

# FÍSICA 1

4<sup>a</sup> Edición



Resnick | Halliday | Krane

# CONTENIDO

<hr/> <hr/>		3-4 Suma de Vectores: Método de las Componentes	46
<hr/> <hr/>		3-5 Multiplicación de Vectores	48
<hr/> <hr/>		3-6 Las Leyes Vectoriales en la Física ( <i>Opcional</i> )	50
<hr/> <hr/>		Preguntas y Problemas	53
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>	<hr/> <hr/>	
<b>MEDICIONES</b>		<b>CAPÍTULO 4</b>	
1-1 Las Cantidades Físicas, Patrones y Unidades	1	<b>MOVIMIENTO BIDIMENSIONAL</b>	
1-2 El Sistema Internacional de Unidades	2	<b>Y TRIDIMENSIONAL</b>	<b>59</b>
1-3 Patrón de Tiempo	3	<hr/> <hr/>	
1-4 Patrón de Longitud	5	4-1 Posición, Velocidad, y Aceleración	59
1-5 Patrón de Masa	7	4-2 Movimiento con Aceleración Constante	61
1-6 Precisión y Cifras Significativas	8	4-3 Movimiento de proyectiles	63
1-7 Análisis Dimensional	10	4-4 Movimiento Circular Uniforme	67
Preguntas y Problemas	11	4-5 Vectores de Velocidad y de Aceleración en el Movimiento Circular ( <i>Opcional</i> )	69
<hr/> <hr/>		4-6 Movimiento Relativo	71
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>17</b>	Preguntas y Problemas	74
<b>MOVIMIENTO UNIDIMENSIONAL</b>		<hr/> <hr/>	
2-1 Cinemática de la Partícula	17	<b>CAPÍTULO 5</b>	
2-2 Descripciones del Movimiento	17	<b>FUERZA Y LAS LEYES</b>	
2-3 Velocidad Promedio	20	<b>DE NEWTON</b>	<b>87</b>
2-4 Velocidad Instantánea	21	<hr/> <hr/>	
2-5 Movimiento Acelerado	23	5-1 Mecánica Clásica	87
2-6 Movimiento con Aceleración Constante	25	5-2 Primera Ley de Newton	88
2-7 Cuerpos en Caída Libre	28	5-3 Fuerza	90
2-8 Galileo y la Caída Libre ( <i>Opcional</i> )	29	5-4 Masa	90
2-9 Medición de la Aceleración en Caída Libre ( <i>Opcional</i> )	30	5-5 Segunda Ley de Newton	92
Preguntas y Problemas	31	5-6 Tercera Ley de Newton	94
<hr/> <hr/>		5-7 Unidades de Fuerza	96
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>41</b>	5-8 Peso y Masa	97
<b>VECTORES</b>		5-9 Medición de Fuerzas	99
3-1 Vectores y Escalares	41	5-10 Aplicaciones de las Leyes de Newton	100
3-2 Suma de Vectores: Método Gráfico	42	5-11 Más Aplicaciones de las Leyes de Newton	103
3-3 Componentes de Vectores	43	Preguntas y Problemas	106

---



---

**CAPÍTULO 6**  
**DINÁMICA DE LA PARTÍCULA 117**

---



---

6-1 Leyes de la Fuerza	117
6-2 Fuerzas de Fricción	118
6-3 La Dinámica del Movimiento Circular Uniforme	123
6-4 Ecuaciones del Movimiento: Fuerzas Constantes y No Constantes	126
6-5 Fuerzas Dependientes del Tiempo: Métodos Analíticos	128
6-6 Fuerzas Dependientes del Tiempo: Métodos Numéricos ( <i>Opcional</i> )	129
6-7 Fuerzas de Arrastre y el Movimiento de proyectiles	130
6-8 Marcos No Inerciales y Seudofuerzas ( <i>Opcional</i> )	133
6-9 Limitaciones de las Leyes de Newton ( <i>Opcional</i> )	135
Preguntas y Problemas	137

---



---

**CAPÍTULO 7**  
**TRABAJO Y ENERGÍA 149**

---



---

7-1 Trabajo Efectuado por una Fuerza Constante	149
7-2 Trabajo Efectuado por una Fuerza Variable: Caso Unidimensional	153
7-3 Trabajo Efectuado por una Fuerza Variable: Caso Bidimensional ( <i>Opcional</i> )	155
7-4 Energía Cinética y el Teorema Trabajo-Energía	157
7-5 Potencia	159
7-6 Marcos de Referencia ( <i>Opcional</i> )	160
7-7 Energía Cinética a Altas Velocidades ( <i>Opcional</i> )	162
Preguntas y Problemas	163

---



---

**CAPÍTULO 8**  
**CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA 171**

---



---

8-1 Fuerzas Conservativas	171
8-2 Energía Potencial	174
8-3 Sistemas Conservativos Unidimensionales	176
8-4 Sistemas Conservativos Unidimensionales: La Solución Completa	179
8-5 Sistemas Conservativos Bidimensionales y Tridimensionales ( <i>Opcional</i> )	182
8-6 Conservación de la Energía en un Sistema de Partículas	183

8-7 Masa y Energía ( <i>Opcional</i> )	187
8-8 Cuantización de la Energía ( <i>Opcional</i> )	189
Preguntas y Problemas	190

---



---

**CAPÍTULO 9**  
**SISTEMAS DE PARTÍCULAS 203**

---



---

9-1 Sistemas de Dos Partículas	203
9-2 Sistemas de Muchas Partículas	206
9-3 Centro de Masa de Objetos Sólidos	209
9-4 Ímpetu Lineal de una Partícula	212
9-5 Ímpetu Lineal de un Sistema de Partículas	213
9-6 Conservación del Ímpetu Lineal	214
9-7 Trabajo y Energía en un Sistema de Partículas ( <i>Opcional</i> )	217
9-8 Sistemas de Masa Variable ( <i>Opcional</i> )	220
Preguntas y Problemas	224

---



---

**CAPÍTULO 10**  
**COLISIONES 233**

---



---

10-1 ¿Qué es una Colisión?	233
10-2 Impulso e Ímpetu	234
10-3 Conservación e Ímpetu Durante las Colisiones	236
10-4 Colisiones en una Dimensión	237
10-5 Colisiones Bidimensionales	241
10-6 Marco de Referencia del Centro de Masa	244
10-7 Procesos de Desintegración Espontánea ( <i>Opcional</i> )	248
Preguntas y Problemas	250

---



---

**CAPÍTULO 11**  
**CINEMÁTICA DE LA ROTACIÓN 261**

---



---

11-1 Movimiento de Rotación	261
11-2 Las Variables de la Rotación	262
11-3 Rotación con Aceleración Angular Constante	264
11-4 Cantidades de Rotación como Vectores	265
11-5 Relaciones Entre Variables Lineales y Angulares: Forma Escalar	268
11-6 Relaciones Entre las Variables Lineales y Angulares: Forma Vectorial ( <i>Opcional</i> )	269
Preguntas y Problemas	271

---



---

**CAPÍTULO 12**  
**DINÁMICA DE LA ROTACIÓN 277**

---



---

12-1 Dinámica de la Rotación: Una Visión General	277
--	-----

12-2 Energía Cinética de la Rotación e Inercia de la Rotación	278
12-3 Inercia de Rotación de los Cuerpos Sólidos	281
12-4 Torca que Actúa Sobre una Partícula	283
12-5 Dinámica de la Rotación de un Cuerpo Rígido	286
12-6 Movimientos de Rotación y de Traslación Combinados	290
Preguntas y Problemas	296

---



---

**CAPÍTULO 13**  
**ÍMPETU ANGULAR** **305**

---



---

13-1 Ímpetu Angular de una Partícula	305
13-2 Sistemas de Partículas	307
13-3 Ímpetu Angular y Velocidad Angular	309
13-4 Conservación del Ímpetu Angular	313
13-5 El Trompo	319
13-6 Cuantización del Ímpetu Angular ( <i>Opcional</i> )	320
13-7 Dinámica Rotacional: un Repaso	321
Preguntas y Problemas	321

---



---

**CAPÍTULO 14**  
**EQUILIBRIO DE LOS CUERPOS RÍGIDOS** **331**

---



---

14-1 Condiciones de Equilibrio	331
14-2 Centro de Gravedad	332
14-3 Ejemplos de Equilibrio	334
14-4 Equilibrio Estable, Inestable y Neutro de los Cuerpos Rígidos en un Campo Gravitatorio	339
14-5 Elasticidad	341
Preguntas y Problemas	344

---



---

**CAPÍTULO 15**  
**OSCILACIONES** **353**

---



---

15-1 Sistemas Oscilatorios	353
15-2 El Oscilador Armónico Simple	355
15-3 Movimiento Armónico Simple	356
15-4 Consideraciones Energéticas en el Movimiento Armónico Simple	359
15-5 Aplicaciones del Movimiento Armónico Simple	361
15-6 Movimiento Armónico Simple y Movimiento Circular Uniforme	365
15-7 Combinaciones de Movimientos Armónicos	367
15-8 Movimiento Armónico Amortiguado ( <i>Opcional</i> )	368

15-9 Oscilaciones Forzadas y Resonancia ( <i>Opcional</i> )	370
15-10 Oscilaciones de Dos Cuerpos ( <i>Opcional</i> ) Preguntas y Problemas	371 373

---



---

**CAPÍTULO 16**  
**GRAVITACIÓN** **383**

---



---

16-1 La Gravitación Desde la Antigüedad Hasta Kepler	383
16-2 Newton y la Ley de la Gravitación Universal	385
16-3 La Constante Gravitatoria $G$	386
16-4 La Gravedad Cerca de la Superficie de la Tierra	388
16-5 Efecto Gravitatorio de una Distribución Esférica de la Materia ( <i>Opcional</i> )	390
16-6 Energía Potencial Gravitatoria	393
16-7 El Campo Gravitatorio y el Potencial ( <i>Opcional</i> )	396
16-8 Los Movimientos de Planetas y Satélites	397
16-9 Gravitación Universal	402
16-10 La Teoría General de la Relatividad ( <i>Opcional</i> ) Preguntas y Problemas	404 408

---



---

**CAPÍTULO 17**  
**ESTÁTICA DE LOS FLUIDOS** **419**

---



---

17-1 Fluidos y Sólidos	419
17-2 Presión y Densidad	420
17-3 Variación de la Presión en un Fluido en Reposo	422
17-4 Principio de Pascal y Principio de Arquímedes	426
17-5 Medición de la Presión	429
17-6 Tensión Superficial ( <i>Opcional</i> ) Preguntas y Problemas	431 433

---



---

**CAPÍTULO 18**  
**DINÁMICA DE LOS FLUIDOS** **441**

---



---

18-1 Conceptos Generales del Flujo de los Fluidos	441
18-2 Trayectoria de una Corriente y la Ecuación de Continuidad	442
18-3 La Ecuación de Bernoulli	445
18-4 Aplicaciones de la Ecuación de Bernoulli y de la Ecuación de Continuidad	447
18-5 Campos de Flujo ( <i>Opcional</i> )	450

18-6 Viscosidad, Turbulencia, y Flujo Caótico ( <i>Opcional</i> )	453
Preguntas y Problemas	456

---



---

**CAPÍTULO 19**  
**MOVIMIENTO ONDULATORIO** **465**

---

19-1 Ondas Mecánicas	465
19-2 Tipos de Ondas	466
19-3 Ondas Viajeras	467
19-4 Velocidad de Onda	471
19-5 La Ecuación de la Onda ( <i>Opcional</i> )	471
19-6 Potencia e Intensidad en el Movimiento Ondulatorio	475
19-7 El Principio de Superposición	476
19-8 Interferencia de Ondas	478
19-9 Ondas Estacionarias	482
19-10 Resonancia	485
Preguntas y Problemas	487

---



---

**CAPÍTULO 20**  
**ONDAS SONORAS** **495**

---

20-1 La Velocidad del Sonido	495
20-2 Ondas Viajeras Longitudinales	497
20-3 Potencia e Intensidad de las Ondas Sonoras	499
20-4 Ondas Longitudinales Estacionarias	501
20-5 Sistemas Vibratorios y Fuentes de Sonido	503
20-6 Pulsaciones	506
20-7 El Efecto Doppler	508
Preguntas y Problemas	511

---



---

**CAPÍTULO 21**  
**LA TEORÍA ESPECIAL  
DE LA RELATIVIDAD** **519**

---

21-1 Las Dificultades con la Física Clásica	519
21-2 Los Postulados de la Relatividad Especial	521
21-3 Consecuencias de los Postulados de Einstein	522
21-4 La Transformación de Lorentz	526
21-5 Medición de las Coordenadas Espacio-Tiempo de un Suceso	529
21-6 La Transformación de las Velocidades	529
21-7 Consecuencias de la Transformación de Lorentz	531
21-8 Ímpetu Relativista	535
21-9 Energía Relativista	537
21-10 La Lógica la Relatividad Especial	540
Preguntas y Problemas	541

---



---

**CAPÍTULO 22**  
**TEMPERATURA** **547**

---

22-1 Descripción Macroscópica y Descripción Microscópica	547
22-2 Temperatura y Equilibrio Térmico	548
22-3 Medición de la Temperatura	549
22-4 La Escala de Temperatura de un Gas Ideal	552
22-5 Dilatación Térmica	554
Preguntas y Problemas	558

---



---

**CAPÍTULO 23**  
**LA TEORÍA CINÉTICA Y  
EL GAS IDEAL** **565**

---

23-1 Propiedades Macroscópicas de un Gas y la Ley del Gas Ideal	565
23-2 El Gas Ideal: Un Modelo	568
23-3 Cálculo Cinético de la Presión	569
23-4 Interpretación Cinética de la Temperatura	571
23-5 Trabajo Efectuado Sobre un Gas Ideal	572
23-6 La Energía Interna de un Gas Ideal	576
23-7 Fuerzas Intermoleculares ( <i>Opcional</i> )	578
23-8 La Ecuación de Estado de van der Waals ( <i>Opcional</i> )	579
Preguntas y Problemas	581

---



---

**CAPÍTULO 24**  
**MECÁNICA ESTADÍSTICA** **587**

---

24-1 Distribuciones Estadísticas y Valores Medios	587
24-2 Recorrido libre medio	589
24-3 La Distribución de las Velocidades Moleculares	593
24-4 La Distribución de las Energías	597
24-5 Movimiento Browniano	599
24-6 Distribuciones Estadísticas Cuánticas ( <i>Opcional</i> )	600
Preguntas y Problemas	603

---



---

**CAPÍTULO 25**  
**EL CALOR Y LA PRIMERA LEY  
DE LA TERMODINÁMICA** **607**

---

25-1 El Calor: Energía en Tránsito	607
25-2 Capacidad Calorífica y Calor Específico	609
25-3 Capacidades Caloríficas de los Sólidos	611
25-4 Capacidades Caloríficas de un Gas Ideal	612

25-5 La Primera Ley de la Termodinámica	616
25-6 Aplicaciones de la Primera Ley	619
25-7 La Transferencia de Calor	622
Preguntas y Problemas	626

---



---

**CAPÍTULO 26**  
**ENTROPIA Y LA SEGUNDA LEY**  
**DE LA TERMODINÁMICA** **635**

---



---

26-1 Procesos Reversibles y Procesos Irreversibles	635
26-2 Máquinas Térmicas y la Segunda Ley	637
26-3 Refrigeradores y la Segunda Ley	639
26-4 El Ciclo de Carnot	641
26-5 La Escala de Temperatura Termodinámica	644
26-6 Entropía: Procesos Reversibles	646
26-7 Entropía: Procesos Irreversibles	648
26-8 Entropía y la Segunda Ley	650
26-9 Entropía y Probabilidad	651
Preguntas y Problemas	653

---



---

**APÉNDICES**

---



---

A El Sistema Internacional de Unidades (SI)	A-1
B Algunas Constantes Fundamentales de la Física	A-3
C Algunos Datos Astronómicos	A-4
D Propiedades de los Elementos	A-5
E Tabla Periódica de los Elementos	A-7
F Partículas Elementales	A-8
G Factores de Conversión	A-10
H Fórmulas Matemáticas	A-14
I Programas de Computadora	A-16
J Premios Nobel de Física	A-20
K Tablas	A-24

SOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS CON NÚMEROS IMPARES	A-28
CRÉDITOS DE LAS FOTOGRAFÍAS	F-1
ÍNDICE	I-1



# 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 ( $\text{velocidad} = \text{longitud}/\text{tiempo}$ ). 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.

## 1-2 EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES\*

La Conferencia General de Pesos 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

**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

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 Pesos 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<sup>†</sup>**

Factor	Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo
10 <sup>18</sup>	exa-	E	10 <sup>-1</sup>	deci-	d
10 <sup>15</sup>	peta-	P	10 <sup>-2</sup>	<b>centi-</b>	c
10 <sup>12</sup>	tera-	T	10 <sup>-3</sup>	<b>mili-</b>	m
10 <sup>9</sup>	<b>giga-</b>	G	10 <sup>-6</sup>	<b>micro-</b>	μ
10 <sup>6</sup>	<b>mega-</b>	M	10 <sup>-9</sup>	<b>nano-</b>	n
10 <sup>3</sup>	<b>kilo-</b>	k	10 <sup>-12</sup>	<b>pico-</b>	p
10 <sup>2</sup>	hecto-	h	10 <sup>-15</sup>	femto-	f
10 <sup>1</sup>	deca-	da	10 <sup>-18</sup>	atto-	a

<sup>†</sup> 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

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

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

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

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, nece-

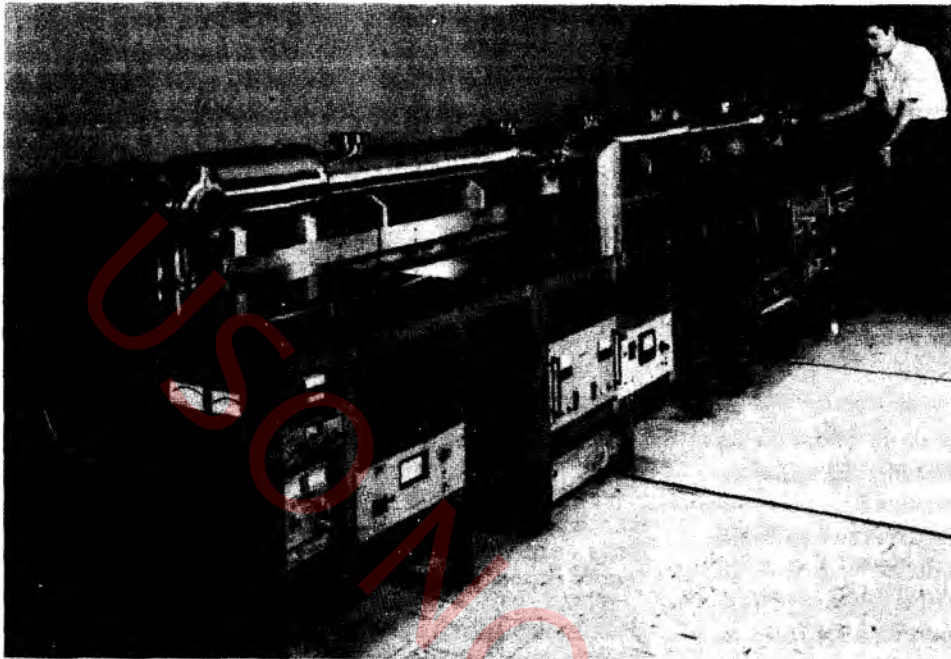
**TABLA 3 ALGUNOS INTERVALOS DE TIEMPO MEDIDOS<sup>†</sup>**

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

<sup>†</sup> Valores aproximados

sitamos 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<sup>63</sup>.

\* 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.



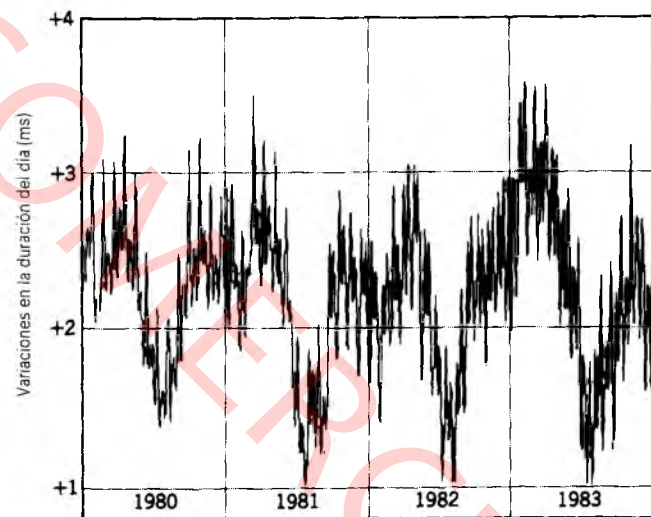
**Figura 1** Patrón de frecuencia atómica de cesio Núm. NBS-6 del National Institute of Standards and Technology, en Boulder, Colorado. Éste es el patrón primario para la unidad de tiempo en Estados Unidos. Marque el teléfono (303)499-7111 para calibrar su reloj contra el patrón. Marque el (900)410-8463 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  $5 \mu\text{s}$ , 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 National 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.

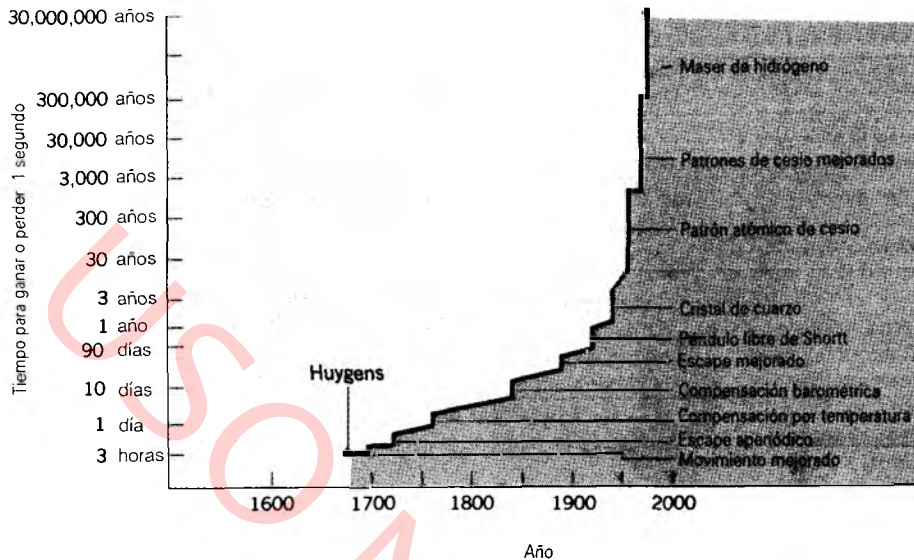
La figura 2 muestra, por comparación con un reloj de cesio, las variaciones en la tasa de rotación de la Tierra en



**Figura 2** La variación en la longitud del día en un periodo de 4 años. Nótese que la escala vertical es de sólo  $3 \text{ ms} = 0.003 \text{ s}$ . 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<sup>‡</sup>

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

\* (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.

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:

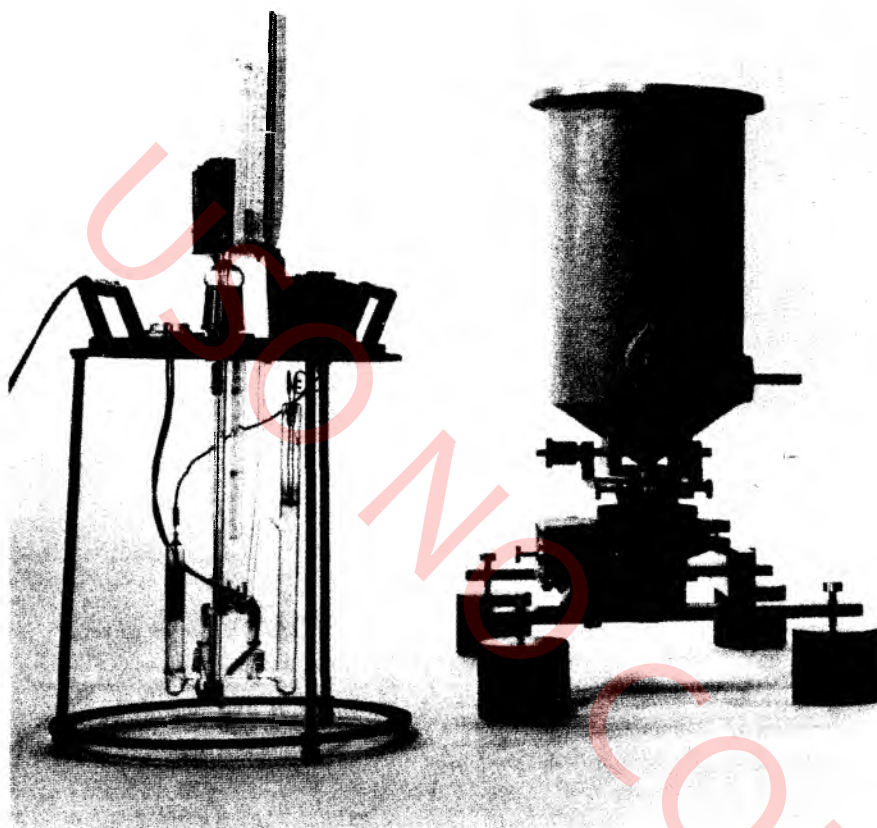
$$1 \text{ yarda} = 0.9144 \text{ metros (exactamente)}$$

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.





**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  $^{86}\text{Kr}$ , 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 ( $-210^\circ\text{C}$ ). 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,\*  $^{86}\text{Kr}$ , 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  $^{86}\text{Kr}$  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  $^{86}\text{Kr}$  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  $^{86}\text{Kr}$  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 definición del metro era necesaria porque las mediciones de la velocidad de la luz habían llegado a ser tan precisas que la reproducibilidad del metro  $^{86}\text{Kr}$  mismo

\* El superíndice 86 del  $^{86}\text{Kr}$  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.

**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

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

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

$$(4.0 \times 10^{16} \text{ m}) \times \frac{1 \text{ año-luz}}{9.48 \times 10^{15} \text{ m}} = 4.2 \text{ años-luz}$$

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

**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

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  $^{12}\text{C}$  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  $^{12}\text{C}$  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  $\text{O}_2$ , y 1 mol de agua contiene  $N_A$  moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ .

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  $10^8$ .

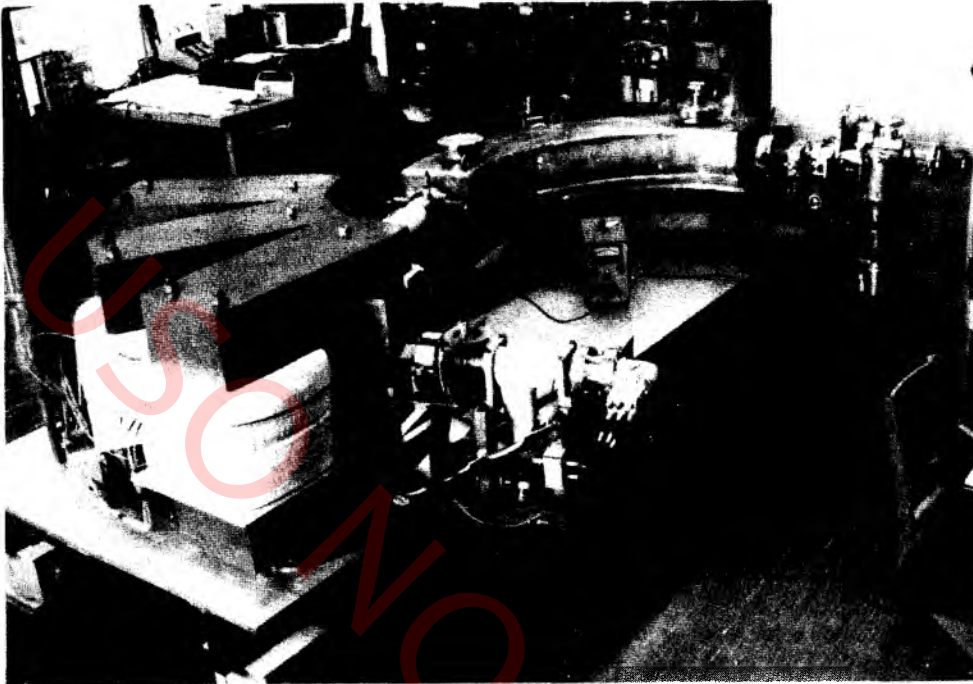
## 1-6 PRECISIÓN Y CIFRAS SIGNIFICATIVAS

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  $x = 3 \text{ m}$  implica que conocemos menos sobre  $x$  que del valor  $x = 3.14159 \text{ m}$ . Al decir que  $x = 3 \text{ m}$ , 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  $x = 3.14159 \text{ m}$ , cuando realmente no tenemos base para saber nada más que  $x = 3 \text{ m}$ , 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 cuántas 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,  $x = 3 \text{ m}$  tiene sólo una cifra significativa, y expresar este valor como  $x = 0.003 \text{ km}$  no cambia el número de cifras significativas. Si en su lugar escribimos  $x = 3.0 \text{ m}$  (o su equivalente,  $x = 0.0030 \text{ km}$ ), 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:  $x = 300 \text{ m}$  no indica si existen una, dos, o tres cifras significativas; no sabemos si los ceros conllevan informa-



**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 ( <i>u</i> )	Incertidumbre ( <i>u</i> )
<sup>1</sup> H	1.00782504	0.00000001
<sup>12</sup> C	12.00000000	(exactamente)
<sup>64</sup> Cu	63.9297656	0.0000017
<sup>102</sup> Ag	101.91195	0.00012
<sup>137</sup> Cs	136.907073	0.000006
<sup>190</sup> Pt	189.959917	0.000007
<sup>238</sup> Pu	238.0495546	0.0000024

ción 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.

**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:

$$\begin{array}{r} 103.9 \text{ kg} \\ 2.10 \text{ kg} \\ 0.319 \text{ kg} \\ \hline 106.319 \text{ ó } 106.3 \text{ kg} \end{array}$$

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

## 10 Capítulo 1 Mediciones

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<sup>2</sup> o en pies<sup>2</sup> 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<sup>2</sup>. 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 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<sup>2</sup> 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,

$$\text{exponentes de M: } a = 1;$$

$$\text{exponentes de T: } b = 2;$$

$$\text{exponentes de L: } b + c = 1, \text{ de modo que } c = -1.$$

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),  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg}$ ; y (3) la constante de Planck (la constante fundamental de la mecánica cuántica),  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ . 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:

$$[c] = [\text{m/s}] = \text{LT}^{-1}$$

$$[G] = [\text{m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg}] = \text{L}^3\text{T}^{-2}\text{M}^{-1}$$

$$[h] = [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}] = \text{ML}^2\text{T}^{-1}$$

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:

$$[t_p] = [c]^i [G]^j [h]^k$$

$$\text{T} = (\text{LT}^{-1})^i (\text{L}^3\text{T}^{-2}\text{M}^{-1})^j (\text{ML}^2\text{T}^{-1})^k$$

$$= \text{L}^{i+3j+2k} \text{T}^{-i-2j-k} \text{M}^{-j+k}$$

Igualando las potencias en ambos lados nos da

$$\text{exponentes de L: } 0 = i + 3j + 2k$$

$$\text{exponentes de T: } 1 = -i - 2j - k$$

$$\text{exponentes de M: } 0 = -j + k$$

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

$$i = -\frac{1}{2}, \quad j = \frac{1}{2}, \quad k = \frac{1}{2}.$$

Así,

$$t_p \propto c^{-1/2} G^{1/2} h^{1/2}$$

$$= \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg})(6.63 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s})}{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^5}}$$

$$= 1.35 \times 10^{-43} \text{ s}.$$

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 picondas. ¿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



## 12 Capítulo 1 Mediciones

- de la Tierra decrece lentamente. ¿Por qué es deseable ajustar nuestros relojes de este modo?
- Una estación de radio se anuncia "en el 89.5 de su carátula de FM". ¿Qué significa este número?
  - ¿Por qué no hay unidades básicas para área y para volumen en el sistema SI?
  - El metro fue originalmente una diezmilésima parte de la distancia del Polo Norte al Ecuador medida sobre el meridiano que pasa por París. Esta definición no coincide con la barra del metro patrón en un 0.023%. ¿Significa esto que la barra del metro patrón es imprecisa en ese porcentaje?
  - ¿Puede la longitud medirse a lo largo de una línea curva? Si se puede, ¿cómo?
  - Cuando la barra metro fue adoptada como el patrón de longitud, se especificó su temperatura. ¿Puede ser llamada la longitud una propiedad fundamental si otra cantidad física, como es la temperatura, debe especificarse para elegir un patrón?
  - Al redefinir al metro en función de la velocidad de la luz, ¿por qué los delegados a la Conferencia General de Pesas y Medidas de 1983 no simplificaron el asunto definiendo que la velocidad de la luz es de  $3 \times 10^8$  m/s exactamente? Por lo mismo, ¿por qué no definieron que es de 1 m/s exactamente? ¿Estaban abiertas para ellos ambas posibilidades de hacerlo? De ser así, ¿por qué las rechazaron?
  - Sugiera una manera de medir (a) el radio de la Tierra, (b) la distancia entre el Sol y la Tierra y (c) el radio del Sol.
  - Sugiera una manera de medir (a) el espesor de una hoja de papel, (b) el espesor de la pared de una burbuja de jabón y (c) el diámetro de un átomo.
  - Si alguien le dijera que cada dimensión de cada objeto se había contraído a la mitad de su valor original durante la noche, ¿cómo podría usted refutar tal aseveración?
  - ¿Es el patrón kilogramo de masa actual accesible, invariable, reproducible e indestructible? ¿Es sencillo para efectos de comparación? ¿Sería mejor un patrón atómico en todos los aspectos? ¿Por qué no adoptamos un patrón atómico, como lo hacemos para la longitud y el tiempo?
  - ¿Por qué hallamos útil tener dos patrones de masa, el kilogramo y el átomo de  $^{12}\text{C}$ ?
  - Cómo obtener la relación entre las masas del kilogramo patrón y del átomo de  $^{12}\text{C}$ ?
  - Sugiera modos prácticos por los cuales puedan ser determinadas las masas de los diversos objetos listados en la tabla 5.
  - Sugiera objetos cuyas masas entren, dentro de la amplia gama de la tabla 5, entre la de un trasatlántico y la Luna, y calcule sus masas.
  - Las críticas sobre el sistema métrico a menudo opacan su adopción diciendo cosas tales como: "En vez de comprar 1 lb de mantequilla tendrás ahora que pedir 0.454 kg de mantequilla". El argumento es que la vida será, de esta manera, más complicada. ¿Cómo podría usted rebatir esto?

## PROBLEMAS

### Sección 1-2 El Sistema Internacional de Unidades

- Use los prefijos de la tabla 2 para expresar (a)  $10^6$  teléfonos; (b)  $10^{-6}$  teléfonos; (c)  $10^1$  tarjetas; (d)  $10^9$  esquilonos; (e)  $10^{12}$  toros; (f)  $10^{-1}$  compañeros; (g)  $10^{-2}$  pezuñas; (h)  $10^{-9}$  Nannettes; (i)  $10^{-12}$  rechiflas; (j)  $10^{-18}$  muchachos; (k)  $2 \times 10^2$  asociados; (l)  $2 \times 10^3$  cenizontes. Ahora que ya percibió la idea, invente unas cuantas expresiones similares. (Véase la pág. 61 de *A Random Walk in Science*, compilado por R. L. Weber; Crane, Russak & Co., Nueva York, 1974.)
- Algunos de los prefijos de las unidades SI se han infiltrado en el lenguaje cotidiano. (a) ¿Cuál es el equivalente semanal de un salario anual de 36K (= 36 k\$)? (b) Una lotería ofrece 10 megadólares como premio mayor, pagadero durante 20 años. ¿Por cuánto es el cheque recibido cada mes? (c) El disco duro de una computadora tiene una capacidad de 30 MB (= 30 megabytes o millones de caracteres). A razón de 8 caracteres/palabra, ¿cuántas palabras puede almacenar? En términos de computación, *kilo* significa  $1024 (= 2^{10})$ , no 1000.

### Sección 1-3 El patrón de tiempo

- Enrico Fermi dijo una vez que el periodo de una clase estándar (50 min) es de cerca de 1 microcenturia. ¿Qué tan larga es una microcenturia en minutos, y cuál es la diferencia porcentual con la aproximación de Fermi?
- Nueva York dista de Los Angeles aproximadamente 3000 mi; la diferencia de tiempo entre estas dos ciudades es de 3 h. Calcule la circunferencia de la Tierra.
- Una sustitución conveniente del número de segundos en un año es  $\pi \times 10^7$ . Dentro de qué porcentaje de error es esto correcto?
- Poco después de la Revolución Francesa y como parte de la introducción del sistema métrico, la Convención Nacional Revolucionaria hizo un intento por introducir el tiempo decimal. En este plan, que no tuvo éxito, el día (comenzando a la media noche) se dividió en 10 horas decimales que constaban de 100 minutos decimales cada una. Las manecillas de un reloj decimal de bolsillo que aún se conserva están detenidas en 8 horas decimales, 22.8 minutos decimales. ¿Qué hora es? Véase la figura 7.



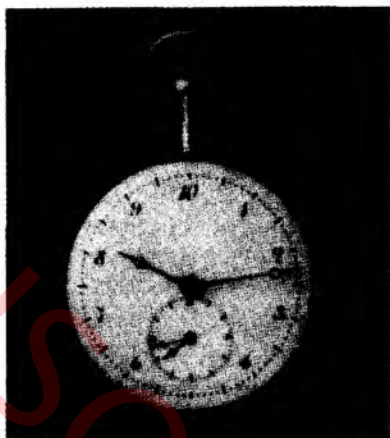


Figura 7 Problema 6.

7. (a) Una unidad de tiempo a veces usada en la física microscópica es el *trémolo*. Un trémolo es igual a  $10^{-8}$  s. ¿Hay más trémolos en un segundo que segundos en un año? (b) El ser humano ha existido desde hace  $10^6$  años, mientras que el universo tiene una edad de  $10^{10}$  años aproximadamente. Si la edad del universo fuera de 1 día, ¿cuántos segundos de existencia tendría el ser humano?
8. En dos carriles *diferentes*, los ganadores de la carrera de una milla hicieron un tiempo de 3 min 58.05 s y 3 min 58.20 s, respectivamente. Con objeto de concluir que el corredor con el tiempo más corto fue realmente más rápido, ¿cuál es el error máximo tolerable, en pies, al determinar las distancias?
9. Un cierto reloj de péndulo (con una carátula de 12 h) se adelanta 1 min/día. Después de poner el reloj en la hora correcta, cuánto tiempo debemos esperar hasta que indique nuevamente la hora correcta?
10. En un laboratorio están siendo probados cinco relojes. Exactamente al mediodía, determinado por la señal de tiempo de la WWV, en los días sucesivos de una semana los relojes indican lo que se muestra en la tabla inferior. ¿Cómo podrían disponerse estos cinco relojes en el orden de su valor relativo como buenos cronómetros? Justifique la elección.
11. La edad del universo es de alrededor de  $5 \times 10^{17}$  s; la pulsación de luz más corta producida en un laboratorio (1990) duró sólo  $6 \times 10^{-15}$  s (véase la tabla 3). Identifique un intervalo de tiempo físicamente significativo de aproximadamente la mitad de estos dos tiempos en una escala logarítmica.

12. Suponiendo que la longitud del día crezca uniformemente 0.001 s en un siglo, calcule el efecto acumulativo sobre la medición del tiempo en 20 siglos. Tal disminución de la rotación de la Tierra está indicada por observaciones de la frecuencia que ocurren los eclipses solares durante este periodo.
13. El tiempo que tarda la Luna en regresar a una posición determinada según se observa contra el fondo de las estrellas fijas, 27.3 días, se llama *mes sideral*. El intervalo de tiempo entre fases idénticas de la Luna se llama *mes lunar*. El mes lunar es más largo que el mes sideral. ¿Por qué y por cuánto?

**Sección 1-4 El patrón de longitud**

14. Un muchacho francés, Pierre, que se cartea con otro muchacho de Estados Unidos, John, escribe a éste diciendo que mide 1.9 m de altura. ¿Cuál es su altura en unidades inglesas?
15. (a) En las pistas de carreras se usan tanto 100 yardas como 100 metros como distancias para carreras cortas y rápidas. ¿Cuál es más larga? ¿Por cuántos metros es más larga? ¿Por cuántos pies? (b) ¿Se mantienen registros de pista y campo para la milla y para la llamada milla métrica (1500 metros). Compare estas distancias.
16. La estabilidad del reloj de cesio usado como un patrón atómico del tiempo es tal que dos relojes de cesio adelantarán o atrasarán 1 s uno con respecto al otro en alrededor de 300,000 años. Si esta misma precisión fuera aplicada a la distancia entre Nueva York y San Francisco (2572 mi), ¿en cuánto se diferenciarían las mediciones sucesivas de esta distancia?
17. La Antártida tiene una forma casi semicircular con un radio de 2000 km. El espesor promedio de la capa de hielo es de 3000 m. ¿Cuántos centímetros cúbicos de hielo contiene la Antártida? (Desprecie la curvatura de la Tierra.)
18. Una unidad de área, a menudo usada al expresar áreas de terreno, es la *hectárea*, que se define como  $10^4$  m<sup>2</sup>. Una mina de carbón a cielo abierto consume 77 hectáreas de terreno con una profundidad de 26 m cada año. ¿Qué volumen de tierra, en kilómetros cúbicos, es retirada en este tiempo?
19. La Tierra es aproximadamente una esfera de radio  $6.37 \times 10^6$  m. (a) ¿Cuál es su circunferencia en kilómetros? (b) ¿Cuál es su área superficial en kilómetros cuadrados? (c) ¿Cuál es su volumen en kilómetros cúbicos?
20. A continuación se dan las velocidades máximas aproximadas de varios animales, pero en unidades de velocidad diferentes. Convierta estos datos a m/s, y después dispon-

Reloj	Dom.	Lun.	Mar.	Miér.	Jue.	Vie.	Sáb.
A	12:36:40	12:36:56	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:51:43	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

ga a los animales en orden creciente de su velocidad máxima: la ardilla, 19 km/h; el conejo, 30 nudos; el caracol, 0.030 mi/h; la araña, 1.8 pies/s; el leopardo, 1.9 km/min; un ser humano, 1000 cm/s; el zorro, 1100 m/min; el león, 1900 km/día.

21. Cierta vehículo espacial tiene una velocidad de 19,200 mi/h. ¿Cuál es su velocidad en años-luz por siglo?
22. Un automóvil nuevo está equipado con un tablero de instrumentos de "tiempo real" que incluye el consumo de combustible. Un interruptor permite al conductor cambiar a voluntad entre unidades británicas y unidades SI. Sin embargo, la representación británica muestra mi/gal mientras que la versión SI lo hace a la inversa, L/km. ¿Qué lectura SI corresponde a 30.0 mi/gal?
23. Las distancias astronómicas son tan grandes comparadas con las terrestres que se emplean unidades de longitud mucho mayores para facilitar la comprensión de las distancias relativas de los objetos astronómicos. Una *unidad astronómica* (UA) es igual a la distancia promedio de la Tierra al Sol,  $1.50 \times 10^8$  km. Un *parsec* (pc) es la distancia a la cual 1 UA subtendería un ángulo de 1 segundo de arco. Un *año-luz* (al) es la distancia que la luz cubriría en 1 año, viajando a través del vacío a una velocidad de  $3.00 \times 10^8$  km/s. (a) Expresé la distancia de la Tierra al Sol en parsecs y en años-luz. (b) Expresé un año-luz y un parsec en kilómetros. Aunque el año-luz se usa mucho en la escritura popular, el parsec es la unidad usada profesionalmente por los astrónomos.
24. El radio efectivo de un protón es de alrededor  $1 \times 10^{-15}$  m; el radio del universo observable (dado por la distancia al cuásar observable más lejano) es de  $2 \times 10^{26}$  (véase la tabla 4). Identifique una distancia físicamente significativa que sea aproximadamente la mitad entre estos dos extremos en una escala logarítmica.
25. La distancia promedio entre el Sol y la Tierra es de 390 veces la distancia promedio entre la Luna y la Tierra. Consideremos ahora un eclipse total de Sol (la Luna entre la Tierra y el Sol; véase la figura 8) y calcule (a) la relación entre los diámetros del Sol y de la Luna, y (b) la razón entre los volúmenes del Sol y de la Luna. (c) El ángulo interceptado en el ojo por la Luna es de  $0.52^\circ$  y la distancia entre la Tierra y la Luna es de  $3.82 \times 10^5$  km. Calcule el diámetro de la Luna.

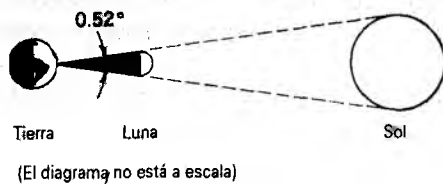


Figura 8 Problema 25.

26. El navegante del buque petrolero *Exxon Valdez* usa los satélites del Sistema de ubicación global (GPS/NAVSTAR) para hallar la latitud y la longitud (véase la figura

9). Éstas son de  $43^\circ 36'25.3''$  N y  $77^\circ 31'48.2''$  W. Si la precisión de estas determinaciones es de  $\pm 0.5''$ , ¿cuál es la incertidumbre en la posición del petrolero medida a lo largo de (a) una línea norte-sur (meridiano de longitud) y (b) una línea este-oeste (paralelo de latitud)? (c) ¿Dónde está el petrolero?

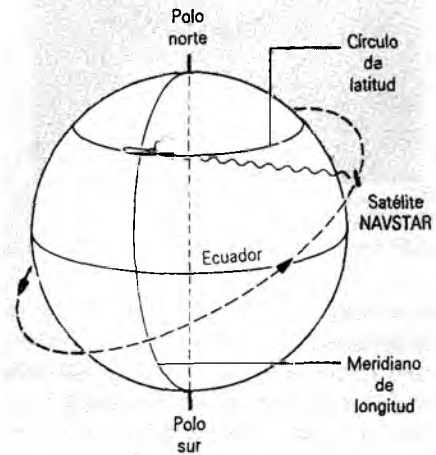


Figura 9 Problema 26.

Sección 1-5 El patrón de masa

27. Usando las conversiones y los datos que aparecen en el capítulo, determine el número de átomos de hidrógeno necesario para obtener 1.00 kg de hidrógeno.
28. Una molécula de agua ( $H_2O$ ) contiene dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno. Un átomo de hidrógeno tiene una masa de 1.0 u y un átomo de oxígeno tiene una masa de 16 u. (a) ¿Cuál es la masa en kilogramos de una molécula de agua? (b) ¿Cuántas moléculas de agua hay en los océanos del mundo? Los océanos tienen una masa total de  $1.4 \times 10^{21}$  kg.
29. En el continente europeo una "libra" es medio kilogramo. ¿Cuál es mejor compra, una libra de café en París por \$3.00, o una libra de café en Nueva York por \$2.40?
30. Una sala tiene las dimensiones 21 ft  $\times$  13 ft  $\times$  12 ft. ¿Cuál es la masa de aire que contiene? La densidad del aire a la temperatura ambiente y la presión atmosférica normal es de  $1.21 \text{ kg/m}^3$ .
31. La longitud del borde de un terrón de azúcar típico es de 1 cm. Si usted tuviera una caja cúbica conteniendo 1 mol de cubos de azúcar, ¿cuál sería la longitud de su borde?
32. Una persona sometida a dieta pierde 2.3 kg (correspondientes a unas 5 lb) por semana. Expresé la tasa de pérdida de masa en miligramos por segundo.
33. Supongamos que nos toma 12 h drenar un recipiente con  $5700 \text{ m}^3$  de agua. ¿Cuál es la tasa del flujo de masa (en kg/s) de agua del recipiente? La densidad del agua es de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .
34. Los granos de arena fina de una playa de California tienen un radio promedio de  $50 \mu\text{m}$ . ¿Qué masa de arena tendría

un área total de su superficie igual al área de la superficie de un cubo que tenga exactamente 1 m de arista? La arena es un bióxido de silicio, 1 m<sup>3</sup> de la cual tiene una masa de 2600 kg.

35. El kilogramo patrón (véase la figura 5) tiene la forma de un cilindro circular con su altura igual a su diámetro. Demuestre que, en un cilindro circular del volumen fijado, esta igualdad da el área superficial más pequeña, haciendo así mínimos los efectos de la contaminación y el desgaste de la superficie.
36. La distancia entre átomos vecinos, o entre moléculas, de una sustancia sólida puede ser estimada calculando al doble el radio de una esfera con un volumen igual al volumen por átomo del material. Calcule la distancia entre átomos vecinos en (a) el hierro, y (b) el sodio. Las densidades del hierro y del sodio son de 7870 kg/m<sup>3</sup> y 1013 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente; la masa de un átomo de hierro es de  $9.27 \times 10^{-26}$  kg, y la masa de un átomo de sodio es de  $3.82 \times 10^{-26}$  kg.

**Sección 1-6 Precisión y cifras significativas**

37. En el periodo 1960-1983, se definió que el metro tenía 1,650,763.73 longitudes de onda de una cierta luz anaranjada emitida por átomos de criptón. Calcule la distancia en nanómetros que corresponde a una longitud de onda. Exprese el resultado usando el número apropiado de cifras significativas.
38. (a) Evalúe  $37.76 + 0.132$  con el número correcto de cifras significativas. (b) Evalúe  $16.264 - 16.26325$  con el número correcto de cifras significativas.
39. Una placa rectangular de metal tiene una longitud de 8.43 cm y una anchura de 5.12 cm. Calcule el área de la placa con el número correcto de cifras significativas. (b) Una placa circular de metal tiene un radio de 3.7 cm. Calcule el área de la placa con el número correcto de cifras significativas.

**Sección 1-7 Análisis dimensional**

40. La roca porosa a través de la cual se mueve el agua subterránea es llamada manto acuífero. El volumen  $V$  de

agua que, en un tiempo  $t$ , se mueve a través de un área  $A$  de la sección transversal del manto acuífero está dado por

$$\frac{V}{t} = KA \frac{H}{L},$$

donde  $H$  es el declive del manto acuífero a lo largo de la distancia horizontal  $L$  (véase la figura 10). Esta relación se llama ley de Darcy. La cantidad  $K$  es la conductividad hidráulica del manto acuífero. ¿Cuáles son las unidades SI de  $K$ ?

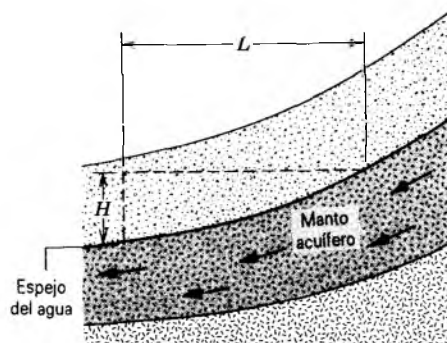


Figura 10 Problema 40

41. En el problema muestra 5, las constantes  $h$ ,  $G$ , y  $c$  fueron combinadas para obtener una cantidad de las dimensiones de tiempo. Repita la derivación para obtener una cantidad con las dimensiones de longitud, y evalúe el resultado numéricamente. No tome en cuenta ninguna constantes sin dimensión. Ésta es la *longitud Planck*, es decir, el tamaño del universo observable en el tiempo Planck.
42. Repita el procedimiento del problema 41 para obtener una cantidad con las dimensiones de masa. Esto da la *masa Planck*, es decir, la masa del universo observable en el tiempo Planck.

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE  
 DOCUMENTACION Y BIBLIOTECAS  
 MONTEVIDEO - URUGUAY

054353