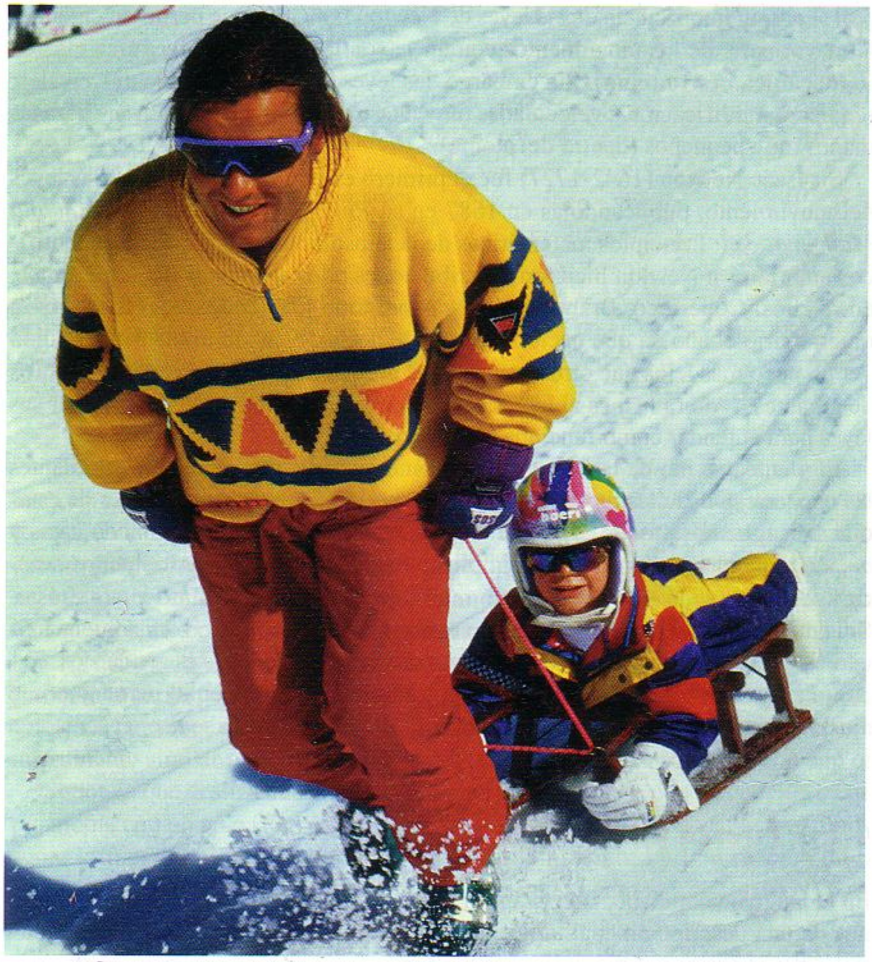
LEYES DEL MOVIMIENTO DE NEWTON 4



Un hombre que tira del trineo de su hijo ilustra la tercera ley de Newton: la ley de acción y reacción. Para impulsarse hacia adelante, el hombre empuja el suelo hacia atrás con los pies (la "acción"), sabiendo que el suelo responderá empujándolo hacia adelante con la misma fuerza (la "reacción"). Asimismo, la fuerza que el hombre ejerce sobre el trineo al tirar de él ("acción") hace que él sienta una fuerza de igual intensidad que tira de él hacia atrás ("reacción").

? **Si el hombre tira del trineo hacia adelante y el trineo tira del hombre hacia atrás con la misma fuerza, ¿cómo es que hay movimiento?**

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 se necesita una distancia larga para detener el barco una vez que está en movimiento? ¿Por qué es más difícil controlar un auto en hielo mojado que en concreto seco? Las respuestas a estas preguntas y otras similares nos llevan al campo de la **dinámica**, la relación entre el movimiento y las fuerzas que lo causan. En los dos capítulos anteriores estudiamos la *cinemática*, el lenguaje que *describe* el movimiento. Ahora estamos en condiciones de pensar en qué hace que los cuerpos se muevan como lo hacen.

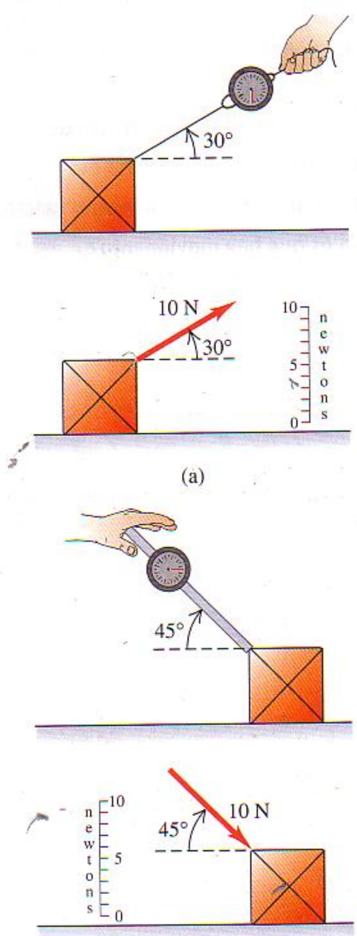
En este capítulo usaremos las cantidades de cinemática desplazamiento, velocidad y aceleración junto con dos conceptos nuevos, *fuerza* y *masa*, para analizar los principios de la dinámica, los cuales se resumen en las **leyes del movimiento**

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 uno con el otro.

Las leyes de Newton no son producto de deducciones matemáticas, sino una síntesis obtenida por los físicos que han descubierto al realizar un sinúmero de *experimentos* con cuerpos en movimiento. Dichas leyes son verdaderamente fundamentales porque no pueden deducirse ni demostrarse a partir de otros principios. La gran importancia de las leyes de Newton radica en que permiten entender la mayor parte de los movimientos comunes; son la base de la **mecánica clásica** (o **mecánica newtoniana**). Sin embargo, las leyes de Newton no son universales; requieren modificación a velocidades muy altas (cercanas a la de la luz) y para tamaños muy pequeños (dentro del átomo).

Sir Isaac Newton (1642-1727) fue el primero en enunciar claramente las leyes del movimiento, publicándolas en 1687 en su *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ("Principios matemáticos de la filosofía natural"). Muchos científicos anteriores a Newton hicieron contribuciones a los cimientos de la mecánica, entre ellos: Copérnico, Brahe, Kepler y sobre todo Galileo Galilei (1564-1642) quien murió el año en que nació Newton. De hecho, Newton dijo: "Si he podido ver un poco más lejos que otros hombres, es porque me he parado en los hombros de gigantes". Ahora le toca al lector pararse en los hombros de Newton y usar sus leyes para entender cómo funciona el mundo físico.

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" 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 conducen al error, y cómo ajustar nuestro entendimiento del mundo físico de modo que sea congruente con lo que nos dicen los experimentos.



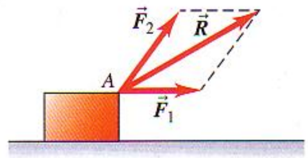
4.1 Puede ejercerse una fuerza sobre una caja (a) tirando de ella o (b) empujándola. Un diagrama de fuerza ilustra cada caso.

4.1 | Fuerza e interacciones

En el lenguaje cotidiano, **fuerza** es un empujón o un tirón. El concepto de fuerza nos da una descripción cualitativa de la interacción entre dos cuerpos o entre un cuerpo y su entorno. Cuando empujamos un auto atascado en la nieve, ejercemos una fuerza sobre él. Una locomotora ejerce una fuerza sobre el tren que arrastra o empuja, un cable de acero ejerce una fuerza sobre la viga que levanta en una construcción, etcétera.

Cuando una fuerza implica contacto directo entre dos cuerpos, la llamamos **fuerza de contacto**. Esto incluye los tirones o empujones que ejercemos con la mano, la fuerza de una cuerda sobre un bloque al que está atada y la fricción que el suelo ejerce sobre un beisbolista que se barre en *home*. También hay fuerzas, llamadas **de largo alcance**, que actúan aunque los cuerpos estén separados. Ya habrá experimentado este tipo de fuerzas si ha jugado con dos imanes. La gravedad también es una fuerza de largo alcance; el Sol ejerce una atracción gravitacional sobre la Tierra, aun a una distancia de 150 millones de kilómetros, que la mantiene en su órbita. La fuerza de atracción gravitacional que la Tierra ejerce sobre un cuerpo es el **peso** del cuerpo.

La fuerza es una cantidad vectorial; podemos empujar o tirar de un cuerpo en diferentes direcciones. Por tanto, para describir una fuerza debemos indicar su *dirección* de acción y su *magnitud*, la cantidad que describe "cuánto" o "qué tan fuerte" la fuerza empuja o tira. La unidad SI de magnitud de fuerza es el *newton*, abreviado N. (Daremos una definición precisa en la sección 4.3.) La tabla 4.1 presenta algunas magnitudes de fuerza típicas.



4.2 Dos fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ que actúan simultáneamente sobre un cuerpo tienen el mismo efecto que una sola fuerza $\vec{R}$ igual a la suma vectorial (resultante) de $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$.

Tabla 4.1 Magnitudes de fuerzas típicas

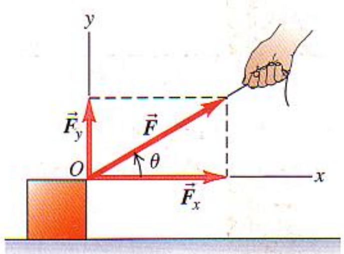
Fuerza gravitacional del Sol sobre la Tierra	3.5×10^{22} N
Empuje de un transbordador espacial durante el despegue	3.1×10^{7} N
Peso de una ballena azul grande	1.9×10^{6} N
Fuerza de tracción máxima de una locomotora	8.9×10^{5} N
Peso de un jugador de fútbol americano de 250 lb	1.1×10^{3} N
Peso de una 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 fuerzas 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; 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 dos, tres o más de estos cuerpos se suspenden simultáneamente de la balanza, la fuerza total que estira el resorte es 2 N, 3 N, etc., y podemos marcar las posiciones correspondientes del puntero 2 N, 3 N, etc. Luego podemos usar el instrumento para medir la magnitud de una fuerza desconocida. Se puede hacer un instrumento similar para fuerzas que empujen.

Suponga que desliza una caja sobre el piso tirando de ella con una cuerda o empujándola con un palo (Fig. 4.1). En ambos casos, dibujamos un vector que represente la fuerza aplicada. Los rótulos indican la magnitud y la dirección de la fuerza, y la longitud de la flecha (dibujada a escala, digamos 1 cm = 10 N) también indica la magnitud.

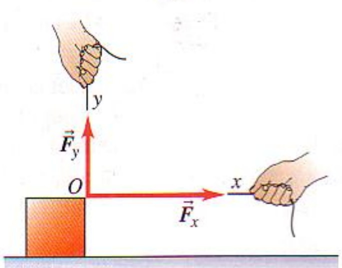
Si *dos* fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ actúan al mismo tiempo en un punto A de un cuerpo (Fig. 4.2), los experimentos muestran que el efecto sobre el movimiento del cuerpo es igual al de una sola fuerza $\vec{R}$ igual a la *suma vectorial* de las fuerzas originales: $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. En general, el efecto de cualquier cantidad de fuerzas aplicadas a un punto de un cuerpo es el 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, 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 4.3a, 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 4.3b, 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.*



Vectores componentes: $\vec{F}_x$ y $\vec{F}_y$
Componentes: $F_x = F\cos\theta$ y $F_y = F \operatorname{sen}\theta$

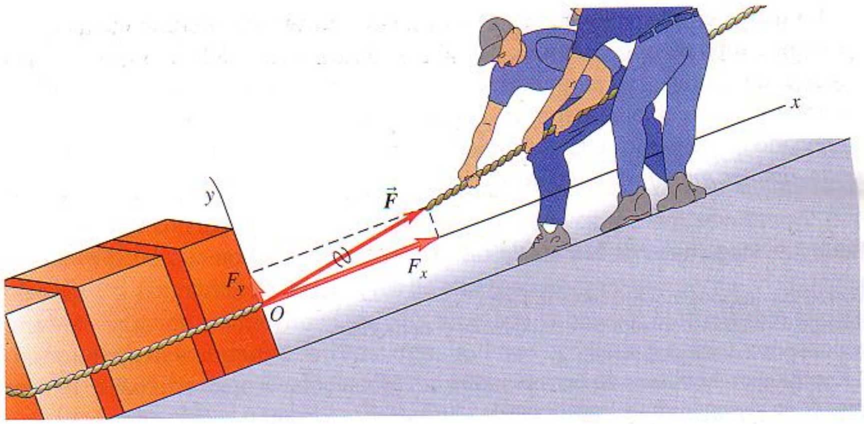
(a)



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

(b)

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



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

Suele ser más conveniente describir una fuerza $\vec{F}$ en términos de sus componentes x y y, F_x y F_y en lugar 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 4.3, F_x y F_y son ambas positivas; con otras orientaciones de $\vec{F}$, cualquiera de ellas puede ser negativa o cero.

Ninguna ley dice que los ejes de coordenadas deben ser verticales y horizontales. En la figura 4.4 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.

CUIDADO En la figura 4.4, 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 todo diagrama de fuerza en el que 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, equivalente a la S romana) para denotar sumatoria. Si las fuerzas son $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$, etc., abreviaremos la sumatoria así:

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

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, etc. 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 θ puede estar en cualquier cuadrante.

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

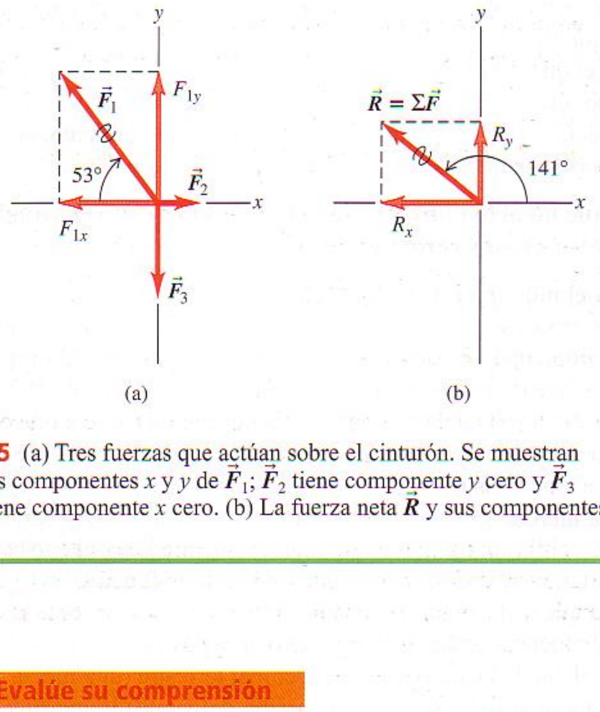
$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$$

Ejemplo 4.1 Superposición de fuerzas

Tres luchadores profesionales se pelean el mismo cinturón de campeonato. Vistos desde arriba, aplican al cinturón las tres fuerzas horizontales de la figura 4.5a, donde el cinturón está en el origen. Las magnitudes de las tres fuerzas son $F_1 = 250$ N, $F_2 = 50$ N y $F_3 = 120$ N. Obtenga las componentes x y y de la fuerza neta sobre el cinturón, y la magnitud y dirección de la fuerza neta.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR Y PLANTEAR: Este ejemplo no es más que un problema de suma vectorial. Nos piden las componentes de la fuerza neta, así que atacamos el problema con el método de componentes. Las incógnitas son: la magnitud y dirección de la fuerza neta, $\vec{R}$ así como sus componentes x y y, que obtendremos usando la ecuación (4.2).



4.5 (a) Tres fuerzas que actúan sobre el cinturón. Se muestran las componentes x y y de $\vec{F}_1$; $\vec{F}_2$ tiene componente y cero y $\vec{F}_3$ tiene componente x cero. (b) La fuerza neta $\vec{R}$ y sus componentes.

EJECUTAR: Por la figura 4.5a, 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 fuerzas son

$$F_{1x} = (250\text{ N})\cos 127° = -150\text{ N}$$
$$F_{1y} = (250\text{ N})\operatorname{sen} 127° = 200\text{ N}$$
$$F_{2x} = (50\text{ N})\cos 0° = 50\text{ N}$$
$$F_{2y} = (50\text{ N})\operatorname{sen} 0° = 0\text{ N}$$
$$F_{3x} = (120\text{ N})\cos 270° = 0\text{ N}$$
$$F_{3y} = (120\text{ N})\operatorname{sen} 270° = -120\text{ N}$$

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 figura 4.5b (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 sea

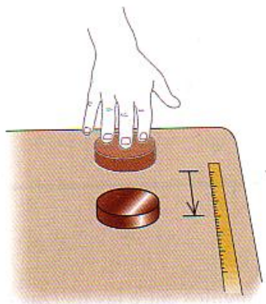
$$\theta = \arctan\frac{R_y}{R_x} = \arctan\left(\frac{80\text{ N}}{-100\text{ N}}\right) = \arctan(-0.80)$$

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 Fig. 4.5b).

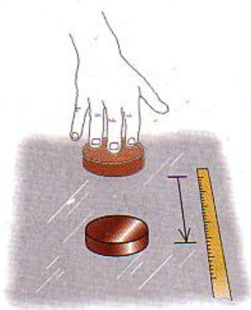
EVALUAR: En esta situación, la fuerza neta *no* es cero, y vemos intuitivamente que el luchador 1 (quien ejerce la mayor fuerza, $\vec{F}_1$, sobre el cinturón) probablemente se quedará con el cinturón después del forcejeo. En la sección 4.2 exploraremos a fondo qué sucede en situaciones en las que la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

Evalúe su comprensión

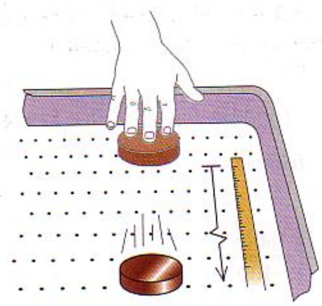
Suponga que, en la figura 4.5a, las fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ no cambian, pero la magnitud y la dirección de $\vec{F}_3$ cambian de modo que la fuerza neta sobre el cinturón es cero. ¿Qué componentes x y y tiene la nueva fuerza $\vec{F}_3$? ¿Qué magnitud y dirección tiene?



(a) Mesa:
el disco se detiene pronto



(b) Piso encerado:
el disco se desliza más lejos



(c) Mesa de hockey de aire:
el disco se desliza más lejos aún

4.6 Se imparte una velocidad inicial a un disco de hockey. (a) El disco se detiene a corta distancia en una mesa. (b) Una superficie recién encerada reduce la fuerza de fricción y el disco viaja más. (c) En una mesa de hockey de aire la fricción es casi 0 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 convendrá en que si un cuerpo está en reposo y ninguna fuerza neta actúa sobre él (es decir, no hay empujón ni tirón neto), el cuerpo permanecerá en reposo. Pero, ¿y si una fuerza neta es cero y actúa sobre un cuerpo *en movimiento, que sucederá*?

Para ver qué sucede en este caso, suponga que desliza un disco de hockey sobre una mesa horizontal, aplicándole una fuerza horizontal con la mano (Fig. 4.6a). Cuando usted deja de empujar, el disco *no* sigue moviéndose indefinidamente; se frena y se para. Para que siga moviéndose, hay que seguirlo empujando (o sea, aplicando una fuerza). Podríamos llegar a la conclusión de "sentido común" que los cuerpos en movimiento naturalmente se detienen y que se necesita una fuerza para mantener el movimiento.

Imagine ahora que empuja el disco en la superficie lisa de un piso recién encerado (Fig. 4.6b). Al dejar de empujar, el disco se deliza mucho más lejos antes de parar. Coloquémoslo en una mesa de hockey de aire, donde flota en un "cojín" de aire, y llegará aún más lejos (Fig. 4.6c). En cada caso, lo que frena al disco es la *fricción*, una interacción entre la superficie inferior del disco y la superficie sobre la que se desliza. Toda 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 piso encerado ejerce menos fricción que 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. Así, la idea de "sentido común" de que se requiere una fuerza para sostener 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; en otras palabras:

Un cuerpo sobre el que no actúa una fuerza neta se mueve con velocidad constante (que puede ser cero) y cero aceleración.

Ésta es la **primera ley del movimiento de Newton**.

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) se mueva hacia adelante; al mover la botella hacia atrás bruscamente, 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. Quizá el lector haya visto sacar de un tirón un mantel de debajo de una vajilla sin romper nada. La fuerza sobre la vajilla no basta para moverla mucho durante el corto tiempo 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: la fuerza hacia abajo de la atracción gravitacional terrestre (una fuerza de largo alcance que actúa aun si la mesa está más arriba del suelo) y una fuerza de apoyo hacia arriba ejercida por la mesa (una fuerza de contacto). El empuje hacia arriba de la superficie es tan grande como la atracción gravitatoria, 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 resbala en una superficie horizontal sin fricción: la resultante del empuje hacia arriba de la superficie y la atracción gravitatoria es 0. Si el disco está en movimiento, sigue moviéndose con velocidad constante porque la fuerza *neta* que actúa sobre él es 0. (La fuerza de apoyo de la superficie se denomina **fuerza normal** porque es *normal*, o perpendicular, a la superficie de contacto. Veremos esto con mayor detalle en el capítulo 5.)

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 en reposo y luego una sola fuerza horizontal $\vec{F}_1$ actúa sobre él (Fig. 4.7a), comenzará a moverse. Si el disco ya se estaba moviendo, la fuerza cambiará su rapidez, su dirección, o ambas cosas, 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 terrestre y la fuerza de apoyo de la superficie, pero, como ya dijimos, éstas se cancelan.)

Suponga ahora que aplicamos una seguna fuerza $\vec{F}_2$ (Fig. 4.7b), 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:

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

Otra vez, vemos que, si el cuerpo está inicialmente en reposo, sigue en reposo; 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.

Si sobre un cuerpo no actúan fuerzas, o actúan varias fuerzas cuya resultante es cero, decimos que el cuerpo está en **equilibrio**. En equilibrio, un cuerpo está en reposo o se mueve en línea recta con velocidad constante. Para un cuerpo en equilibrio, la fuerza neta es cero:

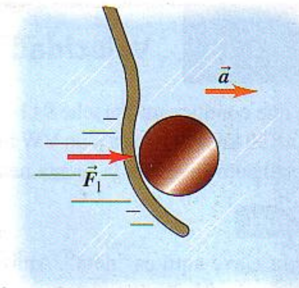
$$\sum \vec{F} = \mathbf{0} \qquad \text{(cuerpo en equilibrio)} \qquad (4.3)$$

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

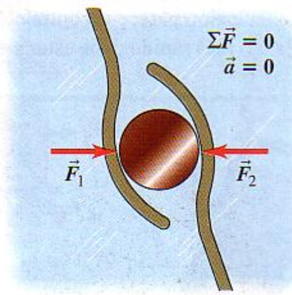
$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0 \qquad \text{(cuerpo en equilibrio)} \qquad (4.4)$$

Si se satisfacen las ecuaciones (4.4), el cuerpo está en equilibrio.

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



(a)



(b)

4.7 (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.

Ejemplo conceptual 4.2 Cero fuerza neta implica 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 usado muy correctamente la ciencia; pero ésta no fue una de ellas.

Ejemplo conceptual 4.3

Velocidad constante implica fuerza neta igual a cero

Imagine que conduce un Porsche 911 Carrera en una pista de prueba recta a 150 km/h y rebasa a un VW Sedán 1971 que va a 75 km/h. ¿Sobre cuál auto es mayor la fuerza neta?

SOLUCIÓN

La palabra clave aquí es "neta". Ambos autos están en equilibrio porque sus velocidades son constantes; por tanto, la fuerza *neta* sobre ambos es *cero*.

Esta conclusión parece ir contra el "sentido común" que nos dice que el auto más rápido debe estar siendo impulsado por una fuerza mayor. Es verdad que actúa una fuerza hacia adelante sobre ambos autos, y que aquélla sobre el Porsche es mucho mayor (gracias a su motor de alta potencia), pero también actúa una fuerza *hacia atrás* sobre los autos 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 autos 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.

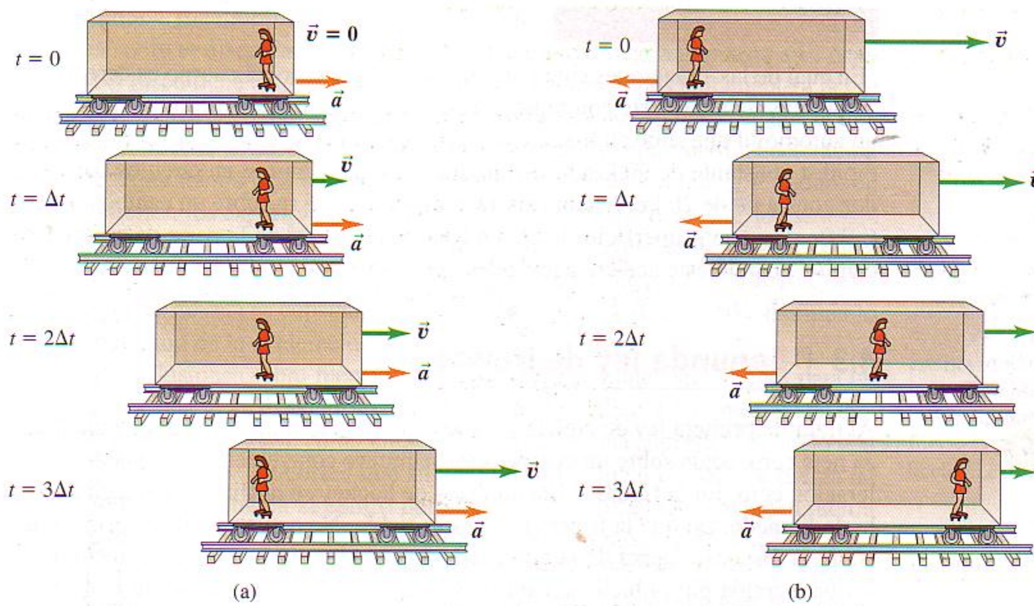
Marcos inerciales de referencia

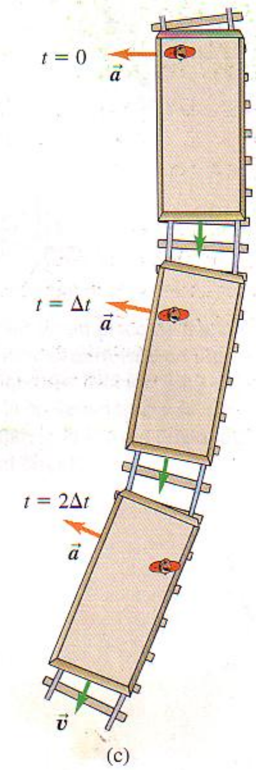
Al tratar la velocidad relativa en la sección 3.5, presentamos el concepto de *marco de referencia*. Este concepto es fundamental para las leyes del movimiento de Newton. Suponga que está en un avión que acelera para despegar. Si pudiera pararse en el pasillo usando patines, comenzaría a moverse *hacia atrás* relativo al avión. En cambio, si el avión estuviera aterrizando, usted comenzaría a moverse hacia adelante al frenar el avión. En ambos casos, parecería que no se obedece la primera ley de Newton; no actúa una fuerza neta sobre usted, pero su velocidad cambia. ¿Qué pasa?

La cuestión es que un avión que acelera respecto a tierra *no es* un marco de referencia apropiado 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 avión no. (La Tierra no es un marco plenamente inercial debido a la aceleración asociada a su rotación y su movimiento alrededor del Sol, aunque estos 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 4.8 muestra cómo podemos usar la primera ley de Newton para entender lo que sentimos al viajar en un vehículo que acelera. En la figura 4.8a, un vehículo está en reposo y comienza a acelerar a la derecha. Una pasajera en patines casi no tiene fuerza neta actuando sobre ella, pues los patines eliminan los efectos de la fricción; por tanto, tiende a seguir en reposo relativo al marco inercial de referencia de la Tierra, según la primera ley. Al acelerar el vehículo a su alrededor, la pasajera se mueve hacia atrás 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 (Fig. 4.8b). Esta pasajera se mueve hacia adelante respecto al vehículo. Un vehículo también acelera si se mueve con rapidez constante pero da vuelta (Fig. 4.8c). En este caso, la pasajera tiende a seguir moviéndose con rapidez constante en línea recta relativa a la Tierra; respecto al vehículo, la pasajera se mueve hacia el exterior de la vuelta.

En los casos de la figura 4.8, un observador en el marco de referencia del vehículo podría concluir que *hay* una fuerza neta actuando sobre la pasajera, ya que la velocidad de ésta *relativa al vehículo* cambia en cada caso. Esto no es correcto;





4.8 Viaje en un vehículo con aceleración. (a) Si usted y el vehículo están inicialmente en reposo, usted tiende a permanecer en reposo cuando el vehículo acelera a su alrededor. (b) Si usted y el vehículo están inicialmente en movimiento, usted tiende a seguir moviéndose con velocidad constante cuando el vehículo se frena. (c) Cuando el vehículo da vuelta, usted tiende a seguir moviéndose en línea recta.

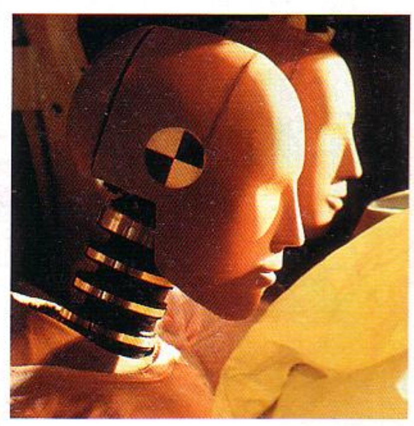
la fuerza neta sobre la pasajera es cero. El error del observador es tratar de aplicar la primera ley de Newton en el marco de referencia del vehículo, que *no* es inercial y en el que dicha ley no es válida (Fig. 4.9). En este libro *sólo* usaremos marcos de referencia inerciales.

Hemos mencionado sólo un marco de referencia (aproximadamente) inercial: la superficie de la Tierra. No obstante, hay muchos. Si tenemos un marco inercial de referencia A, en el que se obedece 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 demostrar esto, 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 $\vec{v}_{P/A}$ 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 otro valor, $\vec{v}_{P/B} = \vec{v}_{P/A} - \vec{v}_{B/A}$. 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 (cero aceleración) y no hay fuerza neta actuando sobre P.

No hay un marco inercial de referencia 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 ésta perspectiva, el estado de reposo y el de movimiento con velocidad constante no son muy distintos; ambos se dan cuando la suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es cero.



4.9 Desde el marco de referencia de este automóvil, parece que una fuerza empuja a los maniquíes para pruebas de choque hacia adelante 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.

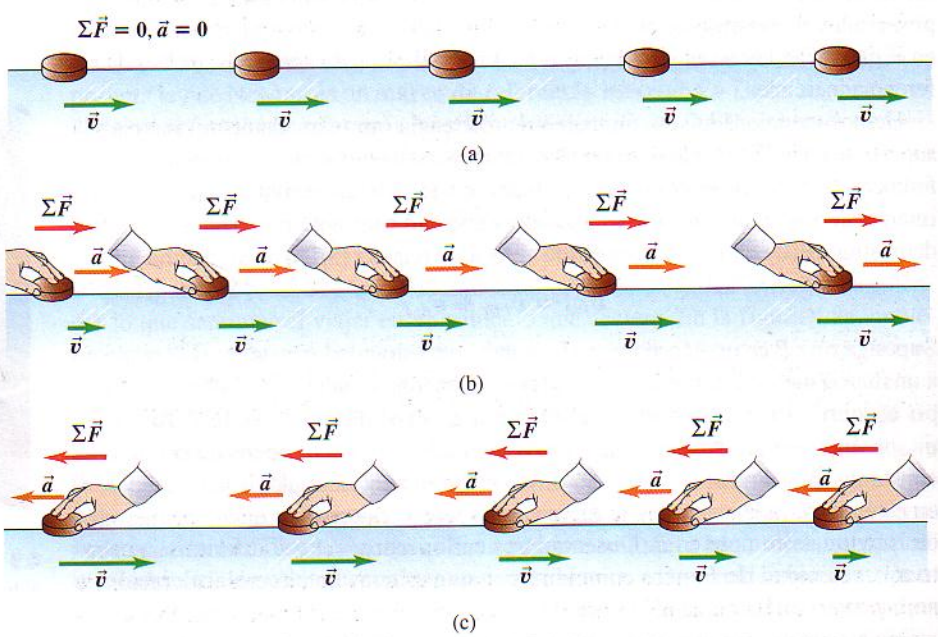
Evalúe su comprensión

¿En cuál de las situaciones siguientes 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°, con 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/s²?

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 velocidad constante y aceleración cero. En la figura 4.10a un disco de hockey se desliza a la derecha sobre hielo húmedo, así que 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 $\sum\vec{F}$ 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 4.10b 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 $\sum\vec{F}$.

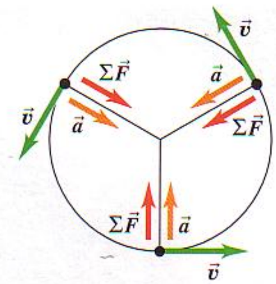


4.10 La aceleración de un cuerpo tiene la misma dirección que la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo (en este caso, un disco de hockey en una superficie sin fricción). (a) Si $\sum\vec{F} = \mathbf{0}$, el disco está en equilibrio; la velocidad es constante y la aceleración es cero. (b) Si $\sum\vec{F}$ tiene dirección a la derecha, la aceleración es a la derecha. (c) Si $\sum\vec{F}$ tiene dirección a la izquierda, la aceleración es a la izquierda.

La figura 4.10c muestra otro experimento, en el que invertimos la dirección de la fuerza sobre el disco de modo que $\sum\vec{F}$ actúa en la dirección opuesta a $\vec{v}$. Aquí también el disco tiene una aceleración: se mueve cada vez más lentamente a la derecha. Si la fuerza a la izquierda sigue actuando, llegará un momento en que el disco pare y comience a moverse con rapidez creciente a la izquierda. La aceleración $\vec{a}$ en este experimento es a la izquierda, en la misma dirección que $\sum\vec{F}$. Como en el caso anterior, los experimentos muestran que $\vec{a}$ es constante si $\sum\vec{F}$ lo es.

La conclusión es que la presencia de una fuerza neta que actúa sobre un cuerpo hace que éste se acelere. La dirección de la aceleración es la de la fuerza neta. Si la magnitud de ésta es constante, como en las figuras 4.10b y 4.10c, también lo será la magnitud de la aceleración.

Estas conclusiones sobre fuerza neta y aceleración también son válidas para un cuerpo que se mueve en trayectoria curva. Por ejemplo, la figura 4.11 muestra un disco de hockey que se mueve en un círculo horizontal en una superficie de hielo con fricción despreciable. Un cordel que sujeta el disco al hielo ejerce una fuerza de magnitud constante hacia el centro del círculo. El resultado es una aceleración de magnitud constante dirigida al centro del círculo. La rapidez del disco es constante, así que es un movimiento circular uniforme (sección 3.4).



4.11 Vista superior de un disco de hockey en movimiento circular uniforme en una superficie horizontal sin fricción. En cualquier punto, la aceleración $\vec{a}$ y la fuerza neta $\sum\vec{F}$ tienen la misma dirección, hacia el centro del círculo.

La figura 4.12a muestra otro experimento que explora la relación entre la aceleración de un cuerpo y la fuerza neta que actúa sobre él. 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 4.10b y 4.10c, 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. Duplicar la fuerza neta duplica la aceleración (Fig. 4.12b); reducir a la mitad la fuerza hace lo propio con $\vec{a}$ (Fig. 4.12c), etc. Muchos experimentos semejantes muestran que, para un cuerpo dado, la magnitud de la aceleración es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él.

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, sea cual sea la magnitud de la fuerza neta. Llamamos a éste cociente masa inercial, o simplemente **masa,** del cuerpo y la denotamos con m. Es decir, $m = |\sum\vec{F}|/a$, o

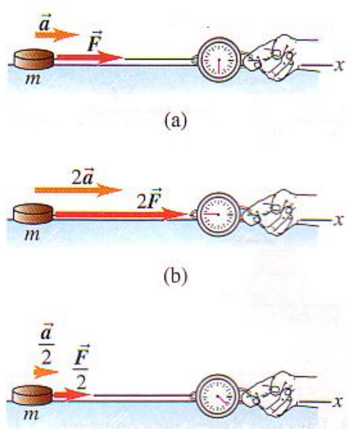
$$\left|\sum\vec{F}\right| = ma \tag{4.5}$$

Esta ecuación *define* la masa y también nos dice cómo medirla empleando la relación $m = |\sum\vec{F}|/a$. Cuando sostenemos una fruta en la mano en el supermercado y la movemos un poco hacia arriba y hacia abajo para estimar su masa, estamos usando esa relación para estimar la masa de la fruta: estamos sintiendo qué tanta fuerza debemos ejercer con la mano para acelerar a la fruta hacia arriba y hacia abajo.

Masa y fuerza

La masa es una medida cuantitativa de la inercia, que vimos en la sección 4.2. Cuanto mayor es su masa, más se "resiste" un cuerpo a ser acelerado. Es fácil relacionar el concepto con las experiencias cotidianas. 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. Si una fuerza causa una aceleración grande, la masa del cuerpo es pequeña; si la misma fuerza causa una aceleración pequeña, la masa es grande.

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 trozo de aleación platino-



4.12 (a) La aceleración $\vec{a}$ es proporcional a la fuerza neta $\sum\vec{F}$. (b) Al duplicarse la fuerza neta, se duplica la aceleración. (c) Al reducirse la fuerza neta a la mitad, la aceleración se reduce a la mitad.

iridio mantenida 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 un metro por segundo al cuadrado a un cuerpo con masa de un 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 sea,

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

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

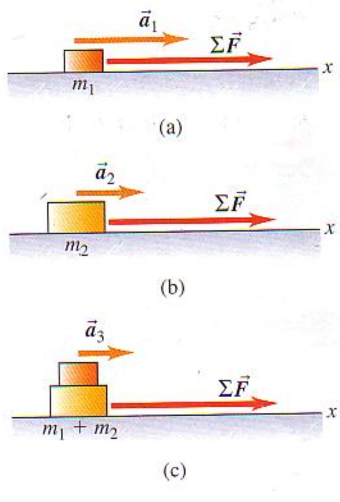
También podemos usar la ecuación (4.5) para comparar una masa con la masa estándar y así *medir* masas. Suponga que aplica una fuerza neta constante F a un cuerpo de masa conocida m_1 y observa una aceleración de magnitud a_1. Luego aplica la misma fuerza a otro cuerpo con masa desconocida m_2 y observa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

$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$

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

El cociente de las masas es el inverso del cociente de las aceleraciones. La figura 4.13 muestra la proporcionalidad inversa entre masa y aceleración. 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 $m_1 + m_2$ (Fig. 4.13c). 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 esas partículas. No obstante, el concepto de masa es la forma más fundamental de caracterizar la cantidad de materia que un cuerpo contiene.



4.13 Para una fuerza neta constante $\Sigma\vec{F}$, la aceleración es inversamente proporcional a la masa de un cuerpo. Las masas se suman como escalares ordinarios. (a) $\vec{a}_1 = \Sigma\vec{F}/m_1$. (b) Con una masa mayor m_2, la aceleración tiene menor magnitud: $\vec{a}_2 = \Sigma\vec{F}/m_2$. (c) Si las dos masas se combinan, la aceleración es $\vec{a}_3 = \Sigma\vec{F}/(m_1 + m_2)$.

Segunda ley de Newton

Nos hemos cuidado de decir que la fuerza *neta* sobre un cuerpo hace que éste se acelere. Los experimentos muestran 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 $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots$. Es decir, el principio de superposición de las fuerzas 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 solo enunciado conciso que llamamos **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 de la fuerza neta. El vector de fuerza neta es igual a la masa del cuerpo multiplicada por su aceleración.

En símbolos,

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

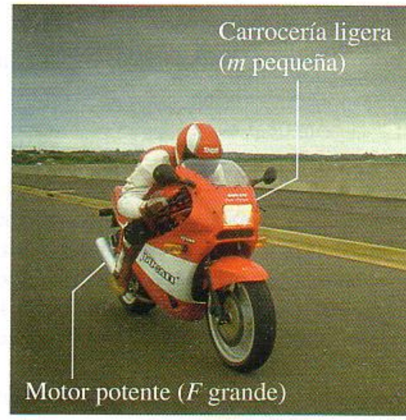
Un enunciado alterno establece que la aceleración de un cuerpo (la razón de cambio de su velocidad) es igual a la suma vectorial (resultante) de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, dividida entre su masa.

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

La aceleración tiene la misma dirección que la fuerza neta.

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 (Fig. 4.14). 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 la de todo el cuerpo— es proporcional a esta fuerza y tiene la misma dirección. Así, Ud. puede sentir la magnitud y dirección de su aceleración incluso con los ojos cerrados.



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

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:

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

ActivPhysics ONLINE

2.13 Cambio de tensión

2.14 Deslizamiento en una rampa

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 eso 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 en movimiento que se carga con carbón, pero 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, igual que la primera. Por tanto, la ley no es válida en el marco de referencia de los vehículos en aceleración de la figura 4.8; respecto a esos marcos, la pasajera acelera aunque la fuerza neta sobre ella es 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 Observe que la cantidad $m\vec{a}$ *no* es una fuerza. Las ecuaciones (4.7) y (4.8) sólo dicen que el vector $m\vec{a}$ es igual en magnitud y dirección a la resultante $\sum\vec{F}$ de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo. Es incorrecto ver a la aceleración como una fuerza; más bien, la aceleración es un resultado de una fuerza neta distinta de cero. Es "sentido común" pensar que hay una "fuerza de aceleración" que nos empuja contra el asiento cuando nuestro coche acelera, pero *no existe tal fuerza*; más bien, nuestra inercia nos hace tender a permanecer en reposo respecto a la Tierra, y el auto acelera a nuestro alrededor. Esta confusión nace de tratar de aplicar la segunda ley de Newton en un marco de referencia en el que no es válida, como el auto en aceleración. Nosotros sólo examinaremos el movimiento relativo a marcos de referencia *inerciales*.

Iniciaremos nuestro estudio de la segunda ley de Newton con ejemplos de movimiento rectilíneo. En el capítulo 5 consideraremos casos más generales y desarrollaremos estrategias más detalladas para resolver problemas aplicando las leyes del movimiento de Newton.

Ejemplo 4.4 Cálculo de aceleración por una fuerza

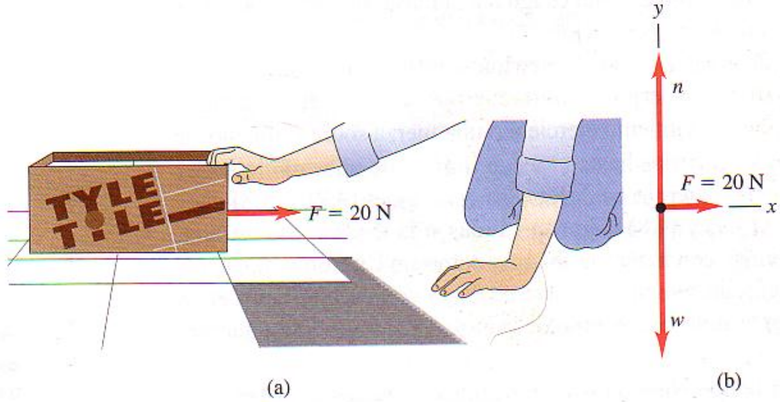
Un trabajador aplica una fuerza horizontal constante con magnitud de 20 N a una caja de 40 kg que descansa en un piso plano con fricción despreciable. ¿Qué aceleración sufre la caja?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En este problema intervienen fuerza y aceleración. Siempre que se tope con un problema de este tipo, atáquelo empleando la segunda ley de Newton.

PLANTEAR: Lo primero en *cualquier* problema que implique fuerzas es: (i) escoger un sistema de coordenadas y (ii) identificar todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo en cuestión.

Suele ser conveniente escoger un eje que apunte en la dirección de la aceleración del cuerpo o en la dirección opuesta, que en este caso es horizontal (véase la Fig. 4.15a). Por tanto, tomamos el eje $+x$ en la dirección de la fuerza horizontal aplicada (es decir, la dirección



4.15 (a) Una fuerza de 20 N acelera la caja a la derecha. (b) Diagrama vectorial de las fuerzas que actúan sobre la caja, considerada como partícula. Las losas bajo la caja están recién enceradas, así que la fricción es despreciable.

en la que la caja se acelera), y el $+y$, hacia arriba (Fig. 4.15b). En casi todos los problemas de fuerzas que verá (incluido éste), todos los vectores de fuerza están en un plano, así que no se usa el eje z.

Las fuerzas que actúan sobre la caja son: (i) la fuerza horizontal $\vec{F}$ ejercida por el trabajador; (ii) el peso $\vec{w}$ de la caja, es decir, la fuerza hacia abajo de la atracción gravitacional y (iii) la fuerza de soporte $\vec{n}$ ejercida por la superficie. Como en la sección 4.3, 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 Fig. 4.15b, sólo la fuerza de 20 N tiene una componente x distinta de cero. Por tanto, la primera relación de las ecuaciones (4.8) nos dice que

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

Por tanto, 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), $\Sigma F_y = ma_y$. 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

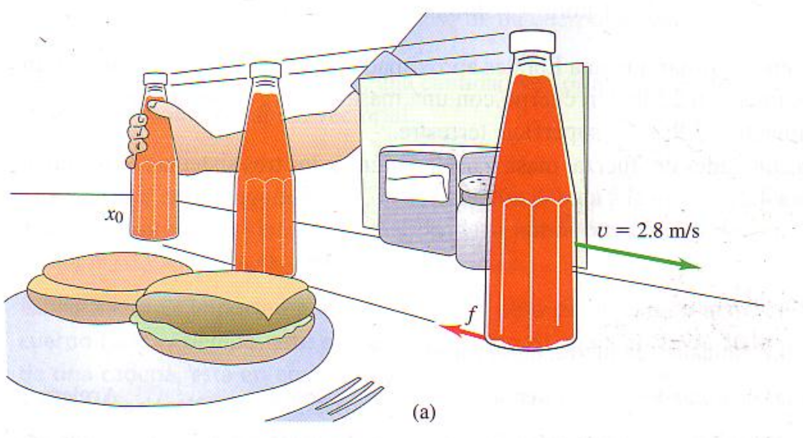
Una mesera empuja una botella de salsa con masa de 0.45 kg a la derecha sobre un mostrador horizontal liso. Al soltarse, la botella tiene una velocidad de 2.8 m/s, pero se frena por la fuerza de fricción horizontal constante ejercida por el mostrador. La botella se desliza 1.0 m antes de parar. ¿Qué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

SOLUCIÓN

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

PLANTEAR: Como en el ejemplo 4.4, lo primero es escoger un sistema de coordenadas e identificar las fuerzas que actúan sobre el cuerpo (en este caso, la botella de salsa). Escogemos el eje $+x$ en la dirección en que la botella se desliza, y tomaremos como origen el punto en que la botella sale de la mano de la mesera con la velocidad inicial dada (Fig. 4.16a). En la figura 4.14b se muestran 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 de la velocidad (véase Fig. 4.10c).

Nuestra incógnita es la magnitud f de la fuerza de fricción. La obtendremos usando la componente x de la segunda ley de Newton



4.16 Al deslizarse la botella hacia la derecha, la fuerza de fricción la frena. (b) Diagrama vectorial de las fuerzas que actúan sobre la botella, considerada como partícula.

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 dicen que la fuerza de fricción es constante. Por tanto, la aceleración también es constante, así que podremos calcular a_x usando una de las fórmulas para aceleración constante de la sección 2.4. Dado que conocemos la coordenada x y la velocidad inicial x de 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).

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, como debe ser, pues la botella se está frenando. La fuerza neta en la dirección x es $-f$, la fuerza de fricción, así que

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

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: Escogimos 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 Fig. 4.16b), para obtener una a_x positiva. En este caso, determinará que ΣF_x es igual a $+f$ (porque ahora la fuerza de fricción está en la dirección $+x$), que a su 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 escoja.

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) y para la distancia es el centímetro (10^{-2} m). La unidad de fuerza correspondiente se llama *dina*:

$$1\text{ dina} = 1\text{ g} \cdot \text{cm/s}^2$$

Una dina es igual a 10^{-5} N. En el sistema británico, la unidad de fuerza es la *libra* (o libra-fuerza) y la de masa es el *slug* (Fig. 4.17). 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. Un cuerpo con una masa de 1 kg tiene un peso de aproximadamente 2.2 lb en la superficie terrestre.

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

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

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

Suponga que el cinturón de campeonato del ejemplo 4.1 (sección 4.1) tiene una masa de 8.0 kg. ¿Qué magnitud y dirección tiene la aceleración del cinturón? Si el cinturón está inicialmente en reposo, ¿qué distancia se habrá movido después de 0.50 s?

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. Estudiaremos las atracciones gravitacionales con detalle en el capítulo 12, pero es preciso hacer aquí un tratamiento preliminar. 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, más fuerza se necesita 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 u otro cuerpo grande. La experiencia cotidiana nos muestra que los cuerpos con masa grande tienen un peso grande. Es difícil lanzar un peñasco por su gran *masa*, y difícil levantarlo del suelo por su gran *peso*. En la Luna, el peñasco sería igualmente difícil de lanzar horizontalmente, pero sería más fácil de levantar. ¿Qué relación exacta *hay* entonces entre masa y peso?

La respuesta, según la leyenda, se le ocurrió a Newton cuando estaba sentado bajo un manzano viendo caer la fruta. 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/s², la fuerza requerida tiene la magnitud

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

La fuerza que hace que el cuerpo se acelere hacia abajo es la atracción gravitacional de la Tierra, o sea, el *peso* del cuerpo. 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

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

El peso de un cuerpo es una fuerza, una cantidad vectorial, y podemos escribir la ecuación (4.9) como ecuación vectorial:

$$\vec{w} = m\vec{g} \qquad (4.10)$$

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 Es importante entender que el peso de un cuerpo actúa sobre el cuerpo *todo el tiempo*, esté en caída libre o no. Si una maceta de 10 kg pende de una cadena, está en equilibrio y su aceleración es cero, pero su peso, dado por la ecuación (4.10) sigue actuando sobre él. En este caso, la cadena tira de la maceta hacia arriba con una fuerza ascendente. La *suma vectorial* de las fuerzas es cero, y la maceta está en equilibrio.

ActivPhysics ONLINE

2.9 Salto con garrocha

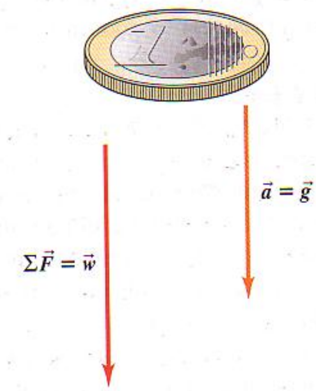
Ejemplo conceptual 4.6 Fuerza neta y aceleración en caída libre

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 cae?

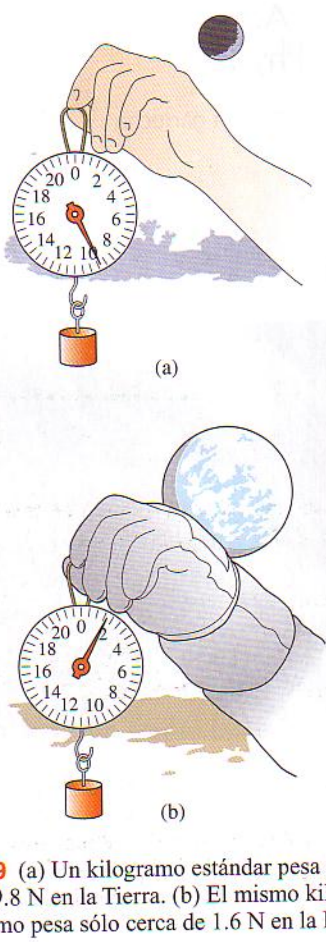
SOLUCIÓN

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 (Fig. 4.18). La velocidad de la moneda cambia durante la caída, pero la fuerza neta que actúa sobre ella es constante. Si esto le sorprende, es porque todavía tiene la idea de "sentido común" errónea de que una mayor velocidad implica mayor fuerza, y debe releer el ejemplo conceptual 4.3.

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



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



4.19 (a) Un kilogramo estándar pesa cerca de 9.8 N en la Tierra. (b) El mismo kilogramo pesa sólo cerca de 1.6 N en la Luna.

Variación de *g* con la ubicación

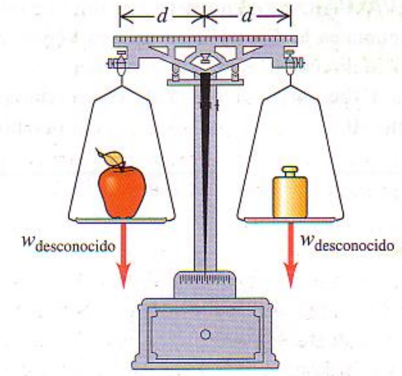
Usaremos $g = 9.80\ \text{m/s}^2$ para problemas en la Tierra (o, si los demás datos del problema se dan con sólo dos cifras significativas, $g = 9.8\ \text{m/s}^2$). En realidad, el valor de g varía un poco en diferentes puntos de la superficie terrestre, entre 9.78 y $9.82\ \text{m/s}^2$, porque la Tierra no es perfectamente esférica y por efectos de su rotación y 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 $1.62\ \text{m/s}^2$, su peso será 1.62 N, pero su masa será aún 1 kg (Fig. 4.19). Un astronauta de 80.0 kg pesa $(80.0\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 784$ N en la Tierra, pero en la Luna sólo pesaría $(80.0\ \text{kg})(1.62\ \text{m/s}^2) = 130$ N.

La siguiente cita del libro *Men from Earth* del astronauta Buzz Aldrin, que describe sus experiencias durante la misión Apolo 11 a la Luna en 1969, ilustra la distinción entre masa y peso:

> Las unidades de soporte vital que cargábamos en la espalda parecían ligeras, pero era difícil ponérselas y operarlas. En la Tierra, el sistema de soporte vital junto con el traje espacial pesaba 190 libras, pero en la Luna sólo pesaba 30. Combinado con mi propio peso, esto me hacía pesar un total de 60 libras en la gravedad lunar.
>
> Una de mis pruebas era trotar desde el módulo lunar para ver qué tan bien podía maniobrar en la superficie. Recordé lo que Isaac Newton nos había enseñado dos siglos atrás: la masa y el peso no son lo mismo. Pesaba sólo 60 libras, pero mi *masa* era la misma que en la Tierra. La inercia era un problema; tenía que planear varios pasos adelante para detenerme o dar vuelta sin caer.

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, la forma más fácil de medir la masa de un cuerpo es 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 (Fig. 4.20) puede determinar con gran precisión (hasta 1 parte en 10^6) si los pesos de dos cuerpos son iguales y, por tanto, si sus masas lo son. Este método no funciona en la aparente "gravedad cero" del espacio exterior, donde tendríamos que aplicar la segunda ley de Newton directamente. 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.



4.20 Una balanza de brazos iguales determina la masa de un cuerpo comparando su peso con un peso conocido.

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 (1 parte en 10^{12}) han concluido que *son* iguales.

CUIDADO Frecuentemente podemos usar mal las unidades del SI para masa y peso en la vida cotidiana. Es común decir "ésta 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. Este uso es tan común que tal vez no haya esperanza de erradicarlo, pero tenga conciencia de que a menudo usamos el término *peso* para hablar de *masa*. ¡Tenga cuidado de evitar este error! En el SI, el peso (una fuerza) se mide en newtons; la masa, en kilogramos.

Ejemplo 4.7

Masa y peso

Un Lincoln Town Car de 1.96×10^4 N que viaja en la dirección $+x$ se detiene abruptamente; la componente x de la fuerza neta que actúa sobre él es -1.50×10^4 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 coche. Sin embargo, dado que el newton es una unidad de fuerza, sabemos que 1.96×10^4 N es el *peso* del auto, no su masa. Por 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 auto, 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

$$m = \frac{w}{g} = \frac{1.96 \times 10^4\ \text{N}}{9.80\ \text{m/s}^2} = \frac{1.96 \times 10^4\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{9.80\ \text{m/s}^2}$$
$$= 2000\ \text{kg}$$

Entonces, $\sum F_x = ma_x$ nos da

$$a_x = \frac{\sum F_x}{m} = \frac{-1.50 \times 10^4\ \text{N}}{2000\ \text{kg}} = \frac{-1.50 \times 10^4\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{2000\ \text{kg}}$$
$$= -7.5\ \text{m/s}^2$$

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 $-0.77g$. Además, -0.77 es el cociente de -1.50×10^4 N (la componente x de la fuerza neta) y 1.96×10^4 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

Suponga que una astronauta llega a un planeta donde $g = 19.6$ 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.)

4.5 | Tercera ley de Newton

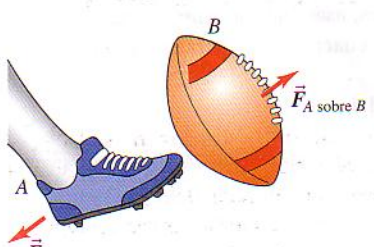
Una fuerza que actúa sobre un cuerpo siempre es el resultado de su interacción con otro cuerpo, así que las fuerzas siempre vienen en pares. No podemos tirar de una perilla sin que ésta tire de nosotros. Al patear un balón, la fuerza hacia adelante que el pie ejerce sobre él lo lanza en su trayectoria, pero sentimos la fuerza que el balón ejerce sobre el pie. Si pateamos un peñasco, el dolor que sentimos se debe 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**. En la figura 4.21, $\vec{F}_{A\ \text{sobre}\ B}$ 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 sobre el cuerpo A. El enunciado matemático de la tercera ley es

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

Expresado en palabras,

Si el cuerpo A ejerce una fuerza sobre el cuerpo B (una "acción"), entonces B ejerce una fuerza sobre A (una "reacción"). Estas fuerzas tienen la misma magnitud pero dirección opuesta, y actúan sobre *diferentes* cuerpos.



4.21 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: $\vec{F}_{A\ \text{sobre}\ B} = -\vec{F}_{B\ \text{sobre}\ A}$.

En este enunciado, "acción" y "reacción" son las dos fuerzas opuestas, 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 la "reacción". Con frecuencia decimos sólo que las fuerzas son "iguales y opuestas" para indicar que tienen igual magnitud y dirección opuesta.

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 Fig. 4.21 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 ésta fuerza actúa sobre el *pateador*, no sobre el balón.

En la figura 4.21, 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 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. Sin embargo, ¡se mueve!

Ejemplo conceptual 4.8 ¿Cuál fuerza es mayor?

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

SOLUCIÓN

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

Tal vez se pregunte cómo el auto "sabe" que debe empujarlo a Ud. con la misma magnitud de fuerza que Ud. ejerce sobre él. Podría ser útil recordar que las fuerzas que Ud. 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 uno sobre el otro es que *los experimentos 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 4.22a muestra la manzana en la mesa, y la 4.22b muestra las fuerzas que actúan sobre ella. La manzana es A, la mesa T y la Tierra E. En el diagrama, $\vec{F}_{\text{E sobre A}}$ es el peso de la manzana, o sea, la fuerza gravitacional hacia abajo ejercida *por* la Tierra (primer subíndice) *sobre* la manzana A (segundo subíndice). Asimismo, $\vec{F}_{\text{T sobre A}}$ es la fuerza hacia arriba ejercida *por* la mesa T (primer subíndice) *sobre* la manzana A (segundo subíndice).

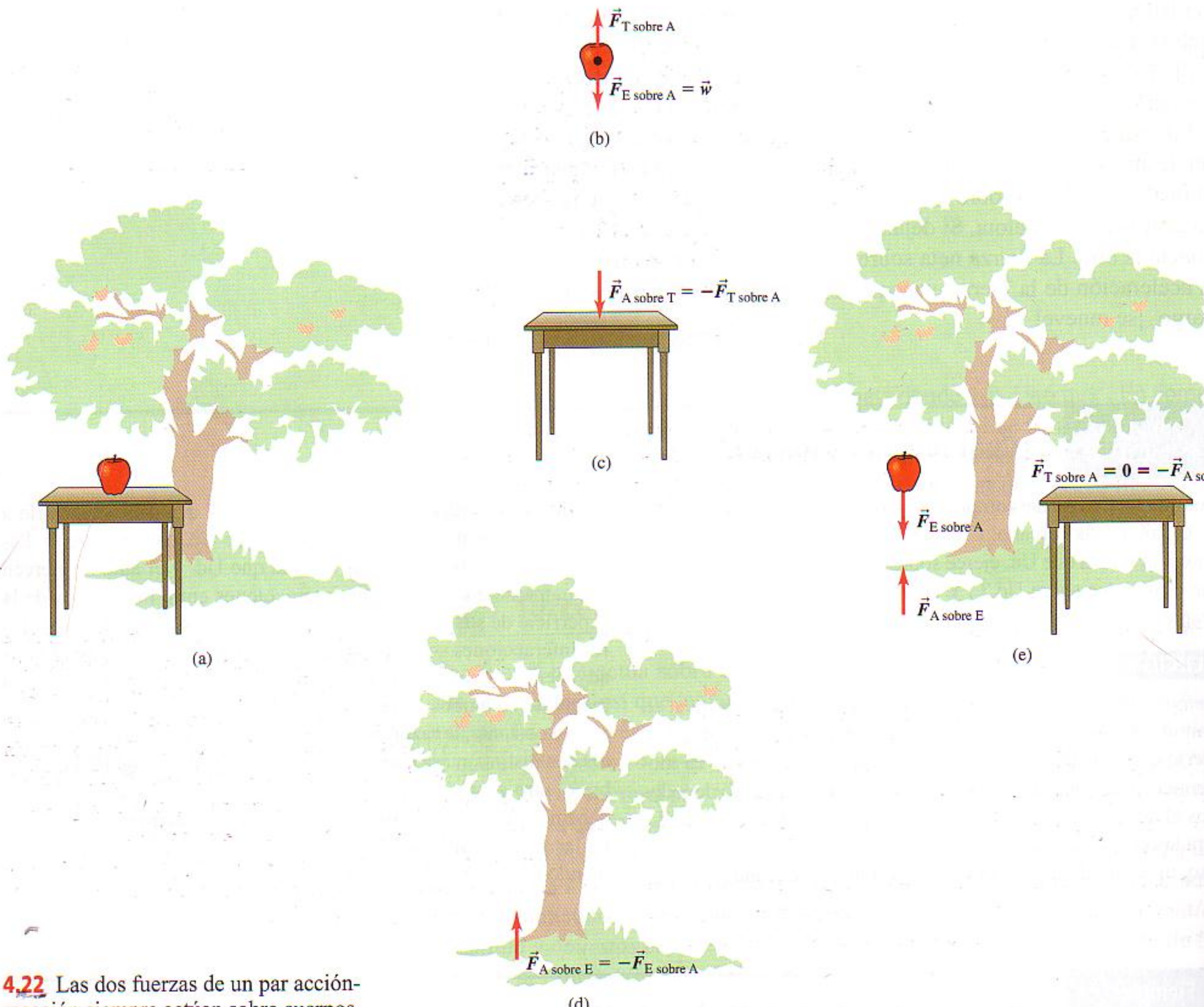
Al tirar la Tierra de la manzana, ésta ejerce una fuerza igualmente intensa hacia arriba, $\vec{F}_{\text{A sobre E}}$ sobre la Tierra (Fig. 4.22d). $\vec{F}_{\text{A sobre E}}$ y $\vec{F}_{\text{E sobre A}}$ son un par acción-reacción que representan la interacción de la manzana y la Tierra, así

$$\vec{F}_{\text{A sobre E}} = -\vec{F}_{\text{E sobre A}}$$

Además, la mesa empuja a la manzana hacia arriba con fuerza $\vec{F}_{\text{T sobre A}}$, y la reacción correspondiente es la fuerza hacia abajo $\vec{F}_{\text{A sobre T}}$ que la manzana ejerce sobre la mesa (Fig. 4.22c). Así, tenemos

$$\vec{F}_{\text{A sobre T}} = -\vec{F}_{\text{T sobre A}}$$

Las dos fuerzas que actúan sobre la manzana son $\vec{F}_{\text{T sobre A}}$ y $\vec{F}_{\text{E sobre A}}$. ¿Son un par acción-reacción? No, pese a ser 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*. He aquí otra forma de verlo. Si quitamos repentinamente la mesa de debajo de la manzana (Fig. 4.22e), las fuerzas $\vec{F}_{\text{A sobre T}}$ y $\vec{F}_{\text{T sobre A}}$ serán cero, pero $\vec{F}_{\text{A sobre E}}$ y $\vec{F}_{\text{E sobre A}}$ seguirán existiendo (la interacción gravitacional aún está presente). Puesto que $\vec{F}_{\text{T sobre A}}$ ahora es cero, no puede ser el negativo de $\vec{F}_{\text{E sobre A}}$, y éstas fuerzas no pueden ser un par acción-reacción.



4.22 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 arrastra un bloque de mármol sobre un piso tirando de una cuerda atada al bloque (Fig. 4.23a). El bloque podría estar o no en equilibrio. ¿Qué relaciones hay entre las diversas fuerzas? ¿Cuáles son los pares acción-reacción?

SOLUCIÓN

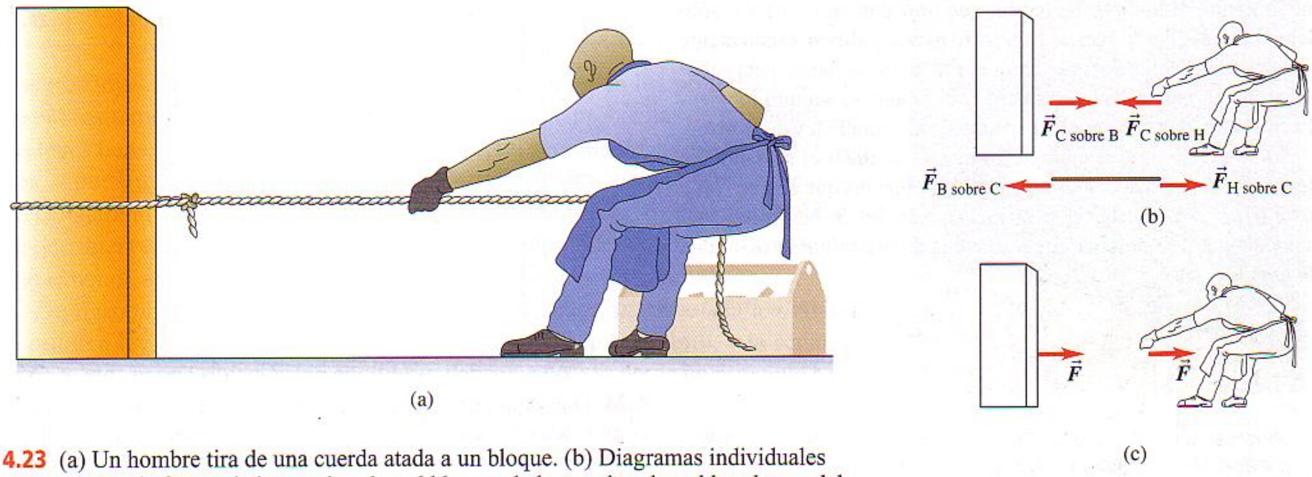
La figura 4.23b muestra las fuerzas horizontales que actúan sobre cada cuerpo, el bloque (B), la cuerda (C) y el hombre (H). Usaremos subíndices en todas las fuerzas por claridad. El vector $\vec{F}_{\text{H sobre C}}$ representa la fuerza ejercida *por* el hombre *sobre* la cuerda; su reacción es la fuerza igual y opuesta $\vec{F}_{\text{C sobre H}}$ ejercida *por* la cuerda *sobre* el hombre. $\vec{F}_{\text{C sobre B}}$ es la fuerza ejercida por la cuerda sobre el bloque; su reacción es la fuerza igual y opuesta $\vec{F}_{\text{B sobre C}}$ que el bloque ejerce sobre la cuerda:

$$\vec{F}_{\text{C sobre H}} = -\vec{F}_{\text{H sobre C}} \quad \text{y} \quad \vec{F}_{\text{B sobre C}} = -\vec{F}_{\text{C sobre B}}$$

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

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

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 la magnitud de $\vec{F}_{\text{H sobre C}}$ deberá ser distinta de la de $\vec{F}_{\text{B sobre C}}$. En contraste, las fuerzas de acción-reacción $\vec{F}_{\text{H sobre C}}$ y $\vec{F}_{\text{C sobre H}}$



4.23 (a) Un hombre tira de una cuerda atada a un bloque. (b) Diagramas individuales que muestran la fuerza de la cuerda sobre el bloque, de la cuerda sobre el hombre, y del bloque y el hombre sobre la cuerda. (c) Si la cuerda no está acelerando o si su masa es despreciable, puede considerarse que transmite sin menoscabo una fuerza del hombre al bloque, y viceversa.

siempre tienen la misma magnitud, lo mismo que $\vec{F}_{\text{C sobre B}}$ y $\vec{F}_{\text{B sobre C}}$. 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 $\vec{F}_{\text{H sobre C}}$ y $\vec{F}_{\text{B sobre C}}$ 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 de la página anterior. Entonces, $\vec{F}_{\text{B sobre C}} = -\vec{F}_{\text{H sobre C}}$ por la primera o 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 de la página anterior y, otra vez, $\vec{F}_{\text{B sobre C}} = -\vec{F}_{\text{H sobre C}}$. Puesto que $\vec{F}_{\text{B sobre C}}$ *siempre* es igual a $-\vec{F}_{\text{C sobre B}}$ por la tercera ley de Newton (son un par acción-reacción), en estos mismos casos especiales $\vec{F}_{\text{C sobre B}}$ es igual a $\vec{F}_{\text{H sobre C}}$, o sea, 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 (Fig. 4.23c). Esta perspectiva es útil, pero hay que recordar que *sólo* es válida si la cuerda tiene masa insignificante o está en equilibrio.

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

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?

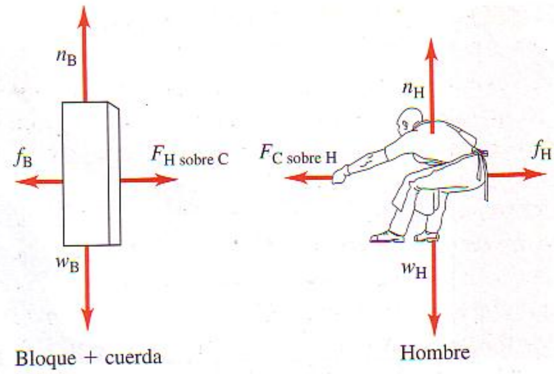
SOLUCIÓN

La solución a ésta 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.

El cantero no se mueve porque la fuerza neta que actúa sobre él es cero. Esa fuerza neta es la suma vectorial de la fuerza normal hacia arriba que el piso ejerce sobre él, su peso que actúa hacia abajo, la fuerza de la cuerda que tira de él a la izquierda y la fuerza de fricción del piso que lo empuja a la derecha (Fig. 4.24). Dado que el hombre tiene zapatos con suelas antiderrapantes que no se resbalan sobre el piso, la fuerza de fricción es suficiente para equilibrar exactamente el tirón de la cuerda. Si el piso estuviera recién encerado, de modo que la fricción entre el piso y los zapatos del cantero fuera pequeña, él comenzaría a deslizarse hacia la izquierda.

También actúan cuatro fuerzas sobre la combinación bloque-cuerda: fuerza normal, peso, fricción y la fuerza del hombre que tira a la derecha (ver Fig. 4.24). Si el bloque inicialmente está en reposo, comenzará a deslizarse si la fuerza del cantero es *mayor* que la fuerza de fricción que el piso ejerce sobre el bloque. (El bloque de mármol tiene base lisa, lo cual ayuda a reducir la fricción.) En tal caso, la fuerza neta sobre el bloque no será cero, y el bloque se acelerará hacia la derecha. 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 con velocidad constante, obedeciendo la primera ley de Newton.

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 determinar la identidad de esas fuerzas.



4.24 Diagramas de fuerzas para el hombre (derecha) y la combinación bloque-cuerda (izquierda) del ejemplo conceptual 4.10. Sobre el bloque y sobre el hombre actúan fuerzas normales ejercidas por el piso (n_B y n_H, respectivamente), fuerzas de peso (w_B y w_H, respectivamente) y fuerzas de fricción ejercidas por el piso (f_B y f_H, respectivamente). (Despreciamos la masa relativamente pequeña de la cuerda.) La fuerza de la cuerda sobre el hombre tiene la misma magnitud que la del hombre sobre la cuerda ($F_{C\ sobre\ H} = F_{H\ sobre\ C}$).

Un cuerpo, como la cuerda de la figura 4.23, al que 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. En la figura 4.23b, la tensión en el extremo derecho de la cuerda es la magnitud de $\vec{F}_{H\ sobre\ C}$ (o de $\vec{F}_{C\ sobre\ H}$), y en el izquierdo, la de $\vec{F}_{B\ sobre\ C}$ (o de $\vec{F}_{C\ sobre\ B}$). 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 tanto, si las magnitudes de $\vec{F}_{B\ sobre\ C}$ y $\vec{F}_{H\ sobre\ C}$ son de 50 N, la tensión en la cuerda es 50 N (*no* 100 N). La fuerza *total* $\vec{F}_{B\ sobre\ C} + \vec{F}_{H\ sobre\ C}$ que actúa sobre la cuerda en este caso es ¡cero!

CUIDADO 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 puede ayudarle a evitar confusiones acerca de los pares acción-reacción y la tercera ley de Newton.

Evalúe su comprensión

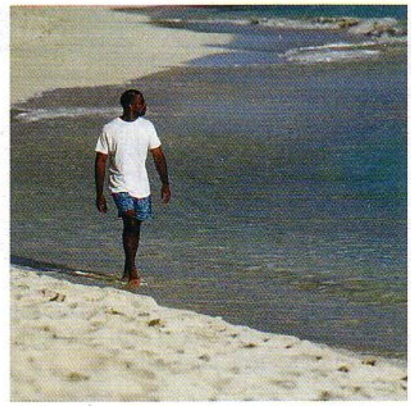
Imagine que conduce su auto por un camino rural y un mosquito se estrella con el parabrisas. ¿Qué tiene mayor magnitud, la fuerza que el auto ejerció sobre el mosquito o la que éste ejerció sobre el coche? ¿O son iguales las magnitudes? Si son diferentes, ¿cómo podemos conciliar este hecho con la tercera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

4.6 | Diagramas de cuerpo libre

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, pero 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 complejas.

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.

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 tanto, una vez que haya escogido 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 que éste ejerce sobre algún otro. Por ejemplo, para analizar una persona que camina, incluiríamos en $\sum\vec{F}$ la fuerza que el suelo ejerce sobre la persona al caminar, pero *no* la que la persona ejerce *sobre* el suelo (Fig. 4.25). 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 está considerando.



4.25 El simple acto de caminar depende crucialmente 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 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.

Los diagramas de cuerpo libre son indispensables para identificar las fuerzas relevantes. Un **diagrama de cuerpo libre** es un diagrama que muestra el cuerpo escogido 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 4.15, 4.16 y 4.22. 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.

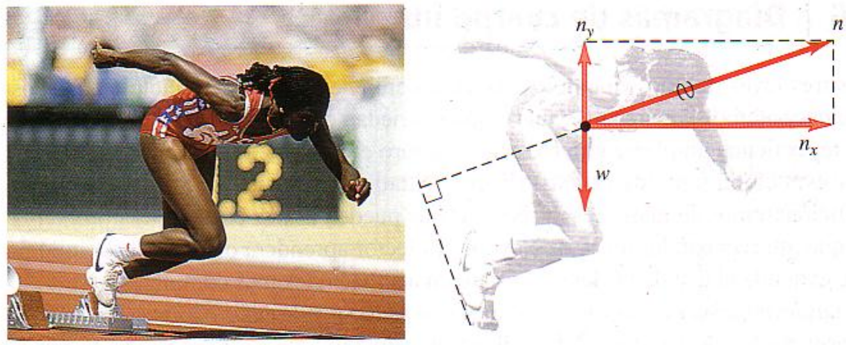
ActivPhysics Online

2.11 Magnitudes de fuerzas

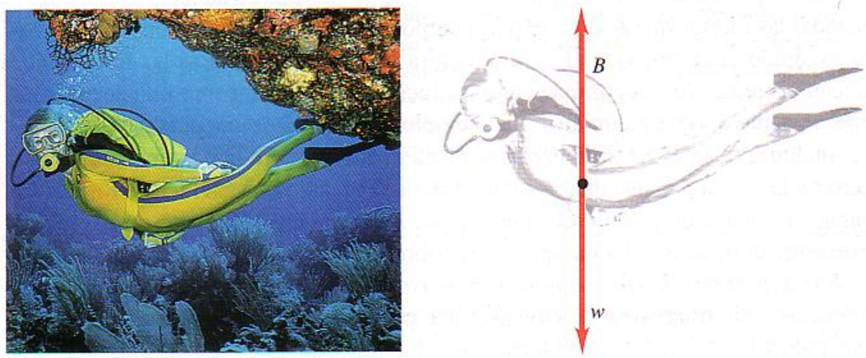
CUIDADO Al terminar de dibujar un diagrama de cuerpo libre, *deberemos* poder contestar, para cada fuerza, la pregunta: "¿qué otro cuerpo la está aplicando?" Si no podemos, tal vez estamos tratando con una fuerza inexistente. Cuídese sobre todo de evitar fuerzas ficticias como "la fuerza de aceleración" 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 4.23b hay un diagrama de cuerpo libre aparte para la cuerda en el caso en que se considera sin masa (no actúa fuerza gravitacional sobre ella). La figura muestra también diagramas para el bloque y el cantero, pero éstos *no* están completos porque no muestran todas las fuerzas que actúan sobre cada cuerpo. ¿Cuáles faltan? (Compare esos diagramas con los diagramas de cuerpo libre completos de la Fig. 4.24.)

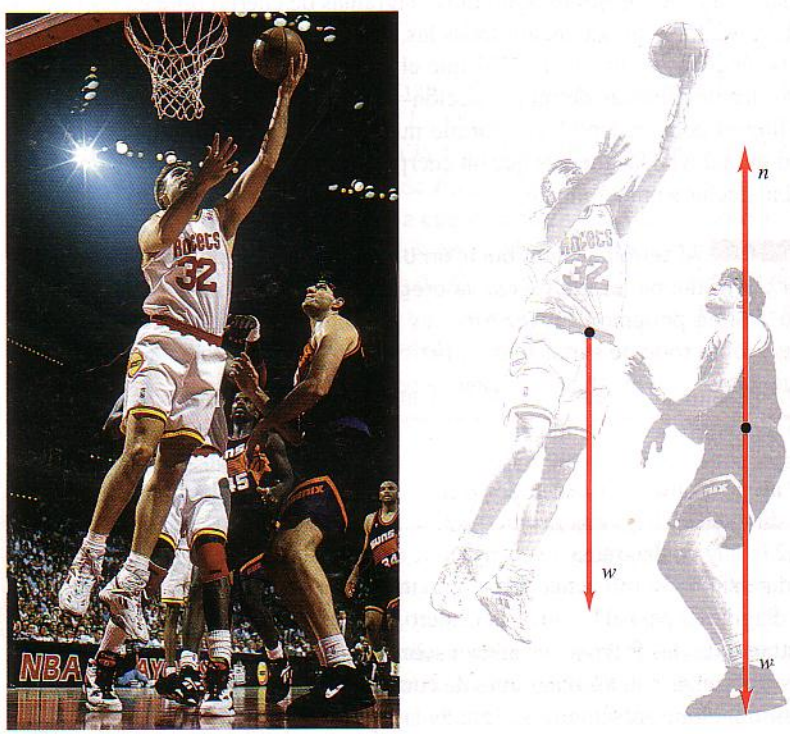
A continuación, presentamos algunas situaciones reales y los diagramas de cuerpo libre correspondientes. Observe que, aunque estas situaciones se dan en entornos muy distintos, los diagramas de cuerpo libre son muy similares.



Una velocista adquiere gran aceleración hacia adelante al principio de una carrera pateando con fuerza contra los bloques de salida angulados. Los bloques ejercen una fuerza de reacción $\vec{n}$ igualmente grande sobre la velocista. Esta fuerza tiene una componente hacia adelante n_x grande que pone a la velocista en movimiento, así como una componente hacia arriba n_y más pequeña. Si esta última tiene la misma magnitud que el peso de la velocista w, la fuerza vertical neta que actúa sobre ella es cero y no le imparte una aceleración vertical.



Sumergido en agua, el cuerpo de una persona experimenta una fuerza hacia arriba $\vec{B}$ por su flotación, equilibrada por la fuerza hacia abajo de su peso, $\vec{w}$. Aquí, el movimiento de la buceadora depende de la fuerza con que el agua la empuja, debida a corrientes o bien a fuerzas de reacción a los movimientos de brazos y piernas de la persona.

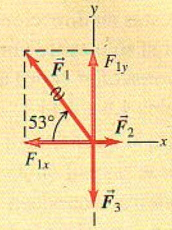


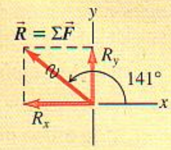
Un jugador de baloncesto salta empujando los pies contra el piso. Las fuerzas que actúan sobre él son la fuerza de reacción con que el piso lo empuja a él y a su peso $\vec{w}$. Una vez que el jugador está en el aire, la única fuerza que actúa sobre él es su peso; su aceleración es hacia abajo, aun cuando se está elevando. Sobre su compañero estacionario actúa su propio peso y la fuerza normal hacia arriba $\vec{n}$ que el piso ejerce sobre él.

RESUMEN

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. (Ver ejemplo 4.1.)

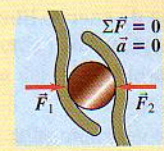
$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots = \sum \vec{F} \quad (4.1)$$





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. Si el cuerpo está en reposo, permanece en reposo; si está en movimiento, sigue moviéndose con velocidad constante. Esta ley sólo es válida en marcos de referencia inercial. (Ver ejemplos 4.2 y 4.3.)

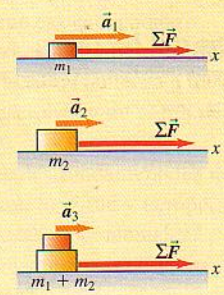
$$\sum \vec{F} = 0 \quad (4.3)$$



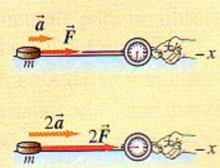
Las propiedades inerciales de un cuerpo se caracterizan por su *masa*. La aceleración de un cuerpo bajo la acción de un grupo de fuerzas dado es directamente proporcional a la suma vectorial de las fuerzas (la *fuerza neta*) e inversamente proporcional a la masa del cuerpo. Esta relación es la segunda ley de Newton. Al igual que la primera ley, ésta sólo es válida en marcos de referencia inerciales. (Ver ejemplos 4.4 y 4.5.)

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

$$\sum F_x = ma_x \qquad \sum F_y = ma_y \qquad \sum F_z = ma_z \quad (4.8)$$

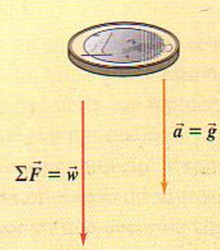


La unidad de fuerza se define en términos de las unidades de masa y aceleración. En el SI, la unidad de fuerza es el newton (N), igual a $1\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$.



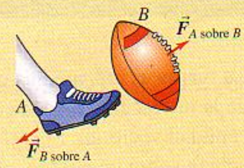
El peso de un cuerpo es la fuerza gravitacional ejercida sobre él por la Tierra (u otro cuerpo que ejerza esa fuerza). El peso es una fuerza y, por tanto, una cantidad vectorial. La magnitud del peso de un cuerpo en un lugar dado es igual al producto de su masa m y la magnitud de la aceleración debida a la gravedad g en ese lugar. El peso de un cuerpo depende de su ubicación, pero la masa es independiente de la ubicación. (Ver ejemplos 4.6 y 4.7.)

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



La tercera ley de Newton dice que "acción es igual a reacción"; es decir, cuando dos cuerpos interactúan, se ejercen mutuamente fuerzas que en todo instante son iguales en magnitud y opuestas en dirección. Cada fuerza de un par acción-reacción actúa sólo sobre uno de los dos cuerpos; las fuerzas de acción y reacción nunca actúan sobre el mismo cuerpo. (Ver ejemplos 4.8 a 4.11.)

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



Términos clave

Notas del lector

Respuesta a la pregunta inicial del capítulo

Lo que determina el movimiento del hombre y el trineo juntos son las fuerzas que *otros* cuerpos ejercen sobre ellos. En particular, el hombre empuja el suelo hacia atrás con sus pies y el suelo lo empuja hacia adelante con una fuerza de la misma magnitud (en cumplimiento de la tercera ley de Newton). El suelo también ejerce una fuerza de fricción hacia atrás sobre el trineo. Así, para tirar del trineo hacia adelante, la fuerza que el hombre ejerce sobre el suelo deberá ser por lo menos tan grande como la fuerza de fricción sobre el trineo.

Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

Sección 4.1 Exigimos que la fuerza neta sea cero, así que

$$F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = 0 \quad \text{y} \quad F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = 0$$

Por tanto,

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

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

La magnitud es

$$F_3 = \sqrt{F_{3x}{}^2 + F_{3y}{}^2} = \sqrt{(100\text{ N})^2 + (-200\text{ N})^2} = 224\text{ N}$$

y la dirección es

$$\theta = \arctan\left(\frac{F_{3y}}{F_{3x}}\right) = \arctan\left(\frac{100\text{ N}}{-200\text{ N}}\right) = \arctan\left(-\frac{1}{2}\right) = -27°$$

Sección 4.2 En las situaciones: (i), (ii) y (iv) la fuerza neta es cero. En la situación (iii), el halcón se mueve en un círculo; por tanto, está acelerando y no está en equilibrio. 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. 4.8a.

Sección 4.3 La aceleración es igual a la fuerza neta dividida entre la masa. Por tanto, la magnitud de la aceleración es $a = (128\text{ N})/(8.0\text{ kg}) = 16\text{ m/s}^2$. La aceleración tiene la misma dirección que la fuerza neta, $\theta = 141°$. Por la ecuación (2.12), después de 0.50 s, el cinturón se habrá movido una distancia $\frac{1}{2}at^2 = (1/2)(16\text{ m/s}^2)(0.50\text{ s})^2 = 2.0\text{ m}$.

Sección 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. La *masa* de la pelota no cambia, así que la fuerza horizontal que la astronauta tendría que ejercer para detenerla (o sea, para impartirle la misma aceleración) sería la misma que en la Tierra.

Sección 4.5 Por la tercera ley de Newton, las dos fuerzas tienen la misma magnitud. Puesto que la masa del auto es mucho mayor que la del mosquito, sufre una aceleración minúscula, imperceptible, en respuesta a la fuerza del impacto. En contraste, el mosquito, con su masa tan pequeña, sufre una aceleración catastróficamente alta.

Preguntas para análisis

P4.1 ¿Un cuerpo puede estar en equilibrio si sólo una fuerza actúa sobre él? Explique.

P4.2 Una bola lanzada verticalmente hacia arriba tiene velocidad cero en su punto más alto. ¿Está en equilibrio ahí? ¿Por qué sí o por qué no?

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. ¿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 total no es cero?

P4.6 Imagine que ata un tabique a una cuerda y lo hace girar en un círculo horizontal. Describa la trayectoria del tabique después de que usted suelta la cuerda.

P4.7 Si un auto para repentinamente, los pasajeros tienden a moverse hacia adelante, relativo a 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 auto frena abruptamente. ¿Qué error tiene esa explicación?

P4.9 Un pasajero de un camión en movimiento, sin ventanillas, ve que una pelota que estaba parada en el pasillo comienza a moverse hacia atrás. Piense dos posibles explicaciones y en cómo decidir cuál es correcta.

P4.10 Suponga que escoge 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 fundamentales?

P4.11 La inercia *no* es una fuerza que mantiene las cosas en su lugar o moviéndose. ¿Por qué sabemos esto?

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.

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 9.8 m/s (constante). ¿Qué resultado se obtiene?

P4.16 Podemos jugar a atrapar pelotas en un camión que se mueve con rapidez constante en un camino recto, igual que si estuviera en reposo. ¿Podemos hacerlo si el camión da vuelta con rapidez constante en un camino horizontal? ¿Por qué sí o por qué no?

P4.17 ¿El cinturón del ejemplo 4.1 está en equilibrio? Explique.

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.

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 daño, 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 seguridad los coches se diseñan a modo de aplastarse al frente y por detrás ¿Por qué? Para choques de lado y volcaduras ¿Por qué no?

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 hacerlo tirando uniformemente; pero si se da un tirón, el cordel se rompe. Explique esto en términos de las leyes del movimiento de Newton.

P4.25 Una caja grande cuelga 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, ¿es la tensión mayor cuando está acelerando o cuando está frenando? En cada caso, explique en términos de las leyes del movimiento de Newton.

P4.26 ¿ Quien siente un mayor tirón por la gravedad terrestre, una piedra de 10 kg o una de 20 kg? Si las deja caer, ¿por qué la piedra de 20 kg no cae con el doble de la aceleración de 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 del caballo tan fuerte como éste del carro, ¿por qué no está en equilibrio el carro, por más fuerte que el caballo tire de él?

P4.29 Una chica sureña de 450 N, abofetea a un chico norteño de 800 N. Sus dedos ejercen una fuerza de 30 N al oeste sobre su mejilla. Puede haber otras reacciones pero, por la tercera ley de Newton ¿cuál es la *fuerza* de reacción a la bofetada?

P4.30 Un camión grande y un auto compacto chocan de frente. El camión ejerce una fuerza $\vec{F}_{\text{C sobre A}}$ sobre el auto, y éste ejerce $\vec{F}_{\text{A sobre C}}$ 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 sí o por qué no?

P4.31 Si preguntamos qué fuerza hace que un auto acelere hacia adelante, la mayoría de la gente contesta: "la fuerza del motor". Sin embargo, ¿qué fuerza es *directamente* responsable de la aceleración del coche?

P4.32 Un auto compacto empuja una camioneta grande averiada, y viajan 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 que la camioneta ejerce sobre él? ¿A cuál vehículo se aplica la mayor fuerza neta, o son iguales las fuerzas netas? Explique.

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, $g = 1.62\ \text{m/s}^2$. Si un tabique 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. Si se lanza el mismo tabique y lo golpea a Ud. moviéndose horizontalmente a 6 m/s, le dolerá más, menos o igual en la Luna que en la Tierra? Explique. (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 dice: "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.

P4.36 Si 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 cunclillas (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 chicoteo. 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 auto compacto de 1000 kg y uno grande de 2500 kg, ¿cuál experimenta mayor fuerza? Explique. ¿Cuál experimenta mayor aceleración? ¿Por qué? Ahora explique por qué los pasajeros del carro 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 hacer contacto alguno con el mundo exterior, explique cómo podría determinar si el cohete: i) se mueve hacia adelante con una rapidez constante igual al 80% de la de la luz; ii) 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) $\sqrt{2}F$? ¿Cero? Dibuje los 3 vectores en cada situación.

4.2 En vez de usar los ejes x y y de la figura 4.5 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) 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 como en la figura 4.1b, con una fuerza de 10 N que apunta 45° hacia abajo de la horizontal. Obtenga las componentes horizontal y vertical de la fuerza.

4.4 Un hombre arrastra un baúl por la rampa de un camión de mudanzas. La rampa está inclinada 20.0° y el hombre tira con una fuerza $\vec{F}$ cuya dirección forma un ángulo de 30.0° con la rampa (Fig. 4.26). a) ¿Qué $\vec{F}$ se necesita para que la componente F_x paralela a la rampa sea 60.0 N? b) ¿Qué magnitud tendrá entonces la componente F_y perpendicular a la rampa?

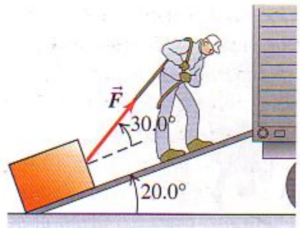


Figura 4.26 Ejercicio 4.4.

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 resultante y su ángulo 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 9.00 N, y su dirección es 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 su magnitud.

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 se mueve 11.0 m en 5.00 s. a) ¿Qué masa tiene? b) Si el trabajador deja de empujar a los 5.00 s, qué distancia recorre el bloque en los siguientes 5.00 s?

4.11 Un disco de hockey de 0.160 kg reposa en el origen ($x = 0$) sobre una cancha horizontal, sin fricción. En $t = 0$, 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 disco de hockey se mueve de *A* a *B* con velocidad constante bajo la influencia de varias fuerzas. a) ¿Qué podemos decir de esas fuerzas? b) Grafique la trayectoria del disco. c) En la gráfica, continúe la trayectoria al punto *C* si en *B* se aplica una nueva fuerza constante al disco, perpendicular a la velocidad de éste en *B*. d) Continúe la trayectoria al punto *D* si en *C* la fuerza aplicada en *B* es reemplazada por otra de magnitud constante pero siempre perpendicular a la trayectoria.

4.14 Un electrón (masa = 9.11×10^{-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 aceleradora es constante, calcule a) la aceleración; b) el tiempo para llegar a la rejilla; c) la fuerza neta en newtons. (Puede hacerse caso omiso de la fuerza gravitacional sobre el electrón.)

Sección 4.4 Masa y peso

4.15 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?

4.16 Una bola de bolos pesa 71.2 N. El jugador aplica una fuerza horizontal de 160 N a la bola. ¿Qué magnitud tiene la aceleración horizontal de la bola?

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

4.18 ¿Qué masa tiene un libro que pesa 3.20 N en un punto donde $g = 9.80$ m/s^2? b) En ese lugar, ¿cuánto pesa un perro cuya masa es de 14.0 kg?

Sección 4.5 Tercera ley de Newton

4.19 Una velocista olímpica puede arrancar con una aceleración casi horizontal de magnitud 15 m/s^2. ¿Qué fuerza horizontal debe aplicar una corredora de 55 kg a los bloques de salida para producir esta aceleración? ¿Qué cuerpo ejerce la fuerza que impulsa a la corredora: los bloques o ella misma?

4.20 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 de (b) es la reacción a la de (a)? d) La reacción a la fuerza de (a) es una fuerza de magnitud ______ ejercida sobre ______ por ______; su dirección es ______. e) La reacción a la fuerza de (b) es una fuerza de magnitud ______ ejercida sobre ______ por ______; su dirección es ______. f) Las fuerzas de (a) y (b) son iguales y opuestas por la ______ ley de Newton. g) Las fuerzas de (b) y (e) son iguales y opuestas por la ______ ley de Newton. Suponga ahora que ejerce una fuerza de 5 N hacia arriba 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 él? j) ¿La fuerza que la Tierra ejerce sobre el libro es igual y opuesta a la que éste ejerce sobre ella? k) La fuerza que la mano ejerce sobre el libro es igual y opuesta a la que éste ejerce sobre la mano? Por último, suponga que Ud. retira de repente la mano mientras el libro está subiendo. l) ¿Cuantas fuerzas actúan entonces sobre el libro? m) ¿Está en equilibrio?

4.21 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 cuerpo?

4.22 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 reacciones a estas fuerzas? ¿Está acelerando el pasajero? ¿En qué dirección y qué magnitud tiene ésta aceleración?

4.23 Una estudiante de 45 kg se lanza de 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 9.8 m/s^2 hacia la Tierra. Suponga que la fuerza neta sobre la Tierra es la de gravedad que ella ejerce.

Sección 4.6 Diagramas de cuerpo libre

4.24 Dos cajas, A y B, descansan juntas sobre una superficie horizontal sin fricción (Fig. 4.27). 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.

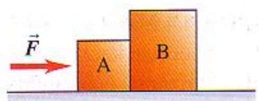


Figura 4.27 Ejercicio 4.24.

4.25 Una pelota cuelga de un cordón largo atado al techo de un vagón de tren que viaja al este sobre vías horizontales y cuya rapidez va en aumento. Un observador dentro del tren ve que la pelota cuelga inmóvil. Dibuje un diagrama de cuerpo libre claramente marcado para la pelota. ¿La fuerza neta sobre la pelota es cero? Explique.

4.26 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 otro para la caja. Indique los pares de fuerzas, si los hay, que son pares acción-reacción según la tercera ley.

4.27 Una silla de 12.0 kg 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.

4.28 Un esquiador de 65.0 kg 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 de remolque.

4.29 Su sobrino Picho está paseando en su triciclo, el cual está unido por una cuerda horizontal ligera a un carrito en el que está sentado su perro Nerón. Trate al triciclo y a Picho como un objeto y a Nerón y el carrito como un objeto. Dibuje un diagrama de cuerpo libre claramente marcado para cada objeto. Indique cuáles pares de fuerzas, si acaso las hay, forman pares acción-reacción según la tercera ley.

Problemas

4.30 Una bala de rifle calibre 22 que viaja a 350 m/s golpea un bloque de madera, penetrando a una profundidad de 0.130 m. El bloque

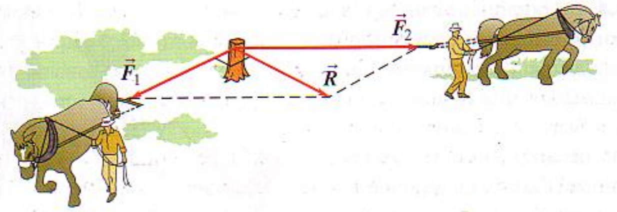


Figura 4.28 Problema 4.31.

está fijo en su lugar y no se mueve. La masa de la bala es de 1.80 g. Suponga una fuerza de retardo constante. a) Cuánto tarda la bala en detenerse? b) ¿Qué fuerza (en N) ejerce la madera sobre la bala?

4.31 Dos caballos tiran horizontalmente de cuerdas atadas a un tronco de un árbol. Las fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ que aplican son tales que la resultante $\vec{R}$ tiene magnitud igual a la de $\vec{F}_1$ y está a 90° de $\vec{F}_1$ (Fig. 4.28). Sea $F_1 = 1300$ N y $R = 1300$ N. Calcule la magnitud de $\vec{F}_2$ y su dirección (relativa a $\vec{F}_1$).

4.32 Imagine que acaba de posarse en el Planeta X. Saca una pelota de 100 g, la suelta desde el reposo a una altura de 10.0 m y determina que tarda 2.2 s en llegar al suelo. Puede hacer caso omiso de cualquier fuerza que la atmósfera del planeta ejerza sobre la pelota. ¿Cuánto pesa la pelota de 100 g en la superficie del Planeta X?

4.33 Dos adultos y un niño quieren empujar un carrito con ruedas en la dirección x de la figura 4.29. 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 deberá ejercer. Se pueden despreciar los efectos de la fricción. b) Si el niño ejerce la fuerza mínima obtenida en la parte (a), el carrito acelerará a 2.0 m/s^2 en la dirección $+x$. ¿Cuánto pesa el carrito?

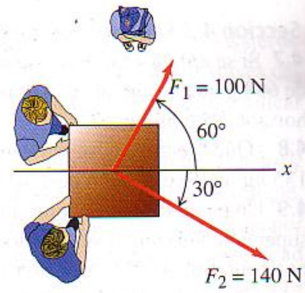


Figura 4.29 Problema 4.33.

4.34 Las máquinas de un buque tanque se averiaron y el viento está empujando a la nave con rapidez constante de 1.5 m/s hacia un arrecife (Fig. 4.30). Cuando el barco está a 500 m del arrecife, el viento cesa y el maquinista logra poner en marcha las máquinas. El timón está atorado, así que la única opción es acelerar hacia atrás. La masa del buque y su carga es 3.6×10^7 kg y las máquinas producen una fuerza horizontal neta de 8.0×10^4 N. ¿Chocará el barco con el arrecife? Si lo hace, ¿se derramará el petróleo? El casco puede resistir impactos a 0.2 m/s o menos. Puede despreciarse la fuerza de retardo que el agua ejerce sobre el casco de la nave.

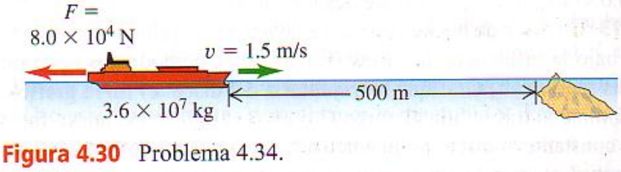


Figura 4.30 Problema 4.34.

4.35 Salto vertical sin carrera. El jugador de baloncesto Darrell Griffith saltó una vez 1.2 m sin carrera. (Esto implica que ascendió

1.2 m después de que sus pies se separaron del piso.) Griffith pesaba 890 N. 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 de la parte (b) para calcular la fuerza media que aplicó sobre el piso.

4.36 Un anuncio asegura que cierto auto 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)?

4.37 Una cubeta de 4.80 kg, llena de agua, se acelera hacia arriba con un cordel de masa despreciable cuya resistencia a la ruptura 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.

4.38 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. ¿Esa fuerza es hacia arriba o hacia abajo? c) ¿Qué aceleración (magnitud y dirección) tiene la paracaidista?

4.39 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 ligera (Fig. 4.31). Una mujer (con zapatos de golf que le dan tracción) 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 a las dos cajas. c) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la caja de 6.00 kg. ¿Qué dirección tiene la fuerza neta sobre esa caja? ¿Cuál tiene mayor magnitud, la fuerza T o la fuerza F? d) Use la parte (c) y la segunda ley de Newton para calcular la magnitud de F.

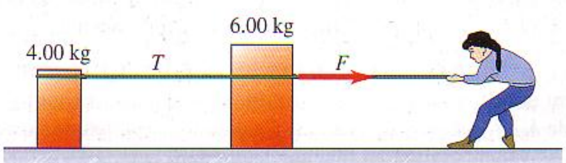


Figura 4.31 Problema 4.39.

4.40 Una astronauta está unida a una nave mediante un cable fuerte. La astronauta y su traje tienen una masa total de 105 kg, mientras que la masa del cable es despreciable. La masa de la nave es de 9.05×10^4 kg. La nave 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 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? e) ¿Qué aceleración tiene la nave?

4.41 Imagine que, a fin de estudiar los daños en aviones que chocan con aves, 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) ¿$t = 0$? (ii) ¿$t = 0.025$ s?

4.42 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 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.

4.43 Un tren (máquina más 4 vagones) que viaja por una vía horizontal tiene aceleración positiva de magnitud $|\vec{a}|$. Si cada vagón tiene masa m y las fuerzas de fricción que actúan sobre él son despreciables, ¿qué fuerza ejerce: a) la máquina sobre el primer vagón? b) ¿el primer vagón sobre el segundo? c) ¿el segundo sobre el tercero? d) ¿el cuarto sobre el tercero? e) ¿Cómo serían estas fuerzas si el tren tuviera aceleración negativa de magnitud $|\vec{a}|$? Su respuesta a cada pregunta deberá incluir un diagrama de cuerpo libre marcado claramente. En cada caso, indique cuál cuerpo está considerando.

4.44 Un gimnasta de masa m trepa 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) trepa a 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 $|\vec{a}|$.

4.45 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) ¿Y si el elevador estuviera en la Luna, donde $g = 1.62$ m/s^2)?

4.46 Salto al suelo. Un hombre de 75.0 kg se tira 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 de la parte (b) para calcular la fuerza media que sus pies ejercen sobre el piso al amortiguar la caída. Exprese la fuerza en N y como múltiplo de su peso.

4.47 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 reacción a cada fuerza 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 (b). ¿Qué fuerza $\vec{F}$ ejerce ahora la cabeza del martillo sobre el clavo mientras está en contacto con él y moviéndose hacia abajo?

4.48 Un cable uniforme de peso w cuelga 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 inferior? c) ¿En medio? Su respuesta a cada parte deberá incluir un diagrama de cuerpo libre. (*Sugerencia:* Escoja 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.

4.49 Los dos bloques de la figura 4.32 están unidos por una cuerda gruesa uniforme de 4.00 kg. Se aplica una fuerza de 200 N hacia arriba como se muestra. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el bloque de 6.00 kg, uno para la cuerda 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?

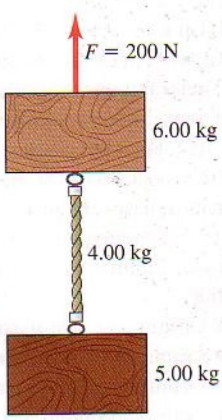


Figura 4.32 Problema 4.49.

4.50 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 de la parte (a) y las leyes de Newton para obtener la fuerza total que sus pies ejercen sobre el suelo mientras levanta la barra.

4.51 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 ascendente de sustentación, 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.

4.52 Un estudiante trata de levantar una cadena que consta de tres eslabones idénticos. Cada uno tiene una masa de 300 g. La cadena está conectada a un cordel y suspendida verticalmente; el estudiante sostiene el extremo superior del cordel y tira hacia arriba. Así, el estudiante ejerce una fuerza de 12 N hacia arriba sobre la cadena a través del cordel. 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 de la parte (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 medio.

4.53 La posición de un helicóptero de entrenamiento de 2.75×10^5 N que se está probando 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.

4.54 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.

***4.55** Sobre un objeto con masa m 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

***4.56** 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, escrita como $\Sigma F = m\,dv/dt$, y dos integraciones para demostrar que $x - x_0 = (m/C)\ln(v_0/v)$. b) Demuestre que dicha ley puede escribirse como $\Sigma F = mv\,dv/dx$. Deduzca la expresión de la parte (a) usando esta forma y una integración.

***4.57** 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

$$F_x(t) = k_1 + k_2y \qquad F_y(t) = k_3t$$

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.