LEYES DEL MOVIMIENTO DE NEWTON

4

?El niño que está de pie empuja al niño que está sentado en el columpio. ¿El niño sentado empuja hacia atrás? Si acaso, ¿empuja con la misma cantidad de fuerza o con una cantidad diferente?

METAS DE APRENDIZAJE

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

- Lo que significa el concepto de fuerza en la física y por qué las fuerzas son vectores.
- La importancia de la fuerza neta sobre un objeto y lo que sucede cuando la fuerza neta es cero.
- La relación entre la fuerza neta sobre un objeto, la masa del objeto y su aceleración.
- La manera en que se relacionan las fuerzas que dos objetos ejercen entre sí.

En los dos últimos capítulos vimos cómo describir el movimiento en una, dos o tres dimensiones. Sin embargo, ¿cuáles son las *causas* del movimiento? Por ejemplo, ¿cómo puede un remolcador empujar un trasatlántico que es mucho más pesado que él? ¿Por qué es más difícil controlar un automóvil en hielo mojado que en concreto seco? Las respuestas a estas preguntas y a otras similares nos llevan al tema de la **dinámica**, es decir, la relación entre el movimiento y las fuerzas que lo causan. En los dos capítulos anteriores estudiamos la *cinemática*, el lenguaje para describir el movimiento. Ahora estamos en condiciones de pensar en lo que hace que los cuerpos se muevan como lo hacen.

En este capítulo usaremos dos conceptos nuevos, la *fuerza* y la *masa*, para analizar los principios de la dinámica, los cuales están establecidos en sólo tres leyes que fueron claramente enunciadas por Sir Isaac Newton (1642-1727), quien las publicó, por primera vez, en 1687 en su *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ("Principios matemáticos de la filosofía natural"). Tales enunciados se conocen como **leyes del movimiento de Newton**. La primera ley dice que si la fuerza neta sobre un cuerpo es cero, su movimiento no cambia. La segunda ley relaciona la fuerza con la aceleración cuando la fuerza neta *no* es cero. La tercera ley es una relación entre las fuerzas que ejercen dos cuerpos que interactúan entre sí.

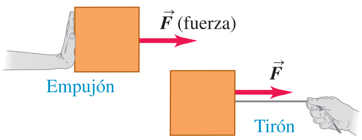
Las leyes de Newton no son producto de deducciones matemáticas, sino una síntesis que los físicos han descubierto al realizar un sinnúmero de *experimentos* con cuerpos en movimiento. (Newton usó las ideas y las observaciones que muchos científicos hicieron antes que él, como Copérnico, Brahe, Kepler y especialmente Galileo Galilei, quien murió el mismo año en que nació Newton.) Dichas leyes son verdaderamente fundamentales porque no pueden deducirse ni demostrarse a partir de otros principios. Las leyes de Newton son la base de la **mecánica clásica** (también llamada **mecánica newtoniana**); al usarlas seremos capaces de comprender los tipos de movimiento más conocidos. Las leyes de Newton requieren modificación sólo en situaciones que implican rapideces muy altas (cercanas a la rapidez de la luz) o para tamaños muy pequeños (dentro del átomo).

El planteamiento de las leyes de Newton es sencillo, pero muchos estudiantes las encuentran difíciles de comprender y manejar. La razón es que, antes de estudiar física, hemos pasado años caminando, lanzando pelotas, empujando cajas y haciendo muchas otras cosas que implican movimiento. Al hacerlo, hemos desarrollado ciertas ideas de "sentido común" con respecto al movimiento y sus causas. Sin embargo, muchas de esas ideas no resisten un análisis lógico. Una buena parte de la tarea de este capítulo —y del resto de nuestro estudio— es ayudarnos a reconocer cuándo las ideas de "sentido común" nos llevan al error, y cómo ajustar nuestro entendimiento del mundo físico de modo que sea congruente con lo que nos dicen los experimentos.

4.1 Fuerza e interacciones

4.1 Algunas propiedades de las fuerzas.

- Una fuerza es un empujón o un tirón.
- Una fuerza es una interacción entre dos objetos o entre un objeto y su ambiente.
- Una fuerza es una cantidad vectorial con magnitud y dirección.



En el lenguaje cotidiano, **fuerza** es un empujón o un tirón. Una mejor definición es que una fuerza es una *interacción* entre dos cuerpos o entre un cuerpo y su ambiente (figura 4.1). Es la causa de por qué siempre nos referimos a la fuerza que un cuerpo *ejerce* sobre un segundo cuerpo. Cuando empujamos un automóvil atascado en la nieve, ejercemos una fuerza sobre el auto; un cable de acero ejerce una fuerza sobre la viga que levanta en una construcción, etcétera. Como se muestra en la figura 4.1, la fuerza es una cantidad *vectorial*: podemos empujar un cuerpo o tirar de él en diferentes direcciones.

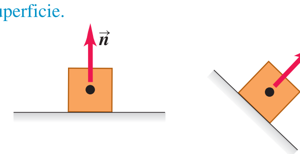
Cuando una fuerza implica contacto directo entre dos cuerpos, como un empujón o un tirón que usted ejerce con la mano sobre un objeto, la llamamos **fuerza de contacto**. Las figuras 42a, 4.2b y 4.2c muestran tres tipos comunes de fuerzas de contacto. La **fuerza normal** (figura 4.2a) es ejercida sobre un objeto por cualquier superficie con la que esté en contacto. El adjetivo *normal* significa que la fuerza siempre actúa perpendicular a la superficie de contacto, sin importar el ángulo de esa superficie. En cambio, la **fuerza de fricción** (figura 4.2b) ejercida sobre un objeto por una superficie actúa *paralela* a la superficie, en la dirección opuesta al deslizamiento. La fuerza de tirón ejercida por una cuerda o por un cordel estirado sobre un objeto al cual se ata se llama **fuerza de tensión** (figura 4.2c). Cuando usted tira de la correa de su perro, la fuerza que tira del cuello de la mascota es una fuerza de tensión.

Además de las fuerzas de contacto, también hay **fuerzas de largo alcance** que actúan aunque los cuerpos estén separados. La fuerza entre dos imanes es un ejemplo de este tipo de fuerza, así como la gravedad (figura 4.2d); la Tierra atrae hacia sí cualquier objeto que se deje caer, incluso cuando no haya contacto directo entre el objeto y la Tierra. La fuerza de atracción gravitacional que la Tierra ejerce sobre un cuerpo se llama **peso** del cuerpo.

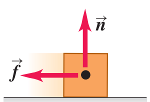
Por lo tanto, para describir una fuerza vectorial $\vec{F}$, debemos indicar su *dirección* de acción y su *magnitud*, la cantidad que describe "cuánto" o "qué tan tanto" la fuerza empuja o tira. La unidad SI de magnitud de fuerza es el *newton*, que se abrevia N. (Daremos una definición precisa del newton en la sección 4.3.) La tabla 4.1 presenta algunas magnitudes de fuerza comunes.

4.2 Cuatro tipos de fuerzas comunes.

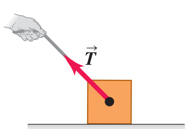
a) **Fuerza normal $\vec{n}$:** cuando un objeto descansa o se empuja sobre una superficie, ésta ejerce un empujón sobre el objeto que es perpendicular a la superficie.



b) **Fuerza de fricción $\vec{f}$:** además de la fuerza normal, una superficie puede ejercer una fuerza de fricción sobre un objeto que es paralela a la superficie.



c) **Fuerza de tensión $\vec{T}$:** una fuerza de tirón ejercida sobre un objeto por una cuerda, un cordón, etc.



d) **Peso $\vec{w}$:** el tirón de la gravedad sobre un objeto es una fuerza de largo alcance (una fuerza que actúa en una distancia).

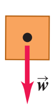


Tabla 4.1 Magnitudes de fuerzas comunes

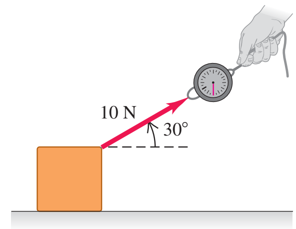
Fuerza gravitacional del Sol sobre la Tierra	3.5×10^{22} N
Empuje de un trasbordador espacial durante el lanzamiento	3.1×10^{7} N
Peso de una ballena azul grande	1.9×10^{6} N
Fuerza de tracción máxima de una locomotora	8.9×10^{5} N
Peso de un jugador de fútbol americano de 250 lb	1.1×10^{3} N
Peso de una manzana mediana	1 N
Peso de los huevos de insecto más pequeños	2×10^{-6} N
Atracción eléctrica entre el protón y el electrón de un átomo de hidrógeno	8.2×10^{-8} N
Peso de una bacteria muy pequeña	1×10^{-18} N
Peso de un átomo de hidrógeno	1.6×10^{-26} N
Peso de un electrón	8.9×10^{-30} N
Atracción gravitacional entre el protón y el electrón de un átomo de hidrógeno	3.6×10^{-47} N

Un instrumento común para medir magnitudes de fuerza es la *balanza de resorte*, que consiste en un resorte espiral protegido en una caja, con un puntero conectado a un extremo. Cuando se aplican fuerzas a los extremos del resorte, éste se estira y la cantidad de estiramiento depende de la fuerza. Puede establecerse una escala para el puntero y calibrarla usando varios cuerpos idénticos de 1 N de peso cada uno. Cuando uno, dos o más de estos cuerpos se suspenden simultáneamente de la balanza, la fuerza total que estira el resorte es 1 N, 2 N, etcétera, y podemos marcar las posiciones correspondientes del puntero 1 N, 2 N, etcétera. Luego podemos usar el instrumento para medir la magnitud de una fuerza desconocida. Se puede hacer un instrumento similar para fuerzas que empujen.

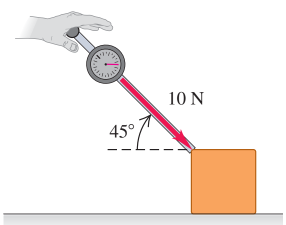
La figura 4.3 muestra una balanza de resorte que se utiliza para medir un tirón o un empujón que se aplica a una caja. En ambos casos, dibujamos un vector que represente la fuerza aplicada. Los rótulos indican la magnitud y la dirección de la fuerza; en tanto que la longitud del vector también indica la magnitud: cuanto más grande sea el vector, mayor será la magnitud de la fuerza.

4.3 Uso de una flecha como vector para indicar la fuerza que ejercemos cuando a) tiramos de un bloque con una cuerda, o b) lo empujamos con una vara.

a) Un tirón de 10 N dirigido a 30° por encima de la horizontal



b) Un empujón de 10 N dirigido a 45° por debajo de la horizontal



Superposición de fuerzas

Cuando se lanza una pelota, hay al menos dos fuerzas que actúan sobre ella: el empujón de la mano y el tirón hacia abajo de la gravedad. Los experimentos muestran que si dos fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ actúan al mismo tiempo en un punto A de un cuerpo (figura 4.4), el efecto sobre el movimiento del cuerpo es igual al de una sola fuerza $\vec{R}$ igual a la *suma vectorial* de las fuerzas originales: $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. En general, *el efecto de cualquier cantidad de fuerzas aplicadas a un punto de un cuerpo es el mismo de una sola fuerza igual a la suma vectorial de las fuerzas*. Éste es el importante principio de **superposición de fuerzas**.

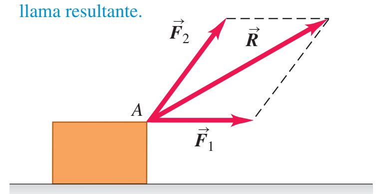
El descubrimiento experimental de que las fuerzas se combinan por suma vectorial es de enorme importancia. Usaremos este hecho muchas veces en nuestro estudio de la física, pues nos permite sustituir una fuerza por sus vectores componentes, como hicimos con los desplazamientos en la sección 1.8. Por ejemplo, en la figura 4.5a, la fuerza $\vec{F}$ actúa sobre un cuerpo en el punto O. Los vectores componentes de $\vec{F}$ en las direcciones Ox y Oy son $\vec{F}_x$ y $\vec{F}_y$. Si éstos se aplican simultáneamente, como en la figura 4.5b, el efecto es idéntico al de la fuerza original $\vec{F}$. *Cualquier fuerza puede ser sustituida por sus vectores componentes, actuando en el mismo punto*.

Suele ser más conveniente describir una fuerza $\vec{F}$ en términos de sus componentes x y y, F_x y F_y en vez de sus vectores componentes (recuerde de la sección 1.8 que los *vectores componentes* son vectores, pero las *componentes* sólo son números). En el caso de la figura 4.5, F_x y F_y son ambas positivas; para otras orientaciones de $\vec{F}$, cualquiera de ellas puede ser negativa o cero.

Ninguna regla establece que los ejes de coordenadas deben ser verticales y horizontales. En la figura 4.6 un bloque de piedra es arrastrado rampa arriba por una fuerza $\vec{F}$, representada por sus componentes F_x y F_y paralela y perpendicular a la rampa inclinada.

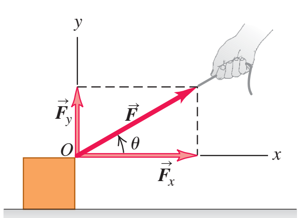
4.4 Superposición de fuerzas.

Dos fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ que actúan sobre un punto A tienen el mismo efecto que una sola fuerza $\vec{R}$ igual a su suma vectorial, que también se le llama resultante.

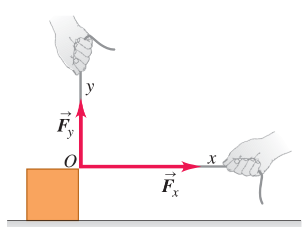


4.5 La fuerza $\vec{F}$, que actúa con un ángulo θ con respecto al eje x, puede ser sustituida por sus vectores componentes rectangulares, $\vec{F}_x$ y $\vec{F}_y$.

a) Vectores componentes: $\vec{F}_x$ y $\vec{F}_y$
Componentes: $F_x = F\cos\theta$ y $F_y = F\,\mathrm{sen}\,\theta$

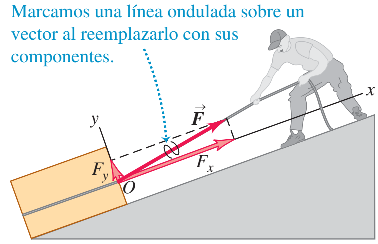


b) Los vectores componentes $\vec{F}_x$ y $\vec{F}_y$ tienen juntos el mismo efecto que la fuerza original $\vec{F}$

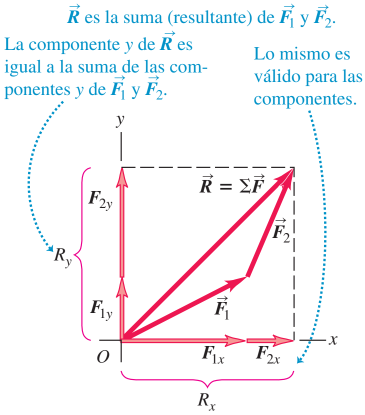


4.6 F_x y F_y son las componentes de $\vec{F}$ paralela y perpendicular a la superficie del plano inclinado.

Marcamos una línea ondulada sobre un vector al reemplazarlo con sus componentes.



4.7 Obtención de las componentes de la suma vectorial (resultante) $\vec{R}$ de dos fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$.



CUIDADO **Uso de una línea ondulada en diagramas de fuerza** En la figura 4.6, dibujamos una línea ondulada sobre el vector de fuerza $\vec{F}$ para indicar que lo hemos sustituido por sus componentes x y y. De lo contrario, el diagrama incluiría la misma fuerza dos veces. Haremos esto en cualquier diagrama de fuerza donde una fuerza se sustituya por sus componentes. Esté alerta a la línea ondulada en otras figuras de este capítulo y capítulos posteriores.

A menudo necesitaremos obtener la suma vectorial (resultante) de *todas* las fuerzas que actúan sobre un cuerpo. Llamaremos a esto la **fuerza neta** que actúa sobre el cuerpo. Usaremos la letra griega Σ (sigma mayúscula, que equivale a la S romana) para denotar sumatoria. Si las fuerzas son $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, etcétera, abreviaremos la sumatoria como

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots = \sum\vec{F} \tag{4.1}$$

donde $\sum\vec{F}$ se lee "suma vectorial de las fuerzas" o "fuerza neta". La versión con componentes de la ecuación (4.1) es el par de ecuaciones

$$R_x = \sum F_x \qquad R_y = \sum F_y \tag{4.2}$$

donde $\sum F_x$ es la suma de las componentes x y $\sum F_y$ es la suma de las componentes y (figura 4.7). Cada componente puede ser positiva o negativa, así que tenga cuidado con los signos al sumar en la ecuación (4.2).

Una vez que se tienen R_x y R_y, puede obtenerse la magnitud y la dirección de la fuerza neta $\vec{R} = \sum\vec{F}$ que actúa sobre el cuerpo. La magnitud es

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

y el ángulo θ entre $\vec{R}$ y el eje $+x$ puede obtenerse de la relación $\tan\theta = R_y/R_x$. Las componentes R_x y R_y pueden ser positivas, negativas o cero, y el ángulo θ puede estar en cualquier cuadrante.

En problemas tridimensionales, las fuerzas pueden tener componentes z, así que agregamos la ecuación $R_z = \sum F_z$ a la ecuación (4.2). La magnitud de la fuerza neta es

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$$

Ejemplo 4.1 Superposición de fuerzas

Tres luchadores profesionales pelean por el mismo cinturón de campeonato. Vistos desde arriba, aplican al cinturón las tres fuerzas horizontales de la figura 4.8a. Las magnitudes de las tres fuerzas sonF_1 = 250 N, F_2 = 50 N y F_3 = 120 N. Obtenga las componentes x y y de la fuerza neta sobre el cinturón, así como la magnitud y dirección de la fuerza neta.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este ejemplo no es más que un problema de suma vectorial. Lo único nuevo es que los vectores representan fuerzas.

PLANTEAR: Debemos calcular las componentes x y y de la fuerza neta $\vec{R}$, así que utilizaremos el método de componentes de la suma vectorial expresada en la ecuación (4.2). Una vez que tenemos las componentes de $\vec{R}$, podemos calcular su magnitud y dirección.

EJECUTAR: Por la figura 4.8a, los ángulos entre las fuerzas $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ y $\vec{F}_3$ y el eje $+x$ son $\theta_1 = 180° - 53° = 127°$, $\theta_2 = 0°$ y $\theta_3 = 270°$. Las componentes x y y de las tres fuerzas son

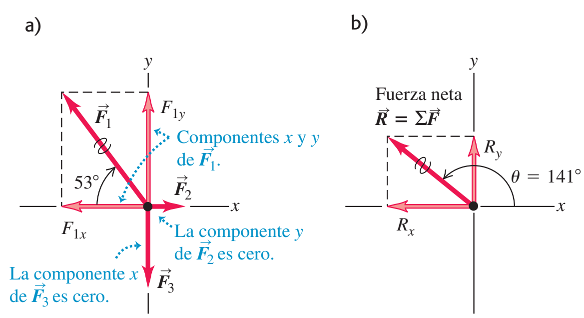
$$F_{1x} = (250\ \text{N})\cos 127° = -150\ \text{N}$$

$$F_{1y} = (250\ \text{N})\,\text{sen}\,127° = 200\ \text{N}$$

$$F_{2x} = (50\ \text{N})\cos 0° = 50\ \text{N}$$

$$F_{2y} = (50\ \text{N})\,\text{sen}\,0° = 0\ \text{N}$$

4.8 a) Tres fuerzas que actúan sobre el cinturón. b) La fuerza neta $\vec{R} = \sum\vec{F}$ y sus componentes.



$$F_{3x} = (120\ \text{N})\cos 270° = 0\ \text{N}$$

$$F_{3y} = (120\ \text{N})\,\text{sen}\,270° = -120\ \text{N}$$

Por la ecuación (4.2), la fuerza neta $\vec{R} = \sum\vec{F}$ tiene componentes

$$R_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = (-150\ \text{N}) + 50\ \text{N} + 0\ \text{N} = -100\ \text{N}$$

$$R_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = 200\ \text{N} + 0\ \text{N} + (-120\ \text{N}) = 80\ \text{N}$$

La fuerza neta tiene componente x negativa y componente y positiva, así que apunta a la izquierda y hacia arriba en la parte superior de la figura 4.8b (es decir, en el segundo cuadrante).

La magnitud de la fuerza neta $\vec{R} = \sum \vec{F}$ es

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(-100\ \text{N})^2 + (80\ \text{N})^2} = 128\ \text{N}$$

Para obtener el ángulo entre la fuerza neta y el eje $+x$, usamos la relación $\tan\theta = R_y/R_x$, o bien,

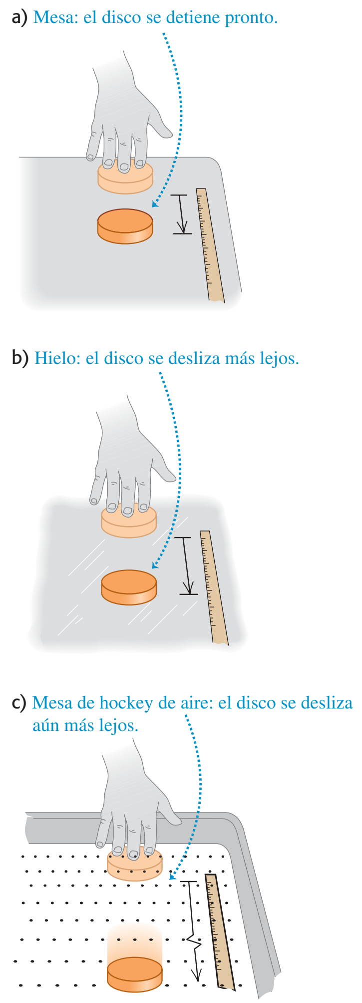
$$\theta = \arctan\frac{R_y}{R_x} = \arctan\left(\frac{80\ \text{N}}{-100\ \text{N}}\right) = \arctan(-0.80)$$

Las dos posibles soluciones son $\theta = -39°$ y $\theta = -39° + 180° = 141°$. Puesto que la fuerza neta está en el segundo cuadrante, como indicamos, la respuesta correcta es 141° (véase la figura 4.8b).

EVALUAR: En esta situación, la fuerza neta *no* es cero, y vemos intuitivamente que el luchador 1 (quien ejerce la mayor fuerza, $\vec{F}_1$, sobre el cinturón) probablemente se quedará con el cinturón después del forcejeo. En la sección 4.2 exploraremos a fondo qué sucede en situaciones en las que la fuerza neta sí *es* cero.

Evalúe su comprensión de la sección 4.1 La figura 4.6 muestra una fuerza $\vec{F}$ que actúa sobre un bloque. Con los ejes x y y que se indican en la figura, ¿qué enunciado acerca de las componentes de la fuerza *gravitacional* que la tierra ejerce sobre el bloque (su peso) es *correcto*? i) Las componentes x y y son ambas positivas. ii) La componente x es cero y la componente y es positiva. iii) La componente x es negativa y la componente y es positiva. iv) Las componentes x y y son ambas negativas. v) La componente x es cero y la componente y es negativa. vi) La componente x es positiva y la componente y es negativa.

4.9 Cuanto más resbaladiza sea la superficie, mayor será el desplazamiento del disco después de que se le da una velocidad inicial. En una mesa de hockey de aire **c)**, la fricción es casi cero y el disco sigue con velocidad casi constante.



4.2 Primera ley de Newton

Hemos visto algunas propiedades de las fuerzas, pero no hemos dicho cómo afectan el movimiento. Por principio de cuentas, consideremos qué sucede cuando la fuerza neta sobre un cuerpo es *cero*. Sin duda el lector estará de acuerdo en que si un cuerpo está en reposo y ninguna fuerza neta actúa sobre él (es decir, no hay empujón ni tirón netos), el cuerpo permanecerá en reposo. Pero, ¿Qué sucedería si la fuerza neta es cero y actúa sobre un cuerpo *en movimiento*?

Para saber qué sucede en este caso, suponga que usted desliza un disco de hockey sobre una mesa horizontal, aplicándole una fuerza horizontal con la mano (figura 4.9a). Cuando usted deja de empujar, el disco *no* sigue moviéndose indefinidamente; se frena y se detiene. Para mantenerlo en movimiento, hay que seguirlo empujando (es decir, aplicando una fuerza). Podríamos llegar a la conclusión de "sentido común" de que los cuerpos en movimiento naturalmente se detienen y que se necesita una fuerza para mantener el movimiento.

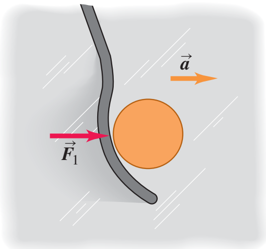
Imagine ahora que usted empuja el disco en una superficie lisa de hielo (figura 4.9b). Al dejar de empujar, el disco se desliza mucho más lejos antes de detenerse. Ponga el disco y empújelo en una mesa de hockey de aire, donde flota sobre un delgado "cojín" de aire, y llegará aún más lejos (figura 4.9c). En cada caso, lo que frena el disco es la *fricción*, una interacción entre la superficie inferior del disco y la superficie sobre la que se desliza. Cada superficie ejerce una fuerza de fricción sobre el disco, la cual reduce su movimiento; la diferencia entre los tres casos es la magnitud de la fuerza de fricción. El hielo ejerce menos fricción que la superficie de la mesa, y el disco viaja más lejos. Las moléculas de gas de la mesa de hockey de aire son las que menos fricción ejercen. Si pudiéramos eliminar totalmente la fricción, el disco nunca se frenaría y no necesitaríamos fuerza alguna para mantener el disco en movimiento, una vez que empieza a hacerlo. Así, la idea de "sentido común" de que se requiere una fuerza para conservar el movimiento es *incorrecta*.

Experimentos como el que describimos demuestran que, si ninguna fuerza neta actúa sobre un cuerpo, éste permanece en reposo, o bien, se mueve con velocidad constante en línea recta. Una vez que un cuerpo se pone en movimiento, no se necesita una fuerza neta para mantenerlo en movimiento; a tal observación la conocemos como *primera ley del movimiento de Newton*:

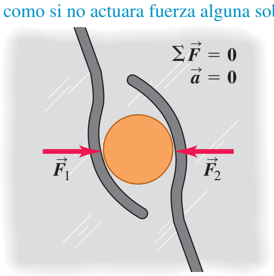
Primera ley del movimiento de Newton: **un cuerpo sobre el que no actúa una fuerza neta se mueve con velocidad constante (que puede ser cero) y aceleración cero.**

4.10 a) Un disco de hockey acelera en la dirección de la fuerza neta aplicada $\vec{F}_1$. b) Si la fuerza neta es cero, la aceleración es cero y el disco está en equilibrio.

a) Sobre una superficie sin fricción, un disco acelera cuando actúa sobre él una sola fuerza horizontal.



b) Un objeto sobre el que actúan fuerzas cuya suma vectorial sea cero se comporta como si no actuara fuerza alguna sobre él.



La tendencia de un cuerpo a seguir moviéndose una vez iniciado su movimiento es resultado de una propiedad llamada **inercia**. Usamos inercia cuando tratamos de sacar salsa de tomate de una botella agitándola. Primero hacemos que la botella (y la salsa del interior) se mueva hacia adelante; al mover la botella bruscamente hacia atrás, la salsa tiende a seguir moviéndose hacia adelante y, con suerte, cae en nuestra hamburguesa. La tendencia de un cuerpo en reposo a permanecer en reposo también se debe a la inercia. Quizás el lector haya visto sacar un mantel de un tirón de debajo de la vajilla sin romper nada. La fuerza sobre la vajilla no basta para moverla mucho durante el breve lapso que toma retirar el mantel.

Es importante señalar que lo que importa en la primera ley de Newton es la fuerza *neta*. Por ejemplo, dos fuerzas actúan sobre un libro en reposo en una mesa horizontal: una fuerza de apoyo hacia arriba, o fuerza normal, ejercida por la mesa (véase la figura 4.2a) y la fuerza hacia abajo debida a la atracción gravitacional terrestre (una fuerza de largo alcance que actúa aun si la mesa está más arriba del suelo; véase la figura 4.2d). El empuje hacia arriba de la superficie es tan grande como la atracción gravitatoria hacia abajo, así que la fuerza *neta* sobre el libro (la suma vectorial de las dos fuerzas) es cero. En concordancia con la primera ley de Newton, si el libro está en reposo en la mesa, sigue en reposo. El mismo principio se aplica a un disco de hockey que se desliza en una superficie horizontal sin fricción: la resultante del empuje hacia arriba de la superficie y la atracción gravitatoria hacia abajo es cero. Si el disco está en movimiento, sigue moviéndose con velocidad constante porque la fuerza *neta* que actúa sobre él es cero.

Veamos otro ejemplo. Suponga que un disco de hockey descansa en una superficie horizontal con fricción despreciable, como una mesa de hockey de aire o una plancha de hielo húmedo. Si el disco está inicialmente en reposo y luego una sola fuerza horizontal $\vec{F}_1$ actúa sobre él (figura 4.10a), comenzará a moverse. Si el disco ya se estaba moviendo, la fuerza cambiará su rapidez, su dirección, o ambas, dependiendo de la dirección de la fuerza. En este caso, la fuerza neta es $\vec{F}_1$, *no* es cero. (También hay dos fuerzas verticales, la atracción gravitacional terrestre y la fuerza normal hacia arriba de la superficie pero, como ya dijimos, estas dos fuerzas se cancelan.)

Suponga ahora que aplicamos una segunda fuerza $\vec{F}_2$ (figura 4.10b), igual en magnitud a $\vec{F}_1$ pero de dirección opuesta. Una fuerza es el negativo de la otra, $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$, y su suma vectorial es cero:

$$\sum\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_1 + (-\vec{F}_1) = 0$$

Otra vez, vemos que, si el cuerpo está inicialmente en reposo, sigue en reposo; y si se está moviendo, sigue moviéndose en la misma dirección con rapidez constante. Estos resultados muestran que, en la primera ley de Newton, *una fuerza neta de cero equivale a ninguna fuerza*. Éste es sólo el principio de superposición de fuerzas que vimos en la sección 4.1.

Cuando un cuerpo está en reposo o se mueve con velocidad constante (en línea recta con rapidez constante), decimos que el cuerpo está en **equilibrio**. Para que esté en equilibrio, sobre un cuerpo no deben actuar fuerzas, o deben actuar varias fuerzas cuya resultante —es decir, la fuerza neta— sea cero:

$$\sum\vec{F} = 0 \qquad \text{(cuerpo en equilibrio)} \qquad (4.3)$$

Para que esto se cumpla, cada componente de la fuerza neta debe ser cero, así que

$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0 \qquad \text{(cuerpo en equilibrio)} \qquad (4.4)$$

Estamos suponiendo que el cuerpo puede representarse adecuadamente con una partícula puntual. Si el cuerpo tiene tamaño finito, tendremos que considerar también en *qué parte* del cuerpo se aplican las fuerzas. Volveremos a esto en el capítulo 11.

Ejemplo conceptual 4.2 Fuerza neta cero significa velocidad constante

En la película clásica de ciencia ficción de 1950 *Rocketship X-M*, una nave se mueve en el vacío del espacio exterior, lejos de cualquier planeta, cuando sus motores se descomponen. El resultado es que la nave baja su velocidad y se detiene. ¿Qué dice la primera ley de Newton acerca de esto?

SOLUCIÓN

En esta situación no actúan fuerzas sobre la nave, así que, según la primera ley de Newton, *no* se detendrá; se seguirá moviendo en línea recta con rapidez constante. En algunas películas de ciencia ficción se ha utilizado muy adecuadamente la ciencia; pero ésta no fue una de ellas.

Ejemplo conceptual 4.3 Velocidad constante significa fuerza neta igual a cero

Imagine que conduce un Porsche Carrera GT en una pista de prueba recta a una rapidez constante de 150 km/h y rebasa a un Volkswagen Sedán 1971 que va a 75 km/h. ¿Sobre qué auto es mayor la fuerza neta?

SOLUCIÓN

La palabra clave aquí es "neta". Ambos automóviles están en equilibrio porque sus velocidades son constantes; por lo tanto, la fuerza *neta* sobre cada uno de ellos es *cero*.

Esta conclusión parece ir contra el "sentido común", que nos dice que el automóvil más rápido debe estar siendo impulsado por una fuerza mayor. Es verdad que la fuerza hacia adelante que actúa sobre el Porsche es mucho mayor (gracias a su motor de alta potencia) que la del Volkswagen; pero también sobre los autos actúa una fuerza *hacia atrás* debida a la fricción con el camino y la resistencia del aire. La única razón por la que es necesario tener funcionando el motor de estos vehículos es para contrarrestar dicha fuerza hacia atrás, de modo que la resultante sea cero y el coche viaje a velocidad constante. La fuerza hacia atrás sobre el Porsche es mayor por su mayor rapidez, y por ello su motor necesita ser más potente que el del Volkswagen.

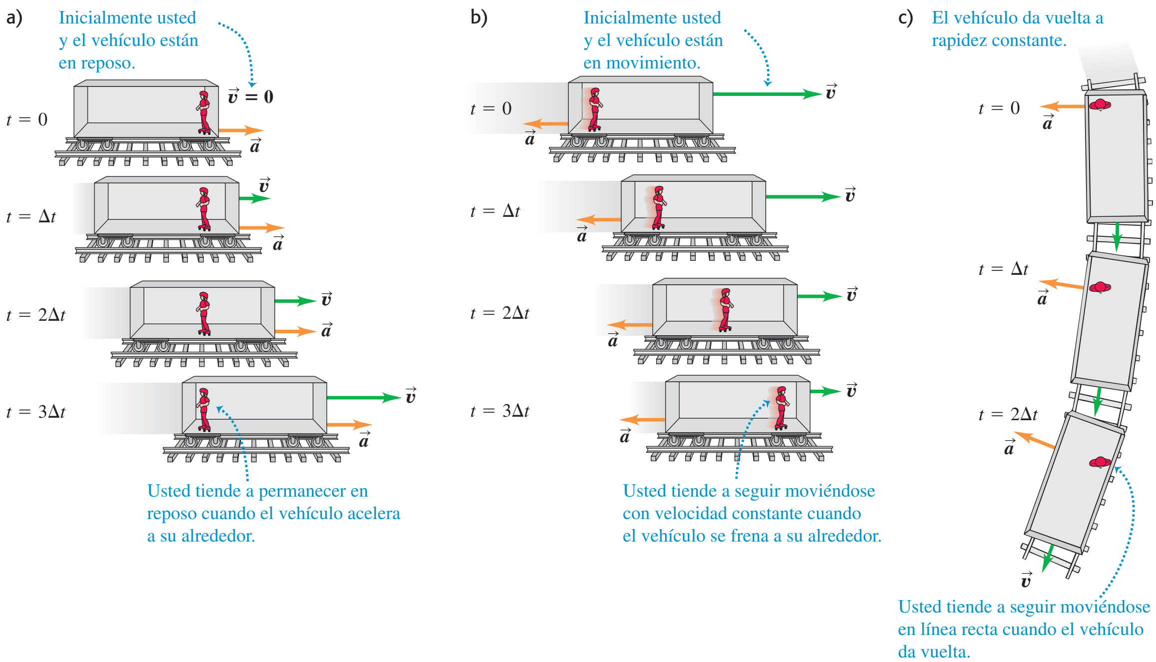
Marcos de referencia inerciales

Al tratar la velocidad relativa en la sección 3.5, presentamos el concepto de *marco de referencia*. Este concepto es fundamental para las leyes del movimiento de Newton. Suponga que está en un autobús que viaja por una carretera recta y acelera. Si pudiera pararse en el pasillo usando patines, comenzaría a moverse *hacia atrás* relativo al autobús, conforme éste aumenta de rapidez. En cambio, si el autobús frenara, usted comenzaría a moverse hacia delante, respecto del autobús, por el pasillo. En ambos casos, parecería que no se cumple la primera ley de Newton: no actúa una fuerza neta sobre usted, pero su velocidad cambia. ¿Qué sucede aquí?

La cuestión es que el autobús acelera con respecto al suelo y *no* es un marco de referencia adecuado para la primera ley de Newton. Ésta es válida en algunos marcos de referencia, pero no en otros. Un marco de referencia en el que *es* válida la primera ley de Newton es un **marco de referencia inercial**. La Tierra es aproximadamente un marco de referencia inercial, pero el autobús no. (La Tierra no es un marco plenamente inercial debido a la aceleración asociada a su rotación y su movimiento alrededor del Sol, aunque tales efectos son pequeños; véanse los ejercicios 3.29 y 3.32.) Como usamos la primera ley de Newton para definir lo que es un marco de referencia inercial, se le conoce como *ley de inercia*.

La figura 4.11 muestra cómo podemos usar la primera ley de Newton para entender lo que sentimos al viajar en un vehículo que acelera. En la figura 4.11a, un vehículo está inicialmente en reposo y comienza a acelerar hacia la derecha. Una pasajera en patines (que casi eliminan los efectos de la fricción) prácticamente no tiene fuerza neta actuando sobre ella; por lo tanto, tiende a seguir en reposo relativo al marco de referencia inercial de la Tierra. Al acelerar el vehículo a su alrededor, la pasajera se mueve hacia atrás con respecto al vehículo. Del mismo modo, una pasajera en un vehículo que está frenando tiende a seguir moviéndose con velocidad constante relativa a la Tierra, por lo que esta pasajera se mueve hacia adelante con respecto al vehículo (figura 4.11b). Un vehículo también acelera si se mueve con rapidez constante pero da vuelta (figura 4.11c). En este caso, la pasajera tiende a seguir moviéndose con rapidez constante en línea recta relativa a la Tierra; con respecto al vehículo, la pasajera se mueve hacia el exterior de la vuelta.

4.11 Viaje en un vehículo con aceleración.



En los casos de la figura 4.11, un observador en el marco de referencia del vehículo podría concluir que *hay* una fuerza neta que actúa sobre la pasajera, ya que la velocidad de ésta *relativa al vehículo* cambia en cada caso. Esto no es correcto; la fuerza neta sobre la pasajera es cero. El error del observador es tratar de aplicar la primera ley de Newton en el marco de referencia del vehículo, que *no* es inercial y en el cual dicha ley no es válida (figura 4.12). En este libro *sólo* usaremos marcos de referencia inerciales.

Hemos mencionado sólo un marco de referencia (aproximadamente) inercial: la superficie de la Tierra. No obstante, hay muchos otros. Si tenemos un marco de referencia inercial A, donde se cumple la primera ley de Newton, cualquier otro marco de referencia B será inercial si se mueve con velocidad constante $\vec{v}_{B/A}$. relativa a A. Para demostrarlo, usamos la ecuación de velocidad relativa (3.36) de la sección 3.5:

$$\vec{v}_{P/A} = \vec{v}_{P/B} + \vec{v}_{B/A}$$

Suponga que P es un cuerpo que se mueve con velocidad constante $\vec{v}_{P/A}$ con respecto a un marco inercial A. Por la primera ley de Newton, la fuerza neta sobre este cuerpo es cero. La velocidad de P relativa a otro marco B tiene un valor distinto, $\vec{v}_{P/B} = \vec{v}_{P/A} - \vec{v}_{B/A}$. No obstante, si la velocidad relativa $\vec{v}_{B/A}$ de los dos marcos es constante, $\vec{v}_{P/B}$ también es constante, y B es un marco inercial. La velocidad de P en este marco es constante y la fuerza neta sobre P es cero, así que la primera ley de Newton se cumple en B. Observadores en los marcos A y B diferirán en cuanto a la velocidad de P, pero coincidirán en que es constante (aceleración cero) y no hay fuerza neta actuando sobre P.

No hay un marco de referencia inercial que sea preferible a todos los demás para formular las leyes de Newton. Si un marco es inercial, todos los que se muevan con velocidad constante relativa a él serán inerciales. Desde esta perspectiva, el estado de reposo y el de movimiento con velocidad constante no son muy diferentes; ambos se dan cuando la suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es cero.

4.12 Desde el marco de referencia de este automóvil, parece que una fuerza empuja hacia adelante a los maniquíes para pruebas de choque, cuando el automóvil se detiene repentinamente. Sin embargo, tal fuerza no existe realmente: al detenerse el vehículo, los maniquíes se siguen moviendo hacia adelante como consecuencia de la primera ley de Newton.

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.

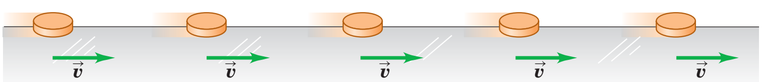
Sin embargo, ¿qué sucede si la fuerza neta *no* es cero? En la figura 4.13b aplicamos una fuerza horizontal constante al disco en la dirección de su movimiento. Entonces, $\sum\vec{F}$ es constante y en la misma dirección horizontal que $\vec{v}$. Vemos que, mientras la fuerza actúa, la velocidad del 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.

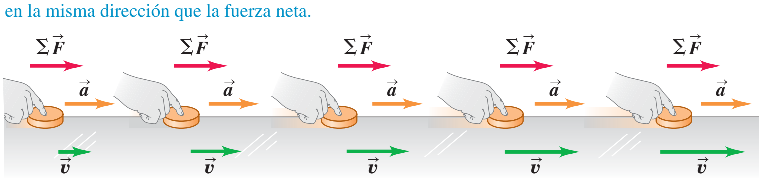
La conclusión es que *una fuerza neta que actúa sobre un cuerpo hace que éste acelere en la misma dirección que la fuerza neta*. Si la magnitud de la fuerza neta es constante, como en las figuras 4.13b y 4.13c, también lo será la magnitud de la aceleración.

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).

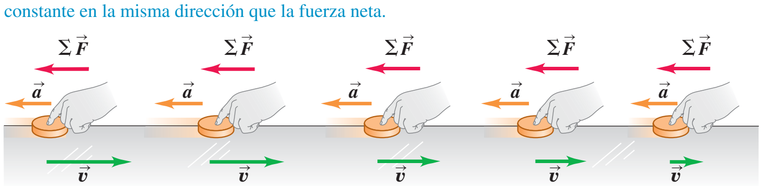
a) Un disco que se mueve con velocidad constante (en equilibrio): $\sum\vec{F} = \mathbf{0}$, $\vec{a} = \mathbf{0}$.



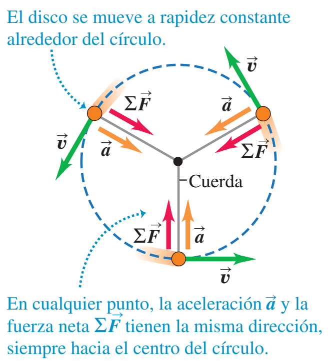
b) Una fuerza neta constante en la dirección del movimiento provoca una aceleración constante en la misma dirección que la fuerza neta.



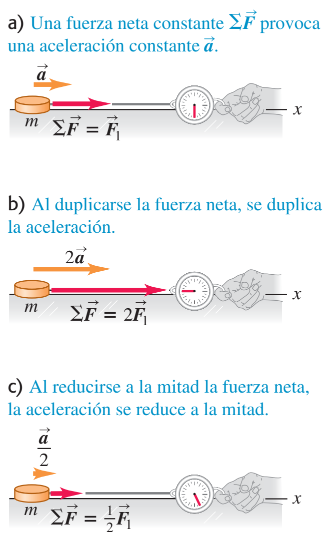
c) Una fuerza neta constante opuesta a la dirección del movimiento causa una aceleración constante en la misma dirección que la fuerza neta.



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.



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 $|\sum\vec{F}|$ 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,

$$m = \frac{|\sum\vec{F}|}{a} \quad \text{o} \quad |\sum\vec{F}| = ma \quad \text{o} \quad a = \frac{|\sum\vec{F}|}{m} \qquad (4.5)$$

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,

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

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 $\sum\vec{F}$ 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),

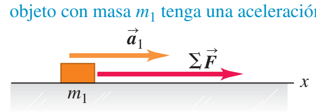
$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$
$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2} \qquad \text{(misma fuerza neta)} \tag{4.6}$$

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 $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \ldots$, 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,

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

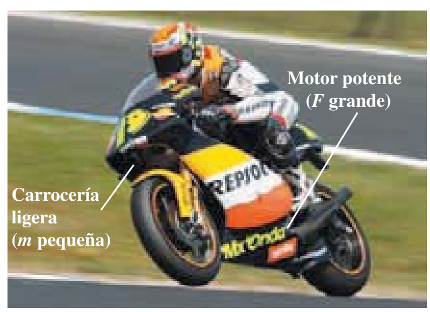
Un enunciado alterno establece que la aceleración de un cuerpo es la misma dirección que la fuerza neta que actúa sobre él, y es igual a la fuerza neta dividida entre la masa del cuerpo.

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

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

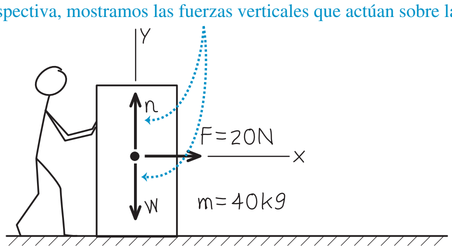
IDENTIFICAR: En este problema intervienen fuerza y aceleración. Siempre que usted se tope con un problema de esta clase, abórdelo empleando la segunda ley de Newton.

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

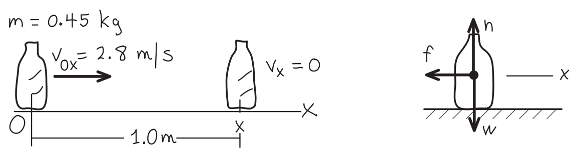
IDENTIFICAR: Al igual que el ejemplo anterior, en este problema intervienen fuerzas y aceleración (el frenado de la botella de salsa), así que usaremos la segunda ley de Newton para resolverlo.

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

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

ActivPhysics 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

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

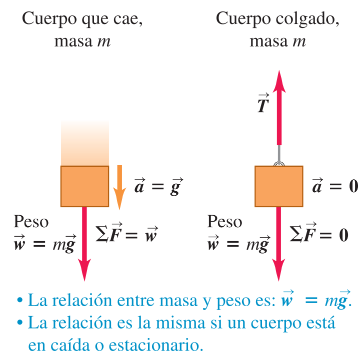
Por lo tanto, la magnitud w del peso de un cuerpo es directamente proporcional a su masa m. El peso de un cuerpo es una fuerza, una cantidad vectorial, y podemos escribir la ecuación (4.9) como ecuación vectorial (figura 4.21):

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

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.



Ejemplo conceptual 4.6 Fuerza neta y aceleración en caída libre

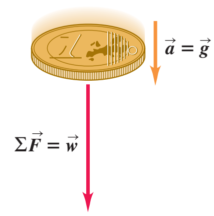
En el ejemplo 2.6 (sección 2.5), se dejó caer una moneda de un euro desde la Torre Inclinada de Pisa. Si suponemos caída libre, con efectos despreciables de la fricción con el aire, ¿cómo varía la fuerza neta sobre la moneda conforme ésta cae?

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.

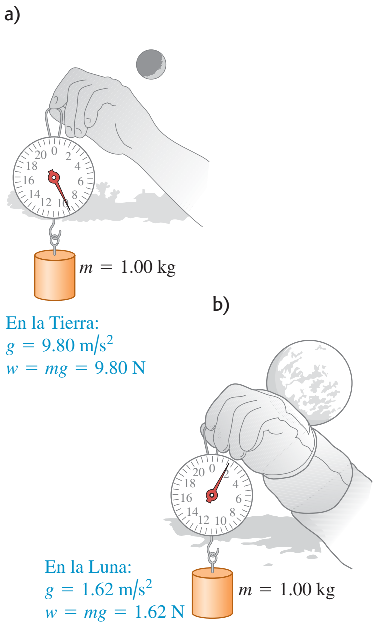


Variación de g con la ubicación

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)$(9.80\ \text{m/s}^2) = 784$ N en la Tierra, pero en la Luna sólo pesaría (80.0 kg)$(1.62\ \text{m/s}^2) = 130$ 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

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

Entonces, $\sum F_x = ma_x$ nos da

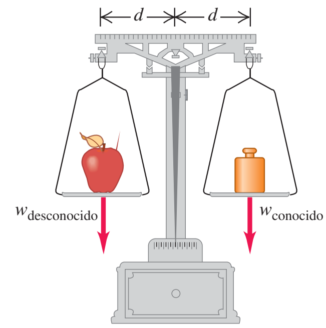
$$a_x = \frac{\sum F_x}{m} = \frac{-1.83 \times 10^4\ \text{N}}{2540\ \text{kg}} = \frac{-1.83 \times 10^4\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{2540\ \text{kg}}$$
$$= -7.20\ \text{m/s}^2$$

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?

Evalúe su comprensión de la sección 4.4 Suponga que una astronauta llega a un planeta donde $g = 19.6\ \text{m/s}^2$. En comparación con la Tierra, ¿le sería más fácil, más difícil o igual de fácil caminar ahí? ¿Le sería más fácil, más difícil o igual de fácil atrapar una pelota que se mueve horizontalmente a 12 m/s? (Suponga que el traje espacial es un modelo ligero que no impide en absoluto los movimientos de la astronauta.)

4.24 Una balanza de brazos iguales determina la masa de un cuerpo (como una manzana) comparando su peso con un peso conocido.



4.5 Tercera ley de Newton

Una fuerza que actúa sobre un cuerpo siempre es el resultado de su interacción con otro cuerpo, así que las fuerzas siempre vienen en pares. No podemos tirar de una perilla sin que ésta tire de nosotros. Al patear un balón de fútbol, la fuerza hacia adelante que el pie ejerce sobre él lo lanza en su trayectoria, pero sentimos la fuerza que el balón ejerce sobre el pie. Si pateamos un peñasco, el dolor que sentiríamos se debería a la fuerza que el peñasco ejerce sobre el pie.

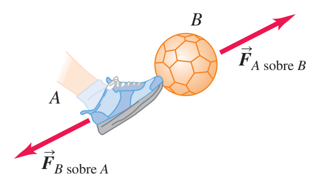
En todos estos casos, la fuerza que ejercemos sobre el otro cuerpo tiene dirección opuesta a la que el cuerpo ejerce sobre nosotros. Los experimentos muestran que, al interactuar dos cuerpos, las fuerzas que ejercen mutuamente son *iguales en magnitud* y *opuestas en dirección*. Ésta es la *tercera ley del movimiento de Newton*.

Tercera ley del movimiento de Newton: si el cuerpo *A* ejerce una fuerza sobre el cuerpo *B* (una "acción"), entonces, *B* ejerce una fuerza sobre *A* (una "reacción"). Estas dos fuerzas tienen la misma magnitud pero dirección opuesta, y actúan sobre *diferentes* cuerpos.

Por ejemplo, en la figura 4.25, $\vec{F}_{A\text{ sobre }B}$ es la fuerza aplicada *por* el cuerpo *A* (primer subíndice) *sobre* el cuerpo *B* (segundo subíndice), y $\vec{F}_{B\text{ sobre }A}$ es la fuerza aplicada *por* el cuerpo *B* (primer subíndice) *sobre* el cuerpo *A* (segundo subíndice). El enunciado matemático de la tercera ley es

$$\vec{F}_{A\text{ sobre }B} = -\vec{F}_{B\text{ sobre }A} \qquad \text{(tercera ley del movimiento de Newton)} \qquad (4.11)$$

4.25 Si el cuerpo *A* ejerce una fuerza $\vec{F}_{A\text{ sobre }B}$ sobre el cuerpo *B*, entonces, el cuerpo *B* ejerce una fuerza $\vec{F}_{B\text{ sobre }A}$ sobre el cuerpo *A* que tiene la misma magnitud, pero dirección opuesta: $\vec{F}_{A\text{ sobre }B} = -\vec{F}_{B\text{ sobre }A}$.



No importa si un cuerpo es inanimado (como el balón de la figura 4.25) y el otro no lo es (como el pateador): necesariamente ejercen fuerzas entre sí que cumplen la ecuación (4.11). ?

Expresado en palabras, en la tercera ley de Newton, "acción" y "reacción" son las dos fuerzas opuestas (en la figura 4.25, $\vec{F}_{A\text{ sobre }B}$ y $\vec{F}_{B\text{ sobre }A}$), y podemos llamarlas **par acción-reacción**. Esto no implica una relación de causa y efecto; podemos considerar cualquiera de las fuerzas como la "acción", y la otra como la "reacción". A menudo decimos sólo que las fuerzas son "iguales y opuestas" para indicar que tienen igual magnitud y dirección opuesta.

CUIDADO **Las dos fuerzas en un par acción-reacción actúan sobre cuerpos diferentes** Destacamos que las dos fuerzas descritas en la tercera ley de Newton actúan sobre cuerpos *distintos*. Esto es importante en problemas que implican la primera o segunda ley de Newton, en los que actúan fuerzas sobre un cuerpo. Por ejemplo, la fuerza neta que actúa sobre el balón de la figura 4.25 es la suma vectorial del peso del balón y la fuerza $\vec{F}_{A\text{ sobre }B}$ ejercida por el pateador. No incluimos $\vec{F}_{B\text{ sobre }A}$ porque esta fuerza actúa sobre el pateador, no sobre el balón.

En la figura 4.25, las fuerzas de acción y reacción son de *contacto*, y sólo existen cuando dos cuerpos se tocan. Sin embargo, la tercera ley de Newton también es válida para las fuerzas de *largo alcance* que no requieren contacto físico, como la de atracción gravitacional. Una pelota de ping-pong ejerce una fuerza gravitacional hacia arriba sobre la Tierra, igual en magnitud a la fuerza gravitacional que la Tierra ejerce hacia abajo sobre la pelota. Si dejamos caer la pelota, ésta y la Tierra se aceleran una hacia la otra. La fuerza neta sobre cada cuerpo tiene la misma magnitud, pero la aceleración de la Tierra es pequeñísima porque su masa es tan grande. Y sin embargo, ¡se mueve!

Ejemplo conceptual 4.8 ¿Cuál fuerza es mayor?

Después de que su automóvil deportivo se descompone, usted comienza a empujarlo hacia el taller mecánico más cercano. Cuando el auto comienza a moverse, ¿cómo es la fuerza que usted ejerce sobre el auto en comparación con la que éste ejerce sobre usted? ¿Y cuando ya va empujando al auto con rapidez constante?

SOLUCIÓN

En *ambos* casos, la fuerza que usted ejerce sobre el automóvil es igual en magnitud y opuesta en dirección a la que el auto ejerce sobre usted. Es cierto que usted debe empujar con más fuerza para poner en movimiento el auto que para mantenerlo en movimiento; sin embargo, de cualquier manera el auto lo empuja a usted con tanta fuerza como usted a él. La tercera ley de Newton da el mismo resultado si los cuerpos están en reposo, moviéndose con velocidad constante o acelerando.

Quizá se pregunte cómo el automóvil "sabe" que debe empujarlo a usted con la misma magnitud de fuerza que usted ejerce sobre él. Podría ser útil recordar que las fuerzas que usted y el auto se ejercen mutuamente en realidad son interacciones entre los átomos de la superficie de sus manos y los átomos de la superficie del auto. Tales interacciones son análogas a diminutos resortes entre átomos adyacentes, y un resorte comprimido ejerce fuerzas de la misma magnitud en ambos extremos.

No obstante, la razón fundamental por la que sabemos que objetos con distinta masa ejercen fuerzas de la misma magnitud entre sí es que los *experimentos nos demuestran que así es*. Nunca debemos olvidar que la física es algo más que una mera colección de reglas y ecuaciones; más bien, es una descripción sistemática del mundo natural basada en experimentación y observación.

Ejemplo conceptual 4.9 Aplicación de la tercera ley de Newton: Objetos en reposo

Una manzana está en equilibrio sobre una mesa. ¿Qué fuerzas actúan sobre ella? ¿Cuál es la fuerza de reacción para cada una de ellas? ¿Cuáles son los pares acción-reacción?

SOLUCIÓN

La figura 4.26a muestra las fuerzas que actúan sobre la manzana. En el diagrama, $\vec{F}_{\text{Tierra sobre manzana}}$ es el peso de la manzana, es decir, la fuerza gravitacional hacia abajo ejercida *por* la Tierra (primer subíndice) *sobre* la manzana (segundo subíndice). Asimismo, $\vec{F}_{\text{mesa sobre manzana}}$ es 1a fuerza hacia arriba ejercida *por* la mesa (primer subíndice) *sobre* la manzana (segundo subíndice).

Al tirar la Tierra de la manzana, ésta ejerce una fuerza igualmente intensa hacia arriba, $\vec{F}_{\text{manzana sobre Tierra}}$ sobre la Tierra como se indica en la figura 4.26b. $\vec{F}_{\text{manzana sobre Tierra}}$ y $\vec{F}_{\text{Tierra sobre manzana}}$ son un par acción-reacción y representan la interacción mutua entre la manzana y la Tierra, así

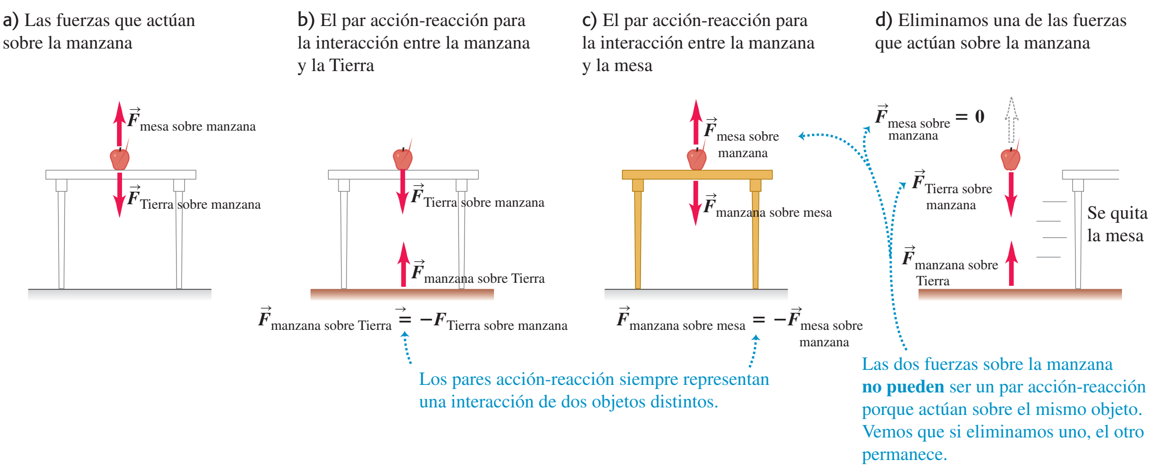
$$\vec{F}_{\text{manzana sobre Tierra}} = -\vec{F}_{\text{Tierra sobre manzana}}$$

Además, la mesa empuja la manzana hacia arriba con fuerza $\vec{F}_{\text{mesa sobre manzana}}$, y la reacción correspondiente es la fuerza hacia abajo $\vec{F}_{\text{manzana sobre mesa}}$ que la manzana ejerce sobre la mesa (figura 4.26c). De manera que tenemos

$$\vec{F}_{\text{manzana sobre mesa}} = -\vec{F}_{\text{mesa sobre manzana}}$$

Las dos fuerzas que actúan sobre la manzana son $\vec{F}_{\text{mesa sobre manzana}}$ y $\vec{F}_{\text{Tierra sobre manzana}}$. ¿Son un par acción-reacción? No, aunque sean iguales y opuestas. No representan la interacción de dos cuerpos; son dos fuerzas distintas que actúan sobre el *mismo* cuerpo. *Las dos fuerzas de un par acción-reacción* ***nunca*** *actúan sobre el mismo cuerpo*. Veámoslo de otra forma. Si quitáramos repentinamente la mesa de debajo de la manzana (figura 4.26d), las fuerzas $\vec{F}_{\text{manzana sobre mesa}}$ y $\vec{F}_{\text{mesa sobre manzana}}$ serían cero, pero $\vec{F}_{\text{manzana sobre Tierra}}$ y $\vec{F}_{\text{Tierra sobre manzana}}$ seguirán existiendo (la interacción gravitacional aún estaría presente). Puesto que $\vec{F}_{\text{mesa sobre manzana}}$ ahora es cero, no puede ser el negativo de $\vec{F}_{\text{Tierra sobre manzana}}$, y estas fuerzas no pueden ser un par acción-reacción.

4.26 Las dos fuerzas de un par acción-reacción siempre actúan sobre cuerpos distintos.



Ejemplo conceptual 4.10 Aplicación de la tercera ley de Newton: Objetos en movimiento

Un cantero (picapedrero) arrastra un bloque de mármol sobre un piso tirando de una cuerda atada al bloque (figura 4.27a). El bloque podría estar o no en equilibrio. ¿Qué relaciones hay entre las diversas fuerzas? ¿Cuáles son los pares acción-reacción?

SOLUCIÓN

Usaremos subíndices en todas las fuerzas por claridad: B para el bloque, R para la cuerda y M para el hombre. El vector $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ representa la fuerza ejercida por el *hombre* sobre la *cuerda*; su reacción es la fuerza igual y opuesta $\vec{F}_{\text{R sobre M}}$ ejercida por la *cuerda* sobre el *hombre*. El vector $\vec{F}_{\text{R sobre B}}$ es la fuerza ejercida por la *cuerda* sobre el *bloque*; su reacción es la fuerza igual y opuesta $\vec{F}_{\text{B sobre R}}$ que el *bloque* ejerce sobre la *cuerda*. Por estos dos pares acción-reacción (figura 4.27b), tenemos

$$\vec{F}_{\text{R sobre M}} = -\vec{F}_{\text{M sobre R}} \qquad \text{y} \qquad \vec{F}_{\text{B sobre R}} = -\vec{F}_{\text{R sobre B}}$$

Tenga claro que las fuerzas $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ y $\vec{F}_{\text{B sobre R}}$ *no* son un par acción-reacción (figura 4.27c); ambas actúan sobre el *mismo* cuerpo (la cuerda); una acción y su reacción siempre *deben* actuar sobre cuerpos *distintos*. Además, las fuerzas $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ y $\vec{F}_{\text{B sobre R}}$ no necesariamente tienen la misma magnitud. Si aplicamos la segunda ley de Newton a la cuerda, obtenemos

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{\text{M sobre R}} + \vec{F}_{\text{B sobre R}} = m_{\text{cuerda}}\vec{a}_{\text{cuerda}}$$

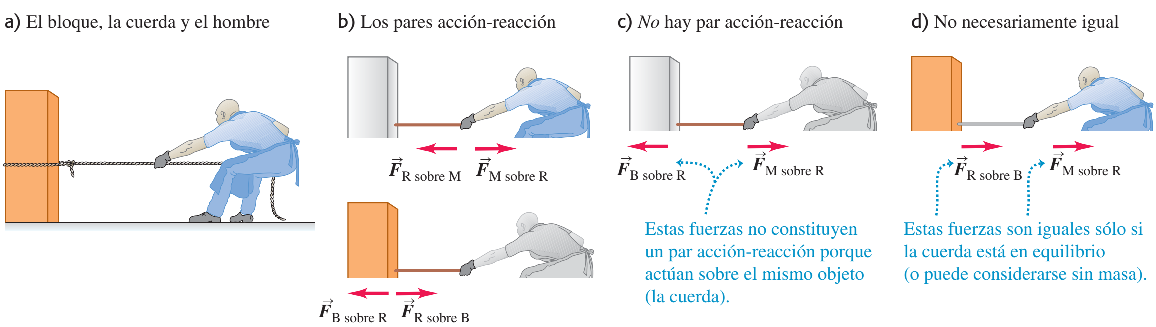
Si el bloque y la cuerda tienen una aceleración (es decir, si su rapidez está aumentando o disminuyendo), la cuerda no está en equilibrio y $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ deberá tener distinta magnitud que $\vec{F}_{\text{B sobre R}}$. En contraste, las fuerzas de acción-reacción $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ y $\vec{F}_{\text{R sobre M}}$ siempre tienen la misma magnitud, al igual que $\vec{F}_{\text{R sobre B}}$ y $\vec{F}_{\text{B sobre R}}$. La tercera ley de Newton se cumple, estén los cuerpos acelerando o no.

En el caso especial en que la cuerda está en equilibrio, las fuerzas $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ y $\vec{F}_{\text{B sobre R}}$ tienen igual magnitud; pero esto es un ejemplo de la *primera* ley de Newton, no de la *tercera*. Otra forma de ver esto es que, en el equilibrio, $\vec{a}_{\text{cuerda}} = \mathbf{0}$ en la ecuación anterior. Entonces, $\vec{F}_{\text{B sobre R}} = -\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ por la primera o la segunda ley de Newton.

Esto se cumple también si la cuerda está acelerando pero tiene masa insignificante en comparación con el bloque o el hombre. En este caso, $m_{\text{cuerda}} = 0$ en la ecuación anterior y, otra vez, $\vec{F}_{\text{B sobre C}} = -\vec{F}_{\text{M sobre R}}$. Puesto que $\vec{F}_{\text{B sobre R}}$ *siempre* es igual a $-\vec{F}_{\text{R sobre B}}$ por la tercera ley de Newton (son un par acción-reacción), en estos mismos casos especiales $\vec{F}_{\text{R sobre B}}$ es igual a $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ (figura 4.27d), es decir, la fuerza de la cuerda sobre el bloque es igual a la del hombre sobre la cuerda y podemos pensar que la cuerda "transmite" al bloque, sin cambio, la fuerza que la persona ejerce sobre la cuerda. Esta perspectiva es útil, pero hay que recordar que *sólo* es válida si la cuerda tiene masa insignificante o está en equilibrio.

Si hasta aquí se siente abrumado con los subíndices, no se desanime. Repase la explicación comparando los símbolos con los diagramas vectoriales, hasta asegurarse de que entiende todo.

4.27 Identificación de las fuerzas que actúan cuando un hombre tira de una cuerda atada a un bloque.



Ejemplo conceptual 4.11 ¿Una paradoja de la tercera ley de Newton?

En el ejemplo conceptual 4.10 vimos que el cantero tira de la combinación cuerda-bloque con la misma fuerza con que esa combinación tira de él. ¿Por qué, entonces, se mueve el bloque mientras el hombre permanece estacionario?

SOLUCIÓN

La solución a esta aparente contradicción radica en la diferencia entre la *segunda* ley de Newton y la *tercera*. Las únicas fuerzas que intervienen en la segunda ley son las que actúan *sobre* el cuerpo en cuestión. La suma vectorial de esas fuerzas determina la forma en que ese cuerpo se acelera (y si se acelera o no). En contraste, la tercera ley de Newton relaciona las fuerzas que dos cuerpos *distintos* ejercen uno sobre el otro. La tercera ley, por sí sola, nada nos dice acerca del movimiento de cualquiera de los dos cuerpos.

Cuando la combinación cuerda-bloque inicialmente está en reposo, comenzará a deslizarse si la fuerza que ejerce el cantero $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ es *mayor* que la fuerza de fricción que el piso ejerce sobre el bloque (figura 4.28). (El bloque de mármol tiene base lisa, lo cual ayuda a reducir la fricción.) Por lo tanto, hay una fuerza neta sobre la combinación cuerda-bloque hacia la derecha, de manera que acelera hacia la derecha. En contraste, el cantero *no* se mueve porque la fuerza neta que actúa sobre él es *cero*. Dado que el hombre tiene zapatos con suelas

continúa

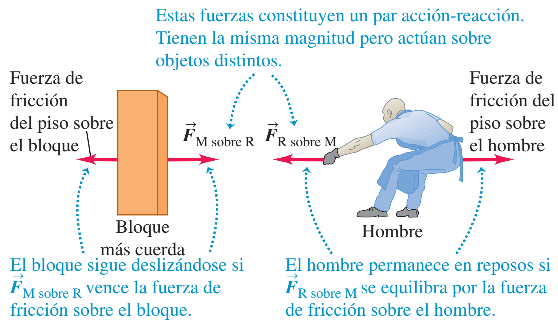
antiderrapantes que no se resbalan sobre el piso, la fuerza de fricción que el piso ejerce sobre él es suficiente para equilibrar exactamente el tirón de la cuerda, $\vec{F}_{\text{R sobre M}}$. (Tanto el bloque como el hombre experimentan también una fuerza de gravedad hacia abajo y una fuerza normal hacia arriba ejercida por el piso, las cuales se equilibran entre sí y se anulan, por lo que no se incluyeron en la figura 4.28.)

Una vez que el bloque esté en movimiento, el hombre no tendrá que tirar con tanta fuerza; sólo deberá desarrollar la fuerza suficiente para equilibrar exactamente la fuerza de fricción sobre el bloque. Entonces, la fuerza neta sobre el bloque en movimiento será cero, y el bloque se seguirá moviendo hacia el hombre con velocidad constante, en concordancia con la primera ley de Newton.

Concluimos que el bloque se mueve mientras el hombre no lo hace debido a que las correspondientes fuerzas de fricción son diferentes. Si el piso estuviera recién encerado, de modo que la fricción entre el piso y los zapatos del cantero fuera pequeña, el tirón de la cuerda haría que el bloque empezara a deslizarse a la derecha *y* él comenzaría a deslizarse hacia la izquierda.

La moraleja de este ejemplo es que, al analizar el movimiento de un cuerpo, sólo debemos considerar las fuerzas que actúan *sobre* ese cuerpo. Desde ésta perspectiva, la tercera ley de Newton es meramente una herramienta que nos ayuda a identificar las fuerzas.

4.28 Las fuerzas horizontales que actúan sobre la combinación bloque-cuerda (izquierda) y el hombre (derecha). (No se muestran las fuerzas verticales.)



Un cuerpo, como la cuerda de la figura 4.27, al cual se aplican fuerzas que tiran de sus extremos, está en *tensión*. La **tensión** en cualquier punto es la magnitud de la fuerza que actúa en él (véase la figura 4.2c). En la figura 4.27b, la tensión en el extremo derecho de la cuerda es la magnitud de $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ (o de $\vec{F}_{\text{R sobre M}}$), y en el izquierdo, la de $\vec{F}_{\text{B sobre C}}$ (o de $\vec{F}_{C \text{ sobre B}}$). Si la cuerda está en equilibrio y sólo actúan sobre ella fuerzas en sus extremos, la tensión es igual en ambos extremos y en toda la cuerda. Por lo tanto, si las magnitudes de $\vec{F}_{\text{B sobre R}}$ y $\vec{F}_{\text{M sobre R}}$ son de 50 N, la tensión en la cuerda es 50 N (*no* 100 N). El vector de fuerza *total* $\vec{F}_{\text{B sobre R}} + \vec{F}_{\text{M sobre R}}$ que actúa sobre la cuerda en este caso ¡es cero!

Hacemos hincapié una vez más en una verdad fundamental: las dos fuerzas de un par acción-reacción *nunca* actúan sobre el mismo cuerpo. Recordar este sencillo hecho a menudo le ayudará a evitar confusiones acerca de los pares acción-reacción y la tercera ley de Newton.

Evalúe su comprensión de la sección 4.5 Imagine que conduce su automóvil por un camino rural y un mosquito se estrella contra el parabrisas. ¿Qué tiene mayor magnitud, la fuerza que el auto ejerció sobre el mosquito o la que éste ejerció sobre el vehículo? ¿O son iguales las magnitudes? Si son diferentes, ¿cómo podemos conciliar este hecho con la tercera ley de Newton? Si son iguales, ¿por qué el mosquito se aplasta y el auto no sufre daños?

4.6 Diagramas de cuerpo libre

ActivPhysics ONLINE
2.1.1 Magnitudes de fuerza

Las tres leyes del movimiento de Newton contienen todos los principios básicos que necesitamos para resolver una amplia variedad de problemas de mecánica. Estas leyes tienen un planteamiento sencillo; sin embargo, el proceso de aplicarlas a situaciones específicas puede constituir un verdadero reto. En esta breve sección mencionaremos algunas ideas y técnicas que pueden usarse en cualquier problema en que intervengan las leyes de Newton. El lector aprenderá otras en el capítulo 5, que extiende el uso de las leyes de Newton a situaciones más complicadas.

1. *Las leyes primera y segunda de Newton se refieren a un cuerpo específico*. Al usar la primera ley de Newton, $\sum \vec{F} = \mathbf{0}$, en una situación de equilibrio, o la segunda, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$, en una situación sin equilibrio, debemos decidir desde un

principio a qué cuerpo nos estamos refiriendo. Esta decisión tal vez parezca trivial, pero no lo es.

2. *Sólo importan las fuerzas que actúan sobre el cuerpo*. La sumatoria $\sum\vec{F}$ incluye todas las fuerzas que actúan *sobre* el cuerpo en cuestión. Por lo tanto, una vez que usted haya elegido el cuerpo que analizará, tendrá que identificar todas las fuerzas que actúan sobre él. No se confunda entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y las fuerzas que éste ejerce sobre algún otro. Por ejemplo, para analizar a una persona que camina, incluiríamos en $\sum\vec{F}$ la fuerza que el suelo ejerce sobre la persona al caminar, pero *no* la fuerza que la persona ejerce sobre el suelo (figura 4.29). Estas fuerzas forman un par acción-reacción y están relacionadas por la tercera ley de Newton; pero en $\sum\vec{F}$ sólo entra el miembro del par que actúa sobre el cuerpo que se esté considerando.
3. *Los diagramas de cuerpo libre son indispensables para identificar las fuerzas pertinentes*. Un **diagrama de cuerpo libre** es un diagrama que muestra el cuerpo elegido solo, "libre" de su entorno, con vectores que muestren las magnitudes y direcciones de todas las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo por todos los cuerpos que interactúan con él. Ya mostramos algunos diagramas de cuerpo libre en las figuras 4.18, 4.19, 4.21 y 4.26a. No olvide incluir todas las fuerzas que actúen *sobre* el cuerpo, y cuídese también de *no* incluir fuerzas que el cuerpo ejerza sobre otro cuerpo. En particular, las dos fuerzas de un par acción-reacción *nunca* deben aparecer en el mismo diagrama de cuerpo libre, porque nunca actúan sobre el mismo cuerpo. Tampoco se incluyen las fuerzas que un cuerpo ejerce sobre sí mismo, ya que éstas no pueden afectar su movimiento.

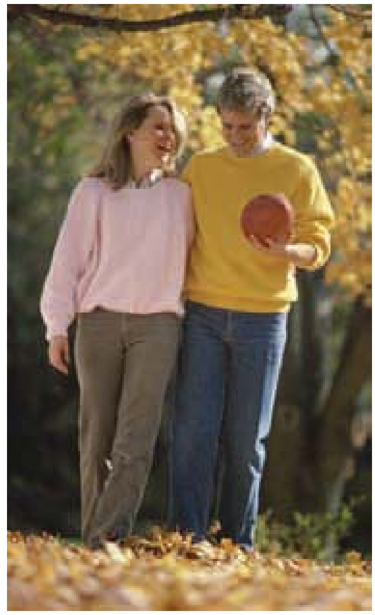
CUIDADO **Fuerzas en los diagramas de cuerpo libre** Al terminar de dibujar un diagrama de cuerpo libre, usted *debe* ser capaz de contestar, para cada fuerza, la pregunta: "¿qué otro cuerpo está aplicando dicha fuerza?" Si no puede responderla, tal vez está tratando con una fuerza inexistente. Cuídese sobre todo de evitar fuerzas ficticias como "la fuerza de aceleración" o "la fuerza $m\vec{a}$", que mencionamos en la sección 4.3.

Si en un problema intervienen dos o más cuerpos, hay que descomponer el problema y dibujar un diagrama de cuerpo libre para cada cuerpo. Por ejemplo, en la figura 4.27c hay un diagrama de cuerpo libre aparte para la cuerda en el caso en que ésta se considera sin masa (no actúa fuerza gravitacional sobre ella). La figura 4.28 también muestra diagramas para el bloque y el cantero; sin embargo, éstos *no* están completos porque no muestran todas las fuerzas que actúan sobre cada cuerpo. (Omitimos las fuerzas verticales: la fuerza del peso ejercida por la Tierra y la fuerza normal hacia arriba ejercida por el piso.)

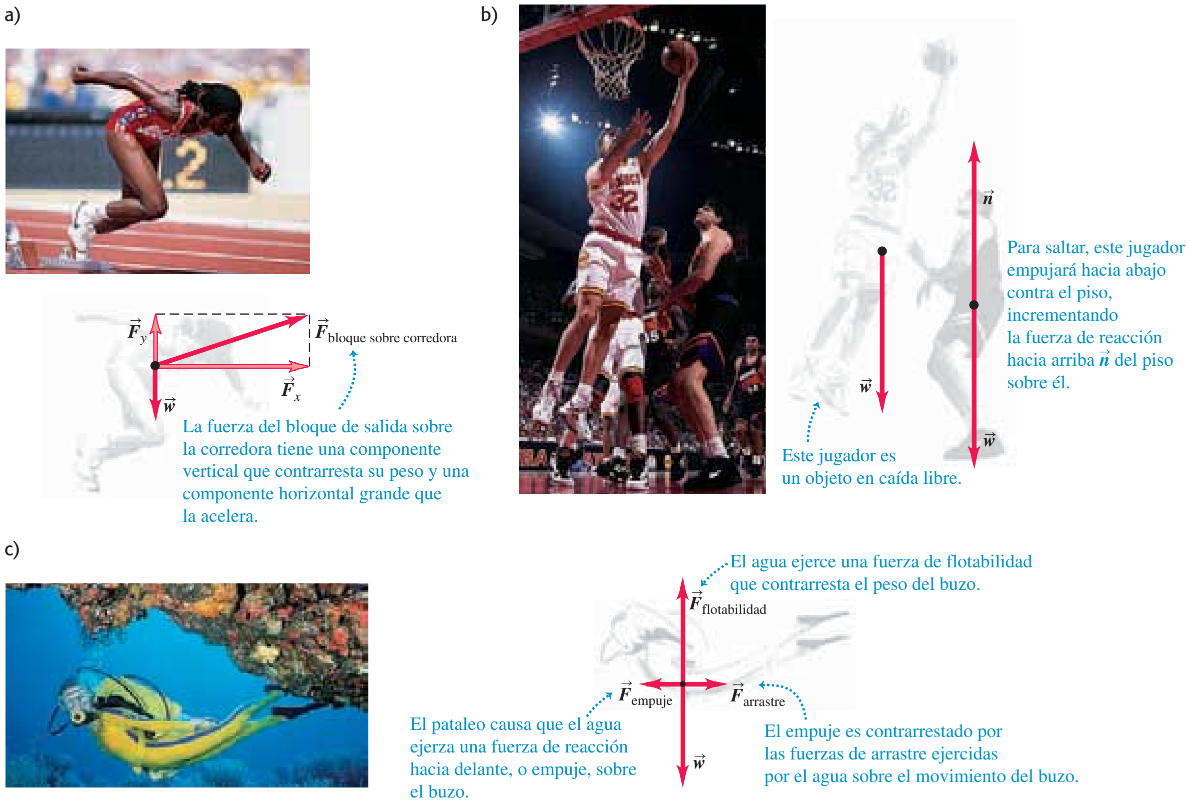
La figura 4.30 de la página 128 presenta algunas situaciones reales y los diagramas de cuerpo libre correspondientes. Observe que en cada situación una persona ejerce una fuerza sobre algo de su entorno; pero la fuerza que se destaca en el diagrama de cuerpo libre de la persona es la reacción de los alrededores *sobre* la persona.

Evalúe su comprensión de la sección 4.6 La fuerza de flotabilidad que se muestra en la figura 4.30c es una mitad de un par acción-reacción. ¿Cuál fuerza es la otra mitad de este par? i) el peso del buzo; ii) la fuerza de empuje hacia delante; iii) la fuerza de arrastre hacia atrás; iv) la fuerza hacia abajo que el buzo ejerce sobre el agua; v) la fuerza hacia atrás que el buzo ejerce sobre el agua al patalear.

4.29 El simple acto de caminar depende esencialmente de la tercera ley de Newton. Para iniciar el movimiento hacia adelante, empujamos el suelo hacia atrás con el pie. En reacción, el suelo empuja nuestro pie (y por lo tanto todo nuestro cuerpo) hacia adelante con una fuerza de la misma magnitud. Esta fuerza *externa*, aplicada por el suelo, es la que acelera nuestro cuerpo hacia adelante.



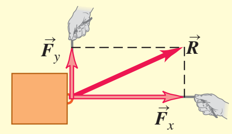
4.30 Ejemplos de diagramas de cuerpo libre. En cada caso, el diagrama de cuerpo libre muestra todas las fuerzas externas que actúan sobre el objeto en cuestión.



CAPÍTULO 4 RESUMEN

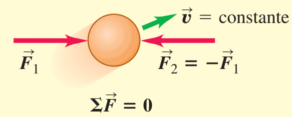
Fuerza como vector: La fuerza es una medida cuantitativa de la interacción de dos cuerpos. Es una cantidad vectorial. Si varias fuerzas actúan sobre un cuerpo, el efecto sobre su movimiento es igual al que se da cuando una sola fuerza, igual a la suma vectorial (resultante) de las fuerzas, actúa sobre el cuerpo. (Véase el ejemplo 4.1.)

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots = \sum \vec{F} \qquad (4.1)$$



La fuerza neta sobre un cuerpo y la primera ley de Newton: La primera ley de Newton dice que, si la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo (la *fuerza neta*) es cero, el cuerpo está en equilibrio y tiene aceleración cero. Si el cuerpo está inicialmente en reposo, permanece en reposo; si está inicialmente en movimiento, sigue moviéndose con velocidad constante. Esta ley sólo es válida en marcos de referencia inerciales. (Véanse los ejemplos 4.2 y 4.3.)

$$\sum \vec{F} = \mathbf{0} \qquad (4.3)$$



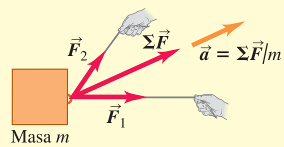
Masa, aceleración y segunda ley de Newton: Las propiedades inerciales de un cuerpo se caracterizan por su *masa*. La aceleración de un cuerpo bajo la acción de un conjunto de fuerzas dado es directamente proporcional a la suma vectorial de las fuerzas (la *fuerza neta*) e inversamente proporcional a la masa del cuerpo. Esta relación es la segunda ley de Newton. Al igual que la primera ley, ésta sólo es válida en marcos de referencia inerciales. La unidad de fuerza se define en términos de las unidades de masa y aceleración. En el SI, la unidad de fuerza es el newton (N), igual a 1 kg · m/s². (Véanse los ejemplos 4.4 y 4.5.)

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \qquad (4.7)$$

$$\sum F_x = ma_x$$

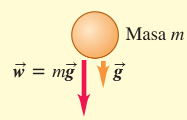
$$\sum F_y = ma_y \qquad (4.8)$$

$$\sum F_z = ma_z$$



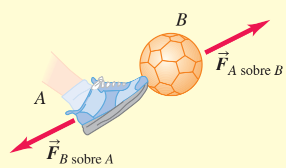
Peso: El peso $\vec{w}$ de un cuerpo es la fuerza gravitacional ejercida sobre él por la Tierra. El peso es una cantidad vectorial. La magnitud del peso de un cuerpo en un lugar dado es igual al producto de su masa m y la magnitud de la aceleración debida a la gravedad g en ese lugar. Mientras que el peso de un cuerpo depende de su ubicación, la masa es independiente de la ubicación. (Véanse los ejemplos 4.6 y 4.7.)

$$w = mg \qquad (4.9)$$



Tercera ley de Newton y pares acción-reacción: La tercera ley de Newton dice que cuando dos cuerpos interactúan, se ejercen mutuamente fuerzas que en todo instante son iguales en magnitud y opuestas en dirección. Estas fuerzas se denominan fuerzas de acción-reacción y cada una actúa sólo sobre uno de los dos cuerpos; nunca actúan sobre el mismo cuerpo. (Véanse los ejemplos 4.8 a 4.11.)

$$\vec{F}_{A \text{ sobre } B} = -\vec{F}_{B \text{ sobre } A} \qquad (4.11)$$



Términos clave

dinámica, *107*
leyes del movimiento de Newton, *107*
mecánica clásica (newtoniana), *107*
fuerza, *108*
fuerza de contacto, *108*
fuerza normal, *108*
fuerza de fricción, *108*
fuerza de tensión, *108*
fuerzas de largo alcance, *108*
peso, *108*
superposición de fuerzas, *109*
fuerza neta, *110*
primera ley del movimiento de Newton, *111*
inercia, *112*
equilibrio, *112*
marco de referencia inercial, *113*
masa, *116*
kilogramo, *116*
newton, *116*
segunda ley del movimiento de Newton, *117*
tercera ley del movimiento de Newton, *123*
par acción-reacción, *123*
tensión, *126*
diagrama de cuerpo libre, *127*

Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

La tercera ley de Newton nos dice que el niño sentado (a quien llamaremos Raymundo) empuja sobre el niño que está de pie (a quien llamaremos Esteban) justo tan fuerte como Esteban empuja a Raymundo, pero en la dirección opuesta. Esto es válido si Raymundo empuja "activamente" sobre Esteban (por ejemplo, si Raymundo empujó su mano contra Esteban) o "pasivamente" (si la espalda de Raymundo es la que empuja, como en la fotografía con que inicia el capítulo). Las magnitudes de fuerza serían mayores en el caso "activo" que en el caso "pasivo", pero de cualquier modo, el empuje de Raymundo sobre Esteban es tan fuerte como el empuje de Esteban sobre Raymundo.

Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

4.1 Respuesta: iv) La fuerza gravitacional sobre el bloque apunta directo hacia abajo. En la figura 4.6 el eje x apunta hacia arriba a la derecha, y el eje y apunta hacia arriba a la izquierda. Por lo tanto, la fuerza gravitacional tiene tanto una componente x como una componente y, y ambas son negativas.
4.2 Respuesta: i), ii) y iv) En i), ii) y iv) el cuerpo no acelera, por lo cual la fuerza neta sobre él es cero. En la situación iv), la caja permanece estacionaria o en reposo, vista en el marco de referencia inercial del suelo, mientras el camión acelera hacia adelante, como la patinadora de la fig. 4.11a. En la situación iii), el halcón se mueve en un círculo; por lo tanto, está acelerando y *no* está en equilibrio.
4.3 Respuesta: iii), i) y iv) (empatados), ii) La aceleración es igual a la fuerza neta dividida entre la masa. Por lo tanto, la magnitud de la aceleración en cada situación es
i) $a = (2.0\text{ N})/(2.0\text{ kg}) = 1.0\text{ m/s}^2$;
ii) $a = (8.0\text{ N})/(2.0\text{ N}) = 4.0\text{ m/s}^2$;
iii) $a = (2.0\text{ N})/(8.0\text{ kg}) = 0.25\text{ m/s}^2$;
iv) $a = (8.0\text{ N})/(8.0\text{ kg}) = 1.0\text{ m/s}^2$.
4.4 La astronauta requeriría esforzarse el doble para caminar porque su peso en ese planeta sería el doble que en la Tierra. En cambio, sería igualmente fácil atrapar la pelota que se mueve horizontalmente. La *masa* de la pelota no cambia, así que la fuerza horizontal que la astronauta tendría que ejercer para detenerla (esto es, para impartirle la misma aceleración) sería la misma que en la Tierra.
4.5 Por la tercera ley de Newton, las dos fuerzas tienen la misma magnitud. Puesto que la masa del automóvil es mucho mayor que la del mosquito, el vehículo sufre una aceleración minúscula, imperceptible, en respuesta a la fuerza del impacto. En cambio, el mosquito, con su masa tan pequeña, sufre una aceleración catastróficamente alta.
4.6 Respuesta: iv) La fuerza de flotabilidad es una fuerza *hacia arriba* que el *agua* ejerce sobre el *buzo*. Por la tercera ley de Newton, la otra mitad del par acción-reacción es una fuerza *hacia abajo* que el *buzo* ejerce sobre el *agua* y tiene la misma magnitud que la fuerza de flotabilidad. Es cierto que el peso del buzo es también hacia abajo y tiene la misma magnitud que la fuerza de flotabilidad; sin embargo, el peso actúa sobre el mismo cuerpo (el buzo) que la fuerza de flotabilidad y, por lo tanto, estas fuerzas no constituyen un par acción-reacción.

PROBLEMAS

Para la tarea asignada por el profesor, visite **www.masteringphysics.com**

Preguntas para análisis

P4.1. ¿Un cuerpo puede estar en equilibrio si sólo una fuerza actúa sobre él? Explique su respuesta.
P4.2. Una bola lanzada verticalmente hacia arriba tiene velocidad cero en su punto más alto. ¿Está en equilibrio ahí? ¿Por qué?
P4.3. Un globo con helio se mantiene en el aire sin ascender ni descender. ¿Está en equilibrio? ¿Qué fuerzas actúan sobre él?
P4.4. Al volar en un avión de noche en aire tranquilo, no tenemos sensación de movimiento, aunque el avión vaya a 800 km/h (500 mi/h). ¿Por qué?
P4.5. Si se tira de los extremos de una cuerda en equilibrio con fuerzas de igual magnitud y dirección opuesta, ¿por qué la tensión en la cuerda total no es cero?
P4.6. Imagine que ata un ladrillo al extremo de una cuerda y lo hace girar alrededor de usted en un círculo horizontal. Describa la trayectoria del ladrillo después de que usted repentinamente suelta la cuerda.
P4.7. Si un automóvil se detiene repentinamente, los pasajeros tienden a moverse hacia adelante, en relación con sus asientos. ¿Por qué? Si el auto da una vuelta abrupta, los pasajeros tienden a deslizarse hacia un lado. ¿Por qué?
P4.8. Algunas personas dicen que la "fuerza de la inercia" (o la "fuerza del ímpetu") lanza a los pasajeros hacia adelante cuando un automóvil frena abruptamente. ¿Qué error tiene esa explicación?
P4.9. Un pasajero de un autobús en movimiento, sin ventanillas, ve que una pelota que estaba en reposo en el pasillo comienza a moverse repentinamente hacia atrás. Piense en dos posibles explicaciones y en cómo decidir cuál es correcta.
P4.10. Suponga que usted elige como unidades fundamentales del SI fuerza, longitud y tiempo, en vez de masa, longitud y tiempo. ¿Qué unidades tendría la masa en términos de las unidades fundamentales?
P4.11. En la Antigüedad, algunos griegos creían que el "estado natural" de un objeto era estar reposo, por lo que los objetos buscarían su estado natural llegando al reposo si se les dejaba solos. Explique porque esta visión parecería realmente muy convincente en el mundo actual.

P4.12. ¿Por qué es la Tierra sólo un marco de referencia aproximadamente inercial?

P4.13. ¿La segunda ley de Newton se cumple para un observador en una vagoneta que acelera, frena o da vuelta? Explique su respuesta.

P4.14. Algunos estudiantes llaman "fuerza de aceleración" a la cantidad $m\vec{a}$. ¿Es correcto decir que esa cantidad es una fuerza? En tal caso, ¿qué ejerce dicha fuerza? Si no, ¿cómo puede describirse mejor esta cantidad?

P4.15. La aceleración de un cuerpo que cae se mide en un elevador que viaja hacia arriba a una rapidez constante de 9.8 m/s. ¿Qué resultado se obtiene?

P4.16. Podemos jugar a atrapar pelotas en un autobús que se mueve con rapidez constante en un camino recto, igual que si estuviera en reposo. ¿Podemos hacerlo si el autobús da vuelta con rapidez constante en un camino horizontal? ¿Por qué?

P4.17. Algunos estudiantes afirman que la fuerza de gravedad sobre un objeto es de 9.8 m/s^2. ¿Qué es incorrecto en este punto de vista?

P4.18. La cabeza de un martillo se está aflojando de su mango de madera. ¿Cómo golpearía el mango contra una acera de concreto para apretar la cabeza? ¿Por qué funciona esto?

P4.19. ¿Por qué puede doler más patear un peñasco que un guijarro? ¿El peñasco *debe* doler más? Explique su respuesta.

P4.20. "No es la caída lo que lastima, es la parada repentina al final". Traduzca este dicho al lenguaje de las leyes del movimiento de Newton.

P4.21. Una persona puede clavarse en agua desde una altura de 10 m sin lastimarse, pero si salta desde un edificio de 10 m y cae en una acera de concreto, seguramente se lastimará mucho. ¿A qué se debe la diferencia?

P4.22. ¿Por qué por seguridad los automóviles se diseñan de tal forma que se aplasten por el frente y por detrás? ¿Y por qué no para choques de lado y volcaduras?

P4.23. Al dispararse una bala de un rifle, ¿cuál es el origen de la fuerza que acelera la bala?

P4.24. Si un peso grande se levanta con un cordel que apenas lo resiste, es posible levantarlo tirando uniformemente; pero si se da un tirón repentino, el cordel se rompe. Explique esto en términos de las leyes del movimiento de Newton.

P4.25. Una caja grande cuelga del extremo de una cuerda vertical. ¿La tensión en la cuerda es mayor cuando la caja está en reposo o cuando sube con rapidez constante? Si la caja sube, ¿la tensión en la cuerda es mayor cuando está acelerando o cuando está frenando? En cada caso, explique en términos de las leyes del movimiento de Newton.

P4.26. ¿Cuál siente un mayor tirón por la gravedad terrestre, una piedra de 10 kg o una piedra de 20 kg? Si usted las deja caer, ¿por qué la piedra de 20 kg no cae con el doble de la aceleración que la piedra de 10 kg? Explique su razonamiento.

P4.27. ¿Por qué no debemos decir que 1.0 kg *es igual* a 2.2 lb?

P4.28. Un caballo está enganchado a un carro. Puesto que el carro tira hacia atrás del caballo tan fuerte como éste tira del carro, ¿por qué el carro no está en equilibrio, sin importar qué tan fuerte el caballo tire del carro?

P4.29. ¿Verdadero o falso? Usted ejerce un empujón P sobre un objeto y éste lo empuja a usted hacia atrás con una fuerza F. Si el objeto se mueve a velocidad constante, entonces, F es igual a P, pero si el objeto acelera, entonces, P debe ser mayor que F.

P4.30. Un camión grande (T) y un automóvil compacto (C) chocan de frente y el camión ejerce una fuerza $\vec{F}_{\text{T sobre C}}$ sobre el auto, y éste ejerce una fuerza $\vec{F}_{\text{C sobre T}}$ sobre el camión. ¿Cuál fuerza tiene mayor magnitud, o son iguales? ¿Su respuesta depende de la rapidez de cada vehículo antes del choque? ¿Por qué?

P4.31. Cuando un automóvil se detiene en una carretera horizontal, ¿qué fuerza hace que frene? Cuándo el auto aumenta su rapidez en la misma carretera, ¿qué fuerza hace que acelere? Explique su respuesta.

P4.32. Un automóvil compacto empuja una camioneta grande averiada, y viajan por la carretera con la misma velocidad y aceleración. Cuando el auto acelera, ¿la fuerza que ejerce sobre la camioneta es mayor, menor o de la misma magnitud que la camioneta ejerce sobre él? ¿A cuál vehículo se aplica la mayor fuerza neta, o son iguales las fuerzas netas? Explique su respuesta.

P4.33. Considere dos personas que tiran en direcciones opuestas de los extremos de una cuerda. Por la tercera ley de Newton, la fuerza que A ejerce sobre B es tan grande como la que B ejerce sobre A. Entonces, ¿qué determina quién gana? (*Sugerencia*: dibuje un diagrama de cuerpo libre que muestre todas las fuerzas que actúan sobre cada persona.)

P4.34. En la Luna, $g = 1.62\ m/s^2$. Si un ladrillo de 2 kg cae sobre su pie desde una altura de 2 m, ¿le dolerá más, menos o lo mismo en la Luna que en la Tierra? Explique su respuesta. Si se lanza el mismo ladrillo y lo golpea a usted moviéndose horizontalmente a 6 m/s, le dolerá más, menos o igual en la Luna que en la Tierra? Explique su respuesta. (En la Luna, suponga que está dentro de un recinto presurizado, así que no usa traje espacial.)

P4.35. Un manual para aprendices de pilotos indica: "cuando un avión vuela a una altitud constante, sin ascender ni descender, la fuerza de sustentación de las alas es igual al peso del avión. Cuando el avión asciende a ritmo constante, la sustentación es mayor que el peso; cuando el avión desciende a ritmo constante, la sustentación es menor que el peso". ¿Son correctas estas afirmaciones? Explique su respuesta.

P4.36. Si usted tiene las manos mojadas y no dispone de una toalla, puede eliminar el exceso de agua sacudiéndolas. ¿Por qué se elimina el agua así?

P4.37. Si está en cuclillas (digamos, al examinar los libros del estante más bajo en una biblioteca o librería) y se para repentinamente, probablemente sentirá un mareo temporal. ¿Cómo explican las leyes del movimiento de Newton este suceso?

P4.38. Cuando un automóvil es golpeado por atrás, los pasajeros sienten un *latigazo*. Use las leyes del movimiento de Newton para explicar este fenómeno.

P4.39. En un choque de frente entre dos automóviles, los pasajeros que no usan cinturón de seguridad podrían ser lanzados a través del parabrisas. Use las leyes del movimiento de Newton para explicar este fenómeno.

P4.40. En un choque de frente entre un automóvil compacto de 1000 kg y uno grande de 2500 kg, ¿cuál experimenta mayor fuerza? Explique su respuesta. ¿Cuál experimenta mayor aceleración? ¿Por que? Ahora explique por qué los pasajeros del auto más pequeño tienen mayor probabilidad de lesionarse que los del auto grande, aunque las carrocerías de ambos vehículos tengan la misma resistencia.

P4.41. Suponga que está en un cohete sin ventanillas que viaja en el espacio profundo, lejos de cualquier otro objeto. Sin ver hacia fuera del cohete y sin hacer contacto alguno con el mundo exterior, explique cómo podría determinar si el cohete: *a*) se mueve hacia adelante con una rapidez constante igual al 80% de la de la luz; *b*) está acelerando hacia adelante.

Ejercicios

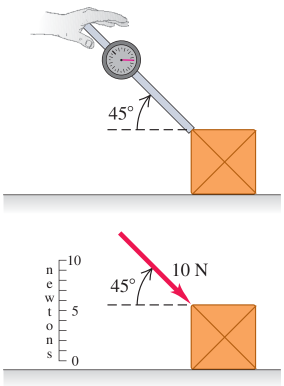
Sección 4.1 Fuerza e interacciones

4.1. Dos fuerzas tienen la misma magnitud F. ¿Qué ángulo hay entre los dos vectores si su resultante tiene magnitud *a*) $2F$? *b*) $\sqrt{2}F$? *c*) cero? Dibuje los 3 vectores en cada situación.

4.2. En vez de usar los ejes x y y de la figura 4.8 para analizar la situación del ejemplo 4.1, use ejes girados 37.0° en el sentido antihorario, de modo que el eje y sea paralelo a la fuerza de 250 N. *a*) Para estos ejes, obtenga las componentes x y y de la fuerza neta sobre el cinturón. *b*) Use esas componentes para obtener la magnitud y dirección de la fuerza neta. Compare sus resultados con los del ejemplo 4.1.

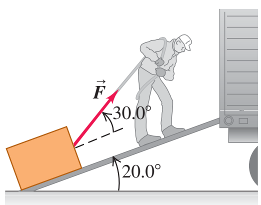
4.3. Un almacenista empuja una caja por el piso, como se indica en la figura 4.31, con una fuerza de 10 N que apunta 45° hacia abajo de la horizontal. Obtenga las componentes horizontal y vertical de la fuerza.

Figura 4.31 Ejercicio 4.3.



4.4. Un hombre arrastra hacia arriba un baúl por la rampa de un camión de mudanzas. La rampa está inclinada 20.0º y el hombre tira con una fuerza $\vec{F}$ cuya dirección forma un ángulo de 30.0° con la rampa (figura 4.32). *a*) ¿Qué $\vec{F}$ se necesita para que la componente F_x paralela a la rampa sea de 60.0 N? *b*) ¿Qué magnitud tendrá entonces la componente F_y perpendicular a la rampa?

Figura 4.32 Ejercicio 4.4.



4.5. Dos perros tiran horizontalmente de cuerdas atadas a un poste; el ángulo entre las cuerdas es de 60.0°. Si el perro *A* ejerce una fuerza de 270 N, y el *B*, de 300 N, calcule la magnitud de la fuerza resultante y su ángulo con respecto a la cuerda del perro *A*.

4.6. Dos fuerzas, $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$, actúan sobre un punto. La magnitud de $\vec{F}_1$ es de 9.00 N, y su dirección es de 60.0° sobre el eje *x* en el segundo cuadrante. La magnitud de $\vec{F}_2$ es 6.00 N, y su dirección es 53.1° bajo el eje *x* en el tercer cuadrante. *a*) Obtenga las componentes *x* y *y* de la fuerza resultante. *b*) Obtenga la magnitud de la fuerza resultante.

Sección 4.3 Segunda ley de Newton

4.7. Si se aplica una fuerza neta horizontal de 132 N a una persona de 60 kg que descansa en el borde de una alberca, ¿qué aceleración horizontal se produce?

4.8. ¿Qué fuerza neta se requiere para impartir a un refrigerador de 135 kg una aceleración de 1.40 m/s^2?

4.9. Una caja descansa sobre un estanque helado que actúa como superficie horizontal sin fricción. Si un pescador aplica una fuerza horizontal de 48.0 N a la caja y produce una aceleración de 3.00 m/s^2, ¿qué masa tiene la caja?

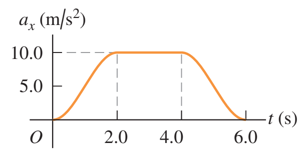
4.10. Un estibador aplica una fuerza horizontal constante de 80.0 N a un bloque de hielo en reposo sobre un piso horizontal, en el que la fricción es despreciable. El bloque parte del reposo y se mueve 11.0 m en 5.00 s. *a*) ¿Qué masa tiene el bloque? *b*) Si el trabajador deja de empujar a los 5.00 s, qué distancia recorrerá el bloque en los siguientes 5.00 s?

4.11. Un disco de hockey con masa de 0.160 kg está en reposo en el origen ($x = 0$) sobre la pista, que es y sin fricción. En el tiempo $t = 0$, un jugador aplica una fuerza de 0.250 N al disco, paralela al eje *x*, y deja de aplicarla en $t = 2.00$ s. *a*) ¿Qué posición y rapidez tiene el disco en $t = 2.00$ s? *b*) Si se aplica otra vez esa fuerza en $t = 5.00$ s, ¿qué posición y rapidez tiene el disco en $t = 7.00$ s?

4.12. Una fuerza horizontal neta de 140 N actúa sobre una caja de 32.5 kg que inicialmente está en reposo en el piso de una bodega. *a*) ¿Qué aceleración se produce? *b*) ¿Qué distancia recorre la caja en 10.0 s? *c*) ¿Qué rapidez tiene después de 10.0 s?

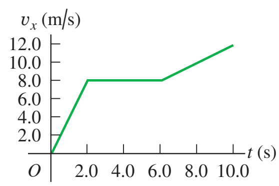
4.13. Un carrito de juguete de 4.50 kg sufre una aceleración en línea recta (el eje *x*). La gráfica de la figura 4.33 muestra esta aceleración en función del tiempo. *a*) Calcule la fuerza neta máxima sobre este carrito. ¿Cuándo ocurre esta fuerza máxima? *b*) En qué instantes la fuerza neta sobre el carrito es constante? *c*) ¿Cuándo la fuerza neta es igual a cero?

Figura 4.33 Ejercicio 4.13.



4.14. Un gato de 2.75 kg se mueve en línea recta (el eje *x*). La figura 4.34 muestra una gráfica de la componente *x* de la velocidad de este gato en función del tiempo. *a*) Calcule la fuerza neta máxima sobre este gato. ¿Cuándo ocurre dicha fuerza? *b*) ¿Cuándo la fuerza neta sobre el gato es igual a cero? *c*) ¿Cuál es la fuerza neta en el tiempo 8.5 s?

Figura 4.34 Ejercicio 4.14.



4.15. Un pequeño cohete de 8.00 kg quema combustible que ejerce una fuerza hacia arriba que varía con el tiempo sobre él,mientras se mueve en la plataforma de lanzamiento. Esta fuerza cumple con la ecuación $F = A + Bt^2$. Las mediciones demuestran que en $t = 0$, la fuerza es de 100.0 N y al final de los primeros 2.00 s, es de 150.0 N. *a*) Encuentre las constantes *A* y *B*, incluyendo sus unidades del SI. *b*) Obtenga la fuerza *neta* sobre este cohete y su aceleración i) en el instante en que empieza a quemarse el combustible y ii) 3.00 s después del comienzo de la ignición del combustible. *c*) Suponga que usted estuvo usando el cohete en el espacio exterior, lejos de cualquier gravedad. ¿Cuál sería su aceleración 3.00 s después de la ignición del combustible?

4.16. Un electrón (masa $= 9.11 \times 10^{-31}$ kg) sale de un extremo de un cinescopio con rapidez inicial cero y viaja en línea recta hacia la rejilla aceleradora, a 1.80 cm de distancia, llegando a ella con rapidez de 3.00×10^6 m/s. Si la fuerza neta es constante, calcule *a*) la aceleración, *b*) el tiempo para llegar a la rejilla, y *c*) la fuerza neta en newtons. (Puede despreciarse la fuerza gravitacional sobre el electrón.)

Sección 4.4 Masa y peso

4.17. Supermán lanza un peñasco de 2400 N a un adversario. ¿Qué fuerza horizontal debe aplicar al peñasco para darle una aceleración horizontal de 12.0 m/s^2?

4.18. Una bola de bolos pesa 71.2 N. El jugador aplica una fuerza horizontal de 160 N (36.0 lb) a la bola. ¿Qué magnitud tiene la aceleración horizontal de la bola?

4.19. En la superficie de Io, una luna de Júpiter, la aceleración debida a la gravedad es $g = 1.81\ \text{m/s}^2$. Una sandía pesa 44.0 N en la superficie terrestre. *a*) ¿Qué masa tiene la sandía en la superficie terrestre? *b*) ¿Qué masa y peso tiene en la superficie de Io?

4.20. La mochila de una astronauta pesa 17.5 N cuando ella está en la Tierra, pero sólo 3.24 N cuando está en la superficie de un asteroide. *a*) ¿Cuál es la aceleración debida a la gravedad en ese asteroide? *b*) ¿Cuál es la masa de la mochila en el asteroide?

Sección 4.5 Tercera ley de Newton

4.21. Una velocista de alto rendimiento puede arrancar del bloque de salida con una aceleración casi horizontal de magnitud $15\ \text{m/s}^2$. ¿Qué fuerza horizontal debe aplicar una corredora de 55 kg al bloque de salida al inicio para producir esta aceleración? ¿Qué cuerpo ejerce la fuerza que impulsa a la corredora: el bloque de salida o ella misma?

4.22. Imagine que sostiene un libro que pesa 4 N en reposo en la palma de su mano. Complete lo que sigue: *a*) ___________ ejerce una fuerza hacia abajo de magnitud 4 N sobre el libro. *b*) La mano ejerce una fuerza hacia arriba de magnitud ___________ sobre ___________. *c*) ¿La fuerza hacia arriba del inciso *b*) es la reacción a la fuerza hacia abajo del inciso *a*)? *d*) La reacción a la fuerza en el inciso *a*) es una fuerza de magnitud ___________ ejercida sobre ___________ por ___________; su dirección es ___________. *e*) La reacción a la fuerza del inciso *b*) es una fuerza de magnitud ___________ ejercida sobre ___________ por ___________; su dirección es ___________. *f*) Las fuerzas de los incisos *a*) y *b*) son iguales y opuestas por la ___________ ley de Newton. *g*) Las fuerzas de los incisos *b*) y *e*) son iguales y opuestas por la ___________ ley de Newton. Suponga ahora que ejerce una fuerza hacia arriba de 5 N sobre el libro. *h*) ¿Éste sigue en equilibrio? *i*) ¿La fuerza que la mano ejerce sobre el libro es igual y opuesta a la que la Tierra ejerce sobre el libro? *j*) ¿La fuerza que la Tierra ejerce sobre el libro es igual y opuesta a la que el libro ejerce sobre la Tierra? *k*) La fuerza que la mano ejerce sobre el libro es igual y opuesta a la que el libro ejerce sobre la mano? Por último, suponga que usted quita de repente la mano mientras el libro está subiendo. *l*) ¿Cuantas fuerzas actúan entonces sobre el libro? *m*) ¿El libro está en equilibrio?

4.23. Se empuja una botella a lo largo de una mesa y cae por el borde. *No* desprecie la resistencia del aire. *a*) ¿Qué fuerzas se ejercen sobre la botella mientras está en el aire? *b*) ¿Cuál es la reacción a cada fuerza; es decir, qué cuerpo ejerce la reacción sobre qué otro cuerpo?

4.24. La fuerza normal hacia arriba que el piso de un elevador ejerce sobre un pasajero que pesa 650 N es de 620 N. ¿Cuáles son las fuerzas de reacción a estas dos fuerzas? ¿El pasajero está acelerando? Si acaso, ¿en qué dirección y qué magnitud tiene la aceleración?

4.25. Una estudiante con 45 kg de masa se lanza desde un trampolín alto. Tomando 6.0×10^{24} kg como masa de la Tierra, calcule la aceleración de la Tierra hacia ella, si la de ella es de $9.8\ \text{m/s}^2$ hacia la Tierra. Suponga que la fuerza neta sobre la Tierra es la fuerza de gravedad que ella ejerce.

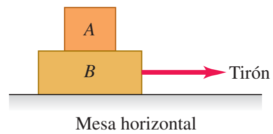
Sección 4.6 Diagramas de cuerpo libre

4.26. Un atleta lanza una pelota de masa m directamente hacia arriba y ésta no experimenta resistencia del aire considerable. Dibuje un diagrama de cuerpo libre de esta pelota mientas está en el aire y *a*) se mueva hacia arriba; *b*) en su punto más alto; *c*) se mueva hacia abajo. *d*) Repita los incisos *a*), *b*) y *c*) si el atleta lanza la pelota a un ángulo de 60° por encima de la horizontal, en vez de directamente hacia arriba.

4.27. Dos cajas, A y B, descansan juntas sobre una superficie horizontal sin fricción. Las masas correspondientes son m_A y m_B. Se aplica una fuerza horizontal $\vec{F}$ a la caja A y las dos cajas se mueven hacia la derecha. *a*) Dibuje los diagramas de cuerpo libre claramente marcados para cada caja. Indique cuáles pares de fuerzas, si acaso, son pares acción-reacción según la tercera ley. *b*) Si la magnitud de $\vec{F}$ es menor que el peso total de las dos cajas, ¿hará que se muevan las cajas? Explique su respuesta.

4.28. Una persona jala horizontalmente del bloque B de la figura 4.35, haciendo que ambos bloques se muevan juntos como una unidad. Mientras este sistema se mueve, elabore un cuidadoso diagrama de cuerpo libre, rotulado, del bloque A, si *a*) la mesa no tiene fricción; y si *b*) hay fricción entre el bloque B y la mesa, y la fuerza sobre el bloque B es igual a la fuerza de fricción sobre él debido a la mesa.

Figura 4.35 Ejercicio 4.28.



4.29. Una pelota cuelga de una cuerda larga atada al techo de un vagón de tren que viaja al este sobre vías horizontales. Un observador dentro del tren observa que la pelota cuelga inmóvil. Dibuje un diagrama de cuerpo libre claramente marcado para la pelota, si *a*) el tren tiene velocidad uniforme y *b*) si el tren acelera de manera uniforme. ¿La fuerza neta sobre la pelota es cero en cualquier caso? Explique su respuesta.

4.30. Una caja grande que contiene su nueva computadora descansa en la plataforma de su camioneta, que está detenida en un semáforo. El semáforo cambia a verde, usted pisa el acelerador y la camioneta se acelera. Horrorizado, ve cómo la caja comienza a deslizarse hacia la parte de atrás de la camioneta. Dibuje un diagrama de cuerpo libre claramente marcado para la camioneta y para la caja. Indique los pares de fuerzas, si los hay, que sean pares acción-reacción según la tercera ley. (Entre la plataforma de la camioneta y la caja hay fricción.)

4.31. Una silla de 12.0 kg de masa descansa en un piso horizontal, que tiene cierta fricción. Usted empuja la silla con una fuerza $F = 40.0$ N dirigida con un ángulo de 37.0° bajo la horizontal, y la silla se desliza sobre el piso. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre claramente marcado para la silla. *b*) Use su diagrama y las leyes de Newton para calcular la fuerza normal que el piso ejerce sobre la silla.

4.32. Un esquiador de 65.0 kg de masa es remolcado cuesta arriba por una ladera nevada con rapidez constante, sujeto a una cuerda paralela al suelo. La pendiente es constante de 26.0° sobre la horizontal, y la fricción es despreciable. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre claramente marcado para el esquiador. *b*) Calcule la tensión en la cuerda.

4.33. Un camión está jalando un automóvil en una autopista horizontal mediante una cuerda horizontal. El auto está en la marcha (cambio) neutral, de manera que se puede suponer que no hay fricción considerable entre sus llantas y la autopista. Conforme el camión acelera para alcanzar la rapidez de crucero en la autopista, dibuje un diagrama de cuerpo libre de *a*) el auto y *b*) el camión. *c*) ¿Qué fuerza acelera este sistema hacia delante? Explique cómo se origina esta fuerza.

Problemas

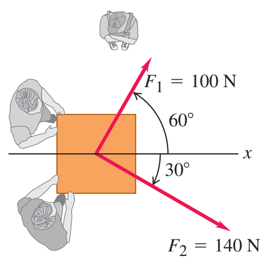
4.34. Una bala de rifle calibre 22 que viaja a 350 m/s golpea un árbol grande, penetrando a una profundidad de 0.130 m. La masa de la bala es de 1.80 g. Suponga una fuerza de frenado constante. *a*) ¿Cuánto tarda la bala en detenerse? b) ¿Qué fuerza (en N) ejerce el árbol sobre la bala?

4.35. Dos caballos tiran horizontalmente de cuerdas atadas al tronco de un árbol. Las fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ que aplican al tronco son tales que la fuerza neta (resultante) $\vec{R}$ tiene magnitud igual a la de $\vec{F}_1$ y está a 90° de $\vec{F}_1$. Sea $F_1 = 1300$ N y $R = 1300$ N. Calcule la magnitud de $\vec{F}_2$ y su dirección (relativa a $\vec{F}_1$).

4.36. Imagine que acaba de llegar al Planeta X y deja caer una pelota de 100 g desde una altura de 10.0 m, la cual tarda 2.2 s en llegar al suelo. Puede ignorar cualquier fuerza que la atmósfera del planeta ejerza sobre la pelota. ¿Cuánto pesa la pelota de 100 g en la superficie del Planeta X?

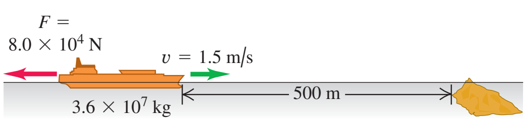
4.37. Dos adultos y un niño quieren empujar un carrito con ruedas en la dirección x de la figura 4.36. Los adultos empujan con fuerzas horizontales $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ como se muestra en la figura. *a*) Calcule la magnitud y dirección de la fuerza *más pequeña* que el niño debería ejercer. Se pueden despreciar los efectos de la fricción. *b*) Si el niño ejerce la fuerza mínima obtenida en el inciso *a*), el carrito acelerará a 2.0 m/s^2 en la dirección $+x$. ¿Cuánto pesa el carrito?

Figura 4.36 Problema 4.37.



4.38. Los motores de un buque tanque se averiaron y el viento empuja la nave con rapidez constante de 1.5 m/s directo hacia un arrecife (figura 4.37). Cuando el barco está a 500 m del arrecife, el viento cesa y el maquinista logra poner en marcha los motores. El timón está atorado, así que la única opción es intentar acelerar hacia atrás. La masa del buque y su carga es 3.6×10^7 kg y los motores producen una fuerza horizontal neta de 8.0×10^4 N. ¿Chocará el barco contra el arrecife? Si lo hace, ¿se derramará el petróleo? El casco puede resistir impactos a una rapidez de 0.2 m/s o menos. Puede despreciarse la fuerza de retardo que el agua ejerce sobre el casco de la nave.

Figura 4.37 Problema 4.38.



4.39. Salto vertical sin carrera. El jugador de baloncesto Darrell Griffith saltó una vez 1.2 m (4 ft) sin carrera. (Esto significa que subió 1.2 m después de que sus pies se separaron del piso.) Griffith pesaba 890 N (200 lb). *a*) ¿Qué rapidez tenía al separarse del piso? *b*) Si sus pies tardaron 0.300 s en separarse del piso después de que Griffith inició su salto, ¿qué aceleración media (magnitud y dirección) tuvo mientras se estaba empujando contra el piso? *c*) Dibuje su diagrama de cuerpo libre (véase la sección 4.6). En términos de las fuerzas del diagrama, ¿qué fuerza neta actuó sobre Griffith? Use las leyes de Newton y los resultados del inciso *b*) para calcular la fuerza media que aplicó sobre el piso.

4.40. Un anuncio asegura que cierto automóvil puede "parar en un diez". ¿Qué fuerza neta sería necesaria para detener un auto de 850 kg que viaja a 45.0 km/h en una distancia igual al diámetro de una moneda de 10 centavos de dólar (1.8 cm)?

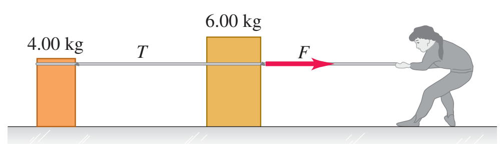
4.41. Una cubeta de 4.80 kg, llena de agua, se acelera hacia arriba con un cordel de masa despreciable, cuya resistencia a la rotura es de 75.0 N. *a*) Dibuje el diagrama de cuerpo libre de la cubeta. En términos de las fuerzas de su diagrama, ¿qué fuerza neta actúa sobre la cubeta? *b*) Aplique la segunda ley de Newton a la cubeta y determine la aceleración máxima hacia arriba que puede imprimirse a la cubeta sin romper el cordel.

4.42. Una paracaidista confía en que la resistencia del aire (principalmente sobre su paracaídas) reducirá su velocidad hacia abajo. Ella y su paracaídas tienen una masa de 55.0 kg y la resistencia del aire ejerce una fuerza total hacia arriba de 620 N sobre ella y el paracaídas. *a*) ¿Cuánto pesa la paracaidista? *b*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la paracaidista (véase la sección 4.6) y úselo para calcular la fuerza neta que actúa sobre ella. ¿Esta fuerza es hacia arriba o hacia abajo? *c*) ¿Qué aceleración (magnitud y dirección) tiene la paracaidista?

4.43. Dos cajas, una de 4.00 kg y la otra de 6.00 kg, descansan en la superficie horizontal sin fricción de un estanque congelado, unidas por una cuerda delgada (figura 4.38). Una mujer (con zapatos de golf que le dan tracción sobre el hielo) aplica una fuerza horizontal F a la caja de 6.00 kg y le imparte una aceleración de 2.50 m/s^2. *a*) ¿Qué aceleración tiene la caja de 4.00 kg? *b*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la caja de 4.00 kg y úselo junto con la segunda ley de Newton para calcular la tensión T en la cuerda que une las dos cajas. *c*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la caja de 6.00 kg. ¿Qué dirección tiene la fuerza neta sobre esta caja? ¿Cuál tiene mayor magnitud, la fuerza T o la fuerza F? *d*) Use el inciso *c*) y la segunda ley de Newton para calcular la magnitud de la fuerza F.

4.44. Una astronauta está unida a una nave espacial mediante un cable fuerte. La astronauta y su traje tienen una masa total de 105 kg; en tanto que la masa del cable es despreciable. La masa de la nave espacial es de 9.05×10^4 kg y está lejos de cualquier cuerpo astronómico grande, así que podemos despreciar las fuerzas gravitacionales sobre ella y la astronauta. También suponemos que inicialmente la nave espacial y la astronauta están en reposo en un marco de referencia inercial. Entonces, la astronauta tira del cable con una fuerza de 80.0 N. *a*) ¿Qué fuerza ejerce el cable sobre la astronauta? *b*) Puesto que $\sum\vec{F} = m\vec{a}$, ¿cómo puede un cable "sin masa" ($m = 0$) ejercer una fuerza? *c*) ¿Qué aceleración tiene la astronauta? *d*) ¿Qué fuerza ejerce el cable sobre la nave espacial? *e*) ¿Qué aceleración tiene la nave espacial?

Figura 4.38 Problema 4.43.



4.45. Imagine que, con la finalidad de estudiar los daños en aviones que chocan con aves grandes, usted diseña un cañón para acelerar objetos del tamaño de un pollo, de modo que su desplazamiento en el cañón esté dado por $x = (9.0 \times 10^3\ \text{m/s}^2)t^2 - (8.0 \times 10^4\ \text{m/s}^3)t^3$. El objeto sale del cañón en $t = 0.025$ s. *a*) ¿Qué longitud debe tener el cañón? *b*) ¿Con qué rapidez salen los objetos del cañón? *c*) ¿Qué fuerza neta debe ejercerse sobre un objeto de 1.50 kg en: i) $t = 0$? Y ii) $t = 0.025$ s?

4.46. Una nave espacial desciende verticalmente cerca de la superficie del Planeta X. Un empuje hacia arriba de 25.0 kN, producido por los motores, la frena a razón de 1.20 m/s^2, pero la nave aumenta su rapidez a razón de 0.80 m/s^2 si el empuje hacia arriba es de 10.0 kN. *a*) En cada caso, ¿qué dirección tiene la aceleración de la nave? *b*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la nave. En cada caso, aumentando o disminuyendo su rapidez, ¿qué dirección tiene la fuerza neta sobre la nave? *c*) Aplique la segunda ley de Newton a cada caso para averiguar el peso de la nave cerca de la superficie del Planeta X.

4.47. Un instrumento de 6.50 kg se cuelga de un alambre vertical dentro de una nave espacial que despega de la superficie de la Tierra. Esta nave parte del reposo y alcanza una altitud de 276 m en 15.0 s con aceleración constante. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el instrumento durante este tiempo. Indique qué fuerza es mayor. *b*) Obtenga la fuerza que el alambre ejerce sobre el instrumento.

4.48. Suponga que el cohete del problema 4.47 se acerca para un aterrizaje vertical, en vez de realizar un despegue. El capitán ajusta el empuje de los motores, de manera que la magnitud de la aceleración del cohete es la misma que tenía durante el despegue. Repita los incisos *a*) y *b*).

4.49. Un gimnasta de masa m sube por una cuerda vertical de masa despreciable sujeta al techo. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el gimnasta. Calcule la tensión en la cuerda si el gimnasta *a*) sube a un ritmo constante; *b*) cuelga inmóvil de la cuerda; *c*) sube la cuerda con aceleración de magnitud $|\vec{a}|$; *d*) baja deslizándose por la cuerda con aceleración hacia abajo de magnitud $|\vec{a}|$.

4.50. Un elevador cargado, cuyos cables están muy desgastados, tiene masa total de 2200 kg, y los cables aguantan una tensión máxima de 28,000 N. *a*) Dibuje el diagrama de cuerpo libre del elevador. En términos de las fuerzas de su diagrama, ¿qué fuerza neta actúa sobre el elevador? Aplique la segunda ley de Newton al elevador y calcule con qué aceleración máxima puede subir el elevador sin que se rompan los cables. *b*) ¿Cuál sería la respuesta al inciso *a*), si el elevador estuviera en la Luna, donde $g = 1.62\ \text{m/s}^2$)?

4.51. Salto al suelo. Un hombre de 75.0 kg se lanza desde una plataforma situada 3.10 m sobre el suelo. Mantiene las piernas rectas al caer pero, al tocar el piso, dobla las rodillas y, tratado como partícula, avanza 0.60 m más antes de parar. *a*) ¿Qué rapidez tiene al tocar el suelo? *b*) Tratándolo como partícula, ¿con qué aceleración (magnitud y dirección) se frena, si la aceleración se supone constante? *c*) Dibuje su diagrama de cuerpo libre (véase la sección 4.6). En términos de las fuerzas del diagrama, ¿qué fuerza neta actúa sobre él? Use las leyes de Newton y los resultados del inciso *b*) para calcular la fuerza media que sus pies ejercen sobre el piso al amortiguar la caída. Exprese la fuerza en newtons y como múltiplo de su peso.

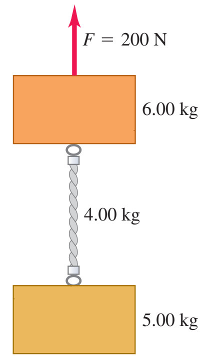
4.52. Un martillo de 4.9 N con velocidad inicial de 3.2 m/s hacia abajo es detenido en una distancia de 0.45 cm por un clavo en una tabla de pino. Además del peso, la persona que lo usa le aplica una fuerza descendente de 15 N. Suponga que la aceleración de la cabeza del martillo es constante mientras está en contacto con el clavo y se mueve hacia abajo. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la cabeza del martillo. Identifique la fuerza de reacción a cada fuerza de acción del diagrama. *b*) Calcule la fuerza hacia abajo $\vec{F}$ ejercida por la cabeza del martillo sobre el clavo mientras está en contacto con él y moviéndose hacia abajo. *c*) Suponga que la tabla es de madera dura y la distancia que el martillo recorre al detenerse es de sólo 0.12 cm. Las fuerzas descendentes sobre el martillo son las mismas que en el inciso *b*). ¿Qué fuerza $\vec{F}$ ejerce ahora la cabeza del martillo sobre el clavo, mientras está en contacto con él y moviéndose hacia abajo?

4.53. Un cable uniforme de peso w cuelga verticalmente hacia abajo, sostenido en su extremo superior por una fuerza hacia arriba de magnitud w. ¿Qué tensión hay en el cable *a*) en el extremo superior? b) ¿En el extremo inferior? *c*) ¿Y en medio? Su respuesta a cada inciso deberá incluir un diagrama de cuerpo libre. (*Sugerencia*: elija como cuerpo por analizar un punto o una sección del cable.) *d*) Grafique la tensión en la cuerda contra la distancia de su extremo superior.

4.54. Los dos bloques de la figura 4.39 están unidos por una cuerda gruesa uniforme de 4.00 kg. Se aplica una fuerza de 200 N hacia arriba, como se indica. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el bloque de 6.00 kg, uno para la cuerda de 4.00 kg y uno para el bloque de 5.00 kg. Para cada fuerza, indique qué cuerpo la ejerce. *b*) ¿Qué aceleración tiene el sistema? *c*) ¿Qué tensión hay en la parte superior de la cuerda? *d*) ¿Y en su parte media?

4.55. Un atleta, cuya masa es de 90.0 kg, está levantando pesas. Partiendo de una posición en reposo, levanta, con aceleración constante, una barra que pesa 490 N, elevándola 0.6 m en 1.6 s. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre claramente marcado para la barra y para el atleta. *b*) Use los diagramas del inciso *a*) y las leyes de Newton para obtener la fuerza total que sus pies ejercen sobre el piso mientras levanta la barra.

Figura 4.39 Problema 4.54.



4.56. Un globo aerostático sostiene una canasta, un pasajero y un poco de carga. Sea M la masa total. Aunque sobre el globo actúa una fuerza de sustentación ascendente, el globo inicialmente está acelerando hacia abajo a razón de $g/3$. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el globo en descenso. *b*) Determine la fuerza de sustentación hacia arriba en términos del peso total inicial Mg. *c*) El pasajero nota que se dirige hacia una catarata y decide que necesita subir. ¿Qué fracción del peso total deberá tirar por la borda para que el globo se acelere *hacia arriba* a razón de $g/2$? Suponga que la fuerza de sustentación no cambia.

4.57. Un estudiante trata de levantar una cadena que consta de tres eslabones idénticos. Cada uno tiene una masa de 300 g. La cadena está colgada verticalmente de una cuerda; el estudiante sostiene el extremo superior del cordel y tira hacia arriba. De esta forma, el estudiante ejerce, por medio de la cuerda, una fuerza de 12 N hacia arriba sobre la cadena. *a*) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para *cada* eslabón de la cadena y también para toda la cadena considerada como un solo cuerpo. *b*) Use los resultados del inciso *a*) y las leyes de Newton para calcular: i) la aceleración de la cadena y ii) la fuerza ejercida por el eslabón superior sobre el eslabón central.

4.58. La posición de un helicóptero de entrenamiento de 2.75×10^5 N que se prueba está dada por $\vec{r} = (0.020\ \text{m/s}^3)t^3\hat{\imath} + (2.2\ \text{m/s})t\hat{\jmath} - (0.060\ \text{m/s}^2)t^2\hat{k}$. Determine la fuerza neta sobre el helicóptero en $t = 5.0$ s.

4.59. Un objeto con masa m se mueve sobre el eje x. Su posición en función del tiempo está dada por $x(t) = At - Bt^3$, donde A y B son constantes. Calcule la fuerza neta sobre el objeto en función del tiempo.

4.60. Sobre un objeto con masa m inicialmente en reposo actúa una fuerza $\vec{F} = k_1\hat{\imath} + k_2t^3\hat{\jmath}$, donde k_1 y k_2 son constantes. Calcule la velocidad $\vec{v}(t)$ del objeto en función del tiempo.

Problemas de desafío

4.61. Si conocemos $F(t)$, la fuerza en función del tiempo, para movimiento rectilíneo, la segunda ley de Newton nos da $a(t)$, la aceleración en función del tiempo, que podemos integrar para obtener $v(t)$ y $x(t)$. Sin embargo, suponga que lo que se conoce es $F(v)$. *a*) La fuerza neta sobre un cuerpo que se mueve sobre el eje x es $-Cv^2$. Use la segunda ley de Newton escrita como $\sum F = m\, dv/dt$, y dos integraciones para demostrar que $x - x_0 = (m/C)\ln(v_0/v)$. *b*) Demuestre que dicha ley puede escribirse como $\sum F = mv\, dv/dx$. Deduzca la expresión del inciso *a*) usando esta forma y una integración.

4.62. Un objeto de masa m está en reposo en equilibrio en el origen. En $t = 0$ se aplica una fuerza $\vec{F}(t)$ con componentes

$$F_x(t) = k_1 + k_2 y \qquad F_y(t) = k_3 t$$

donde k_1, k_2 y k_3 son constantes. Calcule los vectores de posición $\vec{r}(t)$ y velocidad $\vec{v}(t)$ en función del tiempo.