LEYES DEL MOVIMIENTO DE NEWTON

4

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

METAS DE APRENDIZAJE

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

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

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

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

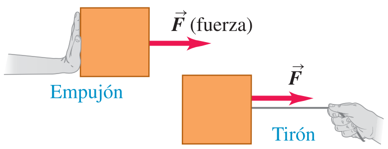
Las leyes de Newton no son producto de deducciones matemáticas, sino una síntesis que los físicos han descubierto al realizar un sinnúmero de *experimentos* con cuerpos en movimiento. (Newton usó las ideas y las observaciones que muchos científicos hicieron antes que él, como Copérnico, Brahe, Kepler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

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

4.1 Fuerza e interacciones

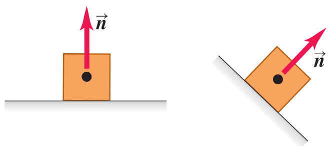
4.1 Algunas propiedades de las fuerzas.

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

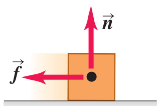


4.2 Cuatro tipos de fuerzas comunes.

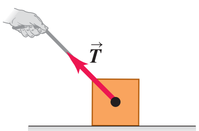
a) **Fuerza normal $\vec{n}$:** cuando un objeto descansa o se empuja sobre una superficie, ésta ejerce un empujón sobre el objeto que es perpendicular a la superficie.



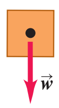
b) **Fuerza de fricción $\vec{f}$:** además de la fuerza normal, una superficie puede ejercer una fuerza de fricción sobre un objeto que es paralela a la superficie.



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



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



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

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

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

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

Tabla 4.1 Magnitudes de fuerzas comunes

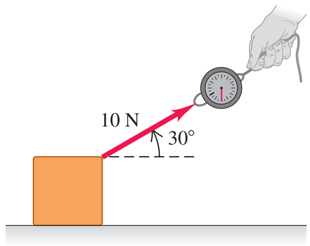
Fuerza gravitacional del Sol sobre la Tierra	3.5×10^{22} N
Empuje de un trasbordador espacial durante el lanzamiento	3.1×10^{7} N
Peso de una ballena azul grande	1.9×10^{6} N
Fuerza de tracción máxima de una locomotora	8.9×10^{5} N
Peso de un jugador de fútbol americano de 250 lb	1.1×10^{3} N
Peso de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

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

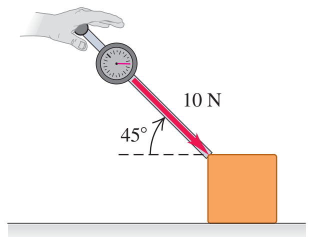
La figura 4.3 muestra una balanza de resorte que se utiliza para medir un tirón o un empujón que se aplica a una caja. En ambos casos, dibujamos un vector que represente la fuerza aplicada. Los rótulos indican la magnitud y la dirección de la fuerza; en tanto que la longitud del vector también indica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

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

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



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



Superposición de fuerzas

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

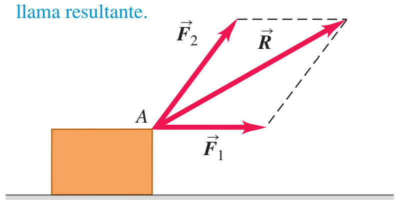
El descubrimiento experimental de que las fuerzas se combinan por suma vectorial es de enorme importancia. Usaremos este hecho muchas veces en nuestro estudio de la física, pues nos permite sustituir una fuerza por sus vectores componentes, como hicimos con los desplazamientos en la sección 1.8. Por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

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

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

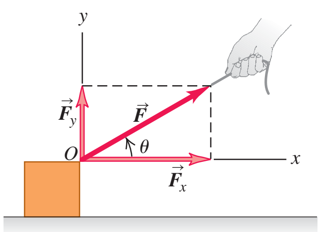
4.4 Superposición de fuerzas.

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

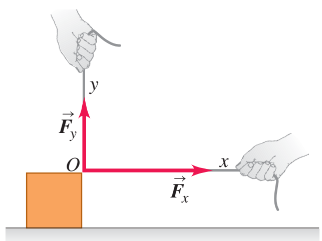


4.5 La fuerza $\vec{F}$, que actúa con un ángulo θ con respecto al eje x, puede ser sustituida por sus vectores componentes rectangulares, $\vec{F}_x$ y $\vec{F}_y$.

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

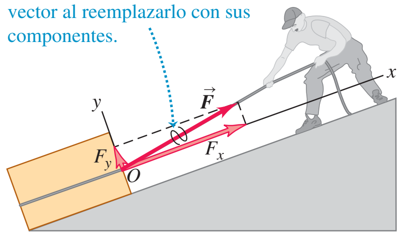


b) Los vectores componentes $\vec{F}_x$ y $\vec{F}_y$ tienen juntos el mismo efecto que la fuerza original $\vec{F}$

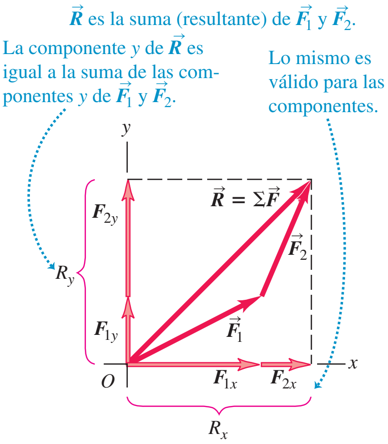


4.6 F_x y F_y son las componentes de $\vec{F}$ paralela y perpendicular a la superficie del plano inclinado.

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



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ejemplo 4.1 Superposición de fuerzas

Tres luchadores profesionales pelean por el mismo cinturón de campeonato. Vistos desde arriba, aplican al cinturón las tres fuerzas horizontales de la figura 4.8a. Las magnitudes de las tres fuerzas 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, así como la magnitud y dirección de la fuerza neta.

SOLUCIÓN

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

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

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

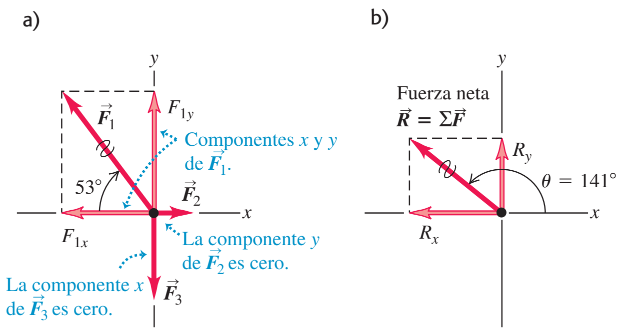
$$F_{1x} = (250\text{ N})\cos 127° = -150\text{ N}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

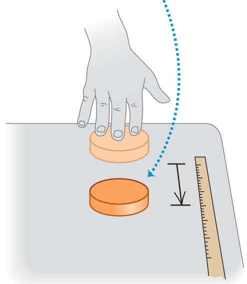
EVALUAR: En esta situación, la fuerza neta *no* es cero, y vemos intuitivamente que el luchador 1 (quien ejerce la mayor fuerza, $\vec{F}_1$, sobre el cinturón) probablemente se quedará con el cinturón después del forcejeo. En la sección 4.2 exploraremos a fondo qué sucede en situaciones en las que la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

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

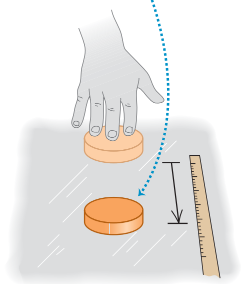
MP

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

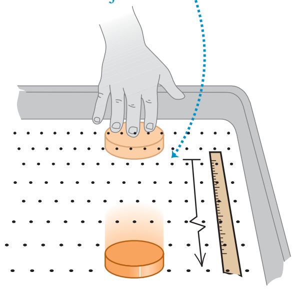
a) Mesa: el disco se detiene pronto.



b) Hielo: el disco se desliza más lejos.



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



4.2 Primera ley de Newton

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

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

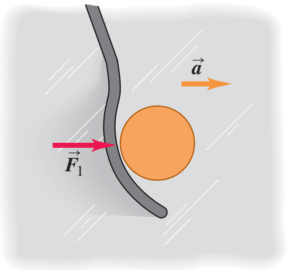
Imagine ahora que usted empuja el disco en una superficie lisa de hielo (figura 4.9b). Al dejar de empujar, el disco se desliza mucho más lejos antes de detenerse. Ponga el disco y empújelo en una mesa de hockey de aire, donde flota sobre un delgado "cojín" de aire, y llegará aún más lejos (figura 4.9c).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

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

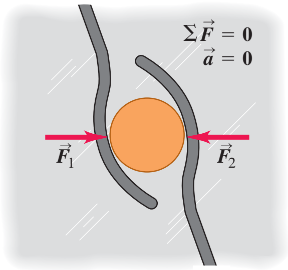
Primera ley del movimiento de Newton: **un cuerpo sobre el que no actúa una fuerza neta se mueve con velocidad constante (que puede ser cero) y aceleración cero.**

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

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



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ejemplo conceptual 4.2 Fuerza neta cero significa velocidad constante

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

SOLUCIÓN

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

Ejemplo conceptual 4.3 Velocidad constante significa fuerza neta igual a cero

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

SOLUCIÓN

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

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

Marcos de referencia inerciales

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

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

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