# CAPÍTULO 1

# MEDICIONES

*A pesar de la belleza matemática de algunas de sus más complejas y abstractas teorías, incluyendo las de las partículas elementales y de la relatividad general, la física es sobre todo una ciencia experimental. Es, por tanto, crucial que quienes realizan mediciones precisas se pongan de acuerdo acerca de patrones mediante los cuales puedan expresarse los resultados de esas mediciones, de modo que puedan ser comunicadas de un laboratorio a otro y verificadas.*

*En este capítulo comenzaremos nuestro estudio de la física con la introducción de algunas de las unidades básicas de las cantidades físicas y de los patrones que han sido aceptados para su medición.*

*Tomamos en cuenta la manera adecuada de expresar los resultados de cálculos y mediciones, incluyendo las dimensiones apropiadas y el número de cifras significativas. Discutimos e ilustramos la importancia de poner atención a las dimensiones de las cantidades que aparecen en nuestras ecuaciones. Más adelante en el texto, se presentarán otras unidades básicas y muchas unidades derivadas según fuera necesario.*

## 1-1 LAS CANTIDADES FÍSICAS, PATRONES Y UNIDADES

El material fundamental que constituye la física lo forman las cantidades físicas, en función de las cuales se expresan las leyes de esta ciencia. Entre éstas están longitud, masa, tiempo, fuerza, velocidad, densidad, resistividad, temperatura, intensidad luminosa, intensidad del campo magnético, y muchas más. Muchas de estas palabras, tales como longitud y fuerza, son parte de nuestro vocabulario cotidiano. Por ejemplo, podría decirse: "Recorrería cualquier *distancia* (longitud) para ayudarte mientras no emplees la *fuerza* para obligarme a hacerlo." Sin embargo, en física no debemos engañarnos con los significados cotidianos de estas palabras. Las definiciones científicas precisas de longitud y de fuerza no tienen conexión alguna con los usos de estas palabras en la frase entre comillas.

Podemos definir una cantidad algebraica, por ejemplo, $L$ para la longitud, o cualquier otra que elijamos, y podemos suponer que es exactamente conocida. Sin embargo, cuando tratamos de asignar una unidad a un valor particular de esa cantidad, encontramos dificultades para establecer un *patrón*, de manera que quienes tienen la necesidad de comparar una longitud con otra, concuerden en las unidades de medición. Antiguamente, la medida inglesa de longitud era la yarda, determinada por el tamaño de la cintura del rey. Podemos fácilmente deducir cuáles serán los problemas de un patrón así: por un lado, es difícilmente *accesible* a quienes necesitan calibrar sus propios patrones secundarios y, por otro, no es *invariable* al cambio con el paso del tiempo.

Por fortuna, no es necesario definir y concordar sobre patrones para cada cantidad física. Ciertas cantidades elementales pueden ser más fáciles de establecer como patrones, y las cantidades más complejas pueden a menudo ser expresadas en función de las unidades elementales. *Longitud* y *tiempo*, por ejemplo, estuvieron durante muchos años entre las cantidades físicas más precisamente mensurables y fueron generalmente aceptadas como patrones. Por lo contrario, la *velocidad* fue menos sujeto de medición precisa y, por lo tanto tratada como una unidad derivada (velocidad = longitud/tiempo). Sin embargo, hoy día las mediciones de la velocidad de la luz han llegado a una precisión más allá del patrón anterior de longitud; todavía tratamos la longitud como una unidad fundamental, pero el patrón para su medición se deriva ahora de los patrones de velocidad y de tiempo.

El problema básico es, por lo tanto, elegir el número más pequeño posible de cantidades físicas como fundamentales y estar de acuerdo con los patrones para su medición. Estos patrones deben ser tanto accesibles como invariables, lo cual puede ser difícil de satisfacer de manera simultánea. Si el kilogramo patrón, por ejemplo, ha de ser un objeto invariable, debe ser *inaccesible* y mantenerse aislado más allá de los efectos del uso y de la corrosión.

Los acuerdos respecto a los patrones han sido logrados luego de una serie de reuniones internacionales de la Conferencia General de Pesos y Medidas que se inició en 1889; la 19a. reunión tuvo lugar en 1991. Una vez que un patrón ha sido aceptado, tal es el *segundo* como una unidad de *tiempo*, entonces puede aplicarse la unidad a una amplia gama de mediciones, desde la duración de vida del protón (mayor de $10^{40}$ segundos) hasta la duración de vida de las partículas menos estables que puedan ser producidas en nuestros laboratorios (alrededor de $10^{-23}$ segundos). Cuando expresamos un valor tal como $10^{40}$ en unidades de segundos, significa que la razón entre la duración de vida del protón y el intervalo de tiempo que se definió arbitrariamente como el patrón segundo es de $10^{40}$. Para lograr tal medición, debemos tener una manera de comparar los instrumentos de medición del laboratorio con el patrón. Muchas de estas comparaciones son indirectas, ya que ningún instrumento de medición es capaz de operar con precisión sobre 40 órdenes de magnitud. Sin embargo, es esencial al progreso de la ciencia que, cuando un investigador registra un intervalo de tiempo en particular con un instrumento de laboratorio, la lectura pueda de algún modo ser relacionada con una calibración basada en el patrón segundo.

La búsqueda de patrones más precisos o accesibles es en sí un empeño científico importante, donde intervienen físicos y otros investigadores en los laboratorios de todo el mundo. En Estados Unidos, los laboratorios del Instituto Nacional de Patrones y Tecnología (NIST), anteriormente la Oficina Nacional de Patrones (NBS) están dedicados a mantener, desarrollar, y probar patrones para investigadores de básicos así como para científicos e ingenieros en la industria. Las mejoras en los patrones en años recientes han sido extraordinarias: desde la primera edición de este texto (1960), la precisión del patrón segundo ha mejorado en un factor superior a 1000.

**TABLA 1 UNIDADES BÁSICAS DEL SI**

| *Cantidad* | *Unidad SI* — *Nombre* | *Símbolo* |
|---|---|---|
| Tiempo | segundo | s |
| Longitud | metro | m |
| Masa | kilogramo | kg |
| Cantidad de sustancia | mol | mol |
| Temperatura termodinámica | kelvin | K |
| Corriente eléctrica | ampere | A |
| Intensidad lumínica | candela | cd |

## 1-2 EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES*

La Conferencia General de Pesas y Medidas, en las reuniones sostenidas durante el periodo 1954-1971, seleccionó como unidades básicas las siete cantidades mostradas en la tabla 1. Éstas son la base del Sistema Internacional de Unidades, abreviado SI, del francés *Système International d'Unités*.

A lo largo de este libro damos muchos ejemplos de unidades derivadas del SI, tales como velocidad, fuerza y resistencia eléctrica, que se desprenden de la tabla 1. Por ejemplo, la unidad SI de fuerza, llamada *newton* (abreviatura N), se define en función de las unidades básicas del SI así:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$$

tal como lo explicaremos con detalle en el capítulo 5.

Si expresamos propiedades físicas, como la producción de una central de energía o el intervalo de tiempo entre dos eventos nucleares en unidades SI, a menudo encontraremos números muy grandes o muy pequeños. Por conveniencia, la Conferencia General de Pesas y Medidas, en las reuniones sostenidas durante el periodo 1960-1975, recomendó los prefijos mostrados en la tabla 2. Así, podemos escribir la producción de una planta de energía eléctrica típica, $1.3 \times 10^9$ watt, como 1.3 gigawatt o 1.3 GW. De igual forma, podemos escribir un intervalo de tiempo de la dimensión encontrada a menudo en física nuclear, $2.35 \times 10^{-9}$ segundos, como 2.35 nanosegundos o 2.35 ns. Los prefijos de factores mayores a la unidad se expresan en términos que provienen del griego, y los de factores menores a la unidad se expresan con términos de origen latino (excepto femto y atto, que provienen del danés).

Para reforzar la tabla 1 necesitamos siete juegos de procedimientos operacionales que nos digan cómo producir las siete unidades SI básicas en el laboratorio. Exploramos las de tiempo, longitud y masa en las tres secciones siguientes.

Otros dos sistemas principales de unidades compiten con el Sistema Internacional (SI). Uno es el sistema gaus-

* Véase "SI: The International System of Units," por Robert A. Nelson (American Association of Physics Teachers, 1981). La guía "oficial" de Estados Unidos para el sistema SI puede encontrarla en la Special Publication 330, de la National Bureau of Standards (edición 1986).

En México se dispone también de información similar en la norma oficial mexicana NOM-Z-1981, Sistema Internacional de Unidades (SI), editada por la Dirección General de Normas, de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI). *(N. del T.)*





**TABLA 2 PREFIJOS DEL SI†**

| *Factor* | *Prefijo* | *Símbolo* | *Factor* | *Prefijo* | *Símbolo* |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{18}$ | exa- | E | $10^{-1}$ | deci- | d |
| $10^{15}$ | peta- | P | $10^{-2}$ | **centi-** | c |
| $10^{12}$ | tera- | T | $10^{-3}$ | **mili-** | m |
| $10^{9}$ | **giga-** | G | $10^{-6}$ | **micro-** | $\mu$ |
| $10^{6}$ | **mega-** | M | $10^{-9}$ | **nano-** | n |
| $10^{3}$ | **kilo-** | k | $10^{-12}$ | **pico-** | p |
| $10^{2}$ | hecto- | h | $10^{-15}$ | femto- | f |
| $10^{1}$ | deca- | da | $10^{-18}$ | atto- | a |

† Los prefijos utilizados en este libro se señalan en bold o negritas.

siano, con el que se expresa mucha de la literatura de física; en este libro no usamos este sistema. El apéndice G da los factores de conversión a unidades SI.

El segundo es el sistema británico (todavía en uso diario en Estados Unidos), del cual las unidades básicas de la mecánica son longitud (pie), fuerza (libra), y tiempo (segundo). De nuevo el apéndice G proporciona los factores de conversión a unidades SI. En este libro usamos unidades SI, pero a veces damos los equivalentes británicos. Solamente en tres países [Myanmar (Birmania), Liberia y Estados Unidos] se usa otro sistema diferente al SI como el patrón nacional de medición aceptado.

**Problema muestra 1** Cualquier cantidad física puede ser multiplicada por 1 sin cambiar su valor. Por ejemplo, 1 min = 60 s, de modo que 1 = 60 s/1 min; similarmente, 1 ft = 12 in, de modo que 1 = 1 ft/12 in. Usando los factores de conversión apropiados, halle (*a*) la velocidad en metros por segundo equivalente a 55 millas por hora, y (*b*) el volumen en centímetros cúbicos de un tanque que contiene 16 galones de gasolina.

**Solución.** (*a*) Para nuestros factores de conversión, necesitamos (véase apéndice G) 1 mi = 1609 m (de modo que 1 = 1609 m/1 mi) y 1 h = 3600 s (de modo que 1 = 1 h/3600 s). Entonces

$$\text{velocidad} = 55\,\frac{\cancel{\text{mi}}}{\cancel{\text{h}}} \times \frac{1609\text{ m}}{1\,\cancel{\text{mi}}} \times \frac{1\,\cancel{\text{h}}}{3600\text{ s}} = 25\text{ m/s}.$$

(*b*) Un galón fluido es igual a 231 pulgadas cúbicas, y 1 in. = 2.54 cm. Entonces

$$\text{volumen} = 16\,\cancel{\text{gal}} \times \frac{231\,\cancel{\text{in.}}^3}{1\,\cancel{\text{gal}}} \times \left(\frac{2.54\text{ cm}}{1\,\cancel{\text{in.}}}\right)^3 = 6.1 \times 10^4\text{ cm}^3.$$

Nótese en estos dos cálculos cómo se insertan los factores de conversión de unidades, de modo que las unidades no deseadas aparezcan en el numerador y en el denominador y, por lo tanto, se cancelen.

## 1-3 EL PATRÓN DE TIEMPO*

La medición del tiempo tiene dos aspectos. Para propósitos cotidianos y para algunos de carácter científico, necesitamos saber la hora del día, de modo que podamos ordenar sucesivamente los acontecimientos. En la mayoría de los trabajos científicos precisamos saber cuánto dura un suceso (el intervalo de tiempo). Así pues, cualquier patrón de tiempo debe ser capaz de responder a las preguntas, "¿a qué hora ocurre?" y "¿cuánto dura?" La tabla 3 muestra el amplio margen de intervalos de tiempo que pueden medirse. Éstos varían por un factor de alrededor de $10^{63}$.

**TABLA 3 ALGUNOS INTERVALOS DE TIEMPO MEDIDOS†**

| *Intervalo de tiempo* | *Segundos* |
|---|---|
| Duración de vida de un protón | $> 10^{40}$ |
| Periodo de semidesintegración doble beta del $^{82}$Se | $3 \times 10^{27}$ |
| Edad del universo | $5 \times 10^{17}$ |
| Edad de la pirámide de Keops | $1 \times 10^{11}$ |
| Vida media del ser humano (Estados Unidos) | $2 \times 10^{9}$ |
| Periodo de la órbita terrestre alrededor del Sol (1 año) | $3 \times 10^{7}$ |
| Periodo de rotación terrestre alrededor de su eje (1 día) | $9 \times 10^{4}$ |
| Periodo de la órbita de un satélite típico en órbita baja | $5 \times 10^{3}$ |
| Tiempo entre latidos normales del corazón | $8 \times 10^{-1}$ |
| Periodo del diapasón de concierto (en "la") | $2 \times 10^{-3}$ |
| Periodo de oscilación de microondas de 3 cm | $1 \times 10^{-10}$ |
| Periodo típico de rotación de una molécula | $1 \times 10^{-12}$ |
| Pulsación de luz más corta producida (1990) | $6 \times 10^{-15}$ |
| Duración de vida de las partículas menos estables | $< 10^{-23}$ |

† Valores aproximados

* Para una historia de la medición del tiempo, véase *Revolution in Time: Clocks and the Making of the Modern World*, por David S. Landes (Harvard University Press, 1983). Los desarrollos recientes en la cronomedición precisa se discuten en "Precise Measurement of Time," por Norman F. Ramsey, *American Scientist*, Enero-Febrero de 1988, pág. 42. Un listado de los diferentes sistemas para reportar el tiempo puede hallarse en "Time and the Amateur Astronomer," por Alan M. MacRobert, *Sky and Telescope*, Abril 1989, pág. 378.

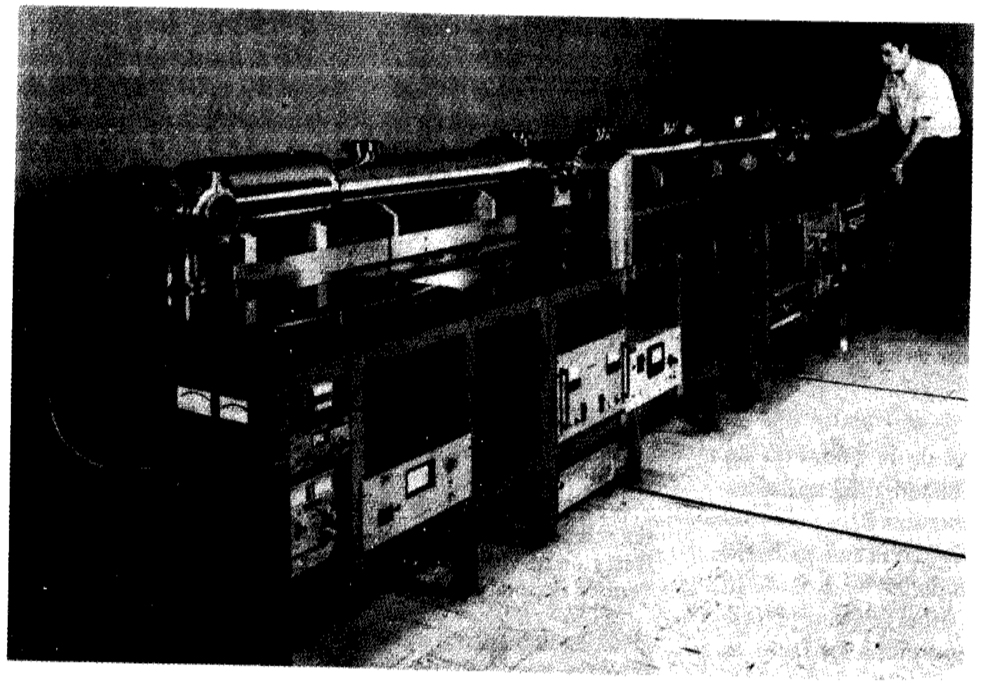

**Figura 1** Patrón de frecuencia atómica de cesio Núm. NBS-6 del National Institute of Standards and Technology, en Boulder, Colorado. Éste es el patrón primario para la unidad de tiempo en Estados Unidos. Marque el teléfono (303)499-7111 para calibrar su reloj contra el patrón. Marque el (900)410-8463 para las señales de tiempo del Observatorio Naval de ese país.

Cualquier fenómeno que se repita a sí mismo puede utilizarse como una medición del tiempo. La medición se realiza contando dichas repeticiones e incluyendo las fracciones de ellas. Podríamos usar un péndulo que oscila, un sistema masa-resorte, o un cristal de cuarzo, por ejemplo. De los muchos fenómenos repetitivos en la naturaleza la rotación de la Tierra sobre su eje, que determina la longitud del día, fue usada durante siglos como un patrón de tiempo. Un segundo (solar medio) se define como 1/86,400 de un día (solar medio).

Los relojes de cristal de cuarzo basados en las vibraciones periódicas de un cristal de cuarzo sostenidas eléctricamente sirven bien como patrones de tiempo secundarios. Un reloj de cuarzo puede ser calibrado contra la Tierra en rotación por medio de observaciones astronómicas y usado para medir el tiempo en el laboratorio. El mejor de éstos ha mantenido el tiempo por un año con un error acumulado máximo de 5 $\mu s$, pero aun esta precisión no es suficiente en la ciencia y la tecnología modernas.

Para cumplir la necesidad de un patrón de tiempo mejor, se han desarrollado relojes atómicos en varios países. La figura 1 muestra un reloj así, basado en una frecuencia característica de la radiación de las microondas emitidas por átomos del elemento cesio. Este reloj, guardado en el Nationai Institute of Standards and Technology, en Estados Unidos, constituye en ese país la base para el Tiempo Universal Coordinado (Coordinated Universal Time, UTC), por el cual se obtienen señales de tiempo en radios de onda corta (estaciones WWV y WWVH) y en el teléfono.

La figura 2 muestra, por comparación con un reloj de cesio, las variaciones en la tasa de rotación de la Tierra en

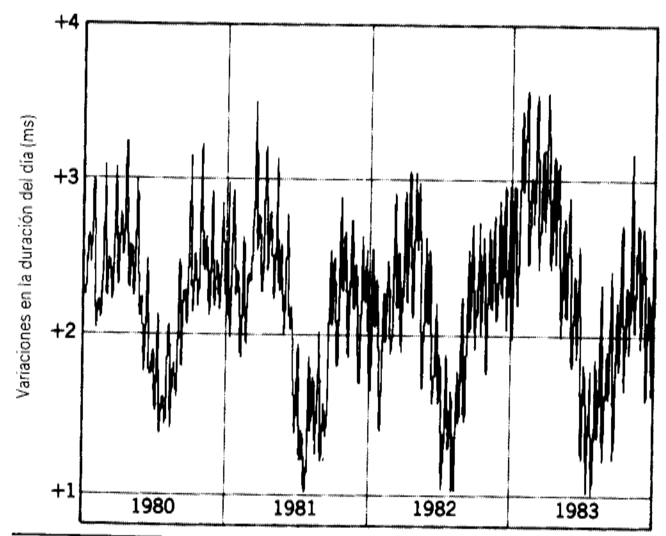


**Figura 2** La variación en la longitud del día en un periodo de 4 años. Nótese que la escala vertical es de sólo 3 ms = 0.003 s. Véase "The Earth's Rotation Rate," por John Wahr, *American Scientist*, Enero-Febrero 1985, p. 41.

un periodo de 4 años. Estos datos muestran lo pobre del patrón de tiempo que proporciona la rotación de la Tierra para un trabajo preciso. Las variaciones que vemos en la figura 2 pueden ser atribuidas a los efectos en las mareas causados por la Luna y a las variaciones estacionales en los vientos atmosféricos.

El segundo basado en el reloj de cesio fue adoptado como un patrón internacional por la 13a. Conferencia General de Pesas y Medidas de 1967, donde se dio la siguiente definición:



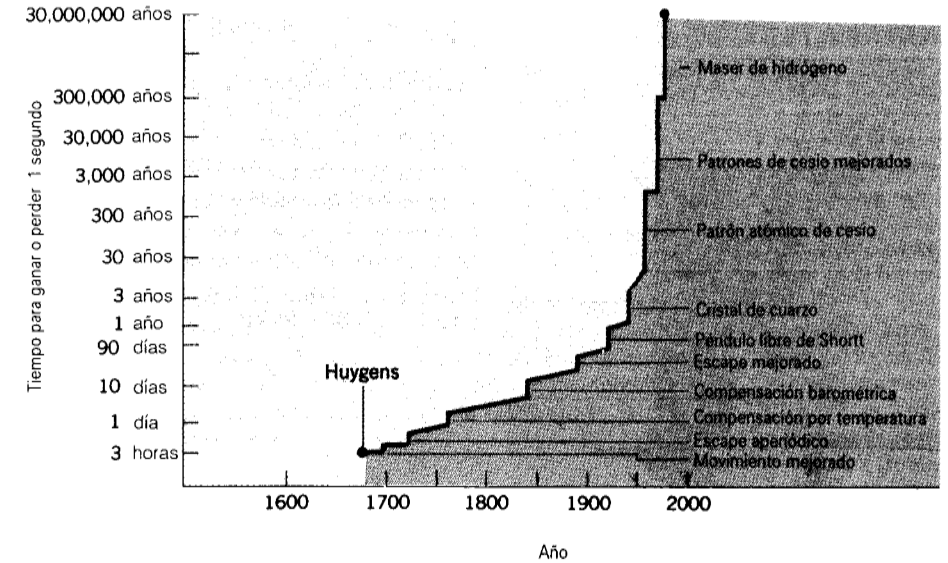


**Figura 3** La mejora en cronometría a lo largo de los siglos. Los antiguos relojes de péndulo ganaron o perdieron un segundo cada unas cuantas horas; los relojes de maser de hidrógeno actuales lo harían sólo después de 30 millones de años.

*Un segundo es el tiempo ocupado por 9,192,631,770 vibraciones de la radiación (de una longitud de onda específica) emitida por un átomo de cesio.*

Dos relojes de cesio modernos podrían marchar durante 300,000 años antes de que sus lecturas difieran en más de 1 s. Se han obtenido relojes de maser* de hidrógeno con la increíble precisión de 1 s en 30 millones de años. Los relojes basados en un simple átomo atrapado pueden ser capaces de mejorar esta precisión en tanto como 3 órdenes de magnitud. La figura 3 muestra el impresionante registro de mejoras en la cronometría que han ocurrido en los pasados 300 años, comenzando con el reloj de péndulo, inventado por Christian Huygens en 1656, y terminando con el maser de hidrógeno de hoy día.

## 1-4 EL PATRÓN DE LONGITUD‡

El primer patrón internacional de longitud fue una barra de una aleación de platino e iridio que se llamó el metro patrón, el cual fue guardado en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas cerca de París. La distancia entre dos líneas finas grabadas cerca de los extremos de la barra, cuando ésta se mantenía a una temperatura de 0°C y soportada mecánicamente de una manera prescrita, fue definida como el metro. Históricamente, el metro se tomó como una diezmillonésima parte de la distancia entre el polo norte y el ecuador a lo largo de la línea del meridiano que pasa por París. Sin embargo, las mediciones más precisas demostraron que la barra del metro patrón difiere ligeramente (alrededor del 0.023%) del valor deseado.

A causa de que el metro patrón no es muy accesible, se hicieron copias maestras precisas de él y enviadas a los laboratorios de estandarización alrededor del mundo. Estos patrones secundarios fueron usados para calibrar otros patrones, aún más accesibles. Entonces, hasta hace poco, cada varilla o dispositivo de medición derivó su autoridad del metro patrón a través de una complicada cadena de comparaciones usando microscopios y máquinas divisoras. Desde 1959, ello sirvió también para la yarda, cuya definición legal en Estados Unidos adoptada en aquel año es como sigue:

$$1 \text{ yarda} = 0.9144 \text{ metros (exactamente)}$$

que es equivalente a

$$1 \text{ pulgada} = 2.54 \text{ centímetros (exactamente).}$$

La precisión con la cual pueden hacerse las intercomparaciones necesarias de la longitud por la técnica de comparar rayas finas usando un microscopio ya no es satisfactoria para la ciencia y la tecnología modernas. Un patrón de longitud más preciso y reproducible fue obtenido cuando el físico estadounidense Albert A. Michelson comparó en 1893 la longitud del metro patrón con la longitud de onda de la luz roja emitida por los átomos de cadmio. Michelson midió cuidadosamente la longitud de la barra metro y encontró que el metro patrón era igual a 1,553,163.5 de aquellas longitudes de onda. Lámparas de cadmio idénticas podían ser obtenidas fácilmente en cualquier laboratorio, y así Michelson encontró una manera de tener un patrón de longitud preciso en todo el mundo, para fines científicos, sin atenerse a la barra del metro patrón.

* (N. del T.) El maser es un dispositivo de amplificación del sonido que usa un cristal de cianuro de potasio-cobalto para captar ondas de radio emitidas por objetos celestiales remotos.

‡ Véase "The New Definition of the Meter", por P. Giacomo, *American Journal of Physics*, Julio 1984, p. 607.

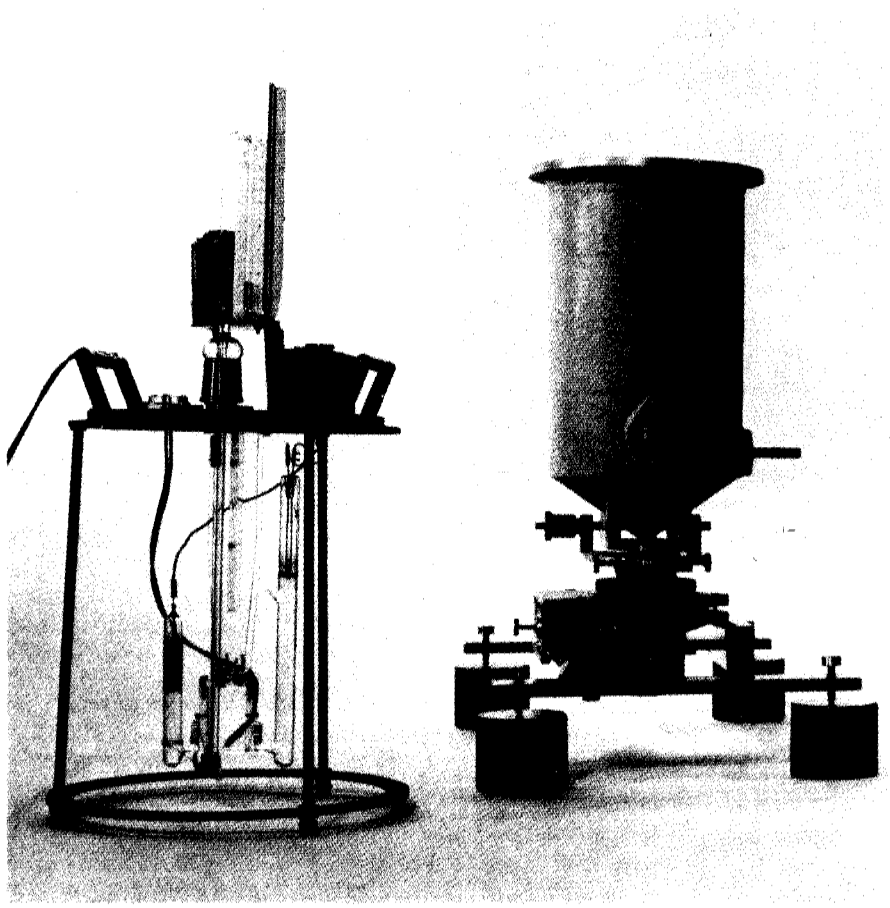

**Figura 4** Una lámpara de criptón de los Laboratorios Nacionales de Física, en Teddington, Inglaterra. El tubo capilar de vidrio del aparato de la izquierda contiene el gas $^{86}$Kr, el cual emite luz cuando es excitado por una corriente eléctrica. La lámpara está insertada en el criostato de la derecha, donde se mantiene a la temperatura del nitrógeno líquido (-210°C). La luz se ve a través de la pequeña portilla del criostato.

A pesar de este avance tecnológico, la barra de metal permaneció como el patrón oficial hasta 1960, cuando la 11a. Conferencia General de Pesas y Medidas adoptó un patrón atómico para el metro. Fue elegida la longitud de onda en el vacío de una cierta luz anaranjada emitida por átomos de un isótopo particular de criptón,* $^{86}$Kr, en una descarga eléctrica (véase la figura 4). Específicamente, el metro se definió como 1,650,763.73 longitudes de onda de esta luz. Con la posibilidad de hacer mediciones de longitud de una fracción de una longitud de onda, los científicos pudieron usar este nuevo patrón para hacer comparaciones de longitudes con una precisión de menos de 1 parte en $10^9$.

La elección de un patrón atómico ofrece otras ventajas, además del aumento de la precisión en las mediciones de longitud. Los átomos de $^{86}$Kr se obtienen en cualquier parte, son idénticos, y emiten luz de la misma longitud de onda. La longitud de onda particular elegida es únicamente característica del $^{86}$Kr y se halla definida de manera rigurosa y exacta. El isótopo puede obtenerse fácilmente en su forma pura.

Para 1983, las demandas de una precisión más alta habían llegado a tal punto que aun el patrón $^{86}$Kr no podía cumplirlas y en aquel año se dio un paso audaz. El metro fue redefinido como la distancia recorrida por una onda de luz en un intervalo de tiempo especificado. En las palabras de la 17a. Conferencia General de Pesas y Medidas:

*El metro es la distancia recorrida por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de 1/299,792,458 de segundo.*

Esto es equivalente a decir que la velocidad de la luz $c$ se define ahora como

$$c = 299{,}792{,}458 \text{ m/s (exactamente)}.$$

Esta nueva definicion del metro era necesaria porque las mediciones de la velocidad de la luz habían llegado a ser tan precisas que la reproducibilidad del metro $^{86}$Kr mismo

* El superíndice 86 del $^{86}$Kr da el *número de masa* (el número de protones más neutrones en el núcleo) de este isótopo del criptón. El gas natural de criptón contiene isótopos con números de masa de 78, 80, 82, 83, 84, y 86. La longitud de onda de la radiación elegida difiere en estos isótopos distintos en alrededor de 1 parte en $10^5$, lo cual es inaceptablemente grande comparado con la precisión del patrón, alrededor de 1 parte en $10^9$. En el caso del reloj de cesio, existe sólo un isótopo natural del cesio, el cual tiene un número de masa de 133.



eran el factor limitante. En vista de esto, tenía sentido adoptar la velocidad de la luz como una cantidad definida y usarla junto con el patrón de tiempo precisamente definido (el segundo) para redefinir el metro.

La tabla 4 muestra la gama de longitudes medidas que pueden ser comparadas con el patrón.

**TABLA 4** ALGUNAS LONGITUDES MEDIDAS†

| *Longitud* | *Metros* |
|---|---|
| Distancia al cuásar más lejano observado | $2 \times 10^{26}$ |
| Distancia a la galaxia Andrómeda | $2 \times 10^{22}$ |
| Radio de nuestra galaxia | $6 \times 10^{19}$ |
| Distancia a la estrella más cercana (Centauro Próxima) | $4 \times 10^{16}$ |
| Radio medio de la órbita del planeta más distante (Plutón) | $6 \times 10^{12}$ |
| Radio del Sol | $7 \times 10^{8}$ |
| Radio de la Tierra | $6 \times 10^{6}$ |
| Altura del monte Everest | $9 \times 10^{3}$ |
| Altura de una persona promedio | $2 \times 10^{0}$ |
| Espesor de una página de este libro | $1 \times 10^{-4}$ |
| Tamaño de un virus típico | $1 \times 10^{-6}$ |
| Radio de un átomo de hidrógeno | $5 \times 10^{-11}$ |
| Radio efectivo de un protón | $1 \times 10^{-15}$ |

† Valores aproximados

**Problema muestra 2** Un año-luz es una medida de longitud (no una medida de tiempo) igual a la distancia que la luz recorre en un año. Calcular el factor de conversión entre años-luz y metros, y hallar la distancia a la estrella Centauro Próxima ($4.0 \times 10^{16}$ m) en años-luz.

**Solución.** El factor de conversión de años a segundos es de

$$1 \text{ año} = 1 \text{ año} \times \frac{365.25 \text{ d}}{1 \text{ año}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$
$$= 3.16 \times 10^7 \text{ s}.$$

La velocidad de la luz es, con tres cifras significativas, $3.00 \times 10^8$ m/s. Entonces en un año la luz recorre una distancia de

$$(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(3.16 \times 10^7 \text{ s}) = 9.48 \times 10^{15} \text{ m},$$

de modo que

$$1 \text{ año-luz} = 9.48 \times 10^{15} \text{ m}.$$

La distancia a Centauro Próxima es

$$(4.0 \times 10^{16} \text{ m}) \times \frac{1 \text{ año-luz}}{9.84 \times 10^{15} \text{ m}} = 4.2 \text{ años-luz}$$

La luz de Centauro Próxima tarda alrededor de 4.2 años en viajar a la Tierra.

## 1-5 EL PATRÓN DE MASA

El patrón SI de masa es un cilindro de platino e iridio que se guarda en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas al cual se le ha asignado, por acuerdo internacional, una masa de 1 kilogramo. Se envían patrones secundarios a laboratorios de estandarización en otros países y las masas de otros cuerpos pueden hallarse por la técnica de una balanza de brazos iguales con una precisión de 1 parte en $10^8$.

En Estados Unidos, una copia del patrón internacional de masa, conocido como kilogramo prototipo Núm. 20, se guarda en una bóveda del National Institute of Standards and Technology (véase la figura 5). Se le retira no más de una vez por año para comprobar los valores de patrones terciarios. Desde 1889 el prototipo Núm. 20 ha sido llevado a Francia dos veces para compararlo con el kilogramo maestro. Cuando se le retira de la bóveda siempre están presentes dos personas, una para transportar el kilogramo con un par de tenazas, y la segunda para sostener al kilogramo si la primera persona lo dejara caer.

La tabla 5 muestra algunas masas medidas. Nótese que varían por un factor de aproximadamente $10^{83}$. La mayoría de las masas han sido medidas en términos del kilogramo patrón por métodos indirectos. Por ejemplo, podemos medir la masa de la Tierra (véase la sección 16-3) midiendo en el laboratorio la fuerza gravitatoria de atracción entre dos esferas de plomo y comparándola con la atracción de la Tierra sobre una masa conocida. Las masas de

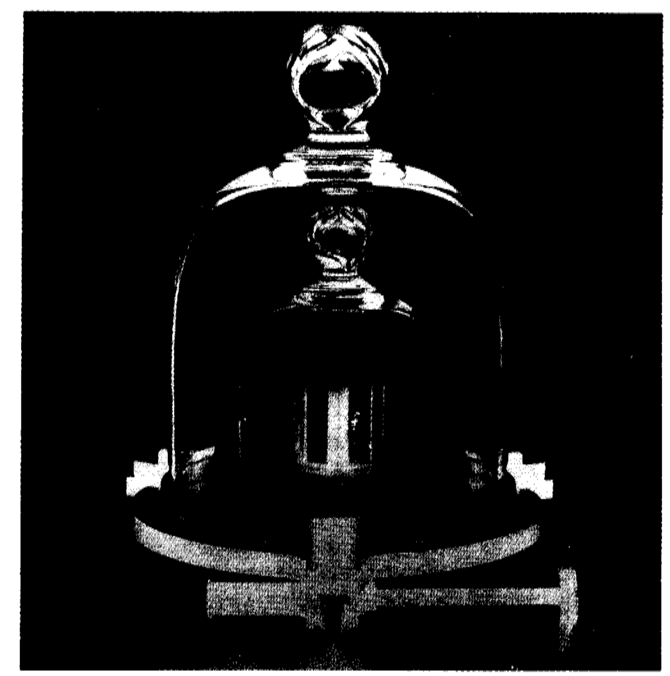

**Figura 5** El kilogramo patrón Núm. 20, que se conserva bajo una campana de vidrio doble en el U. S. National Institute of Standards and Technology.

**TABLA 5** ALGUNAS MASAS MEDIDAS[†]

| *Objeto* | *Kilogramos* |
|---|---|
| Universo conocido (estimación) | $10^{53}$ |
| Nuestra galaxia | $2 \times 10^{43}$ |
| El Sol | $2 \times 10^{30}$ |
| La Tierra | $6 \times 10^{24}$ |
| La Luna | $7 \times 10^{22}$ |
| Un trasatlántico | $7 \times 10^{7}$ |
| Un elefante | $4 \times 10^{3}$ |
| Una persona | $6 \times 10^{1}$ |
| Una uva | $3 \times 10^{-3}$ |
| Una partícula de polvo | $7 \times 10^{-10}$ |
| Un virus | $1 \times 10^{-15}$ |
| Una molécula de penicilina | $5 \times 10^{-17}$ |
| Un átomo de uranio | $4 \times 10^{-26}$ |
| Un protón | $2 \times 10^{-27}$ |
| Un electrón | $9 \times 10^{-31}$ |

[†] Valores aproximados

las esferas deben conocerse por comparación directa con el kilogramo patrón.

En la escala atómica tenemos un segundo patrón de masa, que no es una unidad SI. Es la masa del átomo de carbono $^{12}C$ al que, por acuerdo internacional, se le ha asignado una masa atómica de 12 unidades de masa atómica unificada (abreviatura u), exactamente y por definición. Podemos hallar las masas de otros átomos con precisión considerable usando un espectrómetro de masa (figura 6; véase también la sección 34-2). La tabla 6 muestra alguna selección de masas atómicas, incluyendo las incertidumbres estimadas de la medición. Necesitamos un segundo patrón de masa porque las técnicas de laboratorio actuales nos permiten comparar las masas atómicas entre sí con mayor precisión de lo que podemos hacerlo hoy día contra el kilogramo patrón. Sin embargo, el desarrollo de un patrón de masa atómica para sustituir al kilogramo patrón está aún lejano. La relación entre el patrón atómico actual y el patrón primario es, aproximadamente,

$$1 \text{ u} = 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

Una unidad SI relacionada es el *mol*, que mide la cantidad de una sustancia. Un mol de átomos de $^{12}C$ tiene una masa de 12 gramos exactamente y contiene un número de átomos numéricamente igual a la constante de Avogadro $N_A$:

$$N_A = 6.0221367 \times 10^{23} \text{ por mol}.$$

Éste es un número determinado experimentalmente, con una incertidumbre de alrededor de una parte en un millón. Un mol de cualquier otra sustancia contiene el mismo número de entidades elementales (átomos, moléculas, u otros). Entonces 1 mol de gas helio contiene $N_A$ átomos de He, 1 mol de oxígeno contiene $N_A$ moléculas de $O_2$, y 1 mol de agua contiene $N_A$ moléculas de $H_2O$.

Para relacionar una unidad de masa atómica con una unidad de volumen es necesario usar la constante de Avogadro. Sustituir el patrón kilogramo por un patrón atómico requerirá una mejora de cuando menos dos órdenes de magnitud en la precisión del valor medido de $N_A$ para obtener masas con precisión de 1 parte en $10^8$.

## 1-6 PRECISIÓN Y CIFRAS SIGNIFICATIVAS

Según vayamos mejorando la calidad de nuestros instrumentos de medición y la sofisticación de nuestras técnicas, podremos llevar a cabo experimentos a niveles de precisión siempre más elevados; esto es, podremos extender los resultados medidos a más y más *cifras significativas* y correspondientemente reducir la *incertidumbre experimental* del resultado. Tanto el número de cifras significativas como la incertidumbre dicen algo acerca de nuestra estimación de la precisión del resultado. Esto es, el resultado $x = 3$ m implica que conocemos menos sobre $x$ que del valor $x = 3.14159$ m. Al decir que $x = 3$ m, se sobreentiende que estamos razonablemente seguros de que $x$ se halla entre 2 m y 4 m, mientras que si expresamos a $x$ como 3.14159 m, significa que $x$ probablemente se halla entre 3.14158 m y 3.14160 m. Si expresamos a $x$ como 3 m cuando, de hecho, realmente creemos que $x$ es 3.14159 m, estamos pasando por alto una información que puede ser importante. Por otra parte, si expresamos $x$ = 3.14159 m, cuando realmente no tenemos base para saber nada más que $x = 3$ m, estamos de alguna manera tergiversando la verdad al afirmar que tenemos más información de la que realmente tenemos. La atención a las cifras significativas es importante cuando se presentan los resultados de las mediciones y de los cálculos, y tan erróneo es incluir demasiadas cifras como demasiado pocas.

Existen unas cuantas reglas sencillas a seguir para decidir cúantas cifras significativas se deben incluir:

*Regla 1* Contar desde la izquierda sin tomar en cuenta los primeros ceros, y conservar todos los números hasta el primer número dudoso. Esto es, $x = 3$ m tiene sólo una cifra significativa, y expresar este valor como $x$ = 0.003 km no cambia el número de cifras significativas. Si en su lugar escribimos $x = 3.0$ m (o su equivalente, $x$ = 0.0030 km), implicaríamos que conocemos el valor de $x$ hasta dos cifras significativas. En particular, ¡no conviene escribir los 9 ó 10 dígitos de la pantalla de la calculadora si ello no se justifica por la precisión de los datos de entrada! En este texto la mayoría de los cálculos están hechos con dos ó tres cifras significativas.

Téngase cuidado con las anotaciones ambiguas: $x$ = 300 m no indica si existen una, dos, o tres cifras significativas; no sabemos si los ceros conllevan información o simplemente sirven como ocupantes de un lugar. En cambio, deberíamos escribir $x = 3 \times 10^2$ ó $3.0 \times 10^2$ o $3.00 \times 10^2$ para especificar la precisión con mayor claridad.



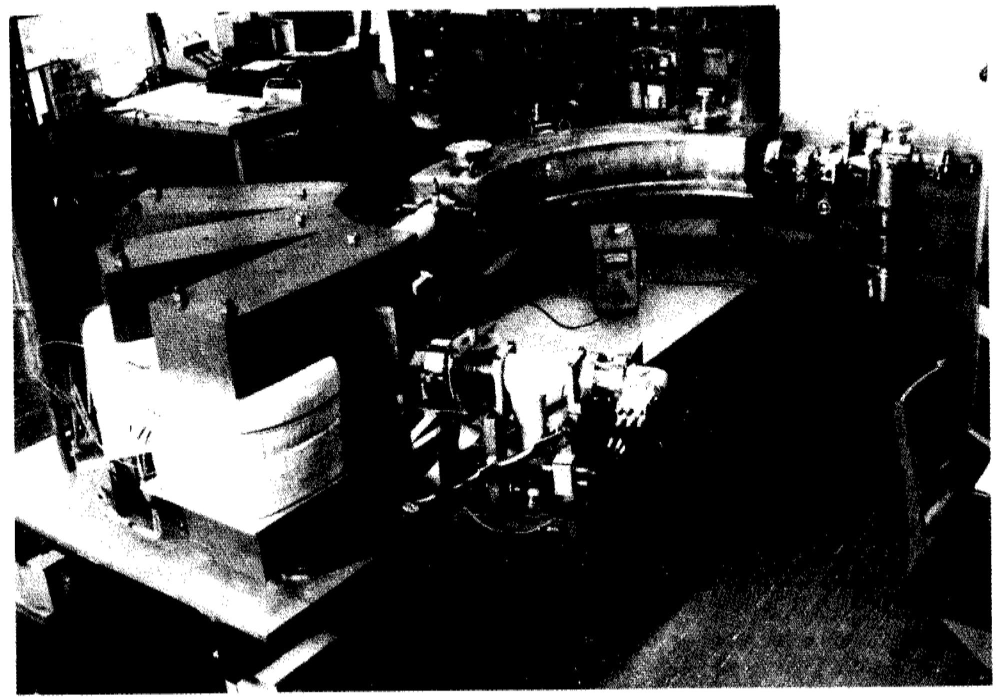

**Figura 6** Espectrómetro de masa de alta resolución, en la Universidad de Manitoba. Los instrumentos de este tipo se usan para obtener masas atómicas precisas tales como las listadas en la tabla 6. El trabajo en este laboratorio se halla respaldado por el Consejo Nacional de Investigación (National Research Council), de Canadá.

**TABLA 6** MEDIDAS DE ALGUNAS MASAS ATÓMICAS

| *Isótopo* | *Masa (u)* | *Incertidumbre (u)* |
|---|---|---|
| $^{1}H$ | 1.00782504 | 0.00000001 |
| $^{12}C$ | 12.00000000 | (exactamente) |
| $^{64}Cu$ | 63.9297656 | 0.0000017 |
| $^{102}Ag$ | 101.91195 | 0.00012 |
| $^{137}Cs$ | 136.907073 | 0.000006 |
| $^{190}Pt$ | 189.959917 | 0.000007 |
| $^{238}Pu$ | 238.0495546 | 0.0000024 |

*Regla 2* Cuando se multiplica o se divide, conserve un número de cifras significativas en el producto o en el cociente no mayor al número de cifras significativas en el menos preciso de los factores. Es decir,

$$2.3 \times 3.14159 = 7.2$$

De vez en cuando, es necesario un poco de buen juicio cuando se aplica esta regla:

$$9.8 \times 1.03 = 10.1$$

porque, aun cuando 9.8 tiene técnicamente sólo dos cifras significativas, está muy cerca de ser un número con tres cifras significativas. El producto debería entonces estar expresado con tres cifras significativas.

*Regla 3* Al sumar o al restar, el dígito menos significativo de la suma o de la diferencia ocupa la misma posición relativa que el dígito menos significativo de las cantidades que son sumadas o restadas. En este caso, el *número* de cifras significativas no es importante; la *posición* es lo que importa. Por ejemplo, supongamos que queremos hallar la masa total de tres objetos como sigue:

$$\begin{array}{r} 10\mathbf{3.9}\ \text{kg} \\ 2.1\mathbf{0}\ \text{kg} \\ \underline{0.31\mathbf{9}\ \text{kg}} \\ 106.\mathbf{319} \text{ ó } 106.\mathbf{3}\ \text{kg} \end{array}$$

Se muestra en **negritas** el dígito menos significativo o primero en duda. Según la regla 1, deberíamos incluir solamente un dígito dudoso; así, el resultado debería expresarse como 106.3 kg, ya que si el "3" es dudoso, entonces el "19" siguiente no nos da información y resulta inútil.

**Problema muestra 3** Deseamos pesar nuestro gato, pero sólo disponemos de una báscula casera de plataforma ordinaria. Es una báscula digital, que muestra el peso en un número entero de libras. Usaremos, por lo tanto, el siguiente esquema: determinamos que nuestro propio peso es de 119 libras, y después tomamos con nosotros al gato y determinamos que nuestro peso combinado es de 128 libras. ¿Cuál es la incertidumbre fraccionaria o en porcentaje de nuestro peso y del peso del gato?

**Solución** El dígito menos significativo es el dígito de las unidades y, por lo tanto, nuestro peso tiene una incertidumbre de una libra aproximadamente. Esto es, la báscula indicaría 119 lb para cualquier peso entre 118.5 lb y 119.5 lb. La incertidumbre fraccionaria es, por lo tanto, de

$$\frac{1 \text{ lb}}{119 \text{ lb}} = 0.008 \text{ ó } 0.8\%$$

El peso del gato es de 128 lb - 119 lb = 9 lb. Sin embargo, la incertidumbre en el peso del gato es todavía alrededor de 1 lb, de modo que la incertidumbre fraccionaria será de

$$\frac{1 \text{ lb}}{9 \text{ lb}} = 0.11 = 11\%$$

Si bien la incertidumbre *absoluta* en nuestro peso y en el peso del gato es la misma (1 lb), la incertidumbre *relativa* en nuestro peso es un orden de magnitud más pequeña que la incertidumbre relativa en el peso del gato. Si tratásemos de pesar un gatito de 1 lb por este método, la incertidumbre relativa en su peso sería del 100%. Esto ilustra un peligro que ocurre comúnmente en la resta de dos miembros que son casi iguales: la incertidumbre relativa o el porcentaje de incertidumbre en la diferencia puede ser muy grande.

## 1-7 ANÁLISIS DIMENSIONAL

Asociada con cada cantidad medida o calculada hay una *dimensión*. Por ejemplo, tanto la absorción del sonido en un recinto cerrado como la probabilidad de que ocurran reacciones nucleares tienen las dimensiones de un área. Las unidades en las que se expresan las cantidades no afectan la dimensión de las cantidades: un área sigue siendo un área, esté expresada en $m^2$ o en $pies^2$ o en acres, o en sabinos (unidad de absorción acústica), o en barns (reacciones nucleares).

De igual manera que definimos a nuestros patrones de medición anteriormente en este capítulo como cantidades fundamentales, podemos elegir un juego de dimensiones fundamentales basadas en patrones de medición independientes. En cantidades mecánicas, masa, longitud, y tiempo son elementales e independientes, así que pueden servir como dimensiones fundamentales. Están representadas respectivamente por M, L, y T.

Toda ecuación debe ser *dimensionalmente compatible*, esto es, las dimensiones en ambos lados deben ser las mismas. La atención a las dimensiones puede a menudo evitar que se cometan errores al escribir las ecuaciones. Por ejemplo, la distancia $x$ cubierta en un tiempo $t$ por un objeto que comienza desde el reposo y que al moverse, está sometido a una aceleración constante $a$, será, según demostraremos en el capítulo siguiente, $x = \frac{1}{2}at^2$. La aceleración se mide en unidades de $m/s^2$. Usamos paréntesis angulares [ ] para denotar "la dimensión de", de modo que $[x]$ = L o $[t]$ = T. Se deduce que $[a] = L/T^2$ o $LT^{-2}$. Manteniendo las unidades (y, por tanto la dimensión) de la aceleración que deseamos, nunca caeremos en el error de escribir $x = \frac{1}{2}at$, o bien $x = \frac{1}{2}at^3$.

El análisis de las dimensiones puede a menudo ayudar en el trabajo con ecuaciones. Los dos ejemplos muestra siguientes ilustran este procedimiento.

**Problema muestra 4** Para mantener a un objeto que se mueve en círculo a velocidad constante se requiere una fuerza llamada "fuerza centrípeta". (El movimiento circular se estudia en el capítulo 4.) Haga un análisis dimensional de la fuerza centrípeta.

**Solución** Comencemos por preguntar "¿de cuántas variables mecánicas podría depender la fuerza centrípeta $F$?" El objeto en movimiento tiene sólo tres propiedades que son igualmente importantes: su masa $m$, su velocidad $v$, y el radio $r$ de su trayectoria circular. La fuerza centrípeta $F$ deberá darse, aparte de cualesquiera constantes sin dimensión, por una ecuación de la forma

$$F \propto m^a v^b r^c$$

donde el símbolo $\propto$ significa que "es proporcional a", y $a$, $b$ y $c$ son exponentes numéricos que deben ser determinados por el análisis de las dimensiones. Como escribimos en la sección 1-2 (y como se estudiará en el capítulo 5), la fuerza tiene unidades de kg · $m/s^2$ y, por lo tanto, sus dimensiones son $[F] = MLT^{-2}$. Podemos, por lo tanto, escribir la ecuación de la fuerza centrípeta en función de sus dimensiones así:

$$\begin{aligned}[F] &= [m^a]\,[v^b]\,[r^c] \\ MLT^{-2} &= M^a\,(L/T)^b L^c \\ &= M^a L^{b+c} T^{-b}.\end{aligned}$$

La consistencia dimensional significa que las dimensiones fundamentales deben ser las mismas en cada lado. Así, ponemos en la ecuación los exponentes,

exponentes de M: $a = 1$;

exponentes de T: $b = 2$;

exponentes de L: $b + c = 1$, de modo que $c = -1$.

La expresión resultante es

$$F \propto \frac{mv^2}{r}.$$

La expresión real para la fuerza centrípeta, derivada de las leyes de Newton y de la geometría del movimiento circular, es $F = mv^2/r$. ¡El análisis dimensional nos da la dependencia exacta de las variables mecánicas! Esto es un acontecimiento feliz, en verdad porque el análisis dimensional no puede decirnos nada con respecto a las constantes que no tienen dimensión. En este caso sucede que la constante es 1.

**Problema muestra 5** Un hito importante en la evolución del universo, justo después de la Gran Explosión es el tiempo Planck $t_P$, cuyo valor depende de tres constantes fundamentales: (1) la velocidad de la luz (la constante fundamental de la relatividad), $c = 3.00 \times 10^8$ m/s; (2) la constante de gravitación





de Newton (la constante fundamental de la gravedad), $G = 6.67 \times 10^{-11}$ $m^3/s^2$ · kg; y (3) la constante de Planck (la constante fundamental de la mecánica cuántica), $h = 6.63 \times 10^{-34}$ kg · $m^2/s$. Con base en un análisis dimensional, halle el valor del tiempo Planck.

**Solución** Usando las unidades dadas para las tres constantes, podemos obtener sus dimensiones:

$$\begin{aligned}[c] &= [m/s] = LT^{-1} \\ [G] &= [m^3/s^2 \cdot kg] = L^3T^{-2}M^{-1} \\ [h] &= [kg \cdot m^2/s] = ML^2T^{-1}\end{aligned}$$

Hagamos que el tiempo Planck dependa de estas constantes:

$$t_P \propto c^i G^j h^k,$$

donde $i$, $j$ y $k$ son exponentes a determinar. Las dimensiones de esta expresión son:

$$\begin{aligned}[t_P] &= [c^i]\,[G^j]\,[h^k] \\ T &= (LT^{-1})^i\,(L^3T^{-2}M^{-1})^j\,(ML^2T^{-1})^k \\ &= L^{i+3j+2k}T^{-i-2j-k}M^{-j+k}.\end{aligned}$$

Igualando las potencias en ambos lados nos da

exponentes de L: $0 = i + 3j + 2k$

exponentes de T: $1 = -i - 2j - k$

exponentes de M: $0 = -j + k$

y resolviendo estas tres ecuaciones para las tres incógnitas, hallamos que

$$i = -\tfrac{5}{2}, \qquad j = \tfrac{1}{2}, \qquad k = \tfrac{1}{2}.$$

Así,

$$\begin{aligned}t_P &\propto c^{-5/2}G^{1/2}h^{1/2} \\ &= \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11}\ m^3/s^2 \cdot kg)(6.63 \times 10^{-34}\ kg \cdot m^2/s)}{(3.00 \times 10^8\ m/s)^5}} \\ &= 1.35 \times 10^{-43}\ s.\end{aligned}$$

Como se ha definido comúnmente, el tiempo Planck difiere de este valor por un factor de $(2\pi)^{-1/2}$. Tales factores sin dimensión no pueden hallarse por medio de esta técnica.

De manera similar, podemos determinar la longitud Planck y la masa Planck, las cuales tienen también interpretaciones muy fundamentales (véanse los problemas 41 y 42).

## PREGUNTAS

1. "Una vez que hemos adoptado un patrón, por el simple hecho de ser un 'patrón' ya es invariable. ¿Cómo criticaría usted esta aseveración?
2. Enliste otras características, además de la accesibilidad y la invariabilidad, que se consideren deseables como patrón físico.
3. ¿Puede usted imaginar un sistema de unidades básicas (tabla 1) en el que no se incluya el tiempo?
4. De las siete unidades básicas enlistadas en la tabla 1, sólo una (el kilogramo) tiene un prefijo (véase la tabla 2). ¿Sería conveniente redefinir la masa de ese cilindro de platino-iridio en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas como 1 g en lugar de 1 kg?
5. ¿Qué significa el prefijo "micro" en el concepto "horno de microondas"? Se ha propuesto que los alimentos que han sido irradiados con rayos gamma para prolongar su vida en la estantería lleven una marca que indique que han sido sometidos a picoondas. ¿Qué se supone que significa esto?
6. Muchos investigadores calificados, basándose en la evidencia, creen en la realidad de la percepción extrasensorial. Suponiendo que la PES sea realmente un hecho natural, ¿qué cantidad o cantidades físicas buscaría para definir o describir este fenómeno cuantitativamente?
7. Según el punto de vista adoptado por algunos físicos y filósofos, si no podemos describir los procedimientos para determinar una cantidad física decimos que la cantidad no es detectable y debería abandonarse por no tener una realidad física. No todos los científicos aceptan este punto de vista. En su opinión, ¿cuáles son los méritos e inconvenientes de este punto de vista?
8. Nombre varios fenómenos repetitivos que ocurren en la naturaleza y que sirvan como patrones de tiempo razonables.
9. ¿Podría definirse "1 segundo" como una pulsación del actual presidente de la Asociación Americana de Profesores de Física? Galileo usó su pulso como un dispositivo de tiempo en alguno de sus trabajos. ¿Por qué es mejor una definición basada en el reloj atómico?
10. ¿Qué criterios debe satisfacer un buen reloj?
11. Por lo que usted sabe sobre los péndulos, cite los inconvenientes de usar el periodo de un péndulo como patrón de tiempo.
12. El 30 de junio de 1981 el minuto que transcurrió entre las 10:59 y las 11:00 de la mañana fue arbitrariamente alargado para contener 61 s. El último día de 1989 fue también prolongado en 1 s. Un *segundo intercalado* así se introduce a veces para compensar el hecho de que, medida por nuestro patrón atómico de tiempo, la velocidad de rotación