CENGAGE Learning

Física

Una mirada al mundo

Edición abreviada

Kirkpatrick • Francis

Física

Una mirada al mundo

Edición abreviada

Kirkpatrick • Francis

TRADUCCIÓN

Miguel Martínez Sarmiento

Traductor Profesional

REVISIÓN TÉCNICA

Nora Natalia Martínez

CENGAGE Learning™

Australia • Brasil • Corea • España • Estados Unidos • Japón • México • Reino Unido • Singapur

Física: Una mirada al mundo
Edición abreviada
Larry D. Kirkpatrick y Gregory E. Francis

Presidente de Cengage Learning Latinoamérica:
Fernando Valenzuela Migoya

Director Editorial, de Producción y de Plataformas Digitales para Latinoamérica:
Ricardo H. Rodríguez

Gerente de Procesos para Latinoamérica:
Claudia Islas Licona

Gerente de Manufactura para Latinoamérica:
Raúl D. Zendejas Espejel

Gerente Editorial de Contenidos en Español:
Pilar Hernández Santamarina

Coordinador de Manufactura:
Rafael Pérez González

Editora:
Abril Vega Orozco

Diseño de portada:
Ivokar creativa
Diseñadora: Gloria Ivonne Álvarez López
Las imágenes utilizadas en la portada fueron utilizadas de conformidad con los términos de servicio de iStockphoto

Foto de portada:
iStockphoto

Composición tipográfica:
Humberto Núñez

Traducido del libro:
Physics: A World View, Sixth Edition
Publicado en inglés por Thomson/Brooks Cole
© 2007
ISBN: 978-0-495-50188-6

Datos para catalogación bibliográfica:
Kirkpatrick, Larry D. y Gregory E. Francis
Física: Una mirada al mundo. Edición abreviada.
ISBN: 978-607-481-843-7

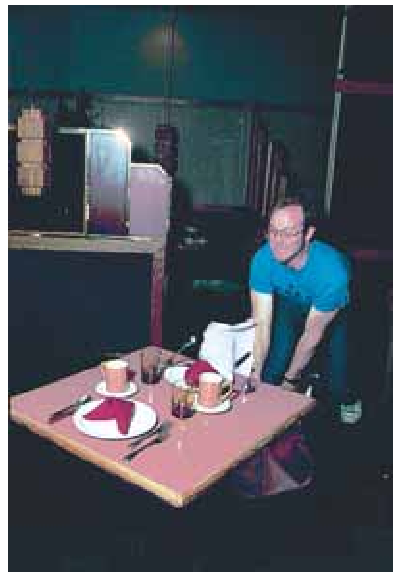
Esta edición abreviada es una obra derivada de la creación originalmente publicada por Cengage Learning, *Física: Una mirada al mundo*, sexta edición, de Kirkpatrick, Larry D. y Gregory E. Francis, con ISBN: 978-607-481-297-8 con un total de 688 pp.

Visite nuestro sitio en:
http://latinoamerica.cengage.com

Impreso en México
1 2 3 4 5 6 7 15 14 13 12

Resumen de contenido

Contenido



4 Gravedad

Una conocida leyenda dice que Newton tuvo su idea más creativa mientras miraba caer al suelo una manzana. Realizó un inmenso salto conceptual al igualar el movimiento de la manzana con el movimiento de la Luna y desarrollar el concepto de gravedad. ¿Qué tan lejos llega la gravedad? ¿Observamos alguna evidencia de gravedad en otro lugar del universo?

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 71.)

Esta vista de la Tierra saludó a los astronautas del Apolo 11 mientras orbitaban la Luna.

En la visión del mundo de un físico, existen cuatro fuerzas fundamentales: la gravitacional, la electromagnética, la débil y la fuerte. Comenzamos nuestro estudio de las fuerzas con la que estamos más familiarizados en nuestras vidas. Todos los niños en edad escolar saben que los objetos caen debido a la gravedad. Pero, ¿qué es la gravedad? Afirmar que es lo que hace caer las cosas no nos dice mucho.

¿La gravedad es un material como un fluido o la niebla? ¿O es algo más etéreo? Nadie lo sabe. Que hayamos asignado un nombre a algo no significa que lo comprendamos por completo. Entendemos la gravedad en el sentido de que podemos describir con precisión cómo afecta el movimiento de los objetos. Por ejemplo, ya hemos visto cómo utilizar el concepto de gravedad para describir el movimiento de los objetos que caen. Podemos hacer más. Al observar con atención los movimientos de ciertos objetos, podemos desarrollar una ecuación que describa esta fuerza de atracción entre los objetos materiales y explorar algunas de sus consecuencias.

Por otra parte, no podemos responder preguntas como "¿Qué es la gravedad?" o "¿Por qué existe la gravedad?".

El concepto de gravedad

El concepto de gravedad no ha existido siempre. Se concibió cuando los cambios en nuestra visión del mundo requirieron una nueva explicación de por qué las cosas caen en la Tierra. Cuando se creía que la Tierra era plana, no se necesitaba la gravedad. Los objetos caían porque buscaban sus lugares naturales. Una piedra en el extremo de una cuerda colgaba por su tendencia a regresar a su lugar natural. Arriba y abajo eran direcciones absolutas.

La comprensión de que la Tierra era esférica requirió un cambio de perspectiva. ¿Qué ocurría con esas desafortunadas personas en el otro lado de la Tierra que estaban de cabeza? Pero el cambio en el pensamiento se hizo sin la gravedad. El centro de la Tierra era el centro del universo, y las cosas se movían naturalmente hacia este punto. Arriba y abajo se volvieron relativos, pero la ubicación del centro del universo se hizo absoluta.

Tampoco se necesitaba la gravedad para comprender el movimiento de los cuerpos celestes. El esquema aceptado más antiguo explicaba que la Tierra era el centro del universo, y que cada uno de los cuerpos celestes rodeaba la Tierra en órbitas circulares. Las órbitas circulares perpetuas se consideraban naturales para los movimientos celestes; se prestaba poca atención a las causas de estos movimientos. Aristóteles no reconoció ninguna relación entre lo que percibía como perfecto, el movimiento celeste, e imperfecto, el movimiento terrestre. Declaró que el movimiento circular con rapidez constante era el más perfecto de todos los movimientos y, por lo tanto, que el movimiento celeste natural no necesitaba mayor explicación.

Esto cambió ligeramente con una nueva visión del movimiento celeste por Nicolás Copérnico, un científico y clérigo polaco del siglo XVI. Propuso que los planetas (entre ellos la Tierra) se desplazaban alrededor del Sol en órbitas circulares y que la Luna rodeaba la Tierra. En esencia, este es el esquema que se enseña en las escuelas en la actualidad. Un indicio de un concepto de la gravedad aparece en la obra de Copérnico. Pensaba que el Sol y la Luna atraerían a los objetos cercanos a sus superficies —cada uno tendría una gravedad local— pero no incluía el concepto de una influencia de atracción que se extendía por todo el espacio.

Cien años después, Johannes Kepler, un matemático y astrónomo alemán, sugirió que los planetas se movían debido a una interacción entre ellos y el Sol. Kepler también nos alejó de la suposición de que los planetas viajaban en trayectorias circulares. Después de muchos años de ensayo y error, Kepler dedujo correctamente que las órbitas de los planetas eran *elipses*; pero elipses que casi eran círculos. Además, los planetas no viajan con velocidades constantes por sus trayectorias elípticas, sino aceleran cuando se acercan al Sol y van más lentos cuando se alejan de él.

Influenciado por su importante trabajo inicial sobre el magnetismo, Kepler razonó que el Sol impulsaba magnéticamente los planetas a lo largo de sus trayec-

KEPLER | La música de las esferas

© Nicku/Dreamstime

Johannes Kepler

Johannes Kepler nació dos días después de Navidad en 1571. En su horóscopo, que después coleccionó, observó que la familia escribía su apellido de diferentes maneras, y que fue prematuro y enfermizo. El pueblo donde nació ahora es parte de Stuttgart, en el estado alemán de Baden-Württemberg. Su origen campesino no pudo encubrir su precocidad y destreza para las matemáticas. Fue elegido por el duque del lugar para recibir una buena educación y después asistido al nuevo seminario luterano en la Tübingen University. Ahí adquirió las técnicas necesarias para trabajar en avanzados problemas astronómicos.

La vida adulta de Kepler se centró en la astronomía matemática. Como luterano, pasó la mayor parte de su vida en Praga, bajo las órdenes de un emperador santo, católico y romano. Era un convencido copernicano y buscó ampliar la exactitud de esa nueva astronomía. Su primera obra —*Misterios cósmicos* (1597)— fue una teoría un tanto mística y numerológica que relacionaba las distancias y los tiempos de las revoluciones de los planetas. Su generación consideraba las matemáticas como un lenguaje que revelaba la armonía interior de la creación y que los movimientos celestiales revelaban la armonía física y la unidad en la acción. De modo que su búsqueda de la "música" de las esferas en realidad fue una búsqueda de una descripción matemática de la creación de dios.

Su mentor en astronomía, Tycho Brahe, fue un maestro danés de la técnica y la precisión en las observaciones. De hecho, la obra de Brahe alcanzó el límite de las observaciones a simple vista. Después de fallecer Brahe, Kepler tuvo acceso a los cuantiosos informes astronómicos de los movimientos de Marte. Este planeta era el más sorprendente por sus movimientos aparentemente irregulares. Kepler publicó su libro sobre Marte en 1609 y lo hizo entrar a una era de la "nueva" astronomía. El libro contiene sus dos leyes del movimiento.

Su obra fue conocida en toda Europa, y él y Galileo (e incluso el padre de Galileo) cruzaron una engañosa correspondencia relacionada con problemas de astronomía. Una vez más, la música se analizó a menudo en este contexto.

Kepler se encontró a sí mismo sumergido en una serie de guerras europeas importantes, en la tragedia personal, y cuando su madre fue acusada de brujería en Baden-Württemberg, con la ley. Su gran capacidad siguió brillando durante toda esta agitación. Desarrolló una técnica —los logaritmos— para acelerar los cálculos, y continuó su trabajo astronómico. Necesitaba dinero con desesperación, de modo que redactaba predicciones astrológicas para los poderosos. Desarrolló el concepto de *satélite* e incluso escribió una breve fábula sobre un viaje espacial.

Siempre en la búsqueda de la armonía del cosmos, publicó en 1618 un libro similar al anterior sobre misterios cósmicos. En esta última obra, estableció su tercera ley, relacionadas con las órbitas planetarias, los tiempos de las revoluciones, y la teoría heliocéntrica. Fue sobre esta tercera ley sobre la cual Isaac Newton basó su obra con tanto éxito. De nuevo, surge un tema musical: se tituló *Armonías del mundo*.

Johannes Kepler dio impulso al descubrimiento de una nueva física, porque su astronomía destruyó las "Ruedas de la fortuna" de los círculos perfectos y las ideas acostumbradas de los movimientos naturales y antinaturales. Cuando murió, en 1630, su legado estaba asegurado. Había creado una nueva astronomía y demandado un nuevo concepto de la física para apoyarla.

—Pierce C. Mullen, historiador y autor

Fuentes: Max Caspar, *Kepler*, trad. y ed. C. Doris Hellman (Nueva York: Abelard-Schuman, 1959); Arthur Koestler, *The Watershed: A Biography of Johannes Kepler* (Garden City, N.Y.: Anchor Books, 1960).

torias. Debido a que esta obra ocurrió poco después de la aceptación de la idea de la inercia, Kepler no comprendió que se necesitaba una fuerza no para impulsar los planetas a lo largo de sus órbitas, sino para hacer que las órbitas fueran curvas. Kepler dedujo una interacción que iba del Sol a los diversos planetas y que los impulsaba, pero no consideró la posibilidad de cualquier interacción entre los planetas mismos; el Sol reinaba supremo, era una metáfora de su dios, de quien todos los demás obtenían fuerza.

Newton desarrolló nuestra actual visión de la gravedad. Comenzó por afirmar que las reglas de la naturaleza que él había desarrollado no se aplicaban de manera especial a la Tierra. También debían aplicarse a los movimientos celestes. La aceleración debe ser hacia el centro del círculo y, por lo tanto, una fuerza neta debe actuar sobre el objeto. Newton siguió buscando esta fuerza.

Gravedad de Newton

La creatividad a menudo implica integrar ideas o cosas de áreas aparentemente no relacionadas. Después que un artista o un erudito lo ha hecho, la relación suele parecer más obvia a los demás. Newton hizo tal síntesis entre los movimientos en la Tierra y los movimientos en los cielos. La leyenda dice que hizo su salto intelectual mientras contemplaba los cielos y veía caer una manzana. La transición de una manzana ligada a la Tierra que llega a las órbitas celestes ofrece una analogía del salto intelectual de Newton.

Newton creía que las leyes del movimiento que funcionaban en la superficie terrestre también se debían aplicar al movimiento en los cielos. Debido a que la Luna rodea la Tierra en una órbita casi circular, debe acelerar hacia la Tierra. Según la segunda ley, cualquier aceleración requiere una fuerza. Él creía que si esta fuerza pudiera cancelarse, la Luna ya no seguiría moviéndose por su trayectoria circular, sino que se alejaría en una línea recta, como una piedra arrojada con una honda.

El genio de Newton fue relacionar la causa de este movimiento celeste con los eventos terrenales. Newton sentía que la aceleración de la Luna se debía a la fuerza de gravedad; la misma gravedad que hacía que la manzana cayera del árbol. ¿Cómo podía demostrar esto? Primero, calculó la aceleración de la Luna. Debido a que ya se conocían la distancia a la Luna y el tiempo que tarda ésta en girar sobre sí misma, fue capaz de calcular que la Luna aceleraba 0.00272 (metros por segundo) por segundo. Esta es una aceleración muy pequeña. En 1 segundo, la Luna se mueve aproximadamente 1 kilómetro a lo largo de su órbita, pero sólo cae 1.4 milímetros (aproximadamente $\frac{1}{20}$ pulgada en 0.6 millas).

En contraste con la aceleración de la Luna, la manzana tiene una aceleración de 9.80 (metros por segundo) por segundo y cae alrededor de 5 metros en su primer segundo de vuelo. (En análisis anteriores, redondeamos la aceleración a 10 (metros por segundo) por segundo para facilitar el cálculo. Esa pequeña diferencia es importante aquí.) Podemos comparar estas dos aceleraciones al dividir una entre la otra:

$$\frac{0.002\,72 \text{ m/s}^2}{9.80 \text{ m/s}^2} = \frac{1}{3600}$$

$\frac{\text{aceleración de la Luna}}{\text{aceleración de la manzana}}$

¿Por qué son tan diferentes estas dos aceleraciones? Por supuesto que la masa de la Luna es mucho más grande que la de la manzana. Pero eso no importa. Como vimos en el capítulo 2, todos los objetos en caída libre tienen la misma aceleración, independiente de sus masas.

Sin embargo, las aceleraciones de una manzana y la Luna no eran iguales. ¿Podía ser errónea la idea de Newton de que ambos movimientos estaban gobernados por la misma gravedad? O, ¿podían las reglas del movimiento que desarrolló en la Tierra no aplicarse al movimiento celeste? Negativo en ambos casos. Newton razonó que la aceleración de la Luna es menor debido a que la atracción gravitacional de la Tierra es menor en distancias más grandes; se "diluye" con la distancia.

¿Cómo disminuyó la fuerza con un aumento en la distancia? Es imposible rastrear el razonamiento de Newton porque no escribió acerca de cómo llegó a sus conclusiones, pero pudo haber aplicado el tipo de razonamiento siguiente.

Muchas cosas se vuelven menos intensas entre más lejos está usted de su origen. Imagine una pistola para pintar que puede atomizar pintura de manera uniforme en todas direcciones. Suponga que la pistola está en el centro de una esfera con un radio de 1 metro, y que al final de 1 minuto de atomización, la pintura en la pared interior de la esfera tiene 1 milímetro de grosor. Si repetimos el experimento con la misma pistola, pero con una esfera que tiene 2 metros de radio, la pintura sólo tendrá un grosor de $\frac{1}{4}$ milímetro porque una esfera con el doble de radio tiene una superficie cuatro veces mayor que la original (figura 4-1). Si la esfera tiene el triple de radio, la superficie es nueve veces mayor, y la pintura tiene un grosor de $(\frac{1}{3})^2 = \frac{1}{9}$. El grosor de la pintura disminuye conforme aumenta el cuadrado del radio de la esfera. Esto se conoce como una relación **cuadrada inversa**. Una fuerza que llega al espacio se diluye de manera similar.

Pregunta Si la esfera tuviera un radio de 4 metros, ¿cuál sería el grosor de la pintura?

Respuesta Sería de $(\frac{1}{4})^2 \times 1$ milímetro $= \frac{1}{16}$ milímetro de grosor.

© Catalin Petolea/Shutterstock

Dice la leyenda que Newton concibió su ley de la gravitación universal mientras observaba caer una manzana en su patio.

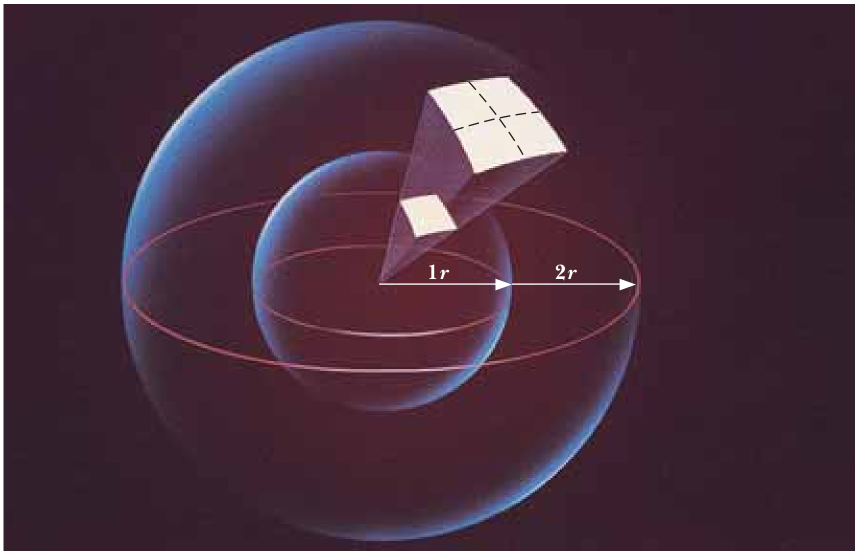


Figura 4-1 Si se duplica el radio de la esfera, la superficie de ésta aumenta por un factor de cuatro.

Newton también pudo haberse entusiasmado por esta explicación porque trabajó hacia atrás a partir de resultados de observaciones del movimiento de los planetas desarrolladas por Kepler. Kepler encontró una relación que conectaba los periodos orbitales de los planetas con sus distancias promedio al Sol. Con los resultados de Kepler y una expresión para la aceleración de un objeto en el movimiento circular, podemos demostrar que la fuerza disminuye con el cuadrado de la distancia. Esto significa que si se duplica la distancia entre los objetos, se tiene sólo una cuarta parte de su fuerza. Si se triplica la distancia, se tiene un noveno de la fuerza que en la distancia original. Y así sucesivamente. Esta relación se presenta en la figura 4-2.

Exactamente, ¿qué significa la afirmación de que la fuerza tiene un noveno que en la distancia original? No podemos atribuirlo a las fuerzas gravitacionales que actúan sobre objetos diferentes; es obvio que la fuerza gravitacional sobre un automóvil es mucho más grande que la fuerzas gravitacional sobre una persona. Debemos comparar la fuerza gravitacional que actúa sobre un solo objeto, como nuestra manzana, a distancias diferentes. Cuando la manzana se aleja tres veces del centro de la Tierra, la fuerza gravitacional sobre la manzana tiene un noveno que en la distancia original.

La prueba obvia de la noción de la gravedad fue apreciar si la relación entre la distancia y la fuerza producía las aceleraciones relativas correctas para la manzana en la Tierra y en la Luna que orbita. Newton pudo aplicar esta regla y hacer la comparación. La distancia del centro de la Tierra al centro de la Luna es de alrededor de 60 veces el radio de la Tierra. Por lo tanto, la Luna está 60 veces más lejos del centro de la Tierra que la manzana. De modo que la fuerza—y su aceleración— en la posición de la Luna debe ser 60^2, o 3600 veces más pequeña. Esto coincide con el cálculo anterior. Los datos disponibles en la época de Newton no eran tan buenos como los que hemos utilizado aquí, pero su calidad era suficiente para convencerlo de la validez de su razonamiento. Las medidas modernas producen valores más precisos y coinciden con que *la fuerza gravitacional es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia*.

Figura 4-2 La fuerza de una masa de 0.1 kilogramo a diversas distancias de la Tierra. Observe que la fuerza disminuye con el cuadrado de la distancia.

Pregunta ¿Qué le ocurre a la fuerza de gravedad si la distancia entre los objetos se reduce a la mitad?

Respuesta La fuerza se vuelve cuatro veces más fuerte.

Entonces Newton comprendió que la gravedad cambiaba con la distancia: la fuerza de gravedad de la Tierra existe más allá de la Tierra y se debilita conforme se aleja. Pero existen otros factores. Él ya sabía que la fuerza de la gravedad dependía de la masa del objeto. Su tercera ley del movimiento decía que la fuerza que ejercía la Tierra sobre la Luna tenía la misma fuerza que la que ejercía la Luna sobre la Tierra; se atraían entre sí. Esta simetría indicaba que ambas masas debían incluirse de la misma manera. *La fuerza gravitacional es proporcional a cada masa*.

La ley de la gravitación universal ✓ MATEMÁTICAS

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

Una vez establecida la conexión entre el movimiento celeste y el movimiento cerca de la superficie terrestre con una fuerza que se extiende a través del espacio vacío y atrae los objetos a la Tierra, Newton dio otro paso, todavía más atrevido. Declaró que la fuerza de la gravedad existía entre *todos* los objetos, que era en realidad una ley de la gravitación *universal*.

La osadía de esta afirmación se vuelve evidente cuando uno comprende que la fuerza entre dos objetos de tamaño normal es sumamente pequeña. Es evidente que mientras usted camina junto a un amigo, no siente una atracción gravitacional que los una. Pero esto es exactamente lo que afirmaba Newton. Cualesquiera dos objetos tienen una fuerza de atracción entre ellos; su regla para la gravedad es una **ley de la gravitación universal**.

◄ ley de la gravitación universal

Al integrar todo, llegamos a una ecuación para la fuerza gravitacional:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

en donde m_1 y m_2 son las masas de los dos objetos, r es la distancia entre sus centros, y G es una constante que contiene información acerca de la intensidad de la fuerza.

Aunque Newton llegó a esta conclusión cuando tenía 24 años de edad, no publicó sus resultados durante más de 20 años. En parte, esto se debió a un aspecto inquietante de su obra. La distancia que aparece en la relación es la distancia desde el centro de la Tierra. Esto significa que se supone que la masa de la Tierra se concentra en un punto en su centro. Esto puede parecer una suposición razonable al considerar la fuerza de gravedad de la Luna; el tamaño de la Tierra es irrelevante cuando se manejan estas enormes distancias. Pero, ¿qué sucede con la manzana en la superficie de la Tierra? En este caso, una masa que está sólo a algunos metros de distancia y una masa que está a 13 000 kilómetros de distancia atraen la manzana, al igual que toda la masa intermedia (figura 4-3). Parece menos intuitivo que todo esto de algún modo actuara como una masa muy compacta ubicada en el centro de la Tierra. Pero eso es justo lo que ocurre. En algún momento Newton fue capaz de demostrar matemáticamente que la suma de las fuerzas debidas a cada metro cúbico de la Tierra era igual que si todas ellas se concentraran en su centro.

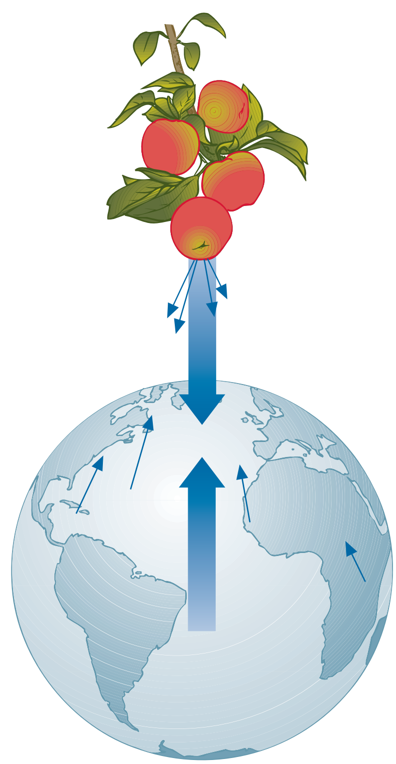


Figura 4-3 La suma de todas las fuerzas sobre la manzana que ejercen todas las partes de la Tierra actúan como si toda la masa estuviera en el centro de la Tierra.

Este resultado se sostiene si la Tierra es esféricamente simétrica. No debe tener una composición uniforme; sólo necesita estar compuesta por una serie de capas esféricas, cada una de las cuales tiene una composición uniforme. De hecho, 1 metro cúbico de material cerca del centro de la Tierra tiene casi cuatro veces la masa de un metro cúbico de material normal en la superficie.

Newton aplicó ampliamente las leyes del movimiento y la ley de la gravitación universal para explicar los movimientos de los cuerpos celestes. Fue capaz de demostrar que las tres leyes de la observación desarrolladas por Kepler para describir el movimiento planetario eran una consecuencia matemáticas de su obra. Las reglas de Kepler fueron el resultado de años de trabajo para reducir la información de las observaciones a un conjunto de pautas sencillas.

Para el siglo XVIII, los científicos confiaban tanto en la obra de Newton que cuando un planeta recién descubierto no se comportó "adecuadamente", supusieron que debían existir otras masas, todavía por descubrir, que provocaban las desviaciones. Cuando se descubrió Urano en 1781, se hizo un gran esfuerzo para reunir datos adicionales acerca de su órbita. Al recurrir a registros antiguos, se determinaron tiempos y ubicaciones adicionales de su obra. Aunque la principal contribución a la órbita de Urano en la fuerza del Sol, los otros planetas también afectan a Urano. No obstante, en este caso los cálculos todavía diferían de la trayectoria real por una cantidad mínima. Las desviaciones fueron explicadas en términos de la influencia de un planeta desconocido. Esto condujo al descubrimiento de Neptuno en 1846.

Esto todavía no consideraba por completo las órbitas de Urano y Neptuno; comenzó la búsqueda por un planeta más. El descubrimiento de Plutón en 1930 todavía dejó algunas discrepancias. Aunque continúa la búsqueda de planetas nuevos, el análisis de la trayectoria de los planetas conocidos indica que cualquier planeta adicional debe ser muy pequeño o muy lejano o ambas cosas.

El concepto de *G*

Aunque Newton tenía una ecuación para la fuerza gravitacional, no podía usarla para calcular en realidad la fuerza entre los objetos; necesitaba conocer el valor de la constante *G*. El modo de obtener esto era medir la fuerza entre dos masas conocidas separadas por una distancia conocida. Sin embargo, la fuerza entre los objetos sobre la Tierra es tan infinitesimal que no podía ser detectada en la época de Newton.

Transcurrieron más de 100 años después de la publicación de los resultados de Newton antes que Henry Cavendish, un científico británico, desarrollara una técnica lo bastante sensible para medir la fuerza entre dos masas. Las mediciones modernas producen el valor

constante gravitacional ➤

$$G = 0.000\,000\,000\,066\,7\,\frac{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2} = 6.67\times10^{-11}\,\frac{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2}$$

(Consulte en el cuadro "Solución" del capítulo 1 una explicación de esta notación.) La incorporación de este valor en la ecuación para la fuerza gravitacional nos indica que la fuerza entre dos masas de 1 kg separadas por un metro es de sólo 0.000 000 000 066 7 newtons. Esto es minúsculo comparado con un peso de 9.8 newtons para cada masa. El minúsculo valor de *G* explica por qué dos amigos no sienten su atracción gravitacional mutua cuando están uno cerca del otro.

Cavendish describió su experimento como "pesar" la Tierra, aunque hubiera sido más exacto afirmar que "concentró la masa" de la Tierra. No obstante, su explicación fue importante. Al medir el valor de *G*, Cavendish por primera vez permitió determinar con exactitud la masa de la Tierra. La aceleración de una masa cerca de la superficie terrestre depende del valor de *G* y de la masa y el radio de la Tierra. Debido a que sabía todos los valores, excepto la masa de la Tierra, pudo calcularla. La masa de la Tierra es 5.98×10^{24} kilogramos; eso es aproximadamente cuatrillones de veces más grande que la masa de usted.

Una vez conocida la masa de la Tierra, podemos utilizar la ley de la gravitación universal para calcular la aceleración debida a la gravedad cerca de la superficie terrestre:

$$g = \frac{F}{m} = \frac{GM_E}{R_E^2}$$

en donde M_E es la masa de la Tierra, y $R_E = 6370$ kilómetros es el radio de la Tierra. La incorporación de los valores numéricos produce $g = 9.8$ (metros por segundo) por segundo, tal como se esperaba.

Debido a que la Tierra orbita al Sol, con los resultados de Cavendish también puede calcularse la masa del Sol. Al hacer estos cálculos, se supone que el valor de *G* medido en la Tierra es válido en todo el sistema solar. Esto no puede mostrarse. Por otra parte, no existe evidencia de lo contrario, y esta suposición produce resultados coherentes. Newton hizo esta misma afirmación más de 100 años antes.

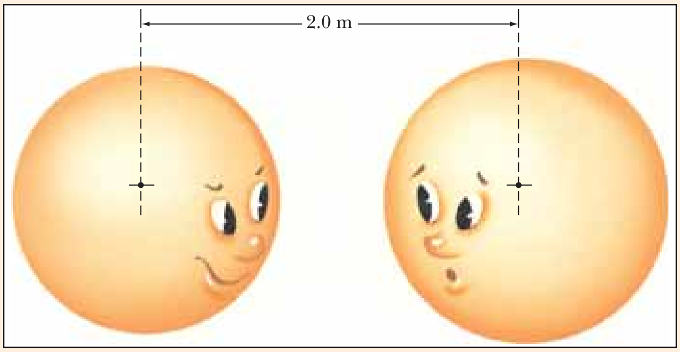
✓ MATEMÁTICAS

SOLUCIÓN | Gravedad

Calculemos la fuerza gravitacional entre dos amigos. Para facilitar el cálculo de esta fuerza, hacemos una suposición poco realista: ¡suponemos que los amigos son esferas! Esto nos permite utilizar la distancia entre sus centros como su separación y todavía obtener una respuesta razonable. Suponiendo que los amigos tienen masas de 70 y 86 kg (alrededor de 154 y 189 lb, respectivamente) y están separados una distancia de 2 m, tenemos

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} = \left(6.67 \times 10^{-11}\,\frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}\right)\frac{(70\ \mathrm{kg})(86\ \mathrm{kg})}{(2\ \mathrm{m})^2} = 1.00 \times 10^{-7}\ \mathrm{N}$$

Esta fuerza infinitesimal es aproximadamente 1 mil millonésimo (10^{-10}) del peso de cualquiera de los amigos.



La atracción entre estos dos amigos esféricos depende de la distancia entre sus centros.

Razonamiento defectuoso

En la exitosa película *Armageddon*, los héroes aterrizan su transbordador espacial en un cometa del tamaño de Texas que se inclina hacia la Tierra. Después caminan sobre el cometa igual que los trabajadores de la construcción aquí en la Tierra. **¿Qué tiene de incorrecto esta imagen?**

Respuesta Un cometa no tiene la masa suficiente para proporcionar la gravedad requerida para caminar normalmente. Los astronautas hubieran tenido que atarse juntos para no salir volando con el mínimo esfuerzo. Los astronautas estaban atados en otra película de un cometa que venía a destruir la Tierra, *Impacto profundo*.

Gravedad cerca de la superficie terrestre

✓ MATEMÁTICAS

En los capítulos iniciales supusimos que la fuerza de gravedad sobre un objeto era constante cerca de la superficie terrestre. Pudimos hacer esto porque la fuerza cambia muy poco sobre las distancias en cuestión. De hecho, suponer lo contrario hubiera complicado innecesariamente el asunto.

Cerca de la superficie terrestre, la fuerza gravitacional disminuye por una parte en un millón por cada 3 metros (alrededor de 10 pies) de aumento en la elevación. Por lo tanto, un objeto que pesa 1 newton en la superficie terrestre, pesaría 0.999 999 newtons en una elevación de 3 metros. Una persona con una masa de 50 kilogramos tiene un peso de 500 newtons (110 libras) en la ciudad de Nueva York; esta persona pesaría alrededor de 0.25 newtons (1 onza) menos en Denver, que tiene una altura de 1609 metros.

¿Cuánto pesa usted?

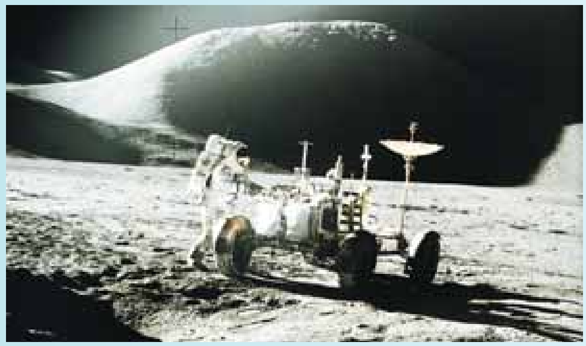
En el siglo XV, las personas no imaginaban que alguien algún día viajaría a planetas lejanos. No obstante, la ley de la gravitación universal de Newton les permitió predecir lo que pesarían si alguna vez se encontraban en otro planeta.

Según la ley de la gravitación universal de Newton, el peso de una persona en un planeta depende de la masa y el radio del planeta, al igual que de la masa de la persona. Su peso en Júpiter comparado con el que tiene en la Tierra depende de estos factores. Si supone que Júpiter tiene el mismo tamaño de la Tierra (esto no es cierto) pero que tiene 318 veces más masa que la Tierra (cierto) significa que usted pesaría 318 veces más en este Júpiter ficticio que en la Tierra. En realidad, el diámetro de Júpiter es 11.2 veces mayor que el de la Tierra. Debido a que la ley de la gravitación universal contiene el radio al cuadrado en el denominador, en realidad su peso se reduce por un factor de 11.2 al cuadrado, o 125. La combinación de estos factores significa que usted movería una báscula de baño en Júpiter a $\frac{318}{125}$ o $2\frac{1}{2}$ veces su peso en la Tierra. Podría pesar menos en Plutón, sólo el 8% de su peso en la Tierra porque la poca masa de Plutón disminuye su peso más de lo que lo aumenta su radio reducido. La tabla siguiente establece su peso en cada uno de los planetas.

En la Luna, la fuerza de gravedad es sólo $\frac{1}{6}$ de la Tierra. Por lo tanto, el peso de un astronauta es sólo $\frac{1}{6}$ de lo que sería en la Tierra. Esto significa que los astronautas pueden brincar más alto y caerán con mayor lentitud, como hemos visto en las imágenes de televisión transmitidas a la Tierra durante las exploraciones lunares. Los vehículos diseñados para viajar en la Luna se colapsarían bajo su propio peso en la Tierra.

Tabla 4-1 | Los pesos en cada uno de los planetas

Planeta	Peso relativo	Persona de 150 lb
Mercurio	0.38	57 lb
Venus	0.91	136
Tierra	1.00	150
Marte	0.38	57
Júpiter	2.53	380
Saturno	1.07	160
Urano	0.92	138
Neptuno	1.18	177
Plutón	0.08	12


© NASA

El explorador lunar colapsaría bajo su peso si se utilizara en la Tierra.

Razonamiento defectuoso

Usted lee en una revista que la gravedad en la Luna no es tan fuerte como en la Tierra porque en la Luna no hay atmósfera. Esto no parece correcto, así que investiga un poco. **¿Qué descubre?**

Respuesta El origen de la atracción gravitacional es la masa, no el aire. La atracción gravitacional sobre la Luna es menor que en la Tierra porque la masa de la Luna es mucho menor que la de la Tierra. En realidad, el argumento en la revista está completamente al revés. La Luna no tiene atmósfera porque su gravedad es demasiado débil para contenerla.


© Royalty-Free/Corbis

Los pasajeros en este avión pesan menos debido a su altitud.

Las variaciones en la fuerza gravitacional provocan cambios en la aceleración debida a la gravedad. El valor de la aceleración —que normalmente se representa como *g*— es casi constante cerca de la superficie terrestre. Siempre y cuando uno permanezca cerca de la superficie, la distancia entre el objeto y el centro de la Tierra cambia muy ligeramente. Si un objeto se eleva 1 kilómetro (alrededor de $\frac{5}{8}$ de milla), la distancia cambia de 6378 a 6379 kilómetros, y *g* cambia sólo de 9.800 (metros por segundo) por segundo a 9.797 (metros por segundo) por segundo.

Sin embargo, incluso sin un cambio en la elevación, *g* no es estrictamente constante de un lugar a otro. La Tierra necesitaría estar formada por capas esféricas, y que cada capa fuera uniforme; este no es el caso. Los depósitos subterráneos de sal tienen menos masa por metro cúbico y producen valores menores de *g* que el promedio, mientras que los depósitos de metales producen valores de *g* más grandes.

Por lo tanto, las medidas de g sirven para localizar depósitos minerales subterráneos de gran tamaño. Al detectar variaciones, los geólogos pueden ubicar regiones para una exploración más detallada.

Pregunta Debido a que el agua tiene menos masa por metro cúbico que el suelo y la roca, ¿esperaría que sobre un lago el valor de g fuera menor o mayor que el promedio?

Respuesta Un metro cúbico de agua proporcionaría menos atracción que un metro cúbico de tierra y roca. Por lo tanto, el valor de g sería menor.

El valor experimental de g también varía con la latitud debido a la rotación de la Tierra sobre su eje. El valor es el mínimo cerca del Ecuador y aumenta hacia cada polo.

Satélites

✔ MATEMÁTICAS

La teoría de Newton también predice las órbitas de los satélites que orbitan la Tierra. Al saber cómo cambia la fuerza con la distancia desde la Tierra, sabemos cuáles aceleraciones —y, por consiguiente, otras características orbitales— esperar en diferentes altitudes. Por ejemplo, un satélite a una altura de 200 kilómetros debe orbitar la Tierra en 88.5 minutos. Esto se acerca a la órbita del satélite *Vostok 6* que llevó a la primera mujer, Valentina Tereskova, en una órbita terrestre en junio de 1963. La altura de su órbita variaba de 170 a 210 kilómetros y tenía un periodo de poco más de 88 minutos.

© Txemanet / Dreamstime

Los platos de los satélites apuntan a los satélites de comunicaciones que recorren órbitas geosíncronas sobre el Ecuador de la Tierra.

FÍSICA | **HÁGALO USTED MISMO**

Muchos satélites tienen órbitas norte-sur con periodos de aproximadamente 90 minutos. Atisbe el cielo nocturno cerca de la estrella polar hasta que localice uno de estos satélites que se mueven hacia el sur. Calcule el tiempo que pasa este satélite sobre el horizonte. ¿Por qué este tiempo es mucho más breve que 45 minutos?

Entre más alta es la órbita de un satélite, más tiempo tarda en completarla. La Luna tarda 27.3 días; *Vostok 6* tardaba 88 minutos. Es posible calcular la altura que un satélite necesitaría para tener un periodo de 1 día. Con esta órbita, si el satélite se posicionara sobre el Ecuador, parecería que permanece fijo directamente sobre un punto sobre la Tierra: una órbita llamada geosíncrona. Tales satélites geosíncronos tienen una altitud de 36 000 kilómetros, o alrededor de $5\frac{1}{2}$ radios de la Tierra, y son útiles para establecer redes de comunicaciones a nivel mundial. Los platos de los satélites caseros que captan las señales de televisión apuntan a los satélites

© NASA

Los satélites climáticos GEOS orbitan la Tierra una vez cada día, y mantienen ubicaciones fijas sobre el Ecuador.

geosíncronos. El primer satélite geosíncrono exitoso fue el *Syncom II*, lanzado en julio de 1963. Algunos satélites geosíncronos sirven para vigilar el clima en la Tierra.

Pregunta Si pudiera detectar un satélite geosíncrono en el cielo, ¿cómo lo diferenciaría de una estrella?

Respuesta El satélite se mantiene en la misma ubicación en el cielo, mientras que la estrella deriva hacia el oeste mientras la Tierra gira bajo ellos.

FÍSICA | **HÁGALO USTED MISMO**

Calcule las ubicaciones de los satélites climáticos con base en las vistas de Norteamérica que presentan durante la predicción climática de un noticiario y su conocimiento de las órbitas posibles de los satélites geosíncronos.

Cualquier sonda espacial requiere los mismos cálculos que los efectuados para los satélites; las computadoras de la NASA determinan las trayectorias para los vuelos espaciales mediante las leyes del movimiento y la ley de la gravitación de Newton. Las fuerzas sobre la nave espacial en cualquier momento dependen de las posiciones de los otros cuerpos en el sistema solar. Éstas se pueden calcular con la ecuación de la gravitación al insertar la distancia hacia cada cuerpo y su masa. La fuerza neta produce una aceleración de la nave espacial que cambia su velocidad. A partir de esto, la computadora calcula una nueva posición para la nave espacial. También calcula posiciones nuevas para los otros cuerpos celestes, y el proceso vuelve a comenzar. De esta manera, la computadora grafica la trayectoria de la nave espacial por el sistema solar.

Mareas

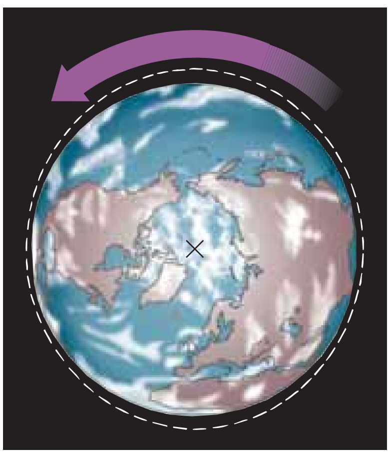


Figura 4-4 Las protuberancias oceánicas exageradas. Cuando la Tierra gira, las protuberancias parecen desplazarse alrededor de la superficie terrestre.

Antes de la obra de Newton con la gravedad, nadie fue capaz de explicar por qué tenemos mareas. Se sabían algunas cosas. Las mareas se deben a las protuberancias en la superficie de los océanos de la Tierra. Existen dos protuberancias, una en cada lado de la Tierra, como se observa en la figura 4-4. La ocurrencia de mareas en un lugar determinado se debe a la rotación de la Tierra. Imagine por sencillez que las protuberancias son estacionarias —apuntan a cierta dirección en el espacio— y que la Tierra gira. Cada punto en la Tierra pasa por ambas protuberancias en 24 horas y en esos momentos tenemos mareas altas. Las mareas bajas ocurren cuando las protuberancias están a la mitad. De modo que cada día tenemos dos mareas bajas y dos altas.

Lo que no se sabía era por qué la Tierra tenía estas protuberancias. Newton afirmó que se debían a la gravedad de la Luna. La Tierra ejerce una fuerza gravitacional sobre la Luna que hace que la Luna la orbite. Pero la Luna ejerce una fuerza igual y opuesta sobre la Tierra que provoca que la Tierra orbite la Luna. En realidad, la Tierra y la Luna orbitan un punto común ubicado entre ellas. Este punto es el centro de la masa del sistema Tierra-Luna. Debido a que la masa de la Tierra es mayor que la de la Luna, el centro de la masa está mucho más cerca de la Tierra. De hecho, se ubica dentro de la Tierra, como se observa en la figura 4-5. El movimiento orbital de la Tierra le parecería un bamboleo a alguien que lo observara desde muy arriba del polo norte. Pero es una órbita.

Pregunta ¿Las fuerzas entre la Tierra y la Luna son un par de la tercera ley?

Respuesta Sí, una es la fuerza de la *Tierra sobre la Luna*, y la otra es la fuerza de la *Luna sobre la Tierra*.

Debido a que la Tierra tiene un movimiento orbital, podemos usar las conclusiones desarrolladas para el movimiento de la Luna como ayuda para comprender las mareas de la Tierra. Por ejemplo, como concluimos que la Luna cae continua-

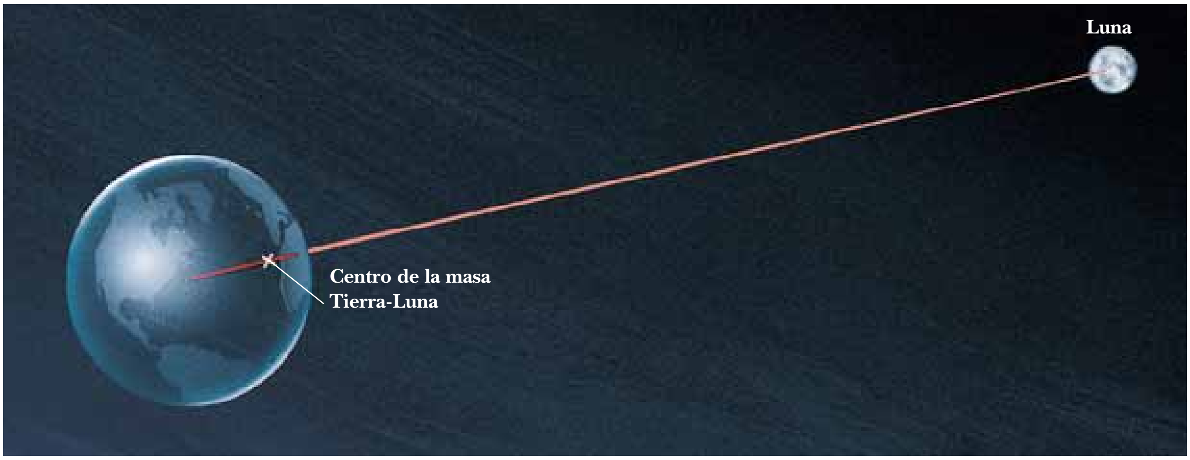


Figura 4-5 El centro de la masa del sistema Tierra-Luna se ubica dentro de la Tierra.

mente hacia la Tierra, entonces la Tierra cae continuamente hacia la Luna. Esta aceleración centrípeta hacia la Luna es la clave para comprender las protuberancias de las mareas.

Olvide por un momento que la Tierra se mueve a lo largo de su órbita y sólo considere que la Tierra cae hacia la Luna, igual que en la figura 4-6. Esta aceleración es lo que más contribuye para las mareas. Debido a que la fuerza de la gravedad de la Luna se debilita conforme aumenta la distancia, la fuerza en diferentes partes de la Tierra es distinta. Por ejemplo, en el lado más cercano a la Luna, 1 kg de agua del océano experimenta una fuerza más intensa que una masa de roca igual en el centro de la Tierra. Asimismo, 1 kg de material en el lado lejano de la Tierra siente una fuerza menos intensa que un kilogramo en el lado cercano y uno en el centro.

Si existen fuerzas de diferente magnitud en diversos lugares en la Tierra, existen aceleraciones distintas para cada lugar. Algunos lugares de la Tierra caen más rápido hacia la Luna que otros. El material en el lado de la Tierra que está frente a la Luna intenta adelantarse, mientras que el material en el otro lado se retrasa. Supuesto, la Tierra tiene fuerzas internas que la mantienen unida y que terminan por equilibrar estas desigualdades. Pero terminamos con una Tierra estirada.

Aunque este razonamiento explica la ocurrencia de dos mareas altas cada día, es demasiado sencillo para exponer los detalles correctamente. Observamos que las mareas altas no ocurren a la misma hora cada día. Esto sucede porque la Luna orbita una vez al mes una Tierra que gira. El intervalo de tiempo normal entre mareas altas sucesivas son 12 horas y 25 minutos. Las mareas altas no ocurren cuando la Luna está arriba, sino más tarde, hasta 6 horas después. Esto se debe a factores como los efectos de la fricción y de la inercia del agua y la profundidades variables del océano.

Si bien la diferencia en altura entre las mareas baja y alta en medio del océano es de sólo 1 metro, la forma de la costa puede ampliar mucho las mareas. Las mareas más grandes ocurren en la bahía de Fundy, en el litoral este entre Canadá y Estados Unidos; ahí el rango máximo de marea baja a alta son 16 metros (54 pies).

También esperaríamos observar mareas solares debido a que el Sol también ejerce una atracción gravitacional sobre la Tierra y la Tierra "cae" hacia el Sol. Ocurren, pero tienen alturas de menos de la mitad de las producidas por la Luna. Este valor puede parecer muy bajo, tomando en consideración que la fuerza gravitacional del Sol sobre la Tierra es alrededor de 180 veces más grande que la de la Luna. El efecto solar es tan reducido porque lo que importa es la diferencia en la fuerza de un lado de la Tierra y no el tamaño absoluto. Las mareas debidas a los planetas son todavía más pequeñas, y la de Júpiter es menos de un diezmillonésimo de la debida al Sol.

Los continentes son mucho más rígidos que los océanos. Incluso así, la Tierra experimenta efectos de marea mensurables. Las áreas continentales pueden elevarse y caer hasta 23 centímetros (9 pulgadas). Debido a que sube y baja el área completa, no sentimos este efecto.

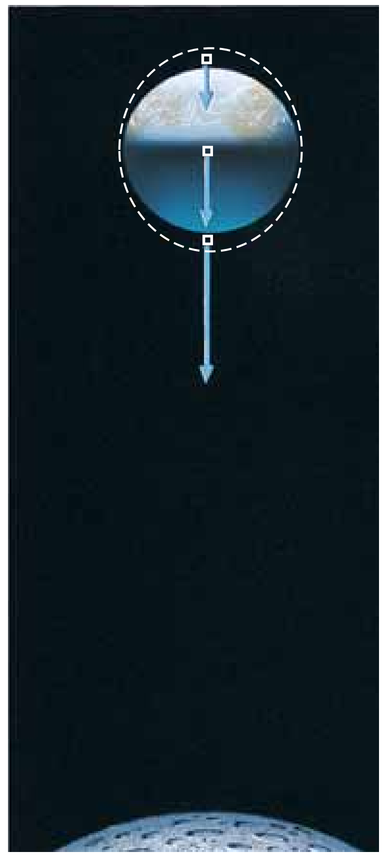


Figura 4-6 Las masas iguales en la Tierra experimentan fuerzas gravitacionales diferentes debido a sus distintas distancias de la Luna. El efecto se exagera en el diagrama.

© Werner Münzker/Dreamstime

© Richard Mc Nab/Dreamstime

Fotografías de las mareas baja y alta.

Pregunta ¿La altura de la marea alta se relaciona con la fase de la Luna? Es decir, ¿es más alta cuando el Sol y la Luna están en el mismo lado de la Tierra (Luna nueva), cuando están en lados opuestos (Luna llena), o cuando están en ángulos rectos entre sí (cuarto creciente o cuarto menguante)?

Respuesta Las mareas altas y las mareas bajas más pronunciadas ocurren cuando hay Luna nueva y Luna llena, y la Tierra, la Luna y el Sol están alineados.

¿Qué tan lejos llega la gravedad?

La ley de la gravitación ha sido probada exhaustivamente dentro del sistema solar. Explica los movimientos de los planetas, incluyendo sus irregularidades debidas a la atracción mutua de todos los otros planetas.

© NASA

Los racimos de estrellas ofrecen evidencia de la acción de la gravedad entre las estrellas.

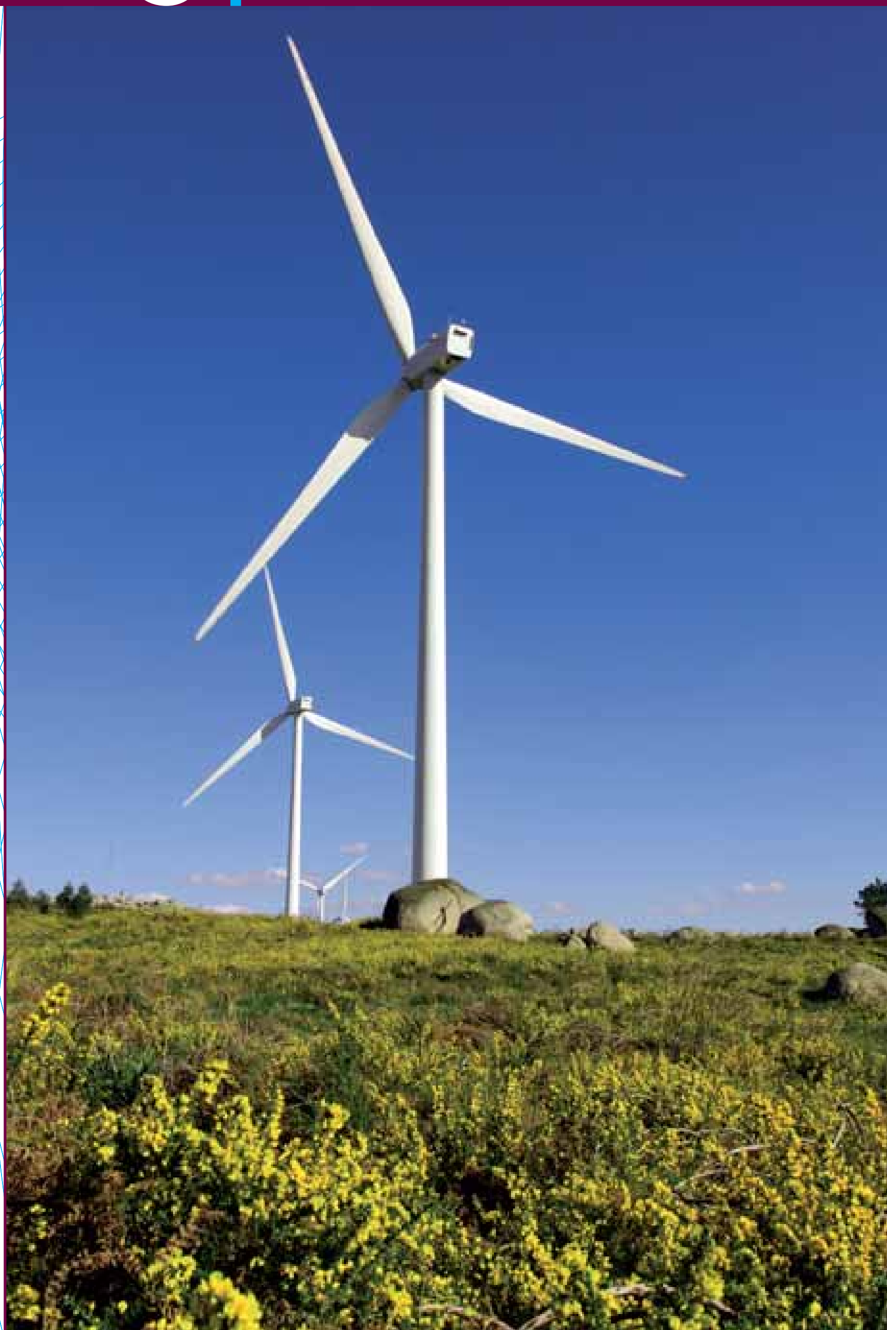
¿Acaso hay pruebas fuera del sistema solar? No hemos enviado sondas ahí. Sin embargo, somos afortunados, porque la naturaleza nos proporciona sondas a la medida. Los astrónomos observan que muchas estrellas de nuestra galaxia dan vueltas alrededor de una estrella compañera. Estos sistemas de estrella binaria son la regla, no la excepción. Estos pares giran entre sí en exactamente en el modo predicho por las leyes de Newton.

En ocasiones, se detecta una estrella que parece estar sola y no obstante se mueve en una trayectoria elíptica. Nuestra fe en las leyes de Newton es tan grande que suponemos que existe una estrella compañera; sólo que no es visible. Algunas de estas estrellas invisibles se han detectado después porque emiten señales diferentes a la luz visible.

Las fotografías de racimos de estrellas demuestran que ocurre interacción gravitacional entre las estrellas. De hecho, las medidas muestran que todas las estrellas en la galaxia Vía Láctea giran respecto a un punto común bajo la influencia de la gravedad. Esto se ha utilizado para calcular la masa total de la galaxia y el número de estrellas en ella. El tamaño y la forma de la galaxia Vía Láctea son muy similares a los de nuestra vecina, la galaxia de Andrómeda.

Tales éxitos son una notable comprobación del genio de Newton. Durante más de dos siglos, los científicos aplicaron sus leyes del movimiento y la ley de la gravitación sin descubrir discrepancias. Sin embargo, en algún momento se descubrieron algunas excepciones a la visión del mundo newtoniana. La admisión de estas excepciones no debe rebajar su fama. Sólo ocurren cuando nos aventuramos muy lejos del reino de nuestros sentidos ordinarios. En el mundo de las velocidades muy altas y las masas muy grandes, debemos reemplazar las ideas de Newton con las teorías de la relatividad general especial. En el mundo de lo extremadamente pequeño, debemos aplicar las teorías de la mecánica cuántica. Sin embargo, debe señalarse que cuando estas teorías más recientes se aplican en el reino donde funcionan las leyes de Newton, las teorías nuevas producen los mismos resultados.

6 Energía



© Cristovao/Shutterstock

Los molinos de viento se perfeccionan para transformar la energía del viento en energía eléctrica.

La energía es un artículo básico importante. Las personas y los países que saben cómo obtener y utilizar la energía por lo general son los más ricos y poderosos. Pero, ¿qué es la energía? Y, ¿qué queremos decir con que se conserva?

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 111.)

En el capítulo anterior, llegamos a comprender el momento al considerar el efecto de una fuerza que actúa durante cierto tiempo. Si, en lugar de eso, analizamos el movimiento de un objeto después que la fuerza ha actuado durante cierta distancia, encontramos otra cantidad que en ocasiones es constante, la energía del movimiento. Sin embargo, esta es sólo una forma de una constante más general y mucho más profunda conocida como energía.

conservación de la energía ➤

La energía total de un sistema aislado no cambia.

La energía es uno de los conceptos más fundamentales y de largo alcance en la visión del mundo de la física. Se requirieron casi 300 años para desarrollar por completo las ideas acerca de la energía y su conservación. En vista de su importancia y popularidad, es probable que piense que sería fácil ofrecer una definición precisa de la energía. No es así.

¿Qué es la energía?

El laureado Nobel Richard Feynman, en su obra *Lectures on Physics*, captura el carácter esencial de la energía y sus numerosas formas cuando analiza la ley de la conservación de la energía:

> Existe cierta cantidad, la cual llamamos energía, que no cambia en los múltiples cambios que experimenta la naturaleza. Esa es una idea muy abstracta, porque es un principio matemático; afirma que existe una cantidad numérica que no cambia cuando ocurre algo. No es una descripción de un mecanismo, ni algo concreto; es sólo un hecho extraño que podamos calcular cierto número y cuando terminamos de observar cómo la naturaleza despliega sus trucos, y volvemos a calcular el número, es el mismo. (Algo similar al alfil en un cuadro rojo, que después de varios movimientos —sin que se conozcan los detalles— todavía está en un cuadro rojo. Es una ley de esta naturaleza.) Debido a que es una idea abstracta, ejemplificaremos su significado mediante una analogía.
>
> Imagine a un niño, tal vez "Daniel el Travieso", que posee unos bloques absolutamente indestructibles, que no pueden fragmentarse. Cada uno es igual al otro. Supongamos que tiene 28 bloques. Su madre lo instala con sus 28 bloques en una habitación al inicio del día. Al final del día, por curiosidad, ella cuenta los bloques con mucho cuidado y descubre una ley fenomenal: sin importar lo que él haga con los bloques, siempre quedan 28. Esto continúa durante varios días, hasta que un día sólo hay 27 bloques, pero un poco de investigación demuestra que hay uno bajo la alfombra, ella debe mirar en todas partes para comprobar que el número de bloques no haya cambiado. Sin embargo, un día el número parece cambiar: sólo hay 26 bloques. Una investigación cuidadosa indica que la ventana estaba abierta, y luego de mirar afuera, aparecen los otros dos bloques. Otro día, una cuenta cuidadosa indica que hay 30 bloques. Esto provoca bastante consternación, hasta que recuerda que Bruce vino de visita, trajo consigo sus bloques, y dejó algunos en casa de Daniel. Después que ella entrega los bloques adicionales, cierra la ventana y prohíbe las visitas de Bruce, todo transcurre en orden, hasta que en una ocasión cuenta sólo 25 bloques. Sin embargo, en la habitación hay un juguetero. La madre se acerca a él, pero el niño grita, "No abras mi juguetero". No permite a la madre abrirlo. Como tiene mucha curiosidad, y es ingeniosa, idea una acción. Sabe que un bloque pesa tres onzas, de modo que pesa la caja una ocasión que ve 28 bloques, y obtiene 16 onzas. La siguiente ocasión que quiere comprobar, vuelve a pesar la caja, resta 16 onzas y descubre lo siguiente:
>
> $$(\text{número de bloques vistos}) + \frac{(\text{peso de la caja}) - 16 \text{ onzas}}{3 \text{ onzas}} = \text{constante}$$
>
> Entonces parece que hay algunas desviaciones nuevas, pero un estudio cuidadoso indica que el agua sucia de la bañera cambia de nivel. El niño lanza los bloques al agua, y ella no puede verlos por el agua turbia, pero puede determinar cuántos bloques hay en el agua al incorporar otro término a su fórmula. Debido a que la lectura original del agua era 6 pulgadas y cada bloque eleva el nivel un cuarto de pulgada, esta nueva fórmula sería:

$$\begin{pmatrix}\text{número de}\\ \text{bloques vistos}\end{pmatrix} + \frac{(\text{peso de la caja}) - 16 \text{ onzas}}{3 \text{ onzas}} + \frac{(\text{altura del agua}) - 6 \text{ pulgadas}}{\frac{1}{4}\text{ pulgada}} = \text{constante}$$

En el aumento gradual de la complejidad de su mundo, ella encuentra una serie completa de términos que representan maneras de calcular cuántos bloques hay en los lugares donde no puede verlos. Como resultado, establece una fórmula compleja, una cantidad que *debe calcularse*, y que siempre es la misma en su situación…

La analogía tiene los conceptos siguientes. Primero, cuando calculamos la energía, en ocasiones una parte de ella abandona el sistema y desaparece, u otras veces se incorpora un poco de energía. Para verificar la conservación de la energía, debemos tener cuidado que no se pierda ni se incorpore nada. Segundo, la energía tiene una gran cantidad de *formas diferentes*, y existe una fórmula para cada una… Si totalizamos las fórmulas para la contribución de cada una, no cambiarán, excepto por la energía que entra o sale.

Es importante comprender que en la física actual, no sabemos qué es la energía. No tenemos una imagen de que la energía venga en pequeñas gotas de una cantidad definida. No existe de ese modo. Sin embargo, existen fórmulas para calcular cierta cantidad numérica, y cuando sumamos todo, genera "28"; siempre el mismo número. Es algo abstracto porque no nos dice los mecanismos ni las *razones* para las diversas fórmulas.*

Energía del movimiento

✓ MATEMÁTICAS

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

La forma de energía más obvia es la que posee un objeto debido a su movimiento. Llamamos a esta cantidad de movimiento la **energía cinética** del objeto. Igual que el momento, la energía cinética depende de la masa y del movimiento del objeto. Pero la expresión para la energía cinética es diferente de la del momento. La energía cinética *KE* de un objeto es

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

◄ energía cinética $= \frac{1}{2}$ de la masa × rapidez al cuadrado

donde el factor de $\frac{1}{2}$ hace que la energía cinética sea compatible con otras formas de energía, las cuales estudiaremos después.

Observe que la energía cinética de un objeto aumenta con el cuadrado de su rapidez. Esto significa que si un objeto duplica su rapidez, su energía cinética aumenta cuatro veces; si triplica su rapidez, su energía cinética aumenta nueve veces; y así sucesivamente.

Pregunta ¿Qué le ocurre a la energía cinética de un objeto si su masa se duplica mientras su rapidez se mantiene igual?

Respuesta Debido a que la energía cinética es directamente proporcional a la masa, la energía cinética se duplica.

Las unidades para la energía cinética y, por lo tanto, para todos los tipos de energía, son kilogramos multiplicados por (metros por segundo) al cuadrado, $kg \cdot m^2/s^2$. Esta unidad de energía se llama **joule**. La energía cinética es diferente del momento en que no es una cantidad de vector. Un objeto tiene la misma energía cinética, sin tomar en cuenta su dirección, siempre y cuando no cambie su rapidez.

Un libro que se deja caer desde una altura de 10 centímetros (alrededor de 4 pulgadas) golpea el suelo con una energía cinética de aproximadamente 1 joule (J). La energía cinética de una persona de 70 kilogramos (154 libras) que corre con una rapidez de 8 metros por segundo es

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(70 \text{ kg})(8 \text{ m/s})^2 = (35 \text{ kg})(64 \text{ m}^2/\text{s}^2) = 2240 \text{ J}$$

*R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963), 1: 4-1 y 4-2.

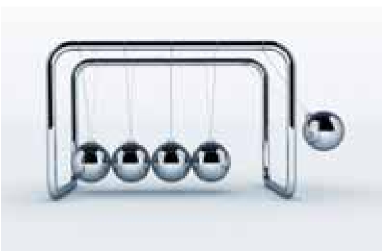
Conservación de la energía cinética

La búsqueda de constantes del movimiento suele implicar las colisiones. De hecho, al inicio de su descubrimiento, con frecuencia se confundían los conceptos de momento y energía cinética. Las cosas se aclararon mucho cuando se reconoció que los dos eran cantidades distintas. Ya hemos visto que el momento se conserva durante las colisiones. Bajo ciertas condiciones más restrictivas, la energía cinética también se conserva.

Considere la colisión de una bola de billar con una pared dura. Es obvio que la energía cinética de la bola no es constante. En el instante en que la bola invierte su dirección, su rapidez es cero y, por lo tanto, su energía cinética es cero. Como veremos, incluso si incluimos la energía cinética de la pared y la Tierra, no se conserva la energía cinética del sistema.

Sin embargo, si no nos preocupamos con los detalles de lo que ocurre durante la colisión y sólo observamos la energía cinética antes y después de la colisión, encontramos que la energía cinética casi se conserva. Durante la colisión, la pelota y la pared se distorsionan, lo cual produce fuerzas friccionales internas que reducen ligeramente la energía cinética. Pero una vez más ignoramos algunas cosas para llegar al núcleo del asunto. Supongamos que tenemos materiales "perfectos" y que podemos ignorar estos efectos friccionales. En este caso, la energía cinética de la bola después que se separa de la pared es igual a su energía cinética antes de golpear la pared. Las colisiones en las cuales se conserva la energía cinética se conocen como colisiones **elásticas**.

En realidad, muchas colisiones atómicas y subatómicas son perfectamente elásticas. Una aproximación en escala mayor de una colisión elástica sería entre los discos de hockey de aire que tienen imanes pegados en la parte superior para que se repelen entre sí.



© Corina Rosul / Dreamstime

Figura 6-1 El aparato con bolas que chocan demuestra la conservación del momento y la energía cinética.

FÍSICA | **HÁGALO USTED MISMO**

El aparato presentado en la figura 6-1 puede resultarle conocido. Tiene cinco bolas con masas iguales colgadas en fila para que puedan balancearse a lo largo de la fila. Si jala una bola en un extremo y la suelta, la última bola en el otro extremo se balancea con la velocidad que la original. Al saber que el momento y la energía cinética se conservan, ¿puede predecir lo que ocurrirá si jala dos bola y las suelta juntas? Intente este experimento si posee uno de estos juguetes.

Las colisiones en las cuales se pierde la energía cinética se conocen como colisiones **inelásticas**. La pérdida en la energía cinética aparece como otras formas de energía, principalmente en forma de calor, lo cual analizaremos en el capítulo 9. Las colisiones en las cuales los objetos se alejan con una velocidad común nunca son elásticas. Apreciaremos esto en el ejemplo de la bola de billar presentado al final de esta sección.

La conservación del momento y el grado en que se conserva la energía cinética determinan los resultados de las colisiones. Sabemos que las colisiones de las bolas de billar no son perfectamente elásticas porque escuchamos que chocan. (El sonido es una forma de energía y, por lo tanto, se traslada una parte de la energía.)

FÍSICA | **HÁGALO USTED MISMO**

Determine las elasticidades relativas de pelotas hechas con diferentes materiales al dejarlas caer desde una altura uniforme sobre una superficie muy dura, como el piso de concreto o una placa gruesa de acero. Entre más elástico es el material, más cerca de su altura original regresará la pelota. ¿Una pelota de goma es más o menos elástica que una canica de vidrio? ¿Sus resultados coinciden con el uso cotidiano de la palabra *elástico*?

MATEMÁTICAS

SOLUCIÓN | Conservación de la energía cinética

Las colisiones entre objetos muy duros, como las bolas de billar, son casi elásticas. Considere la colisión de frente de una bola de billar que se mueve contra una de billar inmóvil (figura 6-2[a]). La bola que se mueve se detiene, y la que está inmóvil adquiere la velocidad inicial de la que se movía (figura 6-2[b]). Suponga que la masa de cada bola es 0.2 kg, y que la velocidad inicial es 4 m/s. Los momentos totales antes y después de la colisión son

$$p(\text{antes}) = m_1v_1 + m_2v_2 = (0.2\text{ kg})(4\text{ m/s}) + 0 = 0.8\text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

$$p(\text{después}) = m_1v_1 + m_2v_2 = 0 + (0.2\text{ kg})(4\text{ m/s}) = 0.8\text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

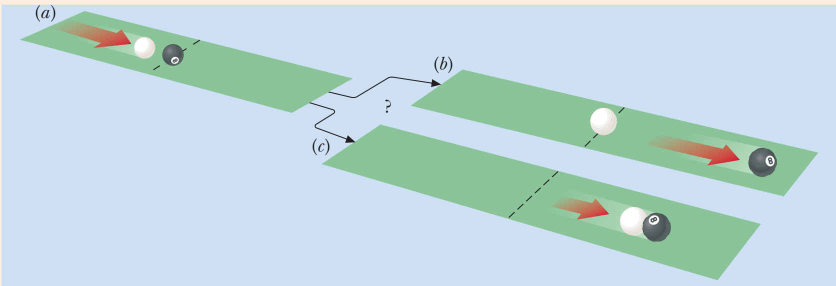


Figura 6-2 (a) Una bola de billar en movimiento choca de frente con una bola inmóvil. ¿Cuál posibilidad ocurre? (b) La bola en movimiento se detiene, y la bola inmóvil continúa con la velocidad inicial. (c) Las bolas se mueven juntas con la mitad de la velocidad inicial.

Por lo tanto, el momento se conserva. Asimismo, las energías cinéticas antes y después de la colisión son

$$KE(\text{antes}) = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}(0.2\text{ kg})(4\text{ m/s})^2 + 0 = 1.6\text{ J}$$

$$KE(\text{después}) = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = 0 + \frac{1}{2}(0.2\text{ kg})(4\text{ m/s})^2 = 1.6\text{ J}$$

Por lo tanto, la energía cinética también se conserva.

Pero ésta no es la única posibilidad que conserva el momento. Otra es que las dos bolas avancen en dirección hacia adelante, cada una con la mitad de la velocidad inicial (figura 6-2[c]). Ambas posibilidades conservan el momento total del sistema de dos bolas. Sin embargo, cuando efectuamos el experimento, la primera posibilidad es la que observamos siempre.

¿Por qué ocurre una y no la otra? La primera posibilidad conserva la energía cinética, pero la segunda no. Para ver que la segunda no conserva la energía cinética, calculamos de nuevo la energía cinética después de la colisión:

$$KE(\text{después}) = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}(0.2\text{ kg})(2\text{ m/s})^2 + \frac{1}{2}(0.2\text{ kg})(2\text{ m/s})^2 = 0.8\text{ J}$$

En este caso, se perdió la mitad de la energía cinética.

Cambio en la energía cinética

Un carro que rueda a lo largo de una superficie horizontal sin fricción tiene cierta energía cinética porque se mueve. Una fuerza neta sobre el carro puede cambiar su rapidez y, por lo tanto, su energía cinética. Si usted empuja en la dirección que se mueve el carro, aumenta su energía cinética. Si empuja en la dirección opuesta, frena el carro y disminuye su energía cinética (figura 6-3).

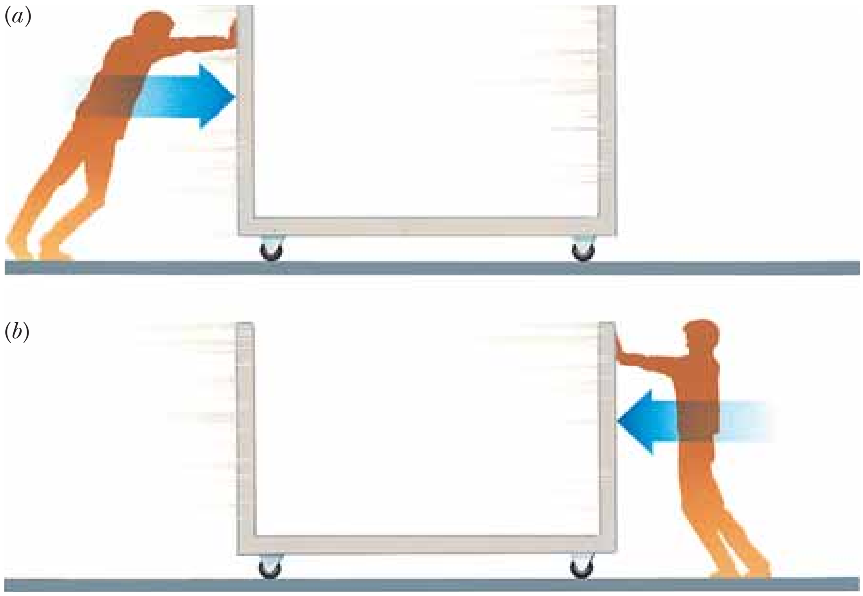


Figura 6-3 (a) Una fuerza en la dirección del movimiento aumenta la energía cinética. (b) Una fuerza opuesta a la dirección del movimiento disminuye la energía cinética.

Cuando una fuerza actúa durante cierto tiempo, produce un impulso que cambia el momento del objeto. En contraste, la *distancia* a través de la cual actúa la fuerza determina cuánto cambia la energía cinética. El producto de la fuerza *F en la dirección del movimiento* y la distancia recorrida *d* se conoce como el **trabajo** *W*:

trabajo = fuerza × distancia recorrida ➤

$$W = Fd$$

A partir de la definición de trabajo, concluimos que las unidades de trabajo son newton-metros. Si sustituimos nuestra expresión anterior para un newton ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$), hallamos que un newton-metro ($\text{N} \cdot \text{m}$) es igual a $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$, lo cual es lo mismo que las unidades para la energía; es decir, un joule. Por lo tanto, las unidades de trabajo son iguales que las de la energía. En el sistema que se emplea en EUA, las unidades de trabajo son pie-libras.

La segunda ley de Newton y nuestras expresiones para la aceleración y la distancia recorrida se combinan con la definición de trabajo para demostrar que el trabajo efectuado sobre un objeto es igual al cambio en su energía cinética:

trabajo efectuado = cambio en energía cinética ➤

$$W = \Delta KE$$

Si la fuerza neta está en la misma dirección que la velocidad, el trabajo es positivo, y la energía cinética aumenta. Si la fuerza neta y la velocidad tienen direcciones opuestas, el trabajo es negativo, y la energía cinética disminuye.

Fuerzas que no trabajan

El significado de *trabajo* en la física es diferente del uso común de la palabra. Las personas suelen hablar de “jugar” cuando lanzan una pelota y de “trabajar” cuando estudian física. La definición de trabajo en la física es muy precisa: ocurre un trabajo cuando el producto de la fuerza y la distancia es diferente de cero. Cuando usted lanza una pelota, en realidad hace un trabajo sobre la pelota; aumenta su energía cinética porque aplica una fuerza sobre una distancia. Aunque puede mover páginas y lápices mientras estudia física, la cantidad de trabajo es muy pequeña.

Asimismo, si sostiene una maleta sobre su cabeza durante 30 minutos, es probable que afirme que fue un trabajo difícil. Sin embargo, de acuerdo con la definición de la física, no hizo ningún trabajo en la maleta; los 30 minutos de esfuerzo y gruñidos no cambiaron la energía cinética de la maleta. Una mesa pudo sostener la maleta de la misma manera. Sin embargo, su cuerpo hace un trabajo fisiológico porque los músculos en sus brazos no se inmovilizan en su lugar, sino más bien se

Distancias de paro para automóviles

Los datos para la distancia de paro que contienen los manuales de conductor no parecen tener una pauta sencilla, aparte de que entre más rápido maneje usted, más tiempo tarda en detenerse. Por ejemplo, el manual del conductor para el estado de Montana afirma que se requieren cuando menos 186 pies para detener un automóvil que viaja a 50 mph y sólo 65 pies para un vehículo que avanza a 25 mph. ¿Por qué la distancia de paro es un tercio de la que se requiere cuando la velocidad es la mitad? Además, estas tablas no mencionan el tamaño del automóvil.

La energía cinética de un vehículo depende de su rapidez y su masa. Cuando se aplican los frenos, las almohadillas frenan las ruedas, las cuales a su vez aplican una fuerza sobre la carretera. La fuerza de reacción de la carretera sobre el carro trabaja sobre éste, y reduce su energía cinética a cero. Para detenerlo, el trabajo total efectuado sobre el carro debe ser igual a su energía cinética inicial.

La fuerza friccional entre los neumáticos y el camino depende de la masa del vehículo y si ruedan o se deslizan. (Un deslizamiento reduce mucho la fuerza friccional.) La fuerza de la fricción no cambia mucho para diversos tipos de neumáticos o superficies del camino, siempre y cuando el camino no esté mojado o helado. Debido a que la fuerza friccional y la energía cinética son proporcionales a la masa del carro, la distancia de paro es independiente de la masa del vehículo. De modo que la distancia que recorre el vehículo después que se aplican los frenos depende casi por completo de su rapidez.

Las distancias en las tablas de un manual de conductor incluyen la distancia recorrida durante aproximadamente 1 segundo de tiempo de reacción, además de la distancia requerida para que los frenos detengan el automóvil. A 50 mph el auto viaja a 74 pies por segundo, de modo que la distancia requerida para detenerlo una vez que se aplican los frenos es 186 pies $-$ 74 pies $=$ 112 pies.

Debido a que la energía cinética del automóvil cambia con el cuadrado de su velocidad, un auto que se desplaza a 25 mph sólo tiene una cuarta parte de la energía cinética de uno que viaja a 50 mph. Debido a que requiere sólo una cuarta parte del trabajo para detener el vehículo, la fuerza deberá actuar sólo durante un cuarto de la distancia. Un automóvil que viaja a 25 mph puede detenerse en $\frac{1}{4} \times$ 112 pies $=$ 28 pies. Durante el tiempo de reacción de 1 segundo, el vehículo viaja $\frac{1}{2} \times$ 74 pies $=$ 37 pies adicionales, de modo que la distancia total de paro es 28 pies $+$ 37 pies $=$ 65 pies. Las distancias de paro para otras velocidades se presentan en la tabla.

Distancias de paro para automóviles que viajan con una rapidez específica

Rapidez		Distancia de paro		
(mph)	(pies/s)	Reacción (pies)	Frenado (pies)	Total (pies)
10	15	15	5	20
20	29	29	18	47
30	44	44	40	84
40	59	59	72	131
50	74	74	112	186
60	88	88	161	249
70	103	103	220	323
80	117	117	287	404
90	132	132	363	495
100	147	147	448	595

crispan en respuesta a los impulsos nerviosos. Este trabajo se revela como calor (evidenciado por su sudor) y no como un cambio en la energía cinética de la maleta.

Existen otras situaciones en las cuales una fuerza neta no cambia la energía cinética de un objeto. Si la fuerza se aplica en una dirección perpendicular a su movimiento, la velocidad del objeto cambia, pero su rapidez no. Por lo tanto, la energía cinética no cambia. La definición de trabajo toma esto en cuenta al afirmar que sólo puede efectuar un trabajo la fuerza que actúa sobre la dirección del movimiento.

A menudo, una fuerza no es paralela ni perpendicular al desplazamiento de un objeto. Debido a que esta fuerza es un vector, podemos considerar que tiene dos componentes, uno paralelo y uno perpendicular al movimiento, como se ejemplifica en la figura 6-4. El componente paralelo trabaja, pero el perpendicular no hace ningún trabajo.

Considere un disco de hockey de aire que se mueve en un círculo en el extremo de una cuerda fijada al centro de la mesa que aparece en la figura 6-5. Debido a que la rapidez es constante, la energía cinética también es constante. La fuerza de gravedad se equilibra con la fuerza hacia arriba de la mesa. Estas fuerzas verticales se cancelan entre sí y no hacen ningún trabajo. La tensión que ejerce la cuerda sobre el disco no se cancela, pero no trabaja porque siempre actúa perpendicular a la dirección del movimiento.

Si la órbita de la Tierra fuera un círculo con el Sol en el centro, la fuerza gravitacional que ejerce el Sol sobre la Tierra no haría un trabajo, la Tierra tendría una energía cinética constante y, por lo tanto, una rapidez constante. Sin embargo,

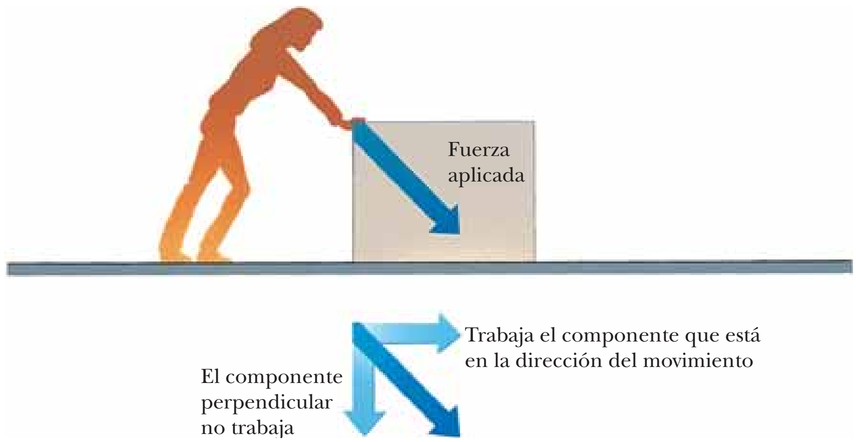


Figura 6-4 Dos fuerzas componentes perpendiculares pueden reemplazar cualquier fuerza. Sólo el componente que está en la dirección del movimiento trabaja sobre la caja.

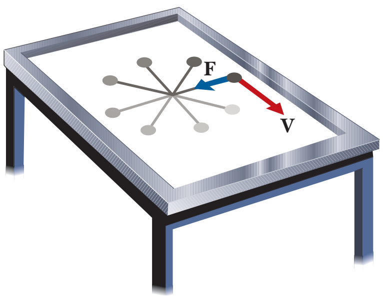


Figura 6-5 Cuando la fuerza es perpendicular a la velocidad, la fuerza no trabaja.

debido a que la órbita es una elipse, la fuerza no siempre es perpendicular a la dirección del movimiento (figura 6-6) y, por lo tanto, no trabaja sobre la Tierra. Durante una mitad de cada órbita, un pequeño componente de la fuerza actúa en la dirección del movimiento, y aumentan la energía cinética y la rapidez de la Tierra. Durante la otra mitad de cada órbita, el componente está en la dirección opuesta al movimiento y disminuyen la energía cinética y la rapidez de la Tierra.

Energía gravitacional potencial

✓ MATEMÁTICAS

Cuando se lanza una pelota verticalmente, tiene cierta cantidad de energía cinética que desaparece conforme asciende. En la parte superior de su vuelo, no tiene energía cinética, pero mientras cae, la energía cinética reaparece. Si consideramos que la energía es una constante, nos hace falta una o más formas de energía.

La pérdida y la reaparición de la energía cinética de la pelota se comprenden al examinar el trabajo efectuado sobre la pelota. Cuando la pelota asciende, la fuerza de gravedad realiza un trabajo negativo sobre la pelota y reduce su energía cinética hasta que llega a cero. Cuando baja, la fuerza de gravedad aumenta la energía cinética de la pelota por la misma cantidad que perdió cuando subía. En vez de simplemente afirmar que la energía cinética desaparece temporalmente, podemos retener la idea de la conservación de la energía al definir una nueva forma de energía. En tal caso, la energía cinética se transforma a esta nueva forma y después regresa a su forma original. Esta nueva energía se llama **energía gravitacional potencial**.

Tenemos algunos indicios para la expresión de esta nueva energía. Su cambio también debe obtenerse del trabajo efectuado por la fuerza de gravedad, y debe aumentar cuando disminuye la energía cinética, y viceversa. Por lo tanto, definimos la energía gravitacional potencial de un objeto como una altura *h* sobre algún nivel cero como igual al trabajo efectuado por la fuerza de gravedad sobre el objeto cuando cae a la altura cero. Entonces, la energía gravitacional potencial (*GPE*) de un objeto cerca de la superficie terrestre se obtiene mediante

energía gravitacional potencial = fuerza de gravedad × altura ➤

$$GPE = mgh$$

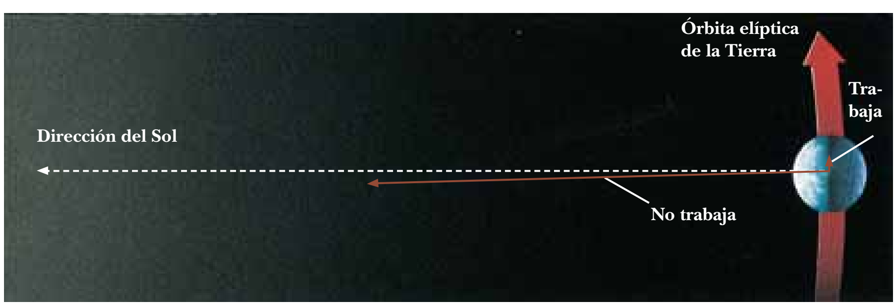


Figura 6-6 La fuerza gravitacional del Sol trabaja sobre la Tierra cuando la fuerza no es perpendicular a la velocidad de la Tierra. La naturaleza elíptica de la órbita se ha exagerado para presentar el componente paralelo.

Por ejemplo, podemos calcular la energía gravitacional potencial de una pelota de 6 kilogramos que está a 0.5 metro sobre el nivel que decidimos llamar cero:

$$GPE = mgh = (6\text{ kg})(10\text{ m/s}^2)(0.5\text{ m}) = 30\text{ J}$$

Observe que sólo es importante el componente vertical. Mover 100 metros hacia un lado un objeto no cambia la energía gravitacional potencial porque la fuerza de gravedad es perpendicular al movimiento y por lo tanto, no trabaja sobre el objeto.

Pregunta ¿Cuál es el cambio en la energía gravitacional potencial de una persona de 50 kilogramos que asciende un tramo de escaleras que tiene una altura de 3 metros y una medida horizontal de 5 metros?

Respuesta El cambio en la energía gravitacional potencial es

$$GPE = mgh = (50\text{ kg})(10\text{ m/s}^2)(3\text{ m}) = 1500\text{ J}$$

La medida horizontal no afecta la respuesta.

La magnitud de la energía gravitacional potencial que posee un objeto es una cantidad relativa. Su valor depende de cómo definimos la altura: es decir, cuál altura tomamos como el valor cero. Elegimos medir la altura desde cualquier lugar que sea conveniente. Lo único que tiene importancia física es el *cambio* en la energía gravitacional potencial. Si una pelota adquiere 20 joules de energía cinética mientras cae, debe perder 20 joules de energía gravitacional potencial. No importa cuánta energía gravitacional potencial tenía al principio; lo único que tiene cierto significado en la física es la cantidad perdida.

Razonamiento defectuoso

Bill y Will calculan la energía gravitacional potencial de una pelota de 5 newtons sostenida 2 metros sobre el suelo del salón de clases.

Bill: “Esto es fácil. La energía gravitacional potencial es *mgh*, donde *mg* es el peso de la pelota. Sólo multiplicamos los 5 newtons por los 2 metros para obtener la energía gravitacional potencial de 10 joules.”

Will: “Olvidas que nuestro salón de clases está en el segundo piso. Debemos determinar qué tan alta está la pelota en relación con el suelo.”

¿Coincide usted con uno de estos estudiantes?

Respuesta Lo único que importa es la diferencia en la energía gravitacional potencial. Podemos decir que la pelota cayó de una altura de 2 metros a una altura de cero, o podemos decir que cayó de una altura de 5 metros (en relación con el suelo) a una altura de 3 metros. De cualquier modo, obtenemos la misma reducción en la energía gravitacional potencial y el mismo aumento en la energía cinética. Las respuestas de ambos estudiantes serían correctas. En general, suele ser más fácil para cada problema tomar como cero el punto más bajo de la altura.

Conservación de la energía mecánica

✓ MATEMÁTICAS

En algunas situaciones, se conserva la suma de las energías gravitacional potencial y cinética. Esta suma se llama la **energía mecánica** (*ME*) del sistema:

$$ME = KE + GPE = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

energía mecánica = energía cinética + energía gravitacional potencial

Cuando se pueden ignorar las fuerzas friccionales y las otras fuerzas no gravitacionales no realizan ningún trabajo, la energía mecánica del sistema no cambia. El

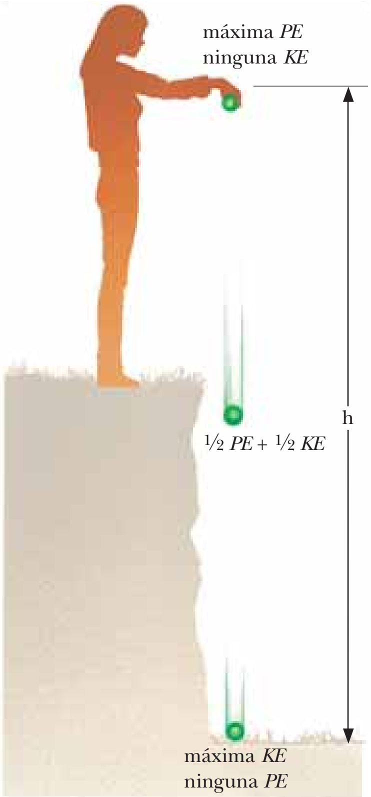


Figura 6-7 Cuando cae una pelota, la energía mecánica se conserva; cualquier pérdida en la energía gravitacional potencial aparece como una ganancia en la energía cinética.

ejemplo más sencillo de esta circunstancia es la caída libre (figura 6-7). Cualquier disminución en la energía gravitacional potencial se presenta como un incremento en la energía cinética, y viceversa.

Apliquemos la conservación de la energía mecánica para analizar una situación idealizada, analizada por primera vez por Galileo. Galileo soltaba una pelota que rodaba hacia abajo por una rampa, seguía un pista horizontal, y ascendía otra rampa, igual que la figura 6-8. Señaló que la pelota siempre regresaba a su altura original. Desde un punto de vista de energía, daba a la pelota cierta energía gravitacional potencial inicial al colocarla a cierta altura arriba de la rampa horizontal. Cuando la pelota bajaba por la primera rampa, su energía gravitacional potencial se transformaba a energía cinética. El ascenso por la rampa del otro lado invertía este proceso; la energía cinética de la pelota se volvía a convertir en energía gravitacional potencial. La pelota seguía moviéndose hasta que su energía cinética se volvía a convertir por completo en energía gravitacional potencial, lo cual ocurría cuando llegaba otra vez a su altura original. Este resultado es independiente de las pendientes de las rampas.

Durante la porción horizontal del viaje de la pelota, la energía gravitacional potencial se mantenía constante. Por lo tanto, la energía cinética no cambiaba y la rapidez permanecía constante, de acuerdo con la primera ley de Newton.

El plomo del péndulo exhibido en la figura 6-9 gana y pierde energía cinética y energía gravitacional potencial de manera cíclica. Observe que no trabaja la tensión que ejerce la cuerda. Por lo tanto, si ignoramos las fuerzas friccionales, se conserva la energía mecánica total. Suponga que al principio, el plomo tiene una rapidez cero en el punto A y una energía gravitacional potencial de 10 joules. (Hemos elegido que el cero para la energía gravitacional potencial esté en el punto más bajo de la trayectoria del plomo.) Debido a que la energía cinética es cero, la energía mecánica total es igual que la energía gravitacional potencial; es decir, 10 joules.

El plomo se suelta. Mientras oscila hacia abajo, pierde energía gravitacional potencial y gana energía cinética. La energía gravitacional potencial es cero en el punto más bajo de la oscilación, y de ese modo la energía mecánica es toda cinética y es igual a 10 joules. El plomo sigue en movimiento y ahora asciende al otro lado hasta que toda la energía cinética se vuelve a transformar en energía gravitacional potencial. Debido a que la energía gravitacional potencial depende de la altura, el plomo debe regresar a su altura original. Y el movimiento se repite.

Pregunta Suponga que el plomo se suelta al doble de la altura. ¿Cuál es la energía cinética máxima?

Respuesta La energía gravitacional potencial inicial es ahora el doble, de modo que la energía cinética máxima también será el doble; es decir, 20 joules.

Incluso cuando el plomo está en algún lugar entre los puntos más alto y más bajo de la oscilación, la energía mecánica total todavía es de 10 joules. Si en este punto determinamos, por la altura del plomo, que tiene 6 joules de energía gravi-

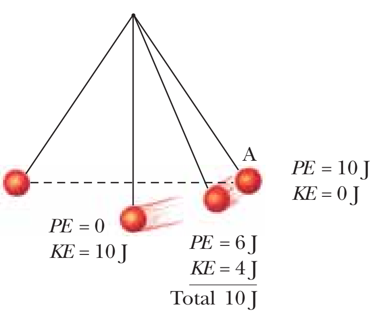


Figura 6-9 La energía mecánica total (cinética más gravitacional potencial) se mantiene igual en 10 joules.

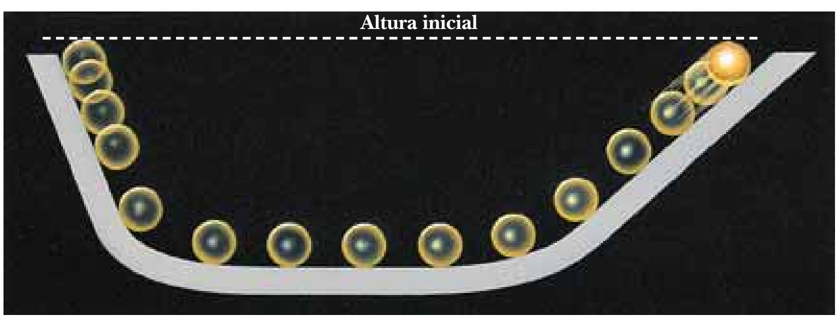


Figura 6-8 El experimento con dos rampas de Galileo se puede analizar en términos de la conservación de la energía.

tacional potencial, de inmediato podemos declarar que tiene 4 joules de energía cinética. Debido a que conocemos la expresión para la energía cinética, podemos calcular la rapidez del plomo en este punto.

FÍSICA | **HÁGALO USTED MISMO**

Construya un péndulo sencillo. Si lo deja oscilar libremente, regresa a su altura original. Si coloca un lápiz en la trayectoria de la cuerda, como se aprecia en la figura 6-10, ¿el plomo todavía oscilará a su altura original? ¿Su resultado depende de la altura vertical de la posición del lápiz? Coloque el lápiz cerca del punto más bajo de la oscilación.

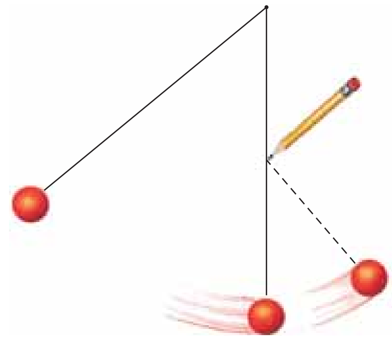


Figura 6-10 ¿A qué altura oscilará el plomo del péndulo?

Montañas rusas

Imagine que intenta determinar la rapidez de un carro rodante que recorre las crestas y los valles de una montaña rusa. Es difícil determinar la rapidez de cualquier punto con la segunda ley de Newton debido a que cambian constantemente la magnitud y la dirección de las fuerzas. Sin embargo, podemos utilizar la conservación de la energía mecánica para determinar la rapidez de un objeto sin conocer los detalles de las fuerzas netas que actúan sobre él, siempre y cuando podamos ignorar las fuerzas friccionales. Si conocemos la masa, la rapidez y la altura del carrito en algún punto, podemos calcular su energía mecánica. Entonces se simplifica mucho determinar su rapidez en cualquier otro punto. La altura nos da la energía gravitacional potencial. Al restarla de la energía mecánica total se calcula la energía cinética de la cual obtenemos la rapidez del carro. Observe que no necesitamos preocuparnos por las transformaciones de energía que ocurrieron antes en el viaje.

Suponga que la montaña rusa fue diseñada como en la figura 6-11, y que al llegar a la parte superior de la colina más baja, el carro casi queda en reposo. Suponiendo que no hay fuerzas friccionales por las cuales preocuparse (lo cual no es cierto en situaciones reales), ¿existe alguna posibilidad de trepar la colina más alta? La respuesta es no. La energía gravitacional potencial en la parte superior de la colina es casi igual a la energía mecánica. Esta energía no basta para trepar la colina más alta. El carro ganará rapidez y, por lo tanto, energía cinética cuando baje la colina, pero cuando comience a trepar por la otra colina, será evidente que no puede ir más allá de la altura de la colina original.

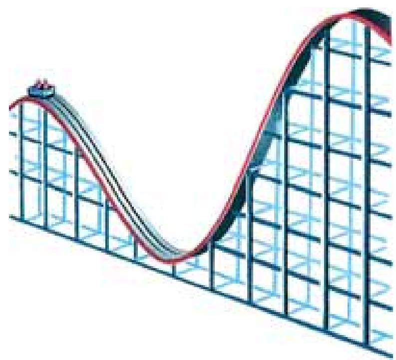


Figura 6-11 El carro no tiene energía gravitacional potencial suficiente para trepar la colina más alta.

La energía mecánica del carro de la montaña rusa se conserva si no se toman en cuenta las fuerzas friccionales.

Pregunta ¿Existe algún modo de que el carro pueda trepar la segunda colina si comienza en la parte superior de la primera colina?

Respuesta Sí. Si el carro tiene cierta energía cinética en la parte superior de la primera colina, puede llegar hasta arriba en la segunda. Se necesita suficiente energía cinética para igualar o exceder la energía gravitacional potencial adicional requerida para trepar por la segunda colina.

Nuestro uso de la conservación de la conservación de la energía mecánica es limitado porque ignoramos las pérdidas debidas a las fuerzas friccionales y, en muchos casos, esto no es realista. Estas fuerzas friccionales hacen un trabajo sobre el carro y, por lo tanto, consumen una parte de su energía mecánica. Sin embargo, si conocemos la magnitud de estas fuerzas friccionales y las distancias sobre las cuales actúan, podemos calcular la energía transformada a otras formas y admitir la pérdida de energía mecánica.

¿Adónde va la energía consumida? Tendremos que esperar para obtener la respuesta a esta pregunta. Para mantener la noción de que la energía es una constante, tendremos que buscar otras formas de energía.

Razonamiento defectuoso

La pregunta siguiente aparece en un examen final: "Tres osos lanzan rocas idénticas desde un puente hacia un río que está debajo. Papá Oso lanza su roca hacia arriba en un ángulo de 30 grados sobre la horizontal. Mamá Osa lanza la suya de manera horizontal. Bebé Oso lanza la roca en un ángulo de 30 grados bajo la horizontal. Suponiendo que los tres osos lanzan con la misma rapidez, ¿cuál roca viajará más rápido cuando llegue al agua?" Tres estudiantes se reúnen después del examen y analizan sus respuestas.

Emma: "La roca de Bebé Oso irá más rápido porque empieza con un componente de velocidad hacia abajo."

Héctor: "Pero la roca de Papá Oso permanecerá más tiempo en el aire, por lo que tendrá más tiempo para acelerar. Creo que su roca será la que viaje más rápido."

M'Lynn: "La roca de Papá Oso permanece más tiempo en el aire, pero parte de ese tiempo se mueve hacia arriba y frena. Creo que la roca de Mamá Osa viajará más rápido cuando toque el agua porque está más tiempo en el aire que la de Bebé Oso y acelera todo el tiempo."

¿Con la respuesta de cuál estudiante está usted de acuerdo?

Respuesta Los tres estudiantes están equivocados. Vuelven muy difícil un problema fácil al ignorar el poder del método de la energía para resolverlo. Debido a que cada una de las tres rocas comenzó con la misma energía cinética (misma rapidez) y la misma energía gravitacional potencial (misma altura), todas deben terminar con la misma energía cinética final antes de chocar con el agua. Por lo tanto, las tres rocas deben tocar el agua con la misma rapidez. Observe que las tres rocas no tocarán el agua al mismo tiempo, ni con la misma velocidad, ni desde la misma distancia del puente. Sin embargo, el método de la energía no nos dará esta información.

Otras formas de energía

Podemos identificar otros lugares donde se guarda temporalmente la energía cinética. Por ejemplo, una pelota en movimiento puede comprimir un resorte y perder su energía cinética (figura 6-12). Mientras el resorte está comprimido, conserva la energía de manera muy parecida a la pelota de la situación gravitacional. Si

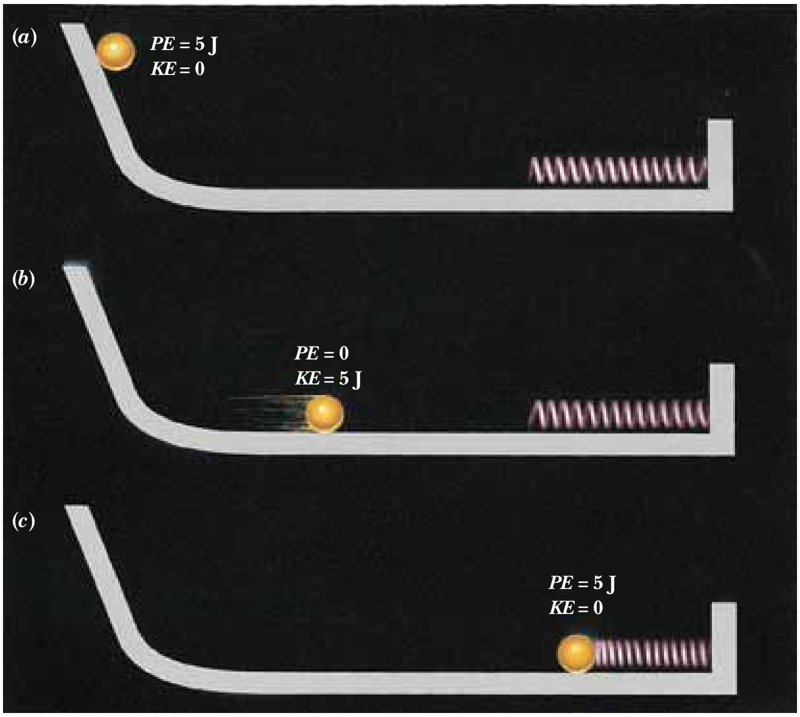


Figura 6-12 La energía gravitacional potencial: (a) se convierte en energía cinética, (b) la cual, a su vez, se convierte en la energía elástica potencial del resorte (c).

aseguramos el resorte mientras está en el estado comprimido, podemos guardar su energía indefinidamente como energía elástica potencial. Su liberación en una fecha futura convertirá otra vez la energía elástica potencial del resorte en la energía cinética de la pelota.

Pregunta Cuando se cuelga una pelota de un resorte vertical, lo estira. Conforme baja, pierde energía gravitacional potencial, pero esto no se presenta como energía cinética. ¿Qué le ocurre a la energía gravitacional potencial?

Respuesta La energía gravitacional potencial se convierte en la energía cinética y la energía elástica potencial del resorte. En la parte inferior, está toda la energía elástica potencial.

Un ejemplo emocionante de esto es el salto en caída libre. Se sujeta con firmeza una cuerda en los tobillos de un saltador, quien se lanza de cabeza desde una plataforma muy alta. Conforme el saltador cae, la energía gravitacional potencial se convierte en energía cinética. Cuando la cuerda se tensa y estira, la energía cinética y un poco de la energía gravitacional potencial adicional se convierten en energía elástica potencial. Cuando la cuerda alcanza su estiramiento máximo, el saltador rebota hacia arriba en el aire porque gran parte de la energía elástica potencial se convierte otra vez en energía cinética y gravitacional potencial. Después de varios rebotes, se baja al saltador hasta el suelo. Observe que si no hubiera pérdida de energía mecánica, ¡el saltador rebotaría para siempre!

Cuando una fuerza los distorsiona, muchos objetos o materiales conservan cierta energía elástica potencial como resultado de las distorsiones. Un piso cede cuando saltamos sobre él. Nuestra energía cinética en el impacto se transforma, en parte, en la energía elástica potencial del piso. Conforme el piso recobra su forma original, recuperamos una parte de esta energía cinética. En estos casos, una parte de la energía mecánica (tal vez, casi toda) se pierde en los efectos de disipación de la distorsión.

Hemos descrito una energía gravitacional potencial asociada con la fuerza gravitacional. Otras energías potenciales se asocian con otras fuerzas en la naturaleza. La energía elástica potencial en un resorte se debe a las fuerzas electromag-

Mientras cae el saltador de caída libre, la energía gravitacional potencial se convierte en energía cinética.

Crecimiento exponencial

El uso de la energía en Estados Unidos ha aumentado a una tasa de cerca de 5% anual durante las décadas anteriores. A primera vista, esto suena relativamente inofensivo, pero no se engañe. Todo lo que aumenta en proporción a su tamaño actual se sale de control. Este tipo de crecimiento se llama *crecimiento exponencial*, y ya sea una cuenta bancaria, el uso de la energía, o la población, sigue la misma pauta. Esta pauta se ejemplifica con un relato sencillo de un matemático creativo.

Dice la leyenda que un matemático en la antigua India inventó el juego del ajedrez. El gobernante de la India estaba tan complacido que permitió al matemático elegir su propia recompensa. Este inteligente personaje descartó las recompensas obvias de oro y joyas, y en lugar de eso pidió granos de trigo. Su plan era poner un grano en el primer cuadro del tablero, y después duplicar el número de granos en cada cuadro sucesivo, de modo que habrían dos granos de trigo en el segundo cuadro, cuatro granos en el tercero, y así sucesivamente. Usted puede determinar la cantidad en cada cuadro con una simple calculadora. Sólo comience con el primer grano y siga multiplicando por dos, 64 veces.

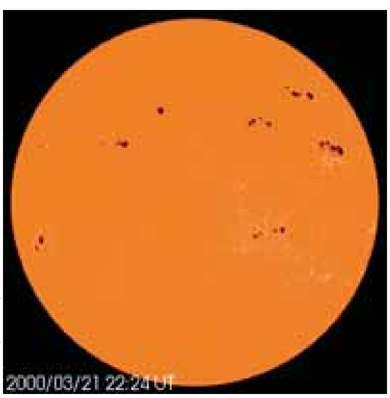
Al final de la primera fila, hay 128 granos en el 8o. cuadro (figura A). No son muchos. Para el final de la segunda fila, el matemático sólo tiene trigo suficiente para hacer algunos panes. Pero, ¿qué sucede si continuamos esta pauta de duplicación? La fotografía de la figura B es sólo simbólica, porque el número de granos en el 64o. cuadro es de alrededor de ¡900 cuatrillones! Y el gran total es ¡el doble de esto! Esa cifra es aproximadamente 500 veces la cantidad de trigo cultivado

© Larry D. Kirkpatrick

Figura A El 8o. cuadro tiene 128 granos de trigo.

© Bohuslav Mayer/Dreamstime

Figura B El 64o. cuadro tiene 900 cuatrillones de granos de trigo. Por supuesto, la fotografía sencillamente es simbólica.



© SOHO/NASA/ESA

El Sol es un enorme almacén de energía nuclear.

néticas (eléctricas y magnéticas). También existen otras formas de energía electromagnética potencial. La energía química en realidad es sólo una energía potencial asociada con la fuerza electromagnética.

La transformación de estas diversas formas de energía potencial a energía cinética es lo que energiza nuestra civilización. La energía gravitacional potencial del agua detrás de las presas energiza las plantas hidroeléctricas; la de un plomo hace funcionar los relojes antiguos. Casi toda la energía que utilizamos todos los días es el resultado de liberar la energía química potencial de combustibles fósiles. Las plantas de energía nucleares están diseñadas para liberar la energía nuclear potencial. La energía nuclear potencial es la fuente final de la energía que recibimos del Sol.

Hemos definido diversas energías potenciales para explicar las pérdidas temporales de energía. Sin embargo, esta explicación no se aplica a situaciones que incluyen fricción. Para comprender la física de la fricción, considere lo siguiente. Hacemos que una caja se deslice sobre el piso con cierta cantidad de energía cinética. Mientras frena y llega a detenerse, su energía cinética disminuye y finalmente en todo el mundo durante un año y es probable que sea más trigo que el cultivado durante toda la historia de la humanidad.

La pauta es muy importante. El proceso de duplicación comienza muy lento: un crecimiento leve, un tanto inocente, que termina por salirse de las manos. La leyenda concluye con la decapitación del matemático alrededor del 35o. cuadro, cuando se agotaron los graneros del país.

Existen otros ejemplos de crecimiento exponencial. Considere el interés compuesto que usted gana en una cuenta de ahorros. Suponga que el banco le ofrece una tasa de interés garantizada de 5% anual. Esta pauta de crecimiento es igual que la del ejemplo del ajedrez. Su dinero se duplicará cada cierta cantidad de años y se volverá a duplicar cada vez que transcurra esta cantidad de años. El *tiempo de duplicación* se obtiene al dividir 70 entre la tasa del porcentaje. Para su cuenta de ahorros, esto sería 70/(5%/año), o 14 años. Si deposita $1 en el banco hoy, se duplicará cada 14 años. En 100 años sus descendientes cobrarán $128. Si optan por dejar el dinero en el banco a sus sucesores —por ejemplo, otros 400 años— su $1 inicial se convierte en ¡$64 000 millones! (A los banqueros no les preocupan las cuentas de 500 años de antigüedad, pero están muy conscientes de esta pauta y tienen reglas acerca de las cuentas inactivas.)

En el curso de la historia, el crecimiento de la población mundial ha sido aproximadamente exponencial. De acuerdo con el estimado de Naciones Unidas, la población mundial llegó a 6000 millones en octubre de 1999 y aumenta a una tasa de 1.3% anual. Esto no preocupa casi a nadie, porque parece una tasa de aumento muy baja. Sin embargo, si se mantuviera esta tasa, la población mundial se duplicaría en 55 años para un total de 12 000 millones en 2054. Pocas personas creen que la población mundial en realidad alcance esta cifra a mediados del siglo, porque la tasa de crecimiento disminuye y puede haber bajado a 0.5% (con un tiempo de duplicación de 140 años) para 2050. Si esto ocurre, la población mundial estará entre 9000 y 10 000 millones para 2050.

El crecimiento exponencial puede tener consecuencias muy serias porque los cambios grandes llegan muy rápido. Podemos analizar otro ejemplo para apreciar la naturaleza del problema. Las bacterias son bastante singulares porque se multiplican al dividirse. Suponga que tiene una colonia de bacterias en la cual cada una se divide exactamente en dos al final de cada minuto. Por lo tanto, el tiempo de duplicación es 1 minuto. Suponga además que la botella en que están las bacterias estará exactamente llena al final de 1 hora; es decir, se requerirán 60 duplicaciones para llenar la botella. ¿Cuándo estará la botella a la mitad? En 59 minutos. Si usted fuera una bacteria, ¿cuándo comprendería que se le agota el espacio? Debido a que está leyendo este artículo, suponga que a los 55 minutos reconoce que el crecimiento es exponencial y que ocurrirá un problema importante. En ese momento, la botella estará llena sólo al 3%. ¿Cuánto éxito tendría para convencer a sus compañeras bacterias que sólo les quedan 5 minutos?

Imagine que durante el debate, un adversario argumenta que, con un financiamiento adecuado del gobierno, la colonia puede encontrar más espacio y que, de hecho, lo obtienen. Después de muchos gastos y esfuerzos, localizan tres botellas nuevas. Los recursos se han cuadruplicado. ¿Cuánto tiempo más puede continuar el crecimiento? La respuesta es sólo 2 minutos más.

La cuestión de esta discusión es comprender nuestro uso actual de la energía. Es evidente que no podemos permitir que nuestro uso crezca exponencialmente. Aunque existen variaciones considerables en los estimados de los recursos de energía no renovables del mundo, todos los estimados carecerán de importancia si continúa el crecimiento exponencial. ¿Existe realmente alguna diferencia si hemos subestimado estos recursos por un factor de dos, o incluso de cuatro? No. Si seguimos aumentando el uso de estos recursos, incluso por un porcentaje mínimo cada año, se agotarán rápidamente. Durante el siguiente tiempo de duplicación, usaremos tanta energía como la utilizada por la humanidad hasta el presente.

Fuente: A. A. Bartlett, "Forgotten Fundamentals of the Energy Crisis", *The Physics Teacher* 46 (1978): 876.

llega a cero. Podríamos imaginar que esta energía se conservó en alguna forma de "energía friccional potencial". Si éste fuera el caso, de algún modo podríamos liberar esta energía friccional potencial, y la caja se movería sobre el suelo y ganaría energía cinética de manera continua. Esto no ocurre. Como analizaremos en el capítulo 9, cuando actúan fuerzas friccionales, una parte de la energía cambia de forma y aparece como energía térmica.

¿La conservación de la energía es un engaño?

Puede parecer extraño que cada que descubrimos una situación en la cual parece que no se conserva la energía, inventamos una nueva forma de energía. ¿Cómo puede tener validez la ley de la conservación si seguimos modificándola dondequiera que parece ser violada? De hecho, todo el procedimiento no tendría validez si no fuera internamente coherente, lo que significa que la cantidad total de energía se mantiene igual, sin importar la secuencia de cambios que ocurra. Esta idea de la coherencia interna impone una restricción bastante fuerte sobre la ley de la conservación de la energía.

Explora tu **mundo**

a través de la mirada de un físico

Considerada como la más fundamental de las ciencias, la física desempeña una función preponderante en prácticamente todo lo que nos rodea, desde la vasta extensión de las estrellas y las galaxias hasta las más diminutas partículas subatómicas: en realidad, todo el universo. *Física: Una mirada al mundo*, edición abreviada, presenta con claridad los conceptos y principios necesarios para comprender cómo se formó la visión del mundo de la física. Con un estilo de redacción accesible que despeja incluso las ideas más abstractas y elusivas, los autores, Larry Kirkpatrick y Gregory Francis, incorporan cuantiosos ejemplos prácticos que exhiben la función de la física en todos los ámbitos.

Las matemáticas sostienen gran parte de la belleza y la fuerza de la física, son la base estructural para la visión del mundo de todos los físicos, es por ello que este texto traduce casi todas las ideas en frases más explicativas y menos complejas.

Diseñada para un curso conceptual de introducción a la física para estudiantes de diferentes campos de las ciencias, las matemáticas o la ingeniería, el objetivo de esta obra es ofrecer una presentación clara y lógica de algunos conceptos y principios básicos de la física en un lenguaje sencillo.

CENGAGE Learning®

http://latinoamerica.cengage.com

ISBN-13: 978-607481843-7
ISBN-10: 607481843-6

9 786074 818437