Evalúe su comprensión de la sección 4.2 ¿En cuál de las siguientes situaciones la fuerza neta sobre el cuerpo es cero: i) un avión que vuela al norte con rapidez constante de 120 m/s y altitud constante; ii) un automóvil que sube en línea recta por una colina con pendiente de 3°, a una rapidez constante de 90 km/h; iii) un halcón que se mueve en círculos con rapidez constante de 20 km/h a una altura constante de 15 m sobre un campo abierto; iv) una caja con superficies lisas, sin fricción, que está en la parte de atrás de un camión cuando éste acelera hacia adelante en un camino plano a 5 m/s^2?

4.3 Segunda ley de Newton

Al tratar la primera ley de Newton, vimos que cuando ninguna fuerza, o una fuerza neta cero, actúa sobre un cuerpo, éste se mueve con aceleración cero y su velocidad es constante. En la figura 4.13a, un disco de hockey se desliza a la derecha sobre hielo húmedo, donde la fricción es despreciable. No actúan fuerzas horizontales sobre el disco; la fuerza de la gravedad hacia abajo y la fuerza de contacto hacia arriba ejercida por el hielo se cancelan. Así, la fuerza neta $\sum\vec{F}$ que actúa sobre el disco es cero, el disco tiene aceleración cero y su velocidad es constante.

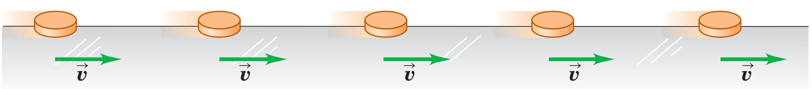
Sin embargo, ¿qué sucede si la fuerza neta *no* es cero? En la figura 4.13b aplicamos una fuerza horizontal constante al disco en la dirección de su movimiento. Entonces, $\sum\vec{F}$ es constante y en la misma dirección horizontal que $\vec{v}$. Vemos que, mientras la fuerza actúa, la velocidad del disco cambia a ritmo constante; es decir, el disco se mueve con aceleración constante. La rapidez del disco aumenta, así que $\vec{a}$ tiene la misma dirección que $\vec{v}$ y $\sum\vec{F}$.

En la figura 4.13c invertimos la dirección de la fuerza sobre el disco, de modo que $\sum\vec{F}$ actúe en la dirección opuesta a $\vec{v}$. Aquí también el disco tiene una aceleración: se mueve cada vez más lentamente a la derecha. La aceleración $\vec{a}$ en este caso es a la izquierda, en la misma dirección que $\sum\vec{F}$. Como en el caso anterior, el experimento muestra que la aceleración es constante si $\sum\vec{F}$ es constante.

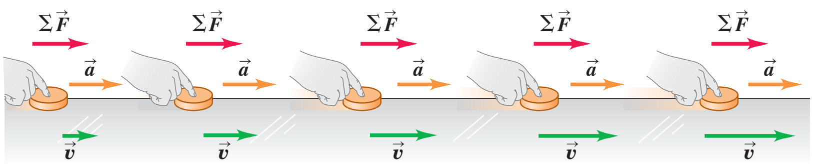
La conclusión es que *una fuerza neta que actúa sobre un cuerpo hace que éste acelere en la misma dirección que la fuerza neta*. Si la magnitud de la fuerza neta es constante, como en las figuras 4.13b y 4.13c, también lo será la magnitud de la aceleración.

4.13 Análisis de la relación entre la aceleración de un cuerpo y la fuerza neta que actúa sobre éste (aquí, un disco de hockey sobre una superficie sin fricción).

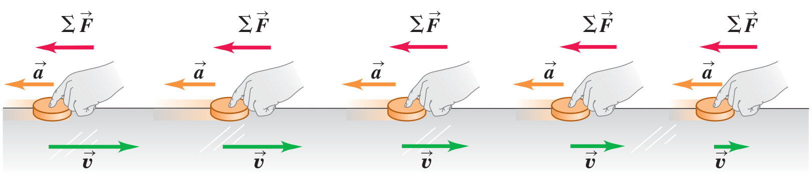
a) Un disco que se mueve con velocidad constante (en equilibrio): $\sum\vec{F} = \mathbf{0}$, $\vec{a} = \mathbf{0}$.



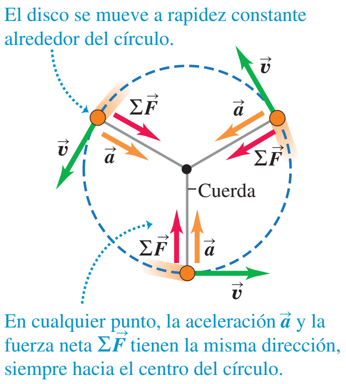
b) Una fuerza neta constante en la dirección del movimiento provoca una aceleración constante en la misma dirección que la fuerza neta.



c) Una fuerza neta constante opuesta a la dirección del movimiento causa una aceleración constante en la misma dirección que la fuerza neta.

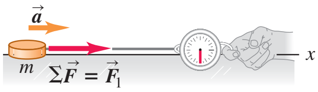


4.14 Vista superior de un disco de hockey en movimiento circular uniforme en una superficie horizontal sin fricción.

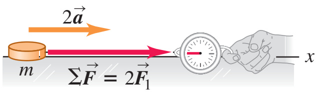


4.15 Para un cuerpo de cierta masa m, la magnitud de la aceleración del cuerpo es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo.

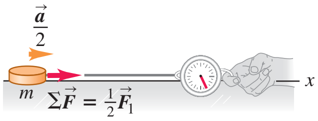
a) Una fuerza neta constante $\Sigma\vec{F}$ provoca una aceleración constante $\vec{a}$.



b) Al duplicarse la fuerza neta, se duplica la aceleración.



c) Al reducirse a la mitad la fuerza neta, la aceleración se reduce a la mitad.



Estas conclusiones sobre fuerza neta y aceleración también son válidas para un cuerpo que se mueve en trayectoria curva. Por ejemplo, la figura 4.14 muestra un disco de hockey que se mueve en un círculo horizontal en una superficie de hielo con fricción despreciable. Una cuerda que sujeta el disco al hielo ejerce una fuerza de tensión de magnitud constante hacia el centro del círculo. El resultado es una fuerza neta y una aceleración de magnitud constante y dirigidas al centro del círculo. La rapidez del disco es constante, así que es un movimiento circular uniforme, como vimos en la sección 3.4.

La figura 4.15a muestra otro experimento que explora la relación entre la aceleración y fuerza neta. Aplicamos una fuerza horizontal constante a un disco de hockey en una superficie horizontal sin fricción, usando la balanza de resorte descrita en la sección 4.1, con el resorte estirado una cantidad constante. Al igual que en las figuras 4.13b y 4.13c, esta fuerza horizontal es la fuerza neta sobre el disco. Si alteramos la magnitud de la fuerza neta, la aceleración cambia en la misma proporción. Al duplicar la fuerza neta se duplica la aceleración (figura 4.15b); al reducir a la mitad la fuerza neta se reduce a la mitad la aceleración (figura 4.15c), y así sucesivamente. Muchos experimentos semejantes muestran que *para un cuerpo dado, la magnitud de la aceleración es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza neta que actúa sobre él.*

Masa y fuerza

Nuestros resultados indican que para un cuerpo dado, el *cociente* de la magnitud $|\Sigma\vec{F}|$ de la fuerza neta entre la magnitud $a = |\vec{a}|$ de la aceleración es constante, sin importar la magnitud de la fuerza neta. Llamamos a este cociente *masa inercial*, o simplemente **masa**, del cuerpo y la denotamos con m. Es decir,

$$m = \frac{|\Sigma\vec{F}|}{a} \quad \text{o} \quad |\Sigma\vec{F}| = ma \quad \text{o} \quad a = \frac{|\Sigma\vec{F}|}{m} \tag{4.5}$$

La masa es una medida cuantitativa de la inercia, que se mencionó en la sección 4.2. La última de las ecuaciones (4.5) indica que cuanto mayor sea su masa, más se "resiste" un cuerpo a ser acelerado. Cuando sostenemos en la mano una fruta en el supermercado y la movemos un poco hacia arriba y hacia abajo para estimar su masa, estamos aplicando una fuerza para saber cuánto acelera la fruta hacia arriba y hacia abajo. Si una fuerza causa una aceleración grande, la fruta tiene una masa pequeña; si la misma fuerza causa sólo una aceleración pequeña, la fruta tiene una masa grande. De la misma forma, si golpeamos una pelota de ping-pong y un balón de baloncesto con la misma fuerza, el balón tendrá una aceleración mucho menor porque su masa es mucho mayor.

La unidad de masa en el SI es el **kilogramo**. En la sección 1.3 dijimos que el kilogramo se define oficialmente como la masa de un cilindro de aleación platino-iridio que se mantiene en una bóveda cerca de París. Podemos usar este kilogramo estándar, junto con la ecuación (4.5), para definir el **newton**:

Un newton es la cantidad de fuerza neta que proporciona una aceleración de 1 metro por segundo al cuadrado a un cuerpo con masa de 1 kilogramo.

Podemos usar esta definición para calibrar las balanzas de resorte y otros instrumentos que miden fuerzas. Por la forma en que definimos el newton, está relacionado con las unidades de masa, longitud y tiempo. Para que la ecuación (4.5) sea dimensionalmente congruente, debe cumplirse que

$$1 \text{ newton} = (1 \text{ kilogramo})\,(1 \text{ metro por segundo al cuadrado})$$

o bien,

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

Usaremos esta relación muchas veces en los próximos capítulos, así que no la olvide.

También podemos usar la ecuación (4.5) para comparar una masa con la masa estándar y así *medir* masas. Suponga que aplica una fuerza neta constante $\Sigma\vec{F}$ a un cuerpo de masa conocida m_1 y observa una aceleración de magnitud a_1 (figura 4.16a). Luego aplica la misma fuerza a otro cuerpo con masa desconocida m_2 y observa una aceleración de magnitud a_2 (figura 4.16b). Entonces, según la ecuación (4.5),

$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$

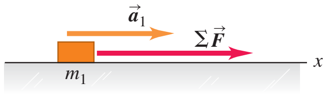
$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2} \qquad \text{(misma fuerza neta)} \tag{4.6}$$

Para la misma fuerza neta, el cociente de las masas de dos cuerpos es el inverso del cociente de sus aceleraciones. En principio, podríamos usar la ecuación (4.6) para medir una masa desconocida m_2, pero suele ser más fácil determinar la masa indirectamente midiendo el *peso* del cuerpo. Volveremos a esto en la sección 4.4.

Cuando dos cuerpos de masas m_1 y m_2 se unen, vemos que la masa del cuerpo compuesto siempre es $m_1 + m_2$ (figura 4.16c). Esta propiedad aditiva de la masa tal vez parezca obvia, pero debe verificarse experimentalmente. En última instancia, la masa de un cuerpo está relacionada con el número de protones, electrones y neutrones que contiene. Ésta no sería una buena forma de *definir* la masa porque no hay manera práctica de contar tales partículas. No obstante, el concepto de masa es la forma más fundamental de caracterizar la cantidad de materia que un cuerpo contiene.

4.16 Para una fuerza neta constante dada $\sum\vec{F}$, la aceleración es inversamente proporcional a la masa del cuerpo. Las masas se suman como escalares ordinarios.

a) Una fuerza $\sum\vec{F}$ conocida provoca que un objeto con masa m_1 tenga una aceleración $\vec{a}_1$.



b) Al aplicar la misma fuerza $\sum\vec{F}$ a un segundo objeto, se percibe la aceleración que nos permite medir la masa.

c) Cuando se unen dos objetos, el mismo procedimiento muestra que su masa compuesta es la suma de sus masas individuales.

Enunciado de la segunda ley de Newton

Nos hemos cuidado de decir que la fuerza *neta* sobre un cuerpo hace que éste se acelere. Los experimentos demuestran que si se aplica a un cuerpo una combinación de fuerzas $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$, ..., el cuerpo tendrá la misma aceleración (magnitud y dirección) que si se aplicara una sola fuerza igual a la suma vectorial $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots$. Es decir, el principio de superposición de las fuerzas (véase la figura 4.4) también se cumple cuando la fuerza neta no es cero y el cuerpo se está acelerando.

La ecuación (4.5) relaciona la magnitud de la fuerza neta sobre un cuerpo con la magnitud de la aceleración que produce. También vimos que la dirección de la fuerza neta es igual a la dirección de la aceleración, sea la trayectoria del cuerpo recta o curva. Newton juntó todas estas relaciones y resultados experimentales en un sólo enunciado conciso que ahora llamamos *segunda ley del movimiento de Newton*:

Segunda ley del movimiento de Newton: si una fuerza externa neta actúa sobre un cuerpo, éste se acelera. La dirección de aceleración es la misma que la dirección de la fuerza neta. El vector de fuerza neta es igual a la masa del cuerpo multiplicada por su aceleración.

En símbolos,

$$\sum\vec{F} = m\vec{a} \qquad \text{(segunda ley del movimiento de Newton)} \tag{4.7}$$

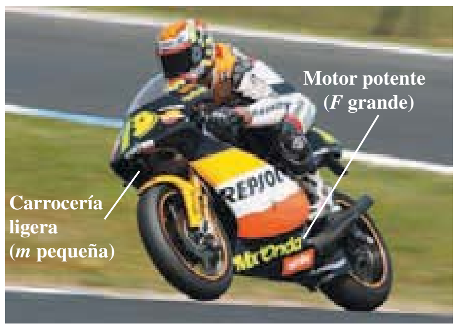
Un enunciado alterno establece que la aceleración de un cuerpo es la misma dirección que la fuerza neta que actúa sobre él, y es igual a la fuerza neta dividida entre la masa del cuerpo.

$$\vec{a} = \frac{\sum\vec{F}}{m}$$

La segunda ley de Newton es una ley fundamental de la naturaleza, la relación básica entre fuerza y movimiento. Casi todo el resto del capítulo, y todo el que sigue, se dedica a aprender a aplicar este principio en diversas situaciones.

La ecuación (4.7) tiene muchas aplicaciones prácticas (figura 4.17). De hecho, el lector la ha estado usando toda su vida para medir la aceleración de su cuerpo. En su oído interno, microscópicas células de pelo detectan la magnitud y dirección de la fuerza que deben ejercer para acelerar pequeñas membranas junto con el resto del cuerpo. Por la segunda ley de Newton, la aceleración de las membranas —y por ende

4.17 El diseño de las motocicletas de alto desempeño depende fundamentalmente de la segunda ley de Newton. Para aumentar al máximo la aceleración hacia adelante, el diseñador hace a la motocicleta lo más ligera posible (es decir, reduce la masa al mínimo) y utiliza el motor más potente posible (es decir, aumenta al máximo la fuerza hacia adelante).



la de todo el cuerpo— es proporcional a esta fuerza y tiene la misma dirección. Así, ¡usted puede sentir la magnitud y dirección de su aceleración incluso con los ojos cerrados!

ActivPhysics ONLINE
2.1.3 Cambio de tensión
2.1.4 Deslizamiento en una rampa

Uso de la segunda ley de Newton

Hay al menos cuatro aspectos de la segunda ley de Newton que merecen atención especial. Primero, la ecuación (4.7) es *vectorial*. Normalmente la usaremos en forma de componentes, con una ecuación para cada componente de fuerza y la aceleración correspondiente:

$$\sum F_x = ma_x \qquad \sum F_y = ma_y \qquad \sum F_z = ma_z \qquad \text{(segunda ley del movimiento de Newton)} \tag{4.8}$$

Este conjunto de ecuaciones de componentes equivale a la ecuación vectorial única (4.7). Cada componente de la fuerza total es igual a la masa multiplicada por la componente correspondiente de la aceleración.

Segundo, el enunciado de la segunda ley de Newton se refiere a fuerzas *externas*, es decir, fuerzas ejercidas sobre el cuerpo por otros cuerpos de su entorno. Un cuerpo no puede afectar su propio movimiento ejerciendo una fuerza sobre sí mismo; si fuera posible, ¡podríamos levantarnos hasta el techo tirando de nuestro cinturón! Por ello, sólo incluimos fuerzas externas en $\sum \vec{F}$ en las ecuaciones (4.7) y (4.8).

Tercero, las ecuaciones (4.7) y (4.8) sólo son válidas si la masa m es *constante*. Es fácil pensar en sistemas con masa cambiante, como un camión tanque con fugas, un cohete o un vagón de ferrocarril en movimiento que se carga con carbón; no obstante, tales sistemas se manejan mejor usando el concepto de cantidad de movimiento que veremos en el capítulo 8.

Por último, la segunda ley de Newton sólo es válida en marcos de referencia inerciales, al igual que la primera. Por lo tanto, la ley no es válida en el marco de referencia de los vehículos en aceleración de la figura 4.11; con respecto a esos marcos, la pasajera acelera aunque la fuerza neta sobre ella sea cero. Normalmente supondremos que la Tierra es una aproximación adecuada a un marco inercial, aunque estrictamente no lo es por su rotación y movimiento orbital.

CUIDADO **$m\vec{a}$ no es una fuerza** Tenga en cuenta que aun cuando el vector $m\vec{a}$ sea igual a la suma vectorial $\sum \vec{F}$ de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, el vector $m\vec{a}$ *no* es una fuerza. La aceleración es un *resultado* de una fuerza neta distinta de cero; no es una fuerza por sí misma. Es "sentido común" pensar que hay una "fuerza de aceleración" que nos empuja contra el asiento cuando nuestro automóvil acelera hacia delante desde el reposo; pero *no existe tal fuerza*; más bien, nuestra inercia nos hace tender a permanecer en reposo con respecto a la Tierra, y el auto acelera a nuestro alrededor (véase la figura 4.11a). Esta confusión de "sentido común" surge al tratar de aplicar la segunda ley de Newton donde no es válida: en un marco de referencia no inercial de un automóvil en aceleración. Nosotros sólo examinaremos el movimiento en marcos de referencia *inerciales*.

En este capítulo, aprenderemos cómo usar la segunda ley de Newton, empezando con ejemplos del movimiento rectilíneo. Después, en el capítulo 5 consideraremos casos más generales y desarrollaremos estrategias más detalladas para resolver problemas.

Ejemplo 4.4 Cálculo de aceleración por una fuerza

Un trabajador aplica una fuerza horizontal constante con magnitud de 20 N a una caja con masa de 40 kg que descansa en un piso plano con fricción despreciable. ¿Qué aceleración sufre la caja?

SOLUCIÓN

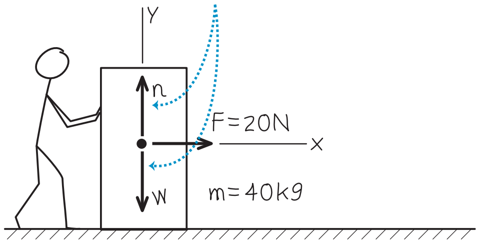
IDENTIFICAR: En este problema intervienen fuerza y aceleración. Siempre que usted se tope con un problema de esta clase, abórdelo empleando la segunda ley de Newton.

PLANTEAR: En *cualquier* problema que implique fuerzas, el primer paso consiste en elegir un sistema de coordenadas y después identificar todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo en cuestión.

Suele ser conveniente elegir un eje que apunte en la dirección de la aceleración del cuerpo o en la dirección opuesta que, en este caso, es horizontal. Por lo tanto, tomamos el eje $+x$ en la dirección de la fuerza horizontal aplicada (es decir, la dirección en la que se acelera la caja), y el $+y$, hacia arriba (figura 4.18b). En casi todos los problemas de

4.18 Nuestro esquema para este problema. Las baldosas bajo la caja están recién enceradas, así que suponga que la fricción es despreciable.

La caja no tiene aceleración vertical, de manera que las componentes verticales de la fuerza neta suman cero. Sin embargo, para una mejor perspectiva, mostramos las fuerzas verticales que actúan sobre la caja.



fuerzas que veremos (incluido éste), todos los vectores de fuerza están en un plano, así que no se usa el eje z.

Las fuerzas que actan sobre la caja son i) la f uerza horizontal $\vec{F}$ ejercida por el trabajador, cuya magnitud es 20 N; ii) el peso $\vec{w}$ de la caja, es decir, la fuerza hacia abajo producida por la atracción gravitacional que ejerce la tierra, y iii) la fuerza de soporte hacia arriba $\vec{n}$ ejercida por la superficie horizontal plana. Como en la sección 4.2, llamamos a $\vec{n}$ fuerza *normal* porque es perpendicular a la superficie de contacto. (Usamos una n cursiva para evitar confusiones con la abreviatura N, de newton.) Consideramos que la fricción es despreciable, así que no hay fuerza de fricción.

Puesto que la caja no se mueve verticalmente, la aceleración y es cero: $a_y = 0$. Nuestra incógnita es la componente x de la aceleración, a_x. La obtendremos usando la segunda ley de Newton en forma de componentes, dada por la ecuación (4.8).

EJECUTAR: Por la figura 4.18, sólo la fuerza de 20 N tiene una componente x distinta de cero. Por lo tanto, la primera relación de las ecuaciones (4.8) nos indica que

$$\sum F_x = F = 20\text{ N} = ma_x$$

Así, la componente x de la aceleración es

$$a_x = \frac{\sum F_x}{m} = \frac{20\text{ N}}{40\text{ kg}} = \frac{20\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2}{40\text{ kg}} = 0.50\text{ m/s}^2$$

EVALUAR: La aceleración apunta en la dirección $+x$, igual que la fuerza neta. La fuerza neta es constante, así que la aceleración es constante. Si conocemos la posición y velocidad iniciales de la caja, podremos calcular su posición y velocidad en cualquier instante posterior con las ecuaciones de movimiento con aceleración constante del capítulo 2.

Cabe señalar que, para obtener a_x, no tuvimos que usar la componente y de la segunda ley de Newton, ecuación (4.8), $\sum F_y = ma_y$. Utilizando esta ecuación, ¿puede el lector demostrar que la magnitud n de la fuerza normal en esta situación es igual al peso de la caja?

Ejemplo 4.5 Cálculo de la fuerza a partir de la aceleración

Una camarera empuja una botella de salsa de tomate con masa de 0.45 kg a la derecha sobre un mostrador horizontal liso. Al soltarla, la botella tiene una rapidez de 2.8 m/s, pero se frena por la fuerza de fricción horizontal constante ejercida por el mostrador. La botella se desliza 1.0 m antes de detenerse. ¿Qué magnitud y dirección tiene la fuerza de fricción que actúa sobre la botella?

SOLUCIÓN

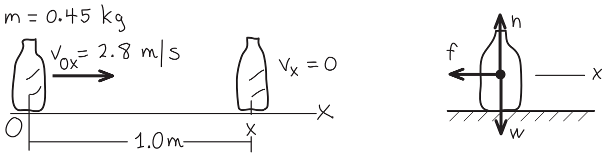
IDENTIFICAR: Al igual que el ejemplo anterior, en este problema intervienen fuerzas y aceleración (el frenado de la botella de salsa), así que usaremos la segunda ley de Newton para resolverlo.

PLANTEAR: Como en el ejemplo 4.4, lo primero es elegir un sistema de coordenadas e identificar las fuerzas que actúan sobre el cuerpo (en este caso, la botella de salsa). Como indica la figura 4.19, elegimos el eje $+x$ en la dirección en que se desliza la botella, y tomaremos como origen el punto donde la botella sale de la mano de la camarera a 2.8 m/s. En la figura 4.19 se muestran también las fuerzas que actúan sobre la botella. La fuerza de fricción $\vec{f}$ frena la botella, así que su dirección debe ser opuesta a la dirección de la velocidad (véase la figura 4.13c).

Nuestra incógnita es la magnitud f de la fuerza de fricción. La obtendremos usando la componente x de la segunda ley de Newton, ecuación (4.8). Para ello, primero necesitamos conocer la componente x de la aceleración de la botella, a_x. No nos dan el valor de a_x en el problema, pero nos indican que la fuerza de fricción es constante. Por lo tanto, la aceleración también es constante, así que calculamos a_x usando una de las fórmulas para aceleración constante de la sección 2.4. Dado que conocemos la coordenada x y la velocidad x inicial de la botella

4.19 Nuestro esquema para este problema.

Dibujamos un diagrama para el movimiento de la botella y uno que muestra las fuerzas sobre la botella.



($x_0 = 0$, $v_{0x} = 2.8$ m/s), así como su coordenada x y velocidad final x ($x = 1.0$ m, $v_x = 0$), la ecuación más fácil de usar para determinar a_x es la ecuación (2.13), $v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x(x - x_0)$.

EJECUTAR: Por la ecuación (2.13),

$$v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x(x - x_0)$$

$$a_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2(x - x_0)} = \frac{(0\text{ m/s})^2 - (2.8\text{ m/s})^2}{2(1.0\text{ m} - 0\text{ m})} = -3.9\text{ m/s}^2$$

El signo negativo indica que la aceleración es a la *izquierda*; la velocidad tiene la dirección opuesta a la aceleración, como debe ser, pues la botella se está frenando. La fuerza neta en la dirección x es $-f$ de la fuerza de fricción, así que

$$\sum F_x = -f = ma_x = (0.45\text{ kg})(-3.9\text{ m/s}^2)$$
$$= -1.8\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2 = -1.8\text{ N}$$

continúa

Otra vez, el signo negativo indica que la fuerza sobre la botella está dirigida a la izquierda. La magnitud de la fuerza de fricción es $f = 1.8$ N. Recuerde que ¡las magnitudes *siempre* son positivas!

EVALUAR: Elegimos el eje $+x$ en la dirección del movimiento de la botella, así que a_x fue negativa. Para verificar su resultado, lo invitamos a repetir el cálculo con el eje $+x$ en dirección *opuesta* al movimiento (a la izquierda en la figura 4.19), así que a_x positiva. En este caso, debería hallar que $\sum F_x$ es igual a $+f$ (porque ahora la fuerza de fricción está en la dirección $+x$), que a la vez es igual a $+1.8$ N. Las *magnitudes* de fuerzas que obtenga (que siempre son números positivos) ¡nunca deberán depender de los ejes de coordenadas que elija!

4.20 En inglés, slug significa “babosa”. Sin embargo, la unidad inglesa de masa nada tiene que ver con este animal. Una babosa de jardín común tiene una masa de unos 15 gramos, lo que equivale aproximadamente a 10^{-3} slug.

Notas acerca de las unidades

Conviene hablar un poco acerca de las unidades. En el sistema métrico cgs (que no usamos aquí), la unidad de masa es el gramo (10^{-3} kg), igual a 10^{-3} kg, y para la distancia es el centímetro, igual a 10^{-2} m. La unidad cgs de fuerza se llama *dina*:

$$1 \text{ dina} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2 = 10^{-5} \text{ N}$$

En el sistema británico, la unidad de fuerza es la *libra* (o libra-fuerza) y la unidad de masa es el *slug* (figura 4.20). La unidad de aceleración es el pie por segundo al cuadrado, así que

$$1 \text{ libra} = 1 \text{ slug} \cdot \text{ft/s}^2$$

La definición oficial de libra es

$$1 \text{ libra} = 4.448221615260 \text{ newtons}$$

Conviene recordar que una libra es aproximadamente 4.4 N y un newton es aproximadamente 0.22 lb. Otro hecho útil: un cuerpo con una masa de 1 kg tiene un peso de aproximadamente 2.2 1b en la superficie terrestre.

Las unidades de fuerza, masa y aceleración en los tres sistemas se resumen en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Unidades de fuerza, masa y aceleración

Sistemas de unidades	Fuerza	Masa	Aceleración
SI	newton (N)	kilogramo (kg)	m/s^2
cgs	dina (din)	gramo (g)	cm/s^2
Británico	libra (lb)	slug	ft/s^2

Evalúe su comprensión de la sección 4.3 Ordene las siguientes situaciones de acuerdo con la magnitud de la aceleración del objeto, de la más baja a la más alta. ¿Hay casos que tengan la misma magnitud de aceleración? i) Sobre un objeto de 2.0 kg actúa una fuerza neta de 2.0 N; ii) sobre un objeto de 2.0 kg actúa una fuerza neta de 8.0 N; iii) sobre un objeto de 8.0 kg actúa una fuerza neta de 2.0 N; iv) sobre un objeto de 8.0 kg actúa una fuerza neta de 8.0 N.

4.4 Masa y peso

El *peso* de un cuerpo es una fuerza que nos es familiar: es la fuerza con que la Tierra atrae al cuerpo. (Si usted estuviera en otro planeta, su peso sería la fuerza gravitacional que ese planeta ejerce sobre usted.) Por desgracia, es común usar incorrecta e indistintamente los términos *masa* y *peso* en la conversación cotidiana. Es absolutamente indispensable que el lector entienda claramente las diferencias entre estas dos cantidades físicas.

La masa caracteriza las propiedades *inerciales* de un cuerpo; es lo que mantiene a la vajilla en la mesa cuando sacamos el mantel de un tirón. A mayor masa, se necesitará más fuerza para causar una aceleración dada; esto se refleja en la segunda ley de Newton, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$.

El peso, en cambio, es una *fuerza* ejercida sobre un cuerpo por la atracción de la Tierra. La masa y el peso están relacionados: los cuerpos con masa grande tienen un peso grande. Sería difícil lanzar un peñasco por su gran *masa*, y sería difícil levantarlo del suelo por su gran *peso*.

Para entender la relación entre masa y peso, note que un cuerpo en caída libre tiene una aceleración igual a g y, por la segunda ley de Newton, una fuerza debe producir esa aceleración. Si un cuerpo de 1 kg cae con una aceleración de 9.8 m/s^2, la fuerza requerida tiene la magnitud

$$F = ma = (1 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.8 \text{ N}$$

Activ Physics ONLINE
2.9 Salto con garrocha

La fuerza que hace que el cuerpo se acelere hacia abajo es su peso. Cualquier cuerpo con masa de 1 kg, cercano a la superficie de la Tierra, *debe* tener un peso de 9.8 N para sufrir la aceleración que observamos en la caída libre. En términos más generales, un cuerpo de masa m debe tener un peso de magnitud w dada por

$$w = mg \qquad \text{(magnitud del peso de un cuerpo de masa } m\text{)} \tag{4.9}$$

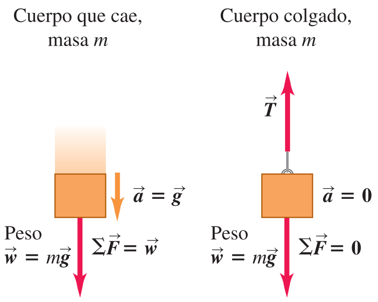
Por lo tanto, la magnitud w del peso de un cuerpo es directamente proporcional a su masa m. El peso de un cuerpo es una fuerza, una cantidad vectorial, y podemos escribir la ecuación (4.9) como ecuación vectorial (figura 4.21):

$$\vec{w} = m\vec{g} \tag{4.10}$$

Recuerde que g es la *magnitud* de $\vec{g}$, la aceleración debida a la gravedad, así que g siempre es positiva, por definición. Así, w, dada por la ecuación (4.9) es la *magnitud* del peso y también es positiva siempre.

CUIDADO **El peso de un cuerpo actúa en todo momento** Es importante entender que el peso de un cuerpo actúa sobre el cuerpo *todo el tiempo*, esté en caída libre o no. Si colgamos un objeto de una cadena, está en equilibrio y su aceleración es cero, pero su peso, dado por la ecuación (4.10) sigue tirando hacia abajo sobre él (figura 4.21). En este caso, la cadena tira del objeto hacia arriba con una fuerza ascendente. La *suma vectorial* de las fuerzas es cero, pero el peso continúa actuando.

4.21 La relación entre masa y peso.



- La relación entre masa y peso es: $\vec{w} = m\vec{g}$.
- La relación es la misma si un cuerpo está en caída o estacionario.

Ejemplo conceptual 4.6 Fuerza neta y aceleración en caída libre

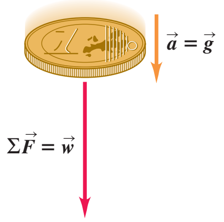
En el ejemplo 2.6 (sección 2.5), se dejó caer una moneda de un euro desde la Torre Inclinada de Pisa. Si suponemos caída libre, con efectos despreciables de la fricción con el aire, ¿cómo varía la fuerza neta sobre la moneda conforme ésta cae?

SOLUCIÓN

En caída libre, la aceleración $\vec{a}$ de la moneda es constante e igual a $\vec{g}$. Por la segunda ley de Newton, la fuerza neta $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ también es constante e igual a $m\vec{g}$, que es el peso $\vec{w}$ de la moneda (figura 4.22). La velocidad de la moneda cambia durante la caída, pero la fuerza neta que actúa sobre ella permanece constante. Si esto le sorprende, es quizá porque usted aún tiene la idea de "sentido común" errónea de que una mayor velocidad implica mayor fuerza. Si es así, debería volver a leer el ejemplo conceptual 4.3.

La fuerza neta sobre una moneda en caída libre es constante incluso si inicialmente se lanza hacia arriba. La fuerza que nuestra mano ejerce sobre la moneda al lanzarla es una fuerza de contacto, y desaparece apenas la moneda pierde contacto con la mano. De aquí en adelante, la única fuerza que actúa sobre la moneda es su peso $\vec{w}$.

4.22 La aceleración de un objeto en caída libre es constante, lo mismo que la fuerza neta que actúa sobre él.

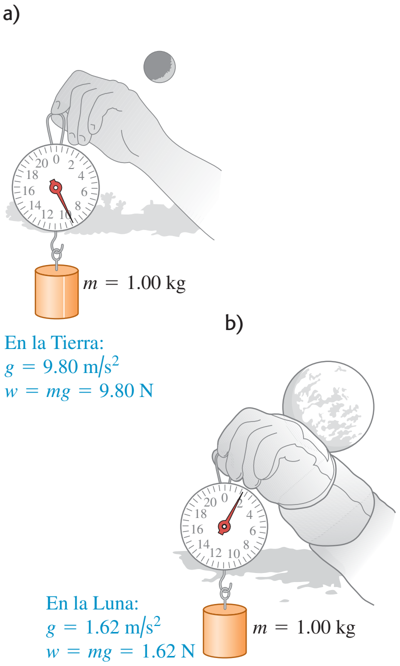


Variación de g con la ubicación

Usaremos $g = 9.80\ \text{m/s}^2$ para problemas en la Tierra (o, si los demás datos del problema se dan con sólo dos cifras significativas, $g = 9.8\ \text{m/s}^2$). En realidad, el valor de g varía un poco en diferentes puntos de la superficie terrestre, entre 9.78 y 9.82 m/s^2, porque la Tierra no es perfectamente esférica y por los efectos de su rotación y el movimiento orbital. En un punto donde $g = 9.80\ \text{m/s}^2$, el peso de un kilogramo estándar es $w = 9.80$ N. En un punto donde $g = 9.78\ \text{m/s}^2$, el peso es $w = 9.78$ N pero la masa sigue siendo 1 kg. El peso de un cuerpo varía de un lugar a otro; la masa no.

Si llevamos un kilogramo estándar a la superficie lunar, donde la aceleración en caída libre (igual al valor de g en la superficie lunar) es 1.62 m/s^2, su peso será 1.62 N,

4.23 El peso de una masa de 1 kilogramo a) en la Tierra y b) en la Luna.



pero su masa será aún 1 kg (figura 4.23). Un astronauta de 80.0 kg pesa (80.0 kg)($9.80\ \mathrm{m/s^2}$) = 784 N en la Tierra, pero en la Luna sólo pesaría (80.0 kg)($1.62\ \mathrm{m/s^2}$) = 130 N. En el capítulo 12 veremos cómo calcular el valor de g en la superficie lunar o en otros planetas.

Medición de masa y peso

En la sección 4.3 describimos una forma de comparar masas comparando sus aceleraciones cuando se someten a la misma fuerza neta. Por lo regular, no obstante, la forma más fácil de medir la masa de un cuerpo consiste en medir su peso, generalmente comparándolo con un estándar. Por la ecuación (4.9), dos cuerpos que tienen el mismo peso en cierto lugar también tienen la misma masa. Podemos comparar pesos con mucha precisión; la conocida balanza de brazos iguales (figura 4.24) puede determinar con gran precisión (hasta 1 parte en 10^6) si los pesos de dos cuerpos son iguales y, por lo tanto, si sus masas lo son. (Este método no funciona en la aparente "gravedad cero" del espacio exterior. En cambio, aplicamos una fuerza conocida a un cuerpo, medimos su aceleración y calculamos la masa como el cociente de la fuerza entre la aceleración. Este método, o una variación, se usa para medir la masa de los astronautas en las estaciones espaciales en órbita, así como las masas de partículas atómicas y subatómicas.)

El concepto de masa desempeña dos papeles un tanto distintos en mecánica. El peso de un cuerpo (la fuerza gravitacional que actúa sobre él) es proporcional a su masa; podemos llamar *masa gravitacional* a la propiedad relacionada con interacciones gravitacionales. Por otro lado, podemos llamar *masa inercial* a la propiedad inercial que aparece en la segunda ley de Newton. Si estas dos cantidades fueran distintas, la aceleración debida a la gravedad bien podría ser distinta para diferentes cuerpos. Sin embargo, experimentos de gran precisión han concluido que *son* iguales, con una precisión mejor que 1 parte en 10^{12}.

CUIDADO **No confunda masa con peso** Frecuentemente podemos usar mal las unidades del SI para masa y peso en la vida cotidiana. Es muy común decir "esta caja pesa 6 kg". Lo que queremos decir es que la *masa* de la caja, la cual quizá se determinó indirectamente *pesándola*, es de 6 kg. ¡Tenga cuidado de evitar este error! En el SI, el peso (una fuerza) se mide en newtons; y la masa, en kilogramos.

Ejemplo 4.7 Masa y peso

Un Rolls-Royce Phantom de 2.49×10^4 N que viaja en la dirección $+x$ se detiene abruptamente; la componente x de la fuerza neta que actúa sobre él es -1.83×10^4 N. ¿Qué aceleración tiene?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Usaremos otra vez la segunda ley de Newton para relacionar fuerza y aceleración. Para ello, necesitamos conocer la masa del automóvil. Sin embargo, dado que el newton es una unidad de fuerza, sabemos que 2.49×10^4 N es el *peso* del auto, no su masa. Por lo tanto, tendremos que usar también la relación entre la masa y el peso de un cuerpo.

PLANTEAR: Nuestra incógnita es la componente x de la aceleración del automóvil, a_x (El movimiento es exclusivamente en la dirección x) Usaremos la ecuación (4.9) para determinar la masa del auto a partir de su peso; después, usaremos la componente x de la segunda ley de Newton, de la ecuación (4.8), para calcular a_x.

EJECUTAR: La masa m del auto es

$$m = \frac{w}{g} = \frac{2.49 \times 10^4\ \mathrm{N}}{9.80\ \mathrm{m/s^2}} = \frac{2.49 \times 10^4\ \mathrm{kg \cdot m/s^2}}{9.80\ \mathrm{m/s^2}} = 2540\ \mathrm{kg}$$

Entonces, $\sum F_x = ma_x$ nos da

$$a_x = \frac{\sum F_x}{m} = \frac{-1.83 \times 10^4\ \mathrm{N}}{2540\ \mathrm{kg}} = \frac{-1.83 \times 10^4\ \mathrm{kg \cdot m/s^2}}{2540\ \mathrm{kg}} = -7.20\ \mathrm{m/s^2}$$

EVALUAR: El signo negativo implica que el vector aceleración apunta en la dirección $-x$. Esto es lógico: el auto se está moviendo en la dirección $+x$ y está frenando.

Cabe señalar que esta aceleración también puede escribirse como $-0.735g$. Además, -0.735 es el cociente de -1.83×10^4 N (la componente x de la fuerza neta) y 2.49×10^4 N (el peso). Efectivamente, la aceleración de un cuerpo expresada como múltiplo de g siempre es igual al cociente de la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo, entre su peso. ¿Entiende por qué?