Feynman Richard. The Feynman Lectures on Physics.
Bogota: Fondo Educativo Interamericano, 1971.

Conservación de la energía

4-1 ¿Qué es la energía?

Habiendo terminado ya nuestra descripción general empezamos en este capitulo un estudio más detallado de los diferentes aspectos de la física. Para ilustrar las ideas y la clase de razonamiento que se puede usar en física teórica, examinaremos una de las leyes más básicas de la física: la conservación de la energía.

Hay un hecho, o si prefiere una *ley*, que gobierna todos los fenómenos naturales conocidos hasta la fecha. No se conoce excepción a esta ley -es exacta hasta donde sabemos-. La ley se llama la *conservación de la energía*. Establece que hay cierta cantidad que llamamos energía, que no cambia en los múltiples cambios que ocurre en la naturaleza. Esta es una idea muy abstracta, porque es un principio matemático; significa que hay una cantidad numérica que no cambia cuando algo ocurre. No es la descripción de un mecanismo, o de algo concreto; ciertamente es un hecho raro que podamos calcular cierto número y que cuando terminemos de observar que la naturaleza haga sus trucos y calculemos el número otra vez, éste será el mismo. (Algo así como el alfil en un cuadro negro, que después de cierto número de movimientos -cuyos detalles son desconocidos- queda en el mismo cuadro. Es una ley de esta naturaleza.) Puesto que ésta es una idea abstracta, ilustraremos su significa-, do mediante una analogía.

Imaginemos un niño, tal vez "Daniel el Travieso", que tiene unos bloques que son absolutamente indestructibles, que no pueden dividirse en partes. Cada uno es igual al otro. Supongamos que tiene 28 bloques. Su madre lo coloca con los 28 bloques en una pieza al comenzar el día. Al final del día, por curiosidad, ella cuenta los bloques con mucho cuidado, y descubre una ley fenomenal -haga lo que haga con los bloques, ¡siempre quedan 28! Esto continúa por varios días, hasta que un día hay sólo 27 bloques, pero una pequeña investigación demuestra que hay uno bajo la alfombra -ella debe mirar por todas partes para estar segura de que el número de bloques no ha cambiado-. Un día, sin embargo, el número parece cambiar -hay sólo 26 bloques-. Una cuidadosa investigación indica que la ventana estaba abierta, y al mirar hacia afuera se encontraron los otros dos bloques. Otro día, una cuidadosa cuenta indica que ¡hay 30 bloques! Esto causa una gran consternación, hasta que se sabe que Bruce vino a visitarlo, trayendo sus bloques consigo y que dejó unos pocos en la casa de Daniel. Después de separar los bloques adicionales cierra la ventana, no deja entrar a Bruce. y entonces todo anda bien, hasta que una vez cuenta y encuentra sólo 25 bloques. Sin embargo, hay una caja en la pieza, una caja de juguetes, y la madre se dirige a abrir la caja de juguetes, pero el niño dice: "No, no abras mi caja de juguetes", y chilla. A la madre no le estaba permitido abrir la caja de juguetes. Como es extremadamente curiosa, y algo ingeniosa, inventa un ardid. Sabe que un bloque pesa cien gramos, así que pesa la caja cuando ve 28 bloques y encuentra 500 gramos. En seguida desea comprobar, pesa la caja de nuevo, resta 500 gramos y divide por cien. Ella descubre lo siguiente:

$$\begin{pmatrix}\text{número de}\\ \text{bloques vistos}\end{pmatrix}+\frac{\text{(peso de la caja) - 500 gramos}}{\text{100 gramos}}=\text{constante} \qquad (4.1)$$

En seguida parece que hubiera algunas nuevas desviaciones, pero un estudio cuidadoso indica que el agua sucia de la bañera está cambiando de nivel. El niño está lanzando bloques al agua y ella no puede verlos porque está muy sucia, pero puede saber cuántos bloques hay en el agua agregando otro término a su fórmula. Ya que la altura original del agua era de 15 centímetros y cada bloque eleva el agua medio centímetro, esta nueva fórmula seria:

$$\begin{pmatrix}\text{número de}\\ \text{bloques vistos}\end{pmatrix}+\frac{\text{(peso de la caja) - 500 gramos}}{\text{100 gramos}}+\frac{\text{(altura del agua) - 15 cm}}{\text{0,5 centímetros}}=\text{constante} \qquad (4.2)$$

En el aumento gradual de la complejidad de su mundo, ella encuentra una serie completa de términos que representan modos de calcular cuántos bloques están en los lugares donde no le está permitido mirar. Como resultado, encuentra una fórmula compleja, una cantidad que *debe ser calculada*, que en su situación siempre permanece la misma.

¿Cuál es la analogía de esto con la conservación de la energía? El más notable aspecto que debe ser abstraído de este cuadro es que *no hay bloques.* Quítese el primer término en (4.1) y en (4.2) y nos encontraremos calculando cosas más o menos, abstractas. La analogía tiene los siguientes puntos. Primero, cuando estamos calculando la energía, a veces algo de ella deja el sistema y se va y a veces algo entra. Para verificar la conservación de la energía debemos tener cuidado de no agregar ni quitar nada. Segundo, la energía tiene un gran número de *formas diferen*tes, y hay una fórmula para cada una. Estas son: energía gravitacional, energía cinética, energía calórica, energía elástica, energía eléctrica, energía química, energía radiante, energía nuclear, energía de masa. Si hacemos el total de las fórmulas para cada una de estas contribuciones, no cambiará a excepción de la energía que entra y que sale.

Es importante darse cuenta que en la física actual no sabemos lo que la energía es. No tenemos un modelo de energía formada por pequeñas gotas de un tamaño definido. No es así. Sin embargo, hay fórmulas para calcular cierta cantidad numérica, y cuando las juntamos todas nos da "28" – siempre el mismo número –. Es algo abstracto en el sentido que no nos informa el mecanismo o las *razones* para las diversas fórmulas.

4-2 Energía potencial gravitacional

Puede entenderse la conservación de la energía sólo si tenemos la fórmula para todas sus formas. Deseo discutir la fórmula para la energía gravitacional cerca de la superficie de la tierra, y deseo deducir esta formula de un modo que no tiene nada que ver con la historia, sino que es una simple línea de razonamiento inventada para esta lección en particular, esto a fin de darles a ustedes una ilustración del notable hecho que puede extraerse mucho acerca de la naturaleza a partir de unos pocos hechos y con un razonamiento acabado. Es una ilustración de la clase de trabajo que los físicos teóricos realizan habitualmente. Está modelado según el excelente argumento del Sr. Carnot sobre la eficiencia de las máquinas de vapor*.

Consideremos máquinas levantadoras de pesos – máquinas que tienen la propiedad de levantar un peso bajando otro. Hagamos, además, una hipótesis: *que no existe movimiento perpetuo* para estas máquinas levantadoras de pesos. (De hecho, que no exista el movimiento perpetuo es un enunciado general de la ley de la conservación de la energía). Debemos tener cuidado al definir el movimiento perpetuo. En primer lugar hagámoslo para máquinas levantadoras de pesos. Si cuando hemos levantado y bajado muchos pesos y llevado la máquina a su condición original, encontramos que el resultado neto es haber *levantado un peso*, entonces tenemos una máquina de movimiento perpetuo, porque podemos usar el peso levantado para poner en movimiento otra cosa. Es decir, *debe cumplirse* que la máquina que levantó el peso vuelva a su exacta *condición origina*, y además debe ser completamente *independiente* – esto es, que no haya recibido la energía de una fuente externa para levantar el peso – como los bloques de Bruce.

Fig. 4-1. Máquina simple para levantar pesos.

En la figura 4-1 se muestra una máquina muy simple para levantar pesos. Esta máquina levanta pesos de tres unidades de "intensidad". Colocamos tres unidades en un platillo y una unidad en el otro. Sin embargo, a fin de hacerla trabajar realmente, debemos quitar un pequeño peso en el platillo de la izquierda. Por otra parte, podríamos levantar una unidad de peso bajando el peso de tres unidades, si trampeamos un poco quitando algo de peso del otro plato. Por supuesto, nos damos cuenta que con cualquier máquina elevadora *real* debemos agregar una pequeña cantidad extra para lograr su funcionamiento. Esto no lo consideramos, *temporalmente.* Las máquinas ideales, aunque no existen, no necesitan nada extra. Una máquina que usemos en la realidad puede ser, por así decir, casi reversible: esto es, si levanta el peso de tres al bajar el de una, entonces también levantará aproximadamente el peso de una en la misma cantidad al bajar el peso de tres.

Imaginemos que hay dos clases de máquinas, las que *no* son reversibles, que incluyen todas las máquinas reales. y las que son reversibles, que, por supuesto no se consiguen en la realidad a pesar del cuidado que pongamos en el diseño de cojinetes, palancas, etc. Sin embargo, suponemos que existe una cosa tal – una máquina reversible – que baja una unidad de peso (un kilo o cualquier otra unidad) en una unidad de distancia y que al mismo tiempo levanta un peso de tres unidades. Llamemos Máquina *A* a esta máquina reversible. Supongamos que esta máquina reversible particular levante el peso de tres unidades una distancia *X*. A continuación, supongan que tenemos otra máquina, la Máquina *B*, que no es necesariamente reversible, que baja el peso de una unidad en una unidad de distancia, pero que levanta el peso de tres unidades una distancia

* Aquí nuestro objetivo no es tanto el resultado (4.3) el cual de hecho ustedes ya pueden conocer, sirio la posibilidad de llegar a él mediante un razonamiento teórico.

Y. Podernos probar, ahora que *Y* no es más alta que *X:* es decir, que es imposible construir una máquina que levante un peso *más alto* que una máquina reversible. Veamos por qué. Supongamos que *Y* fuera más alta que *X*. Tomemos un peso de una unidad y bajémoslo una unidad de altura con la máquina *B*, con lo que se eleva el peso de tres unidades una distancia *Y*. Entonces podríamos bajar el peso de *Y a X*, *obteniendo energía gratis*. y usar la máquina reversible *A*, funcionando a la inversa, para bajar el peso de tres unidades una distancia *X* y levantar el peso de una unidad en una unidad de altura. ¡Esto retornará el peso de una unidad a donde estaba antes y dejará ambas máquinas listas para ser usadas de nuevo! Por lo tanto, tendríamos movimiento perpetuo si *Y* fuera más alta que *X*, lo que asumimos que era imposible. Con esos supuestos debemos concluir que *Y no es más alta que X*, de modo que de todas las máquinas que puedan diseñarse la máquina reversible es la mejor.

Podemos ver, además, que todas las máquinas reversibles deben levantar hasta *exactamente la misma altura.* Supongan que *B* también fuera reversible. El razona-miento que *Y* no es más alto que *X* es, por supuesto, tan bueno corno antes, pero podemos hacer nuestro razonamiento de otra manera usando las máquinas en orden inverso y probar que *X no es más alto que Y*. Esta es entonces una observación muy notable, ya que nos permite analizar la altura a la cual diferentes máquinas van a levantar un objeto *sin mirar en el interior del mecanismo.* Sabemos de inmediato que si alguien construye una serie enormemente complicada de palancas que levantan tres unidades a una cierta distancia al bajar una unidad en una unidad de distancia, y las comparamos con una palanca simple que hace lo mismo y que es fundamentalmente reversible, su máquina no lo levantará más, sino tal vez menos. Si una máquina es reversible sabemos también exactamente hasta qué altura lo levantará. Para resumir: cada máquina reversible, funcione como funcione, que baje un kilo un metro, y levante un peso de tres kilos, siempre lo levantará la misma distancia *X*. Esta es evidentemente una ley universal de gran utilidad. La pregunta siguiente es. por supuesto, ¿cuánto vale *X*?

Supongan que tenemos una máquina reversible que va a levantar a esta distancia *X*, tres mediante una. Colocamos tres bolas en una estantería fija, tal como muestra la figura 4-2. Se mantiene una bola sobre una plataforma a una distancia de un metro sobre el suelo. La máquina puede levantar tres bolas al bajar una en una distancia 1. Pues bien, hemos dispuesto que la plataforma que sostiene tres bolas tenga un piso y dos repisas, espaciadas exactamente a la distancia *X*, y además, que la estantería que sostiene las bolas están espaciada a la distancia 1 metro

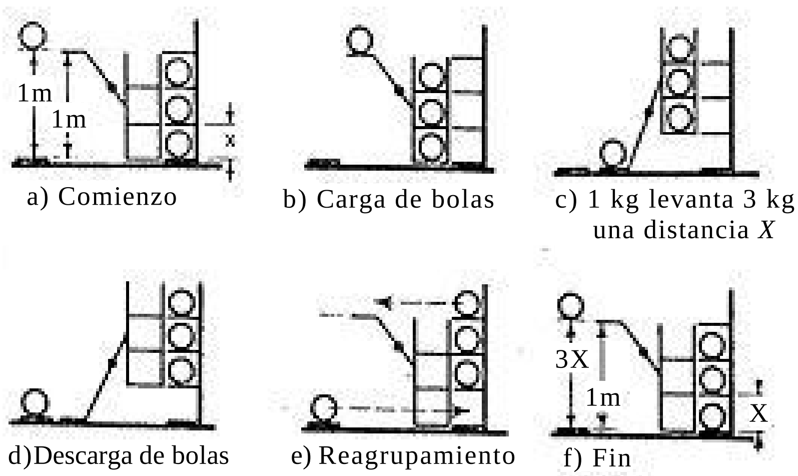

Fig. 4–2. Una máquina reversible.

X. (a). Primero, hacemos rodar horizontalmente las bolas desde la estantería a las repisas. (b), y suponemos que esto no demanda energía, porque no cambiamos la altura. La máquina reversible opera entonces: baja la bola que está sola al suelo y levanta la plata-forma una distancia *X* (c). Más aún, hemos arreglado ingeniosamente la estantería de modo que estas bolas están de nuevo a la par con las repisas. Así descargamos las bolas a la estantería. (d); habiendo descargado las bolas podemos llevar la máquina a su condición original. Tenemos ahora tres bolas en las tres repisas superiores y una en el piso. Pero lo curioso es, por decirlo así, que no hemos levantado de ninguna manera *dos* de ellas, ya que después de todo, antes había bolas en las repisas 2 y 3. El efecto resultante es haber levantado *una bola* la distancia 3*X*. Pues bien, si 3*X* excede un metro, podemos *bajar* la bola para retornar la máquina a la condición inicial (f), y podemos hacer funcionar el aparato de nuevo. Por lo tanto, 3*X*, no puede exceder un metro, porque si 3*X* excediera un metro podríamos realizar movimiento perpetuo. Asimismo, podemos probar que *un metro no puede exceder* a 3*X*, cuando se hace funcionar la máquina al revés, ya que es una máquina reversible. Por lo tanto, *3X no es ni mayor ni menor que un metro*, y entonces hemos descubierto, sólo con razonamientos, la ley $X = {}^1/_3$ metro. La generalización es clara: un kilogramo cae cierta distancia al operar una máquina reversible; entonces la máquina puede levantar *p* kilogramos a esta distancia dividida por *p*. Otra forma de indicar este resultado es que el producto de tres kilogramos por la altura alcanzada, que en nuestro problema era *X*, es igual al producto de un kilogramo por la distancia que fue bajada, que en este caso es un metro. Si tomamos todos los pesos y los multiplicamos por las alturas a las cuales están ahora por sobre el suelo, dejamos que la máquina funcione, y en seguida multiplicamos nuevamente todos los pesos por todas las alturas, no *habrá cambio.* (Tenemos que generalizar este ejemplo en que movemos sólo un peso al caso en que al bajar uno levantamos otros pesos diferentes – pero esto es fácil –.)

Llamamos *energía potencial gravitacional* la suma de los productos pesos por alturas – la energía que tiene un objeto debido a su posición en el espacio con relación a la tierra –. Entonces la fórmula para la energía gravitacional, siempre que no estemos muy lejos de la tierra (la fuerza se debilita a medida que subimos) es

(energía potencial gravitacional para un objeto) = (peso) x (altura) (4.3)

Es una bellísima línea de razonamiento. El único problema es que tal vez no sea verdadera. (Después de todo, la naturaleza *no tiene* por qué marchar con nuestro razonamiento.) Por ejemplo: quizás el movimiento perpetuo sea en efecto posible. Algunos de los supuestos pueden estar equivocados, o podemos haber cometido un error de razonamiento, de modo que siempre es necesario comprobar. En efecto, *resulta experimentalmente* cierto.

El nombre general para la energía que tiene que ver con la posición relativa a alguna otra cosa es energía *potencial.* Por supuesto, en este caso particular la llamamos energía potencial gravitacional. Si es cuestión de fuerzas eléctricas contra las que estamos trabajando, en vez de fuerzas gravitacionales, si estamos "levantando" cargas desde otras cargas, con muchas palancas, entonces el contenido de energía se llama *energía potencial eléctrica.* El principio general es que el cambio en la energía es el producto de la fuerza por la distancia que se desplaza la fuerza, y que esto es en general un cambio en la energía:

(Cambio de energía) = (Fuerza) x (Distancia en que la fuerza actúa)   (4.4)

Volveremos a muchas de estas otras formas de energía a la largo del curso.

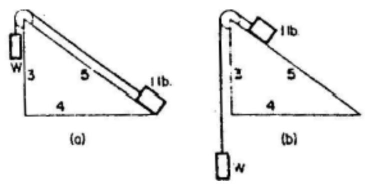

Fig. 4-3. Plano inclinado.

El principio de la conservación de la energía es muy útil para deducir lo que ocurrirá en numerosas circunstancias. En la enseñanza media aprendimos muchas leyes acerca de poleas y palancas usadas de diferentes maneras. Podemos ver ahora que estas "leyes" *son todas la misma cosa,* y que no teníamos necesidad de memorizar 75 reglas para darnos cuenta de ello. Un simple ejemplo es un plano inclinado liso, que por suerte es un triángulo tres-cuatro-cinco (Fig. 4-3). Colgamos el peso de un kilo sobre un plano inclinado con una polea. y un peso *W* al otro lado de la polea. Queremos saber cuánto debe pesar *W* para equilibrar un kilo en el plano. ¿Cómo podemos calcularlo? Si decimos que está justamente equilibrado, es reversible, y así puede moverse hacia arriba y hacia abajo, y podemos considerar la siguiente situación. En la situación inicial (a), el peso de una libra está abajo, y el peso *W* está arriba. Cuando *W* se ha deslizado hacia abajo en forma reversible, tenernos el peso de un kilo arriba y el peso *W* a una distancia deslizada (b), o sea, cinco metros a partir del nivel en que estaba antes.

Nosotros *levantamos* el peso de un kilo solamente *tres* metros y bajamos *W* kilos en *cinco* metros. Por lo tanto, *W* = 3/5 de un kilo. Nótese que hemos deducido esto a partir le la *conservación de la energía y* no a partir de componentes de fuerzas. La habilidad es, sin embargo, relativa. Puede deducirse de una forma que es aún más brillante descubierta por Stevin e inscrita en su tumba. La figura 4-4 explica que debe ser 3/5 de un kilo, porque la cadena no da vuelta. Es evidente que la parte más baja de la cadena está equilibrada por si misma, de modo que la tracción de los cinco pesos por un lado debe equilibrar la tracción de tres pesos por el otro, cualquiera que sea la proporción de los catetos. Ustedes ven, al observar este diagrama, que debe ser 3/5 de kilo. (Si logran un epitafio como éste en su lápida, van por buen camino.)

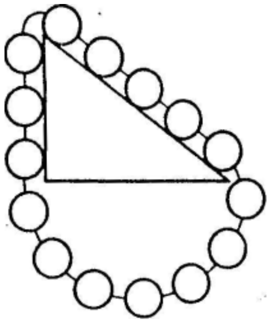

Fig. 4-4. El epitafio de Stevin.

Ilustremos ahora el principio de conservación de la energía con un problema más complicado, el gato de tornillo que se muestra en la figura 4-5. Se usa un mango de 50 centímetros de longitud para girar el tornillo que tiene cuatro hilos por centímetro. Nos gustaría saber cuánta fuerza se necesita en el mango para levantar una tonelada (1000 kilos). Si queremos levantar la tonelada dos centímetros y medio, digamos entonces debemos girar el mango 10 veces. Cuando da una vuelta recorre aproximadamente 314 centímetros. El mango debe así recorrer 3140 centímetros, y si usamos varias poleas, etc., estaríamos levantando nuestra tonelada con un peso menor desconocido *W* aplicado al extremo del mango. Así encontramos que *W* es de aproximadamente 0,8 kilos. Este es un resultado de la conservación de la energía.

Consideremos ahora el ejemplo algo más complicado que se muestra en la figura 4-6. Una varilla o barra de dos metros de longitud está soportada en un extremo. En la mitad de la barra hay un peso de 60 kilos y a una distancia de 50 centímetros del soporte hay un peso de 100 kilos. ¿Cuánta fuerza debemos hacer para levantar el extremo de la barra a fin de mantenerla en equilibrio, despreciando el peso de la barra? Supongamos que ponemos una polea en un extremo y colgamos un peso de la polea. ¿Cuál debe ser el valor del peso *W* (4 kilos /centímetro) para establecer el equilibrio?

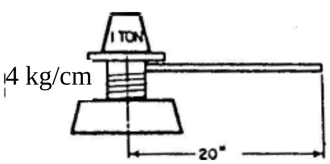

Fig. 4-5. Un gato de Tornillo.

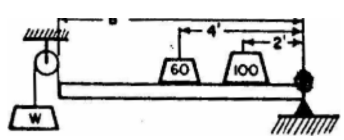

Fig. 4-6. Barra cargada soportada en un extremo.

Imaginemos que el peso cae a una distancia arbitraria — para que sea más fácil para nosotros supongamos que baja cuatro centímetros —; ¿a qué altura se elevarán las dos cargas? El centro se eleva dos centímetros y el punto a un cuarto de la distancia del extremo fijo se eleva un centímetro. Por lo tanto, el principio que la suma de las alturas multiplicadas por los pesos no cambia nos dice que el peso *W* por los cuatro centímetros hacia abajo, más 60 kilos por dos centímetros hacia arriba, más 100 kilos por un centímetro tienen que sumarse para dar cero:

$$- 4W + (2)(6) + (l)(100) = 0, \qquad w = 55 \text{ kg}. \qquad (4.5)$$

Por lo tanto, debemos tener un peso de 55 kilos para equilibrar la barra. De este modo podemos deducir las leyes del “equilibrio” —la estática de complicadas estructuras de puentes, etc. Este método se llama *principio de los trabajos virtuales*, porque para aplicar este argumento tuvimos que *imaginar* que la estructura se nueve un poco —aunque no se mueva *realmente ni* se *pueda mover*—. Usamos el movimiento imaginado muy pequeño para aplicar el principio de conservación de la energía.

4-3 Energía cinética

Para ilustrar otro tipo de energía consideremos un péndulo (Fig. 4-7). Si empujamos la masa hacia un lado y la soltamos, oscila de un lado hacia el otro. En su movimiento pierde altura cuando va desde ambos extremos hacia el centro. ¿A dónde se fue la energía potencial? La energía gravitacional desaparece cuando el cuerpo está abajo; sin embargo, subirá de nuevo. La energía gravitacional debe haberse convertido en otra forma. Evidentemente, es en virtud de su *movimiento* que es capaz de subir de nuevo, de modo que tenemos conversión de energía gravitacional en otra forma cuando el cuerpo llega al fondo.

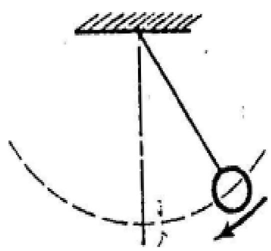

Fig. 4-7. Péndulo.

Debemos obtener una fórmula para la energía de movimiento. Al recordar nuestros argumentos acerca de las máquinas reversibles podemos ver fácilmente que en el movimiento en la parte inferior debe haber una cantidad de energía que le permite subir a cierta altura, y que no tiene nada que ver con el *mecanismo* mediante el cual sube ni con la *trayectoria* según la cual sube. De modo que tenemos una fórmula de equivalencia parecida a la que escribimos para los bloques del niño. Tenemos otra forma de representar la energía. Es fácil decir cuál es. La energía cinética en el fondo es igual al peso multiplicado por la altura que puede alcanzar en correspondencia a su velocidad: E.C. = *WH. Lo* que necesitamos es la fórmula que nos de la altura mediante alguna regla que tenga que ver con el movimiento de los objetos. Si ponemos en marcha algo con cierta velocidad, por ejemplo verticalmente hacia arriba, alcanzará cierta altura; todavía no sabemos cuál es, pero depende de la velocidad -hay una fórmula para eso-. Entonces, para encontrar la fórmula de la energía cinética de un objeto que se mueve con velocidad V, debemos calcular la altura que alcanzaría y multiplicarla por el peso. Encontraremos luego que podemos escribirla de esta manera:

$$\text{E.C.} = WV^2/2g. \qquad (4.6)$$

Por supuesto, el hecho de que el movimiento tenga energía no tiene nada que ver con el de que estemos en un campo gravitacional. No importa *de dónde* vino el movimiento. Esta es una fórmula general, para diversas velocidades. Las fórmulas (4.3) y (4.6) son ambas aproximadas, la primera porque es incorrecta cuando las alturas son grandes, es decir, cuando las alturas son tan grandes que la gravedad se debilita; la segunda debido a la corrección relativista para grandes velocidades. Sin embargo, cuando finalmente obtengamos la fórmula exacta para la energía, entonces la ley de conservación de la energía es correcta.

4-4 Otras formas de energía

Podemos, de este modo, continuar ilustrando la existencia de energía bajo otras formas. Primero, consideremos la energía elástica. Si comprimimos un resorte hacia abajo, debemos hacer cierto trabajo porque, una vez hecho eso, podemos levantar pesos con él. Por lo tanto, en su condición comprimida tiene la posibilidad de hacer cierto trabajo. Si calculáramos las sumas de los productos por las alturas, la ley no se verificaría -debemos agregar algo más para tomar en cuenta el hecho de que el resorte está bajo tensión-. Energía elástica es la receta para un resorte cuando está comprimido. ¿Cuánta energía es? Si soltamos la energía elástica, a medida que el resorte pasa por el punto de equilibrio, se convierte en energía cinética y ésta pasa alternativamente por compresiones o estiramientos del resorte y energía cinética de movimiento. (Hay, además, cierta energía gravitacional que entra y sale, pero podemos hacer este experimento "de costado" si lo deseamos). Se mantendrá en movimiento hasta que frene por pérdidas. ¡Ah! Hemos estado trampeando todo el tiempo, poniendo pequeños pesos para mover cosas, o diciendo que las máquinas son reversibles, o que se mueven permanentemente; pero podemos ver que las cosas se detienen a la larga. ¿Dónde está la energía cuando el resorte ha terminado de moverse de arriba a abajo? Esto introduce *otra* forma de energía: *la energía calórica.*

Dentro de un resorte o de una palanca hay cristales formados por muchos átomos y con gran cuidado y delicadeza en la disposición de las partes uno puede tratar de ajustar las cosas de modo que ruede sobre algo sin que ninguno de los átomos verifique agitación alguna. Pero uno debe tener mucho cuidado. Ordinariamente cuando las cosas ruedan, hay sacudimiento y agitación debido a las irregularidades del material y los átomos comienzan a menearse en el interior. Así perdemos la pista de esa energía; encontramos que los átomos están meneándose en el interior de una manera al azar y confusa después que el movimiento se detuvo. Aún hay energía cinética, por cierto, pero no está asociada a un movimiento visible. ¡Estamos soñando! ¿Cómo *sabemos* que aún hay energía cinética? Resulta que con termómetros pueden encontrar que, de hecho, el resorte o la palanca están *más calientes y* que hay realmente un incremento de la energía cinética en una cantidad definida. Llamamos *energía calórica* a esta energía, pero sabemos que ésta no es realmente una nueva forma, es justamente energía cinética -movimiento interno-. (Una de las dificultades con todos estos experimentos que hacemos con materia a gran escala es que no podemos demostrar realmente la conservación de la energía y no podemos construir realmente nuestras máquinas reversibles, porque en cada momento movemos una gran masa de sustancia y los átomos no permanecen absolutamente imperturbados, y así una cierta cantidad de movimiento al azar ocurre dentro del sistema atómico. No podemos verlo, pero podemos medirlo con un termómetro, etc.)

Hay muchas otras formas de energía y, por supuesto, no podemos describirlas con más detalle ahora. Existe la energía eléctrica, que tiene que ver con el empuje y arrastre de cargas eléctricas. Existe la energía radiante, la energía de la luz, que sabemos es una forma de la energía eléctrica, porque la luz puede representarse como oscilaciones en el campo electromagnético. Existe la energía química, la energía que es liberada en las reacciones químicas. Realmente, la energía elástica es, hasta cierto punto, como la energía química, porque la energía química es la energía de atracción de los átomos, de uno al otro, y así es energía elástica. Nuestro conocimiento moderno es el siguiente: la energía química consta de dos partes, energía cinética de los electrones en el interior de los átomos, así parte de ella es cinética, y energía eléctrica de interacción de los electrones y protones –por lo tanto, el resto de ella es eléctrico –. En seguida llegamos a la energía nuclear, la energía involucrada en el arreglo de las partículas dentro del núcleo, y tenemos fórmulas para eso, pero no tenemos sus leyes fundamentales. Sabemos que no es eléctrica, no es gravitacional y no es puramente química, pero no sabemos lo que es. Parece ser una forma adicional de energía. Finalmente, asociada con la teoría de la relatividad, hay una modificación de las leyes de la energía cinética, o como quieran llamarla, de modo tal que la energía cinética está combinada con otra cosa llamada *energía de masa.* Un objeto tiene energía a partir de su sola *existencia*. Si yo tengo un positrón y un electrón que permanecen quietos sin hacer nada –sin importar la gravedad, sin importar cualquier otra cosa – y se juntan y desaparecen, se libera energía radiante en una cantidad definida, y la cantidad puede calcularse. Todo lo que necesitamos saber es la masa del objeto. No depende de lo que sea –podemos hacer desaparecer dos cosas y obtener cierta cantidad de energía. La fórmula fue encontrada primero por Einstein; ella es: $E = mc^2$.

Es evidente a partir de nuestra discusión que la ley de conservación de la energía es enormemente útil para hacer análisis, tal como lo hemos ilustrado con unos pocos ejemplos sin conocer todas las fórmulas. Si tuviéramos todas las fórmulas para todas las formas de energía, podríamos analizar cuántos procesos deberían verificarse sin tener que entrar en detalles. Por eso las leyes de conservación son muy interesantes. La cuestión que naturalmente surge es qué otras leyes de conservación hay en física. Hay otras dos leyes de conservación que son análogas a la conservación de la energía. Una se llama la conservación del momentum lineal. La otra se llama la conservación del momentum angular. Nosotros averiguaremos más acerca de éstas más adelante. En último análisis no entendemos en profundidad las leyes de conservación. No entendemos la ley de conservación de la energía. No entendemos la energía como cierto número de pequeñas gotas. Puede que hayan oído que los fotones se manifiestan como gotas y que la energía de un fotón es la constante de Planck multiplicada por la frecuencia. Esto es cierto, pero ya que la frecuencia de la luz puede tomar cualquier valor, no hay ninguna ley que diga que la energía tenga que ser una -cierta cantidad definida. A diferencia de los bloques de Daniel puede haber cualquier cantidad de energía, por lo menos como se entiende actualmente. De manera que, por ahora, no entendemos esta energía como contar algo, sino como una cantidad matemática, lo que es una circunstancia abstracta y más bien peculiar. En mecánica cuántica resulta que la conservación de la energía está muy estrechamente relacionada con otra importante pro-piedad del mundo, *las cosas no dependen del tiempo absoluto.* Podemos montar un experimento en un momento dado y probarlo, y luego hacer el mismo experimento en un momento posterior, y él se desarrolla exactamente en la misma forma. Si esto es estrictamente cierto o no, no lo sabemos. Si suponemos que *es* cierto y agregamos los principios de la mecánica cuántica, entonces podemos deducir el principio de la conservación de la energía. Es una cosa más bien sutil e interesante y no es fácil de explicar. Las otras leyes de conservación están también ligadas entre sí La conservación del momentum está asociada en mecánica cuántica con la proposición que no importa *dónde* se haga el experimento; los resultados serán siempre los mismos. Así como la independencia en el espacio tiene que ver con la conservación del momentum, la independencia en el tiempo tiene que ver con la conservación de la energía, y finalmente si *giráramos* nuestros aparatos, esto tampoco implica diferencia, de modo que la invariancia del mundo a la orientación angular está relacionada con la conservación del *momentum angular.* Además de éstas, hay tres leyes de conservación que son exactas hasta donde lo podemos afirmar hoy día, que *son* mucho más simples de entender, porque son del mismo tipo que contar bloques.

La primera de las tres es la *conservación de la carga, y* que sencillamente significa que ustedes cuentan las cargas positivas, menos las cargas negativas que tienen, y el número no cambia nunca. Pueden deshacerse de una positiva con una negativa, pero no crean ningún exceso neto de positivas sobre negativas. Hay otras dos leyes análogas a ésta –una es la llamada *conservación de bariones–.* Hay cierto número de partículas extrañas, son ejemplos un neutrón y un protón, que se llaman bariones. En cualquier reacción en la naturaleza, si contamos cuántos bariones intervienen en un proceso, el número de bariones[*] que resulta será exactamente el mismo. Hay otra ley, *la conservación de leptones.* Podemos decir que ese grupo de partículas llamadas leptones es: el electrón, el meson mu, y el neutrino. Existe un antielectrón, que es un positrón, esto es, -1 leptón. Al contar el número total de leptones en una reacción resulta que el número que entra y sale nunca cambia, al menos por lo que sabemos hasta el presente.

Estas son las seis leyes de conservación, tres de ellas sutiles, involucrando espacio *y* tiempo, *y* tres de ellas simples, en el sentido de contar cosas.

Con relación a la conservación de la energía debiéramos notar que la energía *disponible* es otro asunto – hay mucha agitación de los átomos del agua de mar, puesto que el mar tiene cierta temperatura, pero es imposible reunirlos en un movimiento definido sin tomar energía de cualquier otra parte –. Es decir, aunque sabemos, de hecho, que la energía se conserva, la energía disponible para la utilidad humana no se conserva tan fácilmente. Las leyes que gobiernan la cantidad de energía disponible se llaman *leyes de la termodinámica* y encierran un concepto llamado entropía para los procesos termodinámicos irreversibles.

Finalmente, reparamos en el problema de dónde podemos obtener nuestras fuentes de energía hoy día. Nuestros abastecimientos de energía provienen del sol, la lluvia, el carbón, el uranio y el hidrógeno. El sol forma la lluvia y también el carbón, de modo que todo esto proviene del sol. Aunque la energía se conserva, la naturaleza no parece interesada en ello: libera gran cantidad de energía desde el sol, pero sólo una parte en dos mil millones cae sobre la tierra. La naturaleza conserva la energía, pero, realmente, no le importa; derrocha mucha en todas direcciones. Ya hemos obtenido energía del uranio, podemos obtenerla también del hidrógeno, pero actualmente sólo en una condición explosiva y peligrosa. Si pudiera ser controlada en reacciones termonucleares, resulta que la energía que pueda obtenerse a partir de 10 litros de agua por segundo es igual a toda la potencia eléctrica generada en los Estados Unidos. ¡Con 600 litros de agua corriente por minuto tienen suficiente combustible para abastecer toda la energía que se usa hoy día en los Estados Unidos! Por lo tanto, concierne a los físicos resolver cómo liberarnos de la necesidad de tener energía. Esto puede hacerse.

[*] Contando los antibariones como -1 barión.