentar la temperatura; esto sugiere que la temperatura más baja posible en la naturaleza es aquella en que cesa la actividad molecular. Será necesario discutir este punto más ampliamente en el capítulo de calor, pero por ahora será suficiente decir que esa temperatura límite se llama el *cero absoluto*, que corresponde a *menos* 273°C (Pág. 126).

Efectos de las fuerzas moleculares. Ninguna discusión sobre estas fuerzas sería completa sin mencionar algunos de sus efectos—como, por ejemplo, el de la tensión superficial—. Las moléculas ejercen fuerzas de atracción entre ellas; si éstas fuerzas se ejercen entre moléculas semejantes se llaman fuerzas de *cohesión*, y si se ejercen entre moléculas diferentes se llaman fuerzas de *adhesión*. Las primeras son las que mantienen reunidas a las moléculas de los cuerpos y las segundas

das que adhieren a los diferentes cuerpos entre sí. En la superficie de un líquido estas fuerzas producen un fenómeno que sugiere la existencia de una membrana estirada en la superficie del líquido, que lo obliga a ocupar un volumen tan pequeño como sea posible. Este fenómeno es el que se llama *tensión superficial*. En ciertos casos las fuerzas de adhesión entre dos sustancias son mayores que las fuerzas de cohesión que tienden a mantener reunida una sustancia dada. Por ejemplo, el agua se adhiere muy fácilmente a la superficie químicamente limpia del vidrio. (Fig. 7.6.) Por otro lado, una gota de mercurio, colocada sobre una lámina de vidrio limpio, tiende a evitarlo y toma por sí misma la forma de una gota esférica. A las gotas de agua en una superficie engrasada les pasa lo mismo.

**Atracción capilar.** El mismo fenómeno obliga al agua a elevarse en los tubos capilares (Fig. 7.6) produciendo los llamados efectos capilares como los que evitan que la tinta salga de una pluma fuente, los que mantienen el suelo húmedo, etc. El efecto opuesto —la repulsión del agua por las superficies grasosas— se emplea en ropas y toldos a prueba de agua; por este efecto algunos insectos caminan en la superficie del agua y también se vuelve posible hacer flotar una aguja en la superficie del agua, a pesar de que el acero es varias veces más denso que aquélla. (Fig. 7.7.) Sólo es necesario que la aguja esté revestida con una capa muy delgada de aceite o de grasa, que siempre tiene excepto que se haya limpiado especialmente por medios químicos. La formación de gotas de todas clases se debe también a la tensión superficial.

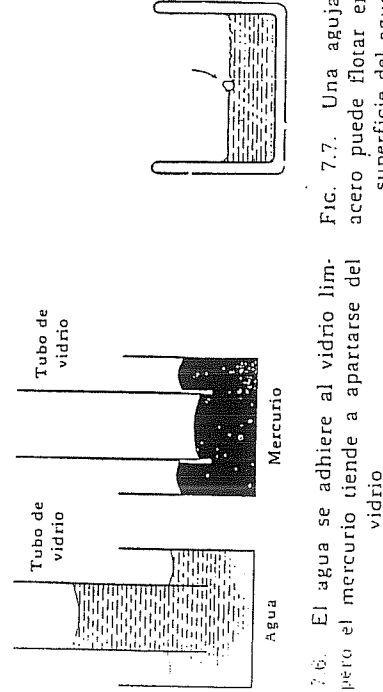


Fig. 7.6. El agua se adhiere al vidrio limpio pero el mercurio tiende a apartarse del vidrio

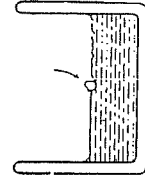


Fig. 7.7. Una aguja de acero puede flotar en la superficie del agua

**Difusión.** Otros ejemplos de fenómenos moleculares son la difusión y la ósmosis. Si dos líquidos se ponen en un tubo, cuidando de que no se mezclen, después de algún tiempo se encuentra que han penetrado uno en el otro, fenómeno llamado *difusión*. Los gases se difunden muy fácilmente, como se demuestra porque la presencia de una sustancia volátil puede conocerse por su olor, muy poco después de haberla liberado en la esquina opuesta de un salón.

**Osmosis.** Ciertas sustancias actúan como válvulas de un solo sentido para ciertos fluidos. Una solución de azúcar puede penetrar en una sola dirección a través de los tejidos de algunas frutas y otros vegetales. Por todos es conocido que ciertas frutas, cuando se remojan en agua, la absorben hasta el punto de hincharse debido a la presión del agua; el agua no sale, sino sólo entra en la fruta a través de la membrana que la rodea. (Este fenómeno se llama *ósmosis* y la presión desarrollada, *presión osmótica*.) La ósmosis explica el ascenso de la humedad en los árboles muy altos a través de las paredes celulares para nutrirlos. El crecimiento de la planta viviente depende, en su mayor parte, de la existencia de la presión osmótica.

**Sumario.** Resumiendo el material de este capítulo, hemos visto que toda materia está formada de pequeñas unidades: moléculas, átomos, electrones, etc. Se ha considerado el gran éxito de la teoría cinética de la materia, insistiendo en su aplicación al estado gaseoso. Se han tratado también otros fenómenos moleculares, así que al llegar a este punto de nuestra descripción, nos hemos ocupado de las propiedades mecánicas, elásticas y de los aspectos materiales de los cuerpos. Procederemos ahora al estudio del calor y de la termometría, que serán considerados desde el punto de vista de la energía.

## CUESTIONARIO

1. ¿Cuántas moléculas, en condiciones normales, hay en un centímetro cúbico de aire?
2. Explique alguna de las pruebas de la teoría molecular.
3. Explique por qué una burbuja de aire que está dentro del agua, se hace mayor al elevarse.
4. ¿Cómo se explica la rápida difusión de un olor a través de un salón?

5. ¿Por qué es famoso el fisico Bohr?
6. Explique la diferencia entre un electrón y un protón.
7. Enuncie la ley de Boyle y explíquense sus limitaciones.
8. Un cuerpo, con mayor densidad que el agua, ¿forzosamente se hunde en ella?
9. Explique la diferencia entre capilaridad y ósmosis.
10. Explique por qué el agua encrespada se calma derramando aceite sobre ella.

### CUESTIONARIO DE REPASO

(VÉASE LA PÁG. 250 PARA LOS RESULTADOS)

#### Capítulos V, VI y VII

1. La elasticidad es una propiedad de la materia que hace que: 1) los líquidos se distingan de los gases; 2) se aplique el principio de Arquímedes; 3) los cuerpos se recuperen de sus deformaciones; 4) los tubos abiertos tengan más sobretonos que los cerrados; 5) la presión dependa de la densidad. . . . . ( 2 )
2. El movimiento armónico simple se caracteriza porque: 1) el movimiento es periódico; 2) la aceleración es proporcional a la elongación (distancia desde la posición de equilibrio); 3) es un movimiento de rotación; 4) el desplazamiento es constante; 5) la velocidad es constante. . . . . ( 2 )
3. La amplitud de una vibración es: 1) lo mismo que la elongación; 2) la elongación máxima; 3) lo mismo que la frecuencia; 4) el número de vibraciones por segundo; 5) el doble de la elongación máxima. . . . . ( 2 )
4. Dentro del límite elástico: 1) el esfuerzo siempre vale cero; 2) la deformación unitaria es la deformación; 3) el esfuerzo es siempre proporcional a la deformación; 4) la rigidez es despreciable; 5) los fluidos no se distinguen de los sólidos. . . . . ( 2 )
5. El siguiente nombre se encuentra asociado más íntimamente con los fenómenos elásticos: 1) Hooke; 2) Boyle; 3) Arquímedes; 4) Newton; 5) Helmholtz. . . . . ( 2 )

6. Algunos jabones flotan en el agua porque: 1) toda materia tiene masa; 2) toda la materia tiene densidad; 3) su densidad es la unidad; 4) su peso específico es mayor que el del agua; 5) su densidad es menor que la del agua. . . . . ( 2 )
7. Cuando un cuerpo está sumergido total o parcialmente en un líquido: 1) siempre se hunde; 2) recibe una fuerza de empuje igual a su peso; 3) recibe una fuerza de empuje igual al peso del líquido desalojado; 4) siempre flota por el principio de Arquímedes; 5) recibe una fuerza de empuje igual al peso del agua desalojada. . . . . ( 2 )
8. Si se aumenta la masa de un cuerpo oscilando colgando de un resorte vertical: 1) la frecuencia de la oscilación aumenta; 2) el período aumenta; 3) la amplitud disminuye; 4) la elongación disminuye; 5) se altera la frecuencia de resonancia. . . . . ( 2 )
9. Las figuras de Chladni son: 1) configuraciones tomadas por una cuerda estirada en vibración; 2) siempre vibraciones longitudinales; 3) siempre presentes en las ondas sonoras; 4) configuraciones producidas en las placas vibrantes; 5) lo mismo que antinodos. . . . . ( 2 )
10. Cuando una onda pasa de un medio a otro de diferentes propiedades elásticas: 1) no se altera la longitud de onda; 2) cambia la frecuencia; 3) cambia la velocidad; 4) se producen pulsaciones; 5) se produce un sonido. . . . . ( 2 )
11. El aparato de Kundt sirve para demostrar: 1) las vibraciones en placas; 2) las vibraciones en cuerdas; 3) las pulsaciones; 4) los sobretonos; 5) las ondas estacionarias en columnas de aire. . . . . ( 2 )
12. El sonido es un fenómeno ondulatorio del tipo siguiente: 1) longitudinal; 2) transversal; 3) torsional; 4) circular; 5) elíptico. . . . . ( 2 )
13. Las ondas estacionarias son siempre: 1) longitudinales; 2) transversales; 3) torsional; 4) el resultado de la interferencia; 5) el resultado de la refracción. . . . . ( 2 )
14. El aparato de Kundt se emplea para medir: 1) la velocidad del sonido; 2) la velocidad de cualquier movimiento ondulatorio; 3) la elasticidad del medio. . . . . ( 2 )

- que vibra; 4) el número de sobretonos de una vari-  
lla; 5) una serie armónica . . . . . ( 4 )
- 15 La longitud de onda es: 1) lo mismo que la fre-  
cuencia; 2) la velocidad de la onda dividida entre  
la frecuencia; 3) el producto de la velocidad y la  
frecuencia; 4) en el aire, siempre cero; 5) la dis-  
tancia de cresta a valle . . . . . ( 2 )
- 16 Cuando dos ondas de la misma frecuencia, velocidad  
y amplitud, pero de sentido opuesto, se sobreponen:  
1) siempre hay interferencia destructiva; 2) siempre  
hay interferencia constructiva; 3) se demuestra la  
refracción; 4) la diferencia de fase es cero; 5) se  
producen ondas estacionarias . . . . . ( 3 )
- 17 En columnas de aire con un extremo cerrado y el  
otro abierto, la longitud de onda del modo funda-  
mental es: 1) cuatro veces el largo de la columna;  
2) el doble de largo de la columna; 3) siempre cero;  
4) indeterminada; 5) la distancia entre dos nodos  
18. Un nodo es un punto en la configuración de una  
onda donde la perturbación es: 1) la máxima; 2)  
la mínima; 3) una rarefacción; 4) una condensa-  
ción; 5) variable . . . . . ( 3 )
19. Las ondas sonoras: 1) no recorren el vacío; 2) se  
mueven mejor en el vacío; 3) se mueven a 300 000  
km/seg; 4) son ondas transversales; 5) siempre  
pueden oírse . . . . . ( 3 )
20. El tono es: 1) el número de vibraciones por segundo;  
2) lo mismo que intensidad; 3) lo mismo que audi-  
bilidad; 4) lo mismo que sonoridad; 5) medido  
en decibels . . . . . ( 4 )
21. El timbre de un sonido musical se determina por:  
1) su intensidad; 2) la ausencia de sobretonos; 3)  
la presencia de sobretonos; 4) el tono; 5) la fre-  
cuencia de vibración . . . . . ( 1 )
22. El número de pulsaciones por segundo entre dos  
diapasones: 1) lo mide la frecuencia de uno u otro  
diapasón; 2) es independiente de la frecuencia de  
los diapasones; 3) es exactamente igual a su dife-  
rencia de frecuencias; 4) es aproximadamente igual  
a su diferencia de frecuencias; 5) siempre puede  
escrucharse . . . . . ( 3 )

23. Los átomos son: 1) indivisibles; 2) invisibles; 3)  
verdaderamente esféricos; 4) siempre estacionarios;  
5) compuestos de moléculas . . . . . ( . . )
24. Un largo tubo de vidrio con mercurio y con su  
extremo abierto sumergido en un depósito de mer-  
curio, puede demostrar que: 1) las moléculas son  
pequeñas; 2) la atmósfera contiene nitrógeno y  
oxígeno; 3) la atmósfera ejerce presión; 4) es cierta  
la ley de Boyle; 5) la presión es el resultado del  
bombardeo molecular . . . . . ( . . )
25. A temperatura-constante, para comprimir un gas a  
la mitad de su volumen inicial, la presión: 1) debe  
reducirse a la mitad; 2) debe duplicarse; 3) de-  
be cuadruplicarse; 4) no influye; 5) debe ser la at-  
mosférica . . . . . ( 1 )
26. El movimiento browniano es: 1) una reforma social  
dirigida por un botánico llamado Brown; 2) el mo-  
vimiento de corrientes de aire en la atmósfera; 3)  
el movimiento de los protones y electrones dentro del  
átomo; 4) una ilusión óptica; 5) un movimiento mi-  
croscópico de las partículas de materia . . . . . ( . . )
27. En la teoría cinética aplicada a los gases, las molécu-  
las son: 1) grandes con relación a las distancias que  
los separan; 2) tan pequeñas que la materia es prin-  
cipalmente espacio vacío; 3) más pequeñas que los  
electrones; 4) del mismo tamaño que los electrones;  
5) tan amontonadas como una docena de pelotas  
de ping-pong en una canastilla de fresas . . . . . ( 2 )
28. La ley de Boyle trata de: 1) los líquidos buscando  
su nivel; 2) la difusión de gases a través de los cuer-  
pos porosos; 3) la ley de las proporciones múltiples;  
4) los hemisferios de Magdeburgo; 5) las relaciones  
entre la presión y el volumen de un gas . . . . . ( 1 )

## CONSIDERACIONES TERMICAS

### LA NATURALEZA DEL CALOR; TERMOMETRIA; DILATACION; CALORIMETRIA; CAMBIOS DE ESTADO

En este estudio descriptivo del mundo físico donde vivimos ya se han bosquejado ciertas consideraciones mecánicas, elásticas y materiales, y se ha encontrado la importancia relativa de tales conceptos, como fuerza, energía y agitación molecular. Se ha visto la gran importancia que tiene la complicada representación de la estructura de la materia, en cualquier intento lógico de conocer los fenómenos naturales. Al considerar estos fenómenos con más detalle, surgen cuestiones de naturaleza térmica, debido a que los fenómenos previamente considerados se alteran si los cuerpos en cuestión se calientan o se enfrían. Naturalmente, deseamos saber qué es el calor y qué efectos causa en las propiedades de la materia ya discutidas. ¿Qué es lo que en realidad significan los conceptos de calor, frío, temperatura, congelación, ebullición, radiación y muchos otros vulgarmente aplicados, a veces en forma incorrecta, a los fenómenos térmicos? Estos son los temas que ahora trataremos en este capítulo, intentando, no sólo continuar el desarrollo lógico de los conceptos fundamentales de la física, sino también corregir algunas equivocaciones populares.

La diferencia entre el calor y la temperatura. En primer lugar, la distinción técnica entre "calor" y "temperatura" debe ser aclarada. El calor es algo que si se agrega a un cuerpo, por lo general le produce una elevación de temperatura; por consiguiente, la temperatura es un concepto completamente dife-



ente al de calor. Hablando de modo algo impreciso, la temperatura puede interpretarse como una medida de la intensidad térmica, la que, por supuesto, generalmente aumenta conforme aumenta la cantidad de calor. La temperatura se mide en "grados", mientras que el calor se mide en unidades tales como el joule o la caloría, que definiremos después.

**Naturaleza del calor—Interpretaciones primitivas vs interpretación de Rumford.** Para los antiguos, el calor se imaginaba como una especie de fluido, cuya adición volvía al cuerpo más caliente y cuya sustracción lo hacía más frío. El llamado fluido calorífico fue un concepto que parecía explicar muchos de los fenómenos térmicos observables, pero que tenía un serio inconveniente: todos los intentos para determinar su densidad —o cualquier otra propiedad física— fallaron. Por 1800 Benjamin Thomson, después conde de Rumford (nacido en los Estados Unidos), ofreció una nueva interpretación. Dedicado a la manufactura de cañones, una de cuyas operaciones es el taladrado, observó Rumford que, aunque las virutas fueran quitadas, había una notable elevación de temperatura, lo que no era compatible con la teoría del fluido calorífico, porque al quitar las virutas debía perderse el calor llevado por ellas. Observó, además —como seguramente otros lo hicieron antes, pero fue él uno de los primeros en hacerlo críticamente—, que se generaba más calor con una herramienta roma que con una afilada, aunque ésta removiera más virutas. Así comprendió que la cantidad de calor formada estaba directamente relacionada con la energía gastada y no con el número de virutas obtenido o con la cantidad de material removido. Por supuesto, se debe suministrar mayor trabajo a un taladro como que a un afilado para taladrar la misma cantidad de material.

**El calor como una forma de energía.** De este modo se llegó a la idea de que el calor, en realidad, no es otra cosa que la energía misma. Experimentos posteriores del inglés Joule y del estadounidense Rowland revelaron la equivalencia directa entre el calor y la energía. Este punto de vista es también compatible con la moderna teoría cinética de la materia, ya discutida, en cuyos términos se ha encontrado que el calor es la energía asociada con el movimiento desordenado de las moléculas. Por esta razón la fricción desarrolla calor debido al incremento de energía molecular asociada con el movimiento molecular des-

ordenado y aleatorio que se desarrolla cuando dos sustancias se frotan entre sí. En realidad, de acuerdo con la teoría cinética, el calor se define simplemente como la energía total asociada con este movimiento molecular desordenado e irregular. Además, la temperatura —aunque cualitativamente definible como la propiedad que determina el sentido en el que fluye el calor— (que siempre fluye de las regiones con alta temperatura a las regiones con baja temperatura)— encaja en la representación cinética como la energía cinética promedio de cada molécula, asociada con su movimiento de traslación.

**Termometría.** Antes de proseguir tratando acerca del calor y de la temperatura, es necesario conocer cómo se mide esta última. Esta parte de nuestro estudio se llama *termometría*. Por supuesto, confiamos en nuestro sentido de temperatura, pero puede demostrarse fácilmente que nuestra sensación de temperatura es muy relativa. (Fig. 8.1.) Con objeto de hacer una determinación de temperatura más fidedigna, podemos aprovechar aquellas propiedades de la materia de las que se ha encontrado que se alteran por la aplicación del calor, siendo

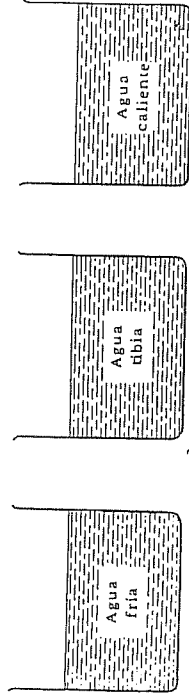


FIG. 8.1. El agua tibia se siente caliente en la mano que previamente se ha introducido en agua fría, pero se siente fría en la mano si ésta antes se ha sumergido en agua caliente, lo que demuestra que la percepción de la temperatura es relativa

una de ellas la dilatación (o aumento de volumen) de los cuerpos cuando se calientan. Desde el punto de vista de la teoría cinética, resulta que la actividad molecular incrementada necesita un espacio adicional.

**La dilatación térmica utilizada para medir la temperatura.** La dilatación (o aumento de volumen) que sufren los líquidos al calentarse, generalmente hablando, es más notable que en los sólidos; los gases se dilatan aún más. El mercurio líquido se dilata muy uniformemente en un considerable tramo de temperaturas, por lo que es una sustancia termométrica apro-

plada cuando forma un hilo delgado, dentro de un tubo capilar de vidrio soldado a un bulbo, constituyendo así un útil termómetro (Fig. 8.2).

Todas las lecturas termométricas son relativas, graduándose las escalas termométricas de acuerdo con normas convencionales, basadas en ciertas temperaturas que se aceptan como puntos fijos. Dos puntos fijos notables son la temperatura del hielo fundiéndose y la temperatura a la que hierve el agua a la presión atmosférica normal, esto es, 76 cm de mercurio o 1.034 kp (kilopondios) por centímetro cuadrado. Es solamente una materia de común acuerdo que éstos sean los puntos fijos en los que se basan todas las escalas termométricas.

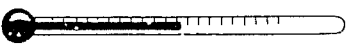


Fig. 8.2. Mercurio en un termómetro de vidrio

**Escala Celsius y Fahrenheit.** En la escala Celsius el punto de fusión del hielo—que es igual al de la congelación del agua—se llama arbitrariamente  $0^{\circ}\text{C}$ , y el punto de ebullición se llama arbitrariamente  $100^{\circ}\text{C}$ . En la escala Fahrenheit estos puntos se gradúan, respectivamente, con  $32^{\circ}\text{F}$  y con  $212^{\circ}\text{F}$ ; esta escala se usa en los países de habla inglesa (Fig. 8.3). Debe

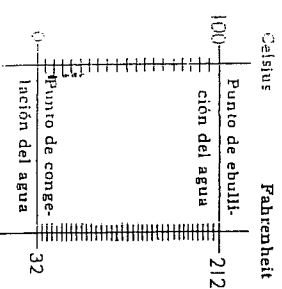


Fig. 8.3. Comparación de las escalas Celsius y Fahrenheit

notarse, además, que la escala Celsius —llamada antes centígrada— está subdividida en 100 partes iguales entre las temperaturas de fusión y de ebullición del agua, mientras que la escala Fahrenheit se subdivide en 180 grados iguales en el mismo tramo, por lo que cada grado Fahrenheit es  $5/9$  de grado Celsius.

**Conversión de una escala a otra.** Es bastante sencillo cambiar una lectura de temperatura de una escala a otra, puesto que el grado Celsius es  $9/5$  mayor que el grado Fahrenheit y el punto de fusión del agua en la escala Fahrenheit se encuentra a  $32$  grados arriba del cero. Así, la temperatura de  $68^{\circ}\text{F}$  se encuentra a  $36^{\circ}\text{F}$  arriba del punto de fusión, correspondiendo a sólo  $20$  grados Celsius arriba de dicho punto, o sea, también  $20^{\circ}\text{C}$ . Incidentalmente, a  $40^{\circ}$  abajo de cero la lectura de temperatura es la misma en las dos escalas, lo que podrá encontrarse fácilmente el estudiante con un mínimo de aritmética.

**Coefficiente de dilatación térmica.** Cada sustancia sólida se dilata de modo diferente, lo mismo que cada sustancia líquida; en cambio, todos los gases se dilatan aproximadamente lo mismo para el mismo cambio de temperatura. La dilatación fraccionaria de cualquier porción de una sustancia, por grado de cambio de temperatura, se define como el *coeficiente de dilatación térmica* de dicha sustancia. La dilatación en sólo una dimensión, es decir, de longitud, se llama dilatación lineal; de modo semejante se puede considerar también la dilatación superficial y la de volumen o cúbica. El *coeficiente de dilatación cúbica* de una sustancia, puede demostrarse que vale, aproximadamente, el triple del coeficiente de dilatación lineal.

**Dilatación de gases.** El coeficiente de dilatación cúbica es aproximadamente el mismo para todos los gases y es muy aproximadamente el recíproco del número 273, por grado Celsius. Esto significa que al elevar la temperatura de un gas de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $1^{\circ}\text{C}$ , su volumen aumenta una fracción igual a  $1/273$ ava parte de su volumen inicial; esto también significa que un gas disminuye su volumen en  $1/273$ ava parte de su volumen inicial, si se enfría un grado Celsius, lo que lleva a la interesante cuestión de qué le sucederá al volumen de un gas, si su temperatura se reduce 273 grados, a partir de  $0^{\circ}\text{C}$ .

**Concepto de cero absoluto de temperatura.** La respuesta a esta pregunta, es decir, si el volumen desaparece o no, no puede encontrarse experimentalmente porque es imposible bajar la temperatura de cualquier gas a  $-273^{\circ}\text{C}$ . Todos los gases conocidos se licúan antes de llegar a esta temperatura, y los líquidos no tienen el mismo coeficiente que los gases. Sin embargo, hay algo único en esa temperatura de  $-273^{\circ}\text{C}$ . Como ya hemos dicho, la presión de un gas también se relaciona con su temperatura y, curiosamente, el coeficiente de presión tiene un valor tal que a  $-273^{\circ}\text{C}$ , la presión que ejerce un gas también debe valer cero. Esto es significativo porque la teoría cinética requiere también que la presión que ejerce un gas desaparezca cuando la temperatura se reduce al cero absoluto. Por estas razones y por otras de las que no podemos tratar aquí, se ha postulado el cero absoluto de temperatura en donde, de acuerdo con la teoría cinética, cesa todo movimiento molecular. Esta temperatura, por consiguiente, es de  $-273^{\circ}\text{C}$  —o unos  $-459^{\circ}\text{F}$ — y su existencia significa la imposibilidad absoluta de que exista una temperatura menor. Esta es la primera vez en nuestro estudio, que hemos impuesto una limitación a nuestro pensamiento sobre los valores extremos de alguna cosa como el tamaño o la intensidad, pero no será la última.

**Escala absoluta de temperatura.** Lo antedicho sugiere una tercera escala absoluta de temperatura, basada en el cero absoluto, más bien que en la temperatura del hielo en fusión. El valor del grado Celsius se sigue empleando, por lo que el punto del hielo corresponde a  $+273^{\circ}$  absolutos, y el punto de ebullición a  $+373^{\circ}$  absolutos

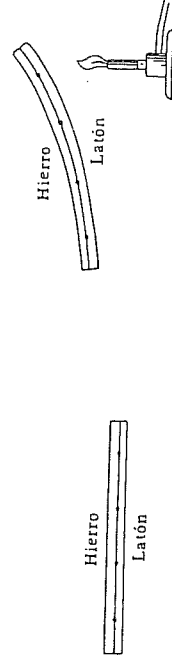
Más sobre el **cero absoluto**. En años recientes los experimentadores han desarrollado técnicas para producir muy bajas temperaturas y estudiar lo que sucede en estas condiciones extremas. Aunque no se ha podido producir una temperatura igual al cero absoluto —cosa que actualmente se sabe que es imposible— se han llegado a obtener temperaturas de una fracción muy pequeña de un grado arriba del cero absoluto. De manera incidental hay que notar que la medida de tales temperaturas no es una cosa sencilla. El campo de investigación de las bajas temperaturas parece contener grandes promesas de pasmosos descubrimientos en un futuro próximo. Muchas de las propiedades de la materia, particularmente del helio, se ha

encontrado que varían notablemente de sus valores normales cuando se someten a muy bajas temperaturas; así se ha descubierto que el helio líquido se encuentra en más de un estado.

**Las fuerzas moleculares involucradas en la dilatación térmica.** Regresando al tema de la dilatación lineal de los sólidos, hay que tener en cuenta la magnitud de las fuerzas moleculares que aparecen cuando se calienta una barra, digamos de acero. El acero aumenta su longitud en aproximadamente once partes por millón, por grado Celsius; esto significa que un puente de acero de, por ejemplo, un kilómetro de longitud, aumenta esta dimensión en unos 55 cm cuando recibe un cambio de temperatura desde un mínimo en invierno de  $10^{\circ}\text{C}$  bajo cero, a un máximo en verano de unos  $+40^{\circ}\text{C}$ . Cuando se considera la fuerza necesaria para estirar una barra de acero en once partes por millón, es maravillosa la sencilla manera en que la elevación de temperatura de sólo un grado Celsius, produce el mismo efecto. La energía está, evidentemente, involucrada en este proceso.

**Dilatación bimetalica. Termostatos.** Si una tira de hierro se sujeta firmemente a lo largo de una tira de latón de la misma longitud y la combinación se calienta, ésta se encorva, porque el latón se dilata un 50% más que el hierro (Fig. 8.4). Este efecto se utiliza en los termostatos bimetalicos que se emplean en numerosos aparatos automáticos de control de la temperatura; en todos estos aparatos se establecen y se cortan contactos eléctricos por el encorvamiento de tiras bimetalicas al aplicar y retirar el calor.

Hay que hacer notar, incidentalmente, el hecho muy afortunado de que el cemento y el acero tienen prácticamente el mismo coeficiente de dilatación, lo que hace posible los mo-



Una tira de latón y una de hierro, soldadas juntas a la temperatura ambiente se dilata como 50% más que el hierro

FIG. 8.4

dentros edificios de concreto que no se doblan con los cambios de temperatura. En realidad, el concreto reforzado en general, que tan importante papel desempeña en nuestra vida mecánica, es posible únicamente debido a este fenómeno.

**La ley general de los gases.** Como el volumen de un gas varía con la temperatura, como ya se indicó, y como la ley de Boyle, previamente discutida, dice cómo el volumen de una masa dada de gas depende de la presión, es natural preguntarse si estos dos efectos pueden combinarse en una ley general. Realmente así sucede, y para un gas ideal, esta relación es muy sencilla; ya nos hemos referido a ella en el capítulo anterior como la *ley general de los gases*. Esta ley dice que la presión multiplicada por el volumen y dividida entre la temperatura absoluta de una masa dada de gas, es constante, lo cual significa, simplemente, que si el volumen de una masa dada de gas se mantiene constante, su presión varía directamente con la temperatura absoluta. Por supuesto, si la temperatura permanece constante se obtiene la ley de Boyle, o sea que la presión es inversamente proporcional al volumen. Por último, si la presión permanece constante, el volumen varía en forma directa con la temperatura, la que siempre debe expresarse en la escala absoluta.

**El concepto de temperatura es sólo una parte de este estudio.**

Menos visto que una característica destacada de la materia —su tamaño— es afectada por la aplicación del calor, y que las variaciones en el tamaño de un cuerpo pueden utilizarse para medir la temperatura. Por supuesto, todo esto es compatible con la teoría cinética de la materia, ya que un aumento en el tamaño del cuerpo puede imaginarse que está asociado con una actividad molecular mayor, la cual requiere más espacio. Para una mejor comprensión de la naturaleza del calor, deberá considerarse el tema de su medida.

**Cantidad de calor—la caloría.** Ya se ha mencionado que antes se creía que el calor era un fluido, pero que actualmente se concibe al calor como una forma de energía, por lo que puede verse que no se necesita una nueva unidad para medir la cantidad de calor, pues las unidades mecánicas de energía y trabajo son suficientes; es decir, el contenido de calor es fácilmente mensurable en newton-metro (joule); en kilopondios-metro, etc. En realidad, es más conveniente emplear otras

unidades. En lugar de medir el calor en joules, se acostumbra comparar con el calor necesario para calentar un grado a una cierta cantidad de agua. La cantidad de calor que debe elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado Celsius, se define como una *caloría* [en Estados Unidos se emplea la *unidad térmica británica* (BTU) que es igual a 252 calorías]. Por otro lado, la caloría empleada por los nutricionistas es la llamada gran caloría o kilocaloría, que vale 1 000 calorías. Debe ser claro que la caloría está definida con relación a una sustancia determinada —el agua— a su unidad de masa y a la unidad de temperatura.

**Calorimetría y calor específico.** Por referirse todas las medidas de calor a la elevación de temperatura de cierta cantidad de agua, se introduce el concepto llamado *calor específico*, que se define como el calor necesario para elevar la temperatura en un grado Celsius de un gramo de la sustancia en cuestión. Por esta razón, el calor agregado a un cuerpo para elevar su temperatura puede calcularse sencillamente como el producto de la masa del cuerpo por su calor específico y por la elevación de temperatura. Este procedimiento facilita el cálculo, si uno desea hacerlo, de cantidades de calor. Por ejemplo, la temperatura de un cuerpo caliente de masa y calor específico conocidos, puede conocerse sumergiéndolo en una masa conocida de agua y anotando su elevación de temperatura, suponiendo que el calor perdido por el cuerpo caliente al enfriarse, es igual al calor ganado por el agua al calentarse. Este procedimiento sugiere también un método para determinar el calor específico desconocido de alguna sustancia, y este método se llama generalmente *calorimetría*. Así, si un cubo de cobre de 100 g (gramos) a la temperatura de ebullición del agua (100°C) se deja caer en 1 000 g de agua a la temperatura ambiente (25°C) y la temperatura del agua se eleva hasta 25.7°C (mientras, por supuesto, la temperatura del cobre desciende a 25.7°C), entonces el calor específico del cobre (despreciando el calor absorbido por el recipiente) vale 0.094.

**Estados de la materia. Calor de vaporización.** En un capítulo anterior se suscitó la cuestión de los estados de la materia. Se dijo que ésta, ordinariamente se presenta en tres estados: gaseoso, líquido y sólido. Encontraremos ahora que si el calor, como se infiere de la teoría cinética, es energía, los estados de

La materia dependen de su contenido de calor. Un cambio de un estado a otro incluye la adición o sustracción de una cierta cantidad de calor por gramo de sustancia. Así, cuando una caldera se agrega a un gramo de agua a la temperatura ambiente y a la presión atmosférica normal, su temperatura se eleva un grado Celsius. En cambio, cuando la temperatura original del agua, a esta presión, es de 100°C, el resultado es diferente: la temperatura no se eleva un grado por cada caloría agregada, sino que a esta temperatura, una fracción del agua es convertida en vapor. La adición de unas 540 calorías convierte a todo el gramo de agua en vapor y mientras esto no sucede, una adición de calor producirá una elevación de temperatura. Durante el proceso, el agua y el vapor de agua permanecen mutuamente en equilibrio. La cantidad de calor que se necesita para convertir un gramo de agua en otro de vapor, sin cambiar su temperatura, se llama el calor latente de vaporización del agua, a la temperatura en cuestión.

**Cambios de la temperatura de la ebullición con la presión.** Se ha notado también que la temperatura a la que hierve un líquido, esto es, su temperatura de ebullición, no es una temperatura fija, sino que depende de la presión. El punto de ebullición del agua a la presión atmosférica normal es de 100°C, pero esta temperatura puede aumentar al aumentar la presión, como sucede en una olla de presión (Fig. 8.5). Por otro lado, a grandes alturas, donde la presión es baja el punto de ebullición también es bajo; puede ser tan suficientemente bajo como para no cocer ciertos alimentos por ebullición, como lo saben bien los pasajeros de las líneas aéreas. Los químicos enseñan que las sustancias pueden identificarse por sus característicos puntos de ebullición, pero para este proceso de identificación

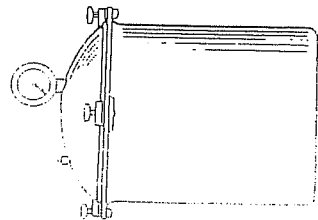


Fig. 8.5. Con la olla de presión el punto de ebullición del agua se eleva arriba de 100°C o 212°F

debe aclararse que es necesario establecer alguna presión normal como la atmosférica de 76 cm de mercurio.

La ebullición bajo presión reducida puede también ser ilustrada por el llamado hervidor de Franklin, que es un aparato de vidrio con la forma de pesas de gimnasia, es decir, un tubo delgado con un bulbo esférico en cada uno de sus extremos y sellado bajo presión reducida. El calor de la mano tomando un bulbo, eleva lo suficiente la temperatura para hacer hervir el agua y condensarla en el otro bulbo más frío.

**Ebullición y evaporación. Presión de vapor.** Con respecto a la discusión del caso de un líquido hirviendo, debe hacerse una distinción entre ebullición y evaporación. Es bien sabido que una poca de agua dejada en un plato descubierto debe finalmente desaparecer por evaporación, lo que es un resultado de la actividad molecular en la superficie del líquido y es explicable por la teoría cinética: las moléculas simplemente saltan fuera del líquido. En el caso de la ebullición el cambio de estado no tiene lugar sólo en la superficie, sino dentro del agua, aun muy profundamente, donde el calor es aplicado tal vez por una flama. Si, por otra parte, se coloca una cubierta al plato con agua, las moléculas quedan encerradas arriba de la superficie del líquido y originan una presión conforme se acumulan; a una temperatura dada existe un valor máximo que puede alcanzar esta presión para un líquido en particular, llamada *presión de vapor saturado*. A esa temperatura probablemente las moléculas que salen del líquido al vapor son en igual número a las moléculas que pasan del vapor al líquido. Desde este punto de vista, el punto de ebullición de un líquido es simplemente la temperatura a la que la presión de vapor saturado coincide con la presión atmosférica.

**Humedad.** Los efectos del vapor de agua en el aire ofrecen un interesante estudio. Todos sabemos que la humedad atmosférica es un factor muy importante del clima. Existe, evidentemente, un límite de la humedad que puede contener el aire, a una temperatura dada; si se sobrepasa el máximo el agua se separa del aire. En esta condición se dice, técnicamente, que el aire tiene una humedad relativa de 100%, donde el término *humedad relativa* es la relación entre el vapor del agua contenida en un volumen dado de aire y la máxima que pueda contener a la temperatura a la que se encuentra. La cantidad de

vapor de agua que contiene un volumen dado de aire se llama *humedad absoluta*; la medición de la humedad se trata en *psicrometría*. Esta medición se lleva a cabo por medio del *higrómetro giratorio* (Fig. 8.6). Haciendo girar este aparato el *aire circula* y mejora la evaporación de humedad del bulbo húmedo. Como la evaporación provoca enfriamiento, hay una *diferencia en las lecturas* de los dos termómetros que está relacionada con la humedad relativa.

**Roceo.** Como la máxima cantidad posible de humedad en el aire varía con la temperatura —en realidad aumenta con ella—, se tiene el fenómeno del *punto de rocío*. Una cantidad de vapor de agua que no es suficiente para producir saturación a una cierta temperatura, puede, sin embargo, saturarse a una temperatura más baja; por ejemplo, un recipiente con hielo exhibe humedad condensada, o rocío, en toda la superficie inferior a la del aire que lo rodea, como para que la cantidad de vapor de agua presente llegue a la saturación. Análogamente, el rocío se forma en el césped en aquellos anochecerse en que la temperatura disminuye lo suficiente, probablemente por radiación, para que el vapor de agua presente en el aire llegue a la saturación. Si la temperatura es muy baja, en lugar de que el vapor se convierta en agua, cambia directamente a hielo formándose en *escarcha*.

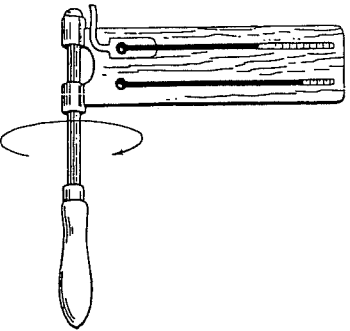


Fig. 8.6. La unidad relativa puede medirse por medio del higrómetro giratorio en el cual el termómetro de bulbo seco y el de bulbo húmedo hacen girar en un marco alrededor de un eje. La diferencia entre las lecturas de los dos termómetros mide la humedad relativa.

**Congelación—Calor de fusión.** Esto nos lleva a otro importante cambio de estado, el cambio de líquido a sólido y viceversa, llamado, respectivamente, congelación y fusión. Hemos visto que la adición de calor a una sustancia eleva la temperatura de ésta —para el agua a un grado Celsius por gramo—, excepto que se alcance la temperatura de ebullición, que es cuando se efectúa el cambio de estado. De modo semejante, pero opuesto, la temperatura de cero grados Celsius es única para el agua, pues la sustracción de calor a esta temperatura produce el cambio del estado líquido al sólido. Para el agua se necesitan, a  $0^{\circ}\text{C}$ , 80 calorías por gramo, es decir, con objeto de congelar el agua a esta temperatura, deben sustrarse 80 calorías por gramo, y la fusión del hielo a esta temperatura, absorbe 80 calorías por gramo. La cantidad de calor necesaria para cambiar de estado a un gramo de una sustancia de líquido a sólido, o viceversa, sin cambio en su temperatura, se llama el *calor de fusión* de dicha sustancia —para el agua es de 80 calorías por gramo.

**Refrigeración—Utilización del calor de fusión.** El calor de fusión es importante en la refrigeración con hielo, la que no hace mucho tiempo era el método común de refrigeración casera. Los alimentos pueden ser mantenidos fríos en una caja con hielo por la fusión de éste, asegurándose de que las 80 calorías por gramo se toman del alimento y no del exterior; por consiguiente, tanto los alimentos como el hielo deben estar rodeados por una caja aisladora del calor, y la eficiencia del refrigerador de hielo es directamente proporcional a su aislamiento térmico.

**Calefacción de las casas. Utilización del calor de vaporización.** Por otra parte, el calor de vaporización es lo importante en los sistemas de calentamiento con vapor de agua. Las 540 calorías liberadas por cada gramo de vapor condensado en el radiador, contribuyen en gran medida a su calentamiento, el que a su vez calienta el aire de las habitaciones de una casa en donde se usa este sistema.

**Sublimación.** Muchas sustancias son capaces de pasar directamente del estado sólido al gaseoso sin pasar por el líquido. Este fenómeno se llama *sublimación*. Todos estamos familiarizados con el hecho de que el llamado hielo seco —esto es, bióxido de carbono sólido— simplemente se evapora sin fun-

dirse a la presión atmosférica: esto es sublimación. Gran parte de la nieve que se encuentra en el suelo durante el invierno se sublima en lugar de fundirse.

**Aire líquido.** Hubo un tiempo en que la licuefacción de muchos gases era imposible y se pensaba que por esa razón podían distinguirse los vapores de los gases, pero ahora esa distinción no es necesaria porque ahora todos los gases pueden ser licuados y aun solidificados. Por ejemplo, el aire líquido es una sustancia familiar en los laboratorios científicos; por supuesto, está hirviendo cuando se encuentra rodeado de la temperatura ambiente y a la presión atmosférica normal, encontrándose entonces a  $180^{\circ}\text{C}$  bajo cero. Se debe tener cuidado de no encerrar el aire líquido en un recipiente tapado, porque a la temperatura ambiente su presión de vapor saturado es de muchísimas atmósferas. Por la misma razón no es seguro encerrar el hielo seco en un recipiente tapado y a la temperatura ambiente, pues la presión de vapor que se desarrollaría sería enorme.

**Efecto de la presión en el punto de congelación.** Se ha visto así que el estado en que existe la materia depende de otras cosas además de su condición térmica. En el punto de ebullición el estado líquido y el estado gaseoso existen en equilibrio mutuo, y en el punto de congelación los estados sólido y líquido de una sustancia se encuentran en equilibrio. Aunque el punto de ebullición del agua se altera en forma notable por un moderado cambio de presión, el punto de congelación sólo cambia ligeramente; sólo enormes presiones pueden reducir de modo apreciable el punto de fusión del hielo. El patinaje sobre hielo es en realidad un proceso de deslizamiento sobre una delgada capa de agua colocada inmediatamente abajo del filo del patín, la que se produce por la fusión local del hielo por la presión que ejerce el peso del patinador actuando sobre el área relativamente pequeña de contacto del patín con el hielo. Al suprimir la presión, después que pasa el patín, esta delgada capa de agua se congela casi instantáneamente. El nombre técnico para este fenómeno, que consiste en la fusión bajo la presión y la recongelación después de quitarla, se llama *regelación*. (Fig. 8.7.) Esto también explica el modo como los heleros probablemente se deslizaron sobre grandes porciones de la Tierra en un periodo primitivo.

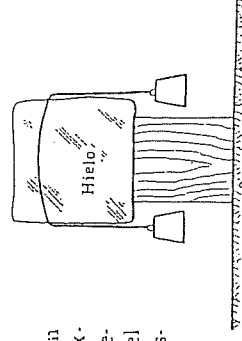


Fig. 8.7. La regelación se demuestra con un alambre, con pesas colgadas en sus extremos, que gradualmente "corta" un pedazo de hielo; éste se funde debajo del alambre y se congela inmediatamente después que ha pasado

**El punto triple.** El descenso del punto de ebullición por reducción de la presión sobre el líquido, combinado con el cambio en el punto de congelación al cambiar la presión, hace surgir la pregunta de si puede existir una combinación apropiada de presión y temperatura en la que el líquido hierva y se congele a la vez. Así sucede en realidad. A la presión de sólo una fracción de centímetro de mercurio ( $4.06\text{ mm}$  de mercurio) y a una temperatura un poco mayor que  $0^{\circ}\text{C}$  ( $0.0075^{\circ}\text{C}$ ), el agua hierve y se congela simultáneamente. Esta combinación se llama punto triple. Debido a que la temperatura del punto triple para el agua es por completo determinada, se le ha escogido recientemente para un punto fijo termométrico en lugar del de la temperatura del agua congelándose a la presión atmosférica normal ( $76\text{ cm}$  de mercurio) para la calibración de los termómetros. La escala centígrada de temperaturas para la cual se toma como referencia el punto triple se llama propiamente escala Celsius.

**Sumario.** En este capítulo hemos visto cómo el calor es sencillamente una manifestación de la energía, cómo se distingue de la temperatura y cómo esta última se mide en virtud de ciertas propiedades térmicas de la materia, en particular la dilatación. También hemos considerado brevemente cómo se mide el calor y qué consideraciones térmicas entran en aquellas cuestiones que involucran los estados de la materia y sus cambios. En seguida haremos consideraciones descriptivas de cómo se transmite el calor y de los fenómenos relacionados.

## CUESTIONARIO

1. ¿Por qué cuando el termómetro se coloca en agua caliente su columna de mercurio generalmente desciende un poco?

Un plato de pyrex se rompe más difícilmente cuando se calienta que un plato de vidrio ordinario. ¿Cómo puede relacionarse este fenómeno con los coeficientes de dilatación de estas dos sustancias?

¿Sirve el procedimiento de sumergir la tapa metálica de un frasco en agua caliente para aflojarla y quitarla más fácilmente?

¿Cuál es la diferencia entre el calor y la temperatura?

Diga si es correcto que un meteorólogo informe que puede esperarse que la temperatura se entibie o se enfríe, según sea el caso.

En un termómetro Celsius se lee  $-40^{\circ}$ . ¿Cuál será la lectura en un termómetro Fahrenheit?

Generalmente es posible, por medio de calentamiento suave, quitar el tapón pegado de un frasco de vidrio. Explique por qué.

Diga si un litro de agua hirviendo está más caliente que un metro cúbico de ella. ¿Cuál contiene más calor?

Diga por qué razón el vapor de agua a  $100^{\circ}\text{C}$  ocasiona una quemadura más grave que el agua hirviendo a la misma temperatura.

¿Por qué se calienta un gas al comprimirlo y se enfría al dilatarlo?

Explique por qué el aire que escapa por la válvula de un neumático de automóvil se siente frío.

Explique por qué es imposible patinar sobre el vidrio.

El fosulfito de sodio se usa a veces en lugar del hielo en pistas cubiertas para patinar. ¿Qué característica tiene que lo hace útil para este propósito?

¿Por qué es necesario adicionar humedad en el invierno al aire de una casa?

Explique por qué se deposita humedad en el exterior de una jarra que contiene hielo.

Explique por qué el sudor es más molesto en un día húmedo que en un día seco, aunque la temperatura sea la misma.

## Capítulo 9

### CONSIDERACIONES TERMICAS (Continuación)

#### LA NATURALEZA DE LA TRANSMISION DEL CALOR; LA TEORIA CUANTICA Y ALGUNAS CONSIDERACIONES FILOSOFICAS

El calor puede transmitirse de un lugar a otro. En el capítulo anterior se ha hecho notar que la temperatura puede imaginarse como aquella propiedad que determina la dirección en que fluye el calor de un cuerpo a otro, cuando están en contacto. Que el calor fluya de una región a otra no es un fenómeno familiar, así que el estudio de la manera cómo se transmite el calor es una parte importante de cualquier curso de física general.

Se transmite o fluye el calor (no el frío). En primer lugar, debe comprenderse claramente que el calor siempre fluye por sí mismo de las regiones de mayor temperatura a las de menor temperatura, justamente como fluye el agua, por sí misma, cuesta abajo. Esto significa que si el calor fluye desde regiones de baja temperatura a otras de mayor temperatura debe ser obligado; esto es, debe suministrarse un trabajo. Además, esto significa que el "frío" no es lo que se mueve. El frío es la ausencia de calor; solamente este último, la energía asociada con el movimiento irregular de las moléculas, es lo que fluye; así, no debe decirse que el frío debe quedarse afuera de una casa bien cerrada en un día de invierno; esto no niega que el aire frío pueda ser obligado a entrar en una casa en un día borrasco por las rendijas de las ventanas, puertas, etc. En realidad, el problema es aislar la casa para mantener el calor en el interior sin que escape al exterior. Análogamente, usamos ropa "caliente" en el invierno para mantener el calor del cuerpo y



no para mantener el frío afuera. El aislamiento térmico no es una cosa sino el hecho de evitar la transmisión de calor, y, en consecuencia, es una parte del tema general de la transmisión de calor, que en seguida trataremos.

Las tres formas en que se transmite el calor (conducción, convección y radiación). Existen tres modos de cómo puede transmitirse el calor de una región a otra: *conducción*, *convección* y *radiación*. Abordaremos en seguida estos temas.

**Conducción.** Cuando un atizador de hierro tiene un extremo en el fuego, se observa que el calor se mueve del extremo caliente al frío pasando sucesivamente de un punto a otro a lo largo del atizador: en esto consiste la *conducción*. En función de la teoría cinética, la agitación molecular pasa de una molécula a otra de modo semejante a como caen los dominós que forman una fila, si se vuelca el primero de la línea. Sucesivamente cada dominó transmite su energía al siguiente. (Fig. 9.1.)

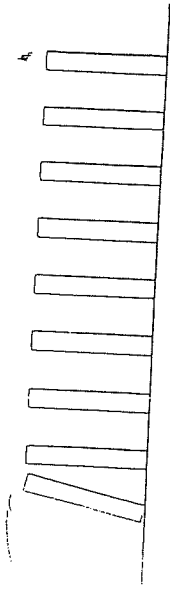


Fig. 9.1. Si el dominó del extremo de una fila se empuja dejándolo caer, su energía cinética va pasando de dominó a dominó; este proceso es análogo a la conducción del calor.

**CONDUCTIVIDAD.** Sustancias diferentes tienen diferentes *coeficientes de conductividad*, determinados por la rapidez con que se conduce el calor a través de la unidad de longitud de la sustancia, cuando se mantiene la unidad de diferencia de temperatura entre los extremos de una muestra de la unidad de área de sección recta. El elemento natural mejor conductor del calor es la plata, la que incidentalmente es también el mejor conductor de la electricidad. Los aisladores son simplemente malos conductores. Mientras que los metales son buenos conductores del calor, el corcho y la lana son buenos aisladores; el aire y la mayoría de los gases son malos conductores; esto es, están en la mala conductividad de los espacios de aire encerrados entre los pelos de la piel; por esta misma razón se deja

una doble pared en la construcción de casas con un espacio de aire en medio. Como el polvo de asbesto es también un aislador muy bueno, esto es, un mal conductor, por lo general se llena con él el espacio entre las paredes de las casas antiguas para mejorar el aislamiento. Debe hacerse notar, por supuesto, que si se evita completamente que escape el calor por las paredes, ventanas, techos, etc., las casas podrán calentarse con muy poco gasto; por esta razón se presta mucha atención al aislamiento de la casa "del futuro".

La llegada del refrigerador eléctrico enfocó la atención en el aislamiento térmico. Por razones de funcionamiento económico, los primeros constructores de refrigeradores estuvieron obligados a desarrollar cajas aisladas tan eficientes que los fabricantes de neveras aprendieron cómo construir las para que sólo fuera necesario llenarlas con hielo una vez a la semana. El hecho consiste sólo en evitar el flujo de calor del exterior al interior de la caja. (Fig. 9.2.)

**Convección.** El segundo modo de transmisión de calor que consideraremos es la *convección*, la cual se caracteriza por la palabra "circulación". Si un cubo de hielo se coloca en un vaso con agua se encuentra que se establecen corrientes en ella (Fig. 9.3). El agua más fría se hunde hasta el fondo del vaso y las

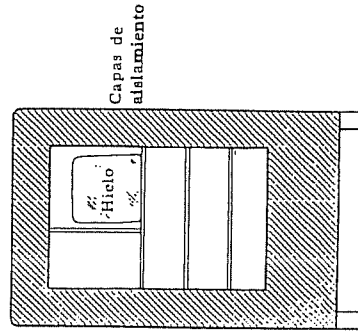


Fig. 9.2. El aislamiento es el secreto de una nevera eficiente. Se evita que el calor penetre a fundir el hielo. Sólo el calor de los alimentos dentro de la caja sirven para fundirlo.

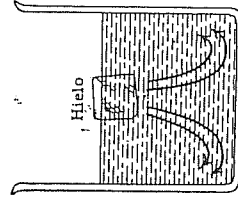


Fig. 9.3. Las corrientes de convección se demuestran por medio de un cubo de hielo flotando sobre el agua de un vaso; el agua fría se hunde dando lugar a que se eleve el agua tibia.

Corrientes tibias se elevan hasta la superficie, lo que se debe a la diferencia de densidad entre el agua fría y la tibia y a la aplicación del principio de flotación de Arquímedes, ya descrito. Esas corrientes se llaman corrientes de convección y el fenómeno de transmisión del calor por este medio se denomina *convección*. La convección se caracteriza específicamente por la adición de calor por algún agente material que, al moverse, lleva el calor de un lugar a otro.

El calentamiento de los cuartos de una casa se realiza en gran medida por corrientes de convección del aire elevándose por radiadores o registros calientes. Debe notarse que las casas donde mejor se aprovecha el calor son aquellas que tienen una buena circulación de aire facilitada por su arreglo interior. Las casas antiguas construidas con cuartos en hilera son difíciles de calentar uniformemente, lo que no sucede en las casas donde los cuartos están rodeando un punto central con puertas, que al estar abiertas, suministran un libre acceso del aire caliente desde el primero hasta el último cuarto.

El principio de la transmisión de calor por convección aún se aplica en los sistemas de enfriamiento de algunos automóviles, aunque la mayoría de ellos tienen actualmente bombas de agua para este propósito. El agua caliente en los motores de los automóviles sube hasta la parte superior del radiador y luego a través de tubos estrechos de latón, en donde, por convección, gran parte del calor es removido y transportado al aire exterior. Del fondo del radiador sale agua fría que pasa al motor, donde el agua caliente es empujada a la parte superior del sistema, volviéndose a repetir el proceso: este sistema se llama *del termostón*. (Fig. 9.4.)

ASPECTOS METEOROLÓGICOS DE LA CONVECCIÓN. Las corrientes convectivas de aire juegan un papel muy importante en la producción del clima, pues las masas de aire caliente que se elevan rápidamente por convección en un día cálido son la causa de la mayoría de las tormentas. Los fenómenos eléctricos que las acompañan se discutirán en un capítulo posterior, pero la formación de nubes que los causan son producidas por corrientes de convección que elevan el aire caliente de las áreas calientes de la superficie terrestre. El estudio de las masas de aire muy grandes alturas y el tema de las corrientes de convec-

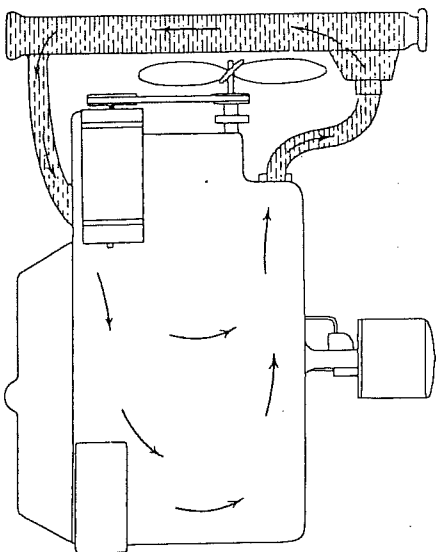


Fig. 9.4. El enfriamiento se lleva a cabo en los radiadores de ciertos carros por medio de corrientes de convección; el agua caliente se eleva en el motor y cae a través de los tubos del radiador donde se enfría y pasa a desplazar el agua caliente de la parte inferior del motor.

ción, han jugado un papel muy significativo en la meteorología moderna.

**Radiación.** El último de los tres modos de transmisión del calor es la radiación que aquí será tratada. Es un hecho conocido que si una mano se coloca a unos pocos centímetros de bajo de un radiador casero caliente, se tiene una sensación de calor. (Fig. 9.5.) Análogamente, se siente calor a unos pocos centímetros del piso enfrente de una hoguera encendida. En ninguno de estos casos se debe la transmisión del calor a la

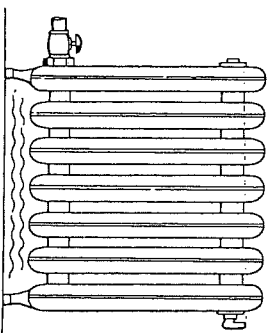


Fig. 9.5. El calentamiento debajo de un radiador se debe principalmente a la radiación

ducción o a la convección del calor. En primer lugar, el aire es un muy mal conductor del calor y, en segundo, la convección lleva el calor hacia arriba y no hacia abajo. En estos casos, el calor es radiado directamente hacia afuera, esto es, se transmite del mismo modo que la luz es transmitida por medio de alguna clase de proceso ondulatorio. Este proceso de transmisión de calor ha sido estudiado con gran atención por los físicos durante muchos años, porque es uno de los más difíciles asuntos estudiados por la física. La naturaleza de la energía radiante no sólo la naturaleza de la radiación del calor, sino también la de la luz, radio, rayos X, radiación cósmica y muchos fenómenos relacionados que serán tratados posteriormente.

**Naturaleza de la energía radiante.** Mucho esmero se ha tenido con la cuestión de si la radiación es corpuscular u ondulatoria. Aunque el punto de vista actual es muy complicado en virtud de ciertos conceptos matemáticos asociados con la teoría cuántica y la relatividad, el punto de vista al que se ha llegado es de que la radiación es principalmente de carácter ondulatorio. La radiación térmica es semejante a la luminosa, excepto en que la longitud de onda que contiene la mayor parte de la energía es diferente en cada caso. Generalmente hablando, las ondas térmicas tienen mayor longitud que las luminosas, pero la velocidad con que viajan por el espacio vacío es la misma. De hecho, ambas clases de radiación se liberan, simultáneamente y con la misma velocidad, de la misma fuente, porque ellas son parte de la misma cosa. En realidad es más aproximado decir que la fuente de energía radiante emite un espectro total de radiación, exhibiendo propiedades ondulatorias y caracterizado por las longitudes de onda que contiene. Una cierta porción de este espectro se reconoce como calor, otra porción como luz, otra como rayos X, etc. El tramo de longitudes de onda visibles, se reconoce con el concepto del color y se extiende desde el violeta hasta el rojo, que corresponden, respectivamente, a longitudes desde unos 0.00004 cm a unos 0.00008 cm. Las ondas térmicas se extienden desde la región infrarroja hasta la de radiación, donde las longitudes de onda se miden en milímetros, centímetros y aun metros. Más allá del violeta del espectro, el mismo de longitudes de onda va desde el llamado ultravioleta responsable en gran parte de las quemaduras del sol y del tostado de la piel— hasta los rayos X. (Fig. 9.6.)

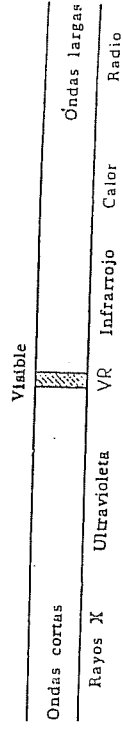


Fig. 9.6. El espectro electromagnético se extiende desde los muy cortos rayos X hasta las muy largas ondas de radio. La porción visible comprende una banda muy estrecha del violeta al rojo.

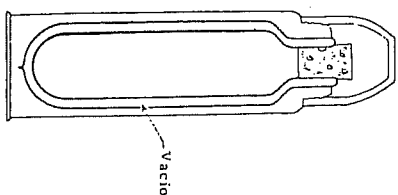
**Color asociado con la radiación.** Que el color está asociado de alguna manera con la radiación térmica puede demostrarse con la estufa de la cocina. Conforme se calienta la estufa se nota primero, que a pesar de sentir que se calienta, no hay indicación alguna de color; sin embargo, arriba de cierta temperatura la cubierta de la estufa empieza a brillar con un color rojo oscuro; este color, al aumentar la temperatura, se vuelve más y más amarillo y tal vez, finalmente, llegue al rojo blanco, en donde se ha encontrado que se emite una gama muy grande de longitudes de onda. La película fotográfica, sensibilizada particularmente para el infrarrojo, es capaz de percibir estas radiaciones mucho antes que la estufa esté suficientemente caliente para brillar visiblemente, aun en la oscuridad. Asimismo, es posible detectar otras longitudes de onda presentes en la radiación de la cubierta al rojo blanco. El análisis de estas radiaciones se llama generalmente *espectroscopia* y la trataremos más ampliamente al estudiar la luz donde parece encontrar lugar más apropiado en nuestro estudio lógico de la física, pues el estudio del calor está tan íntimamente ligado con el de la luz y aun con el de las ondas de la radio, que hacer el estudio separado de cualquiera de estos temas es casi imposible.

**Ley de la radiación térmica.** Regresando al estudio de la radiación del calor o radiación térmica, encontramos que ciertas leyes gobiernan este fenómeno. La rapidez con que se radia o emite el calor depende del tamaño de la superficie del cuerpo radiante, de su temperatura y de su naturaleza. La dependencia de la temperatura no es una proporcionalidad lineal, sino una proporcionalidad a la cuarta potencia, es decir, que si se duplica la temperatura absoluta de la superficie del cuerpo, no se duplica la rapidez con que se emite la radiación, sino que se aumenta 16 veces. Así, aunque todos los cuerpos con temperatura mayores del cero absoluto emiten radiación, los cuerpos calientes siempre se enfrían por radiación más rápidamente que los fríos.

**Características superficiales de los radiadores.** La naturaleza de la superficie que radia es muy importante en relación a la rapidez de la radiación. Las superficies rugosas se enfrían más rápidamente que las lisas y las superficies negras más que las blancas. El peor radiador concebible es, entonces, una superficie perfectamente reflectora, como un espejo muy pulido de plata; por esta razón las planchas modernas se encuentran todas miqueladas, excepto en la base, que es la única superficie por donde se permite que se escape el calor. Este razonamiento sugiere ciertos fenómenos bien conocidos a muchas personas: tales como que las estufas y los radiadores negros suministran más calor que los que están pintados con colores claros, y que los tanques de agua caliente pintados de blanco pierden menos calor que los pintados de otro color. No es la imaginación la que hace que los vestidos claros se sientan más frescos en tiempo lluvioso que los oscuros; en realidad, los vestidos oscuros se sientan más calientes debido a la radiación asociada con el fenómeno de la absorción. Una sustancia absorbe calor radiante en la misma proporción en que lo emite; así, un buen radiador es también un buen absorbedor. Por otro lado, un vestido de lana es más confortable que uno de algodón si la persona se expone, aún en verano, a los rayos directos del sol, debido a la menor conductividad de la lana, más bien que a su propiedad de radiar energía.

**La botella "termos".** La transmisión del calor se verifica en tres modos, a veces simultáneamente. El problema del aislamiento, aunque ya se mencionó en relación con la conducción, en la realidad incluye la eliminación de los tres. El éxito de la botella "termos", por ejemplo, se debe a que reduce al mínimo los tres modos de transmisión del calor. Esta botella consiste en un recipiente de doble pared con un espacio vacío—el peor factor imaginable—entre dichas paredes. (Fig. 9.7.) El único lugar por donde puede escapar el calor por conducción es por el tapón, y éste, por lo general, es de corcho; además, el espacio vacío también elimina la posibilidad de corrientes de convección. Finalmente, las paredes están por lo general plateadas, así que si el calor escapara por radiación a través del espacio vacío, sería reflejado de nuevo hacia el interior de la botella. Por estas razones, un buen "termos" puede mantener calientes los líquidos o alimentos por un lapso considerable, pues el calor escapa difícilmente. Por otra parte, la botella debe mantener a

Fig. 9.7. La botella "termos" es un depósito de doble pared. La región entre las paredes se encuentra al alto vacío para evitar la transmisión de calor por conducción y por convección. Las paredes están plateadas para evitar la radiación



su contenido durante más tiempo frío que caliente, porque los cuerpos calientes radian más rápidamente el calor que los fríos.

**Transmisión y selección selectiva de radiación.** La naturaleza del calor radiante es muy parecida, aunque no exactamente la misma, a la de la luz lo que se demuestra porque puede ser enfocada por lentes y reflejada por espejos. Ciertas sustancias son más transparentes a las ondas luminosas (cortas) que a las ondas térmicas o de calor (largas); es decir, transmiten las ondas de una cierta longitud, pero son opacas a otras de longitud diferente. Algunas sustancias también absorben longitudes de onda especiales.

Un invernadero presenta una situación interesante. La luz se transmite fácilmente a través de las ventanas de vidrio y bastante energía radiante se absorbe por los cuerpos y el piso dentro del invernadero; estos cuerpos inmediatamente vuelven a

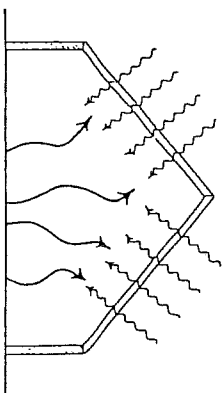


Fig. 9.8. En un invernadero las ondas cortas entran y son absorbidas. Se transforman en ondas largas que no pueden ser transmitidas por el vidrio

... la energía como ondas de calor, pero con longitudes de onda demasiado grandes para penetrar en los vidrios de la ventana (Fig. 1). De esta manera, la energía penetra como onda corta, pero puede escapar porque estas ondas son convertidas a ondas largas. Esta insistencia en las ondas y sus longitudes presenta la cuestión de si la luz y el calor radiante son semejantes; además admitiremos que ninguna discusión de la radiación podrá ser completa sin alguna referencia a la ahora popular teoría cuántica la cual contradice a la teoría ondulatoria.

La teoría cuántica. Por 1900, Max Planck, físico alemán, hizo un estudio intensivo de la distribución de la energía en el espectro de la radiación, intentando formular una relación matemática que indicase la cantidad de energía correspondiente a ciertas longitudes de onda, es decir, asociada con los diferentes colores, llegando entonces al convencimiento de que las leyes de la física clásica eran inadecuadas para explicar los hechos observados. En otras palabras, su investigación para encontrar la verdad, que es la tarea suprema del científico, le llevó a la conclusión de que leyes supuestamente correctas no eran verdaderas, y que todos los fenómenos naturales no se explican necesariamente en función de postulados sencillos. En particular, encontró que en lugar de suponer que la energía radiante se propaga como una perturbación ondulatoria continua, era necesario postular que la energía se radia en porciones, o paquetes, siendo cada uno de ellos un número entero de unidades elementales a las que Planck llamó *quanta* o *cuantos*. Este postulado radical, y muy artificial, enunciado por uno de los físicos más conservadores del mundo, encontró mucha oposición en aquel tiempo, pero actualmente, después de más de dos tercios de siglo de la más completa investigación en la historia de la física, este postulado cuántico se ha convertido en el punto de partida aceptado.

Algunos aspectos filosóficos de la teoría cuántica. Aunque la teoría parece dar un aspecto corpuscular a la naturaleza de la energía radiante, no elimina la hipótesis ondulatoria porque hay otros fenómenos (discutidos posteriormente en óptica, Págs. 180-210) que no pueden explicarse por medio de corpúsculos, y es acepto que estos mismos se imaginen como paquetes de ondas. En este modo, la radiación se discute aún en términos de ondas, pero simultáneamente también en términos de cuantos. Si esto

parece confuso al estudiante, se encontrará justamente en el punto de vista adoptado por los físicos de la última generación, que percibieron que el descubrimiento de la teoría cuántica quita por completo toda apariencia de realidad a la física. Actualmente, sin embargo, muchos aspectos filosóficos de esta cuestión han sido rectificadas de tal manera que demuestra que los puntos de vista anteriores, aunque aproximados a la verdad, no son tan buena aproximación como los últimos puntos de vista, es decir, sucede como si los puntos de vista anteriores explicaran solamente los fenómenos principales pero no los detalles, mientras que los puntos de vista actuales son más comprensivos aunque más complicados.

La "nueva" física va más allá que la física "clásica". Aquí empezaremos a ver cómo ha cambiado la física y por qué los físicos se refieren a una nueva física para distinguirla de la física clásica. La nueva física, o más apropiadamente la física contemporánea, está afectada por un punto de vista carente por completo de relación con el llamado "sentido común", pero caracterizado por una lógica estrictamente matemática y por deducciones de suposiciones formales, justificados sólo por sus resultados observables. Aunque ésta no es la física de Newton, es, a pesar de todo, sólo diferente de ella principalmente en el dominio de los sucesos submicroscópicos, estando la mayoría de las deducciones de la física newtoniana manteniéndose, como siempre, en el mundo mecánico ordinario del hombre y de las máquinas. Actualmente se trata con moléculas, átomos, electrones y otros conceptos subatómicos que no estaban en el vocabulario de Newton y que no se aprecian con nuestros sentidos comunes, sino con los ojos de la mente; en consecuencia, la física cuántica se ha establecido en la ciencia actual, porque "explica" los fenómenos moleculares y atómicos.

Discrepancias adicionales de la "física clásica". Si la teoría cuántica fuera la única fuente de inquietud de los físicos clásicos, probablemente no estaríamos muy interesados en ella, pero el hecho es que muchas de las supuestamente discrepancias menores de la física clásica han sido muy ampliamente por las investigaciones modernas; y, bastante extrañamente, estas medidas necesarias para restaurar orden y concierto a la perturbada representación de la naturaleza, involucran un rompimiento con el sentido común parecido al originado por la teoría

arriba. Especificamente, nos referimos al estudio del movimiento relativo, que ha sido explicado por Einstein únicamente en referencia a conceptos y lógica matemática, las que no parecen razonables desde el antiguo punto de vista. Uno de éstos, ejemplo, es el postulado de relatividad de que ningún cuerpo puede tener una velocidad mayor que la de la luz.

En resumen, el físico moderno, al intentar conocer la naturaleza ha descubierto que en lugar de enfrentarse simplemente a la tarea de pulir ásperos puntos de problemas, por otra parte ya resueltos, en realidad araña la superficie de problemas más y profundamente significativos. Sin embargo, no hay nada para desanimarse, pues los descubrimientos pasados están muy bien consolidados y se tiene confianza en que cuanto se descubra en el futuro, de algún modo estará de acuerdo con lo que se sabe actualmente. Gran parte de la física nueva versa sobre fenómenos eléctricos, que serán tratados en el capítulo siguiente.

**Sumario.** En este capítulo se han descrito los tres modos de transmisión del calor: conducción, convección y radiación. Asimismo se ha visto que es lo inverso de la conducción. La conducción se refiere a la transmisión de energía molecular a través de un cuerpo sólido. La convección involucra la circulación del calor por medio de algún agente (un fluido) que fluye de un lugar a otro. La radiación es una propagación de energía muy diferente de los otros dos modos y es de naturaleza electromagnética, como la luz, la radio y los rayos X, estudiándose por la teoría cuántica. Esta teoría ha revolucionado completamente el punto de vista físico, siendo la física moderna algo más que una extensión de la física clásica, aunque ésta es una primera aproximación de aquélla.

### CUESTIONARIO

Algunas personas están inclinadas a jactarse del lapso que mantienen el hielo en un refrigerador, cuando lo envuelven en un periódico. Comentar.

¿Por qué se emplea una gruesa capa de aire para aislar hogares?

¿Los carámbanos se observan a menudo que funden en el lado sur de una casa, más pronto que en el lado norte, ¿por qué?

4. ¿Cuál es el efecto de una chimenea en una habitación sin ventilación?
5. Cuando una chimenea humea al principio, después de algún tiempo de encendida suele dejar de humear, ¿por qué?
6. Explique por qué una persona, cerca del fuego de la chimenea, puede sentir calor en la cara y frío en la espalda.
7. Explique por qué un termo mantiene más tiempo las cosas frías que las calientes.
8. ¿Cuáles son algunos postulados de la teoría cuántica?

## CONSIDERACIONES ELECTRICAS

### ELECTRICIDAD ESTÁTICA; CARGAS; POTENCIAL; CAPACITANCIA

En los capítulos anteriores se ha hecho referencia a la estructura eléctrica de la materia y se ha hecho notar que toda la materia está formada fundamentalmente por cargas eléctricas. El concepto de carga eléctrica, aunque un poco abstracto, es tan importante que no puede dejar de mencionarse en la descripción del mundo físico. Al principio, dicho concepto era justamente un artificio inventado para describir una situación, pero después adquirió realidad al descubrirse las unidades naturales de carga. En la actualidad se percibe que las unidades de carga como el electrón, positrón, protón, y diversos mesones, etc., realmente existen y son entidades fundamentales con relación al concepto de la materia misma; por consiguiente, invitan a estudiarlas.

**Electricidad por fricción.** Procediendo histórica y lógicamente en el desarrollo del conocimiento de la electricidad, empezaremos con consideraciones de electricidad por fricción y de electrostática. Como ya se ha dicho, si una barra de ebonita (hule duro) se frota vigorosamente con una piel, adquiere la propiedad de atraer pedacitos de papel y de médula de saúco (Fig. 10.1).

**Semejanza entre las fuerzas magnéticas y las eléctricas.** La fuerza así demostrada se llama una *fuerza eléctrica*, de la palabra griega para ámbar, la sustancia donde fue primero observada. Una fuerza semejante, pero bastante diferente, también se ha observado en relación a las limaduras de hierro y el mineral



Una barra de ebonita, frotada con una piel, atrae pedacitos de papel debido a su carga eléctrica

magnetita, o piedra imán, la que se usó antiguamente para atraer a las propiedades direccionales (Fig. 10.2). Se llama *fuerza magnética*; en el Cap. XI se discute con propiedad.

En cada uno de los casos discutidos, la fuerza es especial al contrario de las fuerzas ordinarias de empuje y de atracción que necesitan contacto entre los cuerpos, en esos casos se necesita contacto. Los primeros físicos describieron el fenómeno llamándolo acción a distancia. La gravedad es una fuerza análoga, formando un grupo especial. Por razones que son evidentes posteriormente, estas tres fuerzas se llaman fuerzas de "campo" en contraste con las fuerzas de "contacto". Las fuerzas electromagnéticas y las de gravitación forman ciertos aspectos comunes, son, sin embargo muy diferentes entre sí y relacionan partes de la física completamente nuevas, aunque los fenómenos eléctricos y magnéticos, como ya se ha demostrado, están tan relacionados entre sí que es difícil tratarlos juntos, aparte del estudio de la gravedad.

**Teoría de los fluidos eléctricos.** Retornando a los fenómenos eléctricos, se supone que las fuerzas eléctricas se pro-

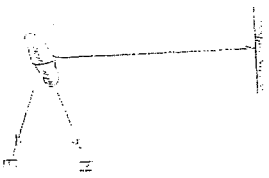


Fig. 10.2. Un pedacito alargado de magnetita, o piedra imán, suspendido de una cuerda, apunta hacia el norte

ducen por las llamadas *cargas eléctricas*, las que pueden acumularse o cancelarse en los cuerpos cuando son frotados por otros, como en el caso de la ebonita frotada con una piel. Se ha encontrado que una barra de ebonita frotada con una piel tiende a repeler a otra barra de ebonita análogamente tratada, pero tiende a ser atraída hacia una barra de vidrio frotada con seda. Sucede como si las cargas de la ebonita y del vidrio fueran diferentes, de hecho, de carácter opuesto. Además, la piel atrae a la ebonita y el vidrio a la seda, después que se han frotado.

Estos fenómenos se observan mejor cargando pequeñas bolitas de médula de saúco, colgadas de un hilo de seda; la carga se lleva a cabo poniendo las bolitas en contacto con barras cargadas de ebonita o de vidrio. Las observaciones llevan al punto de vista primitivo de que hay distintas clases de electricidad, indicadas por conveniencia con los nombres de "positivo" y "negativo". Todas aquellas sustancias, que al frotarlas con otras, se comportan como el vidrio frotado con seda, se dice que están cargadas *positivamente*; todas aquellas que se comportan como la ebonita cuando se frota con piel, se dice que están cargadas *negativamente*. El que una carga sea positiva es algo puramente arbitrario y no debe darse mucha importancia en el significado físico de "positivo" y "negativo", excepto el que uno es el opuesto del otro. Así, dos fundamentales clases de electricidad fueron postuladas y se descubrió una ley muy importante que dice en parte que cargas semejantes se repelen y cargas diferentes se atraen. (Pág. 158.)

**Teoría de un solo fluido.** Benjamin Franklin, el científico y estadista estadounidense, sintiendo que la llamada teoría de los dos fluidos eran innecesariamente complicada, propuso un punto de vista que recuerda de muchos modos el punto de vista moderno. Propuso una teoría, llamada de un solo fluido, postulando que una carga positiva representa una acumulación de carga (posiblemente positiva), mientras que la carga negativa era solamente una deficiencia de dicha carga. Excepto que la moderna teoría electrónica incluye cargas inherentemente negativas en lugar de positivas (de la clase exhibida por la ebonita, más bien que la del vidrio), explica de modo similar los fenómenos electrostáticos ordinarios, es decir, considera sobranes y faltantes de una sola clase de carga eléctrica.



Terminología eléctrica basada en la teoría de un fluido positivo. Una de las dificultades que se encuentran actualmente en el estudio de la electricidad, es que aun cuando la teoría de los electrones negativos ha reemplazado a la teoría del fluido positivo, la terminología antigua aún persiste y muchos conceptos eléctricos se definen actualmente en términos del fluido cargado positivamente de Franklin. Así, aun la unidad de carga eléctrica, definida de manera arbitraria con el propósito de una comprensión lógica de los fenómenos eléctricos, no es una elección (porque esta unidad natural se descubrió hasta principios de este siglo), sino la unidad llamada coulomb (Pág. siguiente).

Naturaleza abstracta del estudio de la electricidad. El importante concepto de la unidad de carga es, en realidad, sólo un producto de la mente; es sólo una suposición, pero necesaria para apreciar con propiedad todos los conceptos eléctricos, ya que la ciencia de la electricidad, se ha desarrollado como un conocimiento abstracto. La electricidad, a diferencia de la mecánica por ejemplo, trata con conceptos más bien que cosas visibles, y el estudiante que desea comprender una acción eléctrica dada debe, sin excepción, seguir una sucesión de argumentos lógicos cuidadosamente desarrollados y pesados en términos definidos con precisión, porque no hay cosas que giren o resortes que oscilen que puedan observarse. Relativamente fácil discutir a nivel académico el movimiento de un cuerpo bajo ciertas circunstancias, ya que los cuerpos en movimiento se pueden observar directamente y los argumentos pueden ser comprobados por dicha observación directa. Por otro lado no se pueden hacer observaciones directas de la carga eléctrica. Aquí, todas las observaciones son indirectas, lo que impide el conocimiento de las relaciones involucradas porque tenemos una percepción directa de la electricidad, pues la carga eléctrica no puede verse, sentirse, oírse, olerse o saborearse. Por esta razón, los físicos son muy cuidadosos con respecto a las definiciones de los términos eléctricos.

Ley de Coulomb. No solamente las cargas semejantes se atraen y las diferentes se atraen, sino que la magnitud de las fuerzas se ha encontrado que depende del valor de las cargas de su separación. La ley de Coulomb lo informa en lenguaje matemático con una expresión muy semejante a la ley

de Newton de la gravitación (que como debe recordarse es una ley llamada de la inversa de cuadrados), porque la fuerza entre las cargas disminuye como la segunda potencia de la separación. La ley dice que la fuerza entre dos cargas varía directamente como su producto e inversamente como el cuadrado de su separación.

La unidad de carga se define en función del valor de la carga del electrón y recibe el nombre de coulomb; así, un coulomb es igual a 6.25 trillones de electrones.

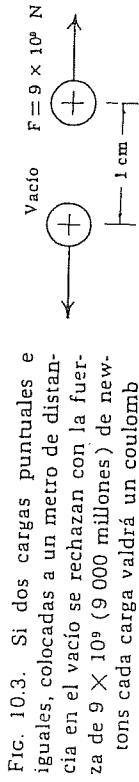


FIG. 10.3. Si dos cargas puntuales e iguales, colocadas a un metro de distancia en el vacío se rechazan con la fuerza de  $9 \times 10^9$  (9 000 millones) de newtons cada carga valdrá un coulomb

Anteriormente se empleaba una unidad de carga llamada statcoulomb (estado coulombio), que se definía como las cargas iguales que a un centímetro de distancia en el vacío se rechazan con la fuerza de una dina; esta unidad es muy pequeña ya que un coulomb es equivalente a 3 000 millones de statcoulombs.

Incidentalmente, debe notarse que todas las unidades eléctricas tienen nombres en honor de físicos famosos.

**Concepto de campo eléctrico.** De este modo, el concepto de carga eléctrica se ha establecido como una especie de porción de electricidad capaz de ejercer una influencia en otras porciones que existan en su proximidad. La región que rodea una carga es, por tanto, donde se manifiestan las fuerzas eléctricas; esta región se llama campo eléctrico.

**Intensidad del campo eléctrico.** La intensidad eléctrica de un campo, ¿no resulta natural medirla por la acción que reciba la unidad de carga positiva? Esto lleva al importante concepto de intensidad del campo eléctrico en un punto, que se define como la fuerza que recibe la unidad de fuerza positiva colocada en el punto considerado; esta magnitud es vectorial. Tal vez sea correcto aclarar al estudiante que el estudio de la electricidad, con sus conceptos abstractos, se ha desarrollado como un estudio de la actividad y el comportamiento de las cargas eléctricas, con la unidad de carga positiva empleada con el propósito de explorar y probar, y que los procedimientos involucrados más bien se imaginan en lugar de observarse directamente.

El concepto de campo, ya sea eléctrico o magnético (que se tratará en el capítulo siguiente) o de gravitación, entraña gran significación para el físico teórico: éste imagina a alguien que rodea a una carga positiva introducida en ella debe que *gira* unidad de carga positiva introducida en ella debe experimentar una fuerza de atracción o de repulsión, según sea positiva o negativa. Por otra parte, el físico teórico encuentra ventajoso definir la fuerza sobre la unidad de carga colocada en el campo. La existencia del campo mismo, es decir, supone que el campo está caracterizado por una propiedad en virtud de la cual una carga en el campo recibe una fuerza. En otras palabras, un campo existe entre dos placas con cargas opuestas sin importar a que sea o no la región rodeando a una sola carga o un solo cuerpo cargado. En este texto se hace, por lo general, referencia al "campo eléctrico" (una magnitud vectorial) en vez de a la "intensidad del campo eléctrico", lo que es la misma cosa; esta magnitud vectorial generalmente se indica con la letra "E".

Al considerar la intensidad del campo (E) en diferentes puntos en el campo eléctrico de un cuerpo cargado, se sugiere el concepto de *líneas de fuerza* para representar esta cantidad (Fig. 10.4). Una línea de fuerza es el camino que toma una carga positiva libre. Y se acostumbra imaginar que las líneas de fuerza salen de las cargas positivas y entran en las negativas pues una carga positiva es rechazada por las positivas y atraída por las negativas. El valor de E en un punto dado se representa por la concentración de líneas de fuerza en ese punto, medido por el número de líneas atravesando perpendicularmente a la unidad de área.

**Potencial eléctrico.** Un término común en el lenguaje eléctrico es el de *potencial*. A menudo se oye decir que algún con-

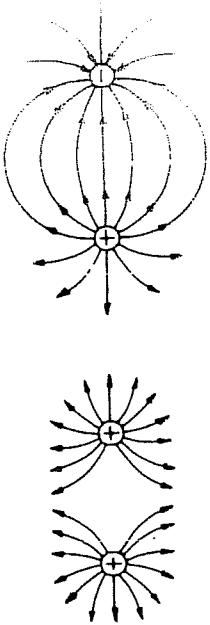


Fig. 10.4. Líneas eléctricas de fuerza

ductor se encuentra a alto potencial y que es peligroso acercarse a él; a veces al alto potencial se le llama alto voltaje. ¿Qué es lo que esto significa y por qué es importante el voltaje en esta edad eléctrica? En todo caso, ¿qué es el voltaje?

Las respuestas a estas preguntas son bien definidas, una vez que se ha establecido el concepto de carga eléctrica. Como una carga positiva, por ejemplo, ejerce una fuerza atractiva sobre una negativa, debe ejercerse otra fuerza para separarlas y entonces debe darse trabajo, porque siempre ha de darse trabajo, cuando un cuerpo se mueve en la misma dirección que la fuerza aplicada. Análogamente, debe darse trabajo para reunir a dos cargas del mismo signo, lo que equivale a decir que la energía potencial eléctrica se encuentra involucrada. Específicamente, cuando una carga positiva se aleja de una carga estacionaria negativa, o de un cuerpo con carga negativa, debe suministrarse trabajo; entonces se dice que la carga positiva que se aleja adquiere energía potencial. Esta energía es capaz de hacer retroceder a la carga negativa, si ésta se libera, justamente como un libro no sostenido es capaz de caer al suelo, bajo la acción de la gravedad. En los alrededores de un cuerpo cargado positivamente, debe suministrarse trabajo a una carga positiva, o a un cuerpo positivamente cargado, para moverlo de un punto a otro punto más cerca de la carga positiva. Esto se describe diciendo que aquellos puntos que están en la vecindad de una carga positiva se encuentran relativamente a *alto potencial*. Con el mismo argumento se infiere que "los puntos que están cerca de una carga negativa se encuentran a *bajo potencial*"; así, la *diferencia de potencial* entre dos puntos representa el trabajo necesario para llevar a la unidad de carga positiva de un punto a otro; justamente como la diferencia de potencial gravitacional entre dos niveles es el trabajo necesario para llevar a la unidad de masa del nivel menor al mayor. Si la unidad de carga es un *statcoulomb*, entonces la diferencia de potencial es un *volt*, si el trabajo suministrado es de un *joule*. El volt es la unidad internacional de potencial y también es la unidad *práctica*. En una discusión popular, voltaje y potencial son términos que a menudo se emplean como sinónimos, lo que no siempre es correcto. El volt es la diferencia de potencial si se necesita un *joule* de trabajo para mover la carga de un *coulomb*.

Analoga mecánica de la diferencia de potencial. Refiriéndose a la cuestión del peligro asociado con un alto potencial, mejor dicho, con una gran diferencia de potencial, la situación es análoga a la de un misil que si se eleva una gran altura luego se deja caer, debe liberarse una energía cuyo valor depende tanto de la masa del misil como de su elevación. Lo mismo sucede con la electricidad. Una gran diferencia de potencial presenta un almacenamiento de energía potencial. Si ésta se libera colocando un camino conductor entre los dos puntos entre los que hay esta diferencia de potencial, la energía se convertirá en una cantidad que depende del valor de la carga y de la diferencia de potencial; esto es precisamente lo que sucede cuando cae un rayo, que no es otra cosa sino una liberación de energía eléctrica. La diferencia de potencial se llama a menudo aunque de modo un poco vago—presión eléctrica, debido a su analogía con la presión hidrostática.

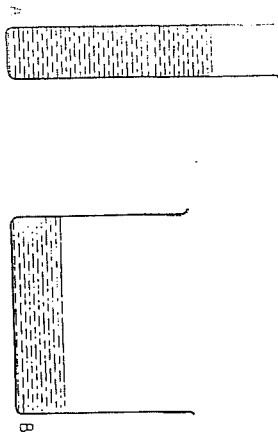
Conducción eléctrica y aislamiento. La cuestión de cómo mantiene la diferencia de potencial es tan interesante como importante, considerando que las cargas opuestas tienden a reunirse y a oponerse a su separación; por consiguiente, el elemento es la clave de la situación. Todas las sustancias pueden ponerse en una lista ordenada de acuerdo a su capacidad de conducir las cargas eléctricas. Las que están en el extremo superior de la lista son las conductoras, y las que se encuentran al final son aisladoras. En general, los metales constituyen el primer grupo y las sustancias como la porcelana, vidrio, la ebonita, etc., constituyen el segundo. El aire seco también un buen aislador, pues se puede mantener una diferencia de potencial de unos 30.000 volts entre dos conductores esféricos de un centímetro de radio, colocados a un centímetro de distancia en aire seco.

Producción de diferencias de potencial. La producción de una diferencia de potencial consiste en separar las cargas, que usualmente lo que pasa cuando una barra de ebonita se frotada con una piel. Las cargas eléctricas se separan por fricción, quedando la ebonita cargada negativamente y la piel positivamente; Pero ahora podemos preguntarnos, ¿dónde se quedan estas cargas que así somos capaces de separar por fricción? O dicho de otro modo, debemos considerar la teoría mecánica de la estructura de la materia.

La teoría electrónica. Como ya se ha mencionado, el coulomb no es una unidad natural de carga, sino es una invención para facilitar el estudio de los fenómenos eléctricos. Durante la última década del siglo XIX, J. J. Thomson, descubrió la prueba de la existencia de una unidad de carga negativa (el electrón), que ocurre naturalmente (Pág. 165). Este hecho quedó bien establecido cuando el físico estadounidense Millikan, por 1910, tuvo éxito al medir la carga del electrón en función de la unidad positiva de carga, encontrando que la carga negativa natural es muy pequeña, un poco más de 15 centésimos de trillónésimo de un coulomb ( $e = -1.6 \times 10^{-19}$  coulomb).

Sin entrar por ahora en los detalles de este descubrimiento, trataremos en lo que resta de esta descripción de hacerlo en términos de la teoría electrónica ahora aceptada—la que dice que la mayoría de los fenómenos electrostáticos se deben a la existencia de electrones libres asociados con la materia—. Así, es creencia actual que cuando una barra de ebonita se frota con una piel, lo que en realidad sucede es que son quitados electrones negativos de la piel y acumulados en la ebonita. Análogamente, en el caso de una barra de vidrio y una tela de seda, los electrones son extraídos del vidrio y llevados a la seda. Sin embargo, en las discusiones cuantitativas, se hace a menudo referencia a la unidad de carga positiva, pero esto simplemente debe imaginarse como la ausencia de unos 6 trillones de electrones. Por supuesto, la carga de un cuerpo por fricción de ninguna manera involucra la generación de la carga, puesto que la materia en sí misma está formada de cargas eléctricas; En el proceso de fricción, las cargas no se crean, sino sólo son separadas; en cambio, la diferencia de potencial se crea al separar las cargas.

Capacidad eléctrica o capacitancia. Aún hay otro aspecto en los fenómenos electrostáticos. Una determinada cantidad de carga no siempre establece el mismo potencial en un cuerpo, del mismo modo que una cantidad dada de agua no produce la misma presión en el fondo de diferentes recipientes; como la presión hidrostática depende de la profundidad del punto considerado, hay una diferencia entre la presión originada por la misma cantidad de agua en dos diferentes recipientes de diferente sección recta, ya que entonces la altura del agua será diferente. Evidentemente, la presión en la base de la columna más esbelta



10.5. Aunque los dos tanques contienen la misma cantidad de líquido, la presión en la base de A es mayor que la presión en la base de B. Electrónicamente hablando, se dice que el tanque B tiene más capacitancia es decir, necesita más líquido para ejercer una presión que la que recibe el fondo del tanque A.

mayor que en la columna líquida de mayor diámetro, pero manteniendo el mismo volumen de líquido (Fig. 10.5).

Por otra parte, si se deja salir el agua simultáneamente de los dos depósitos, la presión debe caer más rápidamente en el primer caso; del último podría decirse que tiene mayor poder para conservar el agua. O dicho de otro modo, es obvio que en el caso del segundo recipiente se necesita más líquido para elevar la presión una cierta cantidad que la necesaria en el primer recipiente porque se requiere más agua para elevar el nivel a una cierta altura.

Electrónicamente se presenta una situación similar. Los conductores de gran tamaño necesitan mayor carga que los conductores pequeños para elevar su potencial en una cierta cantidad (Fig. 10.6). Así, los conductores tienen una característica llamada *capacitancia* —llamada también a menudo, con toda justicia, *capacitancia*—. Estos términos significan no la cantidad de carga eléctrica que puede recibir un conductor, sino más bien la carga necesaria para elevar al potencial en una unidad. Un

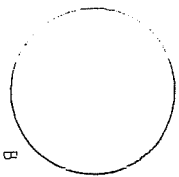


Fig. 10.6. La esfera A debe alcanzar un potencial mayor que la B, con la misma carga, ya que la capacitancia de B es mayor.

coulomb por volt se llama un *farad*, en honor de Miguel Faraday. Un conductor, o una combinación de conductores o aisladores con capacitancia, se llama un *condensador* o *capacitor*. Estos consisten de varias capas de papel de estano separadas por hojas de papel parafinado y empaquetadas en depósitos sellados; estos dispositivos son ampliamente empleados en los teléfonos, los radios, los automóviles e innumerables aparatos eléctricos, por lo que los capacitores juegan un papel muy importante en la vida moderna.

**Una aplicación del capacitor.** Un empleo de los capacitores se encuentra en el automóvil. La función de la bujía es producir chispas eléctricas, a intervalos de tiempo apropiados, entre dos terminales. Como se ha sugerido, la chispa ocurrirá cuando la diferencia de potencial entre los electrodos se eleve a un valor apropiado; si hay un condensador en el circuito de la bujía, la carga necesaria para elevar el potencial al valor apropiado se incrementa, con el resultado que, cuando la chispa tiene lugar, se libera una carga mayor y, por tanto, mayor energía, y la chispa será más intensa o caliente, como diría el mecánico. Esto sugiere el origen del término condensador, cuya función es, por así decirlo, condensar la electricidad, esto es, concentrarla, porque dos conductores separados por un aislador pueden recibir más carga con la misma diferencia de potencial que cualquier conductor único con respecto al suelo.

**Detección de la carga eléctrica.** El *electroscopio de hojas de oro*. Esta discusión estaría lejos de ser completa si no se hiciera mención del modo como se investigan las cargas eléctricas. Con este propósito, el instrumento más a menudo empleado es el electroscopio de hojas de oro que consiste sencillamente de dos delgadas tiras de oro colgando de una varilla metálica que atraviesa un tapón aislador, colocadas en un frasco de vidrio, de tal manera que los extremos de las hojas cuelgan sin tocar al vidrio; el frasco de vidrio sirve solamente como protección de influencias exteriores, tales como corrientes de aire. La parte superior de la varilla termina en un botón o esfera metálica que se encuentra en el lado exterior del tapón (Fig. 10.7). Cuando un cuerpo cargado toca la esfera del electroscopio, las hojas de oro divergen porque cada una de ellas recibe carga del mismo signo y entonces se repelen mutuamente; por supuesto, el signo de las cargas no puede conocerse directamente.

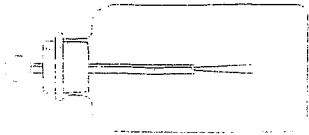


FIG. 10.7. Electroscopio de hojas de oro, encerrado en un recipiente para evitar las corrientes de aire

porque las hojas divergen cualquiera que sea el signo de la carga (Fig. 10.8).

Sin embargo, de modo indirecto es posible determinar el signo de la carga del modo siguiente: si primero la esfera se toca con un cuerpo cargado de signo conocido, tal como la carga positiva del vidrio cuando se frota con seda, entonces las hojas permanecerán separadas por esta carga. Ahora, si un cuerpo positivamente cargado toca al electroscopio, las hojas se separarán más; pero un cuerpo negativamente cargado hará que las hojas se acerquen. Así, una carga de signo desconocido puede compararse con una de signo conocido.

**Carga por inducción.** Es posible transportar una carga a un electroscopio sin tocarlo con el cuerpo cargado; es decir, se puede cargar el electroscopio por *inducción*. Primero se coloca el cuerpo cargado cerca de la esfera del electroscopio (teniendo cuidado de no tocarla) hecho por el cual las hojas divergen; esto se debe a que la carga atrae hacia el extremo de la esfera las cargas de signo opuesto y rechaza hacia el extremo de las hojas un número igual de cargas del mismo signo, pero sin



FIG. 10.8 Las hojas divergen cuando están cargadas ya sea positiva o negativamente

agregar o quitar nada a la carga total del electroscopio porque no se ha hecho contacto; el electroscopio permanece en neutral en conjunto, ya que por definición un cuerpo neutro tiene igual número de cargas positivas que de negativas. Sin alejar el cuerpo cargado del electroscopio, si éste es comunicado con tierra, las hojas caen porque la tierra suministrará toda la carga necesaria para neutralizar la influencia del cuerpo inductor y releva al electroscopio de responsabilidad. Ahora, después de quitar la conexión a tierra, el cuerpo cargado se retirará; entonces las hojas deben divergir de nuevo porque la carga extra suministrada por la tierra mientras el cuerpo inductor estaba cerca, no tiene lugar a donde irse, siendo esta carga extra la carga del electroscopio, que queda así cargado sin llegar a estar en contacto con el cuerpo inductor; además, el signo de la carga inducida es opuesta a la carga del cuerpo inductor (Fig. 10.9).

**Sumario.** Los conceptos de carga, potencial y capacitancia están tan íntimamente relacionados que sin referirse a ellos no puede darse una descripción satisfactoria de los fenómenos eléctricos; por esto se les ha dado mucha atención en este texto. Aunque esta atención pueda parecer innecesaria para estos tres conceptos particulares en un panorama descriptivo, el estudio de la electricidad es tan abstracto que se ha dado énfasis considerable a estos temas básicos, pues de lo contrario el estudio posterior de las corrientes eléctricas y de los fenómenos asociados a ellas sería solamente un despliegue de palabras. Por otro lado, con un vocabulario básico apropiado, el material que se tratará en los capítulos siguientes será de gran significación, aunque esté restringido a un nivel sólo descriptivo.

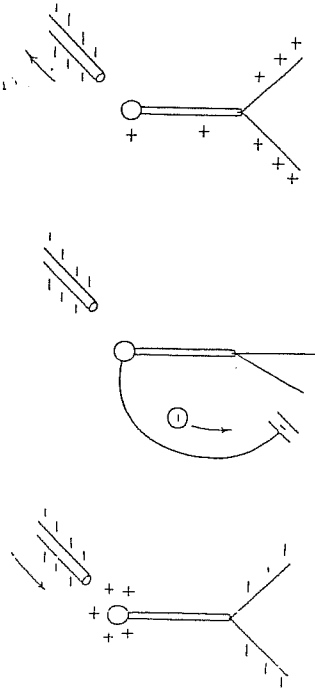


FIG. 10.9. Carga de un electroscopio por inducción. La carga que adquiere el electroscopio es de signo opuesto al de la barra cargada

de estudiar las corrientes eléctricas, sin embargo, parece elado volver nuestra atención a un tema intimamente relacionado con la electricidad y al que ya nos hemos referido en el magnetismo. En el siguiente capítulo serán considerados los fenómenos magnéticos y este tema se explicará de manera semejante como su tema gemelo, la electricidad estática.

### CUESTIONARIO

1. ¿Qué significa el término "capacitancia"?
2. Una botella de médula es atraída por un cuerpo cargado positivamente. ¿Por qué?
3. ¿El contacto es bruscamente rechazada; ¿por qué?
4. Las camionetas transportadoras de gasolina llevan una cadena colgante; ¿por qué esto disminuye el riesgo de incendio?
5. ¿Por qué se recomienda que la limpieza de prendas de seda con gasolina se haga al aire libre?
6. Explique por qué se pierde carga a través de un cuerpo metálico con punta.
7. ¿Por qué es preferible no decir que un cuerpo positivamente cargado ha ganado cargas positivas, sino mejor decir que ha perdido electrones.
8. Una botella de médula descargada se suspende de un hilo; ¿qué sucede si una barra cargada positivamente se le acerca?
9. Una barra cargada positivamente se acerca a un electroscope cargado. Si las hojas caen, ¿cuál es la carga del electroscope?
10. Debe uno tenderse en el suelo si es sorprendido en una lluvia por una fuerte tempestad? ¿Debe uno colocarse debajo de un árbol aislado?
11. ¿Cómo se compara la masa del núcleo de un átomo de hidrógeno con la de un electrón?
12. ¿Por qué las pelotas de ping pong cargadas se rechazan entre sí?
13. ¿Qué podrá decirse con respecto a sus cargas?

## MAGNETISMO

### Capítulo 11

**Fenómenos magnéticos elementales.** Probablemente todos hemos tenido algún contacto con el magnetismo, aunque sea superficial; quizás esto incluya un imán de herradura de juguete que se sabe es capaz de atraer clavitos de acero y limaduras de hierro, pero no a algo hecho de latón. Tal vez también se sabe que un imán en forma de barra, suspendido horizontalmente de una cuerda, gira orientándose por sí mismo en dirección norte-sur (Fig. 11.1). Estas observaciones se hicieron en la antigüedad, suspendiendo trozos alargados de magnetita, un mineral comúnmente llamado piedra imán, inventándose así la brújula supuestamente por los chinos hace miles de años. Aquí, como en nuestro estudio de la electrostática, el problema consiste en responder cuál es la naturaleza de estos fenómenos.

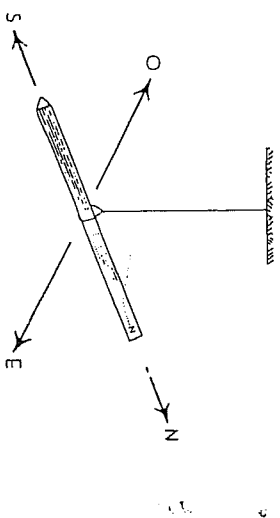


Fig. 11.1. Una barra imán, o un pedazo alargado de magnetita, debe apuntar al norte si se suspende de una cuerda

Debe también hacerse notar que los extremos opuestos de una barra imán actúan como si tuvieran imantaciones opuestas. Debido al aspecto direccional se emplean los términos norte y

En su lugar de positivo o negativo para designar los dos extremos. Es de hacer notar también que los extremos nortes de imanes diferentes se repelen entre sí, pero que un extremo de atrae al extremo sur de otro imán, de modo semejante a como las cargas eléctricas del mismo signo se repelen y de signo contrario se atraen.

**Señalización del magnetismo.** Estos fenómenos sugirieron a primeros físicos que el magnetismo, como la electricidad, de naturaleza corpuscular, con pequeñas unidades de magnetismo análogas a las unidades de carga eléctrica: estas unidades se llamaron *polos magnéticos* norte y sur, más bien que positivo y negativo en vista de la asociación de los fenómenos magnéticos con los polos norte y sur geográficos. Una ley de atracción y repulsión entre estos polos magnéticos fue también descubierta por Coulomb: los polos del mismo nombre se repelen y los de nombre contrario se atraen con una fuerza que fué directamente proporcional al producto de las intensidades de los polos e inversamente proporcional al cuadrado de su separación, justamente como en el caso eléctrico semejante. La *unidad de polo magnético* se definió también de modo semejante empleado para definir la unidad de carga eléctrica. Sin embargo, actualmente no se le da un significado especial a dicha unidad de polo, no sólo porque esta unidad natural de magnetismo nunca se ha descubierto, sino porque es posible explicar fenómenos magnéticos en función de cargas eléctricas en movimiento, haciendo innecesario el concepto de polo. Por otra parte, el concepto de polo persiste en la terminología magnética aun se usa a menudo en discusiones elementales de los fenómenos magnéticos. Desde el descubrimiento, en 1819, por el físico danés Oersted, que una brújula se desví cuando se coloca cerca de un alambre que lleve corriente, el concepto de polo se volvió cada vez más anticuado. En la Pág. 186 hay una descripción de los efectos magnéticos de la corriente eléctrica.

**Magnetismo terrestre.** El magnetismo terrestre proporcionó un tópico de estudio muy interesante. La Tierra se comporta como un gran imán esférico con su eje magnético haciendo un ángulo relativamente pequeño con el eje geográfico. El extremo norte de una brújula no apunta hacia el norte geográfico, sino al polo magnético que está situado al norte de la bahía de Hudson en Canadá. Puesto que los polos magnéticos y geográficos de

la Tierra no coinciden, el eje de la brújula hace por lo general un ángulo con la dirección del norte geográfico; este ángulo, llamado *ángulo de declinación*, vale en la ciudad de México, por ejemplo, unos  $8^{\circ}25'$  al este del norte.

**Angulo de inclinación.** Además, los imaginarios polos magnéticos de la Tierra no están en su superficie, sino a una gran profundidad; esto explica el fenómeno de que una brújula suspendida de tal modo que pueda girar tanto en el plano horizontal como en el vertical, tienda a apuntar hacia abajo en todos los puntos de la Tierra menos en el llamado ecuador magnético (Fig. 11.2). El ángulo que la brújula hace con la horizontal se llama *ángulo de inclinación* y en la ciudad de México vale unos  $47^{\circ}16'$ , apuntando el norte hacia el suelo. Así, en la ciudad de México la tendencia a inclinarse sobrepasa a la tendencia horizontal por la relación como de 5 a 1; esto equivale a decir, técnicamente, que la componente vertical del campo magnético de la Tierra es como 5 veces mayor que la componente horizontal. Como en el estudio de la electrostática, la *intensidad del campo magnético* en un punto se atribuye a la existencia de un polo magnético próximo. Esto sirve para medir la intensidad polar del imán, lo que para el profano es una medida de la intensidad del imán en cuestión.

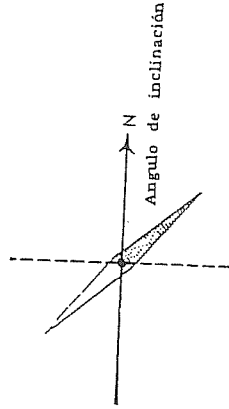


Fig. 11.2. Una brújula libre de girar en un plano vertical se inclina quedando su norte, en el hemisferio norte, abajo del horizonte

**Líneas magnéticas de fuerza.** Si la región que rodea a una barra imán se explora con una brújula, se encuentra que su extremo norte siempre apunta alejándose del polo norte y acercándose al polo sur en cada punto alrededor del imán. Así se sugieren líneas imaginarias que indican la dirección en que un polo magnético norte seguiría si estuviera libre de moverse en

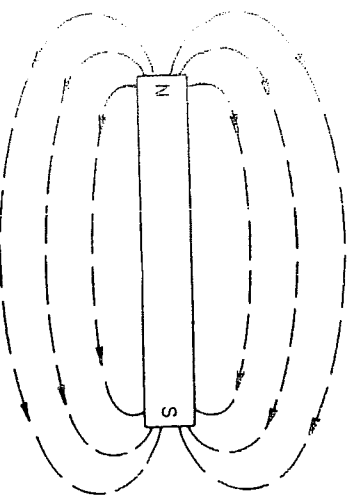


Fig. 11.3 Líneas magnéticas de fuerza

Figura 11.3. Estas líneas se llaman *líneas de fuerza* (Fig. 11.3). Las líneas salen del polo norte y entran al sur de la barra magnética y proporcionan una manera de visualizar la dirección de las líneas magnéticas donde éstas existen.

**Materiales magnéticos.** Es costumbre asociar los fenómenos magnéticos con el hierro, lo que se debe no sólo a que los fenómenos descubrimientos de las propiedades magnéticas se encontraron en minerales de hierro, sino también a que el hierro es la sustancia naturalmente magnética más conspicua que se presenta en la naturaleza. Sin embargo, es un error suponer que el hierro es la única sustancia magnética; el níquel y el cobalto presentan propiedades magnéticas, y recientemente se han encontrado aleaciones con propiedades magnéticas mejores que las del hierro: una de estas aleaciones es el "permaloy", desarrollado en los laboratorios de investigación de la American Telephone Company para uso en equipo telefónico. Otra de estas aleaciones es el "alnico".

**Inducción magnética.** Uno de los más interesantes de los fenómenos magnéticos es la *inducción magnética*. Cuando una varilla de hierro desmagnetado se coloca cerca de una varilla que aún se induce en la primera polos magnéticos, es decir, la segunda se imanta por inducción con su extremo próximo adhiriendo un polo de nombre opuesto al del polo inductor y con el extremo lejano adquiriendo un polo del mismo signo; es como si la varilla desmagnetada estuviera compuesta de miríadas de moléculas alargadas, capaces de orientarse por sí mismas. En la varilla desmagnetada, estas moléculas se encuentran

desordenadamente orientadas, pero en la vecindad de un, digamos, fuerte polo magnético norte, todos los extremos sur de los imanes moleculares son atraídos hacia el polo norte, y todos los extremos norte son rechazados, quedando así la varilla imantada con polos iguales y opuestos. En esto consiste esencialmente una teoría del magnetismo que, aunque ya anticuada, aún proporciona una representación elemental, pero no aclara la naturaleza de los imanes moleculares, ni explica por qué sólo el hierro y otras pocas sustancias presentan esta propiedad peculiar en un grado notable. Pero para un propósito elemental, la teoría es razonablemente satisfactoria.

**Permeabilidad magnética.** La mayoría de los imanes se fabrican por inducción; barras de hierro desmagnetadas, u otras sustancias magnéticas, se someten a fuertes campos magnéticos, los que establecen el magnetismo por influencia, por así decirlo. Una de las propiedades del permaloy es la facilidad con que se imanta con gran fuerza bajo la influencia de un campo magnético relativamente débil, lo que se debe a la propiedad llamada en términos técnicos *permeabilidad*. Esta propiedad ofrece uno de los medios más útiles para clasificar las sustancias magnéticas. Si, por ejemplo, una sustancia es intensamente magnética, su permeabilidad es muy alta y se dice que es *ferromagnética*. Si, por su presencia, una sustancia aumenta un campo magnético, pero no tan intensamente como una ferromagnética, esa sustancia se llama *paramagnética*. Por otro lado, el bismuto se caracteriza porque, por su presencia, debilita a un campo magnético; de ahí que se diga que el bismuto es *diamagnético*. Las sustancias paramagnéticas se caracterizan por permeabilidades mayores que la unidad, mientras que las diamagnéticas tienen una permeabilidad menor de uno.

**Sumario.** Gran parte del estudio del magnetismo trata del electromagnetismo, que lógicamente no puede tratarse hasta que se hayan estudiado las corrientes eléctricas; éste es el tema que será tomado en consideración en el capítulo siguiente. Hasta aquí hemos tratado acerca de los fenómenos magnéticos estáticos, como en el capítulo anterior tratamos de los fenómenos eléctricos estáticos. Este estudio preliminar sirvió para desarrollar el vocabulario y los conceptos fundamentales de los que dependen estudios posteriores. Veremos ahora cómo la electricidad y el magnetismo se reúnen en el estudio de las corrientes eléctricas.



CUESTIONARIO

1. ¿Qué significa la expresión "polo norte de la brújula"?
2. Dígame qué es ángulo de declinación y ángulo de inclinación.
3. ¿Qué es lo que quiere decir campo magnético?

PREGUNTAS DE REPASO

Véase la Pág. 250 para las soluciones)

CAPÍTULOS VIII, IX, X Y XI

1. Los hombres de ciencia que sugirieron que el calor es energía y no un fluido fueron: 1) Newton; 2) Watt; 3) Gibbs; 4) Maxwell; 5) Rumford (5)
2. La temperatura en grados Celsius que corresponde a 68° Fahrenheit es: 1) 20°C; 2) 37.7°C; 3) 68°C; 4) 64.8°C; 5) 55.5°C (1)
3. El vidrio pyrex es útil para fabricar moldes para horno debido a su: 1) pequeño coeficiente de dilatación; 2) pequeño calor específico; 3) gran calor específico; 4) gran conductividad térmica; 5) gran coeficiente de dilatación (1)
4. El calor necesario para elevar la temperatura de un kilogramo de agua en un grado Celsius se llama: 1) calor de fusión; 2) caloría; 3) joule; 4) erg; 5) calor de evaporación (4)
5. El hervidor de Franklin demuestra: 1) el calor específico; 2) el equivalente mecánico del calor y la energía; 3) la ebullición bajo presión reducida; 4) la refrigeración; 5) la tensión superficial (4)
6. Cuando el hielo a 0°C se transforma en agua a 0°C: 1) no hay intercambio de calor; 2) el hielo suministra calor; 3) el hielo absorbe calor; 4) el volumen aumenta; 5) no hay cambio de volumen (4)
7. Al elevarse la presión atmosférica, el punto de ebullición de un líquido: 1) desciende; 2) aumenta; 3) no se altera; 4) vale 100°C; 5) vale 212°F (4)
8. El fenómeno de la fusión bajo presión y la solidificación al quitar la presión se llama: 1) sublimación; 2) evaporación; 3) refrigeración; 4) recongelación; 5) saponificación (4)

9. El higrómetro giratorio se emplea para medir: 1) la humedad relativa; 2) la presión atmosférica; 3) el punto de ebullición del agua; 4) el punto de congelación del agua; 5) ninguna de las cosas mencionadas (1)
10. La razón para aislar un refrigerador es: 1) evitar que salga radiación; 2) evitar que entre calor; 3) evitar que salga frío; 4) fundir el hielo; 5) evitar que el hielo se funda (1)
11. Un invernadero lo calienta el sol porque: 1) el vidrio transmite las ondas cortas más fácilmente que las largas; 2) el vidrio transmite igualmente bien todas las ondas; 3) el vidrio transmite las ondas largas más fácilmente que las cortas; 4) el vidrio es buen conductor del calor; 5) el vidrio es mal conductor del calor (1)
12. Si la temperatura de un trozo de metal cambia de 300° Kelvin a 600° Kelvin, la rapidez con que se emite el calor es: 1) reduce a la mitad; 2) duplica; 3) triplica; 4) cuadruplica; 5) se hace 16 veces mayor (4)
13. El corcho, comparado con el cobre, es mucho: 1) mejor radiador del calor; 2) peor aislador del calor; 3) peor conductor del calor; 4) peor radiador del calor; 5) mejor conductor del calor (1)
14. El calor que se transmite de un radiador de vapor a un punto situado debajo de él, se debe principalmente a: 1) la conducción por el aire; 2) las corrientes de convección que se establecen en el aire; 3) la radiación por el espacio; 4) la tensión superficial; 5) el bombardeo molecular (1)
15. La teoría cuántica fue primero propuesta para explicar: 1) el fenómeno de la radiación; 2) la conducción; 3) la convección; 4) la fusión; 5) la congelación (1)
16. Cuando una varilla de ebonita se frota con una piel: 1) se generan electrones; 2) se acumulan electrones en la varilla; 3) se acumulan electrones en la piel; 4) la piel adquiere protones; 5) se genera electricidad (1)
17. Coulomb: 1) descubrió el electroscopio de hojas de oro; 2) descubrió una ley de atracción electrostática; 3) encontró que el electrón tiene una carga negativa; (1)

- 7) observó que la ebonita frotada con piel adquiere una carga positiva; 5) inventó la varilla luminosa. . . . . ( 5 )
- 18 Si dos pelotas de ping pong metalizadas se rechazan entre sí: 1) una estará positiva y otra negativamente cargada; 2) las dos tendrán carga negativa; 3) una puede estar neutra; 4) ambas serán neutras; 5) estarán cargadas con el mismo signo . . . . . ( 5 )
- 19 Cuando un electroscopio se carga por inducción: 1) su carga es siempre negativa; 2) su carga es siempre positiva; 3) su carga tiene el mismo signo que el de la fuente; 4) su carga tiene signo opuesto al de la fuente; 5) su contenido de electrones no se altera. . . . . ( 4 )
20. Las hojas de un electroscopio se separan: 1) porque el signo de la carga es el mismo en cada hoja; 2) porque los signos son opuestos; 3) porque las cargas permanecen en el exterior de los cuerpos conductores; 4) debido a la atracción electrostática; 5) porque los electrones tienen signo opuesto al de los protones. . . . . ( 4 )
- 21 El propósito de la cadena que cuelga de los camiones aunque que transportan gasolina es: 1) evitar que los protones positivamente cargados se acumulen en el camión; 2) permitir a los protones salir del camión; 3) asegurar que la chispa eléctrica, que podría iniciar un incendio, tenga lugar a alguna distancia de la gasolina; 4) prevenir al conductor si el camión se carga eléctricamente con lo cual aumenta el peligro de incendio; 5) evitar que haya un exceso o deficiencia de electrones . . . . . ( 4 )
22. El rayo: 1) nunca cae dos veces en el mismo lugar; 2) nunca cae en un edificio con armadura de hierro; 3) rara vez cae en objetos altos y aislados; 4) rara vez cae en edificios con pararrayos, sólo si éstos están bien comunicados con tierra; 5) es menos peligroso que caiga en un edificio con pararrayos estén o no bien comunicados con tierra . . . . . ( 4 )
- 23 La capacitancia de un capacitor es igual a: 1) carga/contiente; 2) carga X diferencia de potencial; 3) carga/diferencia de potencial; 4) carga X corriente; 5) diferencia de potencial/carga . . . . . ( 2 )
24. Un capacitor se emplea para: 1) generar carga; 2) destruir la carga; 3) almacenar carga; 4) crear energía; 5) destruir energía . . . . . ( )
25. La electricidad es: 1) una forma de materia; 2) una manifestación de la radiación; 3) un concepto básico; 4) una forma de energía; 5) algo que puede explicarse en términos de masa, longitud y tiempo . . . . . ( )
26. Una brújula apunta en dirección norte-sur porque: 1) está eléctricamente cargada; 2) porque la Tierra es un imán; 4) porque el magnetismo de la Tierra está uniformemente distribuido; 5) porque los polos norte rechazan a los polos sur . . . . . ( )
27. El ángulo entre los nortes geográfico y magnético se llama ángulo de: 1) inclinación; 2) desviación; 3) error; 4) declinación; 5) incidencia . . . . . ( 4 )
28. El ángulo de inclinación se refiere a: 1) el ángulo entre los nortes geográfico y magnético; 2) el ángulo que hace la brújula con la horizontal; 3) el ángulo de declinación; 4) la eclíptica; 5) el ángulo de latitud . . . . . ( )
29. Un campo magnético producido por un imán de herradura se dirige: 1) hacia el polo norte del imán; 2) hacia el polo sur; 3) alejándose del polo sur; 4) nada tiene que ver con los dos polos; 5) ninguna de las respuestas anteriores . . . . . ( )

## CONSIDERACIONES ELECTRICAS (Continuación)

### CORRIENTE ELECTRICA

Esta es una edad eléctrica y, sin embargo, el número de personas que aún se encuentran confundidas por el tema de la electricidad es relativamente grande. Sin duda, parte de las dificultades se debe a la manera exacta como se definen los términos eléctricos y magnéticos, como ya se ha visto en los dos capítulos anteriores. Por otra parte, el lector que ha estudiado este texto hasta aquí debe estar preparado para una consideración descriptiva de aquellos fenómenos que hacen que ésta sea una edad eléctrica —una edad de corrientes eléctricas, de potencia eléctrica, de aparatos eléctricos y temas semejantes—. El presente capítulo trata de las corrientes eléctricas.

**Experimento de Galvani.** Se atribuye al científico italiano Galvani, haber sido el descubridor de la corriente eléctrica. Colgó un par de piernas de rana de un alambre metálico cerca del cual se encontraba un alambre de diferente material conectado con el primero (Fig. 12.1). Cuando las piernas de la rana toca-

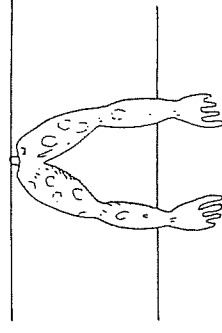


FIG. 12.1. Galvani observó que un par de piernas de rana colgadas de un alambre se contraían cuando hacían accidentalmente contacto con otro alambre, de diferente material que el primero

accidentalmente el segundo alambre, aquéllas se contratan. Interpretación dada a este fenómeno fue que se establecía diferencia de potencial eléctrico debido a la reacción química entre las piezas de la rana y los metales diferentes, obligado así a la electricidad a fluir a través del circuito eléctrico debido de este modo.

**Flujo de cargas.** De las consideraciones anteriores resulta que si se proporciona un camino conductor entre dos puntos cargados a potenciales diferentes, la carga eléctrica debe salir de un punto al otro en un intento de igualar el potencial. Si eventualmente se tendrá un solo impulso de carga; pero si se proporciona algún arreglo para que la diferencia de potencial entre puntos se mantenga mientras se mueven las cargas, se estará la llamada corriente eléctrica. Por supuesto, esto significará una generación de una diferencia de potencial con una rapidez suficientemente grande para compensar su disipación a lo largo del trayecto conductor. Esta situación es muy semejante al flujo de agua de un depósito que se encuentra a cierta presión, que el potencial eléctrico es análogo a dicha presión hidrodinámica. Excepción que se mantenga una entrada de agua para mantener la presión, el depósito se vaciará finalmente y cesará el flujo; la entrada de agua se hace posible empleando una bomba apropiada (Fig. 12.2). La rapidez con que fluye la carga

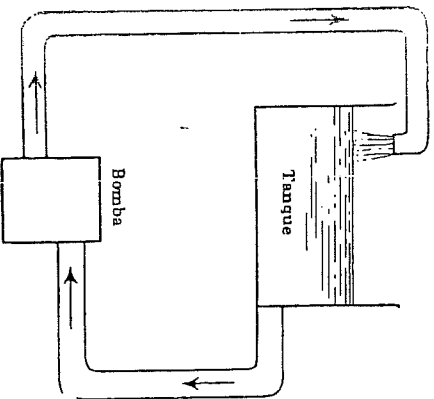


Fig. 12.2. La presión que ejerce el tanque se mantiene por la bomba, la que regresa al tanque toda el agua que sale de él.

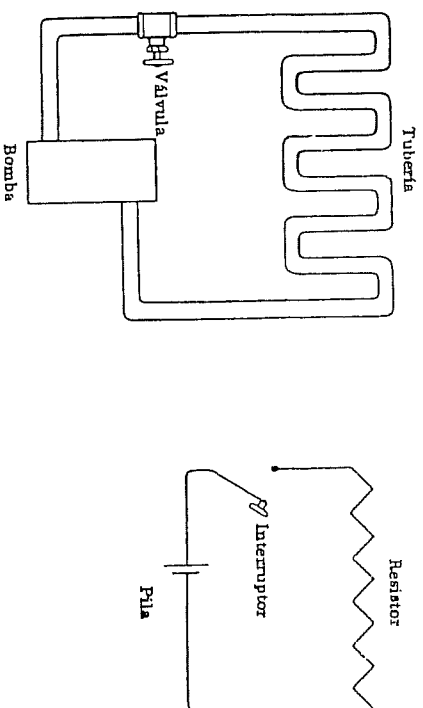


Fig. 12.3. Analogía entre un circuito eléctrico sencillo que contiene en serie una pila, un interruptor y un resistor, y un circuito hidráulico que contiene una bomba, una válvula y una tubería

(coulombs por segundo) se define como la *intensidad de la corriente* (amperes o amperios).

**El circuito eléctrico.** Debe hacerse notar que además de suministrar la presión necesaria, la bomba debe tener la capacidad de bombear la cantidad de agua necesaria para que el flujo se mantenga constante. Una pila eléctrica es la "bomba" para las cargas eléctricas y la parte que desempeña en los circuitos eléctricos incluye muchos factores. (Fig. 12.3). El estudio de estos factores es el contenido de este capítulo, tratándose en él: cómo las pilas generan las diferencias de potencial, cómo se detectan las corrientes eléctricas, qué leyes las gobiernan, cómo se presenta resistencia al flujo de cargas eléctricas y cómo funcionan los aparatos eléctricos por medio de la corriente.

**Fuerza electromotriz y corriente.** Existen muchas clases de bombas eléctricas o, como también se les llama, fuentes de fuerza electromotriz (F.E.M.). Aunque el frotamiento de una varilla de ebonita con una piel puede originar una diferencia de potencial muy grande entre la varilla y la piel, esta combinación no forma una buena pila porque su energía no es suficiente; esta es, no puede mantener un flujo de carga apreciable para que sea de importancia práctica. Por otro lado, las llamadas pilas químicas, como la pila común y la de electrodos de

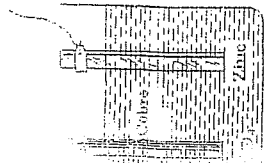


FIG. 12.4. Una barra de cobre y una de zinc, sumergidas en ácido sulfúrico diluido constituyen una pila útil para muchos propósitos

El zinc sumergido en ácido sulfúrico (Fig. 12.4), son los que mantienen un flujo eléctrico relativamente grande en las terminales se conectan por el exterior con un alambre de cobre, aunque desarrollan una diferencia de potencial considerable alrededor de un volt. La desintegración química del zinc ocasiona una separación más activa de la pila (el zinc) ocasiona una separación de las cargas eléctricas; un exceso de electrones se acumula en esta placa (el electrodo), mientras que una deficiencia de electrones tiene lugar en el otro electrodo, produciéndose así una diferencia de potencial entre ellos. Estas diferencias en el potencial, es decir, sin resistencia apreciable en el circuito, puede mantener un flujo de muchos amperes por algunos minutos. Un amperio es un flujo de seis y cuarto mil millones de electrones por segundo, que es lo mismo que un coulomb por segundo. La corriente eléctrica es sencillamente la velocidad con que fluyen las cargas eléctricas.

La resistencia eléctrica. Hemos visto que una pila de alguna fuerza puede ser la fuente de un circuito eléctrico. Existe otro modo igualmente importante que controla la rapidez con que fluye la carga; así, la rapidez con que fluye el agua en un tubo depende de la presión que la impulsa, pero también gobernada por la resistencia que el tubo presenta al flujo; por ejemplo, los tubos de pequeña sección recta ofrecen mayor resistencia que los tubos de gran sección y los tubos largos ofrecen mayor resistencia que los cortos; además, los tubos de paredes lisas ofrecen menor resistencia que los de paredes rugosas; análogos ejemplos deben tenerse en cuenta en las consideraciones eléctricas. La oposición al flujo eléctrico se llama resistencia eléctrica; debe imaginarse como una característica física de un circuito. Justamente como la fuerza electromotriz es una característica específica de una pila, ya se ha hecho notar que diferentes circuitos conducen la electricidad de modo diferente; también

es un hecho que la resistencia eléctrica de un alambre depende de su longitud y de su sección recta.

**Ley de Ohm.** Parece una mera perogrullada decir que el flujo de un fluido por un tubo depende directamente de la fuerza que lo empuja y que es inversamente proporcional a la resistencia que se le opone; no obstante, ésta es la esencia de la más importante ley de las corrientes eléctricas, a saber, la ley de Ohm. (Véase la Pág. 34.) Su importancia estriba, principalmente, en su generalidad. Interpretada con propiedad, explica el modo práctico de todos los fenómenos relacionados con las corrientes y le da al físico los medios de calcular las que de otro modo serían cantidades desconocidas asociadas con los circuitos. La ley de Ohm dice que la intensidad de la corriente eléctrica en un circuito (o en una porción de él) es directamente proporcional a la fuerza electromotriz aplicada al circuito (o a la caída de potencial en una porción del circuito), e inversamente proporcional a la resistencia del circuito (o de la porción considerada). Así, si la fuerza electromotriz aplicada y la resistencia se conocen, la corriente puede calcularse fácilmente. Además, la caída de potencial a través de un resistor puede calcularse si se conocen la corriente y la resistencia. Tomando en cuenta como un total a los circuitos y después en varias partes separadas, se puede, a menudo, obtener mucha información en términos de muy pocos datos. Por esta razón la ley de Ohm es una de las más interesantes leyes de los circuitos eléctricos.

★ **Efectos de la corriente eléctrica.** Conviene ahora tratar los medios empleados para detectar las corrientes eléctricas, que son sólo cargas en movimiento y a las que no es posible observar directamente. Las corrientes eléctricas pueden reconocerse por los efectos o los fenómenos que ellas producen y que son el efecto químico, el térmico y el magnético. De hecho, todo lo que se sabe en relación a las corrientes eléctricas resulta de la información que se tiene indirectamente al estudiar estos efectos, lo cual nos indica de nuevo cuan importantes son las medidas indirectas en física.

✧ **Efectos químicos de la corriente eléctrica.** Que la corriente se relaciona con la actividad química es indudable, en vista de la existencia de las pilas químicas. En éstas, la reacción química separa las cargas, obligando a la carga negativa a que se acumule en un electrodo y a la carga positiva en el otro; todas las

se tienen una terminal positiva y una negativa. Cuando el cable cuando se conecta a estas terminales o electrodos, no se establece una corriente, sino también su dirección especificada.

**dirección de la corriente eléctrica.** Convencionalmente, en el cable externo la dirección de la corriente se toma de la terminal positiva de la pila a la terminal negativa, lo que se basa en la suposición de que la unidad positiva de carga es rechazada por la terminal positiva y atraída por la negativa a través del conductor. En cambio, la teoría electrónica considera a las partículas que en realidad se mueven en los conductores son los electrones negativos, que van del electrodo negativo donde hay exceso, al electrodo positivo donde hay deficiencia. No obstante, la dirección convencional es empleada aún por los autores debido a que la terminología eléctrica se describe antes de que fueran descubiertos los electrones. Después de esto, da lo mismo hablar de reducción de la deficiencia de electrones de la terminal positiva a la negativa, conforme los electrones fluyan en sentido contrario ya que no se trata de si el signo es correcto o equivocado, sino más bien de ser conveniente en describir estos fenómenos que es imposible observarlos directamente.

**Electrólisis.** Los alambres metálicos no son los únicos conductores de la electricidad; también las soluciones de muchas sales conducen, debido a la formación de partículas llamadas iones o rechazadas, respectivamente, por lo que son cargadas ya sea positiva o negativamente, por lo que son rechazadas o positivamente y sumergidos en la solución. Estas partículas se llaman electrólitos. Cuando la corriente pasa a través del electrolito, contenido en una celda electrolítica, los iones negativos llamados aniones, son atraídos hacia la terminal positiva. Los iones positivos reciben sus nombres de las terminales ánodo y cátodo, los nombres que reciben respectivamente los electrodos negativo y positivo de la celda electrolítica. En el cátodo la terminal donde la corriente sale de la celda anodo por donde entra. Los iones metálicos, que son positivos se depositan en el cátodo a donde son atraídos; éste es el principio básico de la galvanoplastia. Así, la plata puede ser atraída por ejemplo, sobre una cuchara sumergiéndola en

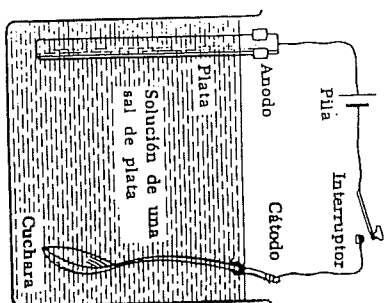


Fig. 12.5. Galvanoplastia. La plata se deposita sobre la cuchara, conectada al cátodo de la celda, cuando se cierra el circuito

un baño de alguna sal de plata por la que se pasa corriente, estando la cuchara conectada a la terminal negativa de la pila (Fig. 12.5). Faraday estudió el fenómeno de la electrólisis—y formuló las leyes correspondientes que aún actualmente se consideran básicas en las industrias electroquímicas. Esencialmente dichas leyes expresan una relación entre la masa del material depositado y la carga que pasa por el electrolito (la carga es igual a la intensidad de la corriente, multiplicada por el tiempo).

La unidad legal de corriente eléctrica. La electrólisis ha proporcionado también la manera de especificar la unidad de corriente eléctrica, el ampere (o amperio) legal internacional, que se define en función de la masa de plata depositada por segundo de una solución especificada de nitrato de plata. De este modo el estudio de los efectos químicos de la corriente eléctrica proporciona una información considerable con relación a la electricidad en movimiento y establece aproximadamente la unidad legal de corriente.

**Efectos térmicos de la corriente eléctrica—Ley de Joule.** Consideremos ahora el efecto térmico de la corriente. Es un fenómeno bien conocido que un alambre que lleva corriente se calienta—una parrilla o un tostador eléctricos, son evidencias visibles de este fenómeno—. La conversión de energía eléctrica en energía térmica es el fundamento de muchos aparatos eléctricos que hacen que ésta sea una edad eléctrica. El principio fun-

momento involucrado es una ley que recibe el nombre del físico inglés Joule, quien descubrió que la rapidez con que se desprende calor de un conductor depende de la segunda potencia de la corriente y de la resistencia del conductor. Así, si la corriente se duplica, la rapidez con que se desprende el calor se cuadruplica. Además, los resistores de mayor resistencia se calientan más rápidamente que los de baja resistencia, si la corriente que pasa por ellos es la misma; como la resistencia entra en la ley de Joule se infiere que debe estar relacionada con la ley de Ohm, lo que se ha encontrado que es cierto tanto teórica como experimentalmente.

**Potencia eléctrica.** Como resultado de las relaciones mencionadas se encuentra otra importante relación, a saber, que el producto de la caída de potencial (en volts) a través de un circuito como el de una parrilla o de una lámpara eléctrica, cuando se multiplica por la corriente (en amperes) se obtiene potencia (en wats), o sea, la rapidez con que la energía eléctrica se disipa como calor. Esto nos lleva a poder calcular el costo de la energía eléctrica, que cuesta alrededor de 50 centavos por kilowatt-hora. Un kilowatt son mil watts y el kilowatt-hora presenta la energía consumida en una hora con la rapidez de un kilowatt. Por ejemplo, en donde la energía eléctrica cuesta 50 centavos por kwh (kilowatt-hora), una lámpara eléctrica de 100 watts cuesta 50 centavos mantenerla prendida por 10 horas, o sea varias veces más, lo mismo que un tostador (que cuesta un watt) encendido más o menos lo mismo que una plancha).

El efecto térmico de la corriente se emplea en ciertos tipos de amperímetros, que son instrumentos usados para medir la cantidad de la corriente eléctrica. Un alambre se enrolla alrededor de una espiga provista de un índice (Fig. 12.6); cuando la corriente por el alambre éste se calienta y se alarga debido a dilatación térmica, lo que hace girar a la espiga un ángulo que depende de la intensidad de la corriente y por consiguiente el índice se mueve a lo largo de una escala graduada colocada en la espiga. Aunque el funcionamiento de este aparato se comprende fácilmente, la mayoría de los amperímetros actuales funcionan en virtud del efecto magnético que se describe a continuación.

**Efectos magnéticos de la corriente eléctrica.** El físico danés Hans Christian Oersted fue el primero que observó que la aguja de una

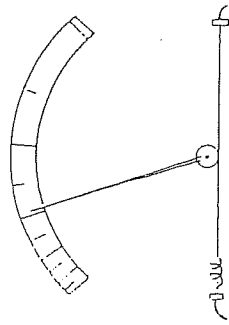


Fig. 12.6. Un método de medir la intensidad de la corriente es emplear el amperímetro térmico. Un alambre se enrolla en una espiga que gira cuando el alambre se dilata al ser calentado por la corriente. Un índice conectado con la espiga se mueve sobre un cuadrante graduado

brújula se mueve si se coloca próxima a un alambre que lleve corriente (Fig. 12.7). Experimentos posteriores demostraron la existencia de un campo magnético rodeando completamente al conductor con corriente; ninguna corriente puede establecerse en un alambre sin que al mismo tiempo se establezca el campo magnético (Fig. 12.8).

Todas las corrientes eléctricas tienen un campo magnético asociado con ellas, aunque debe hacerse notar que el alambre que tiene la corriente no se encuentra imantado. De hecho, el alambre es por lo general de cobre, una sustancia no magnética, y, por tanto, no puede imantarse. El efecto magnético se produce en la región que rodea el alambre ya que las líneas de fuerza magnéticas forman círculos a su alrededor y no radios que partan de él.

**El electroimán.** Si un alambre se enrolla como solenoide —es decir, una configuración que se obtiene enrollando una

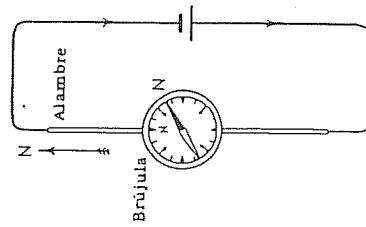


Fig. 12.7. Una brújula colocada arriba de un alambre horizontal que lleva corriente hacia el norte, es desviada hacia el oriente. Este fenómeno fue descubierto por Oersted

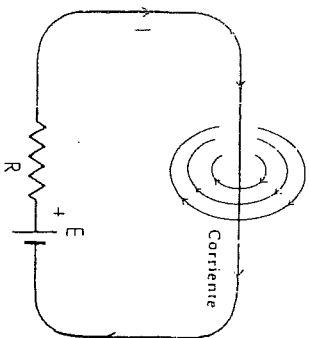


Fig. 12.9. El campo magnético rodea al conductor que lleva corriente eléctrica

capa de espiras alrededor de un núcleo largo y cilíndrico— se puede separar el núcleo, el solenoide actúa como un imán fuerte por el que pasa corriente, presentando un polo magnético norte y uno sur (Fig. 12.9). De hecho, una sola espira de alambre tiene una cara norte y una sur; la ventaja obtenida con muchas espiras de alambre es aumentar la intensidad del campo magnético en proporción directa al número de vueltas. Si una barra de hierro se le inserta como núcleo al solenoide, el campo magnético también se intensifica por inducción en proporción directa a la permeabilidad del hierro. Este aparato se llama electroimán y sus ventajas son evidentes. Por el mero toque de un interruptor, una corriente eléctrica al pasar por la bobina de electroimán le comunica la propiedad de levantar cuerpos de hierro; por otro toque al interruptor, el circuito se abre y el electroimán se desmanta con el resultado de que cualquier cuer-

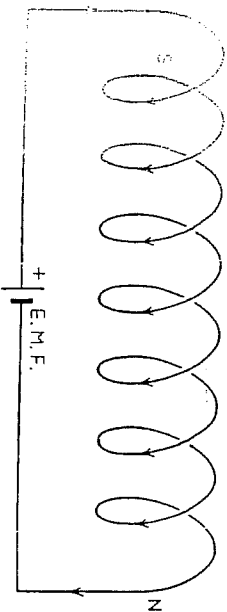


Fig. 12.8. Un solenoide largo que lleva una corriente de intensidad constante como una barra imán con los polos norte y sur como se indica

po de hierro adherido al electroimán es dejado caer automáticamente. Como aplicaciones de este fenómeno se tienen las grúas magnéticas, los mandriles magnéticos y muchos otros aparatos magnéticos.

**Fuerza lateral debida al campo magnético.** Existe un fenómeno electromagnético muy importante que también es responsable de gran parte de la presente edad mecanizada: el principio en el que se basa el funcionamiento de un motor eléctrico. El fenómeno simplificado consiste en lo siguiente: un alambre colocado de modo transversal entre las piezas polares de un imán, ya sea permanente o eléctrico, se mueve lateralmente si pasa por él una corriente. Este movimiento es perpendicular tanto a la dirección del alambre como a la dirección del campo magnético y se debe a la acción mutua entre el campo del imán y el campo que se desarrolla alrededor del conductor; el campo magnético que rodea al conductor interacciona con el campo magnético en donde está colocado el alambre. En la Fig. 12.10 el punto indica que la corriente sale del papel y puede verse que el campo debido a la corriente refuerza al campo norte-sur abajo del alambre y tiende a nulificarlo en la parte superior; por consiguiente, el alambre se mueve de abajo (donde el campo magnético resultante se intensifica) hacia arriba (donde el campo resultante se debilita), como si las líneas de fuerza magnética fueran bandas elásticas estiradas. Este fenómeno se debe a la llamada *fuerza lateral*. Debido a que ésta es una fuerza mutua entre el alambre y el imán, el alambre se moverá si el imán es estacionario (como en la Fig. 12.10), pero el imán se moverá si éste es libre y el alambre se encuentra sujeto en su lugar (como en la Fig. 12.7).

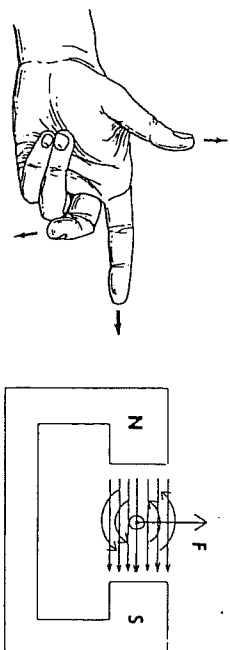


Fig. 12.10. Regla de los tres dedos de la mano izquierda o regla del motor. El dedo índice señala el flujo de norte a sur; el dedo cordal indica el sentido de la corriente y el pulgar predice el sentido del movimiento



Regla de los tres dedos de la mano izquierda. Si el índice de la mano izquierda apunta en la dirección del campo de un imán es decir, de norte a sur, y el cordial indica el sentido convencional de la corriente en el alambre, esto es, de positivo a negativo, entonces el pulgar indica la dirección de la fuerza, cuando los dedos se colocan mutuamente perpendiculares en tres dimensiones. Esta regla se llama la regla del motor (Fig. 12.10).

El motor eléctrico. El fenómeno que se acaba de describir presenta la transformación de energía eléctrica en energía mecánica —un asunto de gran importancia práctica—. La fuerza lateral puede hacer que un manajo de alambres, diseñado de modo apropiado, gire continuamente alrededor de un eje. Aplicándose así la rotación de un motor eléctrico, mismo que puede ser acoplado, por medio de engranajes o bandas, a otra maquinaria. Es evidente que si un alambre con corriente, colocado a través de un campo magnético, es empujado lateralmente, un alambre de la misma longitud y paralelo, pero con corriente en sentido opuesto, será empujado también en sentido opuesto; estos dos conductores llevan la misma intensidad de corriente se conectan formando una espira rectangular, las fuerzas laterales desarrollarán una torca que hará girar a la espira hasta una posición perpendicular al campo (Fig. 12.11). Si luego se invierte la dirección de la corriente, y esta inversión se efectúa cada media revolución, la espira rectangular debe girar continuamente como un motor. Cualquier motor electromagnético funciona debido a este sencillo principio básico, desde el motor de un automóvil de juguete hasta el mayor que se haya construido. En algunos motores, la parte magnética es fija y el arreglo de alambres conductores es el que gira; en otros, las bobinas son estacionarias y gira la parte magnética. La parte en rotación se llama técnicamente *armadura*.

El galvanómetro de D'Arsonval. Este aparato consiste en un cuadro rectangular formado por muchas tiras de alambre

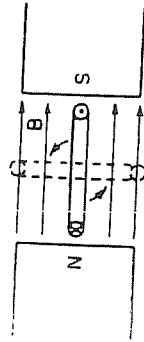


FIG. 12.11 Torca producida por la fuerza lateral

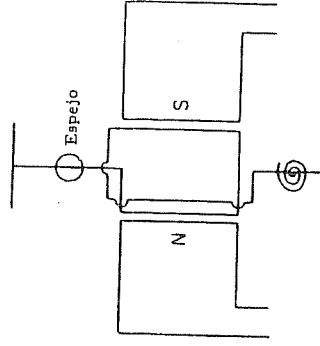


FIG. 12.12. Galvanómetro de D'Arsonval

y suspendido como una armadura vertical entre los polos de un imán permanente (Fig. 12.12); esencialmente es la misma situación descrita en la Fig. 12.11. Cuando pasa una corriente por la bobina se establece una torca que tiende a torcer a todo el cuadro en contra de la torca de restauración elástica debida a un resorte externo. El ángulo de rotación, indicado por un rayo de luz que se refleja en un pequeño espejo sujeto a la suspensión, es proporcional a la corriente que pasa por la bobina del cuadro.

Los *voltímetros* y los *amperímetros* son esencialmente galvanómetros de D'Arsonval, cuyas armaduras están montadas en pivotes en lugar de estar suspendidas verticalmente. En lugar de un espejo y un rayo de luz se sujeta un índice a la bobina, el que oscila sobre una escala montada sobre el aparato.

**Inducción electromagnética.** Describiremos ahora el último fenómeno relacionado con las corrientes eléctricas: el fenómeno de la inducción electromagnética. Nuevamente, fue Faraday, hace más de un siglo, quien descubrió el fenómeno inverso al de la fuerza lateral descrito en las secciones anteriores. Mientras que en el caso descrito el alambre se mueve a través del campo magnético sólo porque por él pasa una corriente, Faraday descubrió que cuando se mueve un alambre, que forma parte de un circuito eléctrico, a través de un campo magnético, se establece una corriente en dicho circuito, como si esta corriente fuera generada por una pila. En otras palabras, descubrió una manera de inducir una corriente eléctrica en un circuito por medio del movimiento; o aun dicho de otro modo, descubrió un modo de

generar la fuerza electromotriz necesaria para producir una corriente eléctrica, sin ayuda de pilas. Este sencillo descubrimiento abre el camino para los generadores eléctricos modernos, que impulsados por vapor o por corrientes de agua, son el soporte de la actual civilización eléctrica, ya que sin los generadores no hubiera la potencia eléctrica. Básicamente, todos los generadores consisten en manojos de alambre impulsados a través de los campos magnéticos por la rotación de las armaduras. El principio del generador es, sencillamente, la inversa del principio del motor y representa una transformación de la energía mecánica en energía eléctrica.

**Ley de Lenz.** El procedimiento descrito anteriormente es una de las maneras de inducir una corriente eléctrica en un circuito. Posteriores estudios han demostrado que la situación es mucho más general, pues cualquier cambio en el *status quo* de un circuito eléctrico que cause una variación en sus características magnéticas, es suficiente para establecer momentáneamente una corriente en los circuitos próximos; éste es el *quid* de una *ley* de las corrientes inducidas llamada *ley de Lenz*. La inducción asociada con una corriente variable es fundamental en el funcionamiento de los transformadores eléctricos y de otros aparatos que funcionan con la llamada corriente alterna. El estudio de estos aparatos, incluyendo la bobina de inducción, el teléfono el telegrafo, la radio, etc., nos llevarían más allá de la sola descripción, por lo que debe ser pospuesta al estudio de aquellos estudiantes que sean capaces de comprender un lenguaje matemático. Es suficiente decir que los principios discutidos antes son fundamentales en el funcionamiento de estos aparatos y aplican perfectamente su comportamiento.

**Sumario.** En este capítulo se han descrito varios efectos de la corriente eléctrica y se ha demostrado que su estudio suministra una información considerable con respecto a las cargas eléctricas en movimiento, aunque ellas mismas no puedan ser derivadas en forma directa. Esta información ya se había ganizado, en un conjunto de leyes y principios lógicamente enlazados, durante los últimos 100 años; ahora vivimos en una edad eléctrica debido a las muchas aplicaciones prácticas de los principios de los cuales aquellos en que se basan el motor y el generador son especialmente importantes.

### CUESTIONARIO

1. ¿Cuál es la naturaleza de la corriente eléctrica?
2. Explique el funcionamiento de una pila en un circuito eléctrico.
3. Por medio de una analogía hidráulica, discútase el significado de la ley de Ohm.
4. ¿Por qué una máquina electrostática no es tan útil como una pila?
5. Describa el proceso de la galvanoplastia.
6. Enumere los tres efectos principales de la corriente eléctrica.
7. ¿Qué diferencia hay entre la "dirección de la corriente" y la del movimiento de los electrones?
8. ¿Qué cuesta más, mantener encendida una lámpara de 100 watts durante 10 horas o una de 10 watts durante 150 horas?
9. ¿Cuál fue el descubrimiento de Oersted?
10. Explique cómo funciona el electroimán.
11. ¿En qué consiste la regla de los tres dedos de la mano izquierda?
12. ¿Cómo se define el ampere internacional?

## CONSIDERACIONES ELECTRONICAS Y FENOMENOS ATOMICOS Y NUCLEARES

### INTRODUCCION A LA FISICA MODERNA; DESCARGA ELECTRICA EN GASES; RAYOS X; ELECTRONICA; RADIOACTIVIDAD; FISICA NUCLEAR Y EL ESTADO SOLIDO

La situación por 1890. Poco antes del principio del siglo xx, por el final del llamado periodo clásico caracterizado por el punto de vista newtoniano, la física se encontraba en una posición única con respecto a otras ciencias y a los diversos campos del saber. La situación era única porque los físicos, en su intento de estudiar los fenómenos naturales, aparentemente habían tenido un éxito casi completo, ya que prácticamente todo lo que se había observado podía explicarse en términos de conceptos y leyes sencillas, como las leyes de Newton del movimiento, etc.; habían sido tan cuidadosos en sus desarrollos lógicos que los físicos parecían tener la situación completamente en sus manos. De una manera poco menos que milagrosa, las nuevas observaciones se habían ajustado en los lugares aparentemente dispuestos para ellas en las teorías e hipótesis válidas por más de un siglo. Los físicos teóricos percibían que la física se estaba aproximando al estado de un tema clásico ya muerto y tan completamente conocido en detalle que tenía pocas cosas interesantes, si es que las tenía, para que la desenredaran las futuras generaciones. Por esta época los físicos famosos declaraban que todos los descubrimientos importantes en física ya se habían hecho y que gran parte de su aventura había desaparecido; todo lo que se había dejado a las generaciones futuras era la tarea incolora de aumentar la precisión de las medidas de las constantes físicas conocidas y de sus relaciones.

Que este punto de vista estaba completamente equivocado, es la historia de la fisica moderna, una historia que ha revolucio- nado por completo la perspectiva total de la fisica, y que los fisicos hayan sido capaces de apreciar este cambio, es aun mas significativo. En los capitulos anteriores se ha hecho refe- rencia a la nueva fisica, es decir, a su desarrollo a partir del año 1900 aproximadamente. El proposito de este capitulo es considerar algunas de las ideas y conceptos de la fisica moderna desde un poco antes del descubrimiento del electron.

**La descarga eléctrica en los gases.** Por 1895, el eminente fi- sico ingles Sir J. J. Thomson, a partir de un trabajo anterior de Crookes, experimentaba la conducción de la electricidad por los gases. Entre otras cosas, observó que el aire seco a la presión atmosférica es un aislador bastante bueno, necesiándose como treinta mil volts por centimetro para perforarlo, es decir, para que pasen cargas eléctricas en formas de chispa; sin embargo, al reducir la presión del aire —por ejemplo, por una máquina neumática— el voltaje necesario para obtener la chispa disminu- yó apreciablemente, pero acompañado por un cambio o muy notable en el carácter de la descarga. Estos experimentos se llevaron a cabo en una época en que las máquinas neumáticas sólo eran raras, sino muy ineficaces. En la actualidad, debido a los avances técnicos, máquinas neumáticas muy eficientes se encuentran fácilmente disponibles, lo que hace posible ejecutar los experimentos ante los ojos de los estudiantes.

**Tubo de descarga de demostración.** Si un tubo de vidrio, de unos 60 o 70 cm de longitud y de 3 o 4 cm de diámetro, con electrodos en sus extremos cerrados, se conecta a una moderna máquina neumática por medio de un tubo unido a uno de sus tubos, una sucesión de interesantes fenómenos se observa cuando el aire es gradualmente retirado y una gran diferencia potencial se mantiene entre los electrodos con una bobina de inducción o alguna otra fuente de varios miles de volts (Fig. 13.1). El experimento se realiza en un cuarto oscuro. Al empe- zar el experimento se realiza en un cuarto oscuro. Al empe- zar entre los electrodos, pero poco después aparece una des- carga semejante a una chispa larga y rasgada. Al disminuir la presión, la descarga se convierte en filamentos irregulares y de color violeta. Poco tiempo después todo el tubo se ve iluminado por un brillo purpúreo, siendo entonces la presión

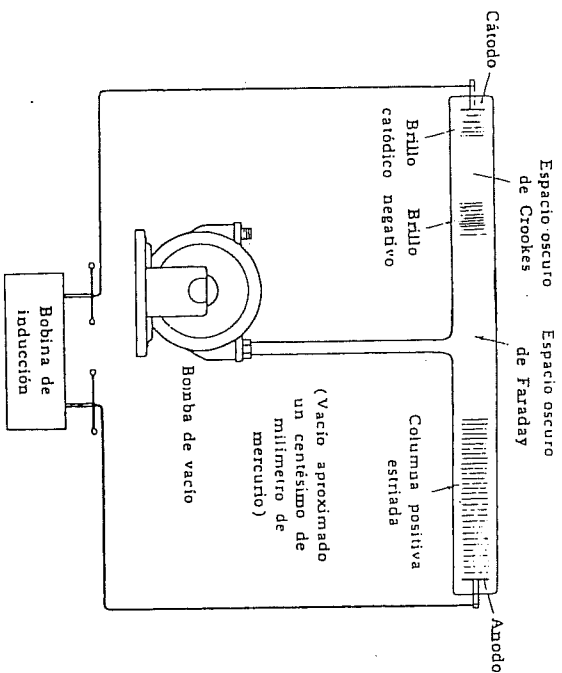


Fig. 13.1. Tubo de descarga

probablemente de sólo unos pocos milímetros de mercurio, o sea, un poco más que algunos milésimos que la presión atmosférica.

Después, el brillo general tiende hacia el rosado y después se vuelve rosado intenso. Mientras tanto, un brillo azul muy definido aparece cerca del electrodo negativo; este brillo se llama el *brillo negativo*. Entré este brillo y la descarga color de rosa se desarrolla un espacio relativamente oscuro, llamado el *espacio oscuro de Faraday*. El brillo color de rosa, que gradualmente se acorta para dejarle lugar al espacio oscuro de Faraday, se conoce como el *brillo positivo* o la *columna positiva*. Pronto esta columna presenta una apariencia especial al fragmentarse en innumerables estrias; simultáneamente el color rosado se debilita transformándose en un color anaranjado pálido, que aun llega a convertirse en blanco. El acortamiento de la columna continúa conforme el espacio oscuro de Faraday y el brillo negativo parecen separarse del cátodo y moverse hacia el electrodo positivo, dejando un segundo espacio oscuro entre el brillo negativo y el cátodo; este espacio oscuro se llama el *espacio oscuro de Crookes*. El mismo cátodo también brilla con una luz violeta llamada *brillo catódico*.

Para entonces, la presión se ha reducido a unos décimos de centésimos de milímetro de mercurio; al aumentar el vacío, la columna positiva presenta una apariencia más y más estriada haciéndose más y más gruesa; la columna positiva, que ahora se encuentra asociada con el extremo positivo del tubo, que ahora cada vez más y el espacio oscuro de Faraday y el brillo negativo se van apartando del cátodo, por lo que el espacio oscuro de Crookes va creciendo acercándose al extremo positivo del tubo. Cuando la presión se ha reducido como a un milésimo de milímetro de mercurio, la columna positiva se ha reducido por completo y el espacio oscuro de Faraday llena todo el tubo. Entonces todo el tubo aparece muy oscuro, excepto que sus paredes de vidrio brillan con una luz verdosa peculiar llamada *fluorescencia*, que es el nombre que recibe el proceso donde una radiación de una cierta longitud de onda se transforma en otra de diferente longitud (generalmente mayor). En este caso, la fluorescencia es producida por el bombardeo de rayos catódicos que salen del electrodo negativo.

**Rayos catódicos.** En esta etapa de vacío se nota que cualquier cuerpo dentro del tubo, y colocado entre los electrodos, proyecta una sombra en el extremo positivo del tubo, lo que indica la existencia de una radiación, que saliendo del cátodo hacia el ánodo se propaga en línea recta ya que forma una sombra definida del cuerpo que está en su camino. Se ha encontrado también que la radiación puede ser enfocada empujando un cátodo en forma de casquete esférico cóncavo. Cuando la radiación es así enfocada en una diana, se genera un haz en el punto donde se concentran los rayos; como la radiación emana del cátodo se le ha dado el nombre de *rayos catódicos*. Pronto se demostró que los rayos catódicos pueden ser desviados por los campos magnéticos y eléctricos, lo que debía que están formados de partículas eléctricamente cargadas y constituyendo así una corriente eléctrica. Debido a que la desviación en un campo magnético es un fenómeno de fuerza normal, con sentido opuesto al predicho por la regla de los dedos de la mano izquierda, se deduce que las partículas que fluyen del cátodo consisten en partículas negativamente cargadas (llamadas ahora *electrones*) que originan una corriente eléctrica de las zonas de bajo potencial a las de alto potencial. Estos electrones son los mismos a los que nos hemos referido en este texto al estudiar la materia y sus

propiedades eléctricas; fue el descubrimiento de los electrones, al experimentar con descargas eléctricas en los gases, lo que abrió la llamada nueva era de la física.

**Rayos X.** Poco después del descubrimiento de los rayos catódicos observó Roentgen que cuando eran enfocados sobre una diana metálica colocada dentro del mismo tubo al vacío, se emitió una radiación secundaria que se llamó la *radiación de rayos X*, la que no debe ser confundida con la radiación catódica (Fig. 13.2). Los rayos X son semejantes a la luz y se caracterizan especialmente porque pueden atravesar sustancias relativamente opacas; no sólo hacen posible las modernas fotografías de sombras de rayos X, sino que en la actualidad son muy empleados en los hospitales con fines de diagnóstico. La naturaleza de los rayos X depende de varios factores, como la naturalza de potencial a través del tubo, el grado de vacío y la sustancia que forma a la diana. A veces los rayos X se llaman rayos Roentgen, en honor a su descubridor.

**Aplicaciones de los tubos de descarga.** Los tubos con vacío parcial recorridos por una descarga eléctrica, como en el experimento antes descrito, se llaman *tubos de Geissler*. El color de la descarga depende del gas que llena al tubo. Los modernos anuncios de neón no son sino tales tubos de descarga, empleando gas neón en lugar de aire debido al color rojo característico del neón cuando se activa de esta manera.

La moderna iluminación fluorescente representa otra aplicación de los tubos de descarga. En lugar de emplear un filamento incandescente como fuente de luz, se emplea el fenó-

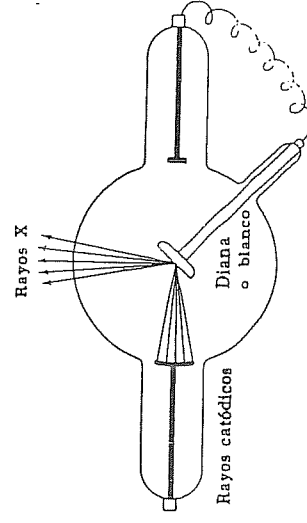


Fig. 13.2. Los rayos X se producen por medio de los rayos catódicos al bombardear una diana

mento de fluorescencia, recubriendo las paredes interiores del tubo con varias sustancias quimicas capaces de producir diferentes colores; esas lámparas funcionan más económicamente por los de filamento.

**Aspectos cuantitativos del electrón.** J. J. Thomson no sólo estableció que los rayos catódicos son una corriente de electrones negativamente cargados, sino que también midió muy ingenuamente una característica del electrón, a saber, la relación entre su carga y su masa. Una corriente de electrones fue sometida primero a un campo magnético transversal de intensidad conocida; en consecuencia, la corriente adquirió un movimiento circular cuyo radio fue medido. Luego, un campo eléctrico de intensidad conocida fue aplicado perpendicularmente, tanto a la corriente electrónica como al campo magnético para equilibrar justamente el efecto de la fuerza lateral debida al campo magnético. Las fuerzas que se equilibran son la fuerza centrípeta (Pág. 57), que puede calcularse en función de la masa de electrones, su carga y el radio de curvatura de su trayectoria cuando sólo estaba aplicado el campo magnético, también las intensidades tanto del campo eléctrico como del magnético; todas las magnitudes directamente medibles, excepto las dos primeras. De este modo se encontró que la relación de la carga a la masa del electrón ( $e/m$ ) vale  $1.76 \times 10^{11}$  coulombs por kilogramo, es decir, aunque el electrón es tan pequeño que sólo puede verse con dificultad, es, sin embargo, posible para nosotros medir una de sus características físicas.

**Determinación por Millikan de la carga del electrón.** Se hizo referencia en la Pág. 134 que por 1910 el físico americano Millikan pudo medir la carga ( $e$ ) del electrón. Su experimento consistió en la gota de aceite se tiene ahora por uno de los más famosos experimentos de todos los tiempos. Pequeñas gotillas de aceite son esparcidas entre dos placas metálicas horizontales que están ser mantenidas con una controlada diferencia de potencial. Una de esas gotillas fue observada con un microscopio y su velocidad de caída, debida a sólo la gravedad, se determinó en primer lugar; entonces se estableció el campo eléctrico entre las placas y se observó que algunas gotillas llevaban cargas eléctricas, lo que se hacía evidente por un cambio brusco en el movimiento de la gota. En función de magnitudes medibles —como la densidad y viscosidad del aceite,

la velocidad de la gotilla, etc.—, fue posible determinar, de una manera relativa, la carga eléctrica adquirida por la gotilla. El hecho interesante es que cada carga observada es un múltiplo de una cierta carga fundamental y, suponiendo que una gotilla de aceite no pueda adquirir una carga menor, se llega a la conclusión de que esta carga fundamental observada es la carga de un electrón que vale  $1.6 \times 10^{-19}$  coulomb, siendo negativa.

Empleando este valor de  $e$  y el encontrado por J. J. Thomson para  $e/m$  ( $1.76 \times 10^{11}$  coulombs por kilogramo), se deduce que  $m$  (la masa del electrón) es de  $9 \times 10^{-31}$  kg.

Estos dos experimentos son especialmente señalados aquí, no sólo porque ahora son considerados clásicos en la física moderna, sino también porque son un ejemplo de cómo la "nueva" física se extrapola de la "vieja" física. De la primera fue necesario tomar en cuenta los conceptos clásicos de masa, velocidad y la fuerza centrípeta, así como los conceptos de campo eléctrico y magnético, atracción electrostática, fuerza electromagnética lateral, etc., para dar un significado cuantitativo al nuevo concepto del electrón. En el segundo caso fue necesario tomar en cuenta los fenómenos asociados con la caída de los cuerpos, la densidad, la viscosidad, etc., con objeto de interpretar las medidas. Se deduce que un conocimiento real de la física moderna necesita un fondo de física clásica.

**Emisión termoiónica.** Con el descubrimiento del electrón se encontró otro fenómeno que es fundamental en las comunicaciones modernas, el efecto Edison o emisión termoiónica de electrones. Un filamento calentado dentro de un bulbo al vacío emite electrones que pueden ser lanzados, por atracción electrostática, hacia una placa positivamente cargada (Fig. 13.3). Este fenómeno es el principio básico de todos los bulbos de la radio y de la multitud de tubos llamados de control que se emplean en innumerables aparatos electrónicos (Fig. 13.4). El tubo de rayos X moderno emplea la emisión termoiónica para producir los electrones obtenidos por la emisión de un filamento caliente, los electrones son dirigidos hacia una diámana, donde se emiten los rayos X.

**Efecto fotoeléctrico.** Otro interesante fenómeno electrónico es el de la emisión de electrones por la superficie de ciertas sustancias debida a la acción de la luz o, en general, de la ra-

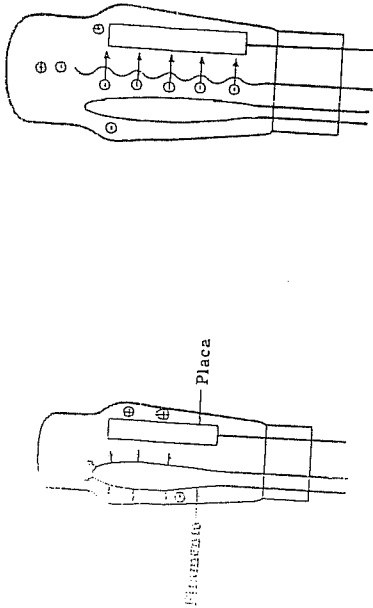


Fig. 13.3. Cuando un filamento en el vacío emite electrones que luego son atraídos por una placa positivamente cargada, se obtiene así una corriente entre el filamento y la placa. El flujo tiene lugar sólo cuando la placa es positivamente cargada, por lo que el tubo actúa como una válvula eléctrica

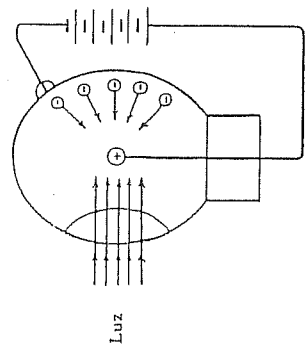


Fig. 13.5. Funcionamiento de la celda fotoeléctrica. La luz que incide en el interior de un bulbo al vacío, recubierto interiormente con ciertas sustancias activas, obliga a que los electrones sean emitidos. Estos electrones son atraídos por el electrodo positivamente cargado, pasando así una corriente eléctrica capaz de ser controlada por las variaciones de la intensidad luminosa y la variación de la corriente se traduce en una imagen visual proyectada en la pantalla.

La explicación del efecto fotoeléctrico se basa en la teoría cuántica de Planck. Aunque esta teoría fue desarrollada para explicar la naturaleza de la radiación del calor (Pág. 149), Einstein sugirió su empleo para explicar dos aspectos del efecto fotoeléctrico: (1) que la emisión de electrones tiene lugar solamente cuando la frecuencia de la luz incidente excede un cierto valor crítico llamado el umbral de frecuencia y (2) que la velocidad, y por tanto la energía cinética de los electrones emitidos, depende sólo de la frecuencia de la luz y no de su intensidad, como podría esperarse. Esta hipótesis fue posteriormente comprobada en forma experimental por Millikan, aumentándose así la confianza de los físicos en la teoría cuántica.

**Electrónica.** El término "electrónica" se da a todos aquellos fenómenos en donde interviene el nombre "electrón". Las aplicaciones de esta área de la física son numerosas; como muchas de ellas se encuentran en el campo de las comunicaciones —radio, radar, televisión, etc.—, algunas personas creen erróneamente que la electrónica significa sencillamente estas cosas. Actualmente, sin embargo, las aplicaciones médicas e industriales son muy extensas. En realidad, los rayos X forman parte de la electrónica. En verdad, el campo de la electrónica

incluyendo los rayos X. Este fenómeno se llama el efecto fotoeléctrico; en él se basa el funcionamiento de la celda fotoeléctrica, o como se le llama popularmente, el ojo eléctrico. Cuando la luz ilumina una de estas celdas se establece una corriente eléctrica, pero al dejar de iluminar, la corriente se interrumpe (Fig. 13.5). De este modo, una corriente eléctrica puede controlar regulando la intensidad de la luz que recibe la celda; debido a esto, la celda fotoeléctrica es un aparato muy útil para controlar las corrientes eléctricas, desempeñando un papel muy importante en el funcionamiento de las películas sonoras y de la televisión. En el primer caso, el rayo de luz varía en intensidad o en dirección al pasar por unas marcas colocadas a un lado de la película; de este modo una corriente eléctrica es obligada a variar controlando así el mecanismo sonoro. En el caso de la televisión, la luz reflejada por el sujeto se recoge con un mecanismo de exploración donde la corriente eléctrica varía de acuerdo con las variaciones de intensidad de la luz reflejada. En el receptor de televisión el conjunto de operaciones esencialmente se invierte

es prácticamente ilimitado ya que toda la materia contiene electrones, la dificultad es liberarlos por métodos tales como la emisión termoiónica y fotoeléctrica, arrastrándolos, literalmente, fuera de la materia por la aplicación de altos voltajes en el vacío. Únicamente cuando están liberados pueden ser manipulados sin fin por campos eléctricos, campos magnéticos, etc. para servir al hombre. Es evidente por qué esta edad se llama a menudo edad electrónica y por qué la física moderna está involucrada con la electrónica.

**Radiactividad.** Por la época en que Roentgen descubrió los rayos X (1905-1906), Becquerel hizo un descubrimiento tan importante como el aislamiento de la electrón y el descubrimiento de los rayos X. Becquerel observó que ciertas sales de uranio emiten espontáneamente radiaciones, cuyos efectos pueden ser estudiados cuando se someten a campos eléctricos y magnéticos. Poco después, madame Curie y Pedro Curie concentraron a partir de los minerales de uranio, ciertas sustancias que llamaron polonio y radio, que mostraban el fenómeno de la desintegración espontánea de modo muy marcado. Actualmente a este fenómeno de la desintegración espontánea se le llama *radioactividad*. Las sustancias radiactivas emiten partículas cargadas eléctricamente y una radiación semejante a los rayos X, antes de que su naturaleza fuera conocida se les llamó rayos alfa, beta y gamma. Los rayos alfa están formados por partículas que ahora se sabe son núcleos de átomos de helio; como llevan tres cargas positivas se dice que son átomos de helio doblemente ionizados. Los rayos beta son una corriente de cargas negativas. Finalmente, los rayos gamma son de carácter ondulatorio, ondas bien que corpuscular, con una longitud de onda muy corta, siendo del mismo tipo que los rayos X (Fig. 13.6).

**Estructura atómica.** El descubrimiento de la desintegración radiactiva sugirió que los átomos, en lugar de ser entidades indivisibles—como se había supuesto hasta entonces—, tenían en realidad una estructura propia, incluyendo componentes subatómicos. Gran parte de la física moderna se dedica a investigar la naturaleza del átomo y de las partes que lo componen. Las partículas alfa son empleadas como balas para bombardear los átomos, intentando así entender cuál es su estructura. Como ya se dijo (Pág. 111), actualmente se considera al átomo formado por un núcleo positivamente cargado,

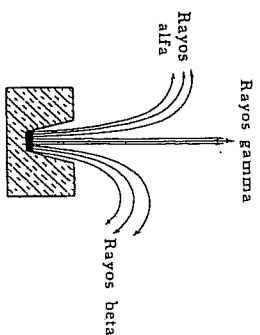


Fig. 13.6. La sustancia radiactiva se encuentra en una cavidad de un bloque de plomo. El efecto de un campo magnético perpendicular al diagrama, es separar entre sí a los rayos alfa, beta y gamma. Los rayos beta son muy desviados hacia un lado, los rayos alfa son menos desviados hacia el otro lado y los rayos gamma no son desviados

rodeado por una distribución de cargas eléctricas negativas. Se ha encontrado posible aun producir sustancias artificialmente radiactivas bombardeándolas, con partículas aceleradas a muy grandes velocidades, por medio de aparatos como el generador de Van de Graaf y el ciclotrón de Lawrence. Estos aparatos son capaces de dotar a las partículas—electrones, protones u otros iones— con energías equivalentes a millones de electrón-volts. (El *electrón-volt* es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado por la diferencia de potencial de un volt.) Estos aparatos se han desarrollado con el propósito de romper los átomos y sus núcleos en pedazos, con objeto de que los productos de esta desintegración puedan estudiarse. Se espera que la desintegración del núcleo abra nuevos campos de conocimiento, como sucedió al romperse los átomos hace algunas generaciones.

**Rayos positivos e isótopos.** Junto al descubrimiento de los rayos catódicos, o negativos, se observó una radiación positiva fluyendo del cátodo al ánodo. Esta radiación se descubrió empleando cátodos perforados que permitían a las partículas originadas en el ánodo, pasar por las perforaciones y así ser detectadas en la pared opuesta al ánodo (Fig. 13.7).

Mientras que los rayos catódicos consisten en partículas negativamente cargadas, todas exactamente iguales (como se demuestra por la acción que tiene un campo magnético sobre ellas), se ha encontrado que los rayos positivos consisten en iones positivamente cargados con varias masas y cargas. Es



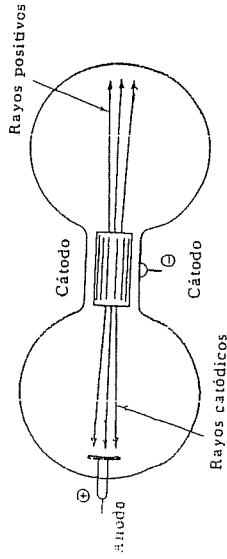


Fig. 13.7 Los rayos positivos son emitidos por el ánodo y los rayos negativos por el cátodo. Los primeros son iones positivos. Tanto los rayos positivos como los negativos se desvían tanto con los campos eléctricos como con los magnéticos

evidente, entonces, que los átomos de un elemento químico dado pueden tener diferentes masas, esto es, pueden tener diferentes propiedades físicas aunque tengan las mismas propiedades químicas. Estas formas diferentes de un elemento se llaman sus *isótopos*. El menos masivo de todos ellos tiene una masa aproximadamente igual a la del átomo de hidrógeno y se llama un *protón*; siendo su carga numéricamente igual a la del electrón, pero con signo positivo en lugar de negativo. Por otra parte, su masa es unas 1845 veces mayor que la del electrón; por consiguiente, resulta que un átomo ordinario de hidrógeno es una combinación de un protón y un electrón. El hidrógeno tiene también un isótopo con doble masa que la del protón, pero con la misma carga eléctrica. Este isótopo se llama *deuterón*. Cuando dos átomos de hidrógeno ordinario se combinan con uno de oxígeno, forman una molécula de agua ordinaria, pero si en lugar de protones entran en la combinación deuterones, se obtiene la llamada *agua pesada*, cuyas propiedades físicas son un poco diferentes de las del agua ordinaria. Prácticamente todos los elementos tienen uno o más isótopos.

**Teoría de Bohr.** Estos hechos elementales relacionados con las partículas eléctricas sirvieron para desarrollar una sucesión de teorías relacionadas con la estructura atómica; probablemente la más famosa de todas ellas es la teoría de Bohr, enunciada en 1913 y que ya hemos mencionado. De acuerdo con esta teoría el átomo de hidrógeno está formado por un electrón que gira alrededor de la Tierra, así como la Luna gira alrededor de la Tierra (Fig. 13.8.) El átomo de helio tiene un núcleo con dos cargas positivas y dos electrones girando a su

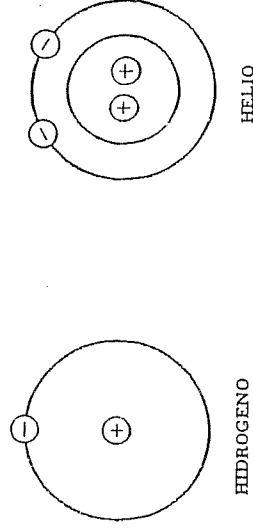


Fig. 13.8. El átomo de hidrógeno y el de helio, según el concepto de Bohr, con cargas eléctricas negativas girando alrededor del núcleo positivamente cargado. El núcleo de helio es la partícula alfa que se obtiene en la desintegración radiactiva; su masa es cuatro veces mayor que la del protón

alrededor, teniendo el núcleo una masa cuatro veces mayor que la del protón. De esta manera, los átomos de todos los elementos están formados por una combinación de cargas eléctricas positivas y negativas configurando sistemas dinámicos de estructura más o menos complicada. El éxito original de esta estructura fue la explicación de los espectros ópticos, de los que hablaremos después. Sin embargo, la teoría se ha encontrado inadecuada en muchos detalles, por lo que actualmente ha sido suplantada por otras teorías que no son adecuadas para una representación pictórica, por lo que la teoría de Bohr aún se explica en muchas discusiones populares sobre la estructura atómica.

El *modelo de Bohr* representa la estructura exterior del átomo como formada por electrones girando en órbitas elípticas alrededor del núcleo —un solo electrón, en el caso del hidrógeno y un número mayor conforme los átomos se complican hasta llegar al Lawrencio, el más complicado de la tabla periódica de los elementos—. En este modelo varias órbitas son posibles dependiendo del estado de excitación del átomo; las órbitas mayores contienen más energía que las menores. Por otra parte son más importantes estos discretos *niveles de energía*, que el concepto de órbitas. Los espectros ópticos y de rayos X se explican por la emisión de radiación al caer los electrones de las órbitas exteriores a las interiores, o sea, de un nivel mayor de energía a uno menor. El espectro del hidrógeno se explica así casi por completo, pero se han encontrado discrepancias en los espectros de sustancias más complicadas.

Las diferencias entre los niveles de energía de las órbitas de Bohr, y, por consiguiente, la radiación emitida, son múltiplos del *cuanto* básico de acción sugerida por la teoría cuántica de Planck (Pág. 149), por lo que se supone que los fenómenos atómicos están gobernados por las leyes de la *mecánica cuántica*. En lugar de la mecánica clásica o newtoniana. De acuerdo con el *principio de incertidumbre* de la mecánica cuántica existe un límite para la precisión con la que cualquier acontecimiento puede ser determinado. Estas son incertidumbres fundamentales. Por ejemplo, la posición y el ímpetu no pueden medirse simultáneamente con ilimitada precisión. Conforme la precisión de una determinación aumenta, la certeza de otra disminuye. El producto de las incertidumbres de estas dos cantidades es aproximadamente igual a la constante de Planck,  $h$ , la constante fundamental que aparece en la teoría cuántica de Planck. Este principio es sólo significativo para aquellas partículas de tamaño atómico o menores y queda completamente oscurecido en el caso de los fenómenos en el mundo macroscópico.

Mucho tiempo después del descubrimiento del electrón y del protón, estas partículas eran consideradas las únicas constituyentes de la materia. Hasta por 1940 este número aumentó al descubrirse el neutrón y a los pocos meses por el descubrimiento del electrón positivo. El *neutrón* es una partícula que no tiene carga y cuya masa es aproximadamente igual a la del protón. El *electrón positivo* (o *positrón*) lleva una carga positiva, pero, por otra parte, tiene todas las características del electrón negativo. Es evidente ahora que el núcleo de todos los átomos está compuesto fundamentalmente de protones y neutrones. Gran parte del trabajo actual de investigación está dedicado al posible descubrimiento de otras partículas fundamentales y al estudio del núcleo atómico. Sólo ayer se encontró que el átomo tenía una estructura, hoy la atención de los físicos se enfoca en la estructura de una de sus partes componentes: el núcleo; mañana se harán, probablemente, los más sorprendentes descubrimientos.

**El núcleo del átomo.** El núcleo del átomo parece estar formado de partículas llamadas nucleones que se mantienen reunidas por fuerzas no bien conocidas, por lo que los detalles de su estructura no están aún muy claros. Básicamente hay dos teorías diferentes: el modelo de gota y el modelo de capas.

En el primero se consideran fuerzas nucleares mucho mayores que las de Coulomb (las de atracción y repulsión electrostática) que actúan de manera análoga a las fuerzas de tensión superficial, obligando a los componentes del núcleo a reunirse en algo semejante a una gota de líquido. En el modelo de capas se postulan niveles de energía, semejantes a las capas o niveles de energía asociados con la estructura atómica.

Los componentes nucleares incluyen el *protón*, el *neutrón*, el *positrón*, varios *mesones* (partículas mucho más masivas que los electrones y cargadas positiva o negativamente), y otras innumerables partículas llamadas *piones*, *muones*, *partículas extrañas* y varias clases de las llamadas *antipartículas*.

Los aparatos para detectar los componentes nucleares incluyen a los siguientes:

*El contador de Geiger-Mueller* que consiste en un alambre montado coaxialmente dentro de un cilindro metálico, pero aislado eléctricamente y con un potencial muy alto con respecto a dicho cilindro; el alambre se descarga momentáneamente cuando una partícula cargada (alfa o beta) entra al tubo, penetrando por una ventana de lámina muy delgada.

*La cámara de niebla de Wilson.* Es un aparato donde se condensan las gotillas de vapor de agua sobre diminutas partículas cuando el vapor se dilata, formando trazos que pueden ser observados visual o fotográficamente y los cuales indican la presencia reciente de dichas partículas.

*Las emulsiones fotográficas.* También pueden emplearse para detectar a las partículas.

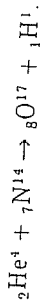
*La cámara de burbujas.* Emplea hidrógeno líquido sobresaturado, para formar las huellas de los trayectos de las partículas.

*Los contadores de centelleo.* Consisten en muchas fotoceldas orientadas de tal forma que pueden multiplicar diminutas corrientes eléctricas.

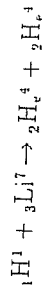
**Rayos cósmicos.** Estos constituyen una fuente de partículas nucleares; se originan en el espacio exterior y se ha descubierto que penetran en la atmósfera de la Tierra. Formadas principalmente por protones, al chocar con la materia producen una radiación cósmica secundaria en chubascos y estallidos.

**Reacciones y transformaciones nucleares.** En 1919 Rutherford demostró que el nitrógeno bombardeado con partículas

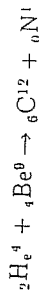
alfa (núcleos de helio) es transformado en oxígeno con liberación de protones, de acuerdo con la siguiente reacción:



También el litio cuando se bombardea con protones se transforma en helio:



Los neutrones fueron producidos por primera vez por Chadwick en 1930, bombardeando berilio con partículas alfa:



*Nota.* El subíndice a la izquierda indica el llamado número atómico  $Z$ , mientras que el índice superior a la derecha indica la llamada masa atómica  $A$ . Esta masa vale 16 para el oxígeno, siendo el número entero más próximo a su peso atómico;  $Z$  es el número de protones que contiene en el núcleo, esto es, especifica su carga positiva.

**Decaimiento radiactivo y semivida.** La emisión espontánea de partículas alfa y beta de sustancias naturalmente radiactivas (en contraste con las artificiales) están acompañadas por cambios de posición de la sustancia en la tabla periódica de los elementos. La expulsión de una partícula alfa por un núcleo representa una pérdida de dos protones y de dos neutrones, por lo que el número másico  $A$  disminuye en cuatro unidades, mientras que el número atómico disminuye en dos. La emisión de una partícula beta corresponde a una pérdida desprezable de masa, pero a un incremento en una unidad del número atómico  $Z$ . Por consiguiente, los materiales radiactivos decaen generalmente en etapas bien definidas hasta una sustancia final estable —por lo general algún isótopo— del plomo, si se parte de elementos pesados como el radio, el uranio, el torio, el actinio, etc.

La semivida es el tiempo que necesita una sustancia para perder la mitad de su actividad. La semivida varía desde fracciones de segundo hasta millones de años, pero cada isótopo tiene su semivida característica.

**Energía nuclear de enlace.** Cuando tienen lugar las reacciones nucleares y los nucleones se combinan para formar al núcleo (como cuando los neutrones y los protones se combinan

para formar un núcleo de helio), o cuando los núcleos se desintegran naturalmente (radiactividad natural) o en forma artificial por bombardeo por otros nucleones (radiactividad artificial), por lo general la masa del núcleo no es igual a la suma de las masas de los nucleones componentes. Esta diferencia se llama *energía de enlace*, teniendo en cuenta la relación de Einstein entre la masa y la energía,  $E = mc^2$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. La energía de enlace por nucleón es una función de número másico  $A$ , siendo mayor para los elementos que están cerca del centro de la tabla periódica y menor para los elementos que están en los extremos.

**Fisión.** Al principio de 1939 se hizo el notable descubrimiento de que cuando ciertas sustancias (notablemente el isótopo 235 del uranio) eran bombardeadas por neutrones lentos, bajo condiciones apropiadas, el núcleo se partía en componentes que incluían átomos de bario y de kriptón, es decir, sustancias colocadas cerca del centro de la tabla periódica. Este proceso se llama ahora *fisión nuclear*. Junto con el hundimiento se observó la liberación de una radiación gamma de alta intensidad (ondas electromagnéticas) y de neutrones adicionales que, al chocar con otros isótopos del uranio, producen más componentes, más radiación y más neutrones, prosiguiéndose así la reacción. Este proceso puede controlarse por medio de *moderadores* como el cadmio o el agua (preferiblemente la pesada) o puede permitirse que quede fuera de control.

La energía de la radiación es equivalente a la energía de enlace liberada de acuerdo con la ecuación de Einstein,  $E = mc^2$ , que sumada para los miles y miles de millones de átomos que contienen unos pocos kilogramos de uranio, representan una fantástica energía comparable con la energía liberada por la explosión de miles de toneladas de T.N.T.

**La bomba atómica.** Las posibilidades militares de la energía atómica se reconocieron inmediatamente. Esto condujo al desarrollo de la bomba atómica como un secreto de la guerra, a un costo de unos dos mil millones de dólares. Cuando se acumula una cantidad crítica de  $\text{U}^{235}$ , una reacción nuclear en cadena, que se sustenta a sí misma, es la consecuencia necesaria. La reacción tiene lugar muy rápidamente con la obtención de una tremenda cantidad de energía. Al romper un neutrón a un átomo de uranio se obtienen neutrones adicionales que, a su vez, rompen otros átomos, prosiguiéndose así la reacción

hasta emplear todo el U 235. Otro importante fenómeno de este proceso es la creación del nuevo elemento plutonio, que también puede ser fisionado. Con métodos, que aún ahora son secretos militares cuidadosamente guardados, en el verano de 1945 se fabricaron devastadoras bombas atómicas, utilizando la fisión nuclear. Aquella fecha marcó la primera ocasión en la que el hombre pudo liberar grandes cantidades de energía atómica y aún no puede predecirse las consecuencias sociales y económicas de este importante evento. Tocó a la Segunda Guerra Mundial estimular la física nuclear acumulando en pocos años tanta investigación como la que normalmente se habría desarrollado probablemente en veintenas de años.

**La fusión y la bomba de hidrógeno (dispositivo termonuclear).** Las temperaturas producidas en el proceso de fisión son suficientemente grandes para producir la fusión de los núcleos de hidrógeno (protones) y de los neutrones en núcleos de helio (partículas alfa) con la liberación, en forma de radiación, del exceso de radiación necesaria para reunir estos núcleos (el hidrógeno y el helio están en el extremo inferior de la tabla periódica, donde la energía de enlace no es de las mayores).

Así se volvió posible, después del desarrollo de la bomba atómica *la bomba de hidrógeno*, de tamaño teóricamente ilimitado. Antes de la bomba atómica la temperatura necesaria para obtener la de hidrógeno no era sólo inasequible, sino inconcebible de obtener. Incidentalmente, se producen menos desechos radiactivos con la bomba H que con la bomba A.

**Enlace molecular.** Las moléculas, siendo agregados de átomos, se mantienen reunidas por varias fuerzas. Para aquellas moléculas que son combinaciones sencillas de iones positivos y negativos, la fuerza de Coulomb parece ser suficiente. Para las moléculas diatómicas como la de H<sub>2</sub>, los átomos parecen compartirse los dos electrones originándose entonces las llamadas *fuerzas de intercambio*. El *principio de exclusión de Pauli*, sostiene que cuando un átomo se aproxima a otro para formar una molécula, los electrones de uno penetran en las capas de energía ocupadas del otro, pero de algún modo son obligadas a pasar a estados superiores de energía, porque no es permitida la duplicación de las capas de energía. Así se explica cómo se desarrollan las fuerzas atractivas que mantienen juntas a las

moléculas, pese a la repulsión de las fuerzas de Coulomb entre los dos núcleos positivos.

**Física del estado sólido.** Los átomos de un sólido se reúnen por medio de fuerzas que dan por resultado una estructura cristalina. En los metales los electrones son libres de moverse dentro del cristal saltando de un átomo a otro, ya que no pueden encontrarse asociados a ningún átomo en particular.

Mientras clásicamente la energía de vibración de las moléculas y de los átomos se supone que vale cero en el cero absoluto, la mecánica cuántica predice un residuo de energía soluto, la mecánica cuántica predice un residuo de energía atómica en el 0° de la escala absoluta de temperatura. La cuantización de las ondas vibratorias en las redes cristalinas, origina el concepto del *fonón*, un equivalente elástico del *fonón* electrónico.

En un sólido, los niveles de energía de los átomos componentes se ensanchan para formar las llamadas *bandas de energía*. En el cero absoluto (Pág. 130) los electrones se encuentran en la banda, o nivel, mínimo posibles, esto es, los niveles inferiores de energía se encuentran llenos, pero al elevarse la temperatura los electrones se excitan y tienden a ocupar las bandas más altas. En los metales las bandas llamadas de conducción no están llenas por completo. Los *conductores*, los *semiconductores* y los *aisladores* se diferencian entre sí por la extensión en que se encuentran llenas las bandas de conducción (las superiores). El llamado *nivel de Fermi* de una sustancia es aquel nivel, a una temperatura dada, donde la probabilidad de que un electrón ocupe cualquier estado disponible de energía es del 50%.

Los *semiconductores con impurezas* (o contaminados) se forman cuando se les agregan pequeñas cantidades de otra sustancia (por ejemplo se les agrega arsénico a un cristal de germanio). Esto altera la distribución de los electrones en la banda de valencia y en la de conducción (separadas por el nivel de Fermi). Un átomo de arsénico suministra un electrón extra de conducción, por lo que se llama una *impureza donadora* (donora) y produce el llamado semiconductor tipo n. Las *impurezas aceptadoras* (aceptora) originan los llamados semiconductores tipo p en donde los electrones faltantes producen las llamadas *cavidades* (u hoyos) disponibles para la conducción.

**El transistor.** Es una unión  $n-p-n$  que tienen importantes aplicaciones como amplificador pudiendo reemplazar a los tubos de muchos circuitos electrónicos.

**El laser.** Es un aparato del estado sólido en donde los átomos son excitados de un estado de baja energía a uno de alta, por medio de un procedimiento novel en donde la luz de alta frecuencia que es emitida por los átomos regresan a su estado original es, por así decirlo, "bombardeada" en ellos. Como resultado, un número de átomos mayor que el normal se encuentra en sus estados superiores, por lo que cuando la radiación es estimulada, resulta muy amplificada, mientras que la frecuencia permanece igual a la de la fuente estimulante y, por tanto, se dice que es coherente.

**Sumario.** En este capítulo se ha desarrollado la fisión moderna desde los primeros experimentos de conducción eléctrica a través de gases, hasta las modernas máquinas de altísimos voltajes empleadas en las máquinas que se usan en experimentos de desintegración. Aunque se han mencionado muchos tópicos, el estudiante no debe suponer que esta discusión ha sido completa; la física moderna es un tema demasiado grande para que pueda tratarse en un solo capítulo, pero para el propósito de este panorama descriptivo de la física, la exposición es adecuada para dar una orientación apropiada al principiante. Por otro lado, este capítulo ha sido más detallado que los anteriores debido a la importancia que tiene en la sociedad la física moderna. Se ha intentado enterar al estudiante del gran número de términos técnicos, que en años recientes se han deslizado en el vocabulario; esto incluye los nombres de muchas partículas atómicas; la descripción usada para describir las transformaciones nucleares; los diversos conceptos de la física del estado sólido y algunos aparatos como el transistor y el laser, para nombrar unos pocos. Se ha intentado también recalcar la necesidad de comprender los conceptos de la física clásica, antes que pueda tenerse una apreciación verdadera de los conceptos de la física moderna.

Gran parte de la física moderna se encuentra en la óptica, que será tratada en los capítulos siguientes. Empezaremos con una descripción de los fenómenos ópticos y terminaremos con el estudio de la naturaleza de la luz.

## CUESTIONARIO

1. Describa brevemente la apariencia de la descarga eléctrica en un tubo de vidrio cuando la presión del aire se va reduciendo.
2. ¿Qué diferencia hay entre los rayos catódicos y los rayos X?
3. ¿En qué consiste el efecto fotoeléctrico?
4. En general, ¿a qué se refiere el término "electrónica"?
5. ¿En qué consiste la radiactividad?
6. ¿En qué se diferencian las partículas alfa, las partículas beta y los rayos gamma?
7. ¿Cómo es el modelo de Bohr de un átomo de hidrógeno?
8. ¿Qué son los isótopos?
9. ¿En qué difiere un neutrón de un electrón o de un protón?
10. ¿En qué consiste la fisión nuclear?

## CONSIDERACIONES OPTICAS

### FOTOMETRIA; LEYES DE LA OPTICA GEOMETRICA; APARATOS OPTICOS

**Ambito de la óptica.** De todos los fenómenos físicos, ninguno más fascinante y de más inmediato interés que el relacionado con la visión humana. Las palabras color, luz solar, diseño geométrico e instrumentos ópticos, también contribuyen al complejo dominio de la óptica. Este campo incluye también los temas de iluminación, fotografía, microscopía, espectroscopia, optometría y polarización, así como el estudio de ciertas cuestiones filosóficas tales como la naturaleza de la luz. Puede verse que la óptica es un tema muy amplio; pero que forma parte de un tema mayor: la física.

**Naturaleza compleja de este estudio.** Desde un punto de vista estrictamente lógico, esta parte de la física está menos adaptada a los métodos empleados en las partes precedentes de este texto, es decir, al desarrollo lógico al pasar, de un tópico a otro. Esto se debe no sólo a la complicación del tema, sino también a la falta de un punto lógico inicial. Históricamente ya se conocían muchos fenómenos muy complicados y en apariencia sin relación, antes que se conocieran otros más sencillos. Filosóficamente ha existido una perpetua controversia entre los partidarios de la teoría corpuscular y los de la teoría ondulatoria de la naturaleza de la luz. Por otra parte, los puntos de contacto entre la óptica y las demás partes de la física son numerosos, pero al mismo tiempo tan diversos como el estudio de la geometría y el de los colores del arco iris. En verdad es esta diversidad la que nos proporciona la clave para un estudio sistemático de los fenómenos ópticos.

**Óptica geométrica vs. óptica física.** El estudio de la óptica se divide en dos secciones principales que son la *óptica geométrica* y la *óptica física*. La primera trata acerca de los rayos de luz que se mueven en línea recta y con las imágenes producidas por refracción y reflexión; la segunda trata de la naturaleza física de la luz y los fenómenos relacionados: consideraremos sucesivamente cada una, empezando con la óptica geométrica de acuerdo con el desarrollo histórico. Las investigaciones de las últimas décadas han tenido una gran importancia en relación con la óptica física, que se tratará en el capítulo siguiente, y final de este libro.

**Primeras teorías.** En la antigüedad se opinaba que la luz y la visión eran prácticamente lo mismo; se pensaba que la luz se originaba en el ojo haciendo contacto de un modo misterioso con los cuerpos observados. Parece extraño que nadie estuviera perturbado por el hecho de que los cuerpos invisibles a los ciegos fueran visibles a los demás. Un punto de vista posterior atribuiría a los cuerpos luminosos la propiedad de emitir partículas de luz capaces de moverse en línea recta y de impresionar el ojo del observador. Que el cuerpo luminoso es el que emite y el ojo el que recibe es el punto de vista moderno, pero que la radiación en sí misma sea corpuscular u ondulatoria es un tema que han discutido los físicos a lo largo de toda la historia de la física.

**Propagación rectilínea de la luz.** Un hecho, sin embargo, es cierto: el del movimiento de la luz en línea recta, lo que técnicamente se llama la *propagación rectilínea* de la luz, lo que se prueba, al menos superficialmente, por la formación de sombras bien definidas (Fig. 14.1) la cámara oscura también demuestra este hecho (Fig. 14.2). El concepto de rayos de luz se sugiere de este modo. Estos rayos son emitidos ya sea por los cuerpos que son luminosos por sí mismos, o bien, son re-

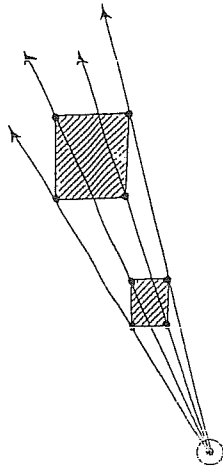


FIG. 14.1. Propagación rectilínea de la luz

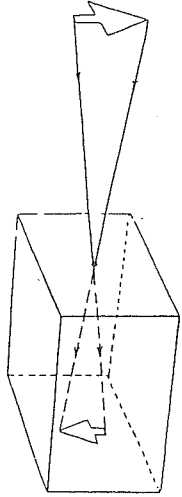


FIG. 14.2. La cámara oscura demuestra la propagación rectilínea de la luz reflejados de los cuerpos iluminados para poder ser percibidos por el ojo. Por supuesto, hablando objetivamente, el ojo no es en general, una parte del fenómeno óptico.

**Fotometría.** El concepto de rayos lleva a la noción de la simetría esférica de la radiación alrededor de una fuente puntual de luz y sugiere un modo de medir la cantidad de la luz. Este campo de la óptica se llama *fotometría*. La fuente luminosa se compara con una bujía o candelilla, en cuya unidad se mide la intensidad de una fuente luminosa. Por ejemplo, una fuente luminosa de cien candelas es unas cien veces más intensa que el tipo especificado de bujía. Una candela normal es la que emite un número especificado de lúmenes de luz, siendo el *lumen* la unidad de cantidad de luz. Si una fuente luminosa es tan pequeña que pueda imaginarse como un punto matemático, las reglas de la geometría en el espacio son suficientes para calcular las cantidades de luz emitidas por fuentes de diversas intensidades. Si una fuente no es puntual, sino que tiene superficie, se habla más bien de su brillo que de su intensidad: el *brillo* se refiere a cuantos lúmenes emite por unidad de área.

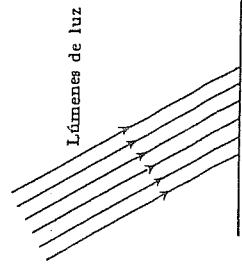


FIG. 14.3. La iluminación de una superficie se mide por medio del número de lúmenes que inciden sobre el área unitaria. Un lumen por metro cuadrado se llama *lux* y es la iluminación que recibe una superficie de un metro cuadrado, que esté a un metro de distancia de la candela normal

**Iluminación.** Cuando la luz incide sobre una superficie se dice que está iluminada (Fig. 14.3). El número de lúmenes incidentes por metro cuadrado de la superficie es una medida de la *iluminación*, expresada generalmente en *lux*. El *lux* es la iluminación de un metro cuadrado de una superficie colocada a un metro de distancia de una fuente puntual cuya intensidad sea de una candela. Debido al popular interés por la fotografía, los medidores de iluminación se han convertido actualmente en instrumentos comunes: con un luxímetro o exposímetro es con lo que el fotógrafo determina el tiempo necesario de exposición para fotografía instantánea.

**Importancia práctica de la fotometría.** Estos y otros temas fotométricos son de gran interés actualmente en la profesión de ingeniero de iluminación. La industria se ha convencido de que la eficiencia de los trabajadores de oficinas y fábricas aumenta cuando existen condiciones apropiadas de iluminación. En lugar de iluminaciones de diez a treinta luxes que se empleaban anteriormente en las fábricas modernas se emplea por lo general iluminaciones de 400 a 500 luxes.

Incidentalmente, la iluminación de una superficie expuesta al sol a mediodía puede llegar a ser como de 100 000 luxes; en cambio, la iluminación de la luna llena es como de 0.2 lux. **Ley de la iluminación.** Una ley muy importante de la fotometría es la ley del cuadrado inverso. Esta ley establece que la iluminación de una superficie por una fuente luminosa puntual varía inversamente como el cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie. Esto significa, por ejemplo, que si se duplica la distancia entre la fuente y la pantalla, la iluminación que ésta recibe disminuye a la cuarta parte de su valor original.

Otra forma de esta ley establece que para que sean iguales las iluminaciones debidas a dos fuentes puntuales de diferente intensidad, la relación de las intensidades debe ser proporcional al cuadrado de la distancia; esto quiere decir que si una fuente luminosa tiene doble intensidad que otra, debe encontrarse como una y media veces más lejos que la más débil, para producir la misma iluminación en un lugar dado (Fig. 14.4).

**Reflexión.** En el estudio de la óptica geométrica hay dos fenómenos de gran importancia que son la *reflexión* y la *refracción*, caracterizada cada una de ellas por una ley natural. En

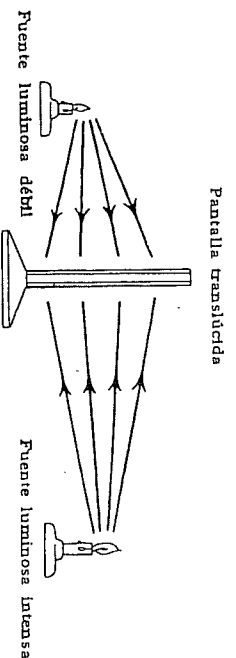


Fig. 14.4. Para producir la misma iluminación en una pantalla la fuente débil debe estar más cerca que la intensa. La iluminación debida a una fuente puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente a la pantalla

el caso de la reflexión, la llamada ley de la reflexión regular establece que el ángulo que describe el rayo incidente y la línea perpendicular trazada por el punto de incidencia en la superficie reflectora, siempre es igual al ángulo que hace la misma perpendicular. Y el rayo reflejado; dice, además, que el rayo incidente, el rayo reflejado y la línea perpendicular se encuentran en el mismo plano (Fig. 14.5).

**Refracción.** Este fenómeno consiste en que un rayo de luz parece quebrarse cuando pasa de un medio a otro de diferentes características ópticas, debido a que la luz cambia su velocidad al pasar de un medio a otro. La ley básica que se aplica es de *Snell*. Esta ley se expresa generalmente en lenguaje matemático y se refiere a la desviación relativa de los rayos de luz en dos medios adyacentes, en términos de ángulos y velocidades; nuevamente se hace referencia a la óptica geométrica. Aunque no es capaz de expresarse con precisión sin el uso del lenguaje matemático, la ley de Snell establece esencialmente que

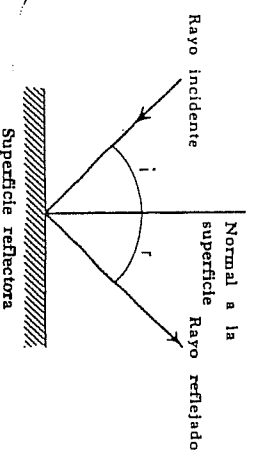


Fig. 14.5. La ley de la reflexión regular establece que:  $r = i$



con referencia a una línea trazada perpendicularmente a la superficie que limita a los dos medios en el punto de incidencia, el rayo es desviado acercándose a la perpendicular si el segundo medio tiene mayor índice de refracción que el primero y alejándose si el índice de refracción es menor. El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio. Por ejemplo, cuando un rayo pasa del aire al vidrio o al agua, sustancias donde se reduce su movimiento, el rayo se desvía de tal manera que el ángulo que hace el rayo incidente y la perpendicular al vidrio o al agua, es más pequeño que el que hace el rayo incidente y la misma perpendicular en el aire (Fig. 14.6); es decir, el ángulo de refracción es más pequeño que el ángulo de incidencia en el aire; además, el ángulo de refracción así definido, es más pequeño para el vidrio que el para el agua porque el índice de refracción del vidrio es mayor que el del agua.

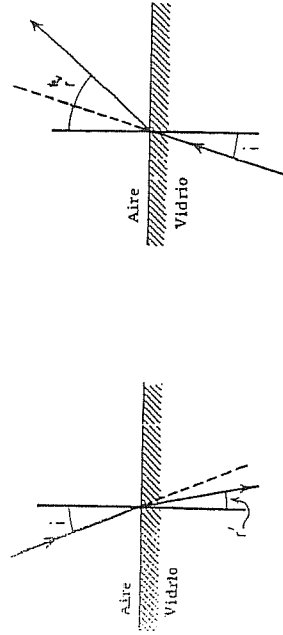


FIG. 14.6. Dos casos de refracción, demostrando la desviación de la luz cuando pasa de un medio a otro

Aunque el aspecto matemático de la ley de Snell no importa mucho en este texto, la ley se expresa matemáticamente como sigue:

$$\mu = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'}$$

donde  $\mu$  es el índice de refracción del segundo medio con respecto al primero,  $i$  es el ángulo de incidencia,  $r'$  es el ángulo de refracción y en cada caso *sen* es la abreviatura de *seno* que es una función trigonométrica de cada ángulo.

El fenómeno de la reflexión total interna. Una consecuencia interesante de esta ley es el fenómeno de la reflexión total

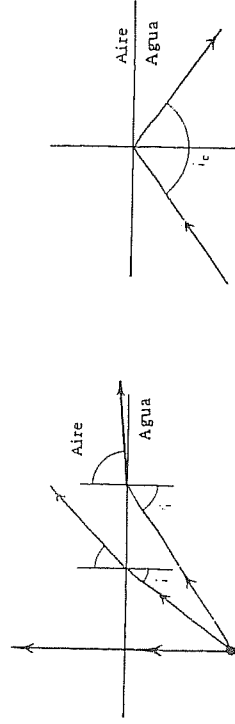


FIG. 14.7. Cuando la luz pasa del agua al aire, existe un cierto ángulo límite de incidencia tal, que cuando se excede la luz es totalmente reflejada internamente dentro del agua. Este ángulo está indicado por  $i_c$  en el segundo diagrama

interna. Cuando la luz pasa de un medio a otro de menor índice de refracción hay un límite al valor del ángulo de incidencia para que la luz se refracte; si el ángulo de incidencia excede este ángulo crítico, como se le llama, la luz en lugar de ser refractada se refleja hacia el medio inicial, como si hubiera un espejo, obedeciéndose las leyes de reflexión (Fig. 14.7). Es evidente que como en estas circunstancias el rayo se desvía alejándose de la normal, no puede desviarse haciendo un ángulo mayor de noventa grados; el límite es impuesto por el valor del ángulo de incidencia; para el vidrio en el aire este ángulo es de unos cuarenta y dos grados, que es menor que los cuarenta y cinco grados que tiene un triángulo isósceles y rectangular. Por consiguiente, la luz que llega a un pedazo triangular recto de vidrio, paralelo a un lado, si llega por un cateto debe ser reflejada por la hipotenusa saliendo perpendicular al otro cateto (Fig. 14.8). En otras palabras, la luz cambiará noventa y cinco grados su dirección como si hubiera un espejo inclinado cuarenta y cinco grados con respecto al rayo incidente, pero

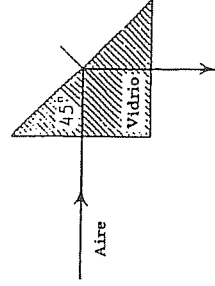


FIG. 14.8. El ángulo crítico para la superficie de vidrio a aire es de unos 42°, menor que el ángulo de incidencia de 45°; por consiguiente, la luz es reflejada interna y totalmente, como se muestra en la figura

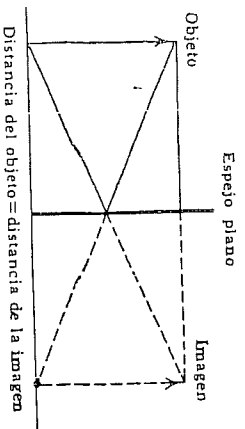
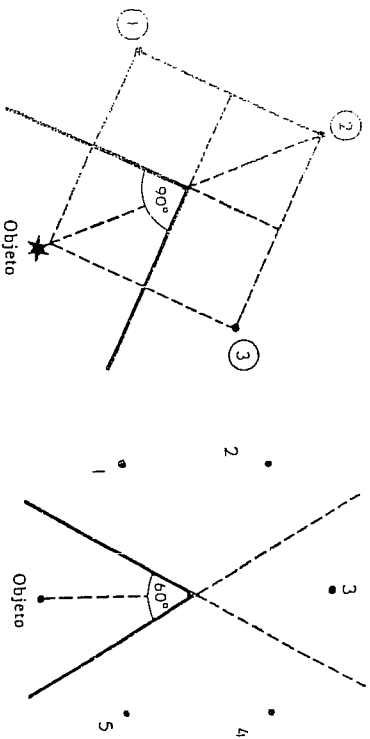


Fig. 14.9. La imagen formada por un espejo plano es derecha y virtual. Se forma detrás del espejo a la misma distancia de éste que la imagen sin necesidad de ningún plateado. El cambio de dirección se dice que es un resultado de la reflexión total interna.

**Imágenes formadas por los espejos planos.** Teniendo en cuenta las leyes de la refracción y de la reflexión se llega a numerosas conclusiones con respecto al comportamiento de los rayos de luz en un medio óptico, explicando cosas tales como la formación de imágenes con espejos, prismas y lentes. Como el funcionamiento de todos los instrumentos ópticos parte de estas consideraciones, éstas no deben subestimarse.

Consideremos, por ejemplo, el espejo plano. Se infiere de las leyes de la reflexión que una imagen derecha se forma apa-



Tres imágenes del objeto se forman con dos espejos planos haciendo entre sí un ángulo de  $90^\circ$ , si el objeto está colocado en la bisectriz del ángulo que forman los dos espejos.

Fig. 14.10 Ejemplos de imágenes múltiples formadas por la reflexión en espejos planos angulares.

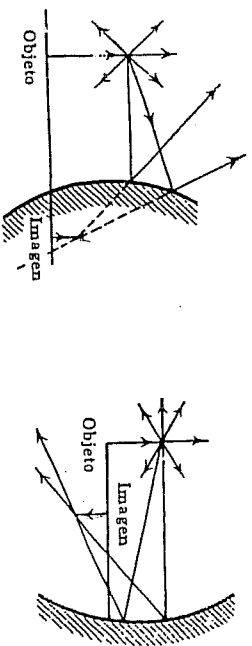


Fig. 14.11. Imágenes obtenidas con espejos esféricos. Imagen obtenida con un espejo esférico convexo. Un caso de imagen obtenida con un espejo esférico cóncavo.

rentemente atrás del espejo cuando el objeto se encuentra al frente de él (Fig. 14.9). Este simple fenómeno es, por supuesto, de ocurrencia cotidiana, pero a pesar de ello es muy importante desde el punto de vista físico. Otros ejemplos pueden verse en la Fig. 14.10.

**Reflexión en superficies esféricas.** Cuando los rayos de luz se reflejan en espejos curvos los resultados son muy interesantes. Un espejo *convexo* proporciona imágenes de tamaños más pequeños que el objeto, pero derechos; en cambio un espejo *esférico cóncavo* puede producir imágenes invertidas colocadas en el espacio enfrente del espejo; otras veces producen imágenes derechas localizadas aparentemente detrás del espejo (Fig. 14.11). Las imágenes invertidas se llaman *imágenes reales* porque en realidad se encuentran donde se enfocan los rayos luminosos, pudiendo ser proyectadas sobre una pantalla. Muchas ilusiones ópticas pueden producirse con las imágenes reales. Las imágenes derechas se llaman *imágenes virtuales*; éstas nunca pueden ser proyectadas sobre una pantalla.

Es evidente que la formación de imágenes con espejos curvos—cilíndricos, esféricos y parabólicos—pueden ser de gran importancia práctica en los instrumentos ópticos.

**Puntos focales.** Los más grandes telescopios del mundo, como el de Monte Palomar, en California (de cinco metros de diámetro) se basan en el principio de la formación de imágenes reales de los cuerpos celestes con grandes espejos cóncavos. Una de las características de estos instrumentos es que todos los rayos de luz que llegan de objetos muy distantes se enfocan en un solo punto llamado *foco* o *punto focal* (Fig. 14.12). La distancia desde este punto al espejo se llama *distancia focal*. Puede demostrarse que en los espejos esféricos la distancia focal es

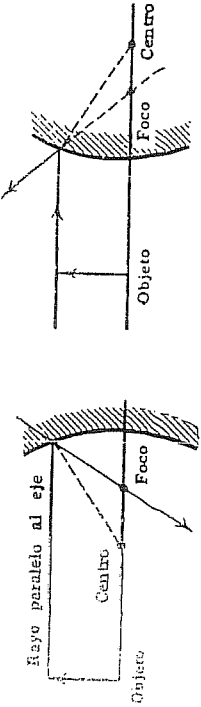


Fig. 14.12. Las figuras muestran el foco de un espejo esférico cóncavo y el foco virtual de un espejo esférico convexo. La distancia focal es la mitad del radio de curvatura

la mitad de radio de curvatura. Mientras los espejos esféricos convexos siempre producen imágenes virtuales más pequeñas que el objeto siendo virtual su punto focal (o foco), los espejos esféricos cóncavos producen imágenes cuyo tipo y tamaño dependen de la distancia entre el objeto y el espejo, relacionada con la distancia focal y el radio de curvatura. El espejo es un ejemplo de un sistema convergente, porque en realidad hace convergir a los rayos de luz; por otro lado, el espejo convexo hace divergir a los rayos de luz por lo que se le llama *espejo divergente*.

**Lentes sencillas.** Otro ejemplo de otro sistema convergente es el de la lente biconvexa la que, por refracción, obliga a los rayos de luz a desviarse más en las orillas que en el centro, por lo que los hace convergir en el foco. Por otro lado la lente biconcava, siendo más gruesa en los bordes que en el centro, produce un efecto opuesto, por lo que es un ejemplo de un sistema divergente (Figs. 14.13 y 14.14).

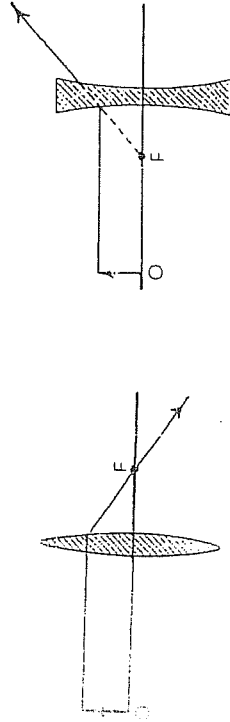


Fig. 14.13. La lente convergente tiene un foco real a donde se reúnen los rayos originalmente paralelos al eje, parecen salir después de refractados

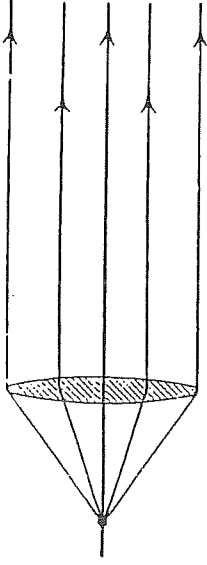


Fig. 14.15. Una fuente puntual está en el foco de una lente convergente. Los rayos de luz refractados por la lente son paralelos entre sí

La convergencia de un sistema puede demostrarse haciendo pasar un haz de luz solar, limitado por una abertura, a través de la lente —o reflejada en el espejo— en un local lleno de humo; entonces se encuentra que los rayos originalmente paralelos (ya que el Sol está a unos ciento cincuenta millones de kilómetros y un haz estrecho no tiene mucha oportunidad de dispersarse en el corto espacio que recorre en un local ordinario) convergen en un foco real o divergen de un foco virtual como se indica en las Figs. 14.13 y 14.14.

Debe hacerse notar también que los rayos de una fuente puntual colocada en el eje principal y a la distancia focal de una lente convergente, deben seguir paralelos al ser refractados por la lente; así puede producirse un haz paralelo de luz en el laboratorio sin acudir a los rayos del Sol (Fig. 14.15).

Con un sistema convergente, ya sea una lente biconvexa o un espejo cóncavo, las imágenes obtenidas son siempre reales e invertidas cuando los objetos se encuentran más allá del-foco. Los objetos colocados a distancias menores que la focal dan origen a imágenes virtuales derechas y aumentadas. El tamaño de la imagen es al tamaño del objeto como la distancia de la imagen es a la distancia del objeto al espejo.

**Diagrama de rayos.** Teniendo en cuenta las leyes de la reflexión y refracción, y conociendo las características de los focos de una lente o de un espejo esférico, es posible encontrar la imagen de un objeto con el llamado diagrama de rayos.

**Diagrama de rayos para un espejo cóncavo.** Consideremos un objeto en forma de flecha cuya base descansa en el eje del

espejo esférico cóncavo (Fig. 14.16). Tratando a la punta de la flecha como una fuente puntual de luz consideremos, de todos los rayos emitidos, a dos cuyas direcciones después de la reflexión puedan ser determinables. El rayo incidente paralelo al eje debe ser reflejado hasta el punto focal y el rayo que pasa por el centro de curvatura se refleja sobre sí mismo porque este rayo coincide con el radio, el que, por definición, es perpendicular a la superficie del espejo y, por tanto, hace un ángulo de incidencia igual a cero. Excepto que la base de la flecha se encuentre en el foco, esos dos rayos deben intersectarse al frente del espejo, o bien, sus prolongaciones parecerán intersectarse detrás del espejo. En estas intersecciones estará la imagen del punto de donde salieron originalmente los rayos de luz. Si la intersección tiene lugar al frente del espejo, la imagen es real; si detrás del espejo, la imagen es virtual. Se ha encontrado que si el objeto está más allá de la distancia focal, la imagen *siempre* es real e invertida; si el objeto se encuentra entre el espejo y el foco, la imagen es virtual y derecha. Debe recordarse que cuando se mira en un espejo de rasurar a muy pequeña distancia del espejo, la imagen observada es derecha, está detrás del espejo y está aumentada; por otra parte, si el espejo se coloca a bastante distancia, la imagen de la cara es real e invertida, debido a que se ha sobrepasado la distancia focal.

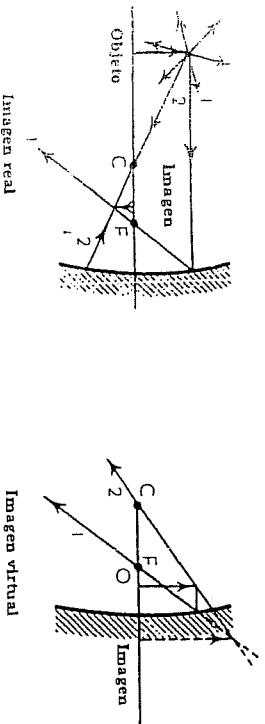


Fig. 14.16. Dos ejemplos de imágenes encontradas por el método de diagrama de rayos; estas imágenes se forman con espejos convergentes (cóncavos)

**Diagrama de rayos para un espejo convexo.** El mismo procedimiento puede aplicarse a un espejo convexo, encontrándose que, en este caso, la imagen siempre es virtual y de menor tamaño que el objeto (Fig. 14.17).

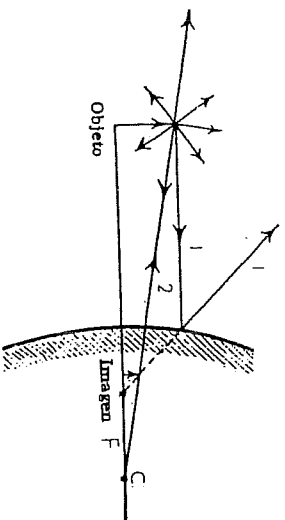


Fig. 14.17. La imagen virtual obtenida por un espejo divergente (convexo) se encuentra por el método del diagrama de rayos

Una comprobación interesante de estos casos se tiene cuando se considera un tercer rayo. Evidentemente, el rayo que sale de la punta de la flecha, que representa al objeto y que pasa por el foco, será reflejado paralelo al eje y deberá pasar también por el punto donde se intersectan los otros dos rayos.

Por supuesto, debe ser necesario considerar estos rayos — que se llaman el primero, el segundo y el tercero — para cada punto del objeto y encontrar así cada punto de la imagen; pero esto no es generalmente necesario, ya que la punta de la flecha localiza la posición de la imagen con su base sobre el eje.

**Diagrama de rayos para lentes delgadas.** Las consideraciones anteriores se aplican también a las lentes delgadas, con la diferencia de que en lugar de reflejarse los rayos atraviesan la lente, y que en lugar de considerar al rayo que pasa por el centro

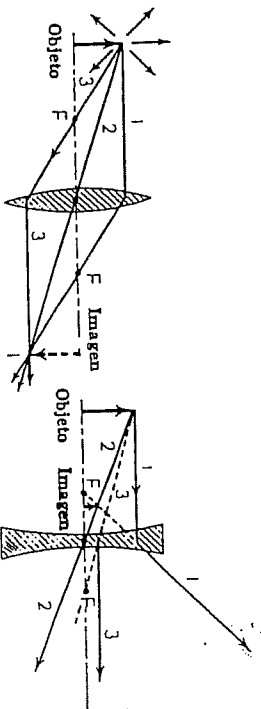


Fig. 14.18. Imágenes encontradas con el diagrama de rayos en una lente convergente y en una divergente; las figuras indican cómo un tercer rayo que pasa por el foco, emerge de la lente paralelo al eje, comprobando los resultados obtenidos por los rayos 1 y 2

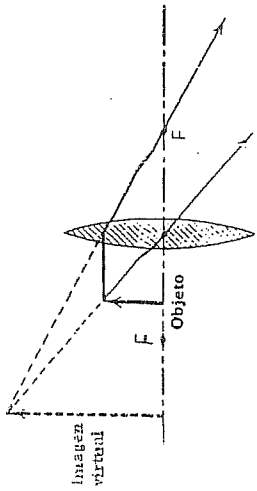


FIG. 14.19. El microscopio simple, o vidrio de aumento o lupa, representa un caso especial de formación de imágenes con una lente convergente, cuando el objeto está colocado entre el foco y la lente. La imagen es virtual y está del mismo lado de la lente que el objeto

de curvatura, se considera al rayo que pasa por el centro verdadero de la lente (Fig. 14.18). Puede demostrarse que este rayo no se desvía. Con este análisis se encuentra que una lente divergente siempre produce imágenes virtuales y más pequeñas, y que las lentes convergentes producen imágenes reales de los objetos que están más allá del foco e imágenes virtuales si el objeto está entre el foco y la lente.

La lente de aumento. Un ejemplo de la última situación se encuentra en la lupa o *microscopio simple*, como se le llama técnicamente. La lente se mantiene a una distancia del objeto menor que la distancia focal, obteniéndose una imagen virtual, derecha, mayor, y del mismo lado de la lente del objeto (Fig. 14.19). Si la lente se coloca bastante lejos del objeto la imagen obtenida es real, invertida y colocada, con respecto al objeto, del lado opuesto de la lente.

Casi todos los instrumentos ópticos son combinaciones de espejos y lentes y en todos los casos es posible trazar los rayos de luz que pasan por el instrumento para comprender cómo funciona. Estos instrumentos incluyen los telescopios, los microscopios, los gemelos de teatro, las cámaras fotográficas y, sobre todo, el ojo humano (Fig. 14.20). En un sistema óptico formado de más de un espejo o lente conviene localizar primero, con el diagrama de rayos, la imagen formada por la primera unidad del sistema, y luego tratar esta imagen como objeto para la segunda unidad, y así sucesivamente.

El ojo. Posiblemente el más importante instrumento óptico es nuestro ojo, aunque no debe confundirse el fenómeno de la

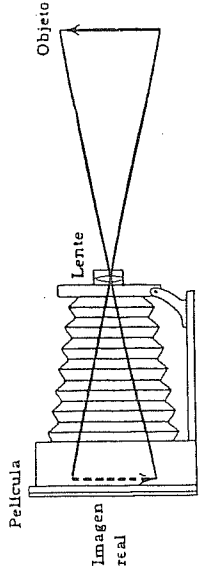


FIG. 14.20. Aquí se muestra el funcionamiento de una cámara fotográfica. Se forma una imagen real del objeto sobre la película colocada en la parte posterior de la cámara

visión con el de la formación de imágenes por el sistema óptico del ojo. La visión incluye la interpretación por el cerebro de la imagen formada. Aquí sólo trataremos al ojo como un instrumento óptico, es decir, como una especie de cámara fotográfica en donde la imagen de un objeto se forma en un tejido nervioso, que se llama *retina*, y que se encuentra en la parte posterior del ojo; la retina juega el mismo papel de la película en la cámara fotográfica.

Enfrente del ojo hay una combinación de una abertura llamada *pupila* y de un arreglo de lentes que sirve como sistema óptico para producir las imágenes de los objetos exteriores. Estas imágenes caen en la retina, la que en realidad forra la parte posterior del globo del ojo, estimulando las células nerviosas que contiene y que envían mensajes apropiados al cerebro (Fig. 14.21). El ojo está lleno con un fluido acuoso que también toma parte en el fenómeno de la refracción. La abertura de la pupila se controla automáticamente por la acción del diafragma iris; cuanto más pequeña, más definida es la imagen; pero demasiado pequeña no deja entrar luz suficiente para estimular

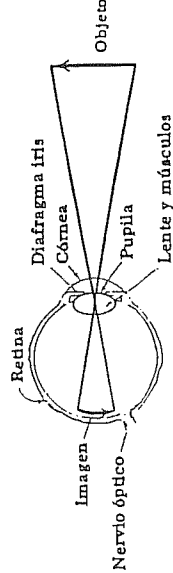


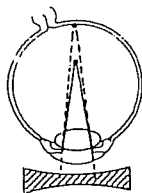
FIG. 14.21. El sistema óptico del ojo humano sirve para formar una imagen real en la retina, el tejido nervioso que forra a la parte posterior del globo del ojo

la retina, por lo que el ajuste del tamaño de la abertura, aunque realizado automáticamente, es en realidad crítico.

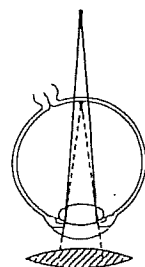
Uno de los más importantes arreglos del ojo es el de su enfoque. Existen músculos unidos a la lente que pueden ampliarla o encorvarla, alterándose así su distancia focal. De esta manera el ojo se acomoda para observar los cuerpos colocados a diferentes distancias. De otro modo no sería posible enfocar los ojos a una escena distante y después a un periódico colocado a la distancia ordinaria de lectura. El poder de acomodación se pierde gradualmente con la edad, siendo entonces necesario emplear los llamados anteojos "bifocales". De hecho, lo relativo a los anteojos, que será considerado a continuación, es una aplicación de la física a la vida cotidiana.

Aunque toda la retina es muy sensible a la luz, existe una región en particular que es sumamente sensible; en realidad, es tan sensible que para toda observación cuidadosa como, por ejemplo, la lectura, el ojo está moviéndose continuamente para enfocar lo que se observa en estas regiones de los dos ojos. Estas regiones son tan pequeñas que es necesario mover los ojos para enfocar cada uno de los puntos que forman los dos puntos de este signo de puntuación: por esto la lectura hace necesario que los ojos se muevan a sacudidas a lo largo de las líneas de la página impresa enfocando un punto después de otro en rápida sucesión. ¿Hay sorpresa alguna en que nuestros ojos se fatiguen a veces y muchas personas necesiten la ayuda de anteojos, especialmente en la edad madura y en la vejez?

**Los defectos del ojo y los anteojos — Miopía.** Ya se ha sugerido que la adaptación de anteojos para ayudar a la visión humana, es una aplicación práctica de la física. Algunas personas nacen con el globo del ojo demasiado largo, no teniendo una visión distinta; las imágenes formadas por el sistema de lentes del ojo quedan delante de la retina y no importando el esfuerzo que haga el ojo para acomodarse, no se obtiene una visión distinta; excepto para objetos muy próximos; esta condición se llama vulgarmente vista corta y técnicamente *miopía*. El remedio está en el uso de una lente divergente frente al ojo para aumentar la distancia focal del sistema; por esta razón los miopes emplean lentes que son más gruesos en los bordes que en el centro; es decir, usan lentes divergentes (Fig. 14.22).



En la miopía o vista corta, la imagen se forma antes de la retina; esta falla se corrige con una lente divergente colocada enfrente del ojo, con lo que la imagen se forma en la retina



En la hipermetropía o vista larga, la imagen se forma atrás de la retina. La imagen se forma en ella con la ayuda de una lente convergente colocada delante del ojo

Fig. 14.22. Defectos del ojo

**Hipermetropía.** La condición opuesta es, por supuesto, la vista larga o *hipermetropía*, como también se le llama. En este caso el globo del ojo es demasiado corto y las imágenes se forman siempre detrás de la retina; este defecto se remedia empleando una lente convergente para acortar la distancia focal del sistema. Cuando se pierde el poder de acomodación al envejecer el ojo, por lo general se vuelve más y más hipermetrope; el punto próximo, por así decirlo, retrocede cuando la edad avanza; por esta razón muchas personas hipermétropes encuentran que su visión mejora al pasar el tiempo.

**Astigmatismo.** Muchos ojos sufren un defecto llamado *astigmatismo*. Es probable asegurar que la mayoría de los anteojos se usan más por esta razón que por cualquier otra. El astigmatismo es una aberración relacionada con la forma de la superficie frontal de la *córnea* del ojo. Este defecto aparece cuando una persona intenta ver con igual precisión a todas las líneas de una serie dibujada en un plano y radialmente a partir de un punto; entonces el ojo astigmático ve las líneas en cierta dirección más distintamente que en las otras. La jaqueca constituye un síntoma común de esta dificultad como un resultado del esfuerzo que hacen los músculos del ojo cuando intentan compensar el defecto. La corrección de este defecto se hace con lentes cilíndricas cuyos ejes se ajustan apropiadamente en la dirección del astigmatismo. Por supuesto, varios defectos pueden ser compensados simultáneamente por un par de anteojos, por lo que éstos a menudo son combinaciones de superficies cilíndricas y esféricas, siendo esto parte del trabajo del optometrista. No es exageración repetir que la aplicación de la física a la ayuda de la visión humana es de la más grande importancia.

**Sumario.** En este capítulo se ha visto que la óptica geométrica desempeña un papel muy importante en el ámbito de la experiencia humana. Desde en los anteojos ordinarios hasta en los grandes telescopios astronómicos, los rayos de luz forman imágenes de los objetos luminosos. La reflexión y la refracción, los espejos y las lentes, la iluminación y la oscuridad: toda forma parte del dominio de la óptica, siendo, a su vez, una parte del estudio de la física. Consideraremos en seguida el efecto de un prisma en un haz luminoso, la maravilla del arco iris, y otros fenómenos ópticos relacionados con la óptica física, en contraste con la óptica geométrica.

### CUESTIONARIO

1. ¿Qué quiere decir fotometría?
2. ¿Cómo varía la iluminación de un lugar con la distancia a la que se encuentra de la fuente luminosa?
3. Defina el lux.
4. Cuando un rayo de luz pasa por el centro de una lente delgada no se desvía; ¿por qué?
5. Indique el camino de dos rayos de luz que saliendo de un punto del objeto puedan dibujarse para localizar la imagen formada por a) un espejo esférico; b) una lente.
6. Demuestre con un diagrama que una persona puede verse de cuerpo entero en un espejo plano de la mitad de su estatura.
7. ¿Cómo se corrige la miopía y la hipermetropía por medio de espejos?
8. ¿Qué tipo de lente produce una imagen aumentada en una pantalla?
9. Muestre con un diagrama cómo pasa la luz a través de a) una lente más gruesa en el centro que en los bordes; b) una lente cuyos bordes son más gruesos que su centro.
10. Para iniciar un fuego, ¿podrá usarse una lente doble convexa? ¿un espejo convexo? ¿un espejo cóncavo?
11. Diga qué tipo de imagen se forma en la película de una cámara fotográfica, por medio de su lente.

## Capítulo 15

# CONSIDERACIONES OPTICAS (Continuación)

## OPTICA FISICA; DISPERSION; ESPECTROSCOPIA; INTERFERENCIA; DIFRACCION Y POLARIZACION

En el capítulo anterior se consideraron cuestiones relacionadas con los aspectos direccionales de los rayos de luz, observándose que los rayos son reflejados, refractados, hechos intersectar entre sí para formar imágenes y afectados por la presencia de la materia, siendo la geometría de cada situación de la más inmediata importancia que la naturaleza misma de la luz; en este capítulo se insiste en la última cuestión, pero consideraremos primero otro fenómeno en que la dirección toma también un importante papel.

**El espectro visible.** Cuando un haz estrecho de luz solar se hace pasar por un prisma triangular de vidrio (Fig. 15.1) un resultado muy interesante, y quizás extraño, se produce por la refracción de la luz. Los rayos no solamente cambian de dirección debido a la refracción sino que se esparcen en una banda o *espectro* de colores que van desde el rojo hasta el violeta, lo cual indica que debe haber algo en el haz luminoso que hace posible su descomposición en sus diversos componentes. Este fenómeno se llama *dispersión* de la luz. Si la fuente luminosa es una estrecha rendija iluminada, y una imagen de ella se forma en una pantalla por medio de una lente colocada cerca del prisma, habrá en la pantalla imágenes sucesivas y traslapadas de la rendija de cada uno de los colores simples presentes en la fuente; por esta razón el espectro formado por un prisma es característico de la fuente de luz empleada y muchos diferentes tipos de espectro se han clasificado de acuerdo con la naturaleza de la fuente.

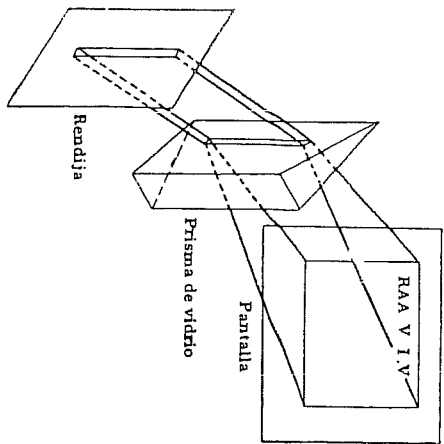


Fig. 15.1. Un haz de luz solar se dispersa en un espectro coloreado con un prisma triangular de vidrio.

**Espectroscopia.** Todas las fuentes incandescentes de luz se ha encontrado que emiten espectros continuos, esto es, una banda continua de luz que contiene todos los colores del arco iris. En realidad, el arco iris mismo es un fenómeno espectroscópico producido por la luz del Sol pasando por las gotillas de agua de la lluvia, cuando el Sol hace un cierto ángulo con el horizonte. Sin embargo, el espectro solar no es estrictamente un espectro continuo, pero los filamentos de las lámparas eléctricas y los hornos incandescentes sí dan espectros continuos.

Los vapores incandescentes, como los de las modernas lámparas fluorescentes, originan espectros en donde sólo están presentes colores seleccionados. Nuevamente, si la fuente es una rendija iluminada por esta luz, el espectro será un grupo de líneas discretas separadas por espacios oscuros; este espectro se llama de *líneas brillantes* y los elementos químicos presentan diferentes espectros de líneas brillantes, por lo que la identificación de sustancias químicas se vuelve posible con métodos espectroscópicos. Esto está de acuerdo con lo que se sabe sobre la estructura del átomo (Cap. XIII). Para un átomo dado, como el del hidrógeno y tomando en cuenta el modelo de Bohr de su estructura, al agregar energía, el electrón orbitando salta a una órbita exterior; cuando cae de una órbita exterior a una interior se libera energía en forma de radiación y de una frecuencia dada, de acuerdo con el principio cuántico,  $E = h\nu$  (donde  $E$  significa

energía,  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia característica). Si esta energía está en la frecuencia visible, se hace evidente por las líneas brillantes del espectro. En realidad, todas las líneas del espectro del hidrógeno se explican de este modo. Análogamente se explican los espectros característicos de líneas brillantes debidos a los vapores incandescentes de todos los elementos químicos; de esto resulta claro que no hay dos elementos químicos que tengan exactamente la misma configuración espectral. Además, debido al extenso estudio de la espectroscopia de los elementos, es por lo que actualmente mucho se conoce con relación a la estructura de la materia.

El tercer tipo de espectro en la clasificación es el espectro de *líneas oscuras* o de *absorción*. Este caso se produce cuando la luz de una fuente incandescente se hace pasar a través de un vapor caliente antes de llegar al espectroscopio. En estas condiciones, los colores que constituyen ordinariamente el espectro del vapor son absorbidos del espectro continuo producido por la fuente incandescente obteniéndose un espectro continuo cruzado por líneas oscuras.

**Líneas de Fraunhofer.** El espectro solar es un espectro de líneas oscuras, indicando que las porciones exteriores del Sol contienen elementos cuyas longitudes de onda características han sido absorbidas por el espectro continuo emitido por las porciones interiores y más calientes del Sol. Como estas líneas fueron observadas por el físico alemán Fraunhofer, llevan su nombre y las más conspicuas se indican con letras (Fig. 15.2); así: la línea D de Fraunhofer se refiere al doblete del sodio, o sea, al par de líneas muy próximas en la región amarilloranjada del espectro que se encuentra precisamente en la misma posición que la que ocupa el par semejante de líneas amarilloranjadas en

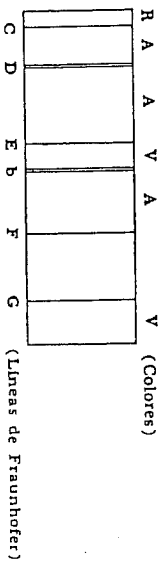


Fig. 15.2. Apariencia del espectro solar cruzado por las líneas de Fraunhofer. Los colores de este espectro están desigualmente espaciados cuando se obtienen por un prisma. La línea D se debe al sodio, la C al hidrógeno, etc.



el espectro de una lámpara de vapor del sodio. La llamada dispersión óptica de un espectroscopio se mide frecuentemente por el grado con que el instrumento puede separar las líneas de este doblete.

**Descubrimiento del helio.** Ciertas líneas del espectro solar que no fueron identificadas postularon la existencia de un nuevo elemento que fue llamado helio —el elemento del Sol— antes que su presencia en la Tierra fuera descubierta después de haber sido emprendida una cuidadosa investigación.

De este modo, el tema de la naturaleza y estructura de la luz fue promovido por el estudio de la espectroscopia. Es evidente que la llamada luz blanca, o simplemente luz de día, puede ser separada en sus colores constituyentes por el prisma del espectroscopio; pero, además, es posible recombinar los colores para reproducir la luz blanca. Por medio de simples procedimientos pueden llevarse a cabo estos experimentos con bastante facilidad en el salón de clases, como justamente lo demostró Newton hace unos trescientos años.

**Mezcla de colores.** La superposición o mezcla de colores es, en sí misma, un estudio interesante y proporciona al arte una base física. Se ha encontrado que sólo tres colores, llamados primarios, son necesarios para producir aproximadamente la luz blanca y que la combinación de estos tres colores reproduce prácticamente cualquier color. La impresión a colores (policromía) utiliza así los tres colores primarios. De modo menos aproximado, algunas parejas de colores producen una bastante buena reproducción de la luz blanca; estos pares de colores se llaman complementarios como, por ejemplo, el añil y el amarillo y el solferino y el verde.

**Suma y resta de colores.** Hay una importante distinción entre la suma de los colores y la suma de dos pigmentos, la que en realidad es resta de dos colores. Como ya se dijo, la luz amarilla y la luz añil al sumarse producen luz blanca; pero una pintura amarilla aplicada a una superficie añil produce una superficie verde. Como el color de la pintura amarilla resulta de que todos los colores menos el amarillo —probablemente orlado por una porción del verde— han sido absorbidos, y como el color de la pintura azul resulta de que todos los colores, excepto el azul —probablemente orlado por una porción del verde—, han sido absorbidos, el único color reflejado por la combinación es

el que es reflejado en común por cada uno de ellos, a saber, el verde. Por esta razón, la suma de un pigmento amarillo con un pigmento de color añil, consiste en la sustracción de todos los colores, excepto el verde.

La distinción entre suma y resta de colores puede demostrarse de otro modo. Si dos reflectores, uno con filtro amarillo y otro con un filtro añil, iluminan el mismo lugar de una pantalla blanca, la mancha de luz resultante será prácticamente blanca. Por otra parte, si se emplea un solo reflector provisto de dos filtros —el amarillo y el añil— la mancha resultante en la pantalla será verde. Esto se debe a que el filtro amarillo impide el paso de todos los colores menos el del amarillo y de una porción pequeña del verde; análogamente, el filtro azul evita el paso de todos los colores menos el añil y probablemente algo del verde debido a una filtración incompleta. Entonces, el único color que probablemente puede pasar a través de dos filtros es el verde. Por supuesto, un filtrado completo por los filtros producirá negro, o sea, la completa ausencia de colores. Entre paréntesis, haremos notar que ningún cuerpo tiene color en la oscuridad, puesto que el color es el resultado de la absorción selectiva de la luz. Así, una manzana roja aparece negra iluminada con luz estrictamente verde, porque en dicha luz no hay ninguna luz roja que pueda ser reflejada.

**Interferencia.** La superposición de la luz no abarca sólo el tema de la suma de colores, sino sugiere también otro fenómeno de considerable interés. Bajo circunstancias muy especiales, la luz, que aparentemente llega de dos fuentes diferentes, puede producir oscuridad, es decir, puede hacerse que dos haces de luz se nulifiquen entre sí. Tomás Young (1773-1829) observó que cuando la llama de una vela se coloca detrás de una doble rendija (dos rendijas paralelas muy juntas), la luz que sale de las dos rendijas forma un diagrama peculiar en una pantalla colocada frente a las rendijas. Este diagrama consiste en un grupo de bandas alternativamente brillantes y oscuras, orientadas paralelamente a las rendijas. Cuando se emplea la luz blanca de la vela, las bandas brillantes son coloreadas, pero cuando se emplea luz de un solo color —por ejemplo, la luz amarilla de una fuente de vapor de sodio— las bandas brillantes, o franjas como también se les llama, son todas de un color y separadas, por supuesto, por bandas oscuras (Fig. 15.3).

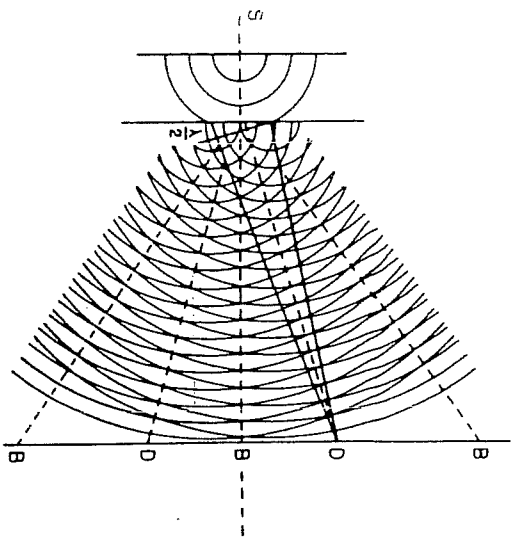


Fig. 15.3. Experimento de interferencia de Young

La explicación de este fenómeno involucra la teoría ondulatoria de la luz. Se sabe que las ondas en el agua son capaces de interferir cuando se superponen si una de ellas está defasada con respecto a la otra en media longitud de onda; de manera análoga, las ondas luminosas pueden interferir destructivamente bajo condiciones apropiadas. Las bandas oscuras D, D, etc. se presentan en aquellos lugares que distan de una rendija una distancia que excede a la distancia a la otra rendija, en un número entero de semilongitudes de onda. Por supuesto, las distancias entre las franjas son muy pequeñas, ya que la longitud de onda de la luz es muy pequeña, del orden de décimos de micra (una micra es un millonésimo de milímetro), y la separación de la rendija debe ser razonablemente pequeña por la misma razón. El fenómeno en conjunto se llama interferencia de la luz. Las bandas oscuras representan interferencia destructiva, y las brillantes, interferencia constructiva.

**Difracción.** Aunque el espectroscopio de prisma proporciona un medio de romper la luz en sus partes componentes —en particular de separar la luz blanca en colores por refracción—, existe otra manera de producir el mismo efecto; esta manera es la *difracción*, que es un fenómeno de desviación selectiva de

los rayos de luz —de acuerdo a su longitud de onda— cuando la luz pasa tocando los bordes de pantallas, siendo las ondas largas más desviadas que las cortas. Una gráticula, producida rayando varios millares de líneas por centímetro en una lámina transparente de vidrio con una punta de diamante, constituye un aparato por medio del cual la luz blanca puede ser resuelta en sus colores. Al pasar la luz por esta gráticula, parte de ella es desviada, siéndolo más la luz roja que la azul; en consecuencia, se producen espectros con una gráticula (Fig. 15.4). Este fenómeno es en realidad un fenómeno de interferencia y para su interpretación hay que suponer que la luz es un fenómeno ondulatorio. Si la luz fuera un fenómeno corpuscular no sería afectado por la gráticula. Como ya se ha hecho notar, la desviación de la luz es selectiva y de acuerdo con la longitud de onda.

**Espectroscopio de red o de gráticula.** Este tipo de espectroscopio convierte en algo muy sencillo la medición de longitud de onda de la luz. El cambio de dirección de las ondas al pasar por un borde es un fenómeno familiar a todos los que hayan observado el paso de las olas cerca de diques y muelles; lo que no es familiar es el que la desviación depende de la longitud de onda. Las muy cortas ondas luminosas (de .00004 a .00007 mm) son, por lo general, desviadas tan poco que se forman sombras definidas, y se dice entonces que la propagación de la luz es rectilínea, esto es, que la luz se propaga en línea recta. Sin embargo, bajo las extraordinarias condiciones de la gráticula la desviación selectiva es muy grande y se forma un espectro. Grabar una gráticula es muy caro, por lo que parecería que no es fácil demostrar el fenómeno de difracción; pero esto no sucede

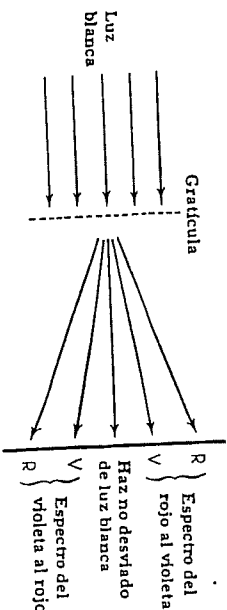


Fig. 15.4. Una gráticula, formada trazando varios miles de líneas en cada centímetro de una placa de vidrio, producirá espectros por difracción, como se indica en la figura

porque pueden construirse réplicas baratas de las graticulas rayadas a gran costo, muy fácilmente sobre colodión y que funcionan tan bien como las graticulas originales.

**Colores de las películas delgadas, debidas a la interferencia.** Otro interesante fenómeno son los colores que se observan en películas muy delgadas, como las de aceite en agua o como las que constituyen el nácar de las conchas de los ostiones. Estos son también fenómenos de interferencia que pueden producirse solamente cuando las películas son muy delgadas. La luz reflejada por una superficie interfiere con la luz reflejada por la otra, dependiendo el refuerzo o la nulificación del número de semilongitudes de onda comprendidas entre las dos superficies. De hecho, con frecuencia, el espesor de una película puede medirse por los fenómenos de color que producen. Esta es una manera de utilizar las ondas luminosas en las mediciones. Estos fenómenos interferométricos se emplean en mediciones de precisión actualmente de un refinamiento tal, que es posible medir con certidumbre hasta millonésimos de centímetro, haciendo así posible el intercambio de las diversas partes de un automóvil moderno, que debe estar ajustado con claros muy pequeños del orden de unos pocos milésimos de centímetro.

**Vidrio invisible.** Una aplicación nueva e interesante de las leyes de la interferometría es la construcción del vidrio invisible, lo cual se lleva a cabo recubriendo el vidrio con una película de algún material conveniente. El espesor de esta película es algo muy crítico, pues debe ser tal que la luz reflejada por una cara debe interferir destructivamente con la luz reflejada por la otra (no mayor que un cuarto de la longitud de onda de la luz), con lo cual se elimina el haz que normalmente sería reflejado por la superficie frontal del vidrio —lo que, por supuesto, lo hace invisible ya que la línea de separación entre el vidrio y los alrededores resulta eliminada—. Debe notarse que la superficie real de un espejo pulido es realmente invisible, ya que la reflexión es total más bien que selectiva. Las lentes de las cámaras fotográficas, recubiertas para hacer sus superficies invisibles, se ha encontrado que son muy efectivas para eliminar los reflejos en las fotografías. Análogamente, las ventanas de vidrio invisible enfrente de relojes y medidores eléctricos, por ejemplo, eliminan los reflejos, pudiéndose así observar cómodamente las carátulas de dichos instrumentos.

**Luz polarizada.** Como tema final que será considerado en este panorama descriptivo de la óptica, y en general de la física, volveremos a tratar la luz polarizada, un tema que ha obtenido gran popularidad recientemente por la fabricación del material polarizador empleado en algunos anteojos contra los rayos del Sol y en algunas películas tridimensionales. Los conceptos de interferencia y difracción establecieron definitivamente el aspecto ondulatorio de la luz, aunque debemos recordar que el aspecto corpuscular, derivado de la teoría cuántica, no debe ser ignorado. A pesar de todo, es evidente que para muchas explicaciones el aspecto ondulatorio de la luz se invoca más a menudo para explicar los fenómenos comunes, que el aspecto corpuscular. Teniendo esto en cuenta, la siguiente cuestión que debe ser resuelta es si las ondas luminosas son longitudinales, como las ondas sonoras, o transversales como las elásticas. Esto ha sido resuelto estudiando la polarización de la luz.

Cuando un rayo de luz pasa por un cristal de turmalina, o por un disco polarizador, la luz adquiere una condición muy especial, pues esta luz sólo puede pasar por un segundo cristal de turmalina (o un disco polarizador) si éste está orientado exactamente como el primero. Si el segundo disco polarizador, por ejemplo, se hace girar un ángulo de 90° con respecto al primero, la luz no puede pasar; este fenómeno se llama *polarización*. Entonces se dice que la luz ha sido "polarizada" por el primer disco, llamado el *polarizador*, pudiendo entonces ser determinado el ángulo de polarización por el segundo disco que recibe el nombre de *analizador*.

**Naturaleza de la luz polarizada.** Para comprender en qué consiste este fenómeno, es conveniente considerar una analogía. Si una cuerda horizontal fijada por un extremo se hace oscilar en un plano vertical subiendo y bajando el otro extremo de la cuerda, se establece una onda plana vertical; la situación no debe alterarse si la cuerda pasa a través de otra rendija vertical. Sin embargo, si esta rendija se hace girar hasta que quede horizontal, detendrá el movimiento ondulatorio que no podrá propagarse más allá de la segunda rendija (Fig. 15.5). Además, si se usan dos rendijas, con alguna distancia entre ellas, un movimiento lateral aleatorio comunicado al extremo libre de la cuerda, será restringido, por la primera rendija, a un movimiento paralelo a ella, y, excepto que la segunda rendija esté orientada

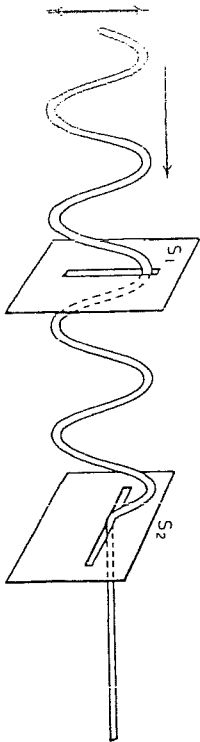


Fig. 15.5. Luz polarizada. Las vibraciones verticales de la cuerda que pasa por la rendija vertical  $S_1$ , serán detenidas por la rendija horizontal  $S_2$ . La onda representada está polarizada, es decir, sólo vibra en un plano; la luz puede ser polarizada con ciertas sustancias como, por ejemplo, la turmalina

en la misma dirección que la primera, la segunda rendija no dejará pasar al movimiento ondulatorio. Existe algo en el arreglo atómico o molecular de la turmalina que deja pasar sólo a las ondas luminosas que tengan un plano particular de vibración, justamente como las rendijas del ejemplo anterior restringen el movimiento de la cuerda. Cuando el modo de la vibración de la luz se restringe así, se dice que la luz es polarizada plana. Vemos nuevamente que la polaridad de la luz requiere que ésta sea un movimiento ondulatorio transversal, si es que es un movimiento ondulatorio, porque las ondas longitudinales no pueden ser polarizadas.

**Polarización por reflexión.** Además del fenómeno de polarización por transmisión que presenta la turmalina, la luz se polariza en gran extensión por reflexión solamente. En realidad, toda la luz reflejada está polarizada en parte, aun el brillo de una carretera de cemento en un día brillante. Por esta razón los anteojos polarizadores para sol reducen efectivamente los reflejos al eliminar la componente polarizada de la luz reflejada. La luz del cielo también está polarizada debido a la reflexión de las partículas que contiene el aire —vapor de agua, polvo, etc.—. Esta reflexión, o dispersión, es mucho más pronunciada para las ondas cortas luminosas que para las largas y, por tanto, la luz reflejada por el cielo es azul, por lo menos al medio día; el cielo es rojizo a la puesta del sol, lo que se debe a que entonces la luz es transmitida por la atmósfera y se ve roja debido a que el azul ha sido removido por dispersión. El cielo a medio día se

ve con luz reflejada, mientras que en el ocaso se ve con luz transmitida; tanto las componentes de la luz transmitida como esparcida están polarizadas.

**Fotoelasticidad.** Se ha encontrado que la luz polarizada es de valor considerable para el diseñador de maquinaria, debido a que muchos materiales, que son transparentes a la luz ordinaria, tienen una apariencia bastante diferente a la luz polarizada. Además, muchos materiales, generalmente transparentes, cuando están sometidos a esfuerzos se vuelven opacos a la luz polarizada. Por ejemplo, el vidrio o el celuloide exhiben configuraciones de interferencia regularmente coloreadas al ser vistos con luz polarizada cuando están sometidos a esfuerzos; molinos de celuloide de engranajes y otras partes de la maquinaria muestran así las regiones que están sometidas a esfuerzos cuando se ven funcionando bajo luz polarizada. Muchos industriales realizan estas pruebas fotoelásticas en nuevos diseños antes de producir partes de máquinas y productos manufacturados. En particular, en la industria de la aviación, cuyas estrictas tolerancias en peso son muy importantes, el análisis fotoelástico se emplea para evitar un sacrificio de la resistencia en aras del peso. De hecho, el tema de la luz polarizada es una rama de la física que ilustra bastante bien cómo la física ha sido puesta conscientemente a trabajar por los técnicos que no están conformes con lo que saben de ingeniería, sino que rápidamente adaptan a sus necesidades los desarrollos de los laboratorios científicos.

**Conclusión.** No es de extrañar, en esta edad científica, que los profanos estén interesados en los intrincados problemas de la física, aunque en algunos casos no puedan ahondar en las matemáticas correspondientes. Para esos estudiantes, y para la gente en general, que estén sinceramente interesados en un modesto tratamiento de la física a nivel descriptivo, se ha elaborado este texto. Este libro no puede, ni debe proporcionar el conocimiento necesario a aquellas personas que desearan utilizarlo de un modo profesional, pero el autor espera que se haya despertado el interés del lector y que haya desarrollado una apreciación de lo que es la física y de lo que no es. Esperamos también que haya adquirido un vocabulario técnico suficiente para que pueda leer con placer y conocimiento la literatura científica popular que va en aumento.

## CUESTIONARIO

1. Dibuje un esquema del paso de un rayo de luz por un prisma triangular.
2. ¿Qué clase de espectro se obtiene de la luz de la Luna? ¿Cuál de la luz de las estrellas?
3. Describa la apariencia de una tarjeta roja cuando se mueve a lo largo de un espectro continuo.
4. Explique por qué produce negro una mezcla de todos los pigmentos, mientras que la superposición de todos los colores produce blanco.
5. La luz roja ¿es más o menos difractada que la luz azul? ¿Cómo se compara esto con la refracción?
6. ¿Qué cosa quiere decir difracción?
7. ¿Qué es lo que quiere decir interferencia constructiva e interferencia destructiva de las ondas luminosas?
8. ¿Por qué el fenómeno de la polarización indica que la luz es un fenómeno ondulatorio transversal?
9. Al físico, una precisión de una millonésima de centímetro le sugiere métodos ópticos de medición. ¿Por qué?

## CUESTIONARIO DE REPASO

(Para respuestas véase Pág. 251)

## CAPÍTULOS XII, XIII, XIV Y XV

1. Las contracciones de las piernas de una rana llevarían al descubrimiento de la corriente eléctrica por: 1) Volta; 2) Ampère; 3) Coulomb; 4) Galvani; 5) Oersted. (✓)
2. La fricción del agua-en-el tubo es semejante a: 1) la corriente eléctrica; 2) la diferencia de potencial; 3) la carga electrostática; 4) la resistencia eléctrica; 5) la fuerza electromotriz. (✓)
3. La resistencia eléctrica en un circuito eléctrico des-  
empeña un papel similar, en un circuito de agua, al  
de: 1) una bomba; 2) un tubo; 3) una rueda hidráulica; 4) la fricción; 5) la presión manométrica. (✓)
4. Un kilowatt hora es equivalente a: 1) una lámpara de 10 watts encendida durante una hora; 2) una de 100 watts durante una hora; 3) una de 10 watts

- durante 10 horas; 4) una de 100 watts durante 10 horas; 5) una de 100 watts durante 100 horas. (✓)
5. La corriente eléctrica está determinada por: 1) la carga total que fluye entre dos puntos; 2) la distancia que fluye la carga; 3) el tiempo que tarda la carga en fluir; 4) la carga dividida entre el tiempo; 5) ninguna de las respuestas anteriores. (✓)
  6. El motor eléctrico depende para su funcionamiento: 1) del efecto de calentamiento; 2) del efecto fotoeléctrico; 3) de la emisión termoiónica; 4) de la fuerza lateral que recibe una corriente de un campo magnético; 5) del efecto químico. (✓)
  7. La potencia eléctrica se mide en: 1) amperes; 2) volts; 3) watts; 4) joules; 5) ohms. (✓)
  8. El electrón negativo fue descubierto por: 1) Franklin; 2) Newton; 3) Coulomb; 4) Thomson; 5) Galvani. (✓)
  9. El núcleo del átomo se piensa que está compuesto de: 1) neutrones y electrones; 2) protones y neutrones; 3) partículas alfa y electrones; 4) electrones y protones; 5) protones y partículas alfa. (✓)
  10. La emisión de electrones cuando incide la luz en una superficie metálica se llama: 1) emisión termoiónica; 2) efecto Edison; 3) rayos X; 4) efecto fotoeléctrico; 5) fisión. (✓)
  11. ¿Cuál de los siguientes términos es más descriptivo del fenómeno empleado en la bomba de hidrógeno?: 1) fisión; 2) fusión; 3) electrólisis; 4) interferencia; 5) inducción. (✓)
  12. Los rayos X son: 1) radiación electromagnética de muy corta longitud de onda; 2) radiación electromagnética de muy larga longitud de onda; 3) radiación verde; 4) electrones de alta velocidad; 5) electrones de baja velocidad. (✓)
  13. El efecto fotoeléctrico es la emisión de: 1) electrones de una superficie iluminada; 2) electrones en el gas de un tubo de descarga; 3) electrones de un cuerpo caliente; 4) electrones por una sustancia radiactiva; 5) partículas alfa por una sustancia radiactiva. (✓)

14. ¿Cuál de las siguientes radiaciones está formada por núcleos de helio? 1) rayos X; 2) rayos térmicos; 3) rayos gamma; 4) rayos beta; 5) rayos alfa ..... (5)
15. Roentgen es famoso por su trabajo con: 1) el tubo de descarga; 2) los rayos X; 3) el bulbo al vacío de dos elementos; 4) el bulbo al vacío de tres elementos; 5) la medida de la luz ..... (4)
16. Se piensa que la luz es un movimiento ondulatorio debido principalmente a: 1) el fenómeno de interferencia; 2) su enorme velocidad; 3) su acción sobre el ojo humano; 4) las teorías de Einstein; 5) su propagación en línea recta ..... (1)
17. La difracción es: 1) lo mismo que refracción; 2) lo mismo que fluorescencia; 3) gobernada por la ley de la reflexión; 4) la causa de los casos rojos; 5) la desviación de la luz alrededor de las aristas ..... (5)
18. El viejo conflicto entre las teorías ondulatorias y corpuscular de la luz ha sido resuelto por los físicos actuales: 1) en favor de la teoría ondulatoria; 2) en favor de la teoría corpuscular; 3) considerando que la luz no es ni ondulatoria ni corpuscular; 4) corpuscular para explicar la difracción y ondulatoria para explicar su enorme velocidad; 5) considerando la luz tanto semejante a una onda como semejante a un flujo de corpúsculos ..... (5)
19. La velocidad de la luz fue determinada con gran precisión por: 1) Newton; 2) Galileo; 3) Michelson; 4) Einstein; 5) Huygens ..... (4)
20. El espejo plano más corto en donde una persona puede verse de cuerpo entero: 1) tiene una altura igual a su estatura; 2) depende de su distancia al espejo; 3) tiene una altura igual a la mitad de su estatura; 4) tiene el doble de su estatura; 5) es indeterminado ..... (1)
21. La candela es una medida de: 1) el brillo de una fuente luminosa; 2) la intensidad de una fuente luminosa; 3) un ángulo sólido; 4) los reflejos; 5) la iluminación de una superficie ..... (5)
22. La iluminación que produce una fuente luminosa en una superficie varía: 1) en razón directa a la distancia entre ellas; 2) inversamente a la distancia entre ellas; 3) inversamente al cuadrado de la dis-

- tancia entre ellas; 4) directamente como el cuadrado de la distancia entre ellas; 5) independientemente de la distancia entre ellas ..... (1)
23. La luz converge al pasar por una lente doble convexa, principalmente por: 1) refracción; 2) difracción; 3) reflexión; 4) absorción selectiva; 5) interferencia ..... (4)
24. Cuando un rayo de luz incide en una superficie de vidrio, después de pasar por el aire, es: 1) desviada hacia la perpendicular a la superficie; 2) desviada alejándose de la perpendicular; 3) no desviada; 4) difractada; 5) "enfocada" ..... (1)
25. Un remo parcialmente sumergido en agua parece "quebrado", debido a: 1) la refracción; 2) la difracción; 3) la polarización; 4) la interferencia; 5) la absorción ..... (1)
26. El espectro del Sol: 1) es una banda de color casi continua, abarcando todo el tramo visible; 2) es un espectro de líneas brillantes; 3) es producido sólo por medio de un prisma; 4) puede ser producido sencillamente con un espejo cóncavo; 5) es muy parecido al espectro de la luz del arco de mercurio ..... (5)
27. Las imágenes reales difieren de las virtuales en que: 1) las imágenes reales siempre están invertidas; 2) las imágenes reales siempre son derechas; 3) las imágenes reales son a veces invertidas y a veces derechas; 4) las imágenes virtuales pueden proyectarse en una pantalla; 5) sólo las lentes convergentes pueden producir imágenes virtuales ..... (4)
28. La longitud de onda de la luz amarilla es aproximadamente de: 1) 0.6 mm; 2) 0.006 mm; 3) 0.0006 mm; 4) 0.06 mm; 5) 0.000006 mm ..... (1)
29. La luz amarilla y la luz azul añil, cuando se reúnen, producen: 1) verde; 2) amarillo; 3) rojo; 4) blanco; 5) negro ..... (1)
30. Una lente de vidrio doble convexa es: 1) un sistema divergente; 2) capaz de producir imágenes virtuales; 3) incapaz de producir imágenes reales; 4) siempre sin aberración cromática; 5) siempre sin aberración esférica ..... (5)
31. El ojo humano es: 1) esencialmente un espectroscopio capaz de analizar los colores componentes de

- una fuente luminosa; 2) esencialmente un radioreceptor "sintonizado" a una estrecha banda de las frecuencias electromagnéticas; 3) en ningún aspecto un receptor de radio; 4) absolutamente no afectado por la luz infrarroja; 5) esencialmente un microscopio compuesto
32. La miopía o vista corta se corrige por el uso de: 1) lentes cóncavas; 2) lentes convexas; 3) espejos cóncavos; 4) espejos convexos; 5) lentes estigmáticas.
33. Los más grandes telescopios del mundo tienen espejos debido a: 1) que se desean imágenes invertidas; 2) que son más baratos y prácticos que las lentes del mismo tamaño; 3) que captan más luz que las lentes del mismo tamaño; 4) que pueden construirse con mayor longitud focal; 5) que es posible obtener mayor aumento que con una lente del mismo tamaño
34. La luz polarizada: 1) fue descubierta por el uso del polaroide; 2) indica el aspecto corpuscular de la luz; 3) puede emplearse para detectar esfuerzos en materiales transparentes; 4) es azul; 5) no tiene valor comercial

Resultados de las preguntas de repaso; Págs. 173-77

- |        |         |         |         |         |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. (1) | 7. (1)  | 13. (1) | 19. (4) | 25. (1) | 31. (1) |
| 2. (1) | 8. (5)  | 14. (3) | 20. (5) | 26. (3) | 32. (2) |
| 3. (4) | 9. (2)  | 15. (3) | 21. (3) | 27. (3) | 33. (2) |
| 4. (1) | 10. (3) | 16. (3) | 22. (1) | 28. (1) | 34. (3) |
| 5. (2) | 11. (4) | 17. (4) | 23. (2) | 29. (4) | 35. (1) |
| 6. (5) | 12. (1) | 18. (3) | 24. (4) | 30. (3) | 36. (1) |
|        |         |         |         |         | 37. (1) |

Resultados de las preguntas de repaso; Págs. 120-123

- |        |        |         |         |         |         |
|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 1. (3) | 5. (1) | 10. (3) | 15. (2) | 20. (1) | 25. (2) |
| 2. (2) | 6. (5) | 11. (5) | 16. (5) | 21. (3) | 26. (5) |
| 3. (2) | 7. (3) | 12. (1) | 17. (1) | 22. (3) | 27. (2) |
| 4. (3) | 8. (2) | 13. (4) | 18. (2) | 23. (2) | 28. (5) |
|        | 9. (4) | 14. (1) | 19. (1) | 24. (3) |         |

Resultados de las preguntas de repaso; Págs. 174-177

- |        |         |         |         |         |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. (3) | 6. (3)  | 11. (1) | 16. (2) | 21. (5) | 26. (3) |
| 2. (1) | 7. (2)  | 12. (5) | 17. (2) | 22. (4) | 27. (4) |
| 3. (1) | 8. (4)  | 13. (3) | 18. (5) | 23. (3) | 28. (2) |
| 4. (2) | 9. (1)  | 14. (3) | 19. (4) | 24. (3) | 29. (2) |
| 5. (3) | 10. (2) | 15. (1) | 20. (1) | 25. (3) |         |

Resultados de las preguntas de repaso; Págs. 246-250

- |        |         |         |         |         |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. (4) | 7. (3)  | 13. (1) | 19. (3) | 25. (1) | 31. (2) |
| 2. (4) | 8. (4)  | 14. (5) | 20. (3) | 26. (1) | 32. (1) |
| 3. (4) | 9. (2)  | 15. (2) | 21. (5) | 27. (1) | 33. (2) |
| 4. (4) | 10. (4) | 16. (1) | 22. (3) | 28. (3) | 34. (3) |
| 5. (4) | 11. (2) | 17. (5) | 23. (1) | 29. (4) |         |
| 6. (4) | 12. (1) | 18. (5) | 24. (1) | 30. (2) |         |

## APENDICE

### CUESTIONARIO FINAL DE REPASO

1. El método científico: 1) se-basa en el razonamiento deductivo; 2) se basa en el razonamiento inductivo; 3) es ejemplificado por los escritos de Aristóteles; 4) siempre ha sido seguido en la física; 5) no toma en cuenta los hechos ..... ( )
2. Una hipótesis es: 1) lo mismo que teoría científica; 2) algo no permitido en física; 3) una cosa que nunca tiene éxito; 4) una etapa necesaria en el razonamiento inductivo; 5) algo que siempre tiene éxito ..... (4)
3. La fuerza es lo mismo que: 1) la masa; 2) un empuje; 3) la potencia; 4) el impulso; 5) la aceleración ..... ( )
4. La resultante de dos fuerzas de 10 N de la misma dirección y con sentidos opuestos es: 1) 20 N; 2) 10 N; 3) 14 N; 4) 5 N; 5) 5) ..... (4)
5. Siempre se necesita una fuerza para: 1) mantener a un cuerpo moviéndose uniformemente en una dirección fija; 2) cambiar la velocidad de un cuerpo; 3) justificar la velocidad de un cuerpo; 4) mantener a los cuerpos en reposo; 5) determinar la posición de un cuerpo ..... (2)
6. El desplazamiento es: 1) el cambio de posición; 2) la distancia recorrida; 3) la rapidez con que cambia la velocidad; 4) lo mismo que impulso; 5) sinónimo de magnitud ..... (4)
7. La velocidad puede cambiar: 1) sólo en magnitud; 2) en magnitud, en dirección o en ambas; 3) sólo en dirección; 4) sólo por la ley de Newton; 5) sólo horizontalmente ..... (4)
8. La aceleración de la gravedad vale: 1) cero; 2) 9.8 cm/seg; 3) 9.8 m/seg; 4) 9.8 cm/seg/seg; 5) 9.8 m/seg/seg ..... (5)



9. La aceleración es: 1) lo mismo que velocidad; 2) lo mismo que desplazamiento; 3) la rapidez con que cambia el desplazamiento; 4) la rapidez con que cambia la velocidad; 5) siempre cero ..... (4)
10. Un cuerpo que recorre un círculo con un valor constante de la velocidad: 1) tiene movimiento uniforme; 2) está acelerado; 3) no es afectado por la gravedad; 4) su desplazamiento es cero; 5) es ingravido ..... (4)
11. La Segunda Ley de Newton del Movimiento propone que: 1) la fuerza es la masa multiplicada por la aceleración; 2) el peso es una fuerza; 3) un cuerpo en reposo continúa en reposo, a menos que reciba una fuerza; 4) a toda acción le corresponde una reacción igual y opuesta; 5) todos los cuerpos son atraídos por el centro de la Tierra ..... (4)
12. El trabajo es: 1) la masa multiplicada por la aceleración; 2) la fuerza multiplicada por el desplazamiento cuando tienen la misma dirección; 3) la fuerza multiplicada por el desplazamiento cuando son perpendiculares entre sí; 4) la fuerza multiplicada por la velocidad; 5) la masa multiplicada por la velocidad ..... (4)
13. El trabajo dado cuando una fuerza de 10 newtons actúa horizontalmente sobre un cuerpo de 50 kg colocado sobre una superficie lisa horizontal, vale: 1) 10 joules; 2) 10 kg; 3) 500 joules; 4) 500 kg; 5) cero ..... (5)
14. La capacidad de suministrar un trabajo se llama: 1) ventaja mecánica; 2) energía; 3) potencia; 4) eficiencia; 5) ímpetu ..... (2)
15. La relación entre la fuerza suministrada por una máquina y la fuerza aplicada a ella se llama: 1) ventaja mecánica; 2) energía; 3) potencia; 4) eficiencia; 5) ímpetu ..... (4)
16. La máxima elongación en un movimiento vibratorio se llama: 1) frecuencia; 2) velocidad; 3) amplitud; 4) periodo; 5) inercia ..... (3)
17. El movimiento armónico simple: 1) tiene lugar en línea recta; 2) es giratorio; 3) es torsional; 4) es siempre audible; 5) siempre incluye nodos y vientres ..... (4)

18. El sonido es un fenómeno ondulatorio; 1) transversal; 2) circular; 3) longitudinal; 4) electromagnético; 5) elíptico ..... (4)
19. La velocidad de una onda es: 1) el producto de la frecuencia y la longitud de onda; 2) la relación entre la frecuencia y la longitud de onda; 3) la masa multiplicada por la aceleración; 4) la distancia de una cresta a la siguiente; 5) siempre de 300 000 km/seg ..... (4)
20. En un tubo abierto en sus dos extremos, las ondas sonoras: 1) presentan un nodo en cada extremo; 2) presentan un antinodo en el centro; 3) resuenan con la longitud de onda fundamental, cuatro veces mayor que la longitud del tubo; 4) tiene una onda fundamental cuya longitud es el doble de la del tubo; 5) nunca puede resonar ..... (4)
21. El número de armónicos de un sonido: 1) determina el tono; 2) determina el timbre; 3) gobierna la intensidad; 4) explica los fenómenos de las pulsaciones; 5) siempre es cero ..... (4)
22. Cuando un diapasón de 256 hertz vibra simultáneamente con uno de 260 hertz, el número de pulsaciones que se escucha es: 1) cero; 2) uno; 3) dos; 4) tres; 5) cuatro ..... (4)
23. Siempre que dos ondas de la misma frecuencia, velocidad y amplitud se sobreponen al moverse en sentidos opuestos: 1) siempre hay interferencia destructiva; 2) siempre hay interferencia constructiva; 3) se demuestra la refracción; 4) la diferencia de fase siempre vale cero; 5) se producen ondas estacionarias ..... (5)
24. Los átomos son: 1) esferas rígidas; 2) compuestos de moléculas; 3) estacionarios; 4) compuestos de electrones, protones y neutrones; 5) no existen ..... (4)
25. Si la presión de un gas aumenta tres veces a temperatura constante, el volumen: 1) aumentará tres veces; 2) disminuirá tres veces; 3) disminuirá nueve veces; 4) permanecerá constante; 5) disminuirá a cero ..... (2)
26. Si la temperatura de un gas aumenta, sus moléculas: 1) aumentan su velocidad; 2) disminuyen su

- velocidad; 3) no cambia su velocidad; 4) se vuelven más pequeñas; 5) se vuelven mayores. (1)
27. La temperatura Celsius que corresponde a  $-40^{\circ}$  Fahrenheit es: 1)  $0^{\circ}\text{C}$ ; 2)  $-22.2^{\circ}\text{C}$ ; 3)  $-72^{\circ}\text{C}$ ; 4)  $10^{\circ}\text{C}$ ; 5)  $-40^{\circ}\text{C}$ . ( )
28. La ley de Boyle tiene que ver con: 1) líquidos cuando su propio nivel; 2) la difusión de los gases a través de cuerpos porosos; 3) la ley de las proporciones múltiples; 4) los hemisferios de Magdeburgo; 5) la relación entre la presión y el volumen de un gas. (5)
29. El calor es: 1) un fluido; 2) energía; 3) potencia; 4) ímpetu; 5) lo mismo que temperatura. (2)
30. La presión puede medirse en: 1) kilogramos; 2) centímetros; 3) newtons por centímetros; 4) newtons por centímetro cuadrado; 5) newtons por centímetro cúbico. (4)
31. Cuando la presión atmosférica disminuye, la temperatura a la que hierve el agua: 1) se eleva; 2) vale siempre  $100^{\circ}\text{C}$ ; 3) disminuye; 4) permanece a  $50^{\circ}\text{C}$ ; 5) no se altera. (1)
32. La razón para aislar un refrigerador es: 1) evitar que salga radiación; 2) evitar que entre calor; 3) evitar que salga el frío; 4) fundir el hielo; 5) evitar que se funde el hielo. (2)
33. Cuando se frota con lana una barra de ebonita: 1) se genera electricidad; 2) las electricidades negativa y positiva se separan; 3) la lana queda negativamente cargada; 4) la barra queda positivamente cargada; 5) no sucede nada. (4)
34. El protón comparado con el electrón negativo tiene: 1) carga del mismo signo; 2) el mismo tamaño; 3) carga de signo opuesto; 4) el doble de carga; 5) 1/1 800 parte de la carga. ( )
35. Dos cargas eléctricas iguales: 1) se atraen entre sí; 2) se rechazan entre sí; 3) se neutralizan entre sí; 4) no ejercen efecto entre sí; 5) deben ser neutras. (2)
36. Cuando el vidrio se frota con seda: 1) se genera electricidad; 2) se carga positivamente el vidrio; 3) se carga negativamente el vidrio; 4) la seda se descar-

- ga; 5) la carga que adquiere la seda es el doble de la que adquiere el vidrio. (5)
37. Las hojuelas de un electroscope cargado, se separan entre sí porque: 1) cargas iguales se atraen; 2) están cargadas positivamente; 3) están cargadas negativamente; 4) cargas opuestas se atraen; 5) cargas iguales se rechazan. (4)
38. De la teoría electrónica se infiere que cuando una varilla de ebonita se frota con una franja: 1) los electrones negativos son tomados de la franja; 2) los electrones positivos se acumulan en la franja; 3) los protones se acumulan en la varilla; 4) los protones son sacados de la varilla; 5) la varilla se vuelve un buen conductor de la electricidad. (1)
39. La función de un capacitor o condensador es: 1) producir una chispa; 2) aumentar el potencial; 3) disminuir la carga; 4) aumentar la intensidad de la chispa a una presión eléctrica dada; 5) condensar una carga eléctrica en un pequeño volumen. (4)
40. En un conductor metálico sus dos extremos se mantienen a una diferencia de potencial constante; entonces: 1) se establece una corriente eléctrica; 2) los electrones fluyen de positivo a negativo; 3) los protones fluyen de más a menos; 4) se cargan pilas en el extremo negativo; 5) no se producen efectos magnéticos. (2)
41. La electrolisis generalmente se clasifica como un efecto: 1) magnético; 2) térmico; 3) químico; 4) acústico; 5) estático. (2)
42. En este lugar el extremo norte de la brújula apunta: 1) al este-del-norte; 2) al-norte; 3) al-este del norte; 4) hacia el polo norte magnético de la Tierra; 5) al sur. (3)
43. Una carga unitaria positiva en reposo y un polo magnético norte unitario: 1) se atraen entre sí; 2) se rechazan entre sí; 3) no ejercen fuerzas entre sí; 4) producen otros polos magnéticos; 5) producen otras cargas eléctricas. (3)
44. Cuando un electroscope se carga por inducción: 1) el signo de la carga inducida es igual al del cuerpo cargado; 2) el signo de la carga inducida

- es opuesto al del cuerpo cargado; 3) las cargas se transportan directamente del cuerpo cargado al electroscope; 4) la carga inducida es siempre positiva, puesto que las hojillas divergen; 5) el electroscopio cargado tiene el mismo número de electrones antes y después (1)
45. Cuando una corriente pasa por un alambre perpendicular a un campo magnético: 1) el alambre es atraído hacia el lado norte del campo; 2) el alambre es atraído hacia el lado sur del campo; 3) el alambre no es atraído; 4) el alambre siempre se imanta; 5) el alambre recibe una fuerza en ángulo recto al campo y a su propia dirección (2)
46. La inducción electromagnética fue descubierta por: 1) Maxwell; 2) Edison; 3) Einstein; 4) Oersted; 5) Faraday (5)
47. La diferencia de potencial eléctrico se mide con un: 1) voltímetro; 2) amperímetro; 3) vatímetro; 4) celda fotoeléctrica; 5) fusible (1)
48. Un tostador eléctrico depende para su funcionamiento del siguiente efecto de la corriente: 1) el térmico; 2) el magnético; 3) el químico; 4) el termoeléctrico; 5) el electrolítico (1)
49. El nombre asociado con los rayos catódicos es el de: 1) Joule; 2) Franklin; 3) Tales de Mileto; 4) Oersted; 5) J. J. Thomson (5)
50. Los siguientes son todos físicos modernos, excepto: 1) Michelson; 2) Compton; 3) Millikan; 4) Maxwell; 5) Heisenberg (4)
51. Los siguientes términos sugieren física moderna, excepto: 1) teoría cuántica; 2) relatividad; 3) positrón; 4) protón; 5) resistividad (5)
52. La luz se piensa que sea un movimiento ondulatorio principalmente por: 1) su enorme velocidad; 2) la posibilidad de que se polarice; 3) su propagación en línea recta; 4) su acción sobre las placas fotográficas; 5) la posibilidad de enfocarla con una lente... (2)
53. El fotómetro se emplea para medir: 1) iluminación; 2) reflejo; 3) brillo de una fuente luminosa; 4) intensidad luminosa; 5) distancia (1)

54. La desviación de la luz alrededor de las aristas se debe a la: 1) refracción; 2) reflexión; 3) polarización; 4) difracción; 5) absorción (1)
55. La iluminación de la parte de una mesa colocada directamente a dos metros abajo de una lámpara de 40 bujías es: 1) 10 luxes; 2) 100 luxes; 3) 20 luxes; 4) cero; 5) 80 luxes (1)
56. El espectro visible del Sol es: 1) una banda continua de colores desde el rojo al violeta; 2) una banda de color cruzada por líneas oscuras; 3) un espectro de líneas brillantes; 4) como el espectro visible de la luz del sodio; 5) una banda continua de color menos la luz verde (2)

*Resultados de las preguntas finales de repaso*

1. (2)	10. (2)	19. (1)	29. (2)	39. (4)	48. (1)
2. (4)	11. (1)	20. (4)	30. (4)	40. (1)	49. (5)
3. (2)	12. (2)	21. (2)	31. (3)	41. (3)	50. (4)
4. (5)	13. (5)	22. (5)	32. (2)	42. (3)	51. (5)
5. (2)	14. (2)	23. (5)	33. (2)	43. (3)	52. (2)
6. (1)	15. (1)	24. (4)	34. (3)	44. (2)	53. (1)
7. (2)	16. (3)	25. (2)	35. (2)	45. (5)	54. (4)
8. (6)	17. (1)	26. (1)	36. (2)	46. (5)	55. (1)
9. (4)	18. (3)	27. (5)	37. (5)	47. (1)	56. (2)
		28. (5)			

## INDICE

### — A —

- Absoluto(a):  
cero, 117, 130  
humedad, 135  
temperatura, 117, 130
- Absorción:  
del calor, 148  
espectro de, 237
- Aceleración, 53, 54
- Aceptor o aceptador, 213
- Acomodación, 232
- Adhesión, 117
- Agua pesada, 206
- Aire líquido, 138
- Aislamiento térmico, 143
- Alfa, partícula, 204
- Altitud, 90
- Ampere o amperio, 182, 185, 186
- Amperimetro, 191
- Amplitud:  
de una onda, 95  
de vibración, 81
- Analizador, 243
- Angulo:  
de declinación, 171  
de inclinación, 171
- Antón, 184
- Anodo, 184
- Antinodos o vientres, 99
- Antipartícula, 209
- Aparato de Kundt, 101
- Arco iris, 236
- Area, 14
- Armadura, 190
- Arquímedes, principio de, 88, 144
- Asígnatismo, 233
- Atmosférica, presión, 89
- Atómica(o):  
bomba, 211  
energía, 36, 205  
masa, 210  
núcleo, 208  
número, 210
- Atomo, 109, 111, 204, 206, 236
- Atracción, 18
- capilar, 118
- Avogadro:  
Ley de, 114  
número de, 114

### — B —

- Balanza:  
de cruz, 21, 49  
de resorte, 18
- Banda de energía, 213
- Barómetro, 89, 90
- Beta, partículas, 204
- Bimetalico, termostato, 131
- Bohr, teoría atómica de, 110, 206
- Bomba:  
atómica, 211  
de hidrógeno, 212
- Botella termos, 148
- Boyle, ley de, 114
- Brazo de palanca, 49
- Brillo, 219  
catódico, 197
- Browniano, movimiento, 112
- Brújula, 171
- BTU, 133
- Burbujas, cámara de, 209

## — C —

Caballo de vapor, 67  
 Caída libre, 53  
 Cálculo, 31-32  
 Calefacción de casas, 137  
 Calor, 125  
 de fusión, 137  
 de vaporización, 127, 133  
 específico, 133  
 transmisión del, 141  
 Caloría, 133  
 Calorimetría, 133  
 Cámara:  
 de burbujas, 209  
 de niebla, 209  
 fotográfica, 230  
 oscura, 219  
 Campo eléctrico, 159  
 intensidad del, 159, 161  
 Cándela, 219  
 Capacidad eléctrica, 163, 164  
 Capacitancia, 164  
 Capacitor, 165  
 Capilaridad, 118  
 Carga:  
 del electrón, 200, 201  
 eléctrica, 110, 155  
 Catión, 184  
 Catódico(s):  
 brillo, 197  
 rayos, 198  
 Catodo, 184  
 Celda fotoeléctrica, 203  
 Celsius, escala de, 128  
 Cenitigrada, escala, 123  
 Centímetro, 17  
 Centrifuga, fuerza, 57  
 Centripeta, fuerza, 57  
 Cero absoluto, 117, 130  
 C.G.S., unidades, 20  
 Charles, ley de, 114  
 Ciudadni, figuras de, 100  
 Colorón, 38, 184  
 Ciencia, 19  
 Cinemática, 41  
 Cinética, energía, 64

Cintilación o de centelleo, contador de, 209  
 Clima, 90, 144  
 Coeficiente:  
 de conductividad térmica, 64  
 de dilatación térmica, 129  
 de fricción, 71  
 Cohesión, 118  
 Color(es):  
 adición de, 238  
 de películas, 242  
 primarios, 238  
 sustracción de, 238  
 Componentes de una fuerza, 43  
 Compresión, 84, 95  
 Cóncavo, espejo, 225  
 Conceptos, 16  
 básicos, 12  
 Condensador, 165  
 Conducción:  
 de electricidad, 162  
 del calor, 142  
 Conductor, 213  
 Conservación de la energía, 66  
 Contador:  
 de cintilación, 209  
 Geiger Mueller, 209  
 Convección del calor, 143-145  
 Convergente, sistema óptico, 226, 227  
 Convexo, espejo, 225  
 Córnea, 233  
 Corriente eléctrica, 179  
 dirección de la, 184  
 efectos de la, 183  
 Cósmicos, rayos, 209  
 Coulomb, 159  
 ley de, 158, 170  
 Crítico, ángulo de incidencia, 223  
 Crookes, espejo oscuro de, 197  
 Cuanto, 150, 208  
 Cuña, 70

## — D —

Decaimiento radiactivo, 210  
 Declinación, ángulo de, 171  
 Deductivo, razonamiento, 12  
 Defectos del ojo, 232

Deformación, 84  
 unitaria o fraccional, 80  
 Densidad, 85, 86  
 Descarga en gases, 196  
 Desplazamiento, 50, 51  
 Deuterón, 206  
 Día solar medio, 19  
 Diagrama de rayos, 227, 228  
 Diamagnetismo, 173  
 Diferencia de potencial, 161, 162  
 Difracción, 240  
 Difusión, 119  
 Dilatación:  
 coeficiente de, 129  
 térmica, 127, 131  
 Dina centímetro, 64  
 Dinámica, 41  
 Dinamómetro, 18  
 Dirección:  
 de la corriente eléctrica, 184  
 de una fuerza, 41  
 Dispersión, 235  
 Dispositivo termonuclear, 212  
 Divergente, sistema óptico, 226  
 Donor o donador, 213  
 Doppler, principio de, 102  
 Duración, 19

— E —

Ebullición, 134, 135  
 temperatura de, 134  
 Edison, efecto, 201  
 Efecto:  
 Doppler, 102, 103  
 fotoeléctrico, 36, 201  
 magnético de la corriente, 186  
 químico de la corriente, 183  
 térmico de la corriente, 186  
 Eficiencia de una máquina, 68  
 Elasticidad, 79  
 Electricidad, 110, 155, 179  
 por fricción, 155  
 Eléctrico(a):  
 campo, 160  
 capacidad, 163  
 carga, 110, 157  
 conducción, 162  
 corriente, 179

descarga de gas, 196  
 inducción, 166  
 líneas de fuerza, 160,  
 rotor, 190  
 potencia, 186  
 potencial, 160  
 resistencia, 182  
 Electrolmán, 189  
 Electrólisis, 184  
 Electroólito, 184  
 Electromagnético(a):  
 espectro, 147  
 inducción, 191  
 Electromotriz, fuerza, 181  
 Electrón, 36, 111, 164, 198, 200  
 —volt, 205  
 Electrónica, 35, 195, 200, 203  
 Electrostática, 135  
 Elevador hidráulico, 91  
 Emisión termoiónica, 201  
 Empuje, 17, 41  
 Energía, 64, 126, 207  
 atómica, 35, 204  
 banda de, 213  
 cinética, 64  
 de enlace nuclear, 210  
 nivel de, 207  
 potencial, 64  
 radiante, 145  
 Enlace molecular, 212  
 Equilibrio de fuerzas, 47, 48  
 Equivalente mecánico del calor, 126  
 Erg, 64  
 Escarcha, 136  
 Esfuerzo, 80  
 Espacio oscuro de Faraday, 197  
 Espectro:  
 continuo, 236  
 de absorción, 237  
 de rayas o líneas brillantes, 236  
 de rayas o líneas oscuras, 237  
 electromagnético, 147  
 visible, 235  
 Espectroscopia, 147, 236  
 Espectroscopio de gratícula, 241  
 Espejos, 223, 225  
 Estatcoulombs, 159  
 Estrías, 197  
 Eter, 36

Evaporación, 135  
Experimentación, 13  
Explicación, 14

## — F —

Fahrenheit, escala de, 128  
Farad o Faradio, 165  
Fase, 83, 94, 240  
Ferromagnetismo, 173  
Figuras de Cklamni, 100  
Física del estado sólido, 213  
Fisión nuclear, 212  
Flotación, 87  
Fluido, 84  
  prestión, 86  
Fluorescencia, 198  
Foco, 225  
Fondón, 213  
Fotoelasticidad, 245  
Fotoeléctrica, celda, 203  
Fotometría, 219, 220  
Fotón, 213  
Franklin, inventor, 135  
Fraunhofer, líneas de, 237  
Frecuencia, 94  
  de vibración, 81

Frenos hidráulicos, 91  
Fricción, 70, 71  
  eléctrica, 110  
  eléctrica, 110  
  electromotriz, 181  
  lateral, 189  
  molecular, 117, 131  
  resultante, 42, 43  
  tangencial, 84  
Fusión:  
  calor de, 137  
  nuclear, 211

## — G —

Galvanómetro, 190, 191  
Gammira, rayos, 204

Gases, 85, 113, 116, 132  
  descarga en, 196  
  dilatación de, 129  
  ideales, 115, 132  
  ley general de los, 114, 132  
  presión de, 116  
Geiger-Mueller, contador de, 209  
Geissler, tubos de, 199  
Generador, 191  
Globo, 90  
Gramo, 18, 159  
Gráticula o red de difracción, 241  
Gravedad, 59, 65  
Gravitación, fuerza de, 17, 66

## — H —

Helio, 238  
Hielo seco, 137  
Higrómetro giratorio, 136  
Hooke, ley de, 80  
Humedad, 135-136  
  absoluta, 136  
  relativa, 135

## — I —

Incertidumbre, 208  
Inclinación, ángulo de, 171  
Ingeniería, 19  
Inglés, sistema de unidades, 16  
Ingravidéz, 17  
Intensidad del sonido, 104

## — K —

Kilogramo, 19  
Kilopondio, 18  
Kilowatt, 186  
  — hora, 186  
Kundt, aparato de, 101

## — L —

Laser, 214  
Lentes, 229  
Lenz, ley de, 192  
Ley(es):  
  científica, 13, 58  
  de Boyle, 114

de Coulomb, 158  
de gravitación de Newton, 59  
de Hooke, 80  
de Joule, 185  
de Lenz, 192  
de Ohm, 183  
de la iluminación, 220  
de la reflexión, 220  
de la refracción (de Snell), 221  
del movimiento de Newton, 54  
general de los gases, 114, 132  
Libra, 18  
Líneas de Fraunhofer, 237  
Líquido, aire, 138  
Longitud de onda, 12, 16, 94  
Lumen, 219  
Lupa, 230  
Luz, 227  
  infrarroja, 146  
  paralela, 227  
  polarizada, 243  
  rayos de, 218  
  ultravioleta, 146

## — M —

Magnético(a):  
  efecto de la corriente, 186  
  inducción, 172  
  intensidad del campo, 171  
  líneas de fuerza, 171, 172  
  permeabilidad, 173  
  polo, 170  
Magnetismo, 169  
  terrestre, 170  
Magnetita, 157, 169  
Máquinas, 67  
Masa, 12, 16, 17, 19  
  atómica, 210  
Materia, 109  
Mecánico(a):  
  cuántica, 208  
  equivalente, del calor, 126  
  ventaja, 67  
Medición y medida, 14, 15, 20, 21  
  instrumento de, 20  
  Medide, aparato de, 102  
Mercurio, 89  
  termómetro de, 127  
Mesones, 209  
Meteorología, 90, 144  
Método científico, 12, 13  
Métrico, sistema, 16  
Metro internacional, 16  
Michelson-Morley, experimento de,  
  37  
Microscopio simple, 230  
Mipia, 232, 233  
MKS, unidades, 20  
Moléculas:  
  enlace de, 212  
  fuerza entre, 117, 131  
Momento de la fuerza, 50  
Motor eléctrico, 190  
Movimiento, 17, 41, 50  
  armónico simple, 81, 85  
  browniano, 112, 113  
  de rotación, 49  
  de traslación, 49  
  leyes de Newton de, 54, 55  
Muón, 209

## — N —

Navegación a vela, 46  
Negativo(a):  
  brillo, 197  
  carga eléctrica, 110, 157  
Neutrón, 112, 209  
Newton, 18  
  ley de gravitación de, 59  
  leyes del movimiento de, 54, 55  
Nivel de energía, 208  
Nodos: 99  
Norte, polo magnético, 170  
Nuclear(es):  
  energía de enlace, 210  
  física, 35  
  fisión, 211  
  fusión, 211  
  reacciones, 209  
  transformaciones, 209  
Núcleo atómico, 208  
Número atómico, 211  
Números, sistema arábigo de, 30

## — O —

- Observación, 13  
Octava, 104  
Ohm, ley de, 183  
Ojo, 230  
defectos del, 232  
Olla de presión, 134  
Ondas(s), 93  
características de las, 94  
de radio, 146  
elásticas, 93  
estacionaria, 98  
frecuencia de la, 94, 95  
interferencia de la, 97-98  
longitud de la, 94  
longitudinal, 95  
movimiento de la, 94  
representación de, 95  
senoide, 96  
transversal, 146  
velocidad de la, 94  
Ondas, 93  
de radio, 147  
estacionarias, 98, 105  
sonoras, 95  
transversal, 146  
Óptica, 217  
física, 217  
geométrica, 217  
imagen, 224-230  
Ósmosis, 119
- P —  
Palanca, 69  
Paramagnetismo, 173  
Partícula:  
ant-, 209  
beta, 204  
extraña, 209  
Pascal, principio de, 90, 91  
Paso de rosca, 70  
Pauli, principio de exclusión de,  
212  
Películas:  
colores de las, 242  
sonoras, 202  
Péndulo simple, 83
- Periodo:  
de péndulo, 83  
de vibración, 81  
Permaloy, 172  
Permeabilidad magnética, 173  
Pesada, agua, 206  
Peso, 17, 18  
específico, 86  
Pie, 16  
Piedra imán, 156, 169  
Pión, 209  
Plutonio, 211  
Polarización por reflexión, 244  
Polarizador, 243  
Polo magnético, 170  
Posición, 50  
Positrón, 111, 208, 209  
Potencia, 66  
eléctrica, 186  
Potencial eléctrico, 160  
Presión:  
atmosférica, 89 k  
de vapor, 135  
gaseosa, 116  
olla de, 134  
osmótica, 119  
Principio:  
de Arquímedes, 88, 89, 144  
de Doppler, 212  
de exclusión de Pauli, 212  
de incertidumbre, 208  
Prisma, 236  
Protón, 110, 111, 207, 209  
Pulsaciones, 97, 98  
Punto:  
de congelación, 137  
de ebullición, 134  
de rocío, 136  
Punto(s):  
fijos del termómetro, 128  
focal, 225  
Pupila, 231
- R —  
Radar, 203  
Radiación del calor, 145, 203  
Radiactividad, 35, 36, 204  
Radio, 203

- Rapidez, 52  
Rarefracción, 95  
Rayos:  
alfa, 204  
beta, 204  
catódicos, 198  
cósmicos, 209  
diagrama de, 227, 228  
gama, 204  
luminosos, 218  
positivos, 205  
Reacciones nucleares, 209  
Red de difracción o gratícula, 241  
Reflexión, 98, 221, 244  
total, 224  
índice de, 222  
Refrigeración, 137  
Regla de la mano izquierda,  
189, 190  
Rehelo, 138  
Relatividad, 32, 152  
Reloj, 20  
Resistencia eléctrica, 182  
Resonancia, 82, 99  
Resorte, balanza de, 18  
Rocío, punto de, 136
- S —  
Segundo solar medio, 19  
Semiconductor, 213  
Semivida, 210  
Senoide, 96  
Sistemas de unidades, 20, 21  
Snell, ley de, 221  
Sobretonos, 97, 104  
Solar, día, 19  
Solenoides, 188  
Sólido, 84  
Sonido, 103  
características, 104  
velocidad, 104
- Sublimación, 137  
Submarino, 89  
Supersónico, sonido, 103
- T —  
Televisión, 35, 202  
Temperatura, 125  
absoluta, 130  
de ebullición, 135  
Tensión, 84  
superficial, 117, 118  
Teoría:  
cinética, 113  
cuántica, 150  
Térmica, dilatación, 127  
Termometría, 125, 127  
Termómetro de mercurio, 89  
Termos, botella, 149  
Termostato bimetalico, 131  
Tiempo, 12, 15, 20  
Tumbre (de un sonido), 104, 105  
Turón, 41  
Tono de un sonido, 104  
Torca o torque, 50, 190  
Tornillo, 70  
Trabajo, 63  
Transformaciones nucleares, 209  
Transmisión:  
del calor, 141  
selectiva, 149  
Tubos de Geissler, 199  
Tubos de órgano:  
abiertos, 105  
cerrados, 105
- U —  
Ultravioleta, 146  
Umbral de audición, 104  
Unidad, 16, 18, 19  
de carga eléctrica, 158, 159  
de polo magnético, 170  
término británica, 133

- Uranio, 211  
 fusión, 211  
 isótopo, 211  
 — V —  
 Veriores, 41, 43  
 Velocidad, 51, 52  
   de la onda, 94  
   del sonido, 103  
   instantánea, 52  
   media, 52  
 Ventaja mecánica, 67  
 Venuser, 21  
 Vibración, 81  
 Vidrio de aumento, 230  
   invisible, 242  
 Vientos o aninodos, 99  
 Virtual imagen, 225
- Vista:  
   corta, 232, 233  
   larga, 233  
 Volt, 161  
 Voltaje, 161  
 Voltmetro, 191  
 — W —  
 Watts, 186  
 Wilson, cámara de, 209  
 Física sin matemáticas  
   — X —  
 X, rayos, 35, 146, 199  
   — Y —  
 Yarda, 17  
 Young, experimento de, 240