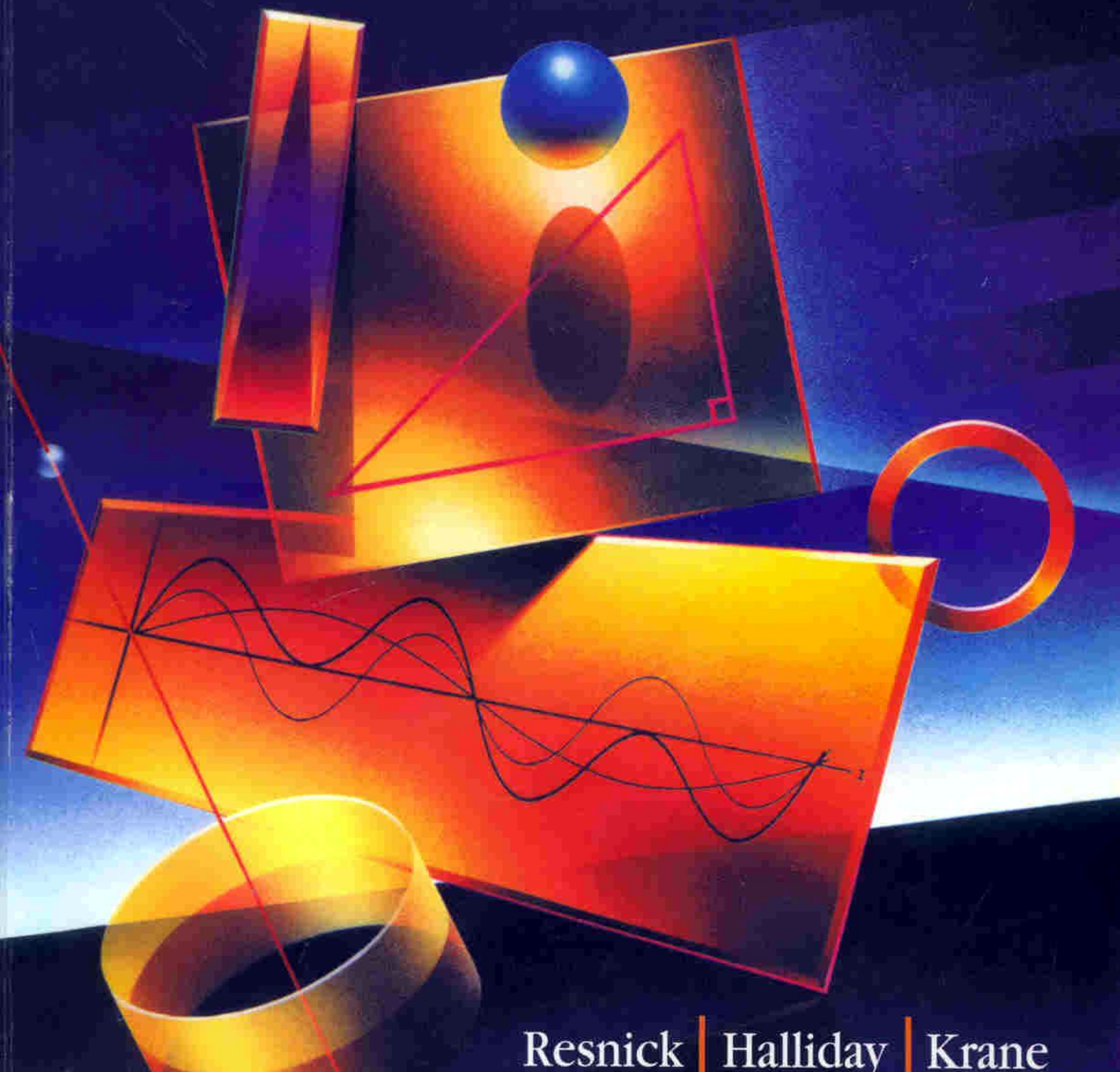
FÍSICA 1

4ª Edicion



Resnick | Halliday | Krane

CONTENIDO

CAPÍTULO 19 MOVIMIENTO ONDULATORIO 465

CAPÍTULO 20 ONDAS SONORAS 495

CAPÍTULO 21 LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD 519

CAPÍTULO 22 TEMPERATURA 547

CAPÍTULO 23 LA TEORÍA CINÉTICA Y EL GAS IDEAL 565

CAPÍTULO 24 MECÁNICA ESTADÍSTICA 587

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

CAPÍTULO 26 ENTROPÍA Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA 635

APÉNDICES

Física / Robert Resnick ; David Halliday ; Kenneth Krane. 3a. ed. español. México : Compania Editorial Continental, 2001

CAPÍTULO 5

FUERZA Y LAS LEYES DE NEWTON

En los capítulos 2 y 4 hemos estudiado el movimiento de una partícula. No nos preguntábamos entonces qué es lo que "causaba" el movimiento; simplemente lo describíamos en función de los vectores **r**, **v**, *y* **a**. *En este capítulo y en el próximo, discutiremos las* causas *del movimiento, un campo de estudio llamado* dinámica.

El enfoque de la dinámica *tal y como nosotros la consideramos en este capítulo y en el próximo, recibe el nombre de* mecánica clásica, *fue desarrollada y éxitosamente probada en los siglos* XVII *y* XVIII. *En nuestro siglo, nuevas teorías (la relatividad especial y general, y la mecánica cuántica) han descubierto ciertas áreas alejadas de nuestras experiencias ordinarias en que la mecánica clásica no consigue dar predicciones que estén de acuerdo con el experimento, pero estas nuevas teorías reducen a la mecánica clásica a los límites de los objetos ordinarios.*

Sin tener que recurrir a la relatividad especial o general o a la mecánica cuántica, podemos construir grandes rascacielos y estudiar las propiedades de los materiales de construcción; construir aeroplanos que puedan transportar a cientos de personas y volar alrededor del mundo; y enviar al espacio sondas en misiones complejas a los cometas, los planetas, y aún más allá. De todo esto trata la mecánica clásica.

5-1 MECÁNICA CLÁSICA

Centraremos nuestra atención en el movimiento de un cuerpo en particular. Éste interactúa con los cuerpos que lo rodean (su *entorno*) de modo que su velocidad cambia: se produce una aceleración. La tabla 1 muestra algunos movimientos acelerados comunes y el entorno responsable, en su mayoría, de la aceleración. El problema central de la mecánica clásica es éste: (1) Se nos da un cuerpo cuyas características (masa, volumen, carga eléctrica, etc.) conocemos. (2) Situamos a este cuerpo, en una posición inicial conocida y con una velocidad inicial también conocida, en un entorno del cual tenemos una descripción completa. (3) Cuál es el movimiento siguiente que tendrá el cuerpo?

TABLA 1 ALGUNOS MOVIMIENTOS ACELERADOS Y SUS CAUSAS

Objeto	*Cambio en el movimiento*	*Causa principal (entorno)*
Manzana	Cae del árbol	Gravedad (Tierra)
Bola de billar	Rebota contra otra	Otra bola, la mesa, la gravedad (Tierra)
Esquiador	Se desliza cuesta abajo	La gravedad (Tierra), fricción (la nieve), resistencia del aire
Haz de electrones (aparato de TV)	Enfoque y deflexión	Campos electromagnéticos (imanes y diferencias de voltaje)
Cometa Halley	Viaje redondo a través del sistema solar	Gravedad (del Sol)

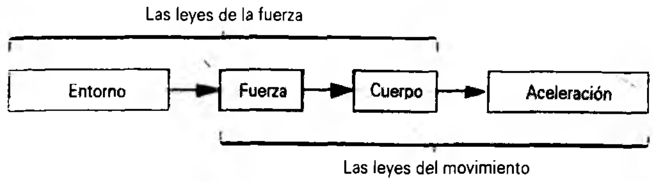


Figura 1 Nuestro programa de mecánica. Las tres casillas de la izquierda sugieren que la fuerza es una interacción entre un cuerpo y su entorno. Las tres casillas de la derecha sugieren que una fuerza que actúe sobre un cuerpo lo acelerará.

En capítulos anteriores, hemos tratado a los objetos físicos como *partículas*, esto es, como cuerpos cuya estructura interna o sus movimientos internos pueden ser dejados de lado y cuyas partes se mueven todas exactamente de la misma manera. Al estudiar la interacción de un cuerpo y su entorno, por lo general debemos considerar objetos grandes cuyas diferentes partes puedan interactuar con el entorno en modos distintos. Por ejemplo, un trabajador empuja un cajón pesado sobre una superficie rugosa. El obrero empuja sobre uno de los lados verticales del cajón, en tanto que su base horizontal experimenta el efecto retardante de la fricción con el piso. La superficie frontal puede incluso experimentar la resistencia del aire.

Más adelante trataremos a fondo la mecánica de los cuerpos extensos. Por ahora continuaremos suponiendo que todas las partes del cuerpo se mueven de la misma manera, de modo que podamos tratar al cuerpo como una partícula. Con esta suposición, no importa en qué parte del cuerpo actúe el entorno; nuestra principal preocupación es el *efecto neto* del entorno.

Este problema de la mecánica clásica fue resuelto, al menos para una gran veriedad de entornos, por Isaac Newton (1642-1727) cuando promulgó sus leyes del movimiento y formuló su ley de la gravitación universal. El procedimiento para resolver este problema, en términos de nuestro actual marco de referencia de la mecánica clásica, es como sigue: (1) Introducimos el concepto de *fuerza* $\mathbf{F}$ (la cual consideraremos por ahora como un empujón o un jalón), y la definimos en función de la aceleración $\mathbf{a}$ que experimenta determinado cuerpo estándar. (2) Desarrollamos un procedimiento para asignar una *masa* m a un cuerpo de modo que podamos entender el hecho de que diferentes cuerpos experimentan diferentes aceleraciones en el mismo entorno. (3) Finalmente, tratamos de hallar maneras de calcular las fuerzas que actúan sobre los cuerpos a partir de las propiedades del cuerpo y de su entorno; esto es, buscamos las *leyes de la fuerza*. La fuerza, que es básicamente un medio de relacionar al entorno con el movimiento del cuerpo, aparece tanto en las leyes del movimiento (que nos dicen qué aceleración experimentará un cuerpo bajo la acción de una fuerza dada) y en las leyes de fuerza (que nos dicen cómo calcular la fuerza que actúa sobre un cuerpo dado en un entorno determinado). Las leyes del movimiento y las leyes de la fuerza, juntas, constituyen las leyes de la mecánica, como lo sugiere la figura 1.

Este programa de la mecánica no puede ser probado por partes. Debemos verlo como una unidad y juzgarlo como exitoso si podemos decir **"sí"** a estas dos preguntas: (1) ¿Las predicciones del programa concuerdan con el experimento? (2) ¿Tienen las leyes de la fuerza una forma sencilla? Será el broche de oro de la mecánica newtoniana el hecho de que podamos contestar afirmativamente a cada una de estas preguntas.

5-2 PRIMERA LEY DE NEWTON

Durante siglos el problema del movimiento y sus causas fue un tema central de la filosofía natural, un primer apelativo de lo que ahora llamamos física. Sin embargo, el progreso extraordinario se llevó a cabo en los tiempos de Galileo y de Newton. Isaac Newton, nacido en Inglaterra en el año de la muerte de Galileo, es el arquitecto principal de la mecánica clásica. Él logró cristalizar las ideas de Galileo y de otros que le precedieron. Sus tres leyes del movimiento fueron presentadas primero (en 1686) en su *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, obra que suele llamarse también *Principia*.

Antes de Galileo la mayoría de los filósofos pensaban que se necesitaba cierta influencia o "fuerza" para mantener a un cuerpo en movimiento. Ellos pensaban que un cuerpo estaba en su "estado natural" cuando estaba en reposo. Por ejemplo, creían que si un cuerpo se mueve en línea recta a velocidad constante tenía que haber algún agente externo que lo impulsara en forma continua; de lo contrario, de manera "natural" dejaría de moverse.

Si quisiéramos probar estas ideas de manera experimental, tendríamos que hallar primero una forma de liberar a un cuerpo de todas las influencias de su entorno o de todas las fuerzas. Esto es difícil de lograr, pero en ciertos casos podemos hacer que las fuerzas sean muy pequeñas. Si estudiamos el movimiento al hacer más y más pequeñas las fuerzas, tendremos alguna idea de cómo sería el movimiento si las fuerzas externas fuesen realmente cero.

Coloquemos a nuestro cuerpo de prueba, digamos un bloque, sobre un plano horizontal rígido. Si hacemos que el bloque se deslice a lo largo de este plano, notaremos que gradualmente irá más despacio hasta detenerse. De hecho, esta observación se usó para basar la idea de que el movimiento se detenía cuando la fuerza externa, en este caso la mano que inicialmente impulsó al bloque, se retiraba. Sin embargo, podemos argumentar, en contra de esta idea, como sigue. Repitamos nuestro experimento, usando ahora un bloque más liso y un plano más liso también aplicando un lubricante. Observamos que la velocidad disminuye más lentamente que antes. Usemos bloques y superficies todavía más lisos y mejores lubricantes. Hallaremos que el bloque disminuye su velocidad en una cantidad más y más notable y viaja más lejos cada vez antes de llegar al reposo. Podríamos haber experimentado con una pista de aire, en la cual puedan flotar los objetos sobre una capa delgada de aire; tal dispositivo se acerca al límite de fricción nula, ya que con un ligero golpecito sobre uno de los deslizadores puede ponerlo en movimiento a lo largo de la pista a una velocidad baja y casi constante. Podemos ahora extrapolar y decir que, si pudiese ser eliminada toda fricción, el cuerpo continuaría indefinidamente en línea recta a velocidad constante. Se necesitaría una fuerza externa para poner al cuerpo en movimiento, pero *ninguna fuerza externa para mantener al cuerpo en movimiento a velocidad constante.*

Es difícil hallar una situación en la cual ninguna fuerza externa actúe sobre un cuerpo. La fuerza de la gravedad actuará sobre un objeto en o cerca de la Tierra, y fuerzas resistivas tales como la fricción o la resistencia del aire se oponen al movimiento en el suelo o en el aire. Afortunadamente, no necesitamos ir al vacío del espacio distante para estudiar el movimiento libre de una fuerza externa porque, al menos en lo que concierne al movimiento de traslación total de un cuerpo, *no hay distinción entre un cuerpo sobre el cual no actúe una fuerza externa y un cuerpo sobre el cual la suma o resultante de todas las fuerzas externas sea cero.* Usualmente nos referimos a la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo como la fuerza "neta". Por ejemplo, el empuje de nuestra mano sobre el bloque al deslizarse puede ejercer una fuerza que contrarreste a la fuerza de fricción que actúa sobre el bloque, y una fuerza hacia arriba del plano horizontal contrarrestaría a la fuerza de la gravedad. La fuerza neta sobre el bloque puede entonces ser cero, y el bloque puede moverse a velocidad constante.

Este principio fue adoptado por Newton como la primera de sus tres leyes del movimiento:

> *Considérese un cuerpo sobre el cual no actúe alguna fuerza neta. Si el cuerpo está en reposo, permanecerá en reposo. Si el cuerpo está moviéndose a velocidad constante, continuará haciéndolo así.*

La primera ley de Newton es un verdadero enunciado acerca de los marcos de referencia. En general, la aceleración de un cuerpo depende del marco de referencia con relación al cual se mide. Sin embargo, las leyes de la mecánica clásica son válidas solamente en un cierta serie de marcos de referencia, es decir, de aquellos para los cuales todos los observadores medirían *la misma* aceleración en un cuerpo en movimiento. La primera ley de Newton nos ayuda a identificar esta familia de marcos de referencia si la expresamos como sigue:

> *Si la fuerza neta que actúa sobre un cuerpo es cero, entonces es posible hallar un conjunto de marcos de referencia en los cuales ese cuerpo no tenga aceleración.*

La tendencia de un cuerpo a permanecer en reposo o en un movimiento lineal uniforme se llama *inercia*, y la primera ley de Newton suele llamarse también *la ley de la inercia*. Los marcos de referencia a los cuales se aplica se llaman *marcos inerciales*, como ya hemos visto en la sección 4-6. Como el lector recordará, los observadores en diferentes marcos de referencia inerciales (que se muevan a velocidad constante en relación uno con otro) miden todos el mismo valor de la aceleración. Entonces, no existe un marco único en el que la aceleración sea cero; existe un conjunto de marcos inerciales en los cuales la aceleración es cero.

Para probar si un marco de referencia en particular es un marco inercial, situamos un cuerpo de prueba en reposo dentro del marco y nos aseguramos de que no exista ninguna fuerza neta actuando sobre él. Si el cuerpo no permanece en reposo, el marco no es un marco inercial. Asimismo, podemos situar al cuerpo (de nuevo no sujeto a ninguna fuerza neta) en movimiento a velocidad constante; si su velocidad cambia, ya sea en magnitud o en dirección, el marco no es un marco inercial. Un marco en el que estas pruebas hayan pasado en todas sus partes es un marco inercial. Una vez que hayamos encontrado un marco inercial, es fácil encontrar muchos más, porque un marco de referencia que se mueva a velocidad constante en relación a un marco inercial es también un marco inercial.

En este libro casi siempre aplicamos las leyes de la mecánica clásica desde el punto de vista de un observador en un marco inercial. Ocasionalmente, estudiaremos problemas que incluyan a observadores en marcos de referencia no inerciales, tales como un automóvil en aceleración, un tiovivo que gira, o un satélite en órbita. Aun cuando la Tierra esté girando, en la mayoría de los casos prácticos puede considerarse que un marco de referencia unido a la Tierra es aproximadamente un marco de referencia inercial. En aplicaciones a gran escala, tales como el análisis de la trayectoria de los cohetes balísticos (misiles) o en el estudio de los vientos y de las corrientes oceánicas, es importante el carácter no inercial de la Tierra en rotación.

Nótese que no existe en la primera ley una distinción entre un cuerpo en reposo y uno que se mueva a velocidad constante. Ambos movimientos son "naturales" si la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo es cero. Esto resulta claro cuando un cuerpo en reposo situado en un marco inercial es visto desde un segundo marco inercial, esto es, cuando un marco se mueva a velocidad constante con respecto al primero. Un observador en el primer marco encuentra que el cuerpo está en reposo; un observador en el segundo marco encuentra que el mismo cuerpo se mueve a velocidad constante. Ambos observadores encuentran que el cuerpo no tiene aceleración, esto es, no cambia su velocidad, y ambos pueden concluir de la primera ley que no actúa sobre el cuerpo una fuerza neta.

Si existe una interacción mutua neta entre el cuerpo y los objetos presentes en el entorno, el efecto puede ser un cambio en el estado "natural" del movimiento del cuerpo. Para investigar esto, debemos ahora examinar cuidadosamente el concepto de fuerza.

5-3 FUERZA

Desarrollaremos nuestro concepto de fuerza definiéndolo operacionalmente. En el lenguaje cotidiano, una fuerza es un empuje o un jalón. Para medir tales fuerzas en forma cuantitativa, las expresamos en términos de la aceleración que determinado cuerpo estándar experimenta en respuesta a esa fuerza.

Como cuerpo normal encontramos conveniente emplear (o mejor, ¡imaginar que lo empleamos!) el kilogramo estándar (véase la Fig. 5 del capítulo 1). A este cuerpo se le ha asignado, por definición, una masa m_0 de 1 kg exactamente. Más tarde describiremos cómo se asignan las masas a otros cuerpos.

Para tener un entorno que ejerza una fuerza, situamos al cuerpo estándar sobre una mesa horizontal que tenga una fricción despreciable y le unimos un resorte. Mantenemos el otro extremo del resorte en la mano, como en la figura 2*a*. Ahora jalamos del resorte horizontalmente hacia la derecha de modo que, por ensayo y error, podamos dar al cuerpo estándar una aceleración constante medida de 1 m/s^2 exactamente. Entonces afirmamos, a modo de definición, que el resorte (que es el cuerpo significativo dentro del entorno) está ejerciendo sobre el kilogramo estándar una fuerza constante cuya magnitud llamaremos "1 newton" (abreviado, 1 N). Observamos que, al impartir esta fuerza, el resorte se estira una cantidad ΔL sobre su longitud L normal no extendido, como muestra la figura 2*b*.

Podemos repetir el experimento, ya sea estirando más el resorte o usando un resorte más rígido, de modo que midamos una aceleración de 2 m/s^2 en el cuerpo estándar. Declaramos ahora que el resorte está ejerciendo una fuerza de 2 N sobre el cuerpo estándar. En general, si observamos que este cuerpo estándar en particular tiene una aceleración a en un entorno determinado, podemos entonces decir que el entorno está ejerciendo una fuerza F sobre el cuerpo estándar de 1 kg, donde F (en newton) es numéricamente igual a a (en m/s^2).

Veamos ahora si la fuerza, tal como la hemos definido, es una cantidad *vectorial*. En la figura 2*b* asignamos una magnitud a la fuerza F, y es fácil asignarle también una dirección, esto es, la dirección de la aceleración que la fuerza produce. Sin embargo, ser un vector no es

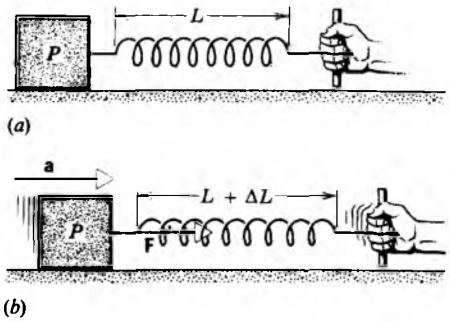


Figura 2 (*a*) Una "partícula" *P* (el kilogramo estándar) en reposo sobre una superficie horizontal sin fricción. (*b*) El cuerpo es acelerado jalando el resorte hacia la derecha.

suficiente para que una cantidad tenga magnitud y dirección; debe también obedecer las leyes de la suma de vectores descritas en el capítulo 3. Si las fuerzas, tal como las definimos, obedecen realmente a estas leyes, es algo que sólo podemos aprender mediante la experimentación.

Ejerzamos una fuerza de 4 N a lo largo del eje x y una fuerza de 3 N a lo largo del eje y. Apliquemos estas fuerzas primero por separado y luego simultáneamente al cuerpo estándar situado, como antes, sobre una superficie horizontal carente de fricción. ¿Cuál será la aceleración del cuerpo estándar? Hallaremos por experimentación que la fuerza de 4 N en la dirección x produjo una aceleración de 4 m/s^2 en la dirección x, y que la fuerza de 3 N en la dirección y produjo una aceleración de 3 m/s^2 en la dirección y (Fig. 3*a*). Cuando las fuerzas se aplican simultáneamente, como se muestra en la figura 3*b*, hallamos que la aceleración es de 5 m/s^2 dirigida a lo largo de una línea que forma un ángulo de 37° con el eje x. Ésta es la misma aceleración que sería producida si el cuerpo estándar estuviera experimentando una fuerza de 5 N en esa dirección. Este mismo resultado puede ser obtenido si primero sumamos vectorialmente las fuerzas de 4 N y de 3 N (Fig. 3*c*) a una resultante de 5 N dirigida a 37° del eje x, y luego aplicamos esa simple fuerza neta de 5 N al cuerpo. Los experimentos de esta clase demuestran sin lugar a dudas que las fuerzas son vectores: tienen magnitud y dirección, *y se suman* de acuerdo con la ley de la suma de vectores.

Obsérvese que disponemos de dos métodos de análisis, los cuales producirían resultados idénticos: (1) Hallar la aceleración producida por cada fuerza separada, y sumar vectorialmente las aceleraciones resultantes. (2) Sumar las fuerzas vectorialmente a una sola resultante, y luego hallar la aceleración cuando esa sola fuerza neta se ejerce en el cuerpo.

5-4 MASA

En la sección 5-3 consideramos solamente las aceleraciones dadas a un cuerpo en particular, el kilogramo estándar.

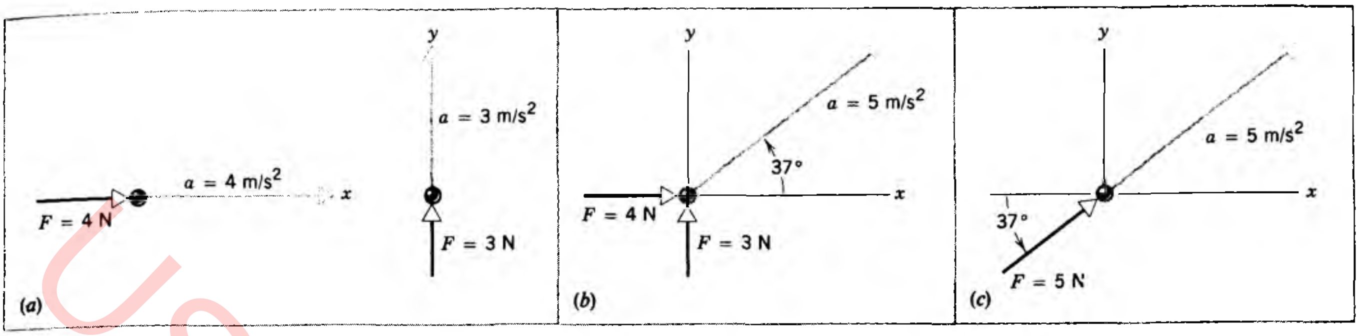


Figura 3 (*a*) Una fuerza de 4 N en dirección *x* produce una aceleración de 4 m/s² en dirección *x*, y una fuerza de 3 N en dirección *y* produce una aceleración de 3 m/s² en dirección *y*. (*b*) Cuando las fuerzas se aplican simultáneamente, la aceleración resultante es de 5 m/s² en la dirección mostrada. (*c*) La misma aceleración puede ser producida por una sola fuerza de 5 N en la dirección mostrada.

Nos fue posible por tanto definir a las fuerzas cuantitativamente. ¿Qué efecto causarían esas fuerzas sobre otros cuerpos? Ya que nuestro cuerpo estándar fue escogido arbitrariamente en el primer lugar, sabemos que para cualquier cuerpo dado la aceleración será directamente proporcional a la fuerza aplicada. La pregunta significativa resultante es, entonces: ¿Qué efecto tendría *la misma fuerza* sobre *cuerpos diferentes*?

La experiencia cotidiana nos da una respuesta cualitativa. La misma fuerza producirá aceleraciones diferentes sobre cuerpos diferentes. Una bola de béisbol será acelerada más por una fuerza dada de lo que lo sería un automóvil. Con objeto de obtener una respuesta cuantitativa a esta pregunta, necesitamos un método para medir la masa, *la propiedad de un cuerpo que determina su resistencia a un cambio en su movimiento.*

Unamos un resorte a nuestro cuerpo estándar (el kilogramo estándar, al cual asignamos arbitrariamente una masa de m_0 = 1 kg, exactamente) y démosle una aceleración a_0 de, digamos, 2.00 m/s² usando el método de la figura 2*b*. Midamos cuidadosamente la extensión ΔL del resorte asociada a la fuerza que el resorte está ejerciendo sobre el bloque.

Unamos ahora dos cuerpos estándar idénticos al resorte y apliquemos la misma fuerza que antes (esto es, jalemos de los dos cuerpos hasta que el resorte se estire la misma cantidad ΔL). Medimos la aceleración de los dos cuerpos, y obtenemos el valor de 1.00 m/s². Si usáramos tres cuerpos estándar idénticos y aplicásemos la misma fuerza, obtendríamos una aceleración de 0.667 m/s².

A partir de estas observaciones parece que, para una fuerza dada, cuanto más grande sea la masa menor será la aceleración. Más precisamente, concluimos de tales experimentos que *la aceleración producida por una fuerza dada es inversamente proporcional a la masa que es acelerada.* Otra manera de decir esto sería: *la masa de un cuerpo es inversamente proporcional a la aceleración que recibe por la aplicación de una fuerza dada.* La masa de un cuerpo puede entonces considerarse como *una medida cuantitativa de la resistencia de un cuerpo a la aceleración producida por una fuerza dada.*

Esta observación nos da una manera directa de comparar las masas de cuerpos diferentes: simplemente comparamos las aceleraciones medidas por la aplicación de una fuerza determinada a cada cuerpo. La razón de las masas de los dos cuerpos es entonces la misma que la razón *inversa* de las aceleraciones dadas a estos cuerpos por esa fuerza, o sea

$$\frac{m_1}{m_0} = \frac{a_0}{a_1} \quad \text{(actuando la misma fuerza } F\text{).}$$

Aquí estamos comparando la aceleración a_1 del cuerpo de masa desconocida m_1 con la aceleración a_0 impartida al cuerpo estándar de masa m_0.

Por ejemplo, supongamos como antes que usamos una fuerza que produzca una aceleración de 2.00 m/s² sobre el cuerpo estándar. Aplicamos la misma fuerza (estirando el resorte en la misma cantidad ΔL) a un cuerpo de masa desconocida m_1, y medimos una aceleración a_1 de, digamos, 0.50 m/s². Podemos entonces resolver para la masa desconocida, lo cual nos da

$$m_1 = m_0\left(\frac{a_0}{a_1}\right) = (1.00\text{ kg})\left(\frac{2.00\text{ m/s}^2}{0.50\text{ m/s}^2}\right) = 4.00\text{ kg}.$$

El segundo cuerpo, que tiene solamente un cuarto de la aceleración del primer cuerpo cuando actúa sobre él la misma fuerza, tiene cuatro veces la masa del primer cuerpo. Esto ilustra la relación inversa entre masa y aceleración para una fuerza dada.

Repitamos ahora el experimento anterior sobre los mismos dos cuerpos usando una fuerza común F' diferente a la usada anteriormente. Esta fuerza dará al cuerpo estándar una aceleración de a_0' y al cuerpo desconocido una aceleración de a_1'. De nuestra medición hallaríamos que la razón de las aceleraciones, a_0'/a_1', es la misma que en el experimento previo, es decir,

$$\frac{m_1}{m_0}=\frac{a_0}{a_1}=\frac{a_0'}{a_1'}.$$

Por ejemplo, apliquemos una fuerza más grande de modo que la extensión del resorte sea de $1.5\Delta L$. Hallaríamos entonces que la masa estándar m_0 se acelera a razón de 3.00 m/s² y que la masa desconocida m_1 se acelera a razón de 0.75 m/s². Deduciríamos que la masa desconocida es

$$m_1=m_0\left(\frac{a_0'}{a_1'}\right)=(1.00\text{ kg})\left(\frac{3.00\text{ m/s}^2}{0.75\text{ m/s}^2}\right)=4.00\text{ kg}.$$

Obtenemos el mismo valor para la masa desconocida m_1, no importa cuál sea el valor de la fuerza común. La razón de las masas m_1/m_0 es independiente de la fuerza común empleada; la masa es una propiedad fundamental del objeto, sin relación alguna con el valor de la fuerza usada para comparar a la masa desconocida con la masa estándar. En efecto, este procedimiento nos permite medir la masa por comparación con el kilogramo estándar.

Podemos extender este procedimiento a una comparación directa de las masas de dos cuerpos cualesquiera. Por ejemplo, usemos primero nuestro procedimiento previo para comparar a un segundo cuerpo arbitrario con el cuerpo estándar, y determinemos entonces su masa, digamos m_2. Podemos ahora comparar a los dos cuerpos arbitrarios, m_2 y m_1, directamente, y obtener las aceleraciones a_2'' y a_1'' cuando es aplicada la misma fuerza F''. La razón de las masas, definida como es usual por

$$\frac{m_2}{m_1}=\frac{a_1''}{a_2''}\quad\text{(actuando la misma fuerza)},$$

resulta tener el mismo valor que el que obtuvimos usando las masas m_2 y m_1 determinadas previamente por comparación directa con el estándar.

Podemos demostrar, en otro experimento más de este tipo, que si los objetos de masa m_1 y m_2 se unen entre sí, se comportan mecánicamente como un solo objeto de masa $(m_1 + m_2)$. En otras palabras, *las masas se suman como (y son) cantidades escalares.*

Un ejemplo práctico del uso de esta técnica (asignar masas por comparación de las aceleraciones relativas producidas por una fuerza dada) consiste en la medición precisa de las masas de los átomos. La fuerza en este caso es una fuerza magnética de desviación y la aceleración es centrípeta, pero el principio es exactamente el mismo. Para una fuerza magnética común que actúe sobre dos átomos, la razón de sus masas es igual a la razón inversa de sus aceleraciones. La medición de la desviación, como en el espectrómetro de masas mostrado en la figura 6 del capítulo 1, nos permite la medición precisa de las razones de masa, y la definición de ^{12}C como el estándar permite entonces la obtención de valores precisos de las masas, tales como los mostrados en la tabla 6 del capítulo 1.

5-5 SEGUNDA LEY DE NEWTON

Podemos ahora resumir todos los experimentos y definiciones descritos anteriormente en una ecuación, la ecuación fundamental de la mecánica clásica,

$$\sum \mathbf{F}=m\mathbf{a}. \tag{1}$$

En esta ecuación $\Sigma\, \mathbf{F}$ es la *suma* (vectorial) *de todas* las fuerzas *que actúan sobre* el cuerpo, m es la masa del cuerpo, y $\mathbf{a}$ es su aceleración (vectorial). Usualmente nos referiremos a $\Sigma\, \mathbf{F}$ como la fuerza *resultante*, o fuerza *neta*.

La ecuación (1) es un enunciado de la segunda ley de Newton. Si la escribimos en la forma $\mathbf{a} = (\Sigma\, \mathbf{F})/m$, podremos ver fácilmente que la aceleración del cuerpo es, en magnitud, directamente proporcional a la fuerza resultante que actúa sobre él en dirección paralela a esta fuerza. Vemos también que la aceleración, para una fuerza dada, es inversamente proporcional a la masa del cuerpo.

Obsérvese que la primera ley del movimiento parece estar contenida en la segunda ley como un caso especial, ya que si $\Sigma\, \mathbf{F} = 0$, entonces $\mathbf{a} = 0$. En otras palabras, si la fuerza resultante sobre un cuerpo es cero, la aceleración del cuerpo es cero y el cuerpo se mueve a velocidad constante, como nos dice la primera ley. Sin embargo, la primera ley tiene un papel independiente e importante para definir marcos de referencia inerciales. Sin esa definición, no nos sería posible elegir los marcos de referencia a los cuales aplicar la segunda ley. Por lo tanto, necesitamos *ambas leyes* para un sistema de mecánica completo.

La ecuación (1) es una ecuación vectorial. Como en el caso de todas las ecuaciones vectoriales, podemos escribir esta simple ecuación vectorial como tres ecuaciones escalares,

$$\sum F_x=ma_x,\quad \sum F_y=ma_y,\quad \text{y}\quad \sum F_z=ma_z, \tag{2}$$

que relacionan a las componentes x, y, y z de la fuerza resultante ($\Sigma\, F_x$, $\Sigma\, F_y$, y $\Sigma\, F_z$) con las componentes x, y, y z de la aceleración (a_x, a_y, y a_z) para la masa m. Debería recalcarse que $\Sigma\, F_x$ es la suma *algebraica* de las componentes x de *todas* las fuerzas, $\Sigma\, F_y$ es la suma *algebraica* de las componentes y de *todas* las fuerzas, y $\Sigma\, F_z$ es la suma *algebraica* de las componentes z de *todas* las fuerzas que actúan sobre m. Al practicar la suma algebraica, deben tomarse en cuenta los signos de las componentes (esto es, las direcciones relativas de las fuerzas).

Al analizar situaciones que empleen la segunda ley de Newton, es de ayuda trazar un diagrama que muestre al cuerpo en cuestión como una partícula y que muestre igualmente a todas las fuerzas como vectores que actúan sobre la partícula. A un diagrama así se le llama *diagrama del cuerpo libre* y constituye un primer paso esencial tanto

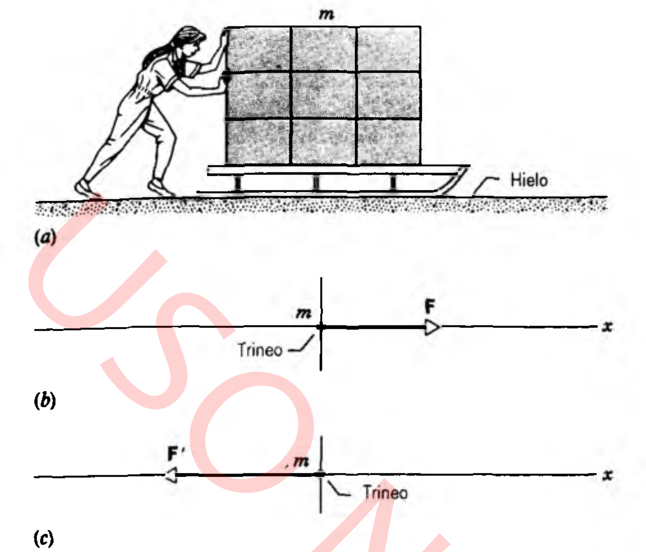


Figura 4 Problemas muestra 1 y 2. (*a*) Una estudiante empuja un trineo cargado sobre una superficie sin fricción. (*b*) Un diagrama del cuerpo libre, que muestra al trineo como una "partícula" y a la fuerza que actúa sobre él. (*c*) Un segundo diagrama del cuerpo libre, que muestra a la fuerza que actúa cuando la estudiante empuja en dirección opuesta.

en el análisis de un problema como en la visualización de la situación física.

Problema muestra 1 Una estudiante empuja un trineo cargado cuya masa m es de 240 kg a través de una distancia d de 2.3 m sobre la superficie sin fricción de un lago helado. Ella ejerce una fuerza horizontal constante F de 130 N (= 29 lb) cuando lo hace; véase la figura 4*a*. Si el trineo parte del reposo, ¿cuál es su velocidad final?

Solución Como lo muestra la figura 4*b*, trazamos un eje horizontal x, hacemos que la dirección creciente de x sea hacia la derecha, y tratamos al trineo como una partícula. La figura 4*b* es un diagrama *parcial* del cuerpo libre. Al trazar diagramas del cuerpo libre, siempre es importante incluir a *todas* las fuerzas que actúan sobre la partícula, pero aquí hemos omitido a dos fuerzas verticales que veremos más adelante en este capítulo y que no afectan a nuestra solución. Supongamos que la fuerza F ejercida por la estudiante es la única fuerza horizontal que actúa sobre el trineo. Podemos entonces hallar la aceleración del trineo por la segunda ley de Newton, es decir,

$$a = \frac{F}{m} = \frac{130\text{ N}}{240\text{ kg}} = 0.54\text{ m/s}^2.$$

A causa de que la aceleración es constante, podemos usar la ecuación 20 del capítulo 2 [$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$] para hallar la velocidad final. Poniendo $v_0 = 0$ y $x - x_0 = d$ y resolviendo para v, obtenemos

$$v = \sqrt{2ad} = \sqrt{(2)(0.54\text{ m/s}^2)(2.3\text{ m})} = 1.6\text{ m/s}.$$

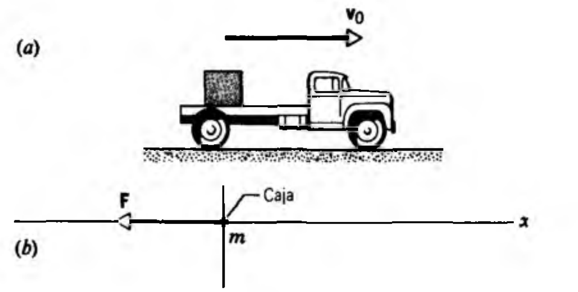


Figura 5 Problema muestra 3. (*a*) Una caja sobre un camión que está reduciendo su marcha. (*b*) El diagrama del cuerpo libre de la caja.

La fuerza, la aceleración, el desplazamiento, y la velocidad final del trineo son todas positivas, lo que significa que apuntan hacia la derecha en la figura 4*b*.

Obsérvese que para continuar aplicando la fuerza constante, la estudiante tendría que correr más y más aprisa para mantenerse a la par con el trineo que acelera. Eventualmente, la velocidad del trineo superaría a la velocidad más alta a la cual puede correr la estudiante, por lo que la estudiante ya no podría aplicar una fuerza al trineo por más tiempo. El trineo continuaría (en ausencia de la fricción) deslizándose a una velocidad constante.

Problema muestra 2 La estudiante del problema muestra 1 quiere invertir la dirección de la velocidad del trineo en 4.5 s. ¿Con qué fuerza constante deberá empujar al trineo para conseguirlo?

Solución Hallemos la aceleración (constante) usando la ecuación 15 del capítulo 2 ($v = v_0 + at$). Resolviendo para a tenemos que

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{(-1.6\text{ m/s}) - (1.6\text{ m/s})}{4.5\text{ s}} = -0.71\text{ m/s}^2.$$

Esta magnitud es más grande que la aceleración del problema muestra 1 (0.54 m/s²) lo que nos lleva a concluir que la estudiante tendrá que empujar más fuerte esta vez. Hallamos esta fuerza F' (constante) según

$$F' = ma = (240\text{ kg})(-0.71\text{ m/s}^2)$$
$$= -170\text{ N } (= -38\text{ lb}).$$

El signo negativo demuestra que la estudiante está empujando al trineo en dirección de x decreciente, es decir, hacia la izquierda como lo muestra el diagrama del cuerpo libre de la figura 4*c*.

Problema muestra 3 Una caja cuya masa m es de 360 kg reposa sobre la plataforma de un camión que se mueve a una velocidad v_0 de 120 km/h, como en la figura 5*a*. El conductor acciona los frenos y reduce la velocidad v a 62 km/h en 17 s. ¿Qué fuerza (supuesta como constante) actúa sobre la caja durante este tiempo? Suponga que la caja no se desliza en la plataforma del camión.

Solución Primero hallamos la aceleración (constante) de la caja. Resolviendo la ecuación 15 del capítulo 2 ($v = v_0 + at$) para a nos da

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{(62\text{ km/h}) - (120\text{ km/h})}{17\text{ s}}$$
$$= \left(-3.41\ \frac{\text{km}}{\text{h}\cdot\text{s}}\right)\left(\frac{1\text{ h}}{3600\text{ s}}\right)\left(\frac{1000\text{ m}}{1\text{ km}}\right) = -0.95\text{ m/s}^2.$$

Ya que hemos tomado la derecha como el sentido positivo de la dirección horizontal, el vector aceleración debe apuntar hacia la izquierda.

La fuerza sobre la caja responde a la segunda ley de Newton:

$$F = ma$$
$$= (360\text{ kg})(-0.95\text{ m/s}^2) = -340\text{ N}.$$

Esta fuerza actúa en la misma dirección de la aceleración, es decir, hacia la izquierda en la figura 5*b*. La fuerza debe ejercerla un agente externo, como son las fajas u otros medios mecánicos usados para sujetarla a la plataforma del camión. Si la caja no se sujeta, entonces la fricción entre la caja y la plataforma del camión debe proporcionar la fuerza necesaria. Si no existe la suficiente fricción como para proveer una fuerza de 340 N, la caja se deslizará sobre la plataforma porque, como lo puede medir un observador parado en el suelo, la caja desacelerará con más lentitud que el camión.

5-6 TERCERA LEY DE NEWTON

Las fuerzas que actúan sobre un cuerpo resultan de otros cuerpos que conforman su entorno. Si examinamos a las fuerzas que actúan sobre un segundo cuerpo, uno anteriormente considerado como parte del entorno, entonces el primer cuerpo es parte del entorno del segundo cuerpo y es, en parte, responsable de las fuerzas que actúan sobre el segundo cuerpo. Toda fuerza es por lo tanto parte de la interacción mutua entre *dos* cuerpos. Hallamos experimentalmente que cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre un segundo cuerpo, el segundo cuerpo siempre ejerce una fuerza sobre el primero. Más aún, hallamos que estas fuerzas son *siempre* iguales en magnitud pero opuestas en dirección. Una fuerza aislada es por lo tanto, algo imposible.

Supongamos que esto no fuera así. Consideremos a dos cuerpos aislados A y B, y supongamos que el cuerpo A ejerce una fuerza sobre el cuerpo B, mientras que ninguna fuerza se ejerce por B sobre A. La fuerza total sobre la combinación $A + B$ no es cero, y la masa combinada debe acelerarse. Si una situación tal pudiera ocurrir, entonces tendríamos una fuente de energía sin límite que podría impulsar a $A + B$ a través del espacio sin costo: los veleros podrían ser impulsados por pasajeros que soplaran sobre las velas, y los vehículos espaciales podrían ser acelerados por los astronautas que empujarían las paredes. La imposibilidad de estas acciones es una consecuencia de la tercera ley de Newton.

Arbitrariamente, llamamos a una de las fuerzas de la interacción mutua entre dos cuerpos la fuerza de "acción",

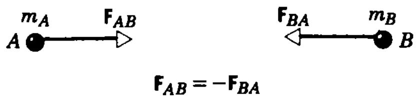


Figura 6 Tercera ley de Newton. El cuerpo A ejerce una fuerza $\mathbf{F}_{BA}$ sobre el cuerpo B. El cuerpo B debe entonces ejercer una fuerza $\mathbf{F}_{AB}$ sobre el cuerpo A, y $\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}$.

y a la otra la denominamos fuerza de "reacción". La tercera ley de Newton puede entonces ser establecida en la forma tradicional:

A cada acción corresponde una reacción igual y opuesta.

Una versión más moderna de la tercera ley pertenece a la fuerza mutua ejercida por dos cuerpos uno sobre el otro:

Cuando dos cuerpos ejercen fuerzas mutuas entre sí, las dos fuerzas son siempre de igual magnitud y de dirección opuesta.

Formalmente (véase la Fig. 6) hagamos que el cuerpo A ejerza una fuerza $\mathbf{F}_{BA}$ sobre el cuerpo B; el experimento demuestra entonces que el cuerpo B ejerce una fuerza $\mathbf{F}_{AB}$ sobre el cuerpo A. (Nótese el orden de los subíndices; la fuerza se ejerce *sobre* el cuerpo representado por el primer subíndice *por* el cuerpo representado por el segundo.) En términos de una ecuación vectorial,

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}. \tag{3}$$

Es importante recordar que las fuerzas de acción y reacción siempre actúan sobre cuerpos *diferentes*, como nos lo indican los primeros subíndices diferentes. Si actuaran sobre el mismo cuerpo, no existiría fuerza neta sobre ese cuerpo ni movimiento acelerado.

Cuando un bate de béisbol golpea a la pelota, el bate ejerce una fuerza sobre la pelota (la acción), y la pelota ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el bate. Cuando un jugador de fútbol soccer patea la pelota, el pie ejerce una fuerza sobre la pelota (la acción), y la pelota ejerce una fuerza de reacción opuesta en el pie. Si usted trata de empujar un automóvil parado, podrá comprobar que éste ejerce presión hacia usted. En cada caso las fuerzas de acción y de reacción actúan sobre diferentes cuerpos. Si nuestro propósito consistiera en el estudio de la dinámica de un cuerpo, como la pelota de béibol, por ejemplo, consideraríamos únicamente una fuerza del par acción-reacción; en cuanto a la otra, es percibida por un cuerpo diferente y sólo se consideraría si estuviéramos estudiando la dinámica de ese cuerpo.

Los siguientes ejemplos ilustran aplicaciones de la tercera ley.

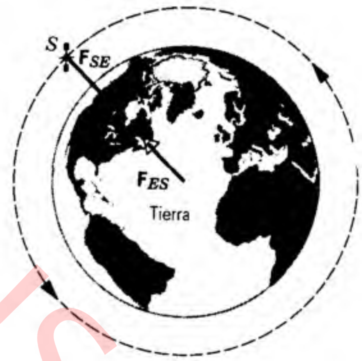


Figura 7 Un satélite en órbita alrededor de la Tierra. Las fuerzas mostradas son el par acción-reacción. Nótese que actúan sobre cuerpos diferentes.

1. *Un satélite en órbita.* La figura 7 ilustra la órbita de un satélite alrededor de la Tierra. La única fuerza que actúa sobre él es $\mathbf{F}_{SE}$, la fuerza ejercida *sobre* el satélite por la atracción gravitatoria de la Tierra. ¿Dónde está la fuerza de reacción correspondiente? Es $\mathbf{F}_{ES}$, la fuerza que actúa sobre la Tierra debida a la atracción gravitatoria del satélite.

Podría pensarse que el pequeño satélite no ejerce mucha atracción gravitatoria sobre la Tierra pero sí lo hace, exactamente como lo enuncia la tercera ley de Newton. Esto es, al considerar solamente las magnitudes, $F_{ES} = F_{SE}$. (Recuérdese que la magnitud de cualquier cantidad vectorial es siempre positiva.) La fuerza $\mathbf{F}_{ES}$ hace que la Tierra se acelere, pero, a causa de la gran masa de la Tierra, su aceleración es tan pequeña que no puede ser detectada fácilmente.

2. *Un libro puesto sobre una mesa.* La figura 8*a* muestra un libro puesto sobre una mesa. La Tierra tira del libro hacia abajo con una fuerza $\mathbf{F}_{BE}$. El libro no se acelera porque esta fuerza es cancelada por la fuerza de contacto $\mathbf{F}_{BT}$, igual y opuesta, que ejerce la mesa sobre el libro.

Aun cuando $\mathbf{F}_{BE}$ y $\mathbf{F}_{BT}$ son de igual magnitud y de dirección opuesta, *no* constituyen un par acción-reacción. ¿Por qué no? *Porque actúan sobre el mismo cuerpo: el libro.* Se anulan entre sí y, por lo tanto, afirman el hecho de que el libro no acelere.

Cada una de estas fuerzas debe entonces tener una fuerza de reacción correspondiente en algún lugar. ¿Dónde están? La reacción a $\mathbf{F}_{BE}$ es $\mathbf{F}_{EB}$, la fuerza (gravitatoria) con la que el libro atrae a la Tierra. Mostramos este par acción-reacción en la figura 8*b*.

La figura 8*c* muestra la fuerza de reacción a $\mathbf{F}_{BT}$. Es $\mathbf{F}_{BT}$, la fuerza de contacto sobre la mesa debida al libro. Los pares acción-reacción que actúan sobre el libro en este problema, y los cuerpos sobre los que actúan, son:

$$\text{primer par: } \mathbf{F}_{BE} = -\mathbf{F}_{EB} \text{ (libro y Tierra)}$$

y

$$\text{segundo par: } \mathbf{F}_{BT} = -\mathbf{F}_{TB} \text{ (libro y mesa).}$$

3. *Empujando una fila de cajas.* La figura 9 muestra a un obrero *W* empujando dos cajas, cada una de las cuales descansa sobre un carrito que puede rodar con fricción despreciable. El obrero ejerce una fuerza $\mathbf{F}_{1W}$ sobre la caja 1, la cual a su vez empuja contra el obrero con una fuerza de reacción $\mathbf{F}_{W1}$. La caja 1 empuja sobre la caja 2 con una fuerza $\mathbf{F}_{21}$, y la caja 2 empuja contra la caja 1 con una fuerza $\mathbf{F}_{12}$. (Nótese que el obrero no ejerce fuerza sobre la caja 2 directamente.) Para moverse hacia adelante, el obrero debe empujar a su vez contra el suelo. El obrero ejerce una fuerza $\mathbf{F}_{GW}$ sobre el suelo, y la fuerza de reacción del suelo sobre el obrero, $\mathbf{F}_{WG}$, empuja al obrero hacia adelante. La figura muestra tres pares de acción-reacción:

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} \quad \text{(caja 1 y caja 2),}$$

$$\mathbf{F}_{1W} = -\mathbf{F}_{W1} \quad \text{(obrero y caja 1),}$$

$$\mathbf{F}_{WG} = -\mathbf{F}_{GW} \quad \text{(obrero y suelo).}$$

La aceleración de la caja 2 se determina, de acuerdo con la segunda ley de Newton, por la fuerza neta aplicada a ella:

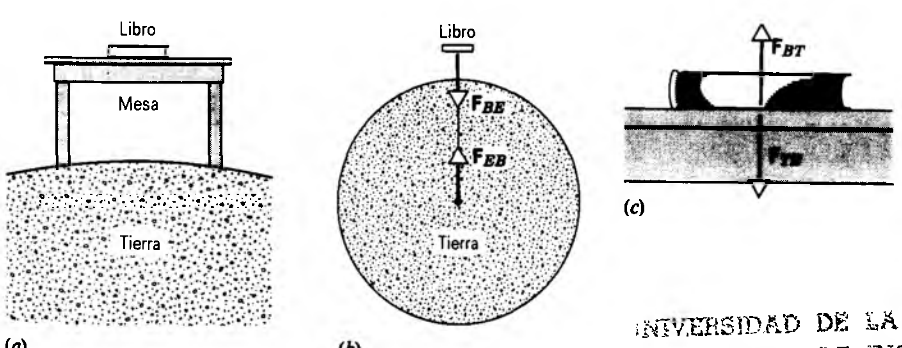


Figura 8 (*a*) Un libro puesto sobre una mesa, la cual a su vez está sobre la Tierra. (*b*) El libro y la Tierra ejercen fuerzas gravitatorias entre sí, formando un par acción-reacción. (*c*) La mesa y el libro ejercen fuerzas de contacto de acción-reacción entre sí.

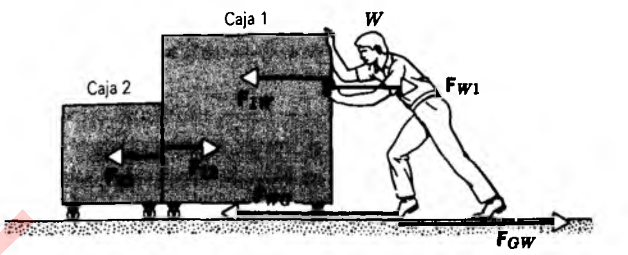


Figura 9 Un obrero empuja una caja 1, la cual a su vez empuja a la caja 2. Las cajas están sobre ruedas que se mueven libremente, de modo que no existe fricción entre las cajas y el suelo.

$$F_{21} = m_2 a_2.$$

La fuerza neta sobre la caja 1 determina su aceleración,

$$F_{1W} - F_{12} = m_1 a_1,$$

donde hemos escrito la suma vectorial de las fuerzas como la diferencia de sus magnitudes, porque actúan sobre la caja 1 en direcciones opuestas. Si las dos cajas permanecen en contacto, sus aceleraciones deben ser iguales. Si a representa la aceleración común y sumamos las ecuaciones, nos da

$$F_{1W} = (m_1 + m_2)a.$$

Si consideramos que las cajas 1 y 2 son un mismo objeto de masa $m_1 + m_2$ resultaría esta misma ecuación. La fuerza externa neta que actúa sobre el objeto combinado es F_{1W}. Las dos fuerzas de contacto que existen en la frontera entre las cajas 1 y 2 no aparecen en la ecuación que describe al objeto *combinado*. Como tampoco aparecen las fuerzas atómicas internas que unen al objeto; cada fuerza interna forma un par acción-reacción que actúa sobre partes separadas (átomos individuales, quizá) y tales pares suman cero al sumar entre sí las partes separadas que forman la combinación total.

Nótese que en este ejemplo el obrero es el agente activo responsable del movimiento, pero es la fuerza de reacción del suelo la que lo hace posible. Si no hubiese fricción entre los zapatos del obrero y el suelo, el obrero no podría mover el sistema hacia adelante.

4. *Un bloque colgado de un resorte*. La figura 10*a* nos muestra un bloque en reposo que cuelga de un resorte, estando su otro extremo fijo en el techo. Las fuerzas sobre el bloque, mostradas por separado en la figura 10*b*, son su peso **W** (que actúa hacia abajo) y la fuerza **F** ejercida por el resorte (que actúa hacia arriba). El bloque está en reposo bajo la influencia de estas fuerzas, pero las fuerzas *no* son un par acción-reacción, porque, de nuevo, actúan sobre el mismo cuerpo. La fuerza de reacción al peso **W** es la

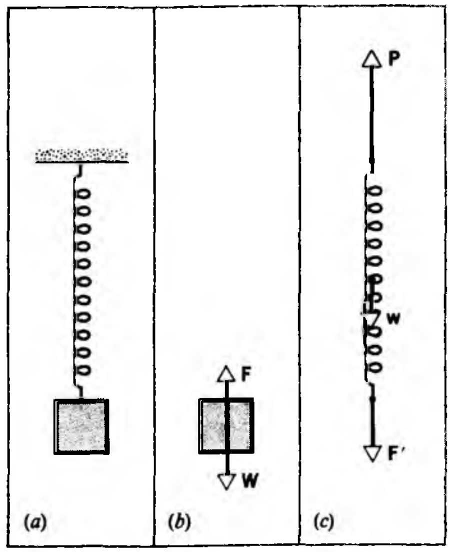


Figura 10 (*a*) Un bloque en reposo colgado del techo por un resorte estirado. (*b*) Las fuerzas sobre el bloque. (c) Las fuerzas sobre el resorte.

fuerza gravitatoria que el bloque ejerce sobre la Tierra, fuerza que no se muestra.

La fuerza de reacción a **F** (la fuerza ejercida *sobre* el bloque *por* el resorte) *es la fuerza ejercida por el bloque sobre* el resorte. Para mostrar esta fuerza, ilustramos en la figura 10*c* las fuerzas que actúan sobre el resorte. Estas fuerzas incluyen la reacción a **F**, la cual mostramos como una fuerza **F′** (= −**F**) que actúa hacia abajo, el peso **w** del resorte (generalmente despreciable), y el jalón **P** hacia arriba del techo. Si el resorte está en reposo, la fuerza neta debe ser cero: **P** + **w** + **F′** = 0.

La fuerza de reacción a **P** actúa *sobre* el techo. Puesto que en este diagrama no estamos mostrando al techo como un cuerpo independiente, la reacción a **P** no aparece.

5-7 UNIDADES DE FUERZA

Como todas la ecuaciones, la segunda ley de Newton ($F = ma$) debe ser dimensionalmente consistente. En el lado derecho, las dimensiones son, recordando del capítulo 1 que [ ] denota *las dimensiones de*, $[m][a] = \mathrm{ML/T^2}$, y por lo tanto éstas deben ser también las dimensiones de una fuerza:

$$[F] = \mathrm{ML/T^2}.$$

No importa cuál sea el origen de la fuerza (gravitatoria, eléctrica, nuclear, o cualquiera otra) y no importa qué tan complicada sea la ecuación que describa a la fuerza, deben mantenerse para ella estas dimensiones.

En el sistema SI de unidades, la masa se mide en kg y la aceleración en m/s^2. Para impartir una aceleración de 1 m/s^2 a una masa de 1 kg se requiere una fuerza de 1 kg · m/s^2. A esta combinación de unidades, en cierta forma inconveniente, se le ha dado el nombre de newton (abreviado N):

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

Si medimos la masa en kg y la aceleración en m/s^2, la segunda ley de Newton nos da la fuerza en N.

Existen otros dos sistemas de unidades de uso común, que son el sistema cegesimal cgs (centímetro-gramo-segundo) y el sistema inglés (o británico). En el sistema cgs, la masa se mide en gramos y la aceleración en cm/s^2. La unidad de fuerza en este sistema es la *dina* y equivale a g · cm/s^2. Puesto que 1 kg = 10^3 g y 1 m/s^2 = 100 cm/s^2, se deduce que 1 N = 10^5 dinas. Una dina es una unidad muy pequeña, aproximadamente igual al peso de un milímetro cúbico de agua. (Por el contrario, un newton es aproximadamente el peso de media taza de agua.)

En el sistema inglés, la fuerza se mide en libras y la aceleración en pies/s^2. En este sistema, la masa que es acelerada a razón de 1 pie/s^2 por una fuerza de 1 lb se llama *slug* (de la palabra *sluggish*, que significa lento o que no responde).

Ocasionalmente se encuentran otras variantes de estos sistemas básicos, pero estos tres son en mucho los más comunes. La tabla 2 resume estas unidades de fuerza comunes; en el apéndice G puede hallarse una lista más extensa.

TABLA 2 UNIDADES DE LA SEGUNDA LEY DE NEWTON

Sistema	*Fuerza*	*Masa*	*Aceleración*
SI	newton (N)	kilogramo (kg)	m/s^2
cgs	dina	gramo (g)	cm/s^2
inglés	libra	slug	pies/s^2

5-8 PESO Y MASA

El *peso* de un cuerpo en la Tierra es la fuerza de gravedad ejercida sobre él por la Tierra. Como todas las fuerzas, el peso es una cantidad vectorial. La dirección de este vector es la dirección de la fuerza de la gravedad, esto es, hacia el centro de la Tierra. La magnitud del peso se expresa en unidades de fuerza, tales como libras, kilogramos o newtons.

Supongamos por el momento que la superficie de la Tierra proporciona un marco inercial de referencia suficientemente bueno. Soltemos a un cuerpo de masa m cerca de la superficie de la Tierra y permitamos que caiga libremente bajo la influencia de la gravedad. Sólo una fuerza actuará sobre el cuerpo: su peso W. La aceleración del cuerpo es la aceleración de la caída libre, g. Aplicamos la segunda ley de Newton, $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, a este cuerpo en caída libre sustituyendo a $\mathbf{W}$ por $\mathbf{F}$ y a $\mathbf{g}$ por $\mathbf{a}$, lo cual nos da $\mathbf{W} = m\mathbf{g}$. Tanto $\mathbf{W}$ como $\mathbf{g}$ son vectores dirigidos hacia el centro de la Tierra. Podemos entonces escribir que

$$W = mg, \tag{4}$$

donde W y g son las magnitudes de los vectores de peso y de aceleración.

Por supuesto, no es necesario que un cuerpo esté cayendo para determinar su peso. Si un cuerpo está en reposo cerca de la superficie de la Tierra, entonces la segunda ley de Newton requiere que la fuerza neta sobre él sea cero. El peso $W = mg$ actúa sobre el cuerpo, y, por lo tanto, para que el cuerpo se mantenga en reposo debe de experimentar otra fuerza numéricamente igual a mg pero que actúe en una dirección opuesta al peso. En la figura 10, el resorte suministra esta fuerza; la fuerza ejercida por el resorte sobre el cuerpo debe ser numéricamente igual a mg. En la figura 8, la mesa ejerce una fuerza $\mathbf{F}_{BT}$ hacia arriba sobre el libro que lo mantenía en equilibrio; esta fuerza hacia arriba es de magnitud igual al peso mg.

Ya que $\mathbf{g}$ varía entre puntos distintos de la Tierra, $\mathbf{W}$, que es el peso de un cuerpo de masa m, es diferente en localidades distintas. Así, el peso de un cuerpo de 1.00 kg de masa, en una localidad donde g = 9.80 m/s^2, será 9.80 N; en una localidad donde g = 9.78 m/s^2, el mismo cuerpo pesará 9.78 N. Si estos pesos fuesen determinados midiendo la cantidad de estiramiento necesaria en un resorte para equilibrarlos, la diferencia de peso del mismo cuerpo de 1 kg en dos localidades distintas se haría evidente en la distinta longitud de estiramiento del resorte de esas dos localidades. Por lo tanto, al contrario de la masa de un cuerpo, que es una propiedad *intrínseca* del cuerpo, el peso de un cuerpo depende de su ubicación en relación al centro de la Tierra. Como discutiremos en la sección siguiente, las básculas de resorte pueden marcar cantidades diferentes, pero las balanzas señalan lo mismo en diferentes localidades de la Tierra.

Ya que la Tierra está girando, su superficie no puede ser un marco inercial de referencia. Todos los marcos de referencia sobre la superficie de la Tierra son acelerados centrípetamente por la rotación. La aceleración en caída libre que medimos en este marco no inercial tiene por lo menos dos componentes: una que proviene de la atracción gravitatoria de la Tierra y otra de su rotación. El pequeño efecto de esta rotación consiste en el cambio de la aceleración en caída libre en un 0.3% aproximadamente con respecto a su valor en el ecuador, donde la aceleración centrípeta es la mayor, a su valor en los polos, donde la aceleración centrípeta se anula. Despreciamos esta pequeña contribución no inercial al peso por ahora, pero volveremos sobre ello en el capítulo 16. En la sección 6-8 se discuten otras contribuciones no inerciales a la fuerza sobre un cuerpo.

El peso de un cuerpo es cero en regiones del espacio donde los efectos de la gravitación son nulos, aunque las propiedades de un cuerpo que dependen de su masa, tales como su resistencia a ser acelerado, permanecen sin cambio con respecto a las mismas en la Tierra. En un vehículo espacial, libre de la influencia de la gravedad, levantar lentamente un bloque grande de plomo ($W = 0$) es un asunto sencillo, pero el astronauta sentiría una sensación de dolor en los dedos del pie si pateara el bloque ($m \neq 0$).

Requiere la misma fuerza acelerar un cuerpo en el espacio libre de gravedad que acelerarlo a lo largo de una superficie horizontal carente de fricción en la Tierra, ya que su masa es la misma en cada lugar. Pero se requiere una fuerza mayor para mantener a un cuerpo levantado contra la atracción de la Tierra en su superficie que la requerida en el espacio, porque su peso es distinto en cada lugar.

En localidades donde g tenga un valor específico, la masa y el peso son proporcionales entre sí. A veces escribimos, por ejemplo, 1 kg "=" 2.2 lb, donde "=" significa que "es equivalente a". Ésta es una correspondencia numérica, no una ecuación real (¡porque las ecuaciones no puede igualar a cantidades con dimensiones diferentes!). Sería un poco como decir que 1 naranja "=" x manzanas, donde x pudiera tener un valor si estuviésemos discutiendo el costo y un valor muy diferente si estuviésemos discutiendo cuánto jugo producen.

La relación entre masa y peso es válida solamente para un valor específico de g, y, por lo tanto, debería de usarse con precaución. De otro modo, podríamos encontrarnos en una situación confusa o embarazosa. Por ejemplo, si usted algún día detuviera su nave espacial en un bien conocido restaurante de servicio rápido en la Luna y ordenara un hamburguesa de un cuarto de libra, le servirían un emparedado de casi 1 pie de diámetro. (La gravedad de la Luna es casi una sexta parte de la de la Tierra. En la Luna, 1 kg "=" 0.38 lb). Si usted coloca la misma orden sobre la superficie del Sol, su hamburguesa sería apenas de 1 pulgada de diámetro pero ¡muy cocida! (En el Sol, 1 Kg "=" 62 lb.) Obviamente, queremos ordenar nuestro alimento por cantidad de materia (masa), y no por peso. Una hamburguesa de 100 gramos (alrededor de $\frac{1}{4}$ de libra en la Tierra) debe tener el mismo tamaño en todos los lugares.

Ingravidez

Las fotografías de astronautas en un vehículo espacial en órbita (como en la Fig. 11) los muestran flotando libremente en un estado usualmente llamado "ingravidez". Sin embargo, según nuestra definición de peso, no están del todo carentes de peso; de hecho, su peso es sólo alrededor del 10% menos de lo que sería si estuviesen parados sobre la superficie de la Tierra. Esta reducción ocurre porque la gravedad de la Tierra se vuelve más débil con el aumento de altitud.

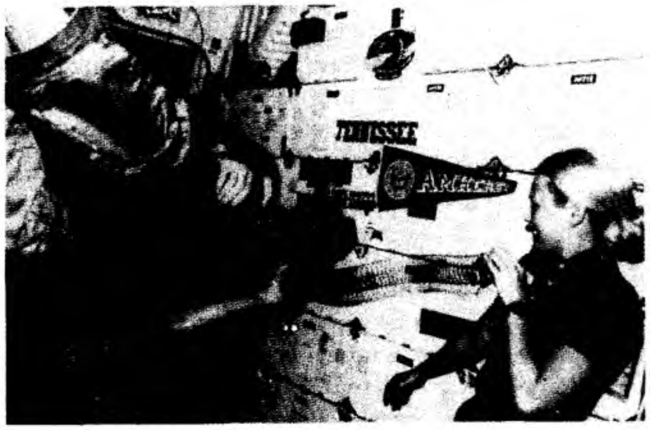


Figura 11 Los astronautas en el vehículo espacial están en un estado de caída libre, donde parecen flotar como si careciesen de peso.

Se dice que los astronautas en órbita están en estado de "ingravidez" por dos razones: (1) Para un observador externo, los astronautas están en caída libre hacia el centro de la Tierra. Mantienen su altitud sólo porque su velocidad tangencial ha sido elegida de modo que la gravedad provea la aceleración centrípeta necesaria para un movimiento circular uniforme. (2) No existe un suelo en contacto con ellos y que los empuje hacia arriba.

Nuestra percepción psicológica del peso implica la fuerza con la que el piso nos empuja. Al flotar en el agua, nosotros percibimos menos nuestro propio peso (pero percibimos plenamente nuestra *masa*, por ejemplo, cuando tratamos de acelerarar nadando en el agua). Si estamos de pie en un ascensor mientras acelera, sentimos como si nuestro peso aumentara cuando el ascensor acelera hacia arriba y como si nuestro peso disminuyera cuando el ascensor acelera hacia abajo. Este efecto, que consideramos en el Problema muestra 7, es el resultado del aumento o disminución de la fuerza hacia arriba ejercida sobre nosotros por el suelo del ascensor.

La verdadera ingravidez sólo puede obtenerse en el espacio profundo, lejos de cualquier estrella o planeta, donde los astronautas flotarían libremente en una nave espacial a la deriva con los motores apagados. Si la nave estuviera girando sobre su eje, los astronautas que estuviesen parados perpendicularmente al eje de la superficie en rotación sentirían una "gravedad artificial", porque el piso estaría empujándolos para suministrar la fuerza centrípeta necesaria para que se muevan en un círculo. El empuje del suelo hacia arriba se percibe como el peso.

Si nos echamos en clavado o saltamos rebotando desde un trampolín, descendemos en caída libre mientras estamos en el aire; no existe una superficie que nos empuje y sentimos la "ingravidez". De igual manera, si estamos en caída libre cerca de la Tierra dentro de una cámara que esté también en caída libre, tampoco existe una superficie que nos empuje y podríamos considerarnos como "carentes de peso". Flotaríamos libremente dentro de la cámara. Tres ejemplos de tal situación son (1) el vehículo espacial en órbita discutido anteriormente, (2) la cabina de un elevador que cae después de haberse roto el cable de suspensión, y (3) un aeroplano en vuelo a lo largo de una trayectoria parabólica elegida. Supongamos que el aeroplano asciende de modo que en determinado tiempo se mueve hacia arriba a velocidad v_0 en una dirección que forme un ángulo ϕ_0 sobre la horizontal. Si usted fuese un pasajero de ese aeroplano, y si en ese instante el aeroplano desapareciese súbitamente, usted seguiría la trayectoria parabólica de la caída libre dada por la ecuación 23 del capítulo 4. Si en lugar de ello, en ese mismo instante, el piloto dirige al aeroplano de modo que siga esa misma trayectoria, el aeroplano estará, en efecto, en caída libre y los objetos dentro de él flotarán libremente en un estado de "ingravidez". De hecho, este sistema se ha utilizado para entrenar a los astronautas a adaptarse a la "ingravidez" del vehículo espacial en órbita. En cada uno de estos tres casos, nuestro peso cambia sólo ligeramente con respecto al que tendría si estuviésemos parados sobre la superficie de la Tierra, pero la falta de un suelo que nos empuje nos lleva a tener la sensación de "no tener peso".

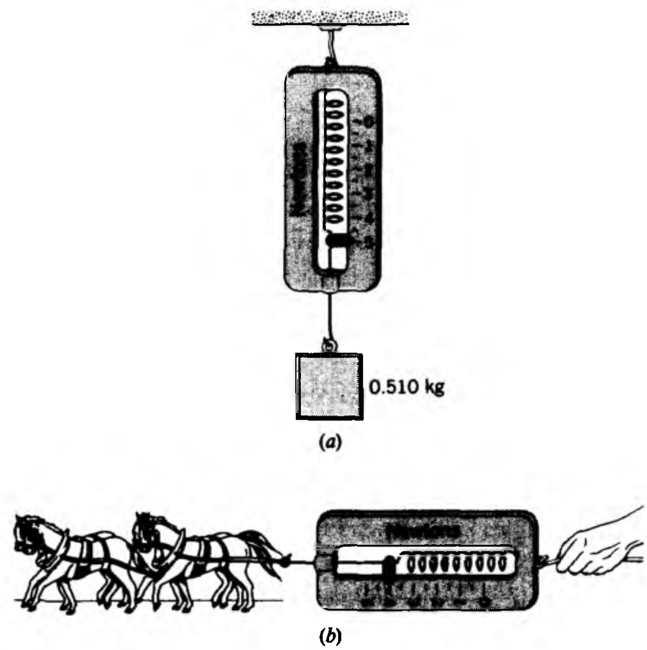


Figura 12 (*a*) Una báscula de resorte puede ser calibrada, en una región donde *g* sea conocida, colgando de ella una masa conocida y marcando la fuerza correspondiente al peso de la masa. En el caso que se muestra, una masa de 0.510 kg da F = 5.00 N cuando g = 9.8 m/s^2. (*b*) La escala calibrada puede entonces ser usada para medir una fuerza desconocida. Ésta es la base de operación de todas las básculas de resorte, tal como la medidora de peso en el correo, la báscula para pesar los productos en las tiendas de abarrotes, y la báscula del cuarto de baño.

5-9 MEDICIÓN DE FUERZAS

En la sección 5-3 hemos definido la fuerza por la medida de la aceleración impartida a un cuerpo estándar jalando de él con un resorte estirado. Podemos llamar a esto método dinámico para la medición de la fuerza. Aunque conveniente para la definición, no siempre resulta un método particularmente práctico para la medición de fuerzas. (La aceleración rara vez es fácil de medir.) Otro método para medir fuerzas se basa en la medición del cambio de forma o de tamaño de un cuerpo (digamos, un resorte) sobre el que se aplique la fuerza cuando el cuerpo no es acelerado. Éste es el método estático de medir fuerzas.

La base del método estático es que cuando un cuepo, bajo la acción de varias fuerzas, tiene una aceleración cero, la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo debe ser cero. Esto no es más que, por supuesto, la segunda ley del movimiento. Una sola fuerza que actúa sobre un cuerpo produciría una aceleración; ésta aceleración puede llegar a ser cero si aplicamos otra fuerza al cuerpo de igual magnitud pero de dirección contraria. En la práctica buscamos mantener al cuerpo en reposo. Si ahora elegimos alguna fuerza como nuestra fuerza unitaria, estaríamos en la posición de medir fuerzas. Por ejemplo, la atracción de la Tierra sobre un cuerpo estándar en un punto en particular puede ser tomado como la unidad de fuerza.

Un instrumento comúnmente empleado para medir fuerzas de esta manera es la báscula de resorte (Fig. 12). Consta de un resorte enrollado con una aguja en un extremo que se mueve sobre una escala de medidas. Una fuerza ejercida sobre la báscula cambia la longitud del resorte. Si un cuerpo que pesa 1.00 N (m = 0.102 kg, donde g = 9.80 m/s^2) se cuelga del resorte, éste se estira hasta que el jalón que ejerce sobre el cuerpo sea de igual magnitud pero de dirección opuesta a su peso. Puede hacerse una marca sobre la escala frente a la aguja y marcar "1.00-N de fuerza". Similarmente, pesos de 2.00-N, 3.00-N,... pueden suspenderse del resorte y hacer marcas correspondientes sobre la escala frente a la aguja en cada caso. De esta manera se calibra el resorte. Suponemos que la fuerza ejercida sobre el resorte es siempre la misma cuando la aguja se detiene en la misma posición. La

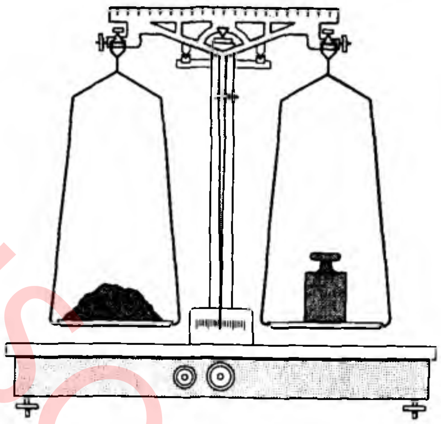


Figura 13 La balanza de brazos iguales, que compara los pesos de distintas masas.

báscula calibrada puede usarse ahora como en la figura 12*b* para medir una fuerza desconocida, y no únicamente para medir la fuerza de atracción que la Tierra ejerce.

La balanza de brazos iguales (Fig. 13) proporciona otro método estático para medir una fuerza. La aplicación más común implica comparar pesos conocidos con pesos desconocidos; cuando los brazos se nivelan, los pesos deben ser iguales. Más aún, a causa de que g es la misma para ambos brazos de la balanza, la igualdad de pesos implica la igualdad de masas. La balanza de brazos iguales determina entonces la igualdad relativa de las masas al pesarlas. (De hecho, las pesas conocidas que se suministran con tales balanzas están generalmente marcadas como masas en gramos.) Este sistema trabaja para cualquier valor de g excepto cero; la balanza trabajaría igualmente bien para comparar masas en la Luna, pero no trabajaría en absoluto en el espacio libre de gravedad o en la ingravidez relativa de las órbitas de la Tierra.

5-10 APLICACIONES DE LAS LEYES DE NEWTON

Si bien todo problema que debe resolverse por el uso de las leyes de Newton requiere un enfoque único, existen unas cuantas reglas generales que se aplican para determinar las soluciones a tales problemas. En esta sección presentamos las reglas e ilustramos su aplicación con varios ejemplos. La mejor manera de aprender las reglas es estudiar los ejemplos.

Los pasos básicos para aplicar las leyes de Newton son: (1) Identifique claramente el cuerpo que se va a analizar. A veces habrá dos o más de tales cuerpos; por lo general cada uno se trata independientemente. (2) Identifique el entorno en que serán ejercidas las fuerzas sobre el cuerpo (superficies, otros objetos, la Tierra, resortes, cuerdas, etc.) (3) Seleccione un marco inercial de referencia sin aceleración apropiado. (4) Elija un sistema de coordenadas (en el marco de referencia elegido) conveniente, localice el origen, y oriente los ejes para simplificar el problema tanto como sea posible. Con el cuidado apropiado, puede elegirse un sistema de coordenadas diferente para cada componente de un problema complejo. (5) Haga un diagrama del cuerpo libre, mostrando a cada objeto como una partícula y a todas las fuerzas que actúen sobre él. (6) Aplique ahora la segunda ley de Newton a cada componente de la fuerza y de la aceleración.

En los siguientes ejemplos, hacemos algunas hipótesis que simplifican el problema a costa de alguna realidad física. Los cuerpos son tratados como partículas, de modo que se considere que todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo lo hacen en un solo punto. Suponemos que todo movimiento carece de fricción. Suponemos también que todas las cuerdas carecen de masa (no se requiere una fuerza para acelerar las cuerdas) y son inextensibles (no se estiran, de modo que los objetos en movimiento lineal unidos por cuerdas tirantes tienen las mismas velocidades y aceleraciones). Las poleas carecen de masa (no se requiere fuerza para que giren) y sus bujes carecen de fricción. Todos los cuerpos son rígidos (no ocurren deformaciones bajo la carga, y las fuerzas a través de ellos se transmiten instantáneamente). A pesar de estas simplificaciones, los ejemplos nos introducen a las técnicas básicas del análisis dinámico. Más adelante en este texto, añadiremos nuevas técnicas que nos permitan ser más realistas en nuestro análisis de situaciones físicas. Por ejemplo, en el capítulo 6 mostramos cómo puede incluirse a la fricción en el análisis, y en el capítulo 12 mostramos cómo explicar la masa de una polea y la fricción de sus chumaceras. Por ahora, no tomaremos en cuenta estos por demás importantes efectos, de modo que podamos centrarnos en los métodos más básicos usados para resolver los problemas.

En el siguiente problema muestra, introducimos la *tensión T*, la fuerza con la cual una cuerda jala de los objetos unidos a ella. En cuerdas de espesor despreciable, la dirección de la tensión debe ser siempre paralela a la cuerda misma. (Esta afirmación no sirve para vigas gruesas y sólidas, como lo discutiremos en el capítulo 14.) En cuerdas de masa despreciable, la tensión se transmite uniformemente a lo largo de la cuerda y es la misma en cada extremo.

Microscópicamente, cada elemento de la cuerda jala del elemento inmediato a él (y es a su vez jalado *por* ese elemento, según la tercera ley de Newton). De esta manera la fuerza que jala de un extremo de la cuerda es transmitida al objeto situado al otro extremo. Cualquier elemento i en particular de la cuerda experimenta una tensión T que actuá en una dirección debida al elemento $i - 1$, y una tensión igual T que actúa en dirección opuesta debida al elemento $i + 1$. Si fuésemos a cortar la cuerda en cualquier

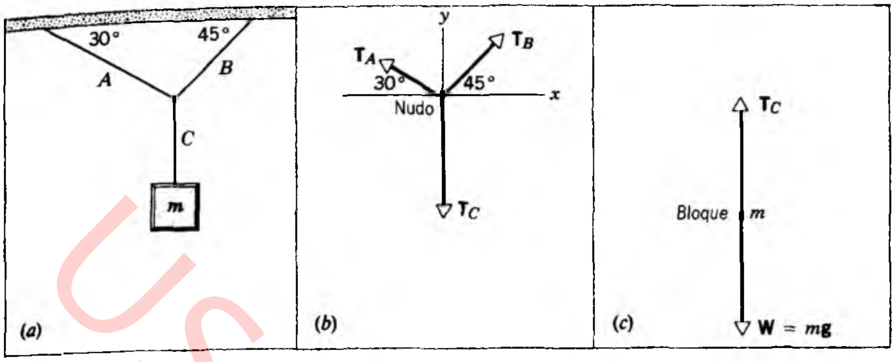


Figura 14 Problema muestra 4. (*a*) Un bloque cuelga de tres cuerdas *A*, *B*, y *C*. (*b*) El diagrama del cuerpo libre del nudo que une a las cuerdas. (*c*) El diagrama del cuerpo libre del bloque.

punto y unir una báscula de resorte (calibrada como lo describimos en la sección 5-9) a los extremos cortados, la báscula de resorte leería la tensión T directamente.

Problema muestra 4 La figura 14*a* muestra un bloque de masa m = 15.0 kg colgado de tres cuerdas. ¿Cuáles son las tensiones en las tres cuerdas?

Solución Consideremos que el nudo en el empalme de las tres cuerdas es "el cuerpo". La figura 14*b* muestra el diagrama del cuerpo libre del nudo, que permanece en reposo bajo la acción de las tres fuerzas T_A, T_B, y T_C, las cuales son las tensiones en las cuerdas. (Suponemos que, al igual que la cuerda, el nudo carece de masa, de modo que su peso no aparece en el diagrama). Eligiendo los ejes x y y como se muestra en la figura 14*b*, podemos resolver las fuerzas en sus componentes x y y. Las componentes de la aceleración son cero, de modo que podemos escribir:

$$\text{componente } x: \quad \sum F_x = T_{Ax} + T_{Bx} = ma_x = 0,$$

$$\text{componente } y: \quad \sum F_y = T_{Ay} + T_{By} + T_{Cy} = ma_y = 0.$$

En la figura 14*b* vemos que

$$T_{Ax} = -T_A \cos 30° = -0.866T_A,$$

$$T_{Ay} = T_A \operatorname{sen} 30° = 0.500T_A,$$

$$T_{Bx} = T_B \cos 45° = 0.707T_B,$$

$$T_{By} = T_B \operatorname{sen} 45° = 0.707T_B,$$

y

$$T_{Cx} = 0,$$

$$T_{Cy} = -T_C.$$

Para continuar, examinemos el diagrama del cuerpo libre de la masa m, que se muestra en la figura 14*c*. Sólo entran las componentes y, y una vez más la aceleración es cero:

$$T_{Cy} - mg = ma_y = 0.$$

A causa de que T_c tiene solamente una componente y, podemos escribir:

$$T_C = mg = (15.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) = 147 \text{ N}.$$

Podemos ahora reescribir las ecuaciones de las componentes x y y para las fuerzas que actúan en el nudo:

$$\text{componente } x: \quad -0.866T_A + 0.707T_B = 0,$$

$$\text{componente } y: \quad 0.500T_A + 0.707T_B - T_C = 0.$$

Sustituyendo el valor para T_C y resolviendo las dos ecuaciones simultáneamente, hallamos que

$$T_A = 108 \text{ N},$$

$$T_B = 132 \text{ N}.$$

Compruebe estos resultados (tal como debe hacerse en todos los problemas) para ver si la suma vectorial de las tres fuerzas es en realidad cero.

En el siguiente problema muestra, introducimos otra clase de fuerza, la *fuerza normal N* ejercida por una superficie sobre un cuerpo. Consideremos el libro que está sobre la mesa que se ilustra en la figura 8. La Tierra ejerce una fuerza hacia abajo sobre el libro (su peso), pero el libro está en equilibrio, de modo que la fuerza total sobre él deberá ser cero. La otra fuerza que actúa sobre el libro es la fuerza normal hacia arriba ejercida por la mesa (indicada como $\mathbf{F}_{BT}$ en la figura 8). En efecto, esta fuerza mantiene al libro sobre la superficie de la mesa. En ausencia de la fricción, las superficies pueden ejercer solamente fuerzas normales, esto es, solamente fuerzas perpendiculares a la superficie. (Nótese que el libro ejerce también una fuerza normal hacia abajo sobre la mesa.)

Si fuesemos a situar nuestra mano sobre el libro y empujáramos hacia abajo con una fuerza P, el libro permanecería en equilibrio, de modo que la fuerza normal de la mesa sobre el libro aumentaría de acuerdo a ello, siendo en este caso igual a la suma del peso del libro y de la fuerza P. Si P fuera suficientemente grande, excederíamos la capacidad de la mesa para proporcionar la fuerza normal hacia arriba, y el libro se rompería contra la cubierta de la mesa.

Las fuerzas de tensión y las fuerzas normales son ejemplos de *fuerzas de contacto*, en las que un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro en virtud del contacto entre ellos. Estas fuerzas se originan en los átomos del cuerpo, los cuales ejercen una fuerza sobre su otro átomo vecino. Las fuerzas de contacto pueden mantenerse solamente si no exceden a las fuerzas interatómicas; de otro modo se rompe la unión entre los átomos, y la cuerda o la superficie se rompe en pedazos.

Problema muestra 5 Un trineo de masa $m = 7.5$ kg es jalado a lo largo de una superficie horizontal sin fricción por medio de una cuerda (Fig. 15). Se aplica a la cuerda una fuerza constante de $P = 21.0$ N. Analice el movimiento si (*a*) la cuerda está horizontal y si (*b*) la cuerda forma un ángulo de $\theta = 15°$ con la horizontal.

Solución (*a*) En la figura 15b se muestra el diagrama del cuerpo libre con la cuerda horizontal. La superficie ejerce una fuerza N, la fuerza normal, sobre el trineo. Las fuerzas son analizadas en componentes y se emplea la segunda ley de Newton como sigue:

$$\text{componente } x: \quad \sum F_x = P = ma_x,$$

$$\text{componente } y: \quad \sum F_y = N - mg = ma_y.$$

Si no existe un movimiento vertical, el trineo permanecerá sobre la superficie y $a_y = 0$. Así,

$$N = mg = (7.5 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) = 74 \text{ N}.$$

La aceleración horizontal es

$$a_x = \frac{P}{m} = \frac{21.0 \text{ N}}{7.5 \text{ kg}} = 2.80 \text{ m/s}^2.$$

Nótese que, si la superficie carece realmente de fricción, como lo hemos supuesto, la persona no puede continuar ejerciendo esta fuerza sobre el trineo por mucho tiempo. Después de 30 s con esta aceleración, el trineo se estaría moviendo a razón de ¡84 m/s o a 188 mi/h!

(*b*) El diagrama de cuerpo libre cuando la fuerza del jalón no es horizontal se muestra en la figura 15*c*, y las ecuaciones de las componentes toman entonces las formas siguientes:

$$\text{componente } x: \quad \sum F_x = P\cos\theta = ma_x,$$

$$\text{componente } y: \quad \sum F_y = N + P \text{ sen } \theta - mg = ma_y.$$

Supongamos por el momento que el trineo descansa sobre la superficie; esto es, que $a_y = 0$. Entonces

$$N = mg - P \text{ sen } \theta = 74 \text{ N} - (21.0 \text{ N})(\text{sen } 15°) = 69 \text{ N},$$

$$a_x = \frac{P\cos\theta}{m} = \frac{(21.0 \text{ N})(\cos 15°)}{7.5 \text{ kg}} = 2.70 \text{ m/s}^2.$$

Una fuerza normal es siempre perpendicular a la superficie de contacto; con las coordenadas elegidas como en la figura 15*b*, N debe ser positiva. Si aumentamos P sen θ, N disminuirá y en algún punto sería cero. En ese punto el trineo abandonaría la superficie bajo la influencia de la componente hacia arriba de P, y necesitaríamos analizar su movimiento vertical. Con los valores de P y de θ que hemos usado, el trineo permanece sobre la superficie y $a_y = 0$.

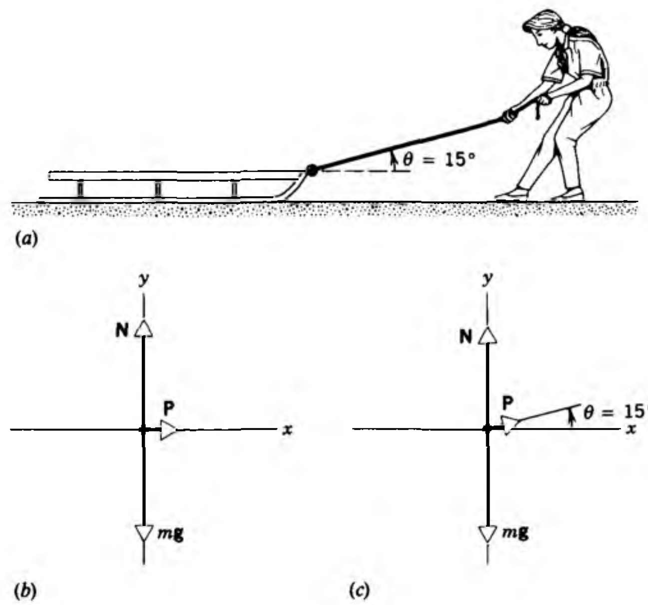


Figura 15 Problema muestra 5. (*a*) Un trineo es jalado a lo largo de una superficie horizontal carente de fricción. (*b*) El diagrama del cuerpo libre del trineo cuando $\theta = 0°$. (*c*) El diagrama del cuerpo libre del trineo cuando $\theta = 15°$.

Problema muestra 6 Un bloque de masa $m = 18.0$ kg es mantenido en su lugar por una cuerda sobre un plano carente de fricción inclinado a un ángulo de 27° (véase la Fig. 16*a*). (*a*) Halle la tensión en la cuerda y la fuerza normal ejercida sobre el bloque por el plano inclinado. (*b*) Analice el movimiento siguiente tras haberse cortado la cuerda.

Solución (*a*) En la figura 16*b* se muestra el diagrama del cuerpo libre del bloque. El bloque es actuado por la fuerza normal N, por su peso $W = mg$, y por la tensión T de la cuerda. Elegimos un sistema de coordenadas con el eje x a lo largo del plano inclinado y el eje y perpendicular al mismo. Con esta elección, dos de las fuerzas (T y N) están ya resueltas en sus componentes, y el movimiento que eventualmente ocurriría a lo largo del plano tiene igualmente una sola componente.

En el caso estático no existe aceleración y las fuerzas deben sumar cero. El peso es resuelto en su componente $x(-mg \text{ sen } \theta)$ y su componente $y(-mg\cos\theta)$, y las ecuaciones de las fuerzas son las siguientes:

$$\text{componente } x: \quad \sum F_x = T - mg \text{ sen } \theta = ma_x = 0,$$

$$\text{componente } y: \quad \sum F_y = N - mg\cos\theta = ma_y = 0.$$

Examine estas ecuaciones. ¿Son razonables? ¿Qué sucede en el límite $\theta = 0°$? Parece como si la tensión fuese cero. ¿Esperaría usted que la tensión fuese cero si el bloque estuviera descansando sobre una superficie horizontal? ¿Qué le sucede a la fuerza normal cuando $\theta = 0°$? ¿Es esto razonable? ¿Qué les sucedería a T y a N en el límite de $\theta = 90°$? Conviene que adquiera usted el hábito de hacerse preguntas como éstas antes de comenzar con el álgebra para hallar la solución. Si existe un error, ahora es el mejor momento para hallarlo y corregirlo.
Resolviendo las ecuaciones,

$$T = mg \text{ sen } \theta = (18.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(\text{sen } 27°) = 80 \text{ N},$$

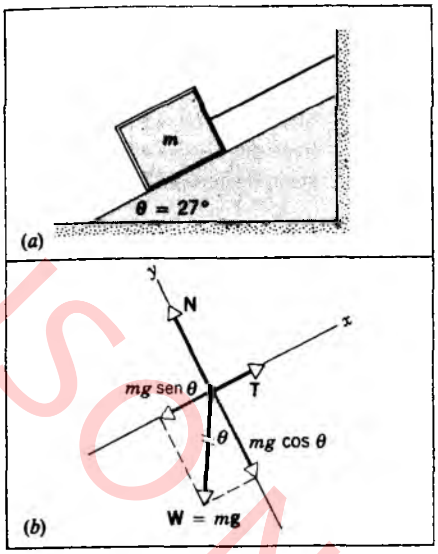


Figura 16 Problema muestra 6. (*a*) Una masa *m* se halla suspendida en reposo por una cuerda sobre un plano inclinado carente de fricción. (*b*) El diagrama del cuerpo libre de *m*. Nótese que el sistema de coordenadas *xy* está inclinado de modo que el eje *x* sea paralelo al plano. El peso *mg* ha sido resuelto en sus componentes vectoriales.

$$N = mg\cos\theta = (18.0\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)(\cos 27°) = 157\ \text{N}.$$

(*b*) Cuando se corta la cuerda, la tensión desaparece de las ecuaciones y el bloque deja de estar en equilibrio. La segunda ley de Newton nos da ahora lo siguiente:

componente x: $\quad \sum F_x = -mg\ \text{sen}\ \theta = ma_x,$

componente y: $\quad \sum F_y = N - mg\cos\theta = ma_y.$

El corte de la cuerda no cambia el movimiento en la dirección y (¡el bloque no salta del plano!), de manera que $a_y = 0$ como antes y la fuerza normal es todavía igual a $mg\cos\theta$, ó 157 N. En la dirección x

$$a_x = -g\ \text{sen}\ \theta = -(9.80\ \text{m/s}^2)(\text{sen}\ 27°) = -4.45\ \text{m/s}^2.$$

El signo menos demuestra que el bloque se acelera en dirección x negativa, esto es, hacia abajo del plano. Compruebe los límites $\theta = 0°$ y $\theta = 90°$. ¿Coinciden con nuestras expectativas?

Problema muestra 7 Un pasajero de 72.2 kg de masa está viajando en un elevador mientras permanece de pie sobre una báscula de plataforma (Fig. 17*a*). ¿Qué indica la báscula cuando la cabina del elevador (*a*) desciende a velocidad constante y (*b*) asciende con una aceleración de 3.20 m/s²?

Solución *Desarrollemos primero un resultado general válido* para cualquier aceleración vertical *a*. Elegimos que nuestro marco inercial de referencia esté fuera del elevador (el pozo o tiro del elevador, por ejemplo, que forma parte del edificio), porque un elevador en aceleración no es un marco inercial de referencia. Tanto *g* como *a* se miden por un observador situado en este marco externo. La figura 17*b* muestra el diagrama del cuerpo libre del pasajero. Existen la fuerza hacia abajo del peso

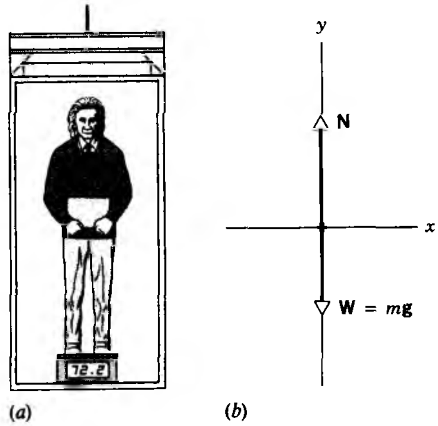


Figura 17 Problema muestra 7. (*a*) Un pasajero viaja en la cabina de un elevador parado sobre una báscula. (*b*) El diagrama de cuerpo libre del pasajero. La fuerza normal *N* es ejercida por la báscula y es de igual magnitud que la lectura de la báscula. (Las básculas comerciales, como la que aquí se muestra, están calibradas para su lectura en kilogramos, en lugar de en newtons.)

y la fuerza normal hacia arriba ejercida por la báscula. La fuerza normal es ejercida *por* la báscula *sobre* el pasajero; la báscula indica la fuerza hacia abajo ejercida *por* el pasajero *sobre* la báscula. Según la tercera ley de Newton, éstas son de igual magnitud. Entonces, si podemos hallar la fuerza normal, tendremos la lectura de la báscula.

Del diagrama del cuerpo libre tenemos que

$$\sum F_y = N - mg = ma$$

o sea

$$N = m(g + a).$$

Cuando $a = 0$, ya sea que el elevador esté en reposo o moviéndose a velocidad constante, como en la parte (*a*), entonces

$$N = mg = (72.2\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 708\ \text{N}\ (= 159\ \text{lb}).$$

Cuando $a = 3.20\ \text{m/s}^2$, como en la parte (*b*) tenemos que

$$N = m(g + a) = (72.2\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2 + 3.20\ \text{m/s}^2)$$
$$= 939\ \text{N}\ (= 211\ \text{lb}).$$

La lectura de la báscula, que indica la fuerza normal con la que el piso está empujando al pasajero, aumenta cuando el elevador está acelerando hacia arriba (*a* es positiva como lo hemos definido por el sistema de coordenadas) y disminuye cuando está acelerando hacia abajo. En caída libre ($a = -g$) la lectura de la báscula será cero (no existe una fuerza normal).

5-11 MÁS APLICACIONES DE LAS LEYES DE NEWTON

Aquí consideraremos algunas aplicaciones adicionales de las leyes de Newton. Estos ejemplos implican a varios

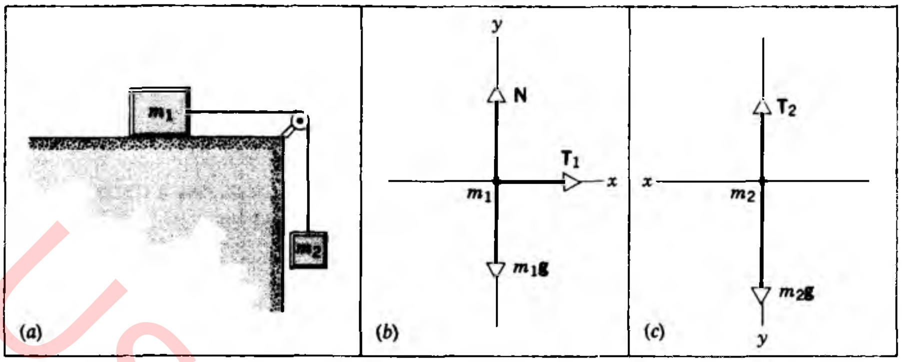


Figura 18 Problema muestra 8. (*a*) El bloque m_1 es jalado a lo largo de una superficie horizontal por una cuerda que pasa por una polea y está unida al bloque m_2. (*b*) El diagrama del cuerpo libre del bloque m_1. (*c*) El diagrama del cuerpo libre del bloque m_2.

objetos que deben ser analizados por separado pero no precisamente en forma independiente, a causa de que el movimiento de un objeto está restringido por el movimiento de otro, tal como cuando están unidos entre sí por medio de una cuerda de longitud fija. Estudie estos ejemplos, y note las elecciones independientes de los sistemas de coordenadas usados para los objetos por separado.

Problema muestra 8 La figura 18*a* muestra un bloque de masa m_1 sobre una superficie horizontal sin fricción. El bloque es jalado por una cuerda de masa despreciable que está unida a un bloque colgante de masa m_2. La cuerda pasa por una polea cuya masa es despreciable y cuyo eje gira con fricción despreciable. Halle la tensión en la cuerda y la aceleración de cada bloque.

Solución Este problema difiere de los considerados anteriormente en que están implicados dos objetos, en lugar de uno. Las figuras 18*b* y 18*c* muestran los diagramas del cuerpo libre de los objetos por separado. No es necesario elegir el mismo sistema de coordenadas para ambos objetos; en tanto seamos coherentes con cada subsistema, no importa cómo se definan los ejes individuales.

En el bloque 1 actúa una fuerza normal N, por gravedad, y por la tensión en la cuerda. Puesto que esperamos que el bloque 1 acelere hacia la derecha, lo elegimos para nuestra dirección x positiva. También esperamos que el bloque 1 permanezca sobre la superficie horizontal, de modo que la componente y de su aceleración sea cero. Las ecuaciones de las componentes según la segunda ley de Newton son, entonces, las siguientes:

$$\text{componente } x: \quad \sum F_x = T_1 = m_1 a_{1x},$$

$$\text{componente } y: \quad \sum F_y = N - m_1 g = m_1 a_{1y} = 0.$$

Para el bloque 2, elegimos que el eje y sea vertical hacia abajo, que es la dirección de la aceleración que esperamos. No es necesario considerar componentes x para el bloque 2, y la componente y nos dará, según la segunda ley de Newton,

$$\sum F_y = m_2 g - T_2 = m_2 a_{2y}.$$

Consideramos que la cuerda carece de masa, de modo que la fuerza neta sobre ella será cero. Las tensiones T_1 y T_2 ejercidas por la cuerda *sobre* los bloques resultan en iguales fuerzas de reacción T_1 y T_2 ejercidas *por* los bloques sobre la cuerda. Si la cuerda estuviera recta, el anulamiento de la fuerza neta sobre la cuerda requeriría que $T_1 = T_2$. La presencia de la polea ideal (sin masa y sin fricción) para cambiar la dirección de la tensión en la cuerda no cambia esta afirmación: la tensión tiene una magnitud común a lo largo de la longitud de la cuerda. Representaremos a la tensión común por la variable única T.

Si la cuerda es también inextensible (esto es, no se estira), entonces cualquier movimiento del bloque 1 en su dirección x es igualado exactamente por un movimiento correspondiente del bloque 2 en su dirección y. En este caso las aceleraciones de los dos bloques son iguales. Llamemos a a esta aceleración común. Tenemos ahora tres ecuaciones:

$$T = m_1 a,$$

$$N = m_1 g,$$

y

$$m_2 g - T = m_2 a.$$

Resolviendo la primera y la tercera simultáneamente nos da

$$a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} g \tag{5}$$

y

$$T = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} g. \tag{6}$$

Es útil considerar los casos límites de estos resultados. ¿Qué sucede cuando m_1 es cero? Esperaríamos que la cuerda se afloje ($T = 0$) y m caiga libremente ($a = g$). Las ecuaciones predicen correctamente estos límites. Cuando $m_2 = 0$, no existe una fuerza horizontal sobre el bloque 1 y no se acelera; de nueva cuenta, las ecuaciones dan la predicción correcta.

Nótese que $a < g$, como era de esperarse. También nótese que T no es igual a $m_2 g$. Sólo si el bloque 2 estuviera colgando en equilibrio ($a = 0$) sería $T = m_2 g$. Si el bloque 2 acelera hacia abajo, entonces $T < m_2 g$; si acelera hacia arriba, entonces $T > m_2 g$.

¿Se comportan las ecuaciones 5 y 6 apropiadamente en el límite $g = 0$?

Problema muestra 9 Consideremos dos masas distintas desiguales unidas por una cuerda que pasa por una polea ideal (cuya masa es despreciable y cuyos ejes giran con una fricción despreciable), como se muestra en la figura 19. (Este mecanis-

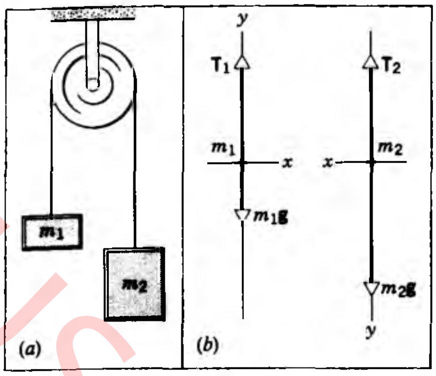


Figura 19 Problema muestra 9. (*a*) Diagrama de la máquina de Atwood, que consta de dos masas suspendidas unidas por una cuerda que pasa por una polea. (*b*) Diagramas del cuerpo libre de m_1 y m_2.

mo se conoce también como *máquina de Atwood*).* Sea m_2 mayor que m_1. Halle la tensión en la cuerda y la aceleración de las masas.

Solución A causa de que hemos previsto que las masas tengan sólo aceleraciones verticales, elegimos que la dirección y positiva sea la dirección del movimiento de cada masa. Sólo se necesita considerar a las componentes y. En la figura 19*b* se muestran los diagramas del cuerpo libre, y las ecuaciones del movimiento serían las siguientes:

$$\text{bloque 1:} \qquad \sum F_y = T_1 - m_1 g = m_1 a_1,$$

$$\text{bloque 2:} \qquad \sum F_y = m_2 g - T_2 = m_2 a_2,$$

donde a_1 y a_2 son las aceleraciones de m_1 y m_2, respectivamente. Como en el ejemplo anterior, si la cuerda carece de masa y no se estira, y si la polea carece de masa y de fricción, entonces $T_1 = T_2 = T$ y $a_1 = a_2 = a$. (Suponemos que esta polea ideal no cambia la magnitud de la tensión o de la aceleración de un lado de la cuerda al otro; su única función es cambiar sus direcciones.) Sustituyendo y resolviendo las dos ecuaciones simultáneamente, hallamos que

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} g, \qquad (7)$$

$$T = \frac{2 m_1 m_2}{m_1 + m_2} g. \qquad (8)$$

Consideremos qué sucede en los casos límite $m_1 = 0$, $m_2 = 0$, $g = 0$, y $m_1 = m_2$. Nótese que $m_1 g < T < m_2 g$, y asegúrese de que ha entendido por qué esto debe de ser así.

* George Atwood (1745-1807) fue un matemático inglés que desarrolló este dispositivo en 1784 para demostrar las leyes del movimiento acelerado y medir g. Haciendo a la diferencia entre m_1 y m_2 pequeña, le fue posible "retardar" el efecto de la caída libre y medir el movimiento del peso en caída con un reloj de péndulo, la manera más precisa de medir intervalos de tiempo en aquella época.

Problema muestra 10 Consideremos el sistema mecánico mostrado en la figura 20*a*, donde m_1 = 9.5 kg, m_2 = 2.6 kg, y θ = 34°. El sistema ha salido del reposo. Describa el movimiento.

Solución En las figuras 20*b* y 20*c* se muestran los diagramas del cuerpo libre para los bloques 1 y 2. Elegimos los sistemas de coordenadas como se muestra, de modo que un sistema de coordenadas sea paralelo a la aceleración prevista para cada cuerpo. Como en los ejemplos anteriores, esperamos que la tensión tenga un valor común y que el movimiento vertical de m_2 y el movimiento a lo largo del plano de m_1 pueda ser descrito por aceleraciones de la misma magnitud. Supongamos que m_1 se mueve en la dirección x positiva (si nuestra hipótesis es errónea, a resultará negativa). Para m_1, las ecuaciones de las componentes, según la segunda ley de Newton, son las siguientes:

$$\text{componente } x\text{:} \qquad \sum F_x = T - m_1 g \operatorname{sen} \theta = m_1 a,$$

$$\text{componente } y\text{:} \qquad \sum F_y = N - m_1 g \cos \theta = 0,$$

y para m_2,

$$\sum F_y = m_2 g - T = m_2 a.$$

Resolviendo simultáneamente tenemos que

$$a = \frac{m_2 - m_1 \operatorname{sen} \theta}{m_1 + m_2} g \qquad (9)$$

y

$$T = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} g (1 + \operatorname{sen} \theta). \qquad (10)$$

Nótese que estos resultados duplican las ecuaciones 5 y 6 del problema muestra 8 si ponemos que $\theta = 0$ (de modo que el

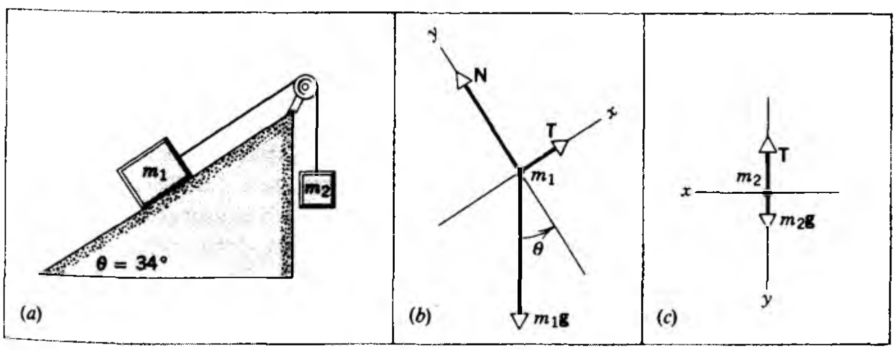


Figura 20 Problema muestra 10. (*a*) El bloque m_1 se desliza sobre un plano inclinado sin fricción. El bloque m_2 cuelga de una cuerda unida a m_1. (*b*) Diagrama del cuerpo libre de m_1. (*c*) Diagrama del cuerpo libre de m_2.

bloque 1 se mueva horizontalmente) y las Ecs. 7 y 8 del problema muestra 9 si hacemos que $\theta = 90°$ (de modo que el bloque 1 se mueva verticalmente).

Poniéndolo en números, tenemos que

$$a = \frac{2.6 \text{ kg} - (9.5 \text{ kg})(\text{sen } 34°)}{9.5 \text{ kg} + 2.6 \text{ kg}} (9.80 \text{ m/s}^2) = -2.2 \text{ m/s}^2.$$

La aceleración resulta ser negativa, lo que significa que nuestra estimación inicial con respecto a la dirección del movimiento era errónea. El bloque 1 se desliza hacia abajo por el plano, y el bloque 2 se mueve hacia arriba. A causa de que en las ecuaciones dinámicas no intervienen fuerzas que dependan de la dirección del movimiento, esta estimación inicial incorrecta no tiene efecto sobre las ecuaciones y podemos aceptar el valor final como correcto. En general, éste no será el caso si consideramos fuerzas de fricción que actúen en oposición a la dirección del movimiento.

Para la tensión en la cuerda, hallamos que

$$T = \frac{(9.5 \text{ kg})(2.6 \text{ kg})}{9.5 \text{ kg} + 2.6 \text{ kg}} (9.80 \text{ m/s}^2)(1 + \text{sen } 34°) = 31 \text{ N}.$$

Este valor es mayor que el peso de m_2(m_2g = 26 N), lo cual es compatible con la aceleración de m_2, que es hacia arriba.

PREGUNTAS

1. ¿Por qué caemos hacia adelante cuando un autobús en movimiento desacelera hasta detenerse y sentimos un impulso hacia atrás cuando acelera desde el reposo? Las personas que viajan de pie en el metro hallan a menudo conveniente situarse de frente al costado del carro cuando el tren arranca o se detiene y viendo hacia el frente o la parte trasera cuando el tren está corriendo a velocidad constante. ¿Por qué?
2. Un bloque de masa m está suspendido del techo por un cordón C, y un cordón similar D está atado a la base del bloque (Fig. 21). Explique lo siguiente: Si le damos un tirón súbito a D, se romperá, pero si jalamos uniformemente de D, C se romperá.

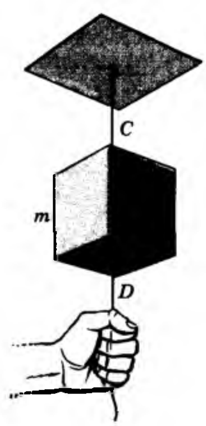


Figura 21 Pregunta 2.

3. Rebata la afirmación, hecha a menudo, de que la masa de un cuerpo es una medida de la "cantidad de materia" que contiene.
4. Usando fuerza, longitud, y tiempo como cantidades fundamentales, ¿cuáles son las dimensiones de masa?
5. ¿Puede ser considerada la primera ley de Newton simplemente como el caso especial $\mathbf{a} = 0$ de la segunda ley? De ser así, ¿es realmente necesaria la primera ley? Discuta esto.
6. ¿Qué relación existe, si la hay, entre la fuerza que actúa sobre un objeto y la dirección en la que se mueve el objeto?
7. Suponga que un cuerpo sobre el que actúen exactamente dos fuerzas se acelera. ¿Se deduce entonces que (*a*) el cuerpo no podrá moverse a velocidad constante; (*b*) la velocidad nunca podrá ser cero; (*c*) la suma de las dos fuerzas no puede ser cero; (*d*) las dos fuerzas deben actuar en la misma línea?
8. En la figura 22 mostramos cuatro fuerzas que son de igual magnitud. ¿Qué combinación de tres de ellas, actuando juntas sobre la misma partícula, podría mantener a esa partícula en equilibrio?

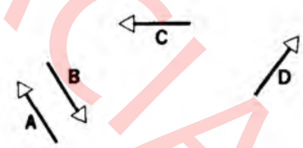


Figura 22 Pregunta 8.

9. Un caballo es obligado a jalar una carreta. El caballo se niega a ello, apelando a la tercera ley de Newton como defensa: el jalón del caballo sobre la carreta es igual pero opuesto al jalón de la carreta sobre el caballo. Se pregunta el caballo: "Si yo no puedo nunca ejercer una fuerza mayor sobre la carreta de la que ésta ejerce sobre mí, ¿cómo puedo hacer que la carreta se mueva"? ¿Qué le contestaría usted?
10. Comente si los siguientes pares de fuerzas son ejemplos de acción-reacción: (*a*) La Tierra atrae a un ladrillo; el

ladrillo atrae a la Tierra. (*b*) Un aeroplano a hélice empuja el aire hacia la cola; el aire empuja al aeroplano hacia adelante. (*c*) Un caballo jala de una carreta, moviéndola; la carreta jala contra el caballo. (*d*) Un caballo jala de una carreta sin moverla; la carreta jala contra el caballo. (*e*) Un caballo jala de una carreta sin moverla; la Tierra ejerce una fuerza igual y opuesta sobre la carreta. (*f*) La Tierra jala a la carreta hacia abajo; el suelo empuja a la carreta hacia arriba con una fuerza igual y opuesta.

11. La siguiente aseveración es verdadera: explíquela. Dos equipos están contendiendo jalando de una cuerda; el equipo que empuje más duro (horizontalmente) contra el suelo gana.

12. Dos estudiantes tratan de romper una cuerda. Primero jalan uno contra el otro y fallan. Luego atan un extremo a una pared y jalan juntos. ¿Es éste procedimiento mejor que el primero? Explique su respuesta.

13. ¿Cuál es su masa en "slugs"? ¿Y su peso en newtons?

14. Un francés, al llenar un formulario, escribe "78 kg" en el espacio marcado Poids (peso). Sin embargo, el peso es una fuerza y el kilogramo es una unidad de masa. ¿Qué tienen los franceses (entre otros) en cuenta cuando usan unidades de masa para describir su peso? ¿Por qué no da su peso en newtons? ¿Cuántos newtons pesa el francés? ¿Y cuántas libras?

15. Comente las aseveraciones siguientes con respecto a masa y peso hechas en hojas de examen. (*a*) La masa y el peso son las mismas cantidades físicas expresadas en unidades diferentes. (*b*) La masa es una propiedad de un objeto aislado, mientras que el peso resulta de la interacción de dos objetos. (*c*) El peso de un objeto es proporcional a su masa. (*d*) La masa de un cuerpo varía con los cambios en su peso local.

16. Una fuerza horizontal actúa sobre un cuerpo que puede moverse libremente. ¿Puede producir una aceleración si la fuerza es menor que el peso de ese cuerpo?

17. ¿Por qué la aceleración de un objeto que cae libremente no depende del peso del objeto?

18. Describa varias maneras en las que usted podría, aun brevemente, experimentar una carencia de peso.

19. ¿En qué circunstancias sería cero su peso? ¿Depende su respuesta de la elección de un sistema de referencia?

20. El "brazo mecánico" de un vehículo espacial puede manejar un satélite de 2200 kg cuando se le extiende a 12 m (véase la Fig. 23). Sin embargo, en la Tierra, este sistema manipulador remoto (RMS) no puede soportar su propio peso. En la "ingravidez" de un vehículo espacial en órbita, ¿por qué ese sistema manipulador remoto tiene que poder ejercer una fuerza?

21. El manual del propietario de un automóvil sugiere que el cinturón de seguridad se ajuste perfectamente y que la almohadilla del asiento frontal *no sea* acomodada sobre la nuca sino de modo tal que "la parte superior de la almohadilla esté a nivel con la parte superior de las orejas". ¿Cómo apoyan las leyes de Newton a estas buenas recomendaciones?

22. Usted dispara una flecha al aire y la sigue con la vista a lo largo de una trayectoria parabólica hasta el suelo. Se da cuenta de que la flecha viaja de modo que siempre es tangente a su trayectoria. ¿Qué es lo que lo causa?

Figura 23 Preguntas 20 y 26.

23. En una contienda para jalar de una cuerda tres hombres jalan de ella a la izquierda *A* y otros tres jalan a la derecha *B* con fuerzas de igual magnitud. Ahora se cuelga una pesa de 5 lb verticalmente en el centro de la cuerda. (*a*) ¿Pueden los hombres hacer que *AB* sea una horizontal? (*b*) De no ser así, explíque. Si pueden hacerlo, determine la magnitud de las fuerzas requeridas en *A* y en *B* para ello.

24. Un pájaro se posa sobre un alambre de telégrafo estirado. ¿Cambia por ello la tensión del alambre? De ser así, ¿en qué cantidad menor, igual, o mayor que el peso del pájaro?

25. Un cable sin masa pasa por una polea carente de fricción. Un chango se cuelga de un lado del cable y en el otro lado del cable hay un espejo colgado, que tiene el mismo peso que el chango y está situado a su mismo nivel. Puede el chango huir de su imagen en el espejo (*a*) trepando por el cable, (*b*) bajando por el cable, o (*c*) soltando el cable?

26. En noviembre de 1984 los astronautas Joe Allen y Dale Gardner recuperaron un satélite de comunicaciones Westar-6 de una órbita defectuosa y lo situaron dentro de la cabina de carga del vehículo espacial *Discovery* (véase la Fig. 23). Al describir la experiencia, Joe Allen dijo del satélite, "no es pesado; es masivo". ¿Qué quiso decir?

27. Usted es un astronauta que está en el salón de descanso de una estación espacial en órbita y quita la tapa de un tarro largo y delgado que contiene una sola aceituna. Describa diversas maneras (todas aprovechando la inercia ya sea de la aceituna o del tarro) para sacar la aceituna del tarro.

28. En la figura 24, una aguja ha sido colocada en cada extremo de un palo de escoba (descansando), las puntas de las agujas se apoyan en los bordes de unas copas llenas de vino. La persona golpea el palo de escoba con una barra mediante un golpe rápido y vigoroso. El palo de escoba se rompe y cae al suelo, pero las copas de vino permanecen en su lugar y no se derrama ni una gota de vino. Esta impresionante habilidad fue popular a finales del siglo pasado. ¿Qué razones físicas están detrás de élla? (Si usted trata de hacerlo, practique primero con latas de refresco vacías. Pensándolo bien, usted podría pedir a su profesor de física que haga el experimento, ¡a modo de demostración para la clase!)

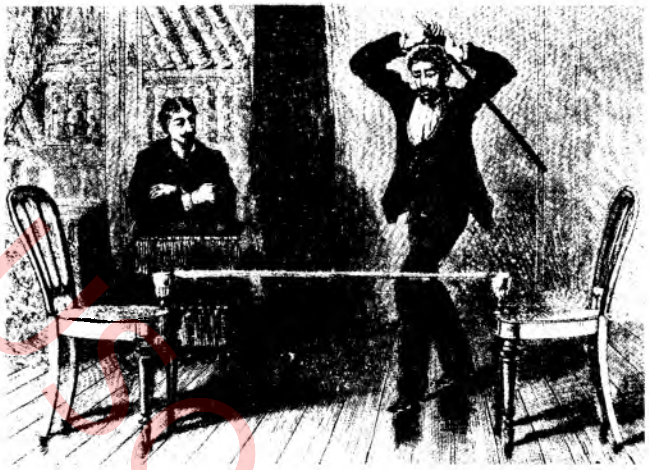


Figura 24 Pregunta 28.

Figura 25 Preguntas 36 y 37.

29. Un elevador está suspendido de un solo cable. No existe un contrapeso. El elevador recibe pasajeros en la planta baja y los lleva hasta el último piso, donde ellos se bajan. Otro grupo de pasajeros entra y son transportados hasta la planta baja. Durante este viaje redondo, ¿cuándo es la tensión del cable igual al peso del elevador más los pasajeros? ¿Cuándo es mayor? ¿Y cuándo menor?

30. Usted está en la plataforma de mando del taxi espacial *Discovery* en órbita y alguien le pasa dos bolas de madera, aparentemente idénticas. Una, sin embargo, tiene un núcleo de plomo y la otra no. Describa varias maneras de distinguirlas.

31. Usted está parado en la plataforma de una báscula grande de resorte y observa su peso. Después avanza un paso sobre la plataforma y observa que en la báscula señala menos de su peso al principio del paso y más de su peso al final del paso. Explique.

32. ¿Podría usted pesarse a sí mismo en un báscula cuya lectura máxima sea menor al peso de usted? Si puede hacerlo, ¿cómo?

33. Una pesa está colgada del techo de un elevador por un cordón. Partiendo de las siguientes condiciones, elija aquella en la cual la tensión del cordón sea mayor . . . o menor: (*a*) el elevador está en reposo; (*b*) el elevador sube a velocidad uniforme; (*c*) el elevador desciende a velocidad decreciente; (*d*) el elevador desciende a velocidad creciente.

34. Una mujer está de pie sobre una báscula de resortes en un elevador. ¿En cuál de los siguientes casos registraría la báscula una lectura mínima . . . o una lectura máxima?: (*a*) el elevador está quieto; (*b*) el cable del elevador se rompe; (*c*) el elevador acelera hacia arriba; (*d*) el elevador acelera hacia abajo; (e) el elevador se mueve a velocidad constante.

35. ¿A qué conclusión podría llegar un físico si dentro de un elevador permanecen en equilibrio dos masas distintas desiguales que cuelgan de una polea, esto es, no existe una tendencia de la polea a girar?

36. La figura 25 muestra al cometa Kohoutek tal como se le vio en 1973. Como todos los cometas, se mueve alrededor del Sol bajo la influencia de la fuerza de gravitación que el Sol ejerce sobre él. El núcleo del cometa es un núcleo relativamente masivo en una posición indicada por *P*. La cauda de un cometa se produce por la acción del viento solar, que consta de partículas cargadas que se extienden alejándose del Sol. Por inspección, ¿qué podría usted decir, si existe algo que lo aumente, con respecto a la dirección de la fuerza que actúa sobre el núcleo del cometa? ¿Qué nos diría acerca de la dirección en la que el núcleo es acelerado? ¿Qué acerca de la dirección en la que se está moviendo el cometa?

37. En general (véase la Fig. 25), los cometas tienen una cauda de polvo, que consiste en partículas de polvo impulsadas lejos del Sol por la presión de la luz del astro rey. ¿Por qué esta cauda tiene a menudo una forma curvada?

38. ¿Puede usted pensar en un fenómeno físico que involucre a la Tierra en el cual nuestro planeta no pueda ser tratado como una partícula?

PROBLEMAS

Sección 5-5 Segunda ley de Newton

1. Supongamos que la fuerza de gravedad del Sol cesara súbitamente, de modo que la Tierra resultara ser un objeto libre en lugar de estar confinada a la órbita del Sol. ¿Cuánto tiempo le tomaría a la Tierra llegar a una distancia del Sol igual al radio orbital actual de Plutón? (*Sugerencia*: En el apéndice C el lector encontrará datos necesarios.)

2. Un bloque de 5.5 kg está inicialmente en reposo sobre una superficie horizontal sin fricción. Es jalado con una fuerza horizontal constante de 3.8 N. (*a*) ¿Cuál es su aceleración? (*b*) ¿Cuánto tiempo debe ser jalado antes de que su velocidad sea de 5.2 m/s? (*c*) ¿Cuánto se aleja en este tiempo?

3. Un electrón viaja en línea recta desde el cátodo de un tubo de vacío hasta su ánodo, que está a 1.5 cm de distancia. Comienza con velocidad cero y llega al ánodo con una velocidad de 5.8×10^6 m/s. (*a*) Suponga constante a la aceleración y calcule la fuerza sobre el electrón. La masa del electrón es de 9.11×10^{-31} kg. Esta fuerza es de origen eléctrico. (*b*) Calcule la fuerza de gravitación sobre el electrón.

4. Un neutrón viaja a una velocidad de 1.4×10^7 m/s. Las fuerzas nucleares son de un alcance muy corto, siendo esencialmente cero afuera del núcleo pero muy fuertes adentro. Si el neutrón es capturado y traído al reposo por un núcleo cuyo diámetro es de 1.0×10^{-14} m, ¿cuál es la magnitud mínima de la fuerza, que se presume es constante, que actúa sobre este neutrón? La masa del neutrón es de 1.67×10^{-27} kg.

5. En un juego de "jalar de la cuerda" modificado, dos personas jalan en direcciones opuestas, no de la cuerda, sino de un trineo de 25 kg que descansa sobre una calle cubierta de hielo. Si los participantes ejercen fuerzas de 90 N y 92 N, ¿Cuál es la aceleración del trineo?

6. El haz de luz de láser en un satélite golpea un objeto lanzado desde un proyectil balístico disparado accidentalmente (véase la Fig. 26). El haz ejerce una fuerza de 2.7×10^{-5} N sobre el objetivo. Si el "tiempo de permanencia" del rayo sobre el objetivo es de 2.4 s, ¿en cuánto se desplazará el objeto si éste es (*a*) una cabeza explosiva de 280 kg y (*b*) un señuelo de 2.1 kg? (Estos desplazamientos pueden medirse observando el rayo reflejado.)

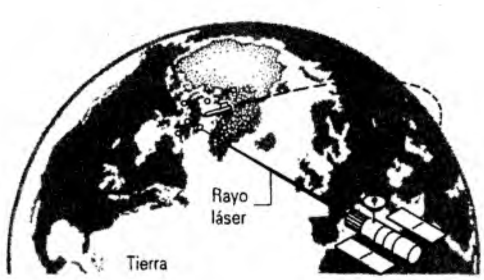


Figura 26 Problema 6.

7. Un automóvil que viaja a razón de 53 km/h choca contra el pilar de un puente. Un pasajero que viaja en el automóvil se mueve hacia adelante una distancia de 65 cm (con respecto a la carretera) mientras es llevado al reposo por un cojín de aire inflado. ¿Qué fuerza (supuesta como constante) actúa sobre la parte superior del torso del pasajero, quien tiene una masa de 39 kg?

8. Un electrón es proyectado horizontalmente a una velocidad de 1.2×10^7 m/s dentro de un campo eléctrico que ejerce una fuerza vertical constante de 4.5×10^{-16} N sobre él. La masa del electrón es de 9.11×10^{-31} kg. Determine la distancia vertical en la que el electrón es desviado durante el tiempo en que se ha movido hacia el frente 33 mm horizontalmente.

9. El yate solar *Diana*, diseñado para navegar en el sistema solar usando la presión de la luz del Sol, tiene una vela con un área de 3.1 km^2 y una masa de 930 kg. Cerca de la órbita de la Tierra, el Sol puede ejercer una fuerza de radiación de 29 N sobre la vela. (*a*) ¿Cuál es la aceleración que tal fuerza impartiría al vehículo? (*b*) Una aceleración pequeña puede producir efectos grandes si actúa continuamente durante un periodo de tiempo suficientemente grande. Partiendo del reposo, ¿qué tan lejos se habría movido el vehículo después de 1 día en estas condiciones? (*c*) ¿Cuál sería entonces su velocidad? (Véase "The Wind from the Sun", un fascinante relato de ciencia-ficción por Arthur C. Clarke, sobre una carrera de yates solares.)

10. Un cuerpo de masa m recibe la acción de dos fuerzas $\mathbf{F}_1$ y $\mathbf{F}_2$ como se muestra en la figura 27. Si m = 5.2 kg, F_1 = 3.7 N, y F_2 = 4.3 N, halle el vector de aceleración del cuerpo.

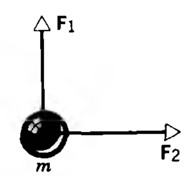


Figura 27 Problema 10.

11. Un objeto de 8.5 kg pasa a través del origen con una velocidad de 42 m/s paralelo al eje x. Experimenta una fuerza constante de 19 N en dirección del eje y positivo. Calcule (*a*) la velocidad y (*b*) la posición de la particula después de haber transcurrido 15 s.

12. Una cierta fuerza da al objeto m_1 una aceleración de 12.0 m/s^2. La misma fuerza da al objeto m_2 una aceleración de 3.30 m/s^2. ¿Qué aceleración daría la fuerza a un objeto cuya masa sea (*a*) la diferencia entre m_1 y m_2, y (*b*) la suma de m_1 y m_2?

13. (*a*) Despreciando las fuerzas de gravitación, ¿qué fuerza se requeriría para acelerar a una nave espacial de 1200 tons métricas desde el reposo hasta 1/10 de la velocidad de la luz en 3 días? ¿Y en 2 meses? (Una tonelada métrica = 1000 kg.) (*b*) Suponiendo que los motores se apaguen al alcanzar esa velocidad, ¿cuál sería el tiempo requerido para completar un viaje de 5 meses-luz para cada uno de estos casos? (Use 1 mes = 30 días.)

Sección 5-6 Tercera ley de Newton

14. Dos bloques, con masas m_1 = 4.6 kg y m_2 = 3.8 kg, están unidos por un resorte ligero sobre una mesa horizontal sin fricción. En cierto instante, cuando m_2 tiene una aceleración a_2 = 2.6 m/s^2. (*a*) ¿Cuál es la fuerza sobre m_2 y (*b*) ¿cuál es la aceleración de m_1?

15. Una niña de 40 kg y un trineo de 8.4 kg están sobre la superficie de un lago congelado, separados uno del otro por una distancia de 15 m. Por medio de una cuerda, la niña ejerce una fuerza de 5.2 N sobre el trineo, jalándolo hacia ella. (*a*) ¿Cuál es la aceleración del trineo? (*b*) ¿Cuál es la aceleración de la niña? (*c*) ¿A qué distancia de la posición inicial de la niña se encontrarán, suponiendo que la fuerza permanezca constante? Suponga que no actúan fuerzas de fricción.

Sección 5-8 Peso y masa

16. ¿Cuál será el peso en newton y la masa en kilogramos de (*a*) un saquito de azúcar de 5.00 lb, (*b*) un jugador de fútbol de 240 lb, y (*c*) un automóvil de 1.8 tons? (1 ton = 2000 lb).

17. ¿Cuáles son la masa y el peso de (*a*) un vehículo para nieve de 1420 lb, y (*b*) una bomba de calor de 412 kg?

18. Un viajero del espacio cuya masa es de 75.0 kg abandona la Tierra. Calcule su peso (*a*) en la Tierra, (*b*) en Marte, donde $g = 3.72\ m/s^2$, y (*c*) en el espacio interplanetario. (*d*) ¿Cuál es su masa en cada uno de estos lugares?

19. Una cierta partícula tiene un peso de 26.0 N en un punto en donde la aceleración debida a la gravedad es de $9.80\ m/s^2$. (*a*) ¿Cuáles son el peso y la masa de la partícula en un punto en que la aceleración debida a la gravedad es de $4.60\ m/s^2$? (*b*) ¿Cuáles son el peso y la masa de la partícula si se mueve hacia un punto en el espacio donde la fuerza de la gravitación es de cero?

20. Un aeroplano de 12,000 kg está volando a nivel con una velocidad de 870 km/h. ¿Cuál es la fuerza de sustentación dirigida hacia arriba que ejerce el aire sobre el aeroplano?

21. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un automóvil de 3900 lb que acelera a razón de $13\ ft/s^2$?

22. Un trineo-cohete experimental de 523 kg puede ser acelerado desde el reposo hasta 1620 km/h en 1.82 s. ¿Cuál es la fuerza neta requerida?

23. Un avión de propulsión a chorro parte desde el reposo cuando está sobre la pista y acelera para el despegue a razón de $2.30\ m/s^2$ ($= 7.55\ ft/s^2$). Tiene dos motores, cada uno de los cuales ejerce un empuje de $1.40 \times 10\ N^5$ (= 15.7 tons). ¿Cuál es el peso del avión?

Sección 5-10 Aplicaciones de las leyes de Newton

24. (*a*) Dos pesas de 10 lb están unidas a una báscula de resorte como se muestra en la figura 28*a*. ¿Cuánto señala la báscula? (*b*) Una sola pesa de 10 lb está unida a una báscula de resorte la que a su vez está unida a una pared, como se muestra en la figura 28*b*. ¿Cuánto señala la báscula? (Desprecie el peso de la báscula.)

25. Una esfera cargada de 2.8×10^{-4} kg de masa está suspendida de una cuerda. Una fuerza eléctrica actúa horizontalmente sobre la esfera de modo que la cuerda forme un ángulo de 33° con la vertical cuando está en reposo. Halle (*a*) la magnitud de la fuerza eléctrica, y (*b*) la tensión en la cuerda.

26. Un automóvil que se mueve inicialmente a una velocidad de 50 mi/h (~ 80 km/h) y que pesa 3000 lb (~ 13,000 N) es detenido a una distancia de 200 ft (~ 61 m). Halle (*a*) la fuerza de frenado y (*b*) el tiempo requerido para que se detenga. Suponiendo la misma fuerza de frenado, halle (*c*) la distancia y (*d*) el tiempo requerido para que se detenga si el automóvil estuviera viajando a razón de 25 mi/h (~ 40 km/h) inicialmente.

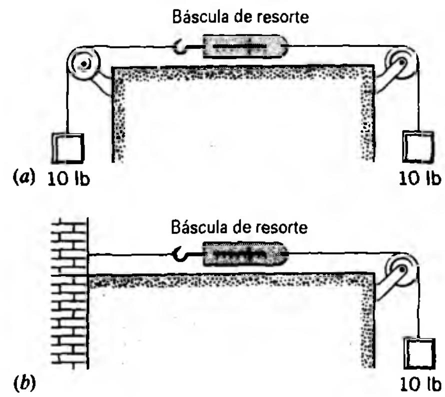


Figura 28 Problema 24.

27. Un meteorito de 0.25 kg de masa cae verticalmente a través de la atmósfera de la Tierra con una aceleración de $9.2\ m/s^2$. Además de la gravedad, una fuerza retardante vertical (debida a la resistencia aerodinámica de la atmósfera) actúa sobre el meteorito. ¿Cuál es la magnitud de esta fuerza retardante? Véase la figura 29.

Figura 29 Problema 27.

28. Un elevador que pesa 6200 lb se eleva mediante un cable con una aceleración de $3.8\ ft/s^2$. (*a*) ¿Cuál es la tensión en el cable? (*b*) ¿Cuál es la tensión cuando el elevador está acelerando hacia abajo a razón de 3.8 ft/s^2 pero se mueve todavía hacia arriba?

29. Un hombre de 83 kg de masa (peso mg = 180 lb) salta a un patio de concreto desde el borde de una ventana situada a sólo 0.48 m (= 1.6 ft) sobre el suelo, pero descuida doblar sus rodillas cuando aterriza, de modo que su movimiento es detenido en una distancia de alrededor de 2.2 in (= 0.87 pulg). (*a*) ¿Cuál es la aceleración promedio del hombre desde el momento en que sus pies tocan por primera vez el patio hasta el momento en que llega al reposo? (*b*) ¿Con qué fuerza promedio sacude a su estructura ósea este salto?

30. Un bloque es proyectado hacia arriba sobre un plano inclinado sin fricción a una velocidad v_0. El ángulo de inclinación es θ. (*a*) ¿Cuánto avanza sobre el plano? (*b*) ¿Cuánto tiempo le toma llegar hasta allí? (*c*) ¿Cuál es su velocidad cuando regresa hasta la base? Halle las respuestas numéricas para θ = 35° y v_0 = 8.2 ft/s.

31. Una lámpara cuelga verticalmente de un cordón en un elevador en descenso. El elevador tiene una desceleración de 2.4 m/s^2 (= 7.9 ft/s^2) antes de detenerse. (*a*) Si la tensión en el cordón es de 89 N (= 20 lb), ¿cuál es la masa de la lámpara? (*b*) ¿Cuál es la tensión en la cuerda cuando el elevador asciende con una aceleración de 2.4 m/s^2 (= 7.9 ft/s^2)?

32. ¿Cuánta fuerza se necesita en el sedal para detener a un salmón de 19 lb que nada a razón de 9.2 ft/s en una distancia de 4.5 in?

33. Un bloque de 5.1 kg de peso es jalado a lo largo de un piso sin fricción por una cuerda que ejerce una fuerza P = 12 N con un ángulo θ = 25° sobre la horizontal, como se muestra en la figura 30. (*a*) ¿Cuál es la aceleración del bloque? (*b*) La fuerza P se incrementa lentamente. ¿Cuál es el valor de P en el momento antes de que el bloque sea levantado del piso? (*c*) ¿Cuál es la aceleración del bloque antes de que sea levantado del piso?

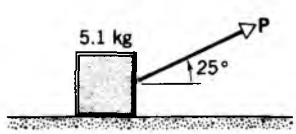


Figura 30 Problema 33.

34. ¿Cómo podría un objeto de 100 lb ser bajado de un tejado usando una cuerda con una resistencia a la rotura de 87 lb sin que se rompa la cuerda?

35. Se deja caer un bloque desde el reposo en la parte superior de un plano inclinado sin fricción de 16 m de longitud. Llega a la base 4.2 s más tarde. Un segundo bloque es lanzado hacia arriba desde el fondo del plano en el instante en que el primer bloque es soltado de modo tal que regresa al fondo simultáneamente con el primer bloque. (*a*) Halle la aceleración de cada bloque sobre el plano inclinado. (*b*) ¿Cuál es la velocidad inicial del segundo bloque? (*c*) ¿Qué distancia recorre hacia arriba en el plano inclinado? (*d*) ¿Qué ángulo forma el plano con la horizontal?

36. Un obrero arrastra una caja por el piso de una fábrica jalando de una cuerda atada a la caja. El obrero ejerce una fuerza de 450 N sobre la cuerda, la cual está inclinada a 38.0° sobre la horizontal. El suelo ejerce una fuerza resistiva horizontal de 125 N, como se muestra en la figura 31. Calcule la aceleración de la caja (*a*) si su masa es de 96.0 kg y (*b*) si su peso es de 96.0 N.

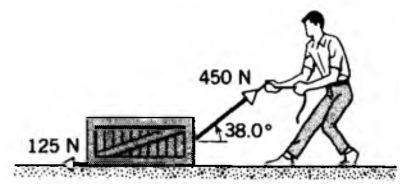


Figura 31 Problema 36.

37. Un elevador y su carga tienen una masa combinada de 1600 kg. Halle la tensión en el cable de sustentación cuando el elevador, que originalmente se mueve hacia abajo a razón de 12.0 m/s, es traído al reposo con aceleración constante a una distancia de 42.0 m.

38. Un objeto cuelga de una balanza de resortes unida al techo de un elevador. La balanza señala 65 N cuando el elevador está quieto. (*a*) ¿Cuánto marca cuando el elevador se mueve hacia arriba a una velocidad constante de 7.6 m/s? (*b*) ¿Cuánto marca la balanza cuando el elevador se mueve hacia arriba a una velocidad de 7.6 m/s y desacelera a razón de 2.4 m/s^2?

39. Una plomada, que consta de una pequeña pesa suspendida por un cordón de masa despreciable, cuelga del techo de un vagón de ferrocarril y actúa como un acelerómetro. (*a*) Demuestre que la expresión que relaciona a la aceleración horizontal a del carro con el ángulo θ formado por el cordón con la vertical está dada por $a = g \tan \theta$. (*b*) Halle a cuando θ = 20°. (*c*) Halle θ cuando a = 5.0 ft/s^2.

40. Un motor a chorro de 1400 kg está afianzado al fuselaje de un avión de pasajeros por apenas tres pernos (que suele ser la práctica usual). Suponga que cada perno soporta un tercio de la carga. (*a*) Calcule la fuerza sobre cada perno cuando el avión espera en línea para que se le permita el despegue. (*b*) Durante el vuelo, el avión encuentra turbulencia, la cual imparte súbitamente al avión una aceleración vertical hacia arriba de 2.60 m/s^2. Calcule la fuerza sobre cada perno ahora. ¿Por qué se usan solamente tres pernos? Véase la figura 32.

41. Unos obreros están cargando un equipo en un elevador de carga en el último piso de un edificio. Sin embargo, sobrecargan el elevador y el cable desgastado se rompe violentamente. La masa del elevador cargado en el momento del accidente es de 1600 kg. Cuando el elevador cae, los rieles de guía ejercen una fuerza retardante constante de 3700 N sobre el elevador. ¿A qué velocidad golpea el elevador el fondo del tiro situado a 72 m hacia abajo?

42. Un automóvil de 1200 kg está siendo arrastrado por un plano inclinado a 18° por medio de un cable atado a la

Figura 32 Problema 40.

parte trasera de un camión-grúa. El cable forma un ángulo de 27° con el plano inclinado. ¿Cuál es la mayor distancia que el automóvil puede ser arrastrado en los primeros 7.5 s después de arrancar desde el reposo si el cable tiene una resistencia a la rotura de 4.6 kN? Desprecie todas las fuerzas resistivas sobre el automóvil. Véase la figura 33.

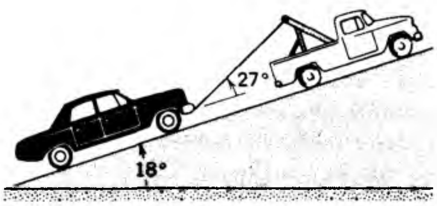


Figura 33 Problema 42.

43. Una caja de 110 kg está siendo empujada a velocidad constante por la rampa de 34° que se muestra en la figura 34. (*a*) ¿Qué fuerza horizontal *F* se requiere? (*b*) ¿Cuál es la fuerza ejercida por la rampa sobre la caja?

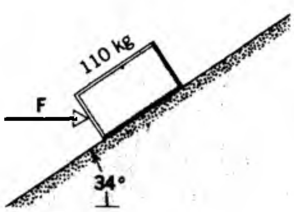


Figura 34 Problema 43.

44. Un reciente avión a chorro de 26 tons de la fuerza aérea de Estados Unidos (Fig. 35) requiere una velocidad en el aire de 280 ft/s para el despegue. Su propio motor desarrolla un empuje de 24,000 lb. El avión va a despegar desde un portaviones con una pista de vuelo de 300 ft. ¿Qué fuerza debe ser ejercida por la catapulta del portaviones? Suponga que la catapulta y el motor del avión ejercen una fuerza constante a lo largo de los 300 ft del despegue.

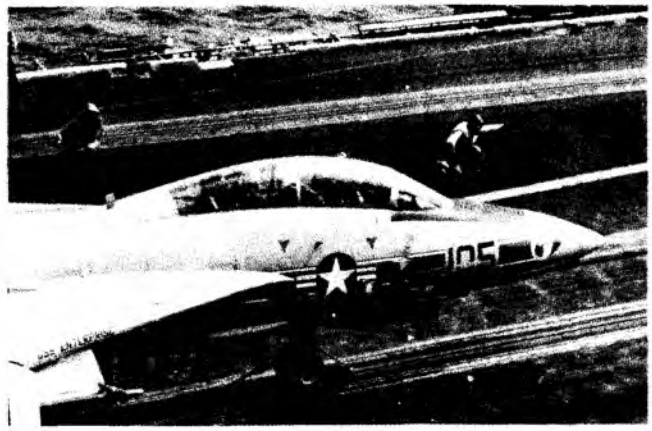


Figura 35 Problema 44.

45. Una nave de descenso se aproxima a la superficie de Calisto, uno de los satélites (lunas) del planeta Júpiter (Fig. 36). Si el motor de la nave proporciona un empuje hacia arriba de 3260 N, la nave desciende a velocidad constante. Calisto no tiene atmósfera. Si el empuje hacia arriba es de 2200 N, la nave acelera hacia abajo a razón de 0.390 m/s^2. (*a*) ¿Cuál es el peso de la nave en descenso en la vecindad de la superficie de Calisto? (*b*) ¿Cuál es

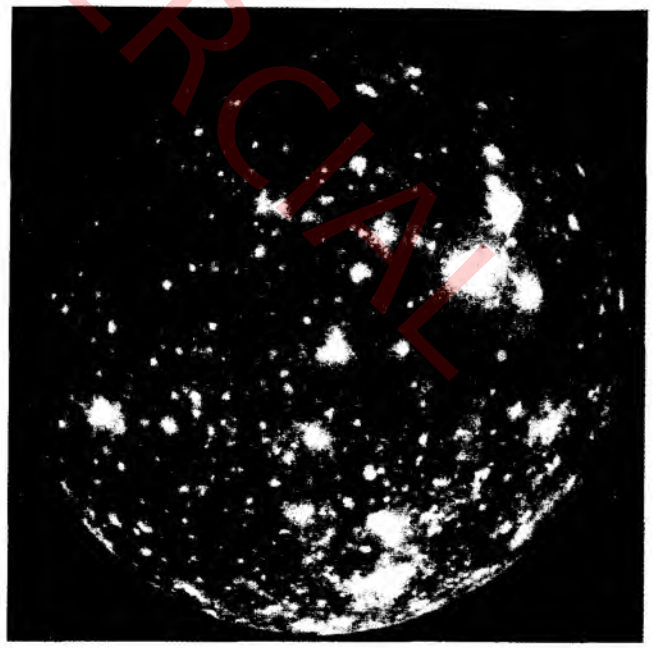


Figura 36 Problema 45.

la masa de la nave? (c) ¿Cuál es la aceleración debida a la gravedad cerca de la superficie de Calisto?

46. Años atrás, las barcazas que viajaban por los canales eran arrastradas por caballos como se muestra en la figura 37. Supongamos que el caballo está ejerciendo una fuerza de 7900 N a un ángulo de 18° con la dirección del movimiento de la barcaza, la cual navega en línea recta por el canal. La masa de la barcaza es de 9500 kg y su aceleración es de 0.12 m/s^2. Calcule la fuerza ejercida por el agua sobre la barcaza.

Figura 37 Problema 46.

47. Un cohete y su carga útil tienen una masa total de 51,000 kg. ¿Cuál es el empuje del motor del cohete cuando (a) el cohete está "flotando" sobre la plataforma de lanzamiento, justo después del encendido, y (b) cuando el cohete está acelerando hacia arriba a razón de 18 m/s^2 ?

48. Un avión de combate a chorro despega a un ángulo de 27.0° con la horizontal, acelerando a 2.62 m/s^2. El peso del avión es de 79,300 N. Halle (a) el empuje T del motor del avión y (b) la fuerza ascensional L ejercida por el aire perpendicularmente a las alas; véase la figura 38. Desprecie la resistencia del aire.

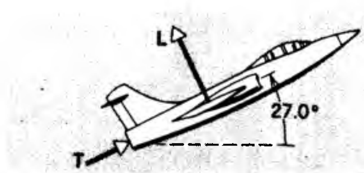


Figura 38 Problema 48

49. Un globo de investigación con una masa total M está descendiendo verticalmente con una aceleración a hacia abajo (Véase la Fig. 39.) ¿Cuánto lastre debe ser arrojado de la canastilla para dar al globo una aceleración a *hacia arriba*, suponiendo que la fuerza ascensional del aire sobre el globo no cambie?

50. Un cohete con masa de 3030 kg se dispara estando en reposo desde el terreno con un ángulo de elevación de 58.0°. El motor ejerce un empuje de 61.2 kN a un ángulo constante de 58.0° con la horizontal durante 48.0 s y luego el motor se detiene. Desprecie la masa del combustible consumido y desprecie la fuerza aerodinámica de resistencia. Calcule (a) la altitud del cohete cuando el motor se detiene, y (b) la distancia total desde el punto de disparo hasta el impacto.

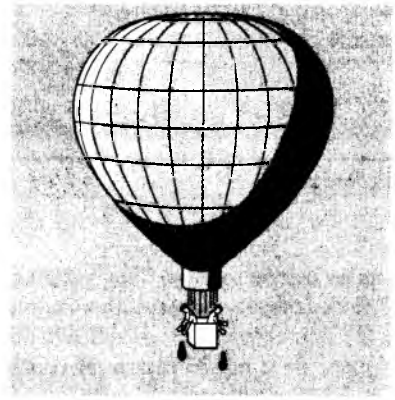


Figura 39 Problema 49.

51. Un bloque, de masa m, se desliza hacia abajo en un plano inclinado sin fricción que forma un ángulo θ con el piso de un elevador. Halle su aceleración con relación al plano en los casos siguientes. (a) El elevador desciende a velocidad constante v. (b) El elevador asciende a velocidad constante v. (c) El elevador desciende con una aceleración a. (d) El elevador desciende con una deceleración a. (e) El cable del elevador se rompe. (f) En la parte (c) de arriba, cuál es la fuerza ejercida sobre el bloque por el plano inclinado?

Sección 5-11 Más aplicaciones de las leyes de Newton

52. Refiérase a la figura 18. Sea m_1 = 4.30 kg y m_2 = 1.80 kg. Halle (a) la aceleración de los dos bloques, y (b) la tensión en la cuerda.

53. Un hombre de 110 kg desciende al suelo desde una altura de 12 m sujetando una cuerda que pasa por una polea sin fricción atada a un saco de arena de 74 kg. (a) ¿A qué velocidad alcanza el hombre el suelo? (b) ¿Podría haber hecho algo para reducir la velocidad con que alcanza el suelo?

54. Un chango de 11 kg está trepando por una cuerda carente de masa que está unida a un tronco de 15 kg y pasa sobre una rama de un árbol (¡sin fricción!). ¿Con qué aceleración mínima deberá trepar el chango por la cuerda de modo que pueda elevar al tronco de 15 kg desde el suelo? Si, después de que el tronco se haya elevado, el chango deja de trepar y se cuelga de la cuerda, ¿cuál será ahora (b) la aceleración del chango y (c) la tensión en la cuerda?

55. Tres bloques están unidos como se muestra en la figura 40 sobre una mesa horizontal carente de fricción y son jalados hacia la derecha con una fuerza T_3 = 6.5 N. Si m_1 = 1.2 kg, m_2 = 2.4 kg, y m_3 = 3.1 kg, calcule (a) la aceleración del sistema y (b) las tensiones T_1 y T_2. Trace una analogía de los cuerpos que están siendo jalados en tándem, tal como si una locomotora jalara de un tren de carros acoplados.

56. Dos bloques están en contacto sobre una mesa carente de fricción. Se aplica una fuerza horizontal a un bloque, como

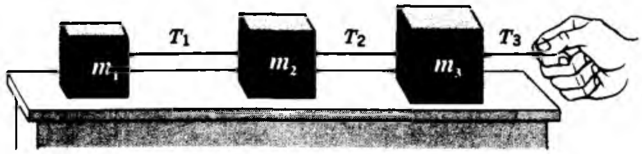


Figura 40 Problema 55.

se muestra en la figura 41. (*a*) Si m_1 = 2.3 kg, m_2 = 1.2 kg, y F = 3.2 N, halle la fuerza de contacto entre los dos bloques. (*b*) Demuestre que si se aplica la misma fuerza F a m_2 en lugar de a m_1, la fuerza de contacto entre los bloques es 2.1 N, el cual no es el mismo valor derivado en (*a*). Explique.

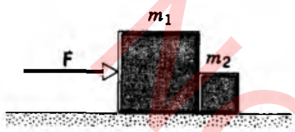


Figura 41 Problema 56.

57. La figura 42 muestra tres cajas con masas m_1 = 45.2 kg, m_2 = 22.8 kg, y m_3 = 34.3 kg sobre una superficie horizontal carente de fricción. (*a*) ¿Qué fuerza horizontal F se necesita para empujar las cajas hacia la derecha, como si fueran una sola unidad, con una aceleración de 1.32 m/s²? (*b*) Halle la fuerza ejercida por m_2 sobre m_3. (*c*) Y por m_1 sobre m_2.

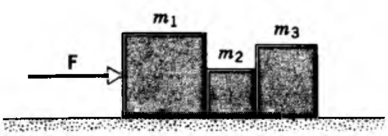


Figura 42 Problema 57.

58. Una cadena que consta de cinco eslabones, cada uno con una masa de 100 g, se levanta verticalmente con una aceleración constante de 2.50 m/s², como se muestra en la figura 43. Halle (*a*) las fuerzas que actúan entre eslabones adyacentes, (*b*) la fuerza F ejercida en el eslabón superior por el agente que eleva la cadena, y (*c*) la fuerza *neta* en cada eslabón.

Figura 43 Problema 58.

59. Un bloque de masa m_1 = 3.70 kg está sobre un plano inclinado de ángulo θ = 28.0°, y unido por una cuerda sobre una polea pequeña, sin fricción y sin masa, a un segundo bloque de masa m_2 = 1.86 kg que cuelga verticalmente (véase la figura 44), (*a*) ¿cuál es la aceleración de cada bloque? (*b*) Halle la tensión en la cuerda.

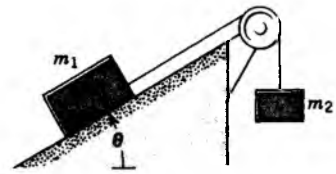


Figura 44 Problema 59.

60. Un paracaidista de 77 kg experimenta una aceleración hacia abajo de 2.5 m/s² poco después de abrirse el paracaídas. La masa del paracaídas es de 5.2 kg. (*a*) Halle la fuerza hacia arriba ejercida en el paracaídas por el aire. (*b*) Calcule la fuerza hacia abajo ejercida por el paracaidista.

61. Un elevador consta de una cabina (*A*), el contrapeso (*B*), el mecanismo de maniobra (*C*), y el cable y las poleas que se muestran en la figura 45. La masa de la cabina es de 1000 kg y la masa del contrapeso es de 1400 kg. Desprecie la fricción y las masas del cable y de las poleas. El elevador acelera hacia arriba a razón de 2.30 m/s² y el contrapeso acelera hacia abajo en una cantidad igual. ¿Cuáles son los valores de las tensiones (*a*) T_1 y (*b*) T_2? (*c*) ¿Cuál es la fuerza ejercida sobre el cable por el mecanismo?

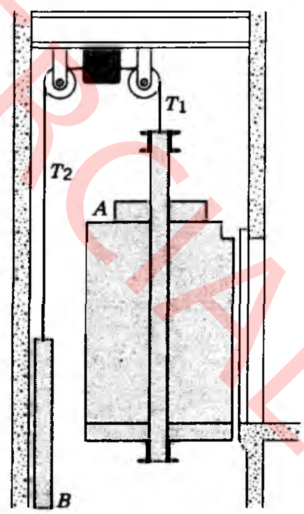


Figura 45 Problema 61.

62. Un helicóptero de 15,000 kg está elevando un vehículo de 4500 kg con una aceleración hacia arriba de 1.4 m/s². Calcule (*a*) la fuerza vertical que el aire ejerce sobre las paletas del helicóptero, y (*b*) la tensión en el cable de soporte superior; véase la figura 46.

Figura 46 Problema 62.

63. Alguien ejerce una fuerza F directamente hacia arriba sobre el eje de la polea que se muestra en la figura 47. Considere que la polea y el cable carecen de masa y que el buje carece de fricción. Dos objetos, m_1 de 1.2 kg de masa y m_2 de 1.9 kg de masa, están unidos como se muestra a los extremos opuestos del cable, el cual pasa sobre la polea. El objeto m_2 está en contacto con el piso. (*a*) ¿cuál es el valor más grande que la fuerza F puede tener de modo que m_2 permanezca en reposo sobre el piso? (*b*) ¿Cuál es la tensión en el cable cuando la fuerza F hacia arriba sea de 110 N? (*c*) Con la tensión determinada en la parte (*b*), ¿Cuál es la aceleración de m_1?

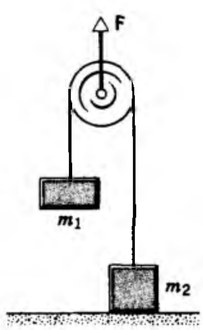


Figura 47 Problema 63.

64. Dos partículas, cada una de masa m, están unidas por un cordel delgado de longitud $2L$, como se muestra en la figura 48. Una fuerza uniforme $\mathbf{F}$ se aplica en el punto medio del cordel ($x = 0$) formando un ángulo recto con la posición inicial del cordel. Demuestre que la aceleración de cada masa en dirección a 90° con $\mathbf{F}$ está dada por

$$a_x = \frac{F}{2m}\frac{x}{(L^2 - x^2)^{1/2}}$$

donde x es la distancia perpendicular de una de las partículas desde la línea de acción de $\mathbf{F}$. Discuta la situación cuando $x = L$.

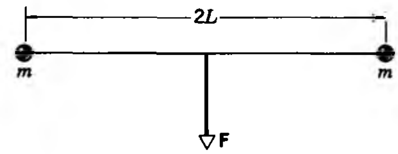


Figura 48 Problema 64.

65. Un bloque de masa M es jalado a lo largo de una superficie horizontal sin fricción por un cable de masa m como se muestra en la figura 49. Se aplica una fuerza horizontal $\mathbf{P}$ a un extremo del cable. (*a*) Demuestre que el cable *debe* combarse, aun cuando sólo sea en una cantidad imperceptible. Luego, suponiendo que la comba sea despreciable, halle (*b*) la aceleración del cable y del bloque, (*c*) la fuerza que el cable ejerce sobre el bloque, y (*d*) la tensión del cable en su punto medio.

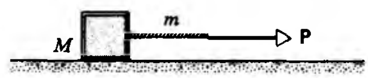


Figura 49 Problema 65.

66. La figura 50 muestra una sección de un sistema alpino de vagones movidos por la tracción de un cable. La masa máxima permitida de cada vagón con ocupantes es de 2800 kg. Los vagones, que viajan sobre un cable de soporte, son jalados por un segundo cable unido a cada torre. ¿Cuál es la diferencia de tensión entre secciones adyacentes del cable de tracción si los vagones son acelerados hacia arriba con una inclinación de 35° a razón de 0.81 m/s²?

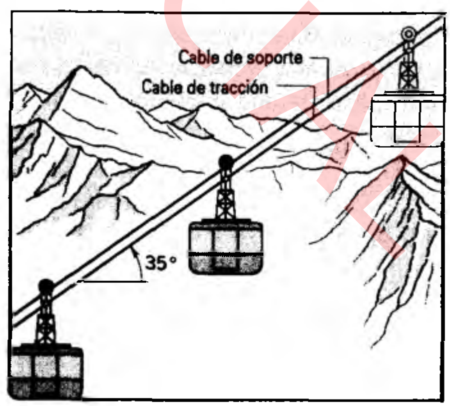


Figura 50 Problema 66.

67. El hombre de la figura 51 pesa 180 lb; la plataforma y la polea sin fricción unida a ella pesan un total de 43 lb.

Figura 51 Problema 67

Desprecie el peso del cable. ¿Con qué fuerza debe el hombre jalar del cable con objeto de elevarse a sí mismo y a la plataforma a razón de 1.2 ft/s²?

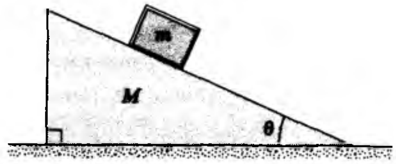


Figura 52 Problema 68.

68. Una cuña en triángulo rectángulo de masa M y ángulo θ, que soporta un pequeño bloque de masa m sobre su lado, descansa sobre una mesa horizontal, como se muestra en la figura 52. (*a*) ¿Qué aceleración horizontal a deberá tener M con relación a la mesa para mantener a m estacionaria con respecto a la cuña, suponiendo contactos carentes de fricción? (*b*) ¿Qué fuerza horizontal **F** deberá ser aplicada al sistema para obtener este resultado, suponiendo que la cubierta de la mesa no tenga fricción? (*c*) Suponga que no se imprime fuerza alguna sobre M y que ambas superficies carecen de fricción. Describa el movimiento resultante.