

CAPÍTULO 26

ENTROPÍA Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Podemos imaginar muchos procesos que conservan la energía (y por lo tanto satisfacen la primera ley), pero que no llegan a suceder jamás. Por ejemplo, que una taza de café caliente ceda algo de energía interna a energía rotatoria y espontáneamente comience a girar; que un bloque y la superficie de una mesa conviertan parte de su energía interna para hacer que el bloque se mueva; que un vaso de agua fría se transforme en un cubo de hielo en un vaso de agua más caliente. Sin embargo, en cada uno de estos casos suele observarse, por lo general, el proceso inverso. Como estudiaremos en este capítulo, la segunda ley de la termodinámica trata de si ocurren o no tales procesos en la naturaleza. A menudo se dice que la segunda ley sigue la dirección de la "flecha del tiempo", significando con esto que los sistemas evolucionan naturalmente con el tiempo en una dirección pero no en la otra.

En este capítulo empleamos la segunda ley para analizar las máquinas que convierten el calor en trabajo útil, y demostramos que existe un límite superior para la eficiencia a la que puede funcionar una máquina. La segunda ley conduce a un nuevo concepto, la entropía, al igual que la ley cero conducía a la temperatura y la primera ley a la energía interna. Concluimos nuestro estudio de la termodinámica demostrando cómo la relación entre la entropía (una cantidad macroscópica) y su cantidad microscópica correspondiente (la probabilidad estadística de diferentes arreglos de un sistema) refuerzan la conexión entre la termodinámica y la mecánica estadística, el objetivo que nos propusimos en la sección 22-1.

26-1 PROCESOS REVERSIBLES Y PROCESOS IRREVERSIBLES

Consideremos un sistema típico en equilibrio termodinámico, digamos n moles de un gas (real), confinados en un arreglo cilindro-émbolo de volumen V , teniendo el gas una presión p y una temperatura T . En un estado de equilibrio, estas variables termodinámicas permanecen constantes con el tiempo. Supongamos que el cilindro, cuyas paredes son aislantes pero cuya base conduce calor, se coloca en un depósito grande a la misma temperatura T , como vemos en la figura 1. Llevemos ahora al sistema a otro estado de equilibrio en el que la temperatura T sea la misma pero el volumen V se reduzca a la mitad. De entre las muchas maneras en que esto se puede hacer, estudiaremos dos casos extremos.

1. Presionamos el émbolo muy rápidamente; entonces esperamos que se restablezca el equilibrio con el depósito. Durante este proceso el gas es turbulento, y su presión y

temperatura no están bien definidos. No podemos trazar el proceso como una línea continua en un diagrama pV porque no sabríamos qué valor de la presión (o de la temperatura) asociaríamos con un volumen dado. El sistema pasa de un estado de equilibrio i a otro f a través de una serie de estados de no equilibrio (Fig. 1a).

2. Presionamos el émbolo (suponiendo que no existe fricción) muy lentamente, quizá añadiendo en forma gradual arena a la parte superior del émbolo, de modo que la presión, el volumen, y la temperatura del gas sean, en todo momento, cantidades bien definidas. Primero, dejamos caer unos cuantos granos de arena sobre el émbolo. Esto reducirá el volumen del sistema un poco y la temperatura tenderá a elevarse; el sistema se saldrá del equilibrio, pero sólo ligeramente. Se transferirá al depósito una pequeña cantidad de calor, y en un tiempo corto el sistema alcanzará un nuevo estado de equilibrio, siendo su temperatura de nuevo la del depósito. Luego dejamos caer unos cuantos granos más de arena sobre el émbolo, reduciendo el volumen aún más. De nuevo, esperamos que se establezca

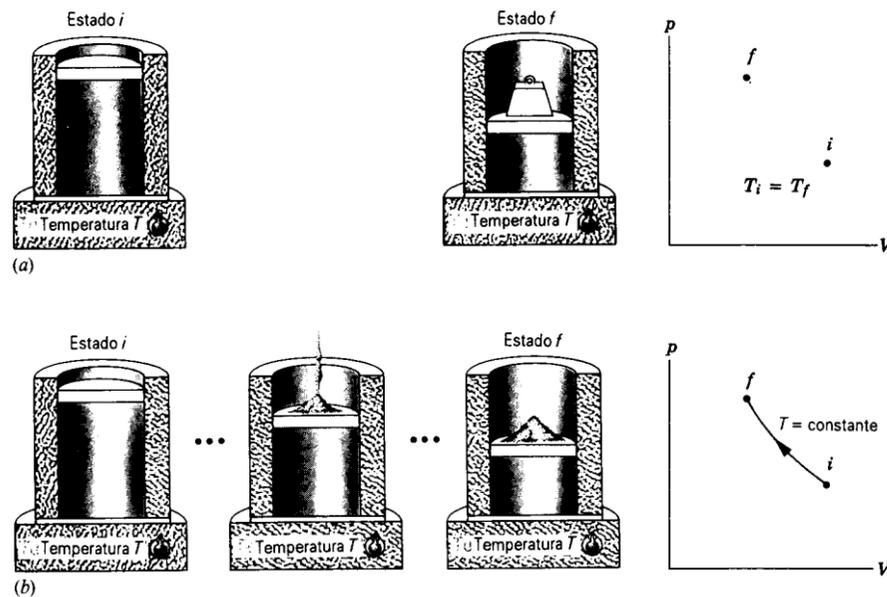


Figura 1 Se hace que un gas real pase de un estado inicial i (caracterizado por la presión p_i , el volumen V_i , y la temperatura T_i) a un estado final f (caracterizado por p_f , V_f , y T_f). El proceso puede llevarse a cabo (a) irreversiblemente, dejando caer de forma súbita un peso sobre el émbolo, o (b) reversiblemente, añadiendo arena al émbolo, unos cuantos granos a la vez.

un nuevo estado de equilibrio, y así sucesivamente. Después de muchas repeticiones de este procedimiento reducimos, finalmente el volumen a la mitad. Durante todo este proceso el sistema está siempre en un estado que difiere sólo ligeramente de un estado de equilibrio. Si imaginamos llevar a cabo este procedimiento con aumentos sucesivos de presión aún más pequeños, los estados intermedios se saldrán del equilibrio todavía menos que antes. Aumentando indefinidamente el número de cambios y disminuyendo en consecuencia el tamaño de cada cambio, llegamos a un proceso ideal en el que el sistema pasa a través de una sucesión continua de estados de equilibrio, los cuales podemos trazar como una línea continua en un diagrama pV (Fig. 1b). Durante este proceso se transfiere cierta cantidad de calor Q del sistema al depósito.

Los procesos del tipo 1 se llaman *irreversibles*, y los del tipo 2 se llaman *reversibles*. Un proceso reversible es aquel en que, por medio de un cambio diferencial en el entorno, puede hacerse que regrese sobre su trayectoria. Es decir, si añadimos unos cuantos granos de arena al émbolo cuando el sistema está en un estado particular A , el volumen disminuye en dV y una pequeña cantidad de calor es transferida al depósito. Si seguidamente quitamos aquellos pocos granos de arena (un cambio diferencial en el entorno), el volumen aumenta en dV y una cantidad igual de calor se transfiere del depósito, regresando por ello tanto el sistema como el entorno al estado original A .

En la práctica, todos los procesos son irreversibles, pero podemos aproximarnos arbitrariamente a la reversibilidad por medio de refinamientos experimentales apropiados. El proceso estrictamente reversible es una abstracción sencilla y útil que guarda una relación similar con los procesos reales como la abstracción del gas ideal lo hace con los gases reales.

No todos los procesos llevados a cabo lentamente son reversibles. Por ejemplo, si el émbolo de nuestro ejemplo ejerciera una fuerza de fricción sobre las paredes del cilindro, no regresaría a su estado previo por el hecho de quitar unos cuantos granos de arena. Si añadimos arena al émbolo lentamente, el sistema seguiría evolucionando a través de una serie de estados de equilibrio, pero no lo haría en forma reversible. Se usa la palabra *casi-estático* para describir procesos que se llevan a cabo con la lentitud suficiente como para que el sistema pase a través de una secuencia continua de estados de equilibrio; un proceso casi-estático puede ser o puede no ser reversible.

El proceso descrito en 2 es no sólo reversible sino también *isotérmico*, porque hemos supuesto que la temperatura del gas difiere en todo momento en sólo una cantidad diferencial dT de la temperatura (constante) del depósito en que descansa el cilindro.

Podríamos también reducir el volumen *adiabáticamente* sacando al cilindro del depósito térmico y poniéndolo sobre una plataforma no conductora. En un proceso adiabático no se permite que el calor entre o salga del sistema.

Un proceso adiabático puede ser reversible o irreversible; la definición no excluye a ninguna de las dos posibilidades. En un proceso adiabático reversible movemos al émbolo con lentitud extrema, quizás usando la técnica de la carga con arena; en un proceso adiabático irreversible empujamos al émbolo hacia abajo rápidamente.

La temperatura del gas se elevará durante una compresión adiabática porque, según la primera ley con $Q = 0$, el trabajo W efectuado sobre el sistema por el entorno al empujar hacia abajo al émbolo debe aparecer como un aumento ΔE_{int} en la energía interna del sistema. El trabajo W tiene valores diferentes para cantidades diferentes del descenso del émbolo, siendo $-\int p dV$ (es decir, el área bajo una curva de un diagrama pV) únicamente para procesos reversibles, para los cuales p tiene un valor bien definido. Entonces, ΔE_{int} y el cambio de temperatura correspondiente ΔT no son los mismos para procesos adiabáticos reversibles e irreversibles.

Por otra parte, para una transformación de un punto inicial dado i a un punto final dado f , el cambio en la energía interna depende únicamente de las coordenadas termodinámicas (p , V , y T , quizá) de i y f . Si bien W y Q dependen de la trayectoria, ΔE_{int} no depende de ella. En particular, si nos es posible calcular ΔE_{int} para una trayectoria reversible determinada, tiene el mismo valor para las demás trayectorias, incluyendo las irreversibles. La entropía, como veremos, es también una variable de estado como E_{int} cuyo cambio en cualquier proceso irreversible puede hallarse a partir de un proceso reversible escogido apropiadamente que conecte a los mismos estados inicial y final.

26-2 MÁQUINAS TÉRMICAS Y LA SEGUNDA LEY

Una *máquina térmica* es un dispositivo para convertir calor en trabajo útil. Esto es, la energía fluye hacia un sistema en forma de calor, y parte de esta energía sale del sistema en forma de trabajo efectuado sobre el entorno. El proceso inverso, que convierte trabajo en calor, ocurre también: las fuerzas de fricción pueden convertir el trabajo en energía interna, como en el calentamiento de dos superficies que se frotan entre sí, y esta energía puede ser entonces transferida a otros objetos del entorno en forma de calor. En otro ejemplo, el trabajo mecánico efectuado por un generador eléctrico conduce corriente a los hogares, donde un calefactor eléctrico convierte el trabajo en energía interna, la cual fluye entonces en forma de calor.

El cilindro de gas ideal colocado sobre el depósito térmico a una temperatura T puede servir como un ejemplo representativo de una máquina térmica. Si quitamos una pequeña cantidad de peso del émbolo, el gas se dilata (isotérmicamente). Entra calor al gas a partir del depósito,

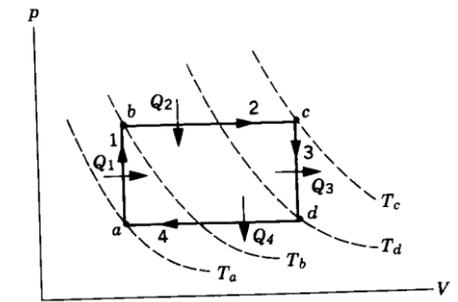


Figura 2 Un proceso cíclico, que consta de cuatro etapas, dos (ab y cd) a volumen constante y dos (bc y da) a presión constante. Las líneas de puntos muestran las isothermas correspondientes a las temperatura T_a , T_b , T_c , y T_d .

y se efectúa trabajo por el gas. Puesto que la temperatura es constante, la energía interna es constante también, y entonces tenemos un aparato para convertir calor en trabajo.

Esta máquina térmica no sería muy útil a la larga, porque no podría operar indefinidamente: nos quedaríamos sin peso que quitar del émbolo o bien el émbolo llegaría hasta arriba del cilindro. Una máquina más útil sería la que operase en un ciclo, regresando a su punto inicial después de haber efectuado cada trabajo unitario W , y repitiendo sus etapas continuamente. La figura 2 muestra un ejemplo de un proceso cíclico que podría constituir la base para una máquina térmica. El ciclo consta de varias etapas, pudiendo todas ellas efectuarse en pequeños incrementos y por lo tanto reversiblemente. Suponemos que el cilindro de gas está situado sobre un depósito térmico, cuya temperatura puede ajustarse fácilmente.

Al analizar las etapas del ciclo, es conveniente tener en cuenta las convenciones de signo que hemos estado usando para el calor y el trabajo:

Se considera que el calor que entra al sistema es positivo, y que el calor que sale del sistema es negativo.

El trabajo efectuado sobre un sistema, correspondiente a una disminución de volumen se considera positivo; el trabajo efectuado por un sistema es el negativo del trabajo efectuado sobre un sistema.

El trabajo efectuado en un proceso cíclico es negativo si el ciclo se efectúa en sentido horario en un diagrama pV , y positivo si el ciclo se efectúa en sentido antihorario.

Para recordar estas convenciones de signo, podemos relacionar el efecto del calor transferido o del trabajo efectuado con el cambio en la energía interna del sistema.

Las cuatro etapas de nuestro ciclo son las siguientes:

Etapas 1 (ab). Aumentamos la temperatura del depósito, y simultáneamente añadimos algún peso adicional al émbolo, de modo que la presión aumente pero el volumen permanezca constante.

Etapas 2 (bc). Aumentamos la temperatura del depósito y dejamos que el gas se dilate a presión constante. El émbolo efectúa un trabajo negativo sobre el gas.

Etapas 3 (cd). Disminuimos la temperatura del depósito y simultáneamente retiramos algo de peso del émbolo, de modo que el volumen permanezca constante.

Etapas 4 (da). Continuamos disminuyendo la temperatura del depósito, pero mantenemos constante la carga sobre el émbolo, con el fin de que la presión permanezca constante mientras el volumen disminuya a su valor original.

Obsérvese de las isotermas mostradas en la figura 2 que la temperatura aumenta en las etapas 1 y 2 y disminuye en las etapas 3 y 4. Entonces, durante las etapas 1 y 2 entra calor al sistema ($Q_1 > 0$ y $Q_2 > 0$), y durante las etapas 3 y 4 sale calor del sistema ($Q_3 < 0$ y $Q_4 < 0$). Además, observamos que $W < 0$ para todo el ciclo, porque el ciclo se efectúa en dirección horaria. En la etapa 1, hemos añadido peso cuando el émbolo estaba en la posición más baja, y en la etapa 3 hemos retirado peso cuando el émbolo estaba en la posición más alta. El efecto total del ciclo sobre el entorno es, entonces, elevar cierto peso mg a la distancia h a la que asciende el émbolo en la etapa 2; la magnitud del trabajo efectuado por el gas sobre el entorno es igual a mgh .

Examinemos ahora las transferencias de energía durante el ciclo. El calor total Q_{in} que entra al sistema es $Q_1 + Q_2$, y el calor total Q_{out} que sale del sistema es $Q_3 + Q_4$. El calor neto transferido Q para el ciclo es $Q_{in} + Q_{out}$; para recordar que Q_{in} es positiva y Q_{out} negativa, escribimos, usando magnitudes absolutas,

$$|Q| = |Q_{in}| - |Q_{out}|. \quad (1)$$

El cambio en la energía interna para el ciclo debe ser cero, porque el ciclo comienza y termina en el mismo punto. La primera ley da entonces $W = -Q$ o sea, usando de nuevo magnitudes absolutas,

$$|W| = |Q| = |Q_{in}| - |Q_{out}|. \quad (2)$$

Para este ciclo, $|Q_{in}| > |Q_{out}|$, de modo que los miembros derechos de las ecuaciones 1 y 2 son positivos, como es necesario cuando escribimos aquellas ecuaciones en términos de magnitudes.

Definimos la *eficiencia* e de cualquier ciclo como la cantidad neta de trabajo efectuado sobre el entorno durante el ciclo, dividido por la *entrada de calor* Q_{in} :

$$e = \frac{|W|}{|Q_{in}|}. \quad (3)$$

El trabajo efectuado sobre el entorno, que es como medimos la salida útil de una máquina, es el negativo del trabajo efectuado por el entorno sobre el gas. Escribimos la razón en la ecuación 3 de esta manera para que tanto el numerador como el denominador sean cantidades positivas.

Podemos también escribir la eficiencia como:

$$e = \frac{|Q_{in}| - |Q_{out}|}{|Q_{in}|} = 1 - \frac{|Q_{out}|}{|Q_{in}|}. \quad (4)$$

Podríamos hacer una máquina perfectamente eficiente ($e = 1.00$ ó 100%) si pudiéramos diseñar un ciclo que reduzca a cero a $|Q_{out}|$, el calor descargado; de otro modo, la eficiencia es siempre menos de 100%. Una forma de la *segunda ley de la termodinámica* afirma que el hacer una máquina térmica perfectamente eficiente es imposible:

En un proceso cíclico, no es posible convertir calor enteramente en trabajo, sin que exista algún otro cambio.

En nuestro ejemplo el "otro cambio que existe" es el calor de escape $|Q_{out}|$, y entonces la segunda ley dice que es imposible reducir $|Q_{out}|$ a cero. La ecuación 4 implica que la eficiencia de la máquina térmica no puede nunca llegar al 100%. Esta forma de la segunda ley, que suele llamarse forma de *Kelvin-Planck*, establece que *no existen máquinas térmicas perfectas*.

La figura 3 muestra una representación esquemática simplificada de una máquina perfecta, la cual convierte al calor Q enteramente en trabajo, y una máquina real, que obtiene el calor Q_H de un recipiente a alta temperatura T_H y descarga calor Q_L al recipiente a baja temperatura T_L . En esta máquina generalizada, el calor de entrada, que puede ser transferido en varias etapas, se representa simplemente como Q_H , y el calor de escape se representa similarmente como Q_L . El ciclo implica una serie de operaciones llevadas a cabo sobre una *sustancia de operación*; en nuestro caso, la serie de operaciones mostradas en la figura 2 se llevaron a cabo en un gas ideal, pero en la práctica podemos diseñar una máquina térmica usando cualquiera de una gran variedad de sustancias de operación. Por ejemplo, en una planta de potencia, el agua es a menudo la sustancia de operación, absorbiendo calor Q_H cuando se convierte en vapor y descargando calor Q_L cuando el vapor se condensa nuevamente en agua. (No debe confundirse el combustible de un motor con la sustancia de operación; el combustible simplemente mantiene la temperatura T_H del recipiente caliente.) El recipiente de baja temperatura, hacia el que escapa el calor Q_L , podría ser la atmósfera, un estanque de enfriamiento, o un río.

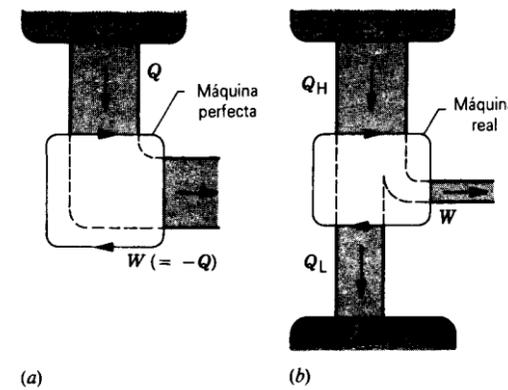


Figura 3 Se representa una máquina por las flechas en el sentido horario que rodean al bloque central. (a) En una máquina perfecta, todo el calor extraído de un depósito a alta temperatura se convierte en trabajo. (b) En una máquina real, el calor Q_H extraído del depósito de alta temperatura se convierte parcialmente en trabajo y parcialmente en calor Q_L que escapa a un recipiente de baja temperatura.

Problema muestra 1 Un motor de automóvil, cuya eficiencia térmica e es de 22%, opera a 95 ciclos por segundo y efectúa trabajo a 120 hp. (a) ¿Cuánto trabajo por ciclo efectúa el entorno sobre el sistema? (b) ¿Cuánto calor entra y sale del motor en cada ciclo?

Solución (a) El trabajo por ciclo efectuado sobre el sistema, una cantidad negativa, es

$$W = -\frac{(120 \text{ hp})[746 \text{ (J/s)/hp}]}{95 \text{ s}^{-1}} = -942 \text{ J}.$$

O, lo que es lo mismo, el motor efectúa +942 J de trabajo por ciclo sobre el entorno.

(b) Para hallar el calor de entrada Q_H absorbido del depósito a alta temperatura (la explosión de la mezcla de combustible), usamos la ecuación 3:

$$|Q_H| = \frac{|W|}{e} = \frac{942 \text{ J}}{0.22} = 4.3 \times 10^3 \text{ J}.$$

Partiendo de la ecuación 2, hallamos el calor de salida, que se descarga al recipiente a baja temperatura (el entorno):

$$|Q_L| = |Q_H| - |W| = 4.3 \times 10^3 \text{ J} - 942 \text{ J} = 3.4 \times 10^3 \text{ J}.$$

El calor descargado del motor lleva un signo negativo de modo que

$$Q_L = -3.4 \times 10^3 \text{ J}.$$

Vemos que este motor absorbe $4.3 \times 10^3 \text{ J}$ de calor por ciclo, por el que debemos pagar en la estación de gasolina, efectúa 942 J de trabajo, y transfiere $3.4 \times 10^3 \text{ J}$ de calor en el escape. El motor desecha 3.6 veces más energía de la que convierte para propósitos útiles. Algunas máquinas pueden poner este calor del escape a trabajar en forma útil. Por ejemplo, el calor del vapor escapado en una planta de potencia puede transferirse a edificios comerciales para mantenerlos calientes durante el tiempo frío.

26-3 REFRIGERADORES Y LA SEGUNDA LEY

Un refrigerador es básicamente una máquina térmica que funciona en sentido inverso. Al igual que una máquina térmica, se considera que un refrigerador funciona en un proceso cíclico, y el recorrido del ciclo de la figura 2 en sentido inverso representaría la operación de un tipo de refrigerador. Un refrigerador más general puede estar representado por el motor de la figura 3 operado en sentido inverso. El calor Q_L se extrae del depósito de baja temperatura a la temperatura T_L , y el calor Q_H se descarga del recipiente de alta temperatura a la temperatura T_H . La figura 4 muestra una representación esquemática de un refrigerador perfecto, en el que $|Q_L| = |Q_H|$, y un refrigerador real, en el que $|Q_L| < |Q_H|$ y debe suministrarsele trabajo W .

Como en el caso de la máquina térmica, no existe un cambio de la energía interna en un ciclo completo, y por lo tanto $|W| = |Q|$, o sea

$$|W| = |Q_H| - |Q_L|. \quad (5)$$

En el refrigerador, el calor *entra* a partir del recipiente de baja temperatura, de modo que $Q_L > 0$, y *sale* al recipiente de alta temperatura, de modo que $Q_H < 0$, como lo sugiere la figura 4. También, $W > 0$, puesto que el entorno efectúa un trabajo sobre la sustancia de operación.

En analogía con la eficiencia de una máquina térmica, evaluamos un refrigerador en términos del *coeficiente de rendimiento* K , definido por

$$K = \frac{|Q_L|}{|W|} = \frac{|Q_L|}{|Q_H| - |Q_L|}. \quad (6)$$

En un refrigerador perfecto, $W = 0$ (entonces $|Q_H| = |Q_L|$), y el coeficiente de rendimiento es infinito.

Un enunciado alternativo de la segunda ley de la termodinámica trata del rendimiento de un refrigerador:

En un proceso cíclico, no es posible que fluya calor de un cuerpo a otro a mayor temperatura sin que exista algún otro cambio.

En este enunciado, el "otro cambio existente" significa que durante el ciclo debe efectuarse un trabajo externo para hacer que el calor se mueva de este modo, puesto que de por sí preferiría fluir en el sentido contrario. Este enunciado de la segunda ley se llama a menudo la forma *Clausius*, y en efecto dice que *no existen refrigeradores perfectos*.

En un refrigerador doméstico ordinario, la sustancia de operación es un líquido (Freón) que circula dentro del sistema. El depósito a baja temperatura es la cámara fría en la que se almacenan los alimentos, y el depósito a alta temperatura es la habitación en que se mantiene la unidad.

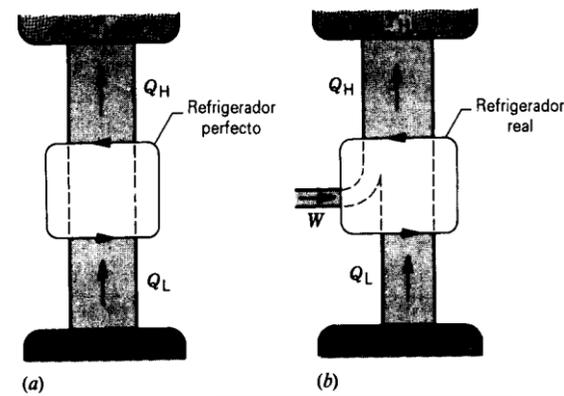


Figura 4 Se representa un refrigerador por flechas apuntando en sentido antihorario alrededor del bloque central. (a) En un refrigerador perfecto no se requiere ningún trabajo. (b) En un refrigerador real, el calor es extraído de un depósito a baja temperatura mediante la ejecución de algún trabajo externo, y la energía equivalente del calor extraído y del trabajo se descarga como calor a un depósito a alta temperatura.

El trabajo externo es proporcionado por un motor que impulsa a la unidad. Los refrigeradores típicos tienen coeficientes de rendimiento alrededor de 5.

Equivalencia de los enunciados de Clausius y de Kelvin-Planck

Los dos enunciados de la segunda ley que hemos presentado no son independientes y, de hecho, son enteramente equivalentes. Para demostrar esto, consideremos lo que pasaría si la forma Kelvin-Planck fuese incorrecta, y que pudiéramos construir una máquina perfecta, convirtiendo el calor Q_H enteramente a trabajo W . Usemos este trabajo W para impulsar un refrigerador real, como se muestra en la figura 5a. Este refrigerador toma el calor $|Q'_L|$ del depósito a baja temperatura y bombea el calor $|Q'_H| = |Q'_L| + |W|$ al depósito a alta temperatura.

Consideremos la combinación de la máquina perfecta y el refrigerador real como un solo aparato, como se indica en la figura 5b. El trabajo W es una característica interna de este aparato y no entra en ningún intercambio de energía con el entorno. Este aparato toma el calor $|Q'_L|$ del depósito a baja temperatura y transfiere al depósito a alta temperatura una cantidad neta de calor igual a $|Q'_H| - |Q_H|$. Pero $|Q_H| = |W|$, y entonces

$$|Q'_H| - |Q_H| = |Q'_L| - |W| = |Q'_L|.$$

Entonces nuestro aparato combinado actúa como un refrigerador perfecto, tomando el calor $|Q'_L|$ del depósito a baja temperatura y bombeando el calor $|Q'_H|$ al depósito a alta temperatura, sin que se efectúe ningún trabajo externo.

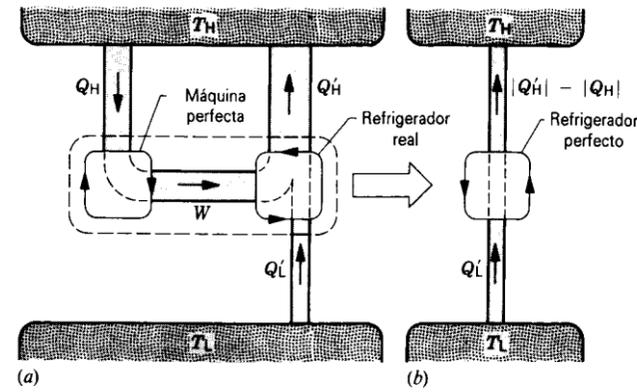


Figura 5 (a) Un refrigerador real, impulsado por una máquina perfecta, es equivalente a (b) un refrigerador perfecto.

Este ejemplo demuestra que, si podemos construir una máquina perfecta, entonces podemos construir un refrigerador perfecto. Es decir, una violación del enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley implica una violación del enunciado de Clausius. De manera similar, un refrigerador perfecto nos permite convertir a una máquina térmica real en una máquina térmica perfecta. Entonces, una violación del enunciado de Clausius implica una violación del enunciado de Kelvin-Planck. Puesto que una violación de cualquiera de los enunciados implica una violación del otro, los dos enunciados son lógicamente equivalentes.

Problema muestra 2 Un refrigerador doméstico, cuyo coeficiente de rendimiento K es 4.7, extrae calor de la cámara de enfriamiento a 250 J por ciclo. (a) ¿Cuánto trabajo por ciclo se requiere para operar el refrigerador? (b) ¿Cuánto calor por ciclo se descarga a la habitación, la cual constituye el depósito de alta temperatura del refrigerador?

Solución (a) Partiendo de la ecuación 6, $K = |Q_L|/|W|$, tenemos

$$|W| = \frac{|Q_L|}{K} = \frac{250 \text{ J}}{4.7} = 53 \text{ J}.$$

W representa el trabajo efectuado sobre el sistema, de modo que es una cantidad positiva.

(b) Para hallar el calor Q_H descargado a la habitación (la cual sirve como depósito de alta temperatura), usamos la ecuación 5, que es la primera ley de termodinámica para un aparato cíclico y es válida tanto para refrigeradores como para máquinas. Entonces, tenemos

$$|Q_H| = |W| + |Q_L| = 53 \text{ J} + 250 \text{ J} = 303 \text{ J}.$$

Un refrigerador ¡es también un calefactor eficiente! Al pagar por 53 J de trabajo (efectuado por el motor), obtenemos 303 J de calor abastecido a la habitación por medio de los tubos de condensación colocados atrás de la unidad. (Véase el problema muestra 4, que trata de la operación de una *bomba de calor*, aparato similar al refrigerador que puede calentar el hogar.)

Si calentásemos la habitación con un calefactor eléctrico, obtendríamos cuando más 53 J de calor por cada 53 J de trabajo por el que pagamos. Pensemos en lo sensato (?) que puede ser tratar de enfriar la cocina en un día caluroso ¡dejando abierta la puerta del refrigerador! Por supuesto, un cálculo completo de la eficiencia relativa de varios sistemas de calefacción debe tener en cuenta la eficiencia termodinámica de la producción de potencia eléctrica en la planta generadora.

26-4 EL CICLO DE CARNOT

Hemos visto que la segunda ley de la termodinámica nos impide construir máquinas térmicas y refrigeradores perfectos. Entonces es lógico preguntar si podemos llegar tan cerca de la perfección como queramos, o si existe alguna otra limitación fundamental en el funcionamiento de las máquinas térmicas y de los refrigeradores. Sucede que *sí existe* un límite fundamental, y para su estudio explicaremos una máquina que funciona en un ciclo particular, llamado *ciclo de Carnot*.*

En el ciclo de Carnot, la sustancia de operación es un gas ideal en nuestro cilindro usual. Usamos dos depósitos térmicos, uno a alta temperatura T_H y otro a baja temperatura T_L . El ciclo consta de cuatro procesos reversibles, dos isotérmicos y dos adiabáticos. La secuencia, indicada esquemáticamente en la figura 6 y trazada en un diagrama pV en la figura 7, es como sigue:

Etapas 1 (ab). Ponemos el cilindro sobre el depósito a alta temperatura, con el gas en un estado representado por el punto a en la figura 7. Gradualmente, quitamos algo de peso del émbolo, permitiendo que el gas se dilate lentamente hasta el punto b . Durante este proceso, el gas del depósito a alta temperatura absorbe calor $Q_1 = |Q_H|$. Ya que este proceso es isotérmico, la energía interna del gas no cambia ($\Delta E_{int} = 0$), y todo el calor (positivo) añadido aparece como trabajo (negativo) efectuado sobre el gas al elevarse el émbolo con el peso.

Etapas 2 (bc). Aislamos el cilindro del depósito y, quitando gradualmente más peso del émbolo, dejamos que el gas se dilate lentamente hasta el punto c de la figura 7. Esta expansión es adiabática porque no entra ni sale calor del sistema ($Q_2 = 0$). El émbolo efectúa un trabajo (negativo) W_2 sobre el gas. La temperatura del gas cae a T_L , porque la energía para efectuar el trabajo debe venir de la energía interna del gas.

Etapas 3 (cd). Ponemos el cilindro sobre el depósito a baja temperatura y, añadiendo gradualmente peso al émbolo, comprimimos el gas lentamente hasta el punto d en

* Llamado así en honor del ingeniero y científico francés N. L. Sadi Carnot (1796-1832), quien propuso el concepto en 1824.

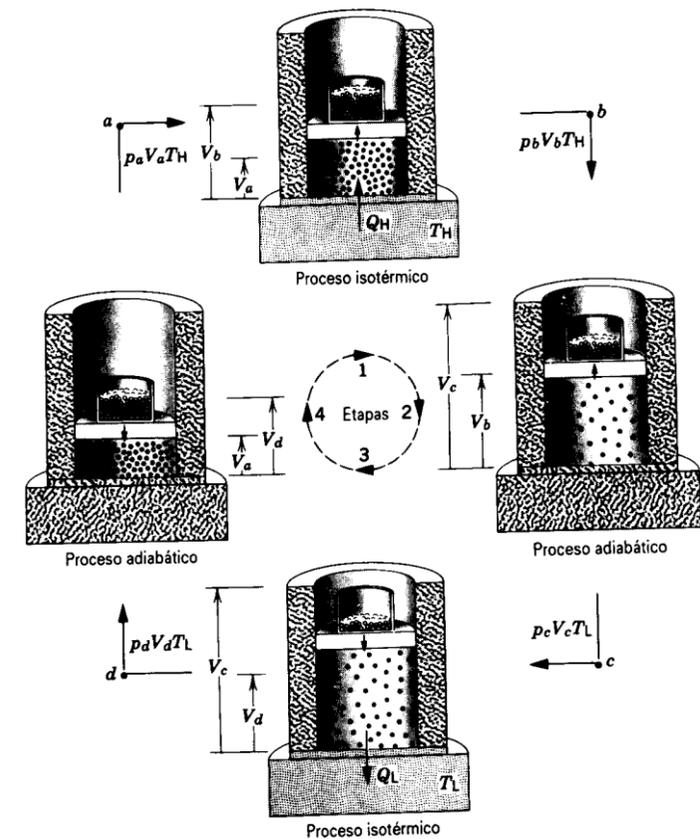


Figura 6 Ciclo de Carnot. Las cuatro etapas (1, 2, 3, 4) y los cuatro puntos finales (a, b, c, d) corresponden a los de la figura 7. El arreglo cilindro-émbolo se muestra en puntos intermedios, durante la realización de cada proceso.

la figura 7. Durante este proceso, se transfiere calor $Q_3 = -|Q_L|$ del gas al depósito. La compresión es isotérmica a la temperatura T_L , y se efectúa un trabajo (positivo) sobre el gas al descender el émbolo y su carga.

Etapas 4 (da). Aislamos al cilindro del depósito y, añadiendo aún más peso, comprimimos al gas lentamente de regreso a su punto inicial a de la figura 7, completando así el ciclo. La compresión es adiabática porque ningún calor entra o sale del sistema. El trabajo W_H es efectuado sobre el gas, y su temperatura se eleva hasta T_H .

Las transferencias de energía durante el ciclo pueden resumirse como sigue:

	Q	W	ΔE_{int}
Etapas 1	>0	<0	0
Etapas 2	0	<0	<0
Etapas 3	<0	>0	0
Etapas 4	0	>0	>0
Ciclo	>0	<0	0

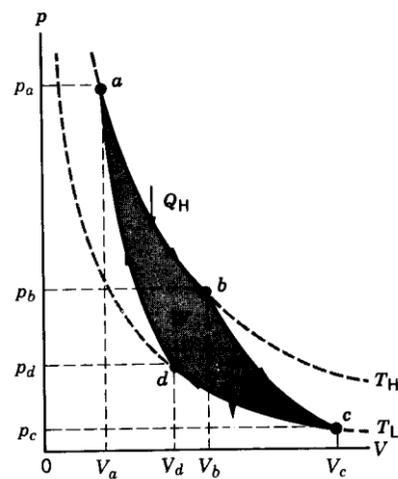


Figura 7 Un diagrama pV del ciclo de Carnot ilustrado en la figura 6. Se supone que la sustancia útil es un gas ideal.

Calculemos ahora la eficiencia de una máquina térmica que opere en un ciclo de Carnot. A lo largo de la trayectoria isotérmica ab en la figura 7, la temperatura permanece constante. Puesto que el gas es ideal, su energía interna, que depende únicamente de la temperatura, permanece también constante. Con $\Delta E_{int} = 0$, la primera ley requiere que el calor Q_H transferido del depósito de alta temperatura sea igual a la magnitud del trabajo W efectuado sobre el gas al expandirse. Según la ecuación 27 del capítulo 23 tenemos entonces

$$|Q_H| = |W_1| = nRT_H \ln \frac{V_b}{V_a}.$$

Similarmente, para el proceso isotérmico cd en la figura 7, podemos escribir

$$|Q_L| = |W_3| = nRT_L \ln \frac{V_c}{V_d}.$$

Dividiendo estas dos ecuaciones tenemos que

$$\frac{|Q_H|}{|Q_L|} = \frac{T_H \ln(V_b/V_a)}{T_L \ln(V_c/V_d)}. \quad (7)$$

La ecuación 38 del capítulo 25 nos permite escribir, para los dos procesos adiabáticos bc y da ,

$$T_H V_b^{\gamma-1} = T_L V_c^{\gamma-1} \quad \text{y} \quad T_H V_a^{\gamma-1} = T_L V_d^{\gamma-1}.$$

Dividiendo estas dos ecuaciones resulta

$$\frac{V_b^{\gamma-1}}{V_a^{\gamma-1}} = \frac{V_c^{\gamma-1}}{V_d^{\gamma-1}}$$

o sea

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}. \quad (8)$$

Al combinar las ecuaciones 7 y 8 nos da

$$\frac{|Q_H|}{|Q_L|} = \frac{T_H}{T_L}. \quad (9)$$

La ecuación 9 es un resultado importante y fundamental del ciclo de Carnot. Necesitaremos este resultado nuevamente más adelante en este mismo capítulo cuando discutamos la entropía.

Usando la ecuación 4 con $Q_{in} = Q_H$ y $Q_{out} = Q_L$ y sustituyendo la ecuación 9, obtenemos la eficiencia de una máquina térmica que opere en un ciclo de Carnot:

$$e = 1 - \frac{T_L}{T_H} = \frac{T_H - T_L}{T_H}. \quad (10)$$

La eficiencia de una máquina Carnot depende únicamente de la temperatura de los dos depósitos entre los que opera. Obsérvese que la eficiencia aumenta al decrecer T_L , tendiendo a 1 cuando T_L tiende a 0. Puesto que T_L no puede llegar nunca a 0, la eficiencia debe ser menos del 100%.

Un ciclo de Carnot, por ser reversible, puede recorrerse en sentido inverso para constituir un refrigerador. Se deja como ejercicio (véase el problema 19) demostrar que el coeficiente de rendimiento de un refrigerador Carnot es

$$K = \frac{T_L}{T_H - T_L}. \quad (11)$$

Hemos empleado un gas ideal como ejemplo de una sustancia de operación. La sustancia de operación puede ser cualquier cosa, aunque los diagramas pV para otras sustancias serían diferentes. Las máquinas térmicas comunes usan vapor o una mezcla de combustible y aire o combustible y oxígeno como sustancias de operación. Puede obtenerse calor mediante la combustión de un combustible como la gasolina o el carbón, o mediante la liberación de energía nuclear en los reactores de fisión. El calor puede ser descargado en el escape o a un condensador. Si bien las máquinas térmicas reales no operan en un ciclo reversible, el ciclo de Carnot, que es reversible, da una información útil respecto al comportamiento de cualquier máquina térmica. Es especialmente importante, como lo veremos más adelante, porque pone un límite superior al rendimiento de las máquinas reales y por lo tanto ofrece un objetivo a lograr.

El teorema de Carnot y la segunda ley

Basado en su máquina térmica reversible ideal, Carnot desarrolló un teorema general aplicable a todas las máquinas térmicas:

La eficiencia de cualquier máquina térmica que opere entre dos temperaturas específicas nunca podrá superar la eficiencia de una máquina Carnot que opere entre las mismas dos temperaturas.

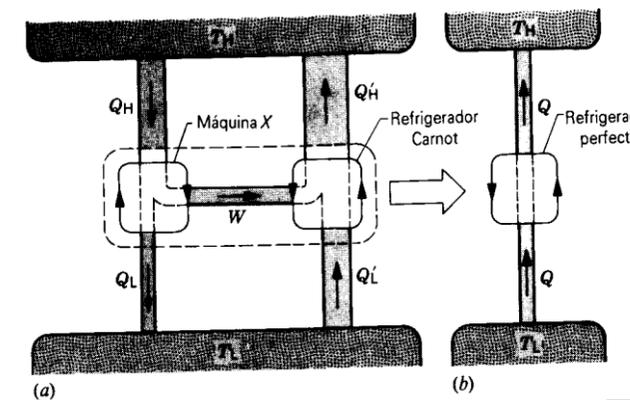


Figura 8 (a) La máquina X impulsa un refrigerador Carnot. Si la máquina X fuese más eficiente que una máquina Carnot, entonces la combinación sería equivalente al refrigerador perfecto mostrado en la figura 8b, donde el calor Q es transferido del depósito de baja temperatura a T_L al depósito de alta temperatura a T_H sin trabajo externo. Esto viola claramente la forma Clausius de la segunda ley, y por lo tanto nuestra hipótesis original (Ec. 13) debe ser falsa. El teorema de Carnot es, por lo tanto, una consecuencia necesaria de la segunda ley.

Es decir, la eficiencia Carnot (Ec. 10) es el límite superior del desempeño de una máquina térmica. Clausius y Kelvin demostraron que el teorema de Carnot era una consecuencia necesaria de la segunda ley de la termodinámica, pero es notable que el trabajo de Carnot haya sido terminado mucho tiempo antes de que Clausius y Kelvin desarrollasen los enunciados de la segunda ley. (¡El trabajo de Carnot sobre máquinas térmicas se publicó en 1824, el año del natalicio de Kelvin y dos años después de haber nacido Clausius!)

Para demostrar que la violación del teorema de Carnot es también una violación de la segunda ley, supongamos que tenemos una máquina, a la que llamaremos máquina X, cuya eficiencia e_x supera a la eficiencia Carnot e . Acoplemos la máquina X a una máquina Carnot que opere en sentido inverso como un refrigerador, como en la figura 8. La máquina X extrae calor Q_H del depósito de alta temperatura y descarga calor Q_L al depósito de baja temperatura, efectuando el trabajo W durante el proceso. Hagamos que este trabajo W impulse el refrigerador Carnot, que extrae calor Q'_L del depósito de baja temperatura y descarga calor Q'_H al depósito de alta temperatura.

El calor neto que fluye del depósito de baja temperatura debido a la combinación de los dos aparatos es $|Q'_L| - |Q_L|$, y el calor neto abastecido al depósito de alta temperatura es $|Q'_H| - |Q_H|$. Al aplicar la primera ley a cada aparato por separado, tenemos $|W| = |Q_H| - |Q_L|$ para la máquina X, y $|W| = |Q'_H| - |Q'_L|$ para el refrigerador Carnot. Igualando estas dos expresiones, hallamos

$$|W| = |Q_H| - |Q_L| = |Q'_H| - |Q'_L|,$$

o, definiendo que Q sea la diferencia entre $|Q'_H|$ y $|Q_H|$,

$$Q = |Q'_H| - |Q_H| = |Q'_L| - |Q_L|. \quad (12)$$

Nuestra hipótesis es que la eficiencia de la máquina X puede exceder a la eficiencia Carnot; es decir,

$$e_x > e \quad (\text{hipótesis}). \quad (13)$$

Investiguemos las consecuencias de esta hipótesis. Partiendo de la ecuación 3 de la definición básica de la eficiencia, nuestra hipótesis es equivalente a

$$\frac{|W|}{|Q_H|} > \frac{|W|}{|Q'_H|}$$

o sea

$$|Q'_H| > |Q_H| \quad (\text{consecuencia de la hipótesis}). \quad (14)$$

Al comparar las ecuaciones 12 y 14 vemos que $Q > 0$ como una consecuencia directa de nuestra hipótesis de que podemos construir una máquina que viole el teorema de Carnot. Entonces, la combinación de la máquina X y el refrigerador Carnot es equivalente al refrigerador perfecto mostrado en la figura 8b, donde el calor Q es transferido del depósito de baja temperatura a T_L al depósito de alta temperatura a T_H sin trabajo externo. Esto viola claramente la forma Clausius de la segunda ley, y por lo tanto nuestra hipótesis original (Ec. 13) debe ser falsa. El teorema de Carnot es, por lo tanto, una consecuencia necesaria de la segunda ley.

¿Cómo diferiría este argumento si X fuese una máquina real? Si $e_x < e$, entonces la ecuación 14 cambiaría a

$$|Q'_H| < |Q_H|,$$

y a partir de la ecuación 12 deduciríamos que $Q < 0$. En este caso, invertiríamos las direcciones de las flechas en la figura 8b, que entonces ya no sería más un refrigerador. En cambio, el calor Q fluiría del depósito de alta temperatura al depósito de baja temperatura, que es un proceso natural y no viola ninguna ley básica.

Si la máquina X opera en un ciclo compuesto enteramente de procesos reversibles, entonces su eficiencia es igual a la eficiencia Carnot. Si el ciclo es en parte irreversible, entonces en efecto, una porción de la energía transferida en cada ciclo se pierde, quizás por fricción, y no puede recuperarse como trabajo útil. En la figura 8, por ejemplo, no sería verdad que todo el trabajo W producido por una máquina X parcialmente irreversible estaría disponible para hacer funcionar al refrigerador; parte se perdería como fricción o por otra causa. Entonces podemos resumir el teorema de Carnot, aplicado a la eficiencia e de cualquier máquina, como sigue:

$$\begin{aligned} e &= e_{\text{Carnot}} \quad (\text{reversible}), \\ e &< e_{\text{Carnot}} \quad (\text{irreversible}). \end{aligned} \quad (15)$$

Problema muestra 3 La turbina de una planta de potencia por vapor toma vapor de una caldera a 520°C y lo descarga a un condensador a 100°C . ¿Cuál es su eficiencia máxima posible?

Solución La eficiencia máxima es la eficiencia de una máquina Carnot que opera entre las mismas dos temperaturas. Entonces, según la ecuación 10,

$$e_{\text{máx}} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = \frac{793 \text{ K} - 373 \text{ K}}{793 \text{ K}} = 0.53 \text{ o sea } 53\%$$

Obsérvese que en esta ecuación las temperaturas deben expresarse en la escala Kelvin. Debido a la fricción, la turbulencia, y las pérdidas térmicas no deseadas, pueden obtenerse en tal turbina de vapor, eficiencias reales de alrededor del 40%. Obsérvese que la eficiencia máxima teórica depende únicamente de las dos temperaturas implicadas, no de las presiones o de otros factores.

La eficiencia teórica de un motor ordinario de automóvil es de alrededor del 56%, pero por consideraciones prácticas se reduce a alrededor del 25%.

Problema muestra 4 Una bomba de calor (véase la fig. 9) es un aparato que, actuando como un refrigerador, puede calentar una casa extrayendo calor del exterior, efectuando cierto trabajo, y descargando calor al interior de la casa. La temperatura exterior es de -10°C , y el interior ha de mantenerse a 22°C . Es necesario entregar calor al interior a 16 kW para compensar las pérdidas de calor normales. ¿Qué cantidad mínima de energía debe suministrarse a la bomba de calor?

Solución El depósito de baja temperatura es el exterior a $T_L = 273 - 10 = 263 \text{ K}$, y el depósito de alta temperatura es el interior a $T_H = 273 + 22 = 295 \text{ K}$. Partiendo de la ecuación 11, el coeficiente de rendimiento máximo de la bomba de calor, que actúa como un refrigerador, es

$$K = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{263 \text{ K}}{295 \text{ K} - 263 \text{ K}} = 8.22.$$

Podemos volver a escribir la ecuación 6 como:

$$K = \frac{|Q_L|}{|W|} = \frac{|Q_H| - |W|}{|W|}.$$

Resolviendo para $|W|$ y dividiendo entre el tiempo para expresar el resultado en términos de potencia, obtenemos

$$\frac{|W|}{t} = \frac{|Q_H|/t}{K + 1} = \frac{16 \text{ kW}}{8.22 + 1} = 1.7 \text{ kW}.$$

En esto radica la "magia" de la bomba de calor. Al usar la bomba de calor como un refrigerador para enfriar el enorme exterior, podemos abastecer 16 kW al interior de la casa pero necesitamos pagar únicamente los 1.7 kW que toma hacer funcionar la bomba. En realidad, los 1.7 kW es un requisito mínimo teórico porque se basa en un rendimiento ideal. En la práctica se requeriría una mayor entrada de potencia, pero todavía existiría un ahorro muy considerable sobre, digamos, calentar la casa directamente con calefactores eléctricos. En ese caso, tendríamos que pagar directamente por cada kilowatt de transferencia de calor. Cuando la temperatura exterior es mayor que la temperatura interior, la bomba de calor puede utilizarse como un acondicionador de aire. Aun operando como un refrigerador, bombea ahora calor del interior de la casa al exterior. De nuevo, debe efectuarse un trabajo (y pagar por él) pero la energía trasladada como calor del interior de la casa supera a la energía equivalente del trabajo efectuado. ¡Otra ganga termodinámica! (Véase también el problema muestra 2

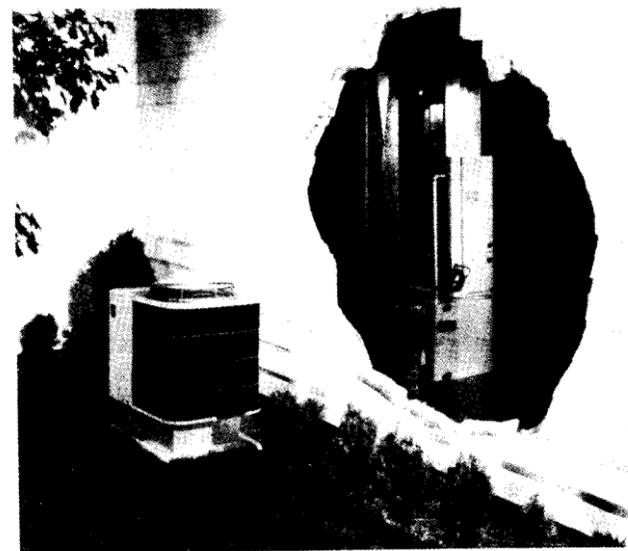


Figura 9 Problema muestra 4. Una bomba de calor.

para otra indicación de que el refrigerador es un calefactor eficiente.)

26-5 LA ESCALA DE TEMPERATURA TERMODINÁMICA

La eficiencia de una máquina reversible es independiente de la sustancia de operación y depende únicamente de las dos temperaturas entre las que trabaja la máquina. Ya que $e = 1 - |Q_L|/|Q_H|$, entonces $|Q_L|/|Q_H|$ puede depender únicamente de las temperaturas. Esto condujo a Kelvin a sugerir una nueva escala de temperatura. Si hacemos que θ_L y θ_H representen estas dos temperaturas, su ecuación definitiva es

$$\frac{\theta_L}{\theta_H} = \frac{|Q_L|}{|Q_H|}.$$

Es decir, dos temperaturas en esta escala tienen la misma razón que el calor absorbido y el calor cedido, respectivamente, por una máquina Carnot que opere entre estas temperaturas. Tal escala de temperatura se denomina escala de temperatura *termodinámica* (o de *Kelvin*).

Para completar la definición de la escala termodinámica, asignamos el valor estándar de 273.16 a la temperatura del punto triple del agua. De aquí que $\theta_{\text{tr}} = 273.16 \text{ K}$. Por lo tanto, para una máquina Carnot que opere entre depósitos a las temperaturas θ y θ_{tr} , tenemos

$$\frac{\theta}{\theta_{\text{tr}}} = \frac{|Q|}{|Q_{\text{tr}}|}$$

o sea

$$\theta = 273.16 \text{ K} \frac{|Q|}{|Q_{\text{tr}}|}. \quad (16)$$

Si comparamos a ésta con la ecuación 7 del capítulo 22,

$$T = 273.16 \text{ K} \frac{X}{X_{\text{tr}}},$$

vemos que, en la escala termodinámica, $|Q|$ juega el papel de una propiedad termométrica. Sin embargo, $|Q|$ no depende de las características de ninguna sustancia porque la eficiencia de una máquina Carnot es independiente de la naturaleza de la sustancia de operación. Por lo tanto, obtenemos una escala de temperatura que está libre de la objeción que podemos poner a la escala del gas ideal del capítulo 22 y, de hecho, llegamos a una definición fundamental de temperatura.

La definición de temperatura termodinámica nos permite reescribir la ecuación para la eficiencia de una máquina reversible como:

$$e = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|} = \frac{\theta_H - \theta_L}{\theta_H}. \quad (17)$$

Pero hemos demostrado que la eficiencia de una máquina Carnot que use un gas ideal como sustancia de operación es

$$e = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|} = \frac{T_H - T_L}{T_H}, \quad (18)$$

donde T es la temperatura dada por el termómetro a volumen constante que contiene el gas ideal. Al comparar las ecuaciones 17 y 18, vemos que $|Q_H|/|Q_L| = T_H/T_L$ y $|Q_H|/|Q_L| = \theta_H/\theta_L$. Ya que $\theta_{\text{tr}} = T_{\text{tr}} = 273.16$ y $\theta/\theta_{\text{tr}} = T/T_{\text{tr}}$, se deduce que $\theta = T$. De aquí que *si estuviese disponible un gas ideal para usarse en un termómetro a volumen constante, el termómetro indicaría la temperatura termodinámica (o Kelvin)*. Hemos visto que, si bien no se dispone de un gas ideal, las mediciones hechas usando el proceso límite con gases reales corresponden al comportamiento del gas ideal. Trataremos la escala del gas ideal y la escala termodinámica como idénticas, y usaremos la designación K intercambiamente para cada una, como de hecho ya lo hemos llevado a cabo.

El cero absoluto y las temperaturas negativas (Opcional)

En la práctica no podemos tener un gas a menos de 1 K, y por lo tanto no podemos medir temperaturas de menos de 1 K usando un termómetro de gas a volumen constante. Por fortuna, es posible medir temperaturas inferiores a 1 K usando la escala termodinámica directamente. Supongamos que tenemos un sistema a una temperatura T_2 que queremos medir. Podemos llevar al sistema alrededor de un ciclo Carnot (Fig. 10), primero efectuando un trabajo adiabático sobre él para elevar la temperatura a T_1 , que es supuestamente conocida en la escala del gas ideal, luego transfiriendo el calor conocido $|Q_1|$ isotérmicamente, efectuando un trabajo adiabático para reducir su temperatura otra vez a T_2 , y por último transfiriendo el calor $|Q_2|$ necesario

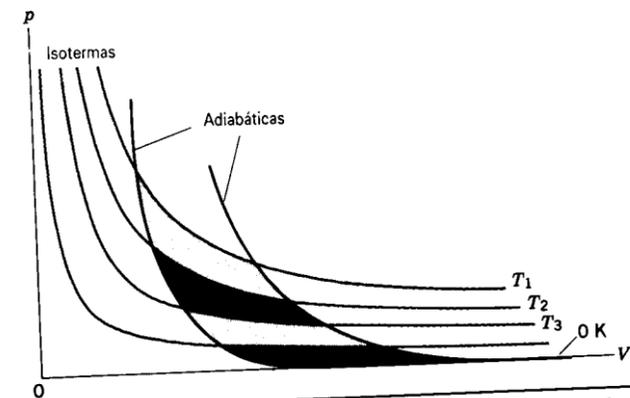


Figura 10 Una serie de ciclos de Carnot que tienden hacia el cero absoluto de temperatura. La diferencia en pendiente entre los procesos isotérmicos y adiabáticos se ha exagerado aquí para mayor claridad.

para regresar al sistema a su condición original. A partir de los argumentos anteriores concluimos que

$$T_2 = T_1 \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \quad (19)$$

Así pues, conociendo T_1 y midiendo $|Q_1|$ y $|Q_2|$ nos es posible determinar la temperatura T_2 directamente. Considerando a T_2 como una temperatura conocida, podemos llevar al sistema alrededor de otro ciclo de Carnot para determinar una temperatura T_3 aún más baja. En principio, podríamos continuar este proceso hasta el cero absoluto de temperatura; sin embargo, cuanto más pequeña sea la temperatura, menor será el calor $|Q|$ transferido en un proceso isotérmico entre dos procesos adiabáticos determinados (Fig. 10). En el límite del cero absoluto de la escala de temperatura termodinámica, el sistema podría experimentar un proceso isotérmico sin transferencia de calor.

La característica fundamental de todos los procesos de enfriamiento es que cuanto más baja es la temperatura tanto mayor la dificultad para bajarla más aún. Esta experiencia ha conducido a la formulación de la *tercera ley de la termodinámica*, que puede enunciarse como sigue: *Es imposible por cualquier procedimiento, sin importar lo idealizado que éste sea, reducir un sistema al cero absoluto de temperatura en un número finito de operaciones*. De aquí que una máquina térmica con 100% de eficiencia sea una imposibilidad práctica, a causa de que no podemos obtener un depósito al cero absoluto.

Como una alternativa al proceso cíclico podemos usar ciertos termómetros *absolutos* para determinar la temperatura termodinámica directamente. Estos termómetros se basan en la dependencia de la temperatura de los resultados básicos de la mecánica estadística. Un tipo de termómetro, llamado *termómetro de ruido*, utiliza el movimiento browniano de los electrones en un sólido. En analogía con nuestra explicación de la media de los cuadrados de la velocidad en la sección 24-3, podemos demostrar que la media de los cuadrados de la corriente de estos electrones es proporcional a la temperatura. El valor promedio de estas corrientes fluctuantes puede ser medido con sondas sensibles, y puede determinarse la temperatura directamente sin hacer uso de una calibración. De esta manera, pueden determinarse las temperaturas en la gama del milikelvin (0.001 K). Otro aparato útil en esta región de temperaturas hace

uso de la distribución de Maxwell-Boltzmann de la energía para determinar la temperatura. Supongamos que tenemos un sistema (un átomo o un núcleo) en que la energía pueda adquirir dos valores E_1 y $E_2 = E_1 + \Delta E$ (Fig. 11). Si tenemos un gran número de esos átomos o núcleos en equilibrio térmico a la temperatura T , entonces una estimación burda del número relativo de átomos o de núcleos con energías E_1 y E_2 está dada por la parte exponencial de la distribución de Maxwell-Boltzmann (véase la Ec. 32 del capítulo 24):

$$\frac{f_{MB}(E_2)}{f_{MB}(E_1)} = \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}} = e^{-\Delta E/kT} \quad (20)$$

Existen numerosas maneras de medir directamente la razón $f_{MB}(E_2)/f_{MB}(E_1)$, como, por ejemplo, mediante la observación de la radiación electromagnética emitida por los átomos o los núcleos, y por lo tanto, una vez más, podemos determinar la temperatura termodinámica.

En el límite de temperatura muy baja, la mayoría de los átomos o de los núcleos en el esquema de la figura 11 estaría en el estado de energía más bajo, porque la ecuación 20 sugiere que $f_{MB}(E_2) \rightarrow 0$ cuando $T \rightarrow 0$. En el límite de alta temperatura, la ecuación 20 indica que $f_{MB}(E_2) = f_{MB}(E_1)$; es decir, existen números iguales de átomos o de núcleos con los dos valores de la energía. Así pues, el aumento de la temperatura de muy baja a muy alta está acompañado por un aumento en el número relativo en el estado más alto de la energía de cerca de 0 a 50%. ¿Es posible que el número sobrepase el 50%? Podemos artificialmente "bombear" sistemas del estado de energía más bajo al estado más alto, haciendo que absorban radiación de la energía ΔE apropiada. (Tal procedimiento es básico para la operación de un láser, donde debemos tener una "inversión de la población" con más átomos en el estado de energía más alto.) Si tratamos de emplear la ecuación 20 para describir un sistema con $f_{MB}(E_2) > f_{MB}(E_1)$, el resultado es una temperatura *negativa*. Es, pues, posible tener temperaturas negativas, pero en contraste con el significado usual de los números negativos, las temperaturas negativas no están por debajo de cero: ¡están por arriba del infinito!*

26-6 ENTROPÍA: PROCESOS REVERSIBLES

La ley cero de la termodinámica se relaciona con el concepto de temperatura T , y la primera ley se relaciona con el concepto de energía interna E_{int} . En esta sección y en las siguientes demostraremos que la segunda ley de la termodinámica se relaciona con una variable termodinámica llamada *entropía*, S , y que podemos expresar la segunda ley cuantitativamente en términos de esta variable.

Comenzaremos considerando un ciclo de Carnot. Para tal ciclo podemos escribir la ecuación 9 como:

$$\frac{|Q_H|}{T_H} = \frac{|Q_L|}{T_L}$$

* Véase "Negative Absolute Temperatures", por Warren G. Proctor, *Scientific American*, agosto de 1978, pág. 90.

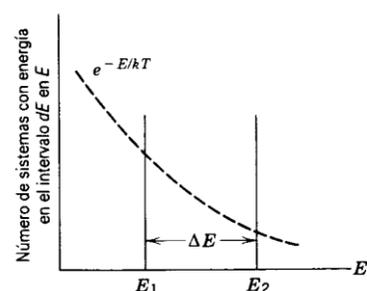


Figura 11 En un sistema que conste de un gran número de átomos o de núcleos con dos estados de energía discretos, los números relativos que ocupan cada estado de la energía pueden ser hallados partiendo de la distribución de Maxwell-Boltzmann (línea de puntos).

Descartamos ahora la notación del valor absoluto, reconociendo en el proceso que si el ciclo de Carnot se lleva a cabo en el sentido horario, como en una máquina, o antihorario, como en un refrigerador, Q_H y Q_L tienen siempre signos opuestos. Por lo tanto, podemos escribir

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0. \quad (21)$$

Esta ecuación establece que la suma de las cantidades algebraicas Q/T es cero en un ciclo de Carnot.

Como paso siguiente, queremos generalizar la ecuación 21 a cualquier ciclo reversible, no precisamente a un ciclo de Carnot. Para hacerlo, aproximamos cualquier ciclo reversible como un conjunto de ciclos de Carnot. La figura 12a muestra un ciclo reversible arbitrario superpuesto en una familia de isothermas. Podemos aproximar el ciclo real al unir las isothermas por medio de segmentos cortos de líneas adiabáticas elegidos convenientemente (Fig. 12b), formando así un conjunto de ciclos de Carnot delgados. Debe usted convencerse de que atravesar los ciclos de Carnot individuales de la figura 12b en secuencia es exactamente equivalente, en términos del calor transferido y del trabajo efectuado, a atravesar la secuencia mellada de líneas isotérmicas y adiabáticas que aproxima el ciclo real. Esto es así porque los ciclos de Carnot adyacentes tienen una isoterma común, y dos travesías, en direcciones opuestas, se cancelan entre sí en la región de traslape en lo que concierne a la transferencia de calor y al trabajo efectuado. Haciendo suficientemente pequeño el intervalo de temperatura entre las isothermas de la figura 12b, podemos aproximar el ciclo real tan cercanamente como lo deseamos por medio de una secuencia alternante de líneas isotérmicas y adiabáticas.

Entonces podemos escribir para la secuencia de líneas isotérmicas-adiabáticas de la figura 12b,

$$\sum \frac{Q}{T} = 0,$$

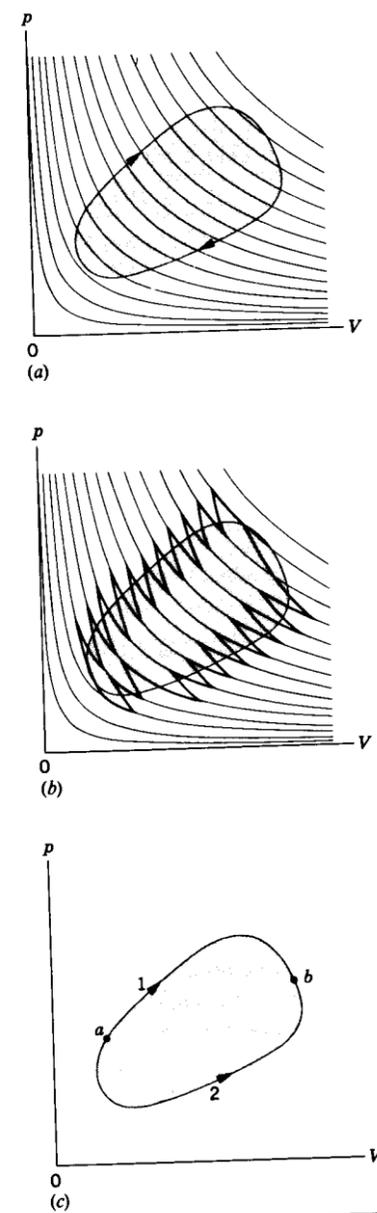


Figura 12 (a) Ciclo reversible superpuesto en una familia de isothermas. (b) Las isothermas están unidas por líneas adiabáticas, formando un conjunto de ciclos de Carnot que aproxima al ciclo dado. (c) a y b son dos puntos arbitrarios en el ciclo, y 1 y 2 son trayectorias reversibles que los unen.

o, en el límite de las diferencias de temperatura infinitesimales entre las isothermas de la figura 12b,

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0, \quad (22)$$

donde \oint indica que la integral es evaluada para una travesía completa del ciclo, comenzando y terminando en el mismo punto arbitrario del ciclo. (Téngase en cuenta que

dQ en la ecuación 22 no es una diferencial exacta, como ya hemos indicado previamente en conexión con la ecuación 31 del capítulo 25. Es decir, no existe una *función* Q , de la que dQ sea la diferencial. Usamos aquí dQ para significar una cantidad de calor pequeña, no como una diferencial verdadera. En el caso de la figura 12b, dQ significa la pequeña cantidad de calor que entra o sale del sistema a lo largo de un elemento corto de la trayectoria.)

Como ya lo hemos visto en la sección 8-1 en el caso de la energía potencial, si la integral de una variable alrededor de cualquier trayectoria cerrada en un sistema de coordenadas es cero, entonces el valor de esa variable en un punto depende únicamente de las coordenadas del punto y no depende en absoluto de la trayectoria por la que se ha llegado a ese punto. Esta variable se llama *variable de estado*, significando que tiene un valor únicamente característico del estado del sistema, sin importar cómo se llegó a ese estado. La ecuación 22 es una integral de éstas, y por lo tanto dQ/T debe ser un cambio diferencial en una variable de estado. Llamamos a esta nueva variable la *entropía* S , de modo que

$$dS = \frac{dQ}{T}, \quad (23)$$

y entonces la ecuación 22 se convierte en

$$\oint dS = 0. \quad (24)$$

La unidad SI para la entropía es J/K.

El punto esencial en las ecuaciones 22 a 24 es que, si bien dQ no es una diferencial exacta, dQ/T sí lo es. La energía potencial gravitatoria U_g , la energía interna E_{int} , la presión p , y la temperatura T son otras variables de estado, y las ecuaciones de la forma $\oint dX = 0$ son válidas para cada una de ellas, donde X se reemplaza por el símbolo apropiado. El calor Q y el trabajo W no son variables de estado; sabemos que, en general $\oint dQ \neq 0$ y $\oint dW \neq 0$, como podemos demostrarlo fácilmente en el caso especial de un ciclo de Carnot.

La propiedad de una variable de estado expresada por $\oint dX = 0$ puede expresarse también diciendo que $\int dX$ entre dos estados de equilibrio cualesquiera tiene el mismo valor para todas las trayectorias (reversibles) que unen a esos estados. Demostremos esto para la variable de estado entropía. Podemos escribir la ecuación 24 (véase la Fig. 12c) como:

$$\int_{tray 1}^a dS + \int_b^a dS = 0, \quad (25)$$

donde a y b son puntos arbitrarios y 1 y 2 describen las trayectorias que unen a esos puntos. Puesto que el ciclo es reversible, podemos recorrer la trayectoria 2 en la dirección opuesta (esto es, de a a b en lugar de b a a), en cuyo caso podemos escribir la ecuación 25 como:

$$\int_a^b dS - \int_a^b dS = 0$$

o sea

$$\int_a^b dS = \int_a^b dS. \quad (26)$$

Nótese que para cambiar el orden de los límites en la segunda integral de la ecuación 25 se requiere que cambiemos también el signo de la integral. Esto da la ecuación 26, la cual nos dice que la cantidad $\int_a^b dS$ entre dos estados de equilibrio cualesquiera del sistema, tales como a y b , es independiente de la trayectoria que une a esos estados, ya que 1 y 2 son trayectorias completamente arbitrarias.

Recordemos nuestra exposición casi idéntica en la sección 8-1, donde introdujimos el concepto de fuerza conservativa.

El cambio en la entropía entre dos estados i y f cualesquiera es entonces

$$\begin{aligned} \Delta S &= S_f - S_i = \int_i^f dS \\ &= \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad (\text{proceso reversible}), \end{aligned} \quad (27)$$

donde la integral se evalúa sobre cualquier trayectoria reversible que una a estos dos estados.

Problema muestra 5 Un trozo de hielo cuya masa m es de 235 g se funde (reversiblemente) a agua, permaneciendo la temperatura a 0°C durante el proceso. ¿Cuál es el cambio de entropía del cubo de hielo? El calor de fusión del hielo es de 333 kJ/kg.

Solución Fundir el hielo reversiblemente significa que debemos poner al hielo en contacto con un depósito térmico cuya temperatura supere los 0°C en una cantidad diferencial únicamente, fundiéndose por lo tanto sólo una pequeña cantidad del hielo. (Si después bajamos la temperatura del depósito en la misma cantidad diferencial, el hielo fundido se congelará; entonces el proceso es reversible.) Para un proceso reversible así, podemos usar la ecuación 27, o, puesto que la temperatura es constante,

$$S_{\text{agua}} - S_{\text{hielo}} = \int \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T} \int dQ = \frac{Q}{T}.$$

Aquí dQ significa los pequeños elementos de energía térmica que entran al hielo desde el depósito térmico, y el total de todos estos elementos es precisamente el calor total absorbido por el hielo, o sea

$$Q = mL = (0.235 \text{ kg})(333 \text{ kJ/kg}) = 7.83 \times 10^4 \text{ J}.$$

Entonces

$$S_{\text{agua}} - S_{\text{hielo}} = \frac{Q}{T} = \frac{7.83 \times 10^4 \text{ J}}{273 \text{ K}} = 287 \text{ J/K}.$$

La respuesta anterior completa nuestro análisis del cambio de entropía del sistema, pero llevemos el problema un poco más

allá y consideremos también el cambio de entropía del entorno. En este caso, el entorno es el depósito térmico del que se extrae el calor necesario para fundir al hielo. Cada unidad térmica que entra al hielo debe haber salido del depósito, siendo la temperatura la misma tanto del hielo como del depósito. Por lo tanto, el cambio de entropía del depósito es igual en magnitud pero opuesto en signo al del hielo, o sea

$$\Delta S_{\text{depósito}} = -287 \text{ J/K}.$$

El cambio de entropía para el hielo + el depósito, considerados juntos, es entonces cero. Esto es cierto para cualquier proceso reversible, porque cualquier incremento de calor $+dQ$ que entre al sistema debe originarse de un incremento igual $-dQ$ que salga del depósito.

En la práctica, la fusión del hielo es más bien irreversible, como cuando ponemos un cubo de hielo en un vaso de agua a la temperatura ambiente. La diferencia de temperatura entre el hielo y el depósito (el agua) en este caso no es una cantidad diferencial sino que es de alrededor de 20°C . El proceso sólo opera en una dirección (el hielo se funde) y no puede ser invertido en ninguna etapa haciendo sólo un cambio diferencial en la temperatura del agua. No podemos emplear la ecuación 27 en tal caso, y los cálculos de este problema no son válidos. En la sección siguiente veremos cómo manejar un cálculo de este tipo.

26-7 ENTROPÍA: PROCESOS IRREVERSIBLES

La ecuación 27 describe el cálculo del cambio en entropía para un proceso reversible. Sin embargo, no existen en la naturaleza procesos absolutamente reversibles. La fricción y las transferencias de calor no deseadas están siempre presentes, y rara vez podemos llevar a cabo procesos reales en pasos infinitesimales. Por lo tanto, todo proceso termodinámico es hasta cierto punto irreversible.

Para calcular el cambio de entropía para un proceso irreversible, tomamos ventaja del hecho de que la entropía es un estado variable. La diferencia en entropía entre los estados i y f es independiente de la trayectoria que elijamos de i a f . Aun cuando la naturaleza puede elegir una trayectoria irreversible entre i y f para el proceso real, nosotros podemos elegir para el cálculo cualquier trayectoria reversible conveniente.

Para hallar el cambio de entropía para una trayectoria irreversible entre dos estados de equilibrio, debe hallarse el proceso reversible que une a los mismos estados, y calcularse el cambio de entropía usando la ecuación 27.

Consideremos dos ejemplos.

1. **Expansión libre.** Como en la sección 25-6 (véase la figura 14 del capítulo 25), hagamos que un gas ideal duplique su volumen expandiéndose en un espacio vacío. No se efectúa ningún trabajo contra el vacío, de modo que

$W = 0$, y el gas está confinado en un recipiente aislante, por lo que $Q = 0$. De la primera ley, debemos por lo tanto tener $\Delta E_{\text{int}} = 0$. Para un gas ideal, cuya energía interna depende únicamente de la temperatura, se deduce que $T_i = T_f$.

La expansión libre es ciertamente irreversible, porque perdemos el control del sistema una vez que hemos abierto la válvula que separa los dos compartimentos. Existe una diferencia de entropía entre los estados inicial y final, pero no podemos calcularlo usando la ecuación 27, que se aplica únicamente a los procesos reversibles. Claramente, la ecuación 27 no debe ser empleada en forma directa, porque la temperatura no está definida para los pasos intermedios no en equilibrio a través de los cuales evoluciona el sistema una vez que el gas comienza a fluir. Además, $Q = 0$, lo cual presenta una dificultad más para emplear la ecuación 27.

Para hallar el cambio de entropía elegimos una trayectoria reversible de i a f para la cual podamos hacer este cálculo. Una elección conveniente es una expansión isotérmica que sufriese un gas ideal del mismo punto inicial (p_i, V_i, T_i) al mismo punto final (p_f, V_f, T_f) . Representa un procedimiento muy diferente al de una expansión libre, pero une al mismo par de estados en equilibrio. De la ecuación 27, podemos tener entonces

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T} \int_i^f dQ = \frac{Q}{T} = \frac{-W}{T},$$

donde la última etapa puede llevarse a cabo porque $\Delta E_{\text{int}} = 0$ en un proceso isotérmico, y por lo tanto $-W = Q$. Usando la ecuación 27 del capítulo 23 para W , obtenemos

$$\begin{aligned} \Delta S &= \frac{-W}{T} = nR \ln \frac{V_f}{V_i} \\ &= nR \ln 2. \end{aligned} \quad (28)$$

Esto es igual al cambio de entropía para la expansión libre irreversible. Nótese que ΔS es positivo para el sistema.

Puesto que en la expansión libre no existe transferencia de energía de ninguna clase al entorno, el cambio de entropía del entorno es cero. Así, la entropía total del sistema + el entorno aumenta durante una expansión libre.

2. **Transferencia de calor irreversible.** La figura 13a muestra dos bloques cuyas temperaturas iniciales son T_1 y T_2 . Para simplificar, suponemos que los bloques tienen la misma masa m y el mismo calor específico c . Quitamos la barrera aislante que separa a los bloques y los ponemos en contacto térmico, como se muestra en la figura 13b. Finalmente, llegan a la temperatura de equilibrio común T_c . Al igual que en la expansión libre, este proceso es totalmente irreversible, porque perdemos el control una vez que hayamos colocado a los bloques en contacto térmico entre sí.

Para hallar el cambio de entropía en este proceso irreversible elegimos una vez más una trayectoria reversible

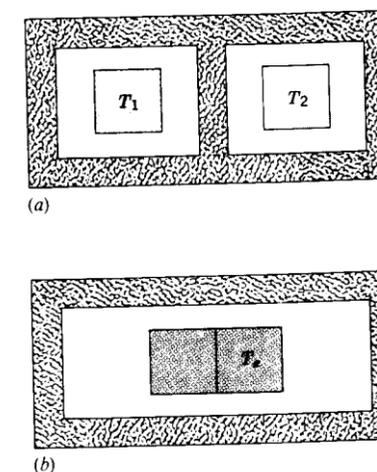


Figura 13 (a) El estado inicial: dos bloques están a temperaturas diferentes en recintos aislados individuales. (b) El estado final: la pared aislante entre los bloques se retira, y se permite que lleguen al equilibrio a la temperatura intermedia T_c .

que nos conduzca al mismo estado final. Consideremos primero el bloque 1 a la temperatura inicial T_1 . (Suponemos que ésta es la temperatura inicial más baja.) Imaginemos una serie de depósitos térmicos a las temperaturas $T_1, T_1 + dT, T_1 + 2dT, \dots, T_c - dT, T_c$. Comenzamos con el bloque 1 en contacto con el primer depósito, y luego lo movemos al siguiente hasta recorrer la secuencia. En cada etapa, entra al bloque una cantidad infinitesimal de calor dQ . El proceso es claramente reversible; en cualquier punto podemos mover el bloque de regreso a la etapa más baja anterior, y fluirá la misma cantidad de calor dQ del bloque de regreso hacia el depósito. Cada transferencia reversible de calor dQ puede expresarse como $mc dT$, pudiendo entonces emplear la ecuación 27 para hallar el cambio de entropía para el bloque 1:

$$\Delta S_1 = \int_i^f \frac{dQ}{T} = mc \int_{T_1}^{T_c} \frac{dT}{T} = mc \ln \frac{T_c}{T_1}. \quad (29)$$

De manera similar podemos construir una serie descendente de depósitos para el bloque 2 entre las temperaturas T_2 y T_c , y hallamos el cambio de entropía para el bloque 2:

$$\Delta S_2 = mc \int_{T_2}^{T_c} \frac{dT}{T} = mc \ln \frac{T_c}{T_2}. \quad (30)$$

El cambio total de la entropía es

$$\begin{aligned} \Delta S &= \Delta S_1 + \Delta S_2 = mc \ln \frac{T_c}{T_1} + mc \ln \frac{T_c}{T_2} \\ &= mc \ln \frac{T_c^2}{T_1 T_2}. \end{aligned} \quad (31)$$

Si T_1 es la temperatura más baja, entonces $\Delta S_1 > 0$ y $\Delta S_2 < 0$. Podemos demostrar que el cambio total de entropía ΔS es siempre positivo, para lo cual necesitamos demostrar que $T_e^2/T_1T_2 > 1$. Hallamos primero la temperatura de equilibrio exigiendo que el calor total transferido sea cero:

$$Q_1 + Q_2 = mc(T_e - T_1) + mc(T_e - T_2) = 0,$$

o sea $T_e = (T_1 + T_2)/2$. Por lo tanto, podemos escribir la cantidad T_e^2/T_1T_2 como:

$$\begin{aligned} \frac{T_e^2}{T_1T_2} &= \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1T_2} = \frac{4T_1T_2 + (T_1 - T_2)^2}{4T_1T_2} \\ &= 1 + \frac{(T_1 - T_2)^2}{4T_1T_2}. \end{aligned}$$

Claramente, esto es mayor que uno (la última cantidad es siempre positiva), de modo que el logaritmo de la ecuación 31 es mayor que cero, y el cambio de entropía es positivo.

El hecho de colocar a los dos bloques en contacto térmico no produce ningún cambio en absoluto en el entorno, de modo que $\Delta S = 0$ para el entorno. Por lo tanto, la entropía total del sistema + el entorno aumenta en esta transferencia de calor irreversible.

26-8 ENTROPÍA Y LA SEGUNDA LEY

Ahora estamos listos para expresar la segunda ley en su forma más general en términos de entropía:

En cualquier proceso termodinámico pasa de un estado de equilibrio a otro, la entropía del sistema + el entorno o bien permanece sin cambio o bien aumenta.

Para los procesos reversibles, como vimos en la sección 26-6, la entropía permanece sin cambio. Como pudimos ver en el caso del problema muestra 5, el cambio de la entropía del sistema era positivo y el del entorno era negativo y de igual magnitud, así que el total era cero.

Para los procesos irreversibles, (es decir, para todos los procesos naturales), la entropía total del sistema + el entorno debe aumentar. Es posible que la entropía del sistema disminuya, pero la entropía del entorno siempre muestra un aumento de mayor magnitud, de modo que el cambio total en la entropía es siempre positivo. *Ningún proceso natural puede mostrar jamás una disminución en la entropía total del sistema + el entorno.*

Como era el caso para las leyes cero y primera, está implícito en esta forma de la segunda ley un enunciado acerca de la existencia y utilidad de una nueva variable termodinámica, en este caso la entropía.

La segunda ley, al igual que las leyes cero y primera, es una generalización de la experiencia. No puede ser de-

mostrada, pero podemos confirmarla en una variedad de circunstancias. Podemos demostrar que es consistente con la observación, en cuanto que prohíbe procesos que pudieran parecer satisfacer a todas las demás leyes conocidas, pero que no son observados. Consideremos este enunciado de la segunda ley respecto a alguno de los principios que ya hemos establecido en este capítulo.

Compresión libre

Imaginemos llevar a cabo la expansión libre con una división removible que separe a las dos mitades del recipiente. Cuando quitamos la división, las moléculas del gas que se movían originalmente hacia la derecha en la figura 14 del capítulo 25 no encuentran una división con la cual chocar, y por lo tanto se diseminan en la mitad del recipiente antes vacía, chocando finalmente contra la pared más lejana. Cuando rebotan de esa pared, no todas encuentran su camino de regreso a la otra mitad, porque posiblemente chocan con otras moléculas que encuentran en su camino. Al final, las colisiones tienden a hacer que los movimientos de las moléculas sucedan al azar, y llenen todo el recipiente.

¿Qué nos impide encontrar todas las moléculas de regreso en la mitad del recipiente un tiempo más tarde? Podríamos llamar a este proceso compresión libre, el inverso de la expansión libre. La ecuación 28 muestra que una compresión libre, en la que $V_f < V_i$, tendría un cambio negativo en la entropía del sistema (sin ningún cambio en la entropía del entorno, como en la expansión libre). Esta aseveración de la segunda ley en términos de entropía prohíbe entonces la compresión libre, y por lo tanto es poco probable que podamos hallar a todo el aire precipitándose al lado opuesto del salón en que estamos sentados. (En la siguiente sección damos otra interpretación de este suceso que nunca se presenta.)

La forma Kelvin-Planck de la segunda ley

A causa de que todas las máquinas operan en ciclos, el cambio de la entropía del sistema (la sustancia de operación) debe ser cero para un ciclo completo de operación. En una máquina perfecta, el entorno (véase la Fig. 3a) libera el calor Q a la temperatura T , y su cambio de entropía es Q/T , una cantidad negativa. Por lo tanto, el cambio total de la entropía del sistema + el entorno es negativo en una máquina perfecta. La existencia de una máquina perfecta violaría entonces el enunciado de la entropía de la segunda ley.

La forma Clausius de la segunda ley

En un refrigerador perfecto, el sistema nuevamente no tiene un cambio de entropía en un ciclo completo, sino

que el entorno libera el calor $-Q$ a la temperatura T_L y absorbe el calor Q a la temperatura T_H . Por lo tanto, el cambio total en la entropía del entorno es

$$\Delta S = \frac{Q}{T_H} - \frac{Q}{T_L} = Q \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T_L} \right).$$

Como $T_H > T_L$, este cambio de entropía es negativo. Entonces, un refrigerador perfecto violaría el enunciado de la entropía de la segunda ley.

La flecha del tiempo

Es el cambio en la entropía el que nos proporciona en última instancia la respuesta a por qué los sistemas evolucionarán naturalmente en una dirección con el tiempo y no en la otra: los sistemas evolucionan siempre en el tiempo de modo que la entropía total del sistema + el entorno aumenta. Si observamos a un sistema en el que la entropía parece disminuir, podemos estar seguros de que en alguna parte existe un cambio en la entropía del entorno lo suficientemente grande como para hacer positivo el cambio total de la entropía.

Problema muestra 6 Un trozo de hielo de masa $m_i = 0.012$ kg está inicialmente a la temperatura $T_i = -15^\circ\text{C}$. Se le deja caer en un recipiente aislado de capacidad calorífica despreciable que contiene una masa $m_w = 0.056$ kg de agua a la temperatura $T_w = 23^\circ\text{C}$. El sistema llega al equilibrio a la temperatura T_e . Calcule el cambio total de la entropía del sistema + el entorno. Utilice las capacidades térmicas específicas y el calor de fusión siguientes: $c_i = 2220$ J/kg · K, $c_w = 4190$ J/kg · K, $L = 333$ kJ/kg.

Solución Echar el hielo al agua es claramente un proceso irreversible; no se hace en etapas infinitesimales, y no podemos regresar al sistema a su estado original invirtiendo el proceso. Para calcular el cambio en la entropía del sistema, debemos primero hallar la temperatura de equilibrio final. Para hacerlo, suponemos que la temperatura final es mayor de 0°C y que todo el hielo se funde, convirtiéndose finalmente en agua a la temperatura de equilibrio. Más adelante, podemos comprobar si esta hipótesis es consistente. Exigiendo que el calor total transferido entre todos los objetos sea cero, podemos hallar la temperatura de equilibrio:

$$m_i c_i (0^\circ\text{C} - T_i) + m_i L + m_i c_w (T_e - 0^\circ\text{C}) + m_w c_w (T_e - T_w) = 0,$$

e insertando los valores dados y resolviendo hallamos

$$T_e = 276.6 \text{ K} = 3.5^\circ\text{C}.$$

Esto es ciertamente consistente con que todo el hielo se funda. (Si, por otra parte, hubiéramos obtenido una temperatura final de 0°C o más baja, sospecharíamos que nuestra hipótesis original era incorrecta, y cambiaríamos la solución en consecuencia.)

Ahora podemos hallar el cambio en la entropía. Primero para el hielo, separamos el procedimiento en tres etapas: el calenta-

miento del hielo a 0°C , la fusión del hielo, y por último el calentamiento del agua resultante a T_e . Usamos la ecuación 29 para el cambio de entropía (reversible) asociado con un cambio en la temperatura y usamos el resultado del problema muestra 5 para el cambio de la entropía en la fusión. El resultado del cambio de entropía ΔS_i para el hielo es

$$\begin{aligned} \Delta S_i &= m_i c_i \ln \frac{273 \text{ K}}{T_i} + \frac{m_i L}{273 \text{ K}} + m_i c_w \ln \frac{T_e}{273 \text{ K}} \\ &= (0.012 \text{ kg})(2220 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{273 \text{ K}}{258 \text{ K}} \\ &\quad + \frac{(0.012 \text{ kg})(333 \text{ kJ/kg})}{273 \text{ K}} \\ &\quad + (0.012 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{276.6 \text{ K}}{273 \text{ K}} \\ &= 16.7 \text{ J/K}. \end{aligned}$$

Para el agua, obtenemos similarmente su cambio de entropía (reversible):

$$\begin{aligned} \Delta S_w &= m_w c_w \ln \frac{T_e}{T_w} = (0.056 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) \ln \frac{276.6 \text{ K}}{296 \text{ K}} \\ &= -15.9 \text{ J/K}. \end{aligned}$$

El cambio de entropía del entorno es cero, puesto que todo el procedimiento tiene lugar en un recipiente aislado. El cambio total de la entropía del sistema más el entorno es, por lo tanto:

$$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_w = 16.7 \text{ J/K} + (-15.9 \text{ J/K}) = 0.8 \text{ J/K},$$

y éste es claramente positivo, como lo exige la segunda ley.

26-9 ENTROPÍA Y PROBABILIDAD

La entropía es una variable macroscópica, asociada con el estado general de un sistema y calculable a partir de cantidades macroscópicas asociadas con su estado general. Hemos visto que todas las variables macroscópicas en la termodinámica tienen una cantidad microscópica correspondiente (como temperatura, una cantidad macroscópica, y energía cinética molecular media, una cantidad microscópica). Si hacemos ciertas suposiciones respecto a las propiedades microscópicas del sistema, usualmente podemos hallar una manera de relacionar las cantidades macroscópicas y microscópicas. En el caso de la temperatura de un gas, estas suposiciones incluyen un modelo mecánico de las moléculas y sus interacciones, junto con una distribución estadística de las energías moleculares. Por lo tanto, nos gustaría considerar el cálculo microscópico de la entropía de un sistema.

La cantidad microscópica relacionada con la entropía es la probabilidad relativa de diferentes maneras de distribuir las moléculas del sistema. Consideremos primeramente algunas aplicaciones cualitativas de esta relación:

1. Expansión libre. En una expansión libre se permite que las moléculas de gas confinadas a una mitad de una

caja llenen toda la ésta. Consideremos a toda la caja en sus dos circunstancias: primero, en el instante en que la división se retira y todas las moléculas ocupan una mitad de la caja, y segundo, cuando las moléculas llenan toda la caja. La primera condición es un estado de probabilidad muy baja; dejado en libertad, sería muy poco probable que el sistema se distribuyera por sí mismo de esta manera. La segunda condición es más bien de alta probabilidad. Podemos considerar que las moléculas en expansión libre se mueven de una condición de probabilidad baja a otra de probabilidad alta. Es decir, dadas todas las maneras posibles de distribuir las moléculas al azar dentro de la caja, un gran número de esas maneras posibles muestra una distribución más bien uniforme de las moléculas, mientras que un número muy pequeño muestra una distribución no uniforme. Por ejemplo, consideremos una caja con 10 moléculas únicamente y evaluemos el número de maneras en que un número n determinado se encuentra en la mitad izquierda de la caja en cualquier instante. Puesto que, en este esquema, cada molécula tiene dos ubicaciones posibles en la caja (mitad izquierda o mitad derecha), el número total de maneras en que podemos distribuir a las moléculas, con dos alternativas para cada una, es $2^{10} = 1024$. De estas 1024 maneras, en sólo una hallaremos a todas las moléculas en la mitad izquierda ($n = 10$), mientras que puede demostrarse que existen 252 maneras de tener una distribución uniforme ($n = 5$). Al aumentar el número de moléculas, la probabilidad relativa de una distribución uniforme aumenta de manera muy acusada. Con 100 moléculas existe todavía una sola manera de distribuir las moléculas a todas en la mitad izquierda, pero existen unas 10^{29} maneras de distribuir las moléculas igualmente entre las dos mitades. La expansión libre, en la cual existe un aumento en entropía, puede ser entonces considerada microscópicamente como una transformación de un estado de muy baja probabilidad a un estado de muy alta probabilidad.

2. Conducción de calor. En este ejemplo dos cuerpos de temperaturas diferentes T_1 y T_2 alcanzan una temperatura intermedia uniforme T_c cuando entran en contacto. Este caso es similar a la expansión libre, excepto que hacemos la distribución por velocidad en lugar de hacerlo por posición. De nuevo, consideraremos a todo el sistema en dos circunstancias: justo después del contacto, con las moléculas "calientes" (las que se mueven más rápidamente) en un lado y las moléculas "frías" (que se mueven más despacio) en el otro, y mucho después, cuando la distribución de las velocidades entre las dos mitades es uniforme. Una vez más, la distribución separada (moléculas rápidas en un lado, moléculas lentas en el otro) es un estado de baja probabilidad y la distribución uniforme es un estado de alta probabilidad. Al entrar en contacto, el sistema evoluciona espontáneamente de un estado de baja probabilidad a otro de alta probabilidad.

3. Una taza de café revuelto. Supongamos que meneamos una taza de café y luego retiramos la cucharilla. Con el tiempo, la circulación del líquido cesa, y la viscosidad hace que la energía del fluido en rotación se disipe como energía interna de las moléculas. En el estado inicial, existe un movimiento ordenado del café en rotación. En el estado de equilibrio final existe un movimiento molecular al azar. Una vez más, la circulación ordenada de las moléculas es un estado de baja probabilidad, mientras que el movimiento desordenado al azar es un estado de alta probabilidad. En este proceso natural, el sistema ha pasado de un estado de baja probabilidad a un estado de alta probabilidad.

En los tres casos anteriores, el sistema ha pasado espontáneamente de un estado de baja probabilidad a otro de alta probabilidad. Las tres situaciones son procesos naturales irreversibles que se caracterizan por un aumento en la entropía del sistema. Por lo tanto, es razonable concluir que existe una relación cuantitativa entre la probabilidad y la entropía. Esta relación, que fue propuesta por Boltzmann, es

$$S = k \ln P. \quad (32)$$

Aquí k es la constante de Boltzmann, y S es la entropía del sistema. P , para definirla vagamente, es el número de ordenamientos moleculares diferentes que corresponden al mismo estado macroscópico. Si, por ejemplo, las circunstancias son tan especiales que únicamente es posible un ordenamiento, entonces $P = 1$ y $S (= k \ln P) = 0$, y tenemos un estado completamente ordenado. Los valores de P más grandes, como el que corresponde a la distribución más uniforme de las moléculas en el recipiente, dan valores de entropía más grandes. Cuando decimos que el estado A de un sistema es más probable que el estado B , queremos decir simplemente que el estado A tiene el valor de P más grande.

Se ha dicho también que un aumento en la entropía es una medida del aumento en el desorden de un sistema, y entonces la entropía es, en efecto, una medida del desorden. El término "desorden" no tiene una definición matemática precisa, sino que se relaciona cualitativamente con la probabilidad. Un estado de desorden bajo es un estado en el que las componentes de un sistema han sido distribuidas cuidadosamente, como colocando a todas las moléculas con velocidades bajas en una parte de un sistema. Un estado de desorden alto es un estado al azar en el que no ha ocurrido ninguna distribución. El aumento en la entropía de un sistema en los procesos naturales puede entonces considerarse también como un aumento en el nivel de desorden del sistema. Los procesos naturales tienden a hacer al universo más desordenado.*

* Para una relación de intentos de violar la segunda ley, incluyendo al diablo de Maxwell y un diseño de una máquina térmica perfecta en la que la sustancia de operación es una molécula de un gas, véase, "Demons, Engines, and the Second Law", por Charles H. Bennet, *Scientific American*, noviembre de 1987, pág. 108.

La segunda ley de la termodinámica nos dice que, si un sistema aislado experimenta un proceso espontáneo, su estado final será uno en el que la entropía (y también P) es máxima. Existe siempre (en principio) la posibilidad de que, debido a una fluctuación estadística, pueda ocurrir algún otro estado, incluso un estado cuya entropía sea más baja que la del estado inicial. En sistemas con un número de partículas muy pequeño, tales fluctuaciones del comportamiento promedio existen, en efecto, siendo un buen ejemplo el movimiento browniano (sección 24-5). En sistemas macroscópicos, sin embargo, la probabilidad de que la entropía crezca realmente en un proceso espontáneo resulta ser increíblemente pequeña. Entonces, podemos predecir con completa seguridad que (1) las moléculas del aire del salón *no* se agruparán

espontáneamente en un lado, (2) un vaso de agua a la temperatura ambiente no se separará espontáneamente en cubos de hielo y agua más templada, y (3) el café no comenzará a girar espontáneamente en la taza. Cada uno de estos procesos puede conservar energía, siendo entonces consistente con la primera ley. Sin embargo, no podremos observarlos, ¡aunque nos quedemos esperando un tiempo tan largo como la edad actual del universo! Se ha dicho que los cálculos de las probabilidades de tales eventos le dan un significado operativo a la palabra "nunca". El área de aplicación de la segunda ley de la termodinámica es tan amplia y la posibilidad de que la naturaleza la contradiga es tan pequeña que cuenta con la distinción de ser una de las leyes más útiles y generales de toda la ciencia.

PREGUNTAS

- ¿Es el ser humano una máquina térmica? Explique.
- ¿No podríamos igualmente definir la eficiencia de una máquina como $e = |W|/|Q_{in}|$ en lugar de $e = |W|/|Q_{out}|$? ¿Por qué no podemos?
- Las eficiencias de las plantas de potencia nuclear son menores que las de las plantas de combustibles fósiles. ¿Por qué?
- ¿Puede una cantidad dada de energía mecánica ser convertida completamente en energía térmica? De ser así, dé un ejemplo.
- Un inventor sugirió que una casa podría calentarse de la manera siguiente. Un sistema que se asemeje a un refrigerador extrae calor de la Tierra y lo descarga en la casa. El inventor afirmó que el calor abastecido a la casa podía sobrepasar al trabajo efectuado por la máquina del sistema. ¿Usted qué opina?
- Comente la aseveración: "Una máquina térmica convierte movimiento mecánico desordenado en movimiento mecánico organizado".
- ¿Es posible el concepto de que una máquina térmica opere entre el agua de la superficie templada de un mar tropical y el agua más fría bajo la superficie? ¿Es práctica la idea? (Véase "Solar Sea Power", por Clarence Zener, *Physics Today*, enero de 1973, pág. 48).
- Dé una explicación cualitativa de cómo producen energía interna las fuerzas de fricción entre superficies móviles. ¿Por qué no ocurre el procedimiento inverso (que la energía interna produzca un movimiento relativo de esas superficies)?
- ¿Son reversibles alguno de los fenómenos siguientes: (a) la rotura de una botella de refresco vacía; (b) el mezclado de un coctel; (c) dar cuerda a un reloj; (d) fundir un cubo de hielo en un vaso de té helado; (e) quemar un leño; (f) ponchar una llanta de automóvil; (g) calentar eléctricamente un bloque de metal con aislamiento; (h) expandir isotérmicamente un gas no ideal contra un émbolo; (i) terminar la "Sinfonía Inconclusa"; (j) escribir este libro?
- Dé algunos ejemplos de procesos irreversibles en la naturaleza.
- ¿Existen procesos naturales que sean reversibles?
- ¿Podemos calcular el trabajo efectuado durante un proceso irreversible en términos de un área en un diagrama pV ? ¿Se efectúa algún trabajo?
- Si una máquina Carnot es independiente de la sustancia de operación, entonces las máquinas reales serían similarmente independientes, hasta un cierto punto. Entonces, ¿por qué para las máquinas reales nos preocupa tanto hallar combustibles apropiados como el carbón, la gasolina, o un material fisionable? ¿Por qué no usar piedras como combustible?
- ¿En qué condiciones sería una máquina térmica ideal 100% eficiente?
- ¿Qué factores reducen la eficiencia de una máquina térmica de su valor ideal?
- Se desea incrementar la eficiencia de una máquina Carnot tanto como sea posible. Podemos hacerlo aumentando T_H a cierta cantidad, manteniendo a T_L constante, o disminuyendo T_L en la misma cantidad y manteniendo a T_H constante. ¿Cuál elegiría usted?
- Explique por qué una habitación puede calentarse dejando abierta la puerta de un horno, pero no puede enfriarse dejando abierta la puerta de un refrigerador de cocina.
- ¿Por qué obtenemos menos kilometraje de la gasolina de nuestro automóvil en invierno que en verano?
- De vez en cuando los inventores pretenden haber perfeccionado un aparato que efectúe un trabajo útil pero que no consuma combustible (o muy poco). ¿Qué piensa usted que es lo más verosímil en tales casos: (a) los inventores tienen razón, (b) los inventores están equivocados en sus mediciones, o (c) los inventores son unos charlatanes?

¿Piensa usted que tal pretensión debería ser examinada a fondo por una mesa de científicos e ingenieros? En su opinión, ¿se justificaría el tiempo y el esfuerzo?

- Hemos visto que las máquinas reales desechan siempre cantidades sustanciales de calor a sus depósitos de baja temperatura. Parece vergonzoso desperdiciar esta energía calorífica. ¿Por qué no usar este calor para mover una segunda máquina, sirviendo el depósito de baja temperatura de la primera máquina como depósito de alta temperatura de la segunda?
- Dé ejemplos en los que la entropía de un sistema disminuye y explique por qué no se viola la segunda ley de la termodinámica.
- ¿Violan los seres vivos la segunda ley de la termodinámica? Por ejemplo, cuando un pollito sale de un huevo se vuelve cada vez más ordenado y organizado. Sin embargo, el aumento de la entropía requiere desorden y decadencia. ¿Está disminuyendo realmente la entropía del pollito mientras crece?
- Dos recipientes de gases a diferentes temperaturas están aislados del entorno y separados entre sí por una división que permite un intercambio de calor. ¿Qué tendría que pasar si la entropía fuese a disminuir? ¿Aumentar? ¿Qué es más probable que pase?
- ¿Existe un cambio de entropía en los movimientos mecánicos puros?
- Demuestre que la entropía total crece cuando el trabajo se convierte en calor por la fricción entre superficies deslizantes. Describa el aumento de desorden.
- Del Sol a la Tierra fluye energía calorífica. Demuestre que la entropía del sistema Tierra-Sol aumenta durante este proceso.
- ¿Es cierto que la energía calorífica del universo está siendo poco a poco cada vez menos disponible? De ser así, ¿por qué?
- Considere una caja que contiene un número de moléculas muy pequeño, digamos cinco. Puede suceder a veces, por azar, que todas estas moléculas se hallen en la mitad izquierda de la caja, estando completamente vacía la mitad derecha. Esto es precisamente el inverso de la expansión libre, un proceso que hemos declarado ser *irreversible*. ¿Cuál es su explicación?
- Una banda de hule se siente más caliente que su entorno inmediatamente después de haber sido estirada con rapidez; resulta marcadamente más fría cuando se deja que se contraiga súbitamente. También, una banda de hule que

soporte una carga se contrae al calentarse. Explique estas observaciones usando el hecho de que las moléculas de hule constan de cadenas largas de átomos entrelazados y estrechamente unidos con una orientación al azar.

- ¿Qué cambio en la entropía ocurre, en caso de que suceda, cuando los 52 naipes de una baraja quedan barajados de un modo particular? ¿Es apropiado en este caso el concepto de entropía? De ser así, explique cómo podría uno obtener un enfriamiento útil llevando a cabo este proceso adiabáticamente.
- Comente la siguiente opinión de Panofsky y Phillips: "Desde el punto de vista de la física formal existe únicamente un concepto que es asimétrico en el tiempo, a saber, la entropía. Pero esto hace que sea razonable suponer que la segunda ley de la termodinámica puede ser empleada para cerciorarse del sentido del tiempo de manera independiente de cualquier marco de referencia; es decir, tomaremos como dirección positiva del tiempo aquella que sea de un desorden estadísticamente creciente, o de entropía creciente." (Véase, a este respecto, "The Arrow of Time", por David Layzer, *Scientific American*, diciembre de 1975, pág. 56.)
- Explique la frase: "Los rayos cósmicos disminuyen continuamente la entropía de la Tierra sobre la que inciden." ¿Por qué no contradice esto a la segunda ley de la termodinámica?
- Cuando ponemos naipes juntos en una baraja o ladrillos juntos para construir una casa, por ejemplo, aumentamos el orden del mundo físico. ¿Viola esto la segunda ley de la termodinámica? Explique.
- ¿Podemos emplear la termodinámica terrestre, que se sabe se aplica a cuerpos circunscritos y aislados, para todo el universo? De ser así, ¿está el universo limitado y de qué está aislado el universo?
- La temperatura y la presión son ejemplos de propiedades *intensivas* de un sistema, siendo sus valores para cualquier muestra del sistema independientes del tamaño de la muestra. Sin embargo, la entropía, al igual que la energía interna, es una propiedad *extensiva*, siendo su valor para cualquier muestra de un sistema proporcional al tamaño de la muestra. Comente.
- La primera, segunda, y tercera leyes de la termodinámica pueden parafrasearse, respectivamente, como sigue: (1) Uno no puede ganar. (2) Ni siquiera puede uno empatar. (3) Uno no puede salirse del juego. Explique en qué sentido son permisibles estas frases comparativas.

25.0%. Calcule, por ciclo, el calor absorbido de la combustión del combustible y el calor descargado a la atmósfera. (b) Después de una afinación, la eficiencia es del 31.0%. ¿Cuáles son los nuevos valores de las cantidades calculadas en (a)?

- Calcule la eficiencia de una planta de potencia por combustible fósil que consume 382 toneladas métricas de car-

bón cada hora para producir trabajo útil a razón de 755 MW. El calor de combustión del carbón es de 28.0 MJ/kg.

- Dos moles de un gas ideal monoatómico se hacen pasar por el ciclo mostrado en la figura 14. El proceso *bc* es una expansión adiabática reversible. También, $p_b = 10.4$ atm, $V_b = 1.22$ m³, y $V_c = 9.13$ m³. Calcule (a) el calor añadido al gas, (b) el calor que sale del gas, (c) el trabajo neto efectuado por el gas, y (d) la eficiencia del ciclo.

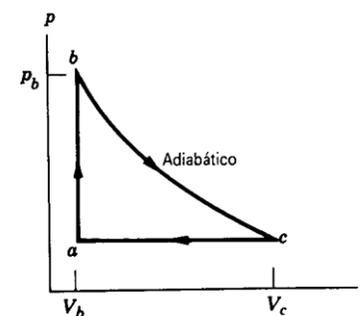


Figura 14 Problema 4.

- Un mol de un gas monoatómico ideal inicialmente a un volumen de 10 L y una temperatura de 300 K se calienta a volumen constante a la temperatura de 600 K, se deja expandir isotérmicamente a su presión inicial, y finalmente se comprime isobáricamente (es decir, a presión constante) a su volumen, presión, y temperatura originales. (a) Calcule la entrada de calor al sistema durante un ciclo. (b) ¿Cuál es el trabajo neto efectuado por el gas durante un ciclo? (c) ¿Cuál es la eficiencia de este ciclo?
- Un motor de combustión interna de gasolina puede ser aproximado por el ciclo mostrado en la figura 15. Suponga un gas diatómico ideal y use una relación de compresión de 4:1 ($V_a = 4V_b$). Suponga que $p_b = 3p_a$. (a) Determine la presión y la temperatura en cada uno de los vértices del diagrama *pV* en términos de p_a y de T_a . (b) Calcule la eficiencia del ciclo.
- La máquina A, comparada con la máquina B, produce, por ciclo, cinco veces el trabajo pero recibe el triple y descarga el doble de calor. Determine la eficiencia de cada máquina.

Sección 26-3 Refrigeradores y la segunda ley

- Un refrigerador efectúa 153 J de trabajo para transferir 568 J de calor desde su compartimento frío. (a) Calcule el coeficiente de rendimiento del refrigerador. (b) ¿Cuánto calor es descargado a la cocina?
- Para hacer hielo, un congelador extrae 185 kJ de calor a -12.0°C . El congelador tiene un coeficiente de rendimiento de 5.70. La temperatura ambiente es 26.0°C . (a) ¿Cuánto calor fue abastecido a la habitación? (b) ¿Cuánto trabajo se requirió para hacer funcionar el congelador?

Sección 26-4 El ciclo de Carnot

- Cuánto trabajo debe efectuarse para extraer 10.0 J de calor (a) de un depósito a 7°C y transferirlo a otro a 27°C por

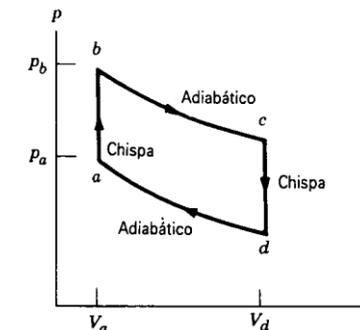


Figura 15 Problema 6.

medio de un refrigerador usando un ciclo de Carnot; (b) de uno a -73°C a otro a 27°C ; (c) de uno a -173°C a otro a 27°C ; y (d) de uno a -223°C a otro a 27°C ?

- En un ciclo de Carnot, la expansión isotérmica de un gas ideal tiene lugar a 412 K y la compresión isotérmica a 297 K. Durante la expansión se transfieren al gas 2090 J de energía calorífica. Determine (a) el trabajo llevado a cabo por el gas durante la expansión isotérmica, (b) el calor rechazado por el gas durante la compresión isotérmica, y (c) el trabajo efectuado sobre el gas durante la compresión isotérmica.
- Una máquina de Carnot tiene una eficiencia de 22%. Opera entre depósitos de calor cuya temperatura difiere en 75°C . Halle las temperaturas de los depósitos.
- Para el ciclo de Carnot ilustrado en la figura 7, demuestre que el trabajo efectuado por el gas durante el proceso *bc* (etapa 2) tiene el mismo valor absoluto que el trabajo efectuado sobre el gas durante el proceso *da* (etapa 4).
- Un aparato que licua helio está en un laboratorio a 296 K. El helio en el aparato está a 4.0 K. Si se transfieren 150 mJ de calor del helio, halle la cantidad mínima de calor abastecido al laboratorio.
- Un acondicionador de aire toma aire de una habitación a 70°F y lo transfiere al exterior, el cual está a 95°F . ¿Cuántos joules de calor se transfieren de la habitación por cada joule de energía eléctrica necesaria para hacer funcionar al refrigerador?
- Un inventor pretende haber creado una bomba de calor que extrae calor de un lago a 3.0°C y abastece calor a razón de 20 kW a un edificio a 35°C , empleando únicamente 1.9 kW de potencia eléctrica. ¿Cómo juzga usted esta pretensión?
- (a) Una máquina Carnot opera entre un depósito caliente a 322 K y un depósito frío a 258 K. Si absorbe 568 J de calor por ciclo del depósito caliente, ¿cuánto trabajo por ciclo abastece? (b) Si la misma máquina, trabajando en sentido inverso, funciona como un refrigerador entre los mismos dos depósitos, ¿cuánto trabajo por ciclo debe ser suministrado para transferir 1230 J de calor del depósito frío?
- Se usa una bomba de calor para calentar un edificio. La temperatura del exterior es de -5.0°C y la temperatura dentro del edificio debe mantenerse a 22°C . El coeficiente

PROBLEMAS

Sección 26-2 Máquinas térmicas y la segunda ley

- Una máquina térmica absorbe 52.4 kJ de calor y descarga 36.2 kJ de calor en cada ciclo. Calcule (a) la eficiencia y (b) el trabajo efectuado por la máquina por ciclo.
- Un motor de automóvil desarrolla 8.18 kJ de trabajo por ciclo. (a) Antes de una afinación, la eficiencia es del

de rendimiento es 3.8, y la bomba suministra 7.6 MJ de calor al edificio cada hora. ¿A qué razón debe efectuarse trabajo para hacer funcionar la bomba?

19. Si un ciclo de Carnot se recorre en sentido inverso, tenemos un refrigerador ideal. Se absorbe una cantidad de calor $|Q_L|$ a la temperatura T_L más baja y se suministra una cantidad de calor $|Q_H|$ a la temperatura T_H más alta. La diferencia es el trabajo W que debe ser abastecido para hacer funcionar al refrigerador. (a) Demuestre que

$$|W| = |Q_L| \frac{T_H - T_L}{T_L}$$

(b) El coeficiente de rendimiento K de un refrigerador se define como la razón del calor extraído de la fuente fría al trabajo necesario para hacer funcionar al refrigerador. Demuestre que, idealmente,

$$K = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

(c) En un refrigerador mecánico el serpentín de baja temperatura está a una temperatura de -13°C y el gas comprimido en el condensador tiene una temperatura de 25°C . Halle el coeficiente teórico de rendimiento.

20. El motor de un refrigerador tiene una potencia de salida de 210 W. El compartimiento de congelar está a -3.0°C y el aire exterior está a 26°C . Suponiendo que la eficiencia sea el 85% de la ideal, calcule la cantidad de calor que puede ser extraído del compartimiento de congelar en 15 min.
21. Demuestre que la eficiencia de una máquina térmica reversible ideal se relaciona con el coeficiente de rendimiento del refrigerador reversible obtenido al hacer marchar el motor en reversa según la relación $e = 1/(K + 1)$.
22. (a) En una máquina térmica de Carnot de dos tiempos, se absorbe una cantidad de calor $|Q_1|$ a una temperatura T_1 , se efectúa un trabajo $|W_1|$, y se descarga una cantidad de calor $|Q_2|$ a una temperatura más baja T_2 durante el primer tiempo. El segundo tiempo absorbe el calor cargado por el primero, efectúa el trabajo $|W_2|$, y descarga una cantidad de calor $|Q_3|$ a la temperatura T_3 más baja. Demuestre que la eficiencia de la combinación es $(T_1 - T_3)/T_1$. (b) Una combinación mercurio-turbina de vapor aspira vapor de mercurio saturado de una caldera a 469°C y lo descarga para calentar una caldera de vapor a 238°C . La turbina de vapor recibe el vapor a esta temperatura y lo descarga a un condensador a 37.8°C . Calcule la eficiencia máxima de la combinación.
23. Una máquina de Carnot trabaja entre las temperaturas T_1 y T_2 . Impulsa a un refrigerador de Carnot que trabaja entre dos temperaturas diferentes T_3 y T_4 (véase la Fig. 16). Halle la razón $|Q_3|/|Q_1|$ en términos de las cuatro temperaturas.
24. Un inventor pretende haber inventado cuatro máquinas, cada una de las cuales opera entre depósitos de calor a 400 y 300 K. Los datos de cada máquina, por ciclo de operación, son como sigue: Máquina A: $Q_{in} = 200 \text{ J}$, $Q_{out} = -175 \text{ J}$, $W = 40 \text{ J}$; máquina B: $Q_{in} = 500 \text{ J}$, $Q_{out} = -200 \text{ J}$, $W = 400 \text{ J}$; máquina C: $Q_{in} = 600 \text{ J}$, $Q_{out} = -200 \text{ J}$, $W = 400 \text{ J}$; máquina D: $Q_{in} = 100 \text{ J}$, $Q_{out} = -90 \text{ J}$, $W = 10 \text{ J}$. ¿Qué

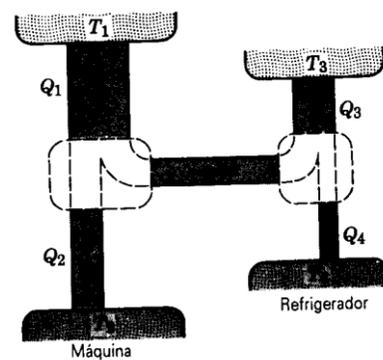


Figura 16 Problema 23.

- ley, de la termodinámica la primera o la segunda viola cada máquina?
25. En una locomotora de vapor, entra a los cilindros vapor a una presión de caldera de 16.0 atm, se expande adiabáticamente a 5.60 veces su volumen original, y luego escapa a la atmósfera. Calcule (a) la presión del vapor después de la expansión y (b) la mayor eficiencia posible de la máquina.
26. (a) Trace con precisión un ciclo de Carnot en un diagrama pV para un mol de un gas ideal. El punto a (véase la Fig. 7) corresponde a $p = 1.00 \text{ atm}$, $T = 300 \text{ K}$, y el punto b corresponde a 0.500 atm , $T = 300 \text{ K}$; considere que el depósito de baja temperatura está a 100 K . Sea $\gamma = 1.67$. (b) Calcule gráficamente el trabajo efectuado en este ciclo. (c) Calcule el trabajo analíticamente.
27. Un mol de un gas monoatómico ideal se emplea como la sustancia en una máquina que opera según el ciclo mostrado en la figura 17. Calcule (a) el trabajo efectuado por la máquina por ciclo, (b) el calor añadido por ciclo durante la carrera de expansión abc , y (c) la eficiencia de la máquina. (d) ¿Cuál es la eficiencia Carnot de una máquina que opera entre las temperaturas más alta y más baja presentes en el ciclo? ¿Cómo se compara ésta con la eficiencia calculada en (c)? Suponga que $p_1 = 2p_0$, $V_1 = 2V_0$, $p_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, y $V_0 = 0.0225 \text{ m}^3$.

Sección 26-6 Entropía: procesos reversibles

28. En la figura 12c, supongamos que el cambio en la entropía del sistema al pasar del estado a al estado b a lo largo de

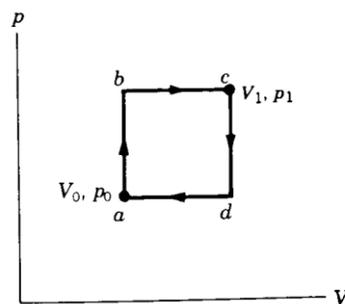


Figura 17 Problema 27.

la trayectoria 1 es $+0.60 \text{ J/K}$. ¿Cuál es el cambio de la entropía al pasar (a) del estado a al estado b a lo largo de la trayectoria 2 y (b) del estado b al estado a a lo largo de la trayectoria 2?

29. Un gas ideal experimenta una expansión isotérmica reversible a 132°C . La entropía del gas aumenta en 46.2 J/K . ¿Cuánto calor fue absorbido?
30. Se hace que cuatro moles de un gas ideal se expandan de un volumen V_1 a un volumen $V_2 = 3.45V_1$. (a) Si la expansión es isotérmica a la temperatura $T = 410 \text{ K}$, halle el trabajo efectuado sobre el gas al expandirse. (b) Halle el cambio en la entropía, de haber alguno. (c) Si la expansión fuese reversiblemente adiabática en lugar de isotérmica, ¿cuál es el cambio en la entropía?
31. (a) Demuestre que un ciclo de Carnot, graficado sobre un diagrama de temperatura versus entropía (TS), es un rectángulo. Para el ciclo de Carnot mostrado en la figura 18, calcule (b) el calor que entra y (c) el trabajo efectuado sobre el sistema.

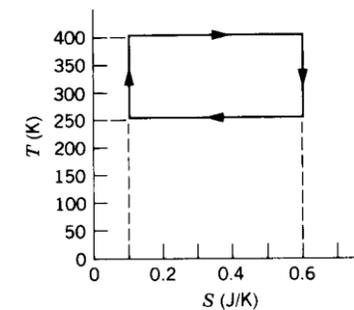


Figura 18 Problema 31.

32. Halle (a) el calor absorbido y (b) el cambio en entropía de un bloque de cobre de 1.22 kg cuya temperatura aumenta reversiblemente de 25.0 hasta 105°C .
33. A temperaturas muy bajas, el calor específico molar de muchos sólidos es (aproximadamente) proporcional a T^3 ; es decir, $C_v = AT^3$, donde A depende de la sustancia en particular. Para el aluminio, $A = 3.15 \times 10^{-5} \text{ J/mol} \cdot \text{K}^4$. Halle el cambio de entropía de 4.8 mol de aluminio cuando su temperatura se eleva de 5.0 a 10 K .
34. Puede transferirse calor del agua a 0°C , a la presión atmosférica, sin provocar que el agua se congele, si se hace con poca agitación del agua. Suponga que el agua se enfría a -5.0°C antes de que el hielo comience a formarse. Halle el cambio en entropía que ocurre durante la congelación súbita de 1.0 g de agua que tiene lugar entonces.
35. Un objeto de capacidad calorífica constante C se calienta de una temperatura inicial T_i a una temperatura final T_f al ponerse en contacto con un depósito a T_f . Represente el proceso en una gráfica de C/T contra T y demuestre gráficamente que el cambio total ΔS en la entropía (objeto + depósito) es positivo y (b) demuestre cómo el uso de depósitos a temperaturas intermedias permite que el proceso se lleve a cabo de una manera que haga a ΔS tan pequeña como se desee.

36. Se hace que un mol de un gas monoatómico ideal recorra el ciclo mostrado en la figura 19. (a) ¿Cuánto trabajo se efectúa sobre el gas al expandirlo de a a c a lo largo de la trayectoria abc ? (b) ¿Cuál es el cambio en la energía interna y en la entropía al pasar de b a c ? (c) ¿Cuál es el cambio en la energía interna y en la entropía al pasar por un ciclo completo? Exprese todas las respuestas en términos de la presión p_0 y del volumen V_0 en el punto a del diagrama.

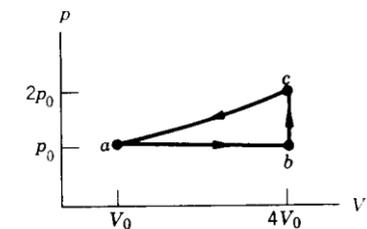


Figura 19 Problema 36.

Sección 26-7 Entropía: procesos irreversibles

37. Un gas ideal experimenta una expansión isotérmica a 77°C , aumentando su volumen de 1.3 a 3.4 L . El cambio de entropía del gas es de 24 J/K . ¿Cuántos moles de gas están presentes?
38. Suponga que se trasfiere la misma cantidad de energía calorífica, digamos 260 J , por conducción de un depósito térmico a una temperatura de 400 K a otro depósito, cuya temperatura es (a) 100 K ; (b) 200 K ; (c) 300 K , y (d) 360 K . Calcule los cambios en la entropía y explique la tendencia.
39. Una barra de latón está en contacto térmico con un depósito de calor a 130°C en un extremo y un depósito de calor a 24.0°C en el otro extremo. (a) Calcule el cambio total en la entropía que surge del proceso de conducción de 1200 J de calor a través de la barra. (b) ¿Cambia la entropía de la barra durante el proceso?
40. Se hace que un mol de un gas diatómico ideal recorra el ciclo mostrado en el diagrama pV de la figura 20 donde $V_2 = 3V_1$. Determine, en términos de p_1 , V_1 , T_1 , y R : (a) p_2 , p_3 , y T_3 y (b) W , Q , ΔE_{int} , y ΔS para los tres procesos.

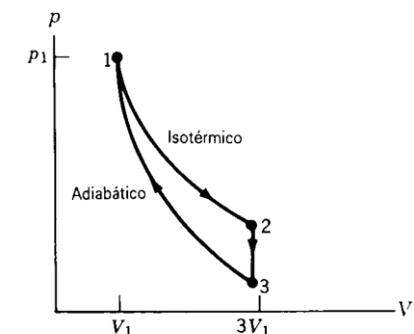


Figura 20 Problema 40.

41. Un mol de un gas monoatómico ideal es llevado de un estado inicial de presión p_0 y volumen V_0 a un estado final de presión $2p_0$ y volumen $2V_0$ por dos procesos diferentes. (I) Se expande isotérmicamente hasta que su volumen se duplica, y luego se aumenta su presión a volumen constante hasta el estado final. (II) Se le comprime isotérmicamente hasta que su presión se duplica, y luego se aumenta su volumen a presión constante hasta el estado final. Muestre la trayectoria de cada proceso en un diagrama pV . Calcule para cada proceso, en términos de p_0 y de V_0 : (a) el calor absorbido por el gas en cada parte del proceso; (b) el trabajo efectuado sobre el gas en cada parte del proceso; (c) el cambio en la energía interna del gas, $E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i}$; y (d) el cambio en la entropía del gas, $S_f - S_i$.

Sección 26-8 Entropía y la segunda ley

42. Un bloque de cobre de 50.0 g que tiene una temperatura de 400 K se sitúa en una caja aislante con un bloque de plomo de 100 g que tiene una temperatura de 200 K. (a) ¿Cuál es la temperatura de equilibrio de este sistema de dos bloques? (b) ¿Cuál es el cambio en la energía interna del sistema de los dos bloques al cambiar de la condición inicial a la condición de equilibrio? (c) ¿Cuál es el cambio en la entropía del sistema de los dos bloques? (Véase la tabla 1 en el capítulo 25.)
43. Una mezcla de 1.78 kg de agua y 262 g de hielo a 0°C se lleva, en un proceso reversible, a un estado final de equilibrio donde la relación agua/hielo, por masa, es de 1:1 a 0°C . (a) Calcule el cambio de entropía del sistema durante el proceso. (b) El sistema es luego regresado al primer estado de equilibrio, pero de un modo irreversible (haciendo uso de un quemador Bunsen, por ejemplo). Calcule el cambio de entropía del sistema durante este proceso. (c) Demuestre que su respuesta es consistente con la segunda ley de la termodinámica.
44. En un experimento de calor específico se mezclan 196 g de aluminio a 107°C con 52.3 g de agua a 18.6°C . (a) Calcule la temperatura de equilibrio. Halle el cambio de entropía de (b) el aluminio y (c) el agua. (d) Calcule el cambio de entropía del sistema. (Sugerencia: Véanse las Ec. 29 y 30).
45. Un cubo de hielo de 12.6 g a -10.0°C se coloca en un lago cuya temperatura es de $+15.0^\circ\text{C}$. Calcule el cambio en la entropía del sistema cuando el cubo de hielo llegue al equilibrio térmico con el lago. (Sugerencia: ¿Afectará el cubo de hielo la temperatura del lago?)

APÉNDICE A

EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)[†]

LAS UNIDADES SI BÁSICAS

Cantidad	Nombre	Símbolo	Definición
longitud	metro	m	"...la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío en $1/299,792,458$ de segundo." (1983)
masa	kilogramo	kg	"...este prototipo [un cilindro de platino-iridio] se considerará en lo sucesivo como la unidad de masa." (1889)
tiempo	segundo	s	"...la duración de 9,192,631,770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo cesio-133." (1967)
corriente eléctrica	ampere	A	"...aquella corriente constante que, si se mantiene en dos conductores paralelos rectos de longitud infinita, de sección transversal circular despreciable, y situados a 1 metro de separación en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud." (1946)
temperatura termodinámica	kelvin	K	"...la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua." (1967)
cantidad de sustancia	mol	mol	"...la cantidad de sustancia de un sistema que contenga tantas entidades elementales como átomos existen en 0.012 kilogramos de carbono 12." (1971)
intensidad luminosa	candela	cd	"...la intensidad luminosa en la dirección perpendicular, de un área de $1/600,000$ metros cuadrados de un cuerpo negro a la temperatura de congelación del platino a una presión de 101.325 newton por metro cuadrado." (1967)

[†] Adaptada de "The International System of Units (SI)", National Bureau of Standards Special Publication 330, edición de 1972 de Estados Unidos. Las definiciones fueron adoptadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas, organismo internacional, en las fechas mostradas. En este libro no se usa la candela.

ALGUNAS UNIDADES SI DERIVADAS

Cantidad	Nombre de la unidad	Símbolo	Equivalente
área	metro cuadrado	m ²	
volumen	metro cúbico	m ³	
frecuencia	hertz	Hz	s ⁻¹
densidad de masa (densidad)	kilogramo por metro cúbico	kg/m ³	
velocidad	metro por segundo	m/s	
velocidad angular	radián por segundo	rad/s	
aceleración	metro por segundo al cuadrado	m/s ²	
aceleración angular	radián por segundo al cuadrado	rad/s ²	
fuerza	newton	N	kg · m/s ²
presión	pascal	Pa	N/m ²
trabajo, energía, cantidad de calor	joule	J	N · m
potencia	watt	W	J/s
cantidad de electricidad	coulomb	C	A · s
diferencia de potencial, fuerza electromotriz	volt	V	N · m/C
campo eléctrico	volt/metro	V/m	N/C
resistencia eléctrica	ohm	Ω	V/A
capacitancia	farad	F	A · s/V
flujo magnético	weber	Wb	V · s
inductancia	henry	H	V · s/A
campo magnético	tesla	T	Wb/m ² , N/A · m
entropía	joule por kelvin	J/K	
capacidad calorífica específica	joule por kilogramo kelvin	J/(kg · K)	
conductividad térmica	watt por metro kelvin	W/(m · K)	
intensidad radiante	watt por esterradián	W/sr	

LAS UNIDADES SI SUPLEMENTARIAS

Cantidad	Nombre de la unidad	Símbolo
ángulo plano	radián	rad
ángulo sólido	esterradián	sr

APÉNDICE B

ALGUNAS CONSTANTES FUNDAMENTALES DE LA FÍSICA

Constante	Símbolo	Valor de cálculo	Mejor valor (1986)	
			Valor [†]	Incertidumbre [‡]
Velocidad de la luz en el vacío	<i>c</i>	3.00 × 10 ⁸ m/s	2.99792458	exacto
Carga elemental	<i>e</i>	1.60 × 10 ⁻¹⁹ C	1.60217733	0.30
Masa del electrón en reposo	<i>m_e</i>	9.11 × 10 ⁻³¹ kg	9.1093897	0.59
Constante dieléctrica	ε ₀	8.85 × 10 ⁻¹² F/m	8.85418781762	exacto
Constante de permeabilidad	μ ₀	1.26 × 10 ⁻⁶ H/m	1.25663706143	exacto
Masa en reposo del electrón [§]	<i>m_e</i>	5.49 × 10 ⁻⁴ u	5.48579902	0.023
Masa en reposo del neutrón [§]	<i>m_n</i>	1.0087 u	1.008664904	0.014
Masa en reposo del átomo de hidrógeno [§]	<i>m</i> (¹ H)	1.0078 u	1.007825035	0.011
Masa en reposo del átomo de deuterio [§]	<i>m</i> (² H)	2.0141 u	2.014101779	0.012
Masa en reposo del átomo de helio [§]	<i>m</i> (⁴ He)	4.0026 u	4.00260324	0.012
Razón carga a masa del electrón	<i>e/m_e</i>	1.76 × 10 ¹¹ C/kg	1.75881962	0.30
Masa en reposo del protón	<i>m_p</i>	1.67 × 10 ⁻²⁷ kg	1.6726231	0.59
Razón de la masa protón a electrón	<i>m_p/m_e</i>	1840	1836.152701	0.020
Masa en reposo del neutrón	<i>m_n</i>	1.67 × 10 ⁻²⁷ kg	1.6749286	0.59
Masa en reposo del muón	<i>m_μ</i>	1.88 × 10 ⁻²⁸ kg	1.8835327	0.61
Constante de Planck	<i>h</i>	6.63 × 10 ⁻³⁴ J · s	6.6260755	0.60
Longitud de onda Compton del electrón	λ _c	2.43 × 10 ⁻¹² m	2.42631058	0.089
Constante universal de los gases	<i>R</i>	8.31 J/mol · K	8.314510	8.4
Constante de Avogadro	<i>N_A</i>	6.02 × 10 ²³ mol ⁻¹	6.0221367	0.59
Constante de Boltzmann	<i>k</i>	1.38 × 10 ⁻²³ J/K	1.3806513	1.8
Volumen molar del gas ideal a STP [¶]	<i>V_m</i>	2.24 × 10 ⁻² m ³ /mol	2.2413992	1.7
Constante de Faraday	<i>F</i>	9.65 × 10 ⁴ C/mol	9.6485309	0.30
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5.67 × 10 ⁻⁸ W/m ² · K ⁴	5.670399	6.8
Constante de Rydberg	<i>R</i>	1.10 × 10 ⁷ m ⁻¹	1.0973731571	0.00036
Constante gravitatoria	<i>G</i>	6.67 × 10 ⁻¹¹ m ³ /s ² · kg	6.67259	128
Radio de Bohr	<i>a₀</i>	5.29 × 10 ⁻¹¹ m	5.29177249	0.045
Momento magnético del electrón	μ _e	9.28 × 10 ⁻²⁴ J/T	9.2847700	0.34
Momento magnético del protón	μ _p	1.41 × 10 ⁻²⁶ J/T	1.41060761	0.34
Magnetón de Bohr	μ _B	9.27 × 10 ⁻²⁴ J/T	9.2740154	0.34
Magnetón nuclear	μ _N	5.05 × 10 ⁻²⁷ J/T	5.0507865	0.34
Constante de la estructura fina	α	1/137	1/137.0359895	0.045
Cuanto de flujo magnético	Φ ₀	2.07 × 10 ⁻¹⁵ Wb	2.06783461	0.30
Resistencia Hall cuantizada	<i>R_H</i>	25800 Ω	25812.8056	0.045

[†] Misma unidad y potencia de diez que el valor de cálculo

[‡] Partes por millón

[§] Masa dada en unidades unificadas de masa atómica, donde 1 u = 1.6605402 × 10⁻²⁷ kg.

[¶] STP —temperatura y presión estándar = 0°C y 1.0 bar. (Las siglas corresponden a *standard temperature and pressure*.)

APÉNDICE C

ALGUNOS DATOS ASTRONÓMICOS

EL SOL, LA TIERRA, Y LA LUNA

Propiedad	Sol [†]	Tierra	Luna
Masa (kg)	1.99×10^{30}	5.98×10^{24}	7.36×10^{22}
Radio medio (m)	6.96×10^8	6.37×10^6	1.74×10^6
Densidad media (kg/m ³)	1410	5520	3340
Gravedad en la superficie (m/s ²)	274	9.81	1.67
Velocidad de escape (km/s)	618	11.2	2.38
Periodo de rotación [‡] (d)	26 - 37 [‡]	0.997	27.3
Radio orbital medio (km)	2.6×10^{17} [†]	$1.50 \times 10^{8*}$	$3.82 \times 10^{5 }$
Periodo orbital	2.4×10^8 y [†]	1.00 y [*]	27.3 d

[†] El Sol irradia energía a razón de 3.90×10^{26} W; la energía solar se recibe a razón de 1380 W/m² justo afuera de la atmósfera de la Tierra, suponiendo una incidencia normal.

[‡] El Sol, una bola de gas, no gira como un cuerpo rígido. Su periodo rotatorio varía entre 26 d en el ecuador y 37 d en los polos.

[§] Medido respecto a las estrellas distantes.

[†] Con respecto al centro de la galaxia.

* Con respecto al Sol.

^{||} Con respecto a la Tierra.

ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS PLANETAS

	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno	Plutón
Distancia media desde el Sol (10 ⁶ km)	57.9	108	150	228	778	1,430	2,870	4,500	5,900
Periodo de revolución (años)	0.241	0.615	1.00	1.88	11.9	29.5	84.0	165	248
Periodo de rotación [†] (días)	58.7	243 [‡]	0.997	1.03	0.409	0.426	0.451 [†]	0.658	6.39
Velocidad orbital (km/s)	47.9	35.0	29.8	24.1	13.1	9.64	6.81	5.43	4.74
Inclinación del eje respecto a la órbita	0.0°	2.6°	23.5°	24.0°	3.08°	26.7°	82.1°	28.8°	65°
Inclinación de la órbita respecto a la órbita de la Tierra	7.00°	3.39°	—	1.85°	1.30°	2.49°	0.77°	1.77°	17.2°
Excentricidad de la órbita	0.206	0.0068	0.0167	0.0934	0.0485	0.0556	0.0472	0.0086	0.250
Diámetro ecuatorial (km)	4,880	12,100	12,800	6,790	143,000	120,000	51,800	49,500	3,400
Masa (Tierra = 1)	0.0558	0.815	1.000	0.107	318	95.1	14.5	17.2	0.002
Densidad promedio (g/cm ³)	5.60	5.20	5.52	3.95	1.31	0.704 [*]	1.21	1.67	0.5(?)
Gravedad en la superficie [§] (m/s ²)	3.78	8.60	9.78	3.72	22.9	9.05	7.77	11.0	0.03
Velocidad de escape (km/s)	4.3	10.3	11.2	5.0	59.5	35.6	21.2	23.6	1.3
Satélites conocidos	0	0	1	2	16 + anillos	19 + anillos	15 + anillos	8 + anillos	1

[†] Medido con respecto a las estrellas distantes.

[‡] El sentido de rotación es opuesto al del movimiento orbital.

[§] Medida en el ecuador del planeta.

APÉNDICE D

PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS

Elemento	Símbolo	Número atómico Z	Masa molar (g/mol)	Densidad (g/cm ³) a 20°C	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)	Calor específico (J/g · °C) a 25°C
Actinio	Ac	89	(227)	—	1050	3200	0.092
Aluminio	Al	13	26.9815	2.699	660	2467	0.900
Americio	Am	95	(243)	13.7	994	2607	—
Antimonio	Sb	51	121.75	6.69	630.5	1750	0.205
Argón	Ar	18	39.948	1.6626×10^{-3}	-189.2	-185.7	0.523
Arsénico	As	33	74.9216	5.72	817 (28 at.)	613	0.331
Astato	At	85	(210)	—	302	337	—
Azufre	S	16	32.066	2.07	112.8	444.6	0.707
Bario	Ba	56	137.33	3.5	725	1640	0.205
Berilio	Be	4	9.0122	1.848	12.78	2970	1.83
Berkelio	Bk	97	(247)	—	—	—	—
Bismuto	Bi	83	208.980	9.75	271.3	1560	0.122
Boro	B	5	10.811	2.34	20.79	2550	1.11
Bromo	Br	35	79.909	3.12 (líquido)	-7.2	58	0.293
Cadmio	Cd	48	112.41	8.65	320.9	765	0.226
Calcio	Ca	20	40.08	1.55	839	1484	0.624
Californio	Cf	98	(251)	—	—	—	—
Carbono	C	6	12.011	2.25	3550	—	0.691
Cerio	Ce	58	140.12	6.768	798	3443	0.188
Cesio	Cs	55	132.905	1.873	28.40	6.69	0.243
Cinc	Zn	30	65.37	7.133	419.58	907	0.389
Cloro	Cl	17	35.453	3.214×10^{-3} (0°C)	-101	-34.6	0.486
Cobalto	Co	27	58.9332	8.85	1495	2870	0.423
Cobre	Cu	29	63.54	8.96	1083.4	2567	0.385
Criptón	Kr	36	83.80	3.488×10^{-3}	-156.6	-152.3	0.247
Cromo	Cr	24	51.996	7.19	1857	2672	0.448
Curio	Cm	96	(247)	—	1340	—	—
Disproscio	Dy	66	162.50	8.55	1412	2567	0.172
Einsteinio	Es	99	(252)	—	—	—	—
Erbio	Er	68	167.26	9.07	1529	2868	0.167
Escandio	Sc	21	44.956	2.99	1541	2836	0.569
Estaño	Sn	50	118.71	7.31	231.97	2270	0.226
Estroncio	Sr	38	87.62	2.54	769	1384	0.737
Europio	Eu	63	151.96	5.245	822	1527	0.163
Fermio	Fm	100	(257)	—	—	—	—
Flúor	F	9	18.9984	1.696×10^{-3} (0°C)	-219.6	-188.2	0.753
Fósforo	P	15	30.9738	1.83	44.25	280	0.741
Francio	Fr	87	(223)	—	(27)	(677)	—
Gadolinio	Gd	64	157.25	7.90	1313	3273	0.234
Galio	Ga	31	69.72	5.907	29.78	2403	0.377
Germanio	Ge	32	72.61	5.323	937.4	2830	0.322
Hafnio	Hf	72	178.49	13.31	2227	4602	0.144
Helio	He	2	4.0026	0.1664×10^{-3}	-272.2	-268.9	5.23
Hidrógeno	H	1	1.00797	0.08375×10^{-3}	-259.34	-252.87	14.4
Hierro	Fe	26	55.847	7.87	1535	2750	0.447
Holmio	Ho	67	164.930	8.79	1474	2700	0.165

Elemento	Símbolo	Número atómico Z	Masa molar (g/mol)	Densidad (g/cm ³) a 20°C	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)	Calor específico (J/g · °C) a 25°C
Indio	In	49	114.82	7.31	156.6	2080	0.233
Iridio	Ir	77	192.2	22.5	2410	4130	0.130
Iterbio	Yb	70	173.04	6.966	819	1196	0.155
Itrio	Y	39	88.905	4.469	1552	5338	0.297
Lantano	La	57	138.91	6.145	918	3464	0.195
Laurencio	Lr	103	(260)	-	-	-	-
Litio	Li	3	6.939	0.534	180.54	1342	3.58
Lutecio	Lu	71	174.97	9.84	1663	3402	0.155
Magnesio	Mg	12	24.305	1.74	649	1090	1.03
Manganeso	Mn	25	54.9380	7.43	1244	1962	0.481
Mendelevio	Md	101	(258)	-	-	-	-
Mercurio	Hg	80	200.59	13.55	-38.87	357	0.138
Molibdeno	Mo	42	95.94	10.22	2617	4612	0.251
Neodimio	Nd	60	144.24	7.00	1021	3074	0.188
Neón	Ne	10	20.180	0.8387 × 10 ⁻³	-248.67	-246.0	1.03
Neptunio	Np	93	(237)	20.25	640	3902	1.26
Niobio	Nb	41	92.906	8.57	2468	4742	0.264
Niquel	Ni	28	58.69	8.902	1453	2732	0.444
Nitrógeno	N	7	14.0067	1.1649 × 10 ⁻³	-210	-195.8	1.03
Nobelio	No	102	(259)	-	-	-	-
Oro	Au	79	196.967	19.32	1064.43	2808	0.131
Osmio	Os	76	190.2	22.57	3045	5027	0.130
Oxígeno	O	8	15.9994	1.3318 × 10 ⁻³	-218.4	-183.0	0.913
Paladio	Pd	46	106.4	12.02	1554	3140	0.243
Plata	Ag	47	107.68	10.49	961.9	2212	0.234
Platino	Pt	78	195.09	21.45	1772	3827	0.134
Plomo	Pb	82	207.19	11.36	327.50	1740	0.129
Plutonio	Pu	94	(244)	19.84	641	3232	0.130
Polonio	Po	84	(209)	9.24	254	962	-
Potasio	K	19	39.098	0.86	63.25	760	0.758
Praseodimio	Pr	59	140.907	6.773	931	3520	0.197
Promecio	Pm	61	(145)	7.264	1042	(3000)	-
Protactinio	Pa	91	(231)	-	1600	-	-
Radio	Ra	88	(226)	5.0	700	1140	-
Radón	Rn	86	(222)	9.96 × 10 ⁻³ (0°C)	-71	-61.8	0.092
Renio	Re	75	186.2	21.04	3180	5627	0.134
Rodio	Rh	45	102.905	12.44	1965	3727	0.243
Rubidio	Rb	37	85.47	1.53	38.89	686	0.364
Rutenio	Ru	44	101.107	12.2	2310	3900	0.239
Samario	Sm	62	150.35	7.49	1074	1794	0.197
Selenio	Se	34	78.96	4.79	217	685	0.318
Silicio	Si	14	28.086	2.33	1410	2355	0.712
Sodio	Na	11	22.9898	0.9712	97.81	882.9	1.23
Talio	Tl	81	204.38	11.85	304	1457	0.130
Tantalio	Ta	73	180.948	16.6	2996	5425	0.138
Tecnecio	Tc	43	(98)	11.46	2172	4877	0.209
Telurio	Te	52	127.60	6.24	449.5	990	0.201
Terbio	Tb	65	158.924	8.25	1357	3230	0.180
Titanio	Ti	22	47.88	4.54	1660	3287	0.523
Torio	Th	90	(232)	11.72	1750	(3850)	0.117
Tulio	Tm	69	168.934	9.31	1545	1950	0.159
Tungsteno	W	74	183.85	19.3	3410	5660	0.134
Uranio	U	92	(238)	19.07	1132	3818	0.117
Vanadio	V	23	50.942	6.1	1890	3380	0.490
Xenón	Xe	54	131.30	5.495 × 10 ⁻³	-111.79	-108	0.159
Yodo	I	53	126.9044	4.94	113.5	184.35	0.218
Zirconio	Zr	40	91.22	6.506	1852	4377	0.276

Los valores entre paréntesis en la columna de masas atómicas son los números de masa de los isótopos más estables de los elementos que son radiactivos. Los puntos de fusión y de ebullición entre paréntesis son inciertos. Todas las propiedades físicas están dadas para una presión de una atmósfera a menos que se indique lo contrario. Los datos para los gases son válidos únicamente cuando están en su estado molecular usual, tal como H₂, He, O₂, Ne, etc. Los calores específicos de los gases son los valores a presión constante. Fuente: *Handbook of Chemistry and Physics*, edición núm. 71 (CRC Press, 1990).

APÉNDICE E

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

METALES ALCALINOS (incluyendo al hidrógeno)																		GASES NOBLES									
1	1	2																2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	H	He																									
2	3	4																5	6	7	8	9	10				
	Li	Be																B	C	N	O	F	Ne				
3	11	12																13	14	15	16	17	18				
	Na	Mg																Al	Si	P	S	Cl	Ar				
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36									
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54									
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86									
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn									
7	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	...																	
	Fr	Ra		Rf*	Ha*	**	**	**	**																		
			Serie de los lantánidos																								
			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71										
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu										
			Serie de los actínidos																								
			89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103										
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr										

* Los nombres de estos elementos (Rutherfordio y Hahnio) no han sido aceptados debido a la controversia por el crédito a sus descubridores. Un grupo de la antes Unión Soviética ha propuesto los nombres de Kurchatovio y Neilsbohrio.

** Se ha reportado el descubrimiento de estos elementos, pero no tienen un nombre universalmente adoptado todavía.

APÉNDICE F

PARTÍCULAS ELEMENTALES

1. LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

LEPTONES

Partícula	Símbolo	Anti-partícula	Carga (e)	Espín (h/2π)	Energía de reposo (MeV)	Vida media (s)	Productos típicos de la desintegración
Electrón	e ⁻	e ⁺	-1	1/2	0.511	∞	
Neutrino del electrón	ν _e	ν̄ _e	0	1/2	<0.00002	∞	
Muón	μ ⁻	μ ⁺	-1	1/2	105.7	2.2 × 10 ⁻⁶	e ⁻ + ν̄ _e + ν _μ
Neutrino del muón	ν _μ	ν̄ _μ	0	1/2	<0.3	∞	
Tau	τ ⁻	τ ⁺	-1	1/2	1784	3.0 × 10 ⁻¹³	μ ⁻ + ν̄ _μ + ν _τ
Neutrino tau	ν _τ	ν̄ _τ	0	1/2	<40	∞	

QUARKS

Sabor*	Símbolo	Antipartícula	Carga (e)	Espín (h/2π)	Energía de reposo [†] (MeV)	Otra propiedad
Arriba	u	ū	+2/3	1/2	300	C = S = T = B = 0
Abajo	d	d̄	-1/3	1/2	300	C = S = T = B = 0
Encanto	c	c̄	+2/3	1/2	1500	Encantamiento (C) = +1
Extraño	s	s̄	-1/3	1/2	500	Extrañeza (S) = -1
Cima [‡]	t	t̄	+2/3	1/2	>40,000	Encumbramiento (T) = +1
Fondo	b	b̄	-1/3	1/2	4700	Profundidad (B) = -1

PARTÍCULAS DE CAMPO

Partícula	Símbolo	Interacción	Carga (e)	Espín (h/2π)	Energía en reposo (GeV)
Gravitón [†]		Gravedad	0	2	0
Bosón débil	W ⁺ , W ⁻	Débil	±1	1	80.6
Bosón débil	Z ⁰	Débil	0	1	91.2
Fotón	γ	Electromagnética	0	1	0
Gluón	g	Fuerte (color)	0	1	0

2. ALGUNAS PARTÍCULAS COMPUESTAS

BARIONES

Partícula	Símbolo	Contenido de quarks	Anti-partícula	Carga (e)	Espín (h/2π)	Energía en reposo (MeV)	Vida media (s)	Desintegración típica
Protón	p	uud	p̄	+1	1/2	938	> 10 ⁴⁰	π ⁰ + e ⁺ (?)
Neutrón	n	udd	n̄	0	1/2	940	889	p + e ⁻ + ν _e
Lambda	Λ ⁰	uds	Λ̄ ⁰	0	1/2	1116	2.6 × 10 ⁻¹⁰	p + π ⁻
Omega	Ω ⁻	sss	Ω̄ ⁺	-1	3/2	1673	8.2 × 10 ⁻¹¹	Λ ⁰ + K ⁻
Delta	Δ ⁺⁺	uuu	Δ̄ ⁻⁻	+2	3/2	1232	5.7 × 10 ⁻²⁴	p + π ⁺
Lambda encantada	Λ _c ⁺	udc	Λ̄ _c ⁻	+1	1/2	2285	1.9 × 10 ⁻¹³	Λ ⁰ + π ⁺

MESONES

Partícula	Símbolo	Contenido de quarks	Anti-partícula	Carga (e)	Espín (h/2π)	Energía en reposo (MeV)	Vida media (s)	Desintegración típica
Pión	π ⁺	u \bar{d}	π ⁻	+1	0	140	2.6 × 10 ⁻⁸	μ ⁺ + ν _μ
Pión	π ⁰	u \bar{u} + d \bar{d}	π ⁰	0	0	135	8.4 × 10 ⁻¹⁷	γ + γ
Kaón	K ⁺	u \bar{s}	K ⁻	+1	0	494	1.2 × 10 ⁻⁸	μ ⁺ + ν _μ
Kaón	K ⁰	d \bar{s}	K ⁰	0	0	498	0.9 × 10 ⁻¹⁰	π ⁺ + π ⁻
Rho	ρ ⁺	u \bar{d}	ρ ⁻	+1	1	768	4.5 × 10 ⁻²⁴	π ⁺ + π ⁻
Mesón-D	D ⁺	c \bar{d}	D ⁻	+1	0	1869	1.1 × 10 ⁻¹²	K ⁻ + π ⁺ + π ⁺
Psi	ψ	c \bar{c}	ψ	0	1	3097	1.0 × 10 ⁻²⁰	e ⁺ + e ⁻
Mesón-B	B ⁺	u \bar{b}	B ⁻	+1	0	5278	1.2 × 10 ⁻¹²	D ⁻ + π ⁺ + π ⁺
Ípsilon	Υ	b \bar{b}	Υ	0	1	9460	1.3 × 10 ⁻²⁰	e ⁺ + e ⁻

[†] Las energías en reposo listadas para los quarks no son las asociadas con los quarks libres; puesto que todavía no ha sido observado ningún quark libre, no ha sido posible la medición de sus energías en reposo en el estado libre. Los valores tabulados son energías en reposo efectivas correspondientes a quarks *constituyentes*, aquellos ligados en partículas compuestas.

[‡] Se cree que existen las partículas pero todavía no han sido observadas.

Fuente: "Review of Particle Properties", *Physics Letters B*, vol. 239 (abril de 1990).

APÉNDICE G

FACTORES DE CONVERSIÓN

Los factores de conversión pueden leerse directamente de las tablas. Por ejemplo, 1 grado = 2.778×10^{-3} revoluciones, de modo que $16.7^\circ = 16.7 \times 2.778 \times 10^{-3}$ rev.

Las cantidades SI están en letras mayúsculas. Parcialmente adaptado de G. Shortley y D. Williams, *Elements of Physics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1971.

ÁNGULO PLANO

	°	'	"	RADIAN	rev
1 grado =	1	60	3600	1.745×10^{-2}	2.778×10^{-3}
1 minuto =	1.667×10^{-2}	1	60	2.909×10^{-4}	4.630×10^{-5}
1 segundo =	2.778×10^{-4}	1.667×10^{-2}	1	4.848×10^{-6}	7.716×10^{-7}
1 RADIAN =	57.30	3438	2.063×10^5	1	0.1592
1 revolución =	360	2.16×10^4	1.296×10^6	6.283	1

ÁNGULO SÓLIDO

1 esfera = 4π esterradianes = 12.57 esterradianes

LONGITUD

	cm	METRO	km	in	ft	mi
1 centímetro =	1	10^{-2}	10^{-5}	0.3937	3.281×10^{-2}	6.214×10^{-6}
1 METRO =	100	1	10^{-3}	39.37	3.281	6.214×10^{-4}
1 kilómetro =	10^5	1000	1	3.937×10^4	3281	0.6214
1 pulgada =	2.540	2.540×10^{-2}	2.540×10^{-5}	1	8.333×10^{-2}	1.578×10^{-5}
1 pie =	30.48	0.3048	3.048×10^{-4}	12	1	1.894×10^{-4}
1 milla =	1.609×10^5	1609	1.609	6.336×10^4	5280	1

1 angström = 10^{-10} m
 1 milla náutica = 1852 m
 = 1.151 millas = 6076 ft
 1 fermi = 10^{-15} m

1 año-luz = 9.460×10^{12} km
 1 parsec = 3.084×10^{13} km
 1 fathom = 6 ft
 1 radio de Bohr = 5.292×10^{-11} m

1 yarda = 3 ft
 1 rod = 16.5 ft
 1 mil = 10^{-3} in
 1 nm = 10^{-9} m

ÁREA

	METRO ²	cm ²	ft ²	in ²
1 METRO CUADRADO =	1	10^4	10.76	1550
1 centímetro cuadrado =	10^{-4}	1	1.076×10^{-3}	0.1550
1 pie cuadrado =	9.290×10^{-2}	929.0	1	144
1 pulgada cuadrada =	6.452×10^{-4}	6.452	6.944×10^{-3}	1

1 milla cuadrada = 2.788×10^7 ft² = 640 acres
 1 barnio = 10^{-28} m

1 acre = 43,560 ft²
 1 hectárea = 10^4 m² = 2.471 acres

VOLUMEN

	METRO ³	cm ³	L	ft ³	in ³
1 METRO CÚBICO =	1	10^6	1000	35.31	6.102×10^4
1 centímetro cúbico =	10^{-6}	1	1.000×10^{-3}	3.531×10^{-5}	6.102×10^{-2}
1 litro =	1.000×10^{-3}	1000	1	3.531×10^{-2}	61.02
1 pie cúbico =	2.832×10^{-2}	2.832×10^4	28.32	1	1728
1 pulgada cúbica =	1.639×10^{-5}	16.39	1.639×10^{-2}	5.787×10^{-4}	1

1 galón fluido U.S. = 4 cuartos fluidos U.S. = 8 pintas U.S. = 128 onzas fluidas U.S. = 231 in^3
 1 galón imperial británico = 277.4 in^3 = 1.201 galones fluidos U.S.

MASA

	g	KILOGRAMO	slug	u	oz	lb	ton
1 gramo =	1	0.001	6.852×10^{-5}	6.022×10^{23}	3.527×10^{-2}	2.205×10^{-3}	1.102×10^{-6}
1 KILOGRAMO =	1000	1	6.852×10^{-2}	6.022×10^{26}	35.27	2.205	1.102×10^{-3}
1 slug =	1.459×10^4	14.59	1	8.786×10^{27}	514.8	32.17	1.609×10^{-2}
1 u =	1.661×10^{-24}	1.661×10^{-27}	1.138×10^{-28}	1	5.857×10^{-26}	3.662×10^{-27}	1.830×10^{-30}
1 onza =	28.35	2.835×10^{-2}	1.943×10^{-3}	1.718×10^{25}	1	6.250×10^{-2}	3.125×10^{-5}
1 libra =	453.6	0.4536	3.108×10^{-2}	2.732×10^{26}	16	1	0.0005
1 ton =	9.072×10^5	907.2	62.16	5.463×10^{29}	3.2×10^4	2000	1

1 tonelada métrica = 1000 kg

Las cantidades en las zonas sombreadas no son unidades de masa pero se usan a menudo como tales. Por ejemplo, cuando escribimos 1 kg "≈" 2.205 lb significa que un kilogramo es una masa que pesa 2.205 libras en condiciones de gravedad estándar ($g = 9.80665 \text{ m/s}^2$).

DENSIDAD

	slug/ft ³	KILOGRAMO/METRO ³	g/cm ³	lb/ft ³	lb/in ³
1 slug por ft ³ =	1	515.4	0.5154	32.17	1.862×10^{-2}
1 KILOGRAMO por METRO ³ =	1.940×10^{-3}	1	0.001	6.243×10^{-2}	3.613×10^{-5}
1 gramo por cm ³ =	1.940	1000	1	62.43	3.613×10^{-2}
1 libra por ft ³ =	3.108×10^{-2}	16.02	1.602×10^{-2}	1	5.787×10^{-4}
1 libra por in ³ =	53.71	2.768×10^4	27.68	1728	1

Las cantidades en las zonas sombreadas son densidades de peso y, como tales, son dimensionalmente diferentes a las densidades de masa. Véase la nota en la tabla de masas.

TIEMPO

	y	d	h	min	SEGUNDO
1 año =	1	365.25	8.766×10^3	5.259×10^5	3.156×10^7
1 día =	2.738×10^{-3}	1	24	1440	8.640×10^4
1 hora =	1.141×10^{-4}	4.167×10^{-2}	1	60	3600
1 minuto =	1.901×10^{-6}	6.944×10^{-4}	1.667×10^{-2}	1	60
1 SEGUNDO =	3.169×10^{-8}	1.157×10^{-5}	2.778×10^{-4}	1.667×10^{-2}	1

VELOCIDAD

	ft/s	km/h	METROS/SEGUNDO	mi/h	cm/s
1 pie por segundo =	1	1.097	0.3048	0.6818	30.48
1 kilómetro por hora =	0.9113	1	0.2778	0.6214	27.78
1 METRO por SEGUNDO =	3.281	3.6	1	2.237	100
1 milla por hora =	1.467	1.609	0.4470	1	44.70
1 centímetro por segundo =	3.281×10^{-2}	3.6×10^{-2}	0.01	2.237×10^{-2}	1

1 nudo = 1 milla náutica por hora 1.688 ft/s 1 mi/min = 88.00 ft/s = 60.00 mi/h

FUERZA

	dina	NEWTON	lb	pdl	gf	kgf
1 dina =	1	10^{-5}	2.248×10^{-6}	7.233×10^{-5}	1.020×10^{-3}	1.020×10^{-6}
1 NEWTON =	10^5	1	0.2248	7.233	102.0	0.1020
1 libra =	4.448×10^5	4.448	1	32.17	453.6	0.4536
1 poundal* =	1.383×10^4	0.1383	3.108×10^{-2}	1	14.10	1.410×10^{-2}
1 gramo-fuerza =	980.7	9.807×10^{-3}	2.205×10^{-3}	7.093×10^{-2}	1	0.001
1 kilogramo-fuerza =	9.807×10^5	9.807	2.205	70.93	1000	1

*(Unidad absoluta de fuerza)

Las cantidades en las zonas sombreadas no son unidades de fuerza pero a menudo se usan como tales. Por ejemplo, si escribimos 1 gramo-fuerza "≈" 980.7 dinas, queremos decir que un gramo-masa experimenta una fuerza de 980.7 dinas en condiciones de gravedad estándar ($g = 9.80665 \text{ m/s}^2$)

ENERGÍA, TRABAJO, CALOR

	Btu	erg	ft·lb	hp·h	JOULE	cal	kW·h	eV	MeV	kg	u
1 unidad térmica británica =	1	1.055×10^{10}	777.9	3.929×10^{-4}	1055	252.0	2.930×10^{-4}	6.585×10^{21}	6.585×10^{15}	1.174×10^{-14}	7.070×10^{12}
1 erg =	9.481×10^{-11}	1	7.376×10^{-8}	3.725×10^{-14}	10^{-7}	2.389×10^{-8}	2.778×10^{-14}	6.242×10^{11}	6.242×10^5	1.113×10^{-24}	670.2
1 libra-pie =	1.285×10^{-3}	1.356×10^7	1	5.051×10^{-7}	1.356	0.3238	3.766×10^{-7}	8.464×10^{18}	8.464×10^{12}	1.509×10^{-17}	9.037×10^9
1 caballo de fuerza-hora =	2545	2.685×10^{13}	1.980×10^6	1	2.685×10^6	6.413×10^5	0.7457	1.676×10^{25}	1.676×10^{19}	2.988×10^{-11}	1.799×10^{16}
1 JOULE =	9.481×10^{-4}	10^7	0.7376	3.725×10^{-7}	1	0.2389	2.778×10^{-7}	6.242×10^{18}	6.242×10^{12}	1.113×10^{-17}	6.702×10^9
1 caloría =	3.969×10^{-3}	4.186×10^7	3.088	1.560×10^{-6}	4.186	1	1.163×10^{-6}	2.613×10^{19}	2.613×10^{13}	4.660×10^{-17}	2.806×10^{10}
1 kilowatt-hora =	3413	3.6×10^{13}	2.655×10^6	1.341	3.6×10^6	8.600×10^5	1	2.247×10^{25}	2.247×10^{19}	4.007×10^{-11}	2.413×10^{16}
1 electrónvolt =	1.519×10^{-22}	1.602×10^{-12}	1.182×10^{-19}	5.967×10^{-26}	1.602×10^{-19}	3.827×10^{-20}	4.450×10^{-26}	1	10^{-6}	1.783×10^{-36}	1.074×10^{-9}
1 millón de electronvolts =	1.519×10^{-16}	1.602×10^{-6}	1.182×10^{-13}	5.967×10^{-20}	1.602×10^{-13}	3.827×10^{14}	4.450×10^{-20}	10^6	1	1.783×10^{-30}	1.074×10^{-3}
1 kilogramo =	8.521×10^{13}	8.987×10^{23}	6.629×10^{16}	3.348×10^{10}	8.987×10^{16}	2.146×10^{16}	2.497×10^{10}	5.610×10^{35}	5.610×10^{29}	1	6.022×10^{26}
1 unidad unificada de masa atómica =	1.415×10^{-13}	1.492×10^{-3}	1.101×10^{-10}	5.559×10^{-17}	1.492×10^{-10}	3.564×10^{-11}	4.146×10^{-17}	9.32×10^8	932.0	1.661×10^{-27}	1

Las cantidades en las zonas sombreadas no son unidades de energía propiamente pero se incluyen por conveniencia. Proviene de la fórmula de equivalencia masa-energía relativista $E = mc^2$ y representan la energía equivalente de una masa de un kilogramo o una unidad unificada de masa atómica (u).

PRESIÓN

	atm	dina/cm ²	in de agua	cm Hg	PASCAL	lb/in ²	lb/ft ²
1 atmósfera =	1	1.013×10^6	406.8	76	1.013×10^5	14.70	2116
1 dina por cm ² =	9.869×10^{-7}	1	4.015×10^{-4}	7.501×10^{-5}	0.1	1.405×10^{-5}	2.089×10^{-3}
1 in de agua [†] a 4°C =	2.458×10^{-3}	2491	1	0.1868	249.1	3.613×10^{-2}	5.202
1 centímetro de mercurio [†] a 0°C =	1.316×10^{-2}	1.333×10^4	5.353	1	1333	0.1934	27.85
1 PASCAL =	9.869×10^{-6}	10	4.015×10^{-3}	7.501×10^{-4}	1	1.450×10^{-4}	2.089×10^{-2}
1 libra por in ² =	6.805×10^{-2}	6.895×10^4	27.68	5.171	6.895×10^3	1	144
1 libra por ft ² =	4.725×10^{-4}	478.8	0.1922	3.591×10^{-2}	47.88	6.944×10^{-3}	1

[†] En donde la aceleración de la gravedad tiene el valor estándar 9.80665 m/s^2 .

1 bar = $10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 0.1 \text{ MPa}$

1 milibar = $10^3 \text{ dinas/cm}^2 = 10^2 \text{ Pa}$

1 torr = 1 milímetro de mercurio

POTENCIA

	Btu/h	ft·lb/s	hp	cal/s	kW	WATT
1 unidad térmica británica por hora =	1	0.2161	3.929×10^{-4}	6.998×10^{-2}	2.930×10^{-4}	0.2930
1 libra-pie por segundo =	4.628	1	1.818×10^{-3}	0.3239	1.356×10^{-3}	1.356
1 caballo de fuerza =	2545	550	1	178.1	0.7457	745.7
1 caloría por segundo =	14.29	3.088	5.615×10^{-3}	1	4.186×10^{-3}	4.186
1 kilowatt =	3413	737.6	1.341	238.9	1	1000
1 WATT =	3.413	0.7376	1.341×10^{-3}	0.2389	0.001	1

FLUJO MAGNÉTICO

	maxwell	WEBER
1 maxwell =	1	10^{-8}
1 WEBER =	10^8	1

CAMPO MAGNÉTICO

	gauss	TESLA	milligauss
1 gauss =	1	10^{-4}	1000
1 TESLA =	10^4	1	10^7
1 milligauss =	0.001	10^{-7}	1

1 tesla = 1 weber/metro²

APÉNDICE H

FÓRMULAS MATEMÁTICAS

GEOMETRÍA

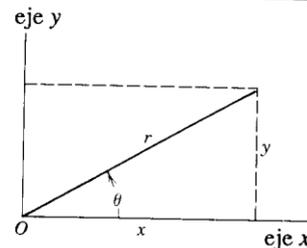
Círculo de radio r : circunferencia = $2\pi r$; área = πr^2 .
 Esfera de radio r : área = $4\pi r^2$; volumen = $\frac{4}{3}\pi r^3$.
 Cilindro circular recto de radio r y altura h : área = $2\pi r^2 + 2\pi rh$; volumen = $\pi r^2 h$.
 Triángulo de base a y altura h : área = $\frac{1}{2}ah$.

FÓRMULA CUADRÁTICA

Si $ax^2 + bx + c = 0$, entonces $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$.

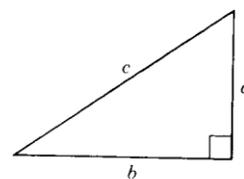
FUNCIONES TRIGONOMÉTRICAS DEL ÁNGULO θ

$$\begin{aligned} \text{sen } \theta &= \frac{y}{r} & \text{cos } \theta &= \frac{x}{r} \\ \text{tan } \theta &= \frac{y}{x} & \text{cot } \theta &= \frac{x}{y} \\ \text{sec } \theta &= \frac{r}{x} & \text{csc } \theta &= \frac{r}{y} \end{aligned}$$



TEOREMA DE PITÁGORAS

$$a^2 + b^2 = c^2$$



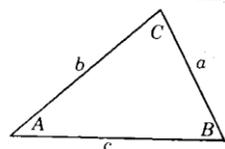
TRIÁNGULOS

Ángulos A, B, C
 Lados opuestos a, b, c

$$A + B + C = 180^\circ$$

$$\frac{\text{sen } A}{a} = \frac{\text{sen } B}{b} = \frac{\text{sen } C}{c}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C$$



SIGNOS Y SÍMBOLOS MATEMÁTICOS

= igual a
 \approx aproximadamente igual a
 \sim es del orden de magnitud de
 \neq no es igual a
 \equiv es idéntico a, se define como
 $>$ es mayor que (\gg es mucho mayor que)
 $<$ es menor que (\ll es mucho menor que)
 \geq es mayor que o igual a (o, no es menor que)
 \leq es menor que o igual a (o, no es mayor que)
 \pm más o menos ($\sqrt{4} = \pm 2$)
 \propto es proporcional a
 Σ la suma de
 \bar{x} el valor promedio de x

PRODUCTOS DE VECTORES

Sean i, j, k vectores unitarios en las direcciones x, y, z . Entonces
 $i \cdot i = j \cdot j = k \cdot k = 1, \quad i \cdot j = j \cdot k = k \cdot i = 0,$

$$i \times i = j \times j = k \times k = 0,$$

$$i \times j = k, \quad j \times k = i, \quad k \times i = j.$$

Cualquier vector a con componentes a_x, a_y, a_z a lo largo de los ejes x, y, z puede escribirse

$$a = a_x i + a_y j + a_z k.$$

Sean a, b, c vectores arbitrarios con magnitudes a, b, c . Entonces

$$a \times (b + c) = (a \times b) + (a \times c)$$

$$(sa) \times b = a \times (sb) = s(a \times b) \quad (s = \text{un escalar}).$$

Sea θ el más pequeño de los dos ángulos entre a y b . Entonces

$$a \cdot b = b \cdot a = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = ab \cos \theta$$

$$a \times b = -b \times a = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

$$= (a_y b_z - b_y a_z)i + (a_z b_x - b_z a_x)j + (a_x b_y - b_x a_y)k$$

$$|a \times b| = ab \text{ sen } \theta$$

$$a \cdot (b \times c) = b \cdot (c \times a) = c \cdot (a \times b)$$

$$a \times (b \times c) = (a \cdot c)b - (a \cdot b)c$$

IDENTIDADES TRIGONOMÉTRICAS

$\text{sen}(90^\circ - \theta) = \text{cos } \theta$
 $\text{cos}(90^\circ - \theta) = \text{sen } \theta$
 $\text{sen } \theta / \text{cos } \theta = \text{tan } \theta$
 $\text{sen}^2 \theta + \text{cos}^2 \theta = 1 \quad \text{sec}^2 \theta - \text{tan}^2 \theta = 1 \quad \text{csc}^2 \theta - \text{cot}^2 \theta = 1$
 $\text{sen } 2\theta = 2 \text{sen } \theta \text{cos } \theta$
 $\text{cos } 2\theta = \text{cos}^2 \theta - \text{sen}^2 \theta = 2 \text{cos}^2 \theta - 1 = 1 - 2 \text{sen}^2 \theta$
 $\text{sen}(\alpha \pm \beta) = \text{sen } \alpha \text{cos } \beta \pm \text{cos } \alpha \text{sen } \beta$
 $\text{cos}(\alpha \pm \beta) = \text{cos } \alpha \text{cos } \beta \mp \text{sen } \alpha \text{sen } \beta$
 $\text{tan}(\alpha \pm \beta) = \frac{\text{tan } \alpha \pm \text{tan } \beta}{1 \mp \text{tan } \alpha \text{tan } \beta}$
 $\text{sen } \alpha \pm \text{sen } \beta = 2 \text{sen } \frac{1}{2}(\alpha \pm \beta) \text{cos } \frac{1}{2}(\alpha \mp \beta)$

TEOREMA DEL BINOMIO

$$(1 \pm x)^n = 1 \pm \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots \quad (x^2 < 1)$$

$$(1 \pm x)^{-n} = 1 \mp \frac{nx}{1!} + \frac{n(n+1)x^2}{2!} + \dots \quad (x^2 < 1)$$

DERIVADAS E INTEGRALES

En lo que sigue, las letras u y v son válidas para cualquier función de x , y a y m son constantes. A cada una de las integrales indefinidas deberá añadirse una constante de integración arbitraria. El *Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press Inc.) proporciona una tabulación más extensa.

- | | |
|---|---|
| 1. $\frac{dx}{dx} = 1$ | 1. $\int dx = x$ |
| 2. $\frac{d}{dx}(au) = a \frac{du}{dx}$ | 2. $\int au \, dx = a \int u \, dx$ |
| 3. $\frac{d}{dx}(u+v) = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dx}$ | 3. $\int (u+v) \, dx = \int u \, dx + \int v \, dx$ |
| 4. $\frac{d}{dx} x^m = mx^{m-1}$ | 4. $\int x^m \, dx = \frac{x^{m+1}}{m+1} \quad (m \neq -1)$ |
| 5. $\frac{d}{dx} \ln x = \frac{1}{x}$ | 5. $\int \frac{dx}{x} = \ln x $ |
| 6. $\frac{d}{dx}(uv) = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}$ | 6. $\int u \frac{dv}{dx} \, dx = uv - \int v \frac{du}{dx} \, dx$ |
| 7. $\frac{d}{dx} e^x = e^x$ | 7. $\int e^x \, dx = e^x$ |
| 8. $\frac{d}{dx} \text{sen } x = \text{cos } x$ | 8. $\int \text{sen } x \, dx = -\text{cos } x$ |
| 9. $\frac{d}{dx} \text{cos } x = -\text{sen } x$ | 9. $\int \text{cos } x \, dx = \text{sen } x$ |
| 10. $\frac{d}{dx} \text{tan } x = \text{sec}^2 x$ | 10. $\int \text{tan } x \, dx = \ln \text{sec } x $ |
| 11. $\frac{d}{dx} \text{cot } x = -\text{csc}^2 x$ | 11. $\int \text{sen}^2 x \, dx = \frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\text{sen } 2x$ |
| 12. $\frac{d}{dx} \text{sec } x = \text{tan } x \text{sec } x$ | 12. $\int e^{-ax} \, dx = -\frac{1}{a} e^{-ax}$ |
| 13. $\frac{d}{dx} \text{csc } x = -\text{cot } x \text{csc } x$ | 13. $\int x e^{-ax} \, dx = -\frac{1}{a^2} (ax + 1)e^{-ax}$ |
| 14. $\frac{d}{dx} e^u = e^u \frac{du}{dx}$ | 14. $\int x^2 e^{-ax} \, dx = -\frac{1}{a^3} (a^2 x^2 + 2ax + 2)e^{-ax}$ |
| 15. $\frac{d}{dx} \text{sen } u \text{cos } u \frac{du}{dx}$ | 15. $\int_0^\infty x^n e^{-ax} \, dx = \frac{n!}{a^{n+1}}$ |
| 16. $\frac{d}{dx} \text{cos } u = -\text{sen } u \frac{du}{dx}$ | 16. $\int_0^\infty x^{2n} e^{-ax^2} \, dx = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n-1)}{2^{n+1} a^n} \sqrt{\frac{\pi}{a}}$ |

DESARROLLO EXPONENCIAL

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

DESARROLLO LOGARÍTMICO

$$\ln(1+x) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 - \dots \quad (|x| < 1)$$

DESARROLLOS TRIGONOMÉTRICOS (θ en radianes)

$$\text{sen } \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \dots$$

$$\text{cos } \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \dots$$

$$\text{tan } \theta = \theta + \frac{\theta^3}{3} + \frac{2\theta^5}{15} + \dots$$

APÉNDICE I

PROGRAMAS DE COMPUTADORA

Se proporcionan tres ejemplos de programas de computadora que han sido usados en el texto para los cálculos cinemáticos que involucran a fuerzas no-constantes que actúan sobre una partícula. Los programas están escritos en el lenguaje BASIC y pueden adaptarse fácilmente a la

mayoría de las computadoras personales. En cada caso, la velocidad y la posición iniciales de la partícula deben ser puestos en los programas en las líneas 40 y 50, respectivamente.

1. FUERZAS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

Este programa se usó en la sección 6-6 para hallar la posición y la velocidad de un automóvil cuya aceleración depende del tiempo. El programa puede ser usado para

cualquier aceleración dependiente del tiempo cambiando la línea 180 de modo que muestre la $a(t)$ deseada. En este caso usamos el ejemplo de la sección 6-6, $a(t) = -2.67t$.

LISTADO DEL PROGRAMA

```

10 ' BASIC KINEMATICS PROGRAM -- TIME DEPENDENT FORCES
20 ' GIVEN A(T), V0, X0; COMPUTES V(T), X(T)
30 ' SPECIFY INITIAL VALUES
40 V0 = 29.2
50 X0 = 0
60 'SPECIFY THE MAXIMUM NUMBER OF TIME UNITS
70 '   FOR WHICH THE PROGRAM SHOULD RUN
80 TMAX = 10
90 'SPECIFY THE VALUE OF ONE TIME UNIT
100 '   EXAMPLE: 0.5 FOR 0.5 SECOND
110 '   EXAMPLE: 2.0 FOR 2.0 HOUR
120 TU = .5
130 'SPECIFY THE NUMBER OF INTERVALS DT
140 '   INTO WHICH EACH TIME UNIT IS DIVIDED
150 NT = 100
160 DT = TU/NT
170 'INSERT A(T) IMMEDIATELY AFTER DEF FN IN NEXT STATEMENT
180 DEF FNA(T)=-2.67*T
190 V=V0
200 X=X0
210 PRINT "TIME           VELOCITY           POSITION"
220 LPRINT "TIME           VELOCITY           POSITION"
230 'BEGIN ITERATION
240 FOR TIME = 1 TO TMAX
250 FOR N = 1 TO NT
260 T = (TIME-1)*TU + N*DT
270 AI=FNA(T)
280 AI1=FNA(T-DT)
290 AV=.5*(AI+AI1)

```

```

300 DV=AV*DT
310 V = V + DV
320 DX = .5*(V + V - DV)*DT
330 X = X+DX
340 NEXT N
350 PRINT TIME*TU,V,X
360 LPRINT TIME*TU,V,X
370 NEXT TIME
400 END

```

SALIDA DE MUESTRA

TIME	VELOCITY	POSITION
.5	28.86625	14.54437
1	27.86499	28.75499
1.5	26.19618	42.2981
2	23.85994	54.83993
2.5	20.85615	66.04676
3	17.18486	75.5848
3.5	12.84612	83.1203
4	7.839843	88.31959
4.5	2.166084	90.84886
5	-4.175166	90.37431

2. FUERZAS DEPENDIENTES DE LA VELOCIDAD

Este programa puede utilizarse como se describió en la sección 6-7 para analizar el movimiento de un proyectil sujeto a una fuerza de arrastre. En este caso la fuerza está escrita en la línea 200 como $F(x) = g - bv^2$, siendo $g = 9.8$ y $b = 0.33$. Pueden ser sustituidas en la línea 200 otras

expresiones para fuerzas dependientes de la velocidad. La salida nos muestra que la partícula alcanza su velocidad terminal de alrededor de 5.4 m/s después de un tiempo de 1.5 s, durante el cual ha viajado unos 6 m.

LISTADO DEL PROGRAMA

```

10 ' BASIC KINEMATICS PROGRAM -- VELOCITY DEPENDENT FORCES
20 ' GIVEN A(V), V0, X0; COMPUTES V(T), X(T)
30 'SPECIFY INITIAL VALUES
40 V0 = 0
50 X0 = 0
60 'SPECIFY THE MAXIMUM NUMBER OF TIME UNITS
70 '   FOR WHICH THE PROGRAM SHOULD RUN
80 TMAX = 10
90 'SPECIFY THE VALUE OF ONE TIME UNIT
100 '   EXAMPLE: 0.5 FOR 0.5 SECOND
110 '   EXAMPLE: 2.0 FOR 2.0 HOUR
120 TU=.25
130 'SPECIFY THE NUMBER OF INTERVALS DT
140 '   INTO WHICH EACH TIME UNIT IS DIVIDED
150 NT=100
160 DT=TU/NT
170 V=V0
180 X=X0
190 'INSERT A(V) IMMEDIATELY AFTER DEF FN IN NEXT STATEMENT
200 DEF FNA(V)=9.8 - .33*V*V
210 PRINT "TIME           VELOCITY           POSITION"
220 LPRINT "TIME           VELOCITY           POSITION"
230 'BEGIN ITERATION
240 FOR TIME = 1 TO TMAX
250 FOR N = 1 TO NT

```

```

260 AV=FNA(V)
270 DV=AV*DT
280 V = V + DV
290 DX = .5*(V + V + DV)*DT
300 X = X+DX
310 NEXT N
320 PRINT TIME*TU,V,X
330 LPRINT TIME*TU,V,X
340 NEXT TIME
400 END

```

SALIDA DE MUESTRA

TIME	VELOCITY	POSITION
.25	2.299237	.2966358
.5	3.905542	1.08959
.75	4.765719	2.18636
1	5.161553	3.434
1.25	5.330923	4.748592
1.5	5.401125	6.091382
1.75	5.42984	7.445783
2	5.441519	8.804918
2.25	5.446261	10.16598
2.5	5.448183	11.52782

3. FUERZAS DEPENDIENTES DE LA POSICIÓN

Este programa se usó en la sección 8-4 para analizar el movimiento de una partícula oscilante sujeta a una fuerza $F = -kx$. La fuerza está insertada en la línea 200 como

$F(x) = -9.6x$, de modo que $k = 9.6$. La salida muestra que la partícula oscila con un periodo de 3.2 s, como es de esperarse para una partícula de esta masa (línea 60).

LISTADO DE PROGRAMA

```

10 ' BASIC KINEMATICS PROGRAM -- POSITION DEPENDENT FORCES
20 ' GIVEN F(X), V0, X0, M; COMPUTES V(T), X(T)
30 ' SPECIFY INITIAL VALUES AND MASS OF PARTICLE
40 V0 = 0 ' METERS PER SECOND
50 X0 = .05 ' METERS
60 M = 2.5 ' KILOGRAMS
70 ' SPECIFY THE MAXIMUM NUMBER OF TIME UNITS
80 ' FOR WHICH THE PROGRAM SHOULD RUN
90 TMAX = 40
100 ' SPECIFY THE VALUE OF ONE TIME UNIT
110 ' EXAMPLE: 0.5 FOR 0.5 SECOND
120 TU=.1
130 ' SPECIFY THE NUMBER OF INTERVALS DT
140 ' INTO WHICH EACH TIME UNIT IS DIVIDED
150 NT = 10
160 DT = TU/NT
170 V=V0
180 X=X0
190 ' INSERT F(X) IMMEDIATELY AFTER DEF FN IN NEXT STATEMENT
200 DEF FNF(X)=-9.600001*X
210 PRINT " TIME VELOCITY POSITION"
220 PRINT " (S) (M/S) (M) "
230 LPRINT " TIME VELOCITY POSITION"
240 LPRINT " (S) (M/S) (M) "
250 LPRINT USING "###.##";TIME;;PRINT USING "+#####.###";V0,X0
260 PRINT USING "###.##";TIME;;PRINT USING "+#####.###";V0,X0

```

```

270 ' BEGIN ITERATION
280 FOR TIME = 1 TO TMAX
290 FOR N = 1 TO NT
300 A=FNF(X)/M ' ACCELERATION IN INTERVAL
310 X = X + V*DT + .5*A*DT*DT ' POSITION AT END OF INTERVAL
320 V = V + A*DT ' VELOCITY AT END OF INTERVAL
330 NEXT N
340 PRINT USING "###.##";TIME*TU;;PRINT USING "+#####.###";V,X
350 LPRINT USING "###.##";TIME*TU;;LPRINT USING "+#####.###";V,X
360 NEXT TIME
400 END

```

SALIDA DE MUESTRA

TIME (S)	VELOCITY (M/S)	POSITION (M)
0.00	+0.000	+0.050
0.10	-0.019	+0.049
0.20	-0.037	+0.046
0.30	-0.054	+0.042
0.40	-0.069	+0.035
0.50	-0.082	+0.028
0.60	-0.091	+0.019
0.70	-0.097	+0.010
0.80	-0.099	-0.000
0.90	-0.097	-0.010
1.00	-0.092	-0.019
1.10	-0.083	-0.028
1.20	-0.070	-0.036
1.30	-0.056	-0.042
1.40	-0.039	-0.047
1.50	-0.020	-0.050
1.60	-0.001	-0.051
1.70	+0.019	-0.050
1.80	+0.037	-0.047
1.90	+0.055	-0.042
2.00	+0.070	-0.036
2.10	+0.083	-0.028
2.20	+0.092	-0.020
2.30	+0.098	-0.010
2.40	+0.100	-0.000
2.50	+0.099	+0.010
2.60	+0.093	+0.019
2.70	+0.084	+0.028
2.80	+0.072	+0.036
2.90	+0.057	+0.043
3.00	+0.040	+0.047
3.10	+0.021	+0.050
3.20	+0.001	+0.052
3.30	-0.018	+0.051
3.40	-0.037	+0.048
3.50	-0.055	+0.043
3.60	-0.071	+0.037
3.70	-0.084	+0.029
3.80	-0.093	+0.020
3.90	-0.099	+0.011
4.00	-0.102	+0.001

APÉNDICE J

PREMIOS NOBEL DE FÍSICA*

1901	Wilhelm Konrad Röntgen	1845-1923	por el descubrimiento de los rayos X	1926	Jean Baptiste Perrin	1870-1942	por su trabajo sobre la estructura discontinua de la materia, y especialmente por su descubrimiento del equilibrio de la sedimentación
1902	Hendrik Antoon Lorentz Pieter Zeeman	1853-1928 1865-1943	por sus investigaciones sobre la influencia del magnetismo en los fenómenos de radiación	1927	Arthur Holly Compton Charles Thomson Rees Wilson	1892-1962 1869-1959	por su descubrimiento del efecto que lleva su nombre por su método para hacer visibles las trayectorias de las partículas cargadas eléctricamente por la condensación del vapor
1903	Antoine Henri Becquerel Pierre Curie Marie Sklowdowska-Curie	1852-1908 1859-1906 1867-1934	por su descubrimiento de la radiactividad espontánea por sus investigaciones conjuntas sobre los fenómenos de radiación descubiertos por el profesor Henri Becquerel	1928	Owen Willans Richardson	1879-1959	por su trabajo sobre los fenómenos termoiónicos y especialmente por el descubrimiento de la ley que lleva su nombre
1904	Lord Rayleigh (John William Strutt)	1842-1919	por sus investigaciones de las densidades de los gases más importantes y por su descubrimiento del argón	1929	Prince Louis-Victor de Broglie	1892-1987	por su descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones
1905	Philipp Eduard Anton v. Lenard	1862-1947	por su trabajo sobre los rayos catódicos	1930	Sir Chandrasekhara Ventaca Raman	1888-1970	por su trabajo sobre la dispersión de la luz y por el descubrimiento del efecto que lleva su nombre
1906	Joseph John Thomson	1856-1940	por sus investigaciones teóricas y experimentales sobre la conducción de la electricidad en los gases	1932	Werner Heisenberg	1901-1976	por la creación de la mecánica cuántica cuya aplicación ha conducido, entre otras cosas, al descubrimiento de las formas alotrópicas del hidrógeno
1907	Albert Abraham Michelson	1852-1931	por sus instrumentos ópticos de precisión y las investigaciones metrologías llevadas a cabo con su ayuda	1933	Erwin Schrödinger	1887-1961	por el descubrimiento de nuevas formas productivas de la teoría atómica
1908	Gabriel Lippmann	1845-1921	por su método para reproducir los colores fotográficamente basado en los fenómenos de interferencia		Paul Adrien Maurice Dirac	1902-1984	
1909	Guglielmo Marconi Carl Ferdinand Braun	1874-1937 1850-1918	por sus contribuciones al desarrollo de la telegrafía inalámbrica	1935	James Chadwick	1891-1974	por su descubrimiento del neutrón
1910	Johannes Diderik van der Waals	1837-1932	por su trabajo sobre la ecuación de estado para los gases y los líquidos	1936	Victor Franz Hess Carl David Anderson	1883-1964 1905-1991	por el descubrimiento de la radiación cósmica por su descubrimiento del positrón
1911	Wilhelm Wien	1864-1928	por sus descubrimientos con respecto a las leyes que gobiernan la radiación del calor	1937	Clinton Joseph Davisson George Paget Thomson	1881-1958 1892-1975	por sus descubrimientos experimentales de la difracción de los electrones por cristales
1912	Nils Gustaf Dalén	1869-1937	por su invento de los reguladores automáticos para usarse junto con los acumuladores de gas para iluminar los faros y las boyas	1938	Enrico Fermi	1901-1954	por sus demostraciones de la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por la irradiación con neutrones, y por su descubrimiento relacionado con las reacciones nucleares causadas por neutrones lentos
1913	Heike Kamerlingh Onnes	1853-1926	por sus investigaciones de las propiedades de la materia a bajas temperaturas que condujeron, entre otras cosas, a la producción del helio líquido	1939	Ernest Orlando Lawrence	1901-1958	por el invento y desarrollo del ciclotrón y por los resultados obtenidos con él, especialmente en elementos radiactivos artificiales
1914	Max von Laue	1879-1960	por su descubrimiento de la difracción de los rayos Röntgen en los cristales	1943	Otto Stern	1888-1969	por su contribución al desarrollo del método de rayos moleculares y su descubrimiento del momento magnético del protón
1915	William Henry Bragg William Lawrence Bragg	1862-1942 1890-1971	por sus servicios en el análisis de la estructura cristalina por medio de los rayos X	1944	Isidor Isaac Rabi	1898-1988	por su método de la resonancia para registrar las propiedades magnéticas de los núcleos (de los átomos)
1917	Charles Glover Barkla	1877-1944	por su descubrimiento de los rayos X característicos de los elementos	1945	Wolfgang Pauli	1900-1958	por el descubrimiento del Principio de exclusión (principio Pauli)
1918	Max Planck	1858-1947	por su descubrimiento de los cuantos de energía	1946	Percy Williams Bridgman	1882-1961	por el invento de un aparato para producir presiones extremadamente altas, y por los descubrimientos que hizo por ello en el campo de la física de altas presiones
1919	Johannes Stark	1874-1957	por su descubrimiento del efecto Doppler en los rayos canal y la separación de las líneas espectrales en los campos eléctricos	1947	Sir Edward Victor Appleton	1892-1965	por sus investigaciones de la física de la alta atmósfera, especialmente por el descubrimiento de la capa llamada Appleton
1920	Charles-Édouard Guillaume	1861-1938	por el servicio rendido a las mediciones de precisión en física a través de su descubrimiento de las anomalías en las aleaciones de acero-níquel	1948	Patrick Maynard Stuart Blackett	1897-1974	por su desarrollo del método de la cámara Wilson, y con ello sus descubrimientos en física nuclear y radiación cósmica
1921	Albert Einstein	1879-1955	por sus servicios a la física teórica, y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico	1949	Hideki Yukawa	1907-1981	por su predicción de la existencia de los mesones con base en el trabajo teórico sobre las fuerzas nucleares
1922	Neils Bohr	1885-1962	por la investigación de la estructura de los átomos y de la radiación que emana de ellos	1950	Cecil Frank Powell	1903-1969	por su desarrollo del método fotográfico para estudiar los procesos nucleares y sus descubrimientos, hechos con este método, con respecto a los mesones
1923	Robert Andrews Millikan	1868-1953	por su trabajo sobre la carga elemental de electricidad y sobre el efecto fotoeléctrico	1951	Sir John Douglas Cockcroft Ernest Thomas Sinton Walton	1897-1967 1903-	por su trabajo pionero sobre la transmutación de los núcleos atómicos por partículas atómicas aceleradas artificialmente
1924	Karl Manne Georg Siegbahn	1888-1979	por sus descubrimientos e investigación en el campo de la espectroscopia de rayos X	1952	Felix Bloch Edward Mills Purcell	1905-1983 1912-	por su desarrollo de nuevos métodos de precisión para la resonancia magnética nuclear y sus descubrimientos en conexión con ellos
1925	James Franck Gustav Hertz	1882-1964 1887-1975	por su descubrimiento de las leyes que gobiernan el impacto de un electrón sobre un átomo	1953	Frits Zernike	1888-1966	por su demostración del método de contraste de fase, especialmente por su invento del microscopio de contraste de fase
				1954	Max Born	1882-1970	por su investigación fundamental en la mecánica cuántica, especialmente por su interpretación estadística de la función de onda
					Walther Bothe	1891-1957	por el método de coincidencia y sus descubrimientos a partir de ello
				1955	Willis Eugene Lamb	1913-	por sus descubrimientos concernientes a la estructura fina del espectro del hidrógeno
					Polykarp Kusch	1911-	por su determinación de precisión del momento magnético del electrón
				1956	William Shockley John Bardeen Walter Houser Brattain	1910-1989 1908-1991 1902-1987	por sus investigaciones sobre los semiconductores y su descubrimiento del efecto transistor
				1957	Chen Ning Yang Tsung Dao Lee	1922- 1926-	por su penetrante investigación de las leyes de la paridad que condujeron a importantes descubrimientos sobre las partículas elementales
				1958	Pavel Alecksejjevič Čerenkov Il'ja Michajlovic Frank	1904- 1908-1990	por el descubrimiento e interpretación del efecto Čerenkov

1959	Igor' Evgen' evic Tamm Emilio Gino Segrè Owen Chamberlain	1895-1971 1905-1989 1920-	por su descubrimiento del antiprotón
1960	Donald Arthur Glaser	1926-	por el invento de la cámara de burbujas
1961	Robert Hofstadter	1915-1990	por sus estudios pioneros sobre la dispersión de los electrones por núcleos atómicos y por sus descubrimientos realizados concernientes a la estructura de los nucleones
	Rudolf Ludwig Mössbauer	1929-	por sus investigaciones concernientes a absorción de los rayos γ en resonancia y su descubrimiento a este respecto del efecto que lleva su nombre
1962	Lev Davidovič Landau	1908-1968	por sus teorías pioneras de la materia condensada, especialmente del helio líquido
1963	Eugene P. Wigner	1902-	por su contribución a la teoría del núcleo atómico y las partículas elementales, particularmente a través del descubrimiento y la aplicación de los principios fundamentales de la simetría
	Maria Goeppert Mayer	1906-1972	por sus descubrimientos concernientes a la estructura de capas del núcleo
1964	J. Hans D. Jensen Charles H. Townes Nikolai G. Basov Alexander M. Prochorov	1907-1973 1915- 1922- 1916-	por el trabajo fundamental en el campo de la electrónica cuántica que condujo a la construcción de los osciladores y los amplificadores basada en el principio maser-láser
1965	Sin-itiro Tomonaga Julian Schwinger Richard P. Feynman	1906-1979 1918- 1918-1988	por el trabajo fundamental en el campo de la electrodinámica cuántica, con consecuencias de profunda penetración en la física de las partículas elementales
1966	Alfred Kastler	1902-1984	por el descubrimiento y desarrollo de métodos ópticos para el estudio de la resonancia Hertziana en los átomos
1967	Hans Albrecht Bethe	1906-	por sus contribuciones a la teoría de las reacciones nucleares, especialmente sus descubrimientos concernientes a la producción de energía en las estrellas
1968	Luis W. Alvarez	1911-1988	por su contribución decisiva a la física de las partículas elementales, en particular el descubrimiento de un gran número de estados de resonancia, hecho posible a través de su desarrollo de la técnica de emplear la cámara de burbujas de hidrógeno y el análisis de datos
1969	Murray Gell-Mann	1929-	por su contribución y descubrimientos concernientes a la clasificación de las partículas elementales y sus interacciones
1970	Hannes Alvéén	1908-	por el trabajo fundamental y los descubrimientos en magneto-hidrodinámica con aplicaciones fructíferas en diferentes partes de la física del plasma
	Louis Néel	1904-	por el trabajo fundamental y los descubrimientos concernientes al antiferromagnetismo y el ferromagnetismo que condujeron a aplicaciones importantes en la física del estado sólido
1971	Dennis Gabor	1900-1979	por su descubrimiento de los principios de la holografía
1972	John Bardeen Leon N. Cooper J. Robert Schrieffer	1908-1991 1930- 1931-	por su desarrollo de una teoría de la superconductividad
1973	Leo Esaki Ivar Giaever Brian D. Josephson	1925- 1929- 1940-	por su descubrimiento del efecto túnel en los semiconductores por su descubrimiento del efecto túnel en los superconductores por su predicción teórica de las propiedades de una supercorriente a través de una barrera túnel
1974	Antony Hewish Sir Martin Ryle	1924- 1918-1984	por su descubrimiento de los púlsares por su trabajo pionero en radioastronomía
1975	Aage Bohr Ben Mottelson James Rainwater	1922- 1926- 1917-1986	por el descubrimiento de la conexión entre el movimiento colectivo y el movimiento de partícula y el desarrollo de la teoría de la estructura del núcleo atómico basada en esta conexión
1976	Burton Richter Samuel Chao Chung Ting	1931- 1936-	por su descubrimiento (independiente) de una partícula fundamental importante
1977	Philip Warren Anderson Nevill Francis Mott John Hasbrouck Van Vleck	1923- 1905- 1899-1980	por sus investigaciones teóricas fundamentales de la estructura electrónica de los sistemas magnéticos y desordenados
1978	Peter L. Kapitza	1894-1984	por sus inventos y descubrimientos básicos en física de bajas temperaturas
	Arno A. Penzias	1926-	por su descubrimiento de la radiación fósil (radiación cósmica de fondo en la región de las microondas)
	Robert Woodrow Wilson	1936-	

1979	Sheldon Lee Glashow Abdus Salam Steven Weinberg	1932- 1926- 1933-	por sus modelos unificados de la acción de las fuerzas débiles, electromagnéticas y por su predicción de la existencia de corrientes neutras
1980	James W. Cronin Val L. Fitch	1931- 1923-	por el descubrimiento de las violaciones de los principios fundamentales de la simetría en la desintegración de los mesones K neutros
1981	Nicolaas Bloembergen Arthur Leonard Schawlow Kai M. Siegbahn	1920- 1921- 1918-	por su contribución al desarrollo de la espectroscopia láser
1982	Kenneth Geddes Wilson	1936-	por su contribución de la espectroscopia electrónica de alta resolución
1983	Subrehmanyan Chandrasekhar William A. Fowler	1910- 1911-	por su método para analizar los fenómenos críticos inherentes en los cambios de la materia bajo la influencia de la presión y la temperatura
1984	Carlo Rubbia Simon van der Meer	1910- 1911-	por sus estudios teóricos de la estructura y evolución de las estrellas por sus estudios de la formación de los elementos químicos en el Universo
1985	Klaus von Klitzing	1934- 1925-	por sus contribuciones decisivas al gran proyecto que condujo al descubrimiento de las partículas de campo W y Z, portadoras de la interacción débil
1986	Ernst Ruska Gerd Binnig	1943- 1906- 1947-	por su descubrimiento de la resistencia Hall cuantizada por su invento del microscopio electrónico por su invento del microscopio electrónico de barrido por efecto túnel
1987	Heinrich Rohrer Karl Alex Müller J. Georg Bednorz	1933- 1927- 1950-	por su descubrimiento de una nueva clase de superconductores
1988	Leon M. Lederman Melvin Schwartz Jack Steinberger	1922- 1932- 1921-	por experimentos con haces de neutrinos y el descubrimiento del neutrino del muón
1989	Hans G. Dehmelt Wolfgang Paul Norman F. Ramsey	1922- 1913- 1915-	por su desarrollo de las técnicas para atrapar átomos individuales
1990	Richard E. Taylor Jerome I. Friedman	1922- 1913- 1915-	por sus descubrimientos en la espectroscopia por resonancia atómica, que condujeron a los masers de hidrógeno y a los relojes atómicos
1991	Henry W. Kendall Pierre-Gilles de Gennes	1929- 1930- 1926- 1932-	por sus experimentos sobre la dispersión de los electrones por núcleos, lo que revela la presencia de los quarks dentro de los nucleones por descubrimientos respecto al ordenamiento de las moléculas en sustancias tales como los cristales líquidos, los superconductores y los polímeros

* Véase *Nobel Lectures, Physics*, Elsevier Publishing Company para las biografías de los premiados y las disertaciones dadas por ellos al recibir el premio.

APÉNDICE K

TABLAS

ALGUNOS SÍMBOLOS MATEMÁTICOS

=	igual a	~	es del orden de la magnitud de
≈	aproximadamente igual a	∝	es proporcional a
≠	no es igual a	lím	el límite de
≡	es idéntico a, se define como	Σ	la suma de
>	es mayor que	∫	la integral de
>>	es mucho mayor que	Δx	el cambio o diferencia en x
≥	es mayor que o igual a	x	el valor absoluto o la magnitud absoluta de x
<	es menor que	\bar{x}	el valor promedio de x
<<	es mucho menor que	df/dx	la derivada de f con respecto a x
≤	es menor que o igual a	∂f/∂x	la derivada parcial de f con respecto a x

LOS PREFIJOS DEL SISTEMA INTERNACIONAL (SI)

Factor	Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹	deci	d
10 ¹⁵	peta	P	10 ⁻²	centi	c
10 ¹²	tera	T	10 ⁻³	mili	m
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁶	mega	M	10 ⁻⁹	nano	n
10 ³	kilo	k	10 ⁻¹²	pico	p
10 ²	hecto	h	10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ¹	deca	d	10 ⁻¹⁸	atto	a

ALFABETO GRIEGO

alfa	A	α	iota	I	ι	rho	Π	ρ
beta	B	β	kappa	K	κ	sigma	Σ	σ
gamma	Γ	γ	lambda	Λ	λ	tau	T	τ
delta	Δ	δ	my	M	μ	ípsilon	Υ	υ
épsilon	E	ε	ny	N	ν	fi	Φ	φ
zeta	Z	ζ	xi	Ξ	ξ	ji	Χ	χ
eta	H	η	ómicron	O	ο	psi	Ψ	ψ
theta	Θ	θ	pi	Π	π	omega	Ω	ω

ALGUNAS TABLAS EN EL TEXTO

Tabla	Capítulo	Página
Unidades básicas del SI	1	2
Prefijos del SI	1	3
Ecuaciones para el movimiento con aceleración constante	2	27
Ecuaciones vectoriales para el movimiento con aceleración constante	4	62
Coefficientes de fricción	6	120
Algunas velocidades terminales en el aire	6	132
Movimiento con aceleración lineal o angular constante	11	265
Inercias de rotación (figura)	12	282
Comparación de las ecuaciones de la dinámica lineal y de rotación	12	288
Resumen de las ecuaciones de la dinámica rotatoria	13	321
Algunas propiedades elásticas de materiales selectos de interés en ingeniería	14	343
Variación de g ₀ con la altitud	16	389
Ciertas velocidades de escape	16	395
Algunas densidades	17	422
Viscosidad de una selección de fluidos	18	453
La velocidad del sonido	20	497
Algunas intensidades y niveles de sonido	20	501
Las ecuaciones de transformación de Lorentz	21	528
La transformación de Lorentz de la velocidad	21	530
Algunos coeficientes de dilatación lineal promedio	22	556
Algunas velocidades moleculares a la temperatura ambiente	23	570
Capacidades caloríficas de algunas sustancias	25	610
Algunos calores de transformación	25	610
Capacidades caloríficas molares de los gases	25	614
Algunas conductividades térmicas y valores de R	25	623

ALGUNAS UNIDADES Y SUS ABREVIATURAS

ampere	A	litro	L
año	y	metro	m
atmósfera	atm	milla	mi
caballo de vapor	hp	minuto	min
caloría	cal	mol	mol
coulomb	C	newton	N
día	d	ohm	Ω
electronvolt	eV	pascal	Pa
farad	F	pie	ft
gauss	G	pulgada	in.
grado Celsius	°C	radián	rad
grado Fahrenheit	°F	revolución	rev
gramo	g	segundo	s
henry	H	tesla	T
hertz	Hz	unidad de masa atómica unificada	u
hora	h	unidad térmica británica	Btu
joule	J	volt	V
kelvin	K	watt	W
libra	lb	weber	Wb

ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS

Aire (seco, a 20°C y 1 atm)	
Densidad	1.21 kg/m ³
Calor específico a presión constante	1010 J/kg · K
Razón de las capacidades caloríficas específicas	1.40
Velocidad del sonido	343 m/s
Resistencia a la disrupción eléctrica	3 × 10 ⁶ V/m
Masa molar efectiva	0.0289 kg/mol
Agua	
Densidad	1000 kg/m ³
Velocidad del sonido	1460 m/s
Calor específico a presión constante	4190 J/kg · K
Calor de fusión (0°C)	333 kJ/kg
Calor de vaporización (100°C)	2260 kJ/kg
Índice de refracción (λ = 589 nm)	1.33
Masa molar	0.0180 kg/mol
Tierra	
Masa	5.98 × 10 ²⁴ kg
Radio medio	6.37 × 10 ⁶ m
Aceleración de la caída libre en la superficie de la Tierra	9.81 m/s ²
Atmósfera estándar	1.01 × 10 ⁵ Pa
Periodo del satélite a 100 km de altitud	86.3 min
Radio de la órbita geosíncrona	42,200 km
Velocidad de escape	11.2 km/s
Momento dipolar magnético	8.0 × 10 ²² A · m ²
Campo eléctrico medio en la superficie	150 V/m, abajo
Distancia a:	
La Luna	3.82 × 10 ⁸ m
El Sol	1.50 × 10 ¹¹ m
La estrella más cercana	4.04 × 10 ¹⁶ m
El centro galáctico	2.2 × 10 ²⁰ m
La galaxia de Andrómeda	2.1 × 10 ²² m
Borde del universo observable	~ 10 ²⁶ m

ALGUNAS CONSTANTES FÍSICAS*

Velocidad de la luz	c	3.00 × 10 ⁸ m/s
Constante gravitatoria	G	6.67 × 10 ⁻¹¹ N · m ² /kg ²
Constante de Avogadro	N_A	6.02 × 10 ²³ mol ⁻¹
Constante universal de los gases	R	8.31 J/mol · K
Relación masa-energía	c^2	8.99 × 10 ¹⁶ J/kg 931.5 × MeV/u
Constante dieléctrica	ϵ_0	8.85 × 10 ⁻¹² F/m
Constante de permeabilidad	μ_0	1.26 × 10 ⁻⁶ H/m
Constante de Planck	h	6.63 × 10 ⁻³⁴ J · s 4.14 × 10 ⁻¹⁵ eV · s
Constante de Boltzmann	k	1.38 × 10 ⁻²³ J/K 8.62 × 10 ⁻⁵ eV/K
Carga elemental	e	1.60 × 10 ⁻¹⁹ C
Masa de un electrón en reposo	m_e	9.11 × 10 ⁻³¹ kg
Masa de un protón en reposo	m_p	1.67 × 10 ⁻²⁷ kg
Radio de Bohr	a_0	5.29 × 10 ⁻¹¹ m
Magnetón de Bohr	μ_B	9.27 × 10 ⁻²⁴ J/T 5.79 × 10 ⁻⁵ eV/T

*Para una lista más completa que muestre también los valores experimentales más usados, véase el apéndice B.

ALGUNOS FACTORES DE CONVERSIÓN*

Masa	Velocidad
1 kg = 1000 g = 6.02 × 10 ²⁶ u	1 m/s = 3.28 ft/s = 2.24 mi/h
1 u = 1.66 × 10 ⁻²⁷ kg	1 km/h = 0.621 mi/h
Longitud	Fuerza y presión
1 m = 100 cm = 39.4 in = 3.28 ft	1 N = 10 ⁵ dinas = 0.225 lb
1 mi = 1.61 km = 5280 ft	1 Pa = 1 N/m ² = 10 dinas/cm ² = 1.45 × 10 ⁻⁴ lb/in ²
1 in = 2.54 cm	1 atm = 1.01 × 10 ⁵ Pa = 14.7 lb/in ² = 76 cmHg
1 nm = 10 ⁻⁹ m = 10 Å	Energía y potencia
Tiempo	1 J = 10 ⁷ erg = 0.239 cal = 0.738 ft · lb
1 d = 86 400 s	1 kW · h = 3.6 × 10 ⁶ J
1 año = 365 $\frac{1}{4}$ d = 3.16 × 10 ⁷ s	1 cal = 4.19 J
Volumen	1 eV = 1.60 × 10 ⁻¹⁹ J
1 L = 1000 cm ³ = 10 ⁻³ m ³ = 1.06 cuartos de galón	1 horsepower = 746 W = 550 · lb/s
1 gal (U.S.) = 231 in ³ = 3.79 L	Electricidad y magnetismo
Medidas angulares	1 T = 1 Wb/m ² = 10 ⁴ gauss
1 rad = 57.3° = 0.159 rev	
π rad = 180° = $\frac{1}{2}$ rev	

*Véase el apéndice G para una lista más completa.

RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

CAPÍTULO 1

3. 52.6 min; 5.2%. 5. -0.44%. 7. (a) Sí. (b) 8.6 s.
9. 720 días. 11. 55 s; alrededor de un minuto. 13. 2 d 5 h.
15. (a) 100 m; 8.56 m; 28.1 ft. (b) 1 mi; 109 m; 358 ft.
17. 1.88×10^{22} cm³. 19. (a) 4.00×10^4 km.
(b) 5.10×10^8 km². (c) 1.08×10^{12} km³.
21. 2.86×10^{-3} años-luz/siglo.
23. (a) 4.85×10^{-6} pc; 1.58×10^{-5} años-luz.
(b) 9.48×10^{12} km; 3.08×10^{13} km. 25. (a) 390.
(b) 5.9×10^7 . (c) 3500 km. 27. 5.97×10^{26} .
29. Nueva York. 31. 840 km. 33. 132 kg/s.
37. 605.780211 nm. 39. (a) 43.2 cm². (b) 43 cm².
41. $\sqrt{Gh/c^3} = 4.05 \times 10^{-35}$ m.

CAPÍTULO 2

1. 81 ft (24 m). 3. 2 cm/año. 5. 48 mi/h.
(El físico hizo otro movimiento además de este viaje semanal.)
7. (a) 45.0 mi/h (72.4 km/h). (b) 42.8 mi/h (68.8 km/h).
(c) 43.9 mi/h (70.6 km/h). 9. (a) 0, 0, -2, 0, 12 m.
(b) -2, 12 m. (c) 7, 0 m/s. 11. (a) 5.7 ft/s. (b) 7.0 ft/s.
13. (a) 28.5 cm/s. (b) 18.0 cm/s. (c) 40.5 cm/s. (d) 28.1 cm/s.
(e) 30.4 cm/s. 15. -2 m/s².
19. (a) OA: +, -, AB: 0, 0; BC: +, +; CD: +, 0. (b) No.
21. (e) Situaciones (a), (b), y (d). 23. (a) 80 m/s.
(b) 110 m/s. (c) 20 m/s².
25. (b) -0.030, -0.020, -0.010, 0.0 m/s.
(c) -0.040, -0.020, 0.0, 0.020, 0.040, 0.060 m/s.
(e) 0.020, 0.020, 0.020 m/s². 27. (b) 19 m/s. (c) 31 m.
29. 2.8 m/s² (9.4 ft/s²). 31. 560 ms. 33. 1.4×10^{15} m/s².
35. 2.6 s. 37. (a) 4.5×10^4 ft/s². (b) 5.8 ms.
39. (a) 5.71 m/s². (b) 3.68 s. (c) 5.78 s. (d) 95.4 m.
41. (a) 60.6 s. (b) 36.4 m/s. 43. (a) 0.75 s. (b) 50 m.
45. (a) 82 m. (b) 19 m/s. 47. (a) 12 ft/s² (3.6 m/s²).
(b) 3.7 ft/s (1.4 m/s). 49. (a) 0.74 s. (b) -20 ft/s².
51. (a) 48.5 m/s. (b) 4.95 s. (c) 34.3 m/s. (d) 3.50 s.
53. (a) 32.4 m/s. (b) 6.62 s. 55. Mercurio.
57. 1.23, 4.90, 11.0, 19.6, 30.6 cm. 59. 3.0 m (9.8 ft).
61. (a) 350 ms. (b) 82 ms.
63. 22.2 y 88.9 cm abajo de la boca de una regadera. 65.
130 m/s², arriba.
67. (a) 3.41 s. (b) 57.0 m. 69. ≈ 0.3 s. 71. (a) 17.1 s.
(b) 293 m. 75. 6.8 cm.

CAPÍTULO 3

1. Los desplazamientos deberán ser (a) paralelos, (b) antiparalelos,
(c) perpendiculares. 3. (a) 370 m, 57° al Este del Norte.
(b) Magnitud del desplazamiento = 370 m; distancia caminada
= 420 m.

7. (a) 4.5 unidades, 52° al Norte del Este.
(b) 8.4 unidades, 25° al Sur del Este.
9. Walpole (la prisión estatal). 11. (a) 4.9 m. (b) 12 m.
13. 4.76 km. 15. (a) 28 m. (b) 13 m.
17. (a) $10\mathbf{i} + 12\mathbf{j} + 14\mathbf{k}$. (b) 21 ft.
(c) Puede ser igual o mayor, pero no menor. (d) 26 ft.
19. (a) $3\mathbf{i} - 2\mathbf{j} + 5\mathbf{k}$. (b) $5\mathbf{i} - 4\mathbf{j} - 3\mathbf{k}$. (c) $-5\mathbf{i} + 4\mathbf{j} + 3\mathbf{k}$.
21. (a) $1400\mathbf{i} + 2100\mathbf{j} - 48\mathbf{k}$. (b) Cero.
23. (a) $r_x = 2.50$, $r_y = 15.3$. (b) 15.5. (c) 80.7°.
27. (a) $a\mathbf{i} + a\mathbf{j} + a\mathbf{k}$, $a\mathbf{i} + a\mathbf{j} - a\mathbf{k}$, $a\mathbf{i} - a\mathbf{j} - a\mathbf{k}$, $a\mathbf{i} - a\mathbf{j} + a\mathbf{k}$.
(b) 54.7°. (c) $a\sqrt{3}$. 33. (a) -19. (b) 27, dirección +z positiva.
39. (a) -21. (b) -9. (c) $5\mathbf{i} - 11\mathbf{j} - 9\mathbf{k}$. 41. (a) 0. (b) -16.
(c) -9. 43. (a) 2.97. (b) $1.51\mathbf{i} - 2.67\mathbf{j} - 1.36\mathbf{k}$. (c) 48.5°.
49. 70.5°.

CAPÍTULO 4

1. (a) 920 mi, 63° al Sur del Este.
(b) 410 mi/h, 63° al Sur del Este. (c) 550 mi/h.
3. (a) 3.9 km/h. (b) 13°. 5. (a) 24 ns. (b) 2.7 mm.
(c) 9.6×10^8 cm/s; 2.3×10^8 cm/s. 7. (a) $8\mathbf{j} + \mathbf{k}$. (b) $8\mathbf{j}$.
(c) Una parábola. 9. 60°. 11. (a) 514 ms. (b) 9.94 ft/s.
13. (a) 18 cm. (b) 1.9 m. 15. (a) 3.03 s. (b) 758 m.
(c) 29.7 m/s. 17. No. 19. (a) 1.16 s. (b) 13.0 m.
(c) 18.8 m/s; 5.56 m/s. (d) No. 21. (b) 76.0°. 23. (a) 99 ft.
(b) 90 ft/s. (c) 180 ft. 25. (a) 285 km/h. (b) 33°.
27. (a) 310 ms. (b) 1.9 m y 2.9 m sobre las manos.
29. El tercero. 31. Sí. 33. (a) 260 m/s. (b) 45 s.
35. 23 ft/s. 37. (a) 9.8 s. (b) 2700 ft.
39. 40 m (130 ft) aproximadamente. 41. (a) 20 cm.
(b) No; la pelota golpea la red a 4.4 cm arriba del suelo.
43. Entre los ángulos 31° y 63° sobre la horizontal.
45. 115 ft/s. 47. (a) $D = v\sqrt{2L/g} \sin \theta - L \cos \theta$.
(b) El proyectil pasará sobre la cabeza del observador si D es
positiva y pega en el suelo antes si D es negativa.
49. 5.66 s. 51. 8.98×10^{22} m/s². 53. (a) 7.49 km/s.
(b) 8.00 m/s². 55. (a) 94 cm. (b) 19 m/s. (c) 2400 m/s².
57. (a) 130 km/s. (b) 850 km/s². 61. (a) 92. (b) 9.6.
(c) $92 = (9.6)^2$. 63. 2.6 cm/s². 65. (a) 33.6 m/s².
(b) 89.7 m/s². 67. 36 s; no.
69. El viento sopla del Oeste a 55 mi/h. 71. 31 m/s.
75. (a) 5.8 m/s. (b) 17 m. (c) 67°. (d) 49°.
77. 170 km/h, 7.3° al Sur del Oeste. 79. (a) 30° corriente arriba.
(b) 69 min. (c) 80 min. (d) 80 min.
(e) Perpendicular a la corriente; 60 min.
81. Dirigir al bote 25° corriente arriba. (b) 0.21 h. 83. 0.83c.
85. (b) $t = 2.16$ s, $x = 97.7$ m, $y = 22.8$ m.
(c) $t = 4.31$ s, $x = 195$ m, $v_x = 45.3$ m/s, $v_y = -21.1$ m/s.

CAPÍTULO 5

1. 6.3 años. 3. (a) 1.0×10^{-15} N. (b) 8.9×10^{-30} N.
5. 8.0 cm/s². 7. 6500 N. 9. (a) 3.1 cm/s². (b) 1.2×10^5 km.
(c) 2.7 km/s. 11. (a) $42\mathbf{i} + 34\mathbf{j}$, m/s. (b) $630\mathbf{i} + 250\mathbf{j}$, m.
13. (a) 1.39×10^8 N; 6.94×10^9 N. (b) 4.11 años; 4.19 años.
15. (a) 0.62 m/s². (b) 0.13 m/s². (c) 2.6 m.
17. (a) 44.4 slug; 1420 lb. (b) 412 kg; 4040 N.
19. (a) 12.2 N; 2.65 kg. (b) Cero; 2.65 kg. 21. 1600 lb
23. 1.19×10^6 N (133 ton). 25. (a) 1.8 mN. (b) 3.3 mN.
27. 0.15 N. 29. (a) 210 m/s² (710 ft/s²). (b) 17 kN (4000 lb).
31. (a) 7.3 kg (0.50 slug). (b) 89 N (20 lb). 33. (a) 2.1 m/s².
(b) 120 N. (c) 21 m/s². 35. (a) 1.8 m/s². (b) 3.8 m/s.
(c) 4.0 m. (d) 11°. 37. 18.4 kN. 39. (b) 12 ft/s². (c) 8.9°.
41. 33 m/s. 43. (a) 730 N. (b) 1300 N. 45. (a) 3260 N.
(b) 2720 kg. (c) 1.20 m/s². 47. (a) 5.0×10^5 N.
(b) 1.4×10^6 N. 49. $2M \left(\frac{a}{a+g} \right)$.

51. (a) g sen θ , hacia abajo del plano inclinado.
(b) g sen θ , hacia abajo del plano inclinado. (c) (g - a) sen θ ,
hacia abajo del plano inclinado.
(d) (g + a) sen θ , hacia abajo del plano inclinado. (e) Cero.
(f) $m(g - a) \cos \theta$. 53. (a) 6.8 m/s.
(b) Sí; puede subir por el cable mientras cae.
55. (a) 0.97 m/s². (b) $T_1 = 1.2$ N; $T_2 = 3.5$ N.
57. (a) 135 N. (b) 45.3 N. (c) 75.4 N. 59. (a) 0.217 m/s².
(b) 17.8 N. 61. (a) 12.1 kN. (b) 10.5 kN.
(c) 1.60 kN, hacia el contrapeso. 63. (a) 37 N.
(b) 55 N. (c) 36 m/s², hacia arriba.
65. (b) $P/(m + M)$. (c) $PM/(m + M)$.
(d) $P(m + 2M)/2(m + M)$. 67. 130 lb.

CAPÍTULO 6

1. 2.3°. 3. 9.3 m/s². 5. 900 N. 7. (a) 9.1 kN. (b) 9.0 kN.
9. (a) No. (b) Una fuerza de 12 lb hacia la izquierda y una fuerza
de 5.0 lb hacia arriba.
11. (a) 11.1 N. (b) 47.3 N. (c) 40.1 N. 15. (a) $v_0^2/4g$ sen θ .
(b) No. 17. (a) 10 kg. (b) 2.7 m/s². 19. (a) 61 N. (b) 66 N.
(c) 5.9 kN. 21. (a) 70 lb. (b) 4.6 ft/s². 23. (b) 30 MN.
25. (a) 1.24 m/s². (b) 13.4 N. 27. $g(\sin \theta - \sqrt{2}\mu_k \cos \theta)$.
29. (a) 3.46 m/s². (b) 0.910 N, en tensión.
(c) 3.46 m/s²; 0.910 N en compresión. 31. (a) 7.6 m/s².
(b) 0.86 m/s². 33. (a) 730 lb (3200 N). (b) 0.30.
35. (a) 0.46. (b) 0.92. 37. 870 N; 17°. 39. 0.032.
41. (a) 0.43. (b) 42 m. 43. (a) 175 lb. (b) 50.0 lb.
45. (a) 30 cm/s. (b) 170 cm/s², radialmente hacia adentro. (c)
2.9 mN. (d) 0.40. 47. 2.32 km. 49. (a) En el fondo del círculo.
(b) 31 ft/s. 51. (a) 0.0337 N. (b) 9.77 N.
53. (a) $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(\tan \theta + \mu_s)}{r(1 - \mu_s \tan \theta)}}$. (b) $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(\tan \theta - \mu_s)}{r(1 + \mu_s \tan \theta)}}$.
55. (a) 235 m/s. (b) 107 m/s². (c) 232 N.
57. (a) $0.632F_0T/m$. (b) $0.368F_0T^2/m$. 59. $\sqrt{mg/b}$.
61. 2.0×10^{-5} N·s/m. 63. 1.30 m/s.
65. (a) $\left(\frac{m}{b} \right) \ln(v_i/v_f)$. (b) 19 s. 67. (b) 370 m.
69. (a) 11.7 s. (b) 59.8 m/s. (c) 0.610.
71. 819, 838, 833, 805, 762 m; 30°.
73. (a) $t = 1.95$ s, $x = 80.4$ m, $y = 20.0$ m,
 $v_x = 37.3$ m/s, $v_y = 0$, $a_x = -3.73$ m/s², $a_y = -9.80$ m/s²;
(b) $t = 1.79$ s, $x = 68.3$ m, $y = 17.8$ m, $v_x = 31.7$ m/s, $v_y = 0$,
 $a_x = -6.33$ m/s², $a_y = -9.80$ m/s²; (c) 151 m, 121 m;
(d) para $b = 0.10$ s⁻¹: $v_x = 30.3$ m/s, $v_y = -18.5$ m/s;
para $b = 0.20$ s⁻¹: $v_x = 21.1$ m/s, $v_y = -16.4$ m/s

CAPÍTULO 7

1. (a) 580 J. (b) Cero. (c) Cero. 3. (a) 430 J. (b) -400 J.
(c) Cero. 5. (a) $-2Mgd$. (b) Mgd . 7. (a) 2160 J.
(b) -1430 J. 9. (a) 215 lb. (b) 1.01×10^4 ft·lb. (c) 48.0 ft.
(d) 1.03×10^4 ft·lb. 11. 800 J. 13. (3/2) F_0x_0 .
15. (a) 23 mm. (b) 45 N. 17. (a) 135 N. (b) 60.0 J.
19. 1200 km/s. 21. AB: +; BC: 0; CD: -; DE: +.
23. 100 ft; no. 25. 20.2 ft·lb (24.4 J).
27. Hombre, 2.41 m/s; joven, 4.82 m/s.
29. (a) 9.0×10^4 "megatones de TNT". (b) 45 km.
31. 6.55 m/s. 33. (a) 304 mJ. (b) -1.75 J. (c) 3.32 m/s.
(d) 22.5 cm. 35. 720 W (0.97 hp). 37. 24 W.
39. (a) 2.45×10^5 ft·lb. (b) 0.619 hp. 41. 90.3 kN.
43. 25 hp. 45. (a) 0.77 mi. (b) 71 kW. 47. 16.6 kW.
49. (b) mtv^2/t^2 . 51. 2.66 hp. 53. (b) 1.95.
55. (a) 10.0 kW. (b) 2.97 kJ. 57. 69 hp. 61. (a) 0.13c.
(b) 4.6 keV. (c) Bajo por 1.3%. 63. (a) 79.1 keV.
(b) 3.11 MeV. (c) 10.9 MeV.

CAPÍTULO 8

1. 110 MN/m. 3. (a) 7.8 MJ. (b) 6.2. 5. 2.15 m/s.
7. (a) 27.0 kJ. (b) 2.94 kJ. (c) 158 m/s; a, b. 9. (a) 2.56 J.
(b) 11.1 m/s. 11. 830 ft. 13. 2.75 m/s. 15. (a) 1300 MW.
(b) 137 M\$. 19. 4.24 m. 21. (a) 34.2 ft/s. (b) 4.32 in.
23. $mgL/32$. 25. 11.1 cm.
27. (a) 8.06mg, a 82.9° a la izquierda de la vertical. (b) $5R/2$.
29. (a) $U(x) = -Gm_1m_2/x$. (b) $Gm_1m_2 d/x_1(x_1 + d)$.
31. (a) 69.2 J. (b) 7.99 m/s. (c) Conservativa.
35. (a) 44.6 cm. (b) 3.47 cm. 37. (a) $\sqrt{5gR}$.
(b) $\theta = \sin^{-1}(1/3)$. 41. (c) -1.2×10^{-19} J. (d) 2.2×10^{-19} J.
(e) $\approx 1 \times 10^{-9}$ N, hacia M. 45. (a) $-U_0(r_0r^{-2} + r^{-1})e^{-r/r_0}$.
(b) 0.14, 0.0078, 6.8×10^{-6} . 47. (a) 3.02 kJ. (b) 391 J.
(c) 2.63 kJ. 49. 39 kW. 51. 472 kJ. 53. 4.19 m.
55. 65.1 cm/s. 57. (a) 48.7 m/s. (b) 64.5 kJ.
59. (a) 24.0 ft/s. (b) 3.00 ft. (c) 9.00 ft. (d) 48.8 ft.
61. (a) 10.8 PJ. (b) 263,000 años. 63. Disminuye en 1.10 kg.
65. 266 veces la circunferencia ecuatorial de la Tierra.
67. 191. 69. 2.21 eV. 71. (a) -12.5 kJ. (b) 2.70 kJ.
(c) -9.80 kJ. (d) 1.70 kJ. (e) 100 J.
(f) $x = 2.95$ m, $y = -2.95$ m.
73. (a) 0.541, 0.541, 0.541 J. (b) 0.541, 1.08, 0.383 J.

CAPÍTULO 9

1. (c) $x_1 = x_{cm} - (m_2/M)(L + d_i \cos \omega t)$;
 $x_2 = x_{cm} + (m_1/M)(L + d_i \cos \omega t)$; $v_1 = (m_2/M)d_i \omega \sin \omega t$;
 $v_2 = -(m_1/M)d_i \omega \sin \omega t$.
3. 4640 km (1730 km bajo la superficie de la Tierra).
5. 75.2 km/h. 7. (a) Abajo; $mv/(m + M)$.
(b) Globo de nuevo estacionario. 9. (a) L. (b) Cero.
11. (a) A medio camino entre ellos.
(b) Se mueve 1.12 mm hacia el cuerpo más pesado.
(c) 0.00160g, hacia abajo. 13. $g(1 - 2x/L)$. 15. 55.2 kg.
17. L/5 a partir de la barra pesada, a lo largo del eje de simetría.
19. $x_{cm} = y_{cm} = 20$ cm; $z_{cm} = 16$ cm.
21. 4R/3 π arriba de la base plana, a lo largo del eje de simetría.
23. (a) 6.94×10^4 J.
(b) 3.56×10^4 kg·m/s, 38.7° al Sur del Este. 25. (a) 6.96 J.
(b) $P_1 = 0.854$ kg·m/s, 27.4° arriba de la horizontal;
 $P_2 = 0.854$ kg·m/s, 27.4° abajo de la horizontal; 0.786 kg·m/s,
verticalmente hacia abajo. (c) 1.53 s.
29. 0.0103 ft/s, hacia atrás. 31. $wv_w/(W + w)$. 33. 27.
35. (a) Cubierta del cohete: 7290 m/s; carga útil: 8200 m/s.

- (b) Antes: 12.71 GJ; después: 12.75 GJ.
 37. (a) 1.4×10^{-22} kg · m/s, a 150° de la traza del electrón y 120° de la traza del neutrino. (b) 1.0 eV.
 39. (a) 746 m/s. (b) 963 m/s. 41. Sí.
 43. $\left(\frac{u \cos \alpha}{\sqrt{1-u \cos^2 \alpha}}\right) \sqrt{2gh}$, $u = \frac{m}{m+M}$. 45. 2.66 m/s.
 47. (a) 1790 N. (b) 609 J. 51. (a) 2.72. (b) 7.39.
 53. 1.33 km/s. 55. 60 N. 57. (a) 49.1 kg. (b) 141 kg.
 59. (a) 23.4 kN (5260 lb). (b) 4.31 MW (5780 hp).

CAPÍTULO 10

1. 64 kN. 3. $2\mu u$. 5. (a) 2.40 N · s. (b) 2.40 N · s. (c) 2.00 kN. (d) 62.7 J. 7. 3.29 kN (744 lb).
 9. (a) 2.20 N · s, a la izquierda. (b) 212 N, a la derecha.
 11. (a) 1.95×10^3 kg · m/s, para cada dirección del empuje; (b) Hacia atrás: +66.1 MJ; hacia adelante: -50.9 MJ; lateralmente: +7.61 MJ. 13. 41.7 cm/s.
 17. (a) 1.03 kg · m/s. (b) 250 J. (c) 10.3 N. (d) 824 N.
 19. 124 kW. 21. (a) 1.9 m/s, a la derecha. (b) Sí.
 23. 4.2 m/s. 25. (a) 2.74 m/s. (b) 1.46 km/s.
 27. ≈ 2 mm/año. 29. 1.2 kg.
 31. (a) 74.4 m/s. (b) 81.5 m/s; 84.1 m/s.
 33. (a) A: 4.57 m/s; B: 3.94 m/s. (b) 7.53 m/s.
 35. 12.9 toneladas 37. (a) 4.21 ft/s; 2210 ft · lb. (b) 3.21 ft/s; 5.51 ft/s. 39. 41.0 N. 41. 35.9 cm.
 43. $\sqrt{2E\left(\frac{M+m}{Mm}\right)}$. 47. (a) $4.0\mathbf{i} + 5.0\mathbf{j}$, m/s.
 (b) Se gana 700 J. 51. (a) 26° a partir de la dirección de llegada del protón. (b) 227 m/s; 466 m/s. 53. $v = V/4$.
 55. (a) 3.43 m/s, desviado 17.3° a la derecha. (b) 954 kJ.
 57. (a) 28.0° . (b) 7.44 m/s. 61. 2.44 m/s, a la izquierda.
 63. (a) 117 MeV. (b) $K_\alpha = 102$ MeV; $K_\beta = 15.0$ MeV.
 65. (a) $(-1.04\mathbf{i} + 0.655\mathbf{j}) \times 10^{-19}$ kg · m/s. (b) 7.66 MeV.

CAPÍTULO 11

3. (a) 5.5×10^{15} s. (b) 26. 5. (a) 0.105 rad/s. (b) 1.75×10^{-3} rad/s. (c) 1.45×10^{-4} rad/s. 7. 11 rad/s.
 9. (a) 4.8 m/s. (b) No. 11. (b) 23 h 56 min.
 13. (a) 8140 rev/min². (b) 425 rev. 15. (a) -1.28 rad/s². (b) 248 rad. (c) 39.5 rev. 17. (a) 2.0 rev/s. (b) 3.8 s.
 19. (a) 369 s. (b) -3.90×10^{-3} rad/s². (c) 108 s.
 21. (b) -2.30×10^{-9} rad/s². (c) ≈ 4610 . (d) 24 ms.
 23. (a) 3.49 rad/s. (b) 20.6 in./s. (c) 10.1 in./s. (d) 71.9 in./s²; 35.3 in./s². 25. 5.6 rad/s².
 27. (a) 3.65 rad/s. (b) 38.0 m/s. (c) 6.78 m/s². (d) 139 m/s².
 29. 4.56 s. 31. (a) -1.18 rev/min². (b) 10,300. (c) 1.08 mm/s². (d) 30.2 m/s².
 33. (a) 6.3×10^4 ft/min (1.9×10^4 m/min). (b) 6.8×10^4 ft/min (2.1×10^4 m/min). 35. 16.4 s.
 37. (a) αr^2 . (b) αr . (c) 44.1° . 39. (a) 71 rad/s. (b) -13 rad/s². (c) 72 m.
 41. (a) $x^2 + y^2 = R^2$; un círculo de radio R; ω es la velocidad angular del objeto.
 (b) $v_x = -\omega y$; $v_y = \omega x$; v es tangente al círculo; $v = \omega R$.
 (c) $a = \omega^2 R$; \mathbf{a} apunta radialmente hacia adentro.

CAPÍTULO 12

1. (a) 1305 g · cm². (b) 545 g · cm². (c) 1850 g · cm².
 3. 6.75×10^{12} rad/s. 5. (a) 6490 kg · m². (b) 4.36 MJ.
 7. 0.097 kg · m². 9. (b) $MR^2/4$. 13. (a) $dm/M = 2r dr/R^2$. (b) $dI = 2Mr^3 dr/R^2$. (c) $I = \frac{1}{2}MR^2$.
 15. 3.66 N · m, hacia la página. 17. 12 N · m, saliendo de la página.
 19. 7.63 rad/s², saliendo de la página. 21. (a) 28.2 rad/s².

- (b) 1.94 G-años. 27. 690 rad/s. 29. (a) $2\theta/t^2$. (b) $2R\theta/T^2$.
 (c) $T_1 = M(g - 2R\theta/t^2)$; $T_2 = Mg - (2\theta/t^2)(MR + I/R)$.
 31. 1.73×10^5 g · cm². 33. 6.11 m/s.
 35. (a) -7.67 rad/s². (b) -11.7 N · m. (c) 45.8 kJ. (d) 624 rev. (e) La energía disipada por fricción; 45.8 kJ.
 37. (a) 4.82×10^5 N. (b) 1.12×10^4 N · m.
 39. (a) 1.88×10^{12} J/s. (b) -2.67×10^{-22} rad/s².
 (c) 4.06×10^9 N. 41. (a) 47.9 km/h. (b) 3.65 rad/s².
 (c) 8.68 kW. 45. (a) 56.5 rad/s. (b) -8.88 rad/s².
 (c) 69.2 m. 47. (a) 12.5 cm/s². (b) 4.63 s. (c) 28.8 rev/s.
 (d) 70.8 rev/s. 49. 48 m. 51. (a) $W/6$. (b) $2g/3$.
 55. $\alpha = 2F/MR$; $a = F/M$. 57. (a) 57.9 rad/s. (b) 4.21 m.

CAPÍTULO 13

5. mvd . 11. (a) -4.17 m/s². (b) -16.9 rad/s².
 (c) -2.62 N · m. 15. (a) 1.49 N · m. (b) 20.8 rad. (c) -31.0 J. (d) 20.3 W. 17. El centro de masa se mueve en la dirección de la fuerza impulsiva con una velocidad de 2.90 m/s; la estaca gira con respecto a su centro de masa con una velocidad angular de 10.7 rad/s. 21. (b) $ML^2/(L^2 + 12d^2)$. 25. (a) 1.18 s. (b) 8.60 m. (c) 5.18 rev. (d) 6.07 m/s. 27. 3.0 min. 29. $mv/(m+M)R$.
 31. (a) 171 rev/min. (b) 0.792. 33. (a) 5.12 mrad/s. (b) 1.90 cm/s. 35. (a) $MR^2\omega_0^2/4$; $MR^2\omega_0/2$. (b) $R^2\omega_0^2/2g$.
 (c) ω_0 . 37. $\sqrt{2gr} \sec \theta_0$.
 39. (a) Cada uno se mueve en un círculo de 1.46 m de radio a 0.945 rad/s.
 (b) 9.12 rad/s. (c) $K_a = 97.5$ J; $K_b = 941$ J. 41. -0.127.
 43. 1.90 min.

CAPÍTULO 14

1. (a) Dos. (b) Siete. 5. (a) 2.5 m. (b) 7.3° .
 7. (a) Se desliza; 31° . (b) Se vuelca; 34° . 9. 1200 lb.
 11. (a) 2.78 kN. (b) 3.89 kN.
 13. Pedestal izquierdo: 1.17 kN (tensión); pedestal derecho: 1.89 kN (compresión).
 15. Tres cuartos de la longitud de la viga desde el obrero del extremo.
 17. $F_{\text{musculo}} = 1.91$ kN, arriba, $3W$; $F_{\text{hueso}} = 2.55$ kN, abajo, $4W$.
 19. $W\sqrt{h(2r-h)}/(r-h)$.
 21. (a) $F_1 = w \sin \theta_1 / \sin(\theta_2 - \theta_1)$; $F_2 = w \sin \theta_2 / \sin(\theta_2 - \theta_1)$; normal a los planos.
 23. (a) 416 N. (b) 238 N; 172 N. 25. (a) 47.0 lb. (b) 21.3 lb; 10.9 lb. 27. (a) 1460 lb. (b) 1220 lb; 1420 lb.
 29. (a) $Wx/L \sin \theta$. (b) $Wx/L \tan \theta$. (c) $W(1-x/L)$.
 31. (a) Pivote inferior: $F_h = 180$ lb, $F_v = 210$ lb; pivote superior: $F_h = 180$ lb, $F_v = 60$ lb. (b) $F_h = 180$ lb, $F_v = 60$ lb, en cada viga, directamente opuestas.
 33. (a) 47 lb. (b) $F_A = 120$ lb; $F_E = 72$ lb. 35. (a) 446 N. (b) 0.500. (c) Sí; empuje 45° hacia arriba; 315 N.
 37. (a) $L/2$, $L/4$, $L/6$. (c) $N = n$. 41. 75 GN/m².
 43. 3.65 mm. 45. 201 kN. 47. 802 rev/min.
 49. (a) 18.0 MN. (b) 14.4 MN. (c) 16.

CAPÍTULO 15

1. 289 ms. 3. 708 N/m. 5. (a) 495 N/m. (b) 1.57 cm. (c) 1.55 Hz. 7. (a) 1250 N/cm. (b) 2.63 Hz. 9. 30.4 lb.
 11. (b) 12.47 kg. (c) 72.85 kg. 13. 2.08 h. 15. 2.83 cm.
 17. (c) $2\pi\sqrt{mb^3/a^4}$. 19. (a) 0.183L. (b) Misma dirección.
 23. (a) 1.07 Hz. (b) 4.73 cm. 27. (a) 6.97 MN/m. (b) 48,500. 29. (a) 3.04 ms. (b) 3.84 m/s. (c) 90.7 J.
 33. (a) 31.9 cm. (b) 34.4° . 37. (a) 5.60 J. (b) 2.80 J.
 39. 24.9 cm. 41. 8.35 s. 43. (a) 436 mHz. (b) 1.31 m.

45. 906 ms. 47. 5.57 cm. 49. (a) $2\pi\sqrt{(L^2 + 12d^2)/12gd}$.
 51. $1.22v_0$. 55. $\left(\frac{1}{2\pi}\right)\sqrt{\left(\frac{g}{L}\right)\sqrt{1 + \left(\frac{v^2}{Rg}\right)^2}}$.
 59. (a) Línea recta, $y = \pm x$. (b) Elipse, $y^2 - \sqrt{3}xy + x^2 = A^2/4$. (c) Círculo, $x^2 + y^2 = A^2$.
 65. $k = 490$ N/cm; $b = 1100$ kg/s. 67. 1.9 in.
 69. 362 ms. 71. (a) 8.00 u; 0.98 u; 6.86 u. (b) 490 N/m.
 73. (a) 2.8 cm, 0. (b) 2.8 cm, 3.14 rad. (c) 1.98 cm, -1.57 rad. (d) 1.98 cm, 1.57 rad. (e) 3.43 cm, -0.615 rad. (f) 3.43 cm, 0.615 rad. (g) 3.43 cm, 3.76 rad. (h) 3.43 cm, 2.53 rad.

CAPÍTULO 16

1. 39.2 nN. 3. 2.60×10^5 km. 5. 997 ms. 7. 997 km.
 9. (a) 1.33×10^{12} m/s². (b) 1.79×10^6 m/s. 11. 9.78 m/s².
 17. (b) 1.9 h. 21. 7.90 km/s.
 23. $\frac{GMm}{d^2} \left[1 - \frac{1}{8(1-R/2d)^2}\right]$
 25. (a) 9.83 m/s². (b) 9.84 m/s². (c) 9.79 m/s².
 27. (b) 2.0×10^8 N/m². (c) 180 km. 31. 220 km/s.
 37. 98.4 pJ. 39. (a) 2.02 km/s. (b) 523 km. (c) 1.26 km/s. (d) 4.80×10^{22} kg. 41. (a) 3.34×10^7 m/s. (b) 5.49×10^7 m/s.
 45. 6.5×10^{23} kg. 47. 0.354 meses lunares.
 49. (a) 1.68 km/s. (b) 108 min. 51. $7.20R_s$. 53. 58.3 km/s.
 55. Las propiedades son proporcionales a (a) $r^{3/2}$; (b) r^{-1} ; (c) $r^{1/2}$; (d) $r^{-1/2}$. 59. 3.5 años.
 61. $4\pi r^{3/2}/\sqrt{G(4M+m)}$. 63. (a) 7.54 km/s. (b) 97.3 min. (c) 405 km; 7.68 km/s; 92.3 min. (d) 3.18 mN.
 (e) Del satélite, no; del sistema Tierra + satélite, sí.
 65. (a) No. (b) La misma. (c) Sí.
 67. (a) Fácilmente; pesaría sólo unas 3 lb. (b) Probablemente; tendría que serle posible correr a 6.9 m/s.
 69. Sur, 35.4° sobre el horizonte. 71. (a) 7964 m/s (7750 m/s para A). (b) 7820 m/s (7750 m/s para A). 73. $\sqrt{GM/L}$.

CAPÍTULO 17

1. 429 kPa. 3. 27.4 kN. 5. 6.0 lb/in.² 7. 0.52 m. 9. 1.29 MPa. 11. 130 km. 13. 0.412 cm. 15. (a) 600, 30, 80 toneladas. (b) No; aun cuando las respuestas anteriores cambiasen a 3100, 280, 760 toneladas, la presión atmosférica actúa sobre cada lado de las paredes y se cancela. 17. 809 kN. 19. 43.5 km. 21. 230 MPa. 23. $\frac{1}{4}\rho gA(h_2 - h_1)^2$. 25. (b) a. 27. (b) $p = \rho gh$. 31. (a) 35.6 kN. (b) Sí; disminuye en 0.0851 m³. 33. 1070 g. 35. 2.0×10^{-4} . 37. (a) 38.4 kN. (b) 40.5 kN. (c) 2.35 kN. (d) 2.08 kN. 39. 4.74 MN. 41. 56.1 cm. 43. 4. 45. 0.190. 47. (a) 1.82 m³. (b) 4.61 m³. 49. 740 kg/m³. 51. 500 μ J. 53. 61.6 μ J. 57. (a) 3.25 Pa. (b) 1.79 Pa. (c) 68.7 J. (d) 765 μ J.

CAPÍTULO 18

1. 1 h 49 min. 3. 3.9 m. 5. 1.1 m/s. 7. 1.7×10^5 N · m.
 9. (a) 2.66 m/s. (b) 271 Pa. 11. (a) 2. (b) 1/2. (c) $h/4$, abajo. 13. 10.8 kN. 15. (b) A la altura h . 17. 41.0 m/s. 19. 1.38 cm. 21. (a) $\sqrt{2g(h_2 + d)}$. (b) $p_{\text{atm}} - \rho g(h_2 + d + h_1)$. (c) 10.3 m. 23. 5 min 42 s. 25. $\frac{1}{2}\rho v^2 A$. 29. 410 m/s. 37. 320 kPa. 39. (b) 35.5 mPa. 43. 3630 s.

CAPÍTULO 19

1. (a) 7.43 kHz. (b) 135 μ s. 3. (a) 712 ms. (b) 1.40 Hz. (c) 1.93 m/s.

5. $y = 0.0112 \sin(10.6x + 3440t)$, en donde x y y están en metros y t está en segundos.
 9. (a) 6.0 cm. (b) 100 cm. (c) 2.0 Hz. (d) 200 cm/s. (e) Dirección x negativa. (f) 75 cm/s. 11. 135 N. 13. 91.9 g/m. 15. (a) 5.0 cm. (b) 40 cm. (c) 12 m/s. (d) 33 ms. (e) 9.4 m/s. (f) $y = 5.0 \sin(0.16x + 190t + 0.93)$, con x y y en cm y t en segundos. 17. $2\pi v_m/\lambda$. 19. 7.54 m desde el extremo del alambre donde generó el primer pulso. 21. (a) $\sqrt{k \Delta L(L + \Delta L)/m}$. 25. 198 Hz. 27. (b) Longitud². 29. (b) 474 nJ/m³. 31. 68.8° , 1.20 rad. 37. $\lambda = 2\sqrt{4(H+h)^2 + d^2} - 2\sqrt{4H^2 + d^2}$. 39. (a) 81.4 m/s. (b) 16.7 m. (c) 4.87 Hz. 41. (a) -3.9 cm. (b) $y = 0.15 \sin(0.79x + 13t)$. (c) -14 cm. 43. (a) 1.25 m. (b) $y = (3.80 \times 10^{-3}) \sin 10.1x \cos 3910t$, en donde x y y están en metros y t está en segundos. 49. 7.47, 14.9, 22.4 Hz. 51. 480, 160, 96 cm. 53. 36.8 N. 55. 190 Hz.

CAPÍTULO 20

1. (a) 76.2 μ m. (b) 333 μ m. 3. (a) 57 nm. (b) -35. 5. 170 m. 7. (a) $L(V-v)/Vv$. (b) 43.5 m. 9. 40.7 m. 11. (a) 1.48 Pa. (b) 167 Hz. (c) 1.87 m. (d) 312 m/s. 13. 4.47 W. 15. 27.1 mJ. 19. (a) 44.2 μ W/m². (b) 164 nm (c) 894 mPa. 21. 51.9 nJ/m³. 23. (a) 5.20 kHz. (b) $B/A = \frac{1}{2}$. 25. 190 dB. 27. 63 dB. 29. (a) 66.8 μ W/m². (b) 5.02 nW. (c) 7.53 μ J. 31. (a) $v = 307n$ Hz, $n = 1, 3, \dots, 65$. (b) $v = 615n$ Hz, $n = 1, 2, \dots, 32$. 33. A $\pm 0.286, 0.857, 1.43, 2.00$ m del punto medio. 35. 346 m. 37. 19.8 kHz. 39. (a) 1130, 1500, 1880 Hz. 41. 57.2 m. 45. Cuatro. 47. Tubo abierto: 58.9 cm; tubo cerrado: 44.2 cm. 49. 45.4 N. 51. 2.25 ms. 53. (a) Diez. (b) Cuatro. 55. 17.4 kHz. 57. (a) 522 Hz. (b) 554 Hz. 59. 31° . 61. 2.65×10^8 m/s. 63. 7.16 km. 67. 160 Hz. 69. (a) 464 Hz. (b) 490 Hz. 71. 8.8° C. 73. 41.2 kHz. 75. (a) 2.0 kHz. (b) 2.0 kHz.

CAPÍTULO 21

1. (a) 7.1×10^{-10} s. (b) 2.5×10^{-18} m. 3. 1.30 m. 5. 0.445 ps. 7. 0.805c. 9. (a) 87.4 m. (b) 394 ns. 11. (a) 15.8 km/s. (b) 6.95×10^{-10} . 13. 0.75. 15. (a) $x' = 3.78 \times 10^7$ m; $t' = 2.26$ s. (b) 6.54×10^8 m; 3.14 s. 17. (a) 25.8 μ s. (b) El destello rojo, corrido por Doppler. 19. (a) $-u$; $c\sqrt{1-u^2/c^2}$. 21. (a) 0.347c. (b) 0.619c. 23. Siete. 25. (a) 0.933c, 31.0° al Este del Sur. (b) 0.933c, 59.0° al Oeste del Norte. 27. 6.29 cm. 29. 1.23 μ s. 31. (a) 0.491c, en la dirección x negativa. (b) 4.32 μ s; rojo. 33. (a) 26.3 años. (b) 52.3 años. (c) 4.06 años. 35. (a) 4.00 μ s. (b) 26.3 y. (b) 52.3 y. (c) 4.06 y. 35. (a) 4.00 μ s. (b) 2.50 μ s. 39. (a) 0.999 165. (b) 0.0133. 41. (a) 0.9988; 20.6. (b) 0.145; 1.01. (c) 0.073; 1.0027. 43. 21.2 um/saño. 45. $\sqrt{8}mc$. 49. (b) $K = p^2/2m$. (c) 207 m_e . 51. (a) 996 eV. (b) 1.05 MeV. 53. (a) $\sqrt{\frac{y-1}{y+1}}c$. (b) $\sqrt{2(y+1)}m$. 55. (b) 202 GeV. (c) 49.1 GeV. 57. (b) 0.796c.

CAPÍTULO 22

1. 291.1 K. 3. 31.2. 5. No; 310 K = 98.6° F. 7. (a) -40° . (b) 575° . (c) Ninguna. 11. 1.3660.

13. 0.073 cm Hg; nitrógeno. 15. 0.038 in. 17. 6.2 mm.
 19. (a) 13.8 cm². (b) 115 cm³. 25. $2.3 \times 10^{-5}/C^\circ$.
 27. (b) Acero: 71 cm; latón: 41 cm. 29. 360°C. 35. 909 g.
 37. (b) Usar 39.3 cm de acero y 13.1 cm de latón.
 39. (a) Cero. (b) -0.36%. (c) -0.36%. 41. +0.68 s/h.
 43. 0.17 mm. 45. 66.4°C. 47. 0.27 mm. 49. (a) 2.25 ft.
 (b) 3.99 ft.

CAPÍTULO 23

1. (a) 0.0225 m³. 3. (a) 113. (b) 0.900 m³. 5. 5.59 m³.
 9. 26.9 lb/in.² 11. 104 cm³. 13. 200 kPa.
 15. 4.34×10^{-5} . 17. 180 m/s. 19. 0.76. 21. (a) 531 m/s.
 (b) 28 g/mol; N₂. 23. 1/5. 25. (a) 3.53 meV; 4.83 meV.
 (b) 3400 J; 4650 J. 27. 2.2×10^{-5} . 29. (a) 3.31×10^{-20} J.
 (b) 0.207 eV. 31. (a) $(N_a + N_b)(kT/V)$. (b) $\frac{1}{2}$.
 33. (a) 1.0×10^4 K; 1.6×10^5 K. (b) 440 K; 7000 K.
 35. 89.0°C. 37. 45 kJ a lo largo de la trayectoria 1; -45 kJ a lo
 largo de la trayectoria 2.
 39. (a) 1.40. (b) 29.0 g/mol. 41. 1.14 kJ. 43. (a) 8.39 atm.
 (b) 544 K. (c) 966 J. 45. 265 K. 47. (a) 2.95 cm.
 (b) 2.11 cm. 49. 2.48 kJ. 51. (a) 1.20. (b) 105°C.
 (c) 628 mol. (d) 1.96 MJ; 2.96 MJ. (e) 0.813.
 53. (a) 423 kPa. (b) 431 kPa.

CAPÍTULO 24

5. (a) 2.69×10^{25} . (b) 0.171 nm. 7. (a) 1.67.
 (b) 49.5×10^{-6} cm. (c) 7.87×10^{-6} cm. 9. 3.86 GHz.
 11. -12°C. 13. (a) 420 m/s; 458 m/s; sí. 15. 13.9 rev/s.
 17. 4.71. 21. (a) $3N/v_0^3$. (b) $0.750v_0$. (c) $0.775v_0$.
 25. (a) $\sqrt{\frac{15}{4}}kT$. 27. 1.5 m/s. 29. 1.5 cm/s.
 31. (a) 35 cm/s. (b) 4.4×10^6 rev/s. 33. (a) 8. (b) 4.

CAPÍTULO 25

1. 44.5 m³. 3. 107 g. 5. (a) 0.12 C°. 7. (a) 75.4 kJ.
 (b) 4.46 kJ. (c) 757°C. 9. 42.7 kJ. 11. 2.4 días.
 13. (a) 117 s. (b) 718 s. 15. (a) 6.75×10^{-20} J. (b) 10.7.
 17. (a) 5.26°C; no queda hielo. (b) 0°C; quedan 62.0 g de hielo.
 19. 4.81 g. 21. 17 mJ. 23. 1.2 kJ. 25. 11.3 kJ.
 27. (a) 7880 J. (b) 5630 J. (c) 3380 J. 29. Diatómico.
 31. $nRT \ln(V_f/V_i)$. 33. (a) +214 J. (b) -293 J.
 (c) -79.0 J. 35. (a) 1090°C. (b) 460°C. 37. (a) $-1.5nRT_1$.
 (b) $4.5nRT_1$. (c) $6nRT_1$. (d) 2R. 39. (a) -6.0 J. (b) -43 J.
 (c) 40 J. (d) 18 J; 18 J. 41. (a) 15.9 J. (b) 34.4 J/mol·K.
 (c) 26.1 J/mol·K.
 43. (a) Q, ΔE_{int} , W: AB: 3740, 3740, 0 J;
 BC: 0, -1810, -1810 J; CA: -3220, -1930, +1290 J;
 ciclo: 520, 0, -520 J. (b) $V_B = 0.0246$ m³; $p_B = 2.00$ atm;
 $V_C = 0.0373$ m³; $p_C = 1.00$ atm. 45. 12.0 kW. 47. 720°C.
 49. (a) 546 C°/m. (b) 394 kW. (c) 63.9°C.
 51. Arreglo b. 53. 1.84 W/m·K. 55. (a) 24 kW.
 (b) 25 W. 57. (a) 1.8 W. (b) 0.025 C°. 59. 1.15 m.

CAPÍTULO 26

1. (a) 30.9%. (b) 16.2 kJ. 3. 25.4%. 5. (a) 7200 J. (b) 960 J.
 (c) 13%. 7. $e_A = 33.3\%$; $e_B = 55.6\%$. 9. (a) 217 kJ.
 (b) 32.5 kJ. 11. (a) 2090 J. (b) 1510 J. (c) 1510 J.
 15. 21 J. 17. (a) 113 J. (b) 305 J. 19. (c) 6.8.
 23. $[1 - T_2/T_1]/[1 - T_4/T_3]$. 25. (a) 1.62 atm. (b) 43.7%.
 27. (a) 2.27 kJ. (b) 14.8 kJ. (c) 15.3%. (d) 75.0%.
 29. 18.7 kJ. 31. (b) 200 J. (c) -75 J. 33. 0.044 J/K.
 37. 3.0 mol. 39. (a) +1.06 J/K. (b) No.
 41. (a) Trayectoria I: $Q_T = p_0V_0 \ln 2$; $Q_V = (9/2)p_0V_0$.
 Trayectoria II: $Q_T = -p_0V_0 \ln 2$; $Q_V = (15/2)p_0V_0$.
 (b) Trayectoria I: $W_T = -p_0V_0 \ln 2$; $W_V = 0$.
 Trayectoria II: $W_T = p_0V_0 \ln 2$; $W_V = 3p_0V_0$.
 (c) $(9/2)p_0V_0$ para cada proceso. (d) $4R \ln 2$ para cada proceso.
 43. (a) -926 J/K. (b) 926 J/K. 45. +0.95 J/K.

CRÉDITOS DE LAS FOTOGRAFÍAS

CAPÍTULO 1

Figura 1: Cortesía de National Bureau of Standards and Technology. Figura 4: Cortesía de National Physical Laboratories, Teddington, England. Figura 5: Cortesía de National Bureau of Standards and Technology. Figura 6: Cortesía del Profesor R. C. Barber, The University of Manitoba. Figura 7: Stephen Pitkin.

CAPÍTULO 2

Figura 21: Cortesía de National Bureau of Standards and Technology. Figura 22: Cortesía de Baltimore Office of Promotion and Tourism. Figura 30: NASA. Figura 31: Cortesía de Marriott Marquis, N.Y.C., Figura 33: National Basketball Association.

CAPÍTULO 3

Figura 21: NASA.

CAPÍTULO 4

Figuras 6 y 7: Education Development Center, Inc. Figura 15: De *The Particle Explosion*, Oxford Press, 1987. Figura 32: Cortesía de Boeing.

CAPÍTULO 5

Figuras 11 y 23: NASA. Figura 25: Cortesía de Hale Observatories. Figura 29: Cortesía de Smithsonian Astrophysical Observatory. Figura 32: Cortesía de A. A. Bartlett y Boeing. Figura 36: NASA. Figura 46: Cortesía de USAADTA. Foto de PUT Eugenio P. Redmond.

CAPÍTULO 6

Figura 2: De *Friction and Lubrication of Solids*, de F. P. Bowden y S. Tabor, Clarendon Press, 1950. Figura 18: NOAA. Figura 19: NASA. Figura 23: Ira Kirschenbaum/Stock, Boston. Figura 41: EPU/Heine Pederson/Woodfin Camp.

CAPÍTULO 7

Figura 2: Ed Goldfarb/Black Star. Figura 21: UPI/Archivo Bettmann. Figura 22: Cortesía de Cunard.

CAPÍTULO 8

Figura 8: Cortesía de Six Flags. Figura 15: De *Introduction to the Detection of Nuclear Particles in a Bubble Chamber*, Ealing Press, 1969. Cortesía de Lawrence Berkeley Radiation Laboratories, University of California at Berkeley. Figura 17: Cortesía del Departamento de Astronomía, University of Texas at Austin. Figura 45: NASA. Figura 50: Cortesía de American Red Cross.

CAPÍTULO 9

Figura 31: United Feature Syndicate.

CAPÍTULO 10

Figura 1: Cortesía de Harold E. Edgerton, M. I. T., Cambridge, Mass. Figura 2: PSSC, *Physics*, Haber-Scham, Cross, Dodge, y Walter, D. C. Health and Co., Boston. Education Development Center, Newton, Mass., 1976. Figura 4: Cortesía de CERN. Figura 5: Bob Kalman/The Image Works. Figura 13: Cortesía de Laurence Radiation Laboratory, Figura 18: Cortesía del Stanford Linear Accelerator Center. Figura 19: Cortesía de Fermi National Accelerator Laboratory. Figura 21: Sylvia Johnson/Woodfin Camp and Associates. Figura 28: Marca registrada de DC Comics, Inc., copyright © 1963. Figura 31: Georg Gerster/Compstock

CAPÍTULO 11

Figura 1: K. Bendo. Figura 10: Reproducido con autorización de *The Courier-Journal* y *The Louisville Times*. Figura 13: NASA.

CAPÍTULO 12

Figura 19: Education Development Center, Inc. Figura 22: Cortesía de Alice Halliday. Figura 44: Cortesía de Lawrence Livermore Laboratory.

CAPÍTULO 13

Figura 15: NASA. Figura 20: Cortesía de GE Medical Systems.

CAPÍTULO 14

Figura 15: Cortesía de Micro Measurements Division, Measurements Group, Inc., Raleigh, N. C. Figura 20: The Bettmann Archive.

CAPÍTULO 15

Figura 17: Cortesía de Tektronix. Figura 24: NASA.

CAPÍTULO 16

Figura 17 y 23a: Cortesía del observatorio de Lick. Figura 23b: observatorios Mt. Wilson y Palomar. Figura 26: Cortesía de Kitt Peak National Observatory. Figura 27: Cortesía de P. J. E. Peebles, basado en el catálogo del observatorio de Lick por C. Shane y C. Wirtanen.

CAPÍTULO 17

Figura 14: Mark Antman/The Image Works. Figura 16: NASA. Figura 26: Cortesía de Goodyear Tire y Rubber Company.

CAPÍTULO 18

Figura 21: Richard Megna/Fundamental Photos. Figura 22: Imperial College, London. Figura 24: Profesor Harry Swinney, University of Texas en Austin.

CAPÍTULO 19

Figura 2: G. Whiteby/Photo Researchers. Figura 16: Clifford Swartz, Figura 23: De PSSC, *Physics*, D. C. Heath, Lexington, Mass., 1960, con autorización.

CAPÍTULO 20

Figura 10: Cortesía del Dr. T. D. Rossing, Northern Illinois University. Figura 14: Cortesía de U. S. Army Ballistic Research Laboratory. Figura 15: Cortesía de John S. Foster, Stanford University. Foto de C. F. Quate. Figura 17: Cortesía de Pilgrim Nuclear Power Plant/Boston Edison.

CAPÍTULO 22

Figura 6: AP/Wide World Photos. Figura 20: Palmer/Monkme-
yer Press.

CAPÍTULO 23

Figura 19: NASA.

CAPÍTULO 24

Figura 15: Cortesía de IBM. Figuras 18 y 19: Mendelssohn, *The Quest for Absolute Zero*.

CAPÍTULO 25

Figura 28: Cortesía de Soehngen.

CAPÍTULO 26

Figura 9: Cortesía de The Bryant Day and Night y Payne Brands de Carrier Corporation.

ÍNDICE

A

Acción a una distancia, 396
Aceleración angular:
 como vector, 267
 componentes radial y tangencial, 268
 constante, rotación con, 264-265
 movimiento rotacional, 263
Aceleración, 18-19, 22, 23-25
 caída libre, 28-32
 centrípeta, 68-69, 70
 centro de masa, 206
 componentes radial y tangencial, 268
 constante, 25-28
 en dos y tres dimensiones, 61-63
 definición, 23
 instantánea, 23-70
 masa y, 90-92
 movimiento en dos y tres dimensiones, 59-60
 radial, 68
 relación entre las variables lineal y angular, 269-270
 tangencial, 69-71
 vectores, movimiento circular, 69-71
 véase también Aceleración angular
Aceleradores de partículas, 247-248
Adhesión superficial, 120
Afelio, 398
Agentes surfactantes, 431-432
Agua:
 expansión volumétrica, 557
 punto triple, 551
Aislamiento del sistema, 334-335
Alcance horizontal, de un proyectil, 64
Amortiguamiento crítico, 369
Amplificador de transistores, ganancia, 560
Amplitud, 354
 modulación, 507
Análisis dimensional, 10-11
Aproximación de un ángulo pequeño, 67
Ángulo azimutal, 44
Ángulos, factores de conversión, A-10
Año-luz, 7, 14
Anomalías, 412
Antinodos, 482
Antiprotón p, 539-540

Apogeo, 398

Área:

 factores de conversión, A-10
 ley del, 398
Arrastre, fuerzas de, 130-133
Arquímedes, Principio de, 428-429
Átomos, movimiento browniano, 599-600
Atwood, máquina de, 104-105
Avogadro, constante de, 8, 566
 movimiento browniano y, 599-600
Avogadro, ley de, 566

B

Balanza de brazos iguales, 100
Bariones, A-9
Barómetro, 430-431
Barras vibratorias, 506
Barrera sónica, 511
Báscula de resortes, 99
Bernoulli, aplicaciones de la ecuación, 447
 ecuación de, 445-447
Binomio, teorema del, A-15
Bohr, modelo del átomo de hidrógeno, 143
Boltzmann, Ludwig, 599
 constante de, 567-571
Bose-Einstein, distribución, 601-602
Bosones, 601
Boyle, ley de, 566-567
Brahe, Tycho, 384
Brazo, del momento 285
Brown, Robert, 599
Browniano, movimiento, 599-600

C

Caballo de fuerza, 160
Caída libre:
 aceleración en la, 28-32
 cuerpos en, 28-32, 130
 Galileo, 29-30
 medición, 30-32
Calisto, movimiento circular uniforme, 365
Calor, 607-626
 bomba de, 644
 conceptos erróneos, 608
 convección, 624

de fusión, 610
 de transformación, 610
 de vaporización, 610
 definición, 607
 equivalente mecánico, 608-609
 específico, 609-610
 razón del, 614
 factores de conversión, A-13
 latente, 610
 radiación, 624-625
 transferencia, 622-626
 irreversible, 649-650
 véase también Primera ley de la termodinámica;
 Segunda ley de la termodinámica; Termodinámica

Caloría, 607-608
 Capacidad calorífica, 609-611
 definición, 609
 Dulong-Petit, valor, 612
 gas ideal, 612-616
 molar, 611-612
 sólidos, 611-612

Calorímetro de flujo, 629
 Campo eléctrico, 397
 Campo, concepto de, 396-397
 Campo, partículas de, A-8
 Campos de flujo, 450-453
 Cantidades extensivas, 583
 Caos, teoría del, 136, 455-456
 Carga, fuerza de, 101, 119-120
 Carnot, ciclo de, 641-644, 646-647
 eficiencia de la máquina de, 642-643
 teorema de, en la segunda ley de la termodinámica,
 642-643

Casi-estático, proceso, 636
 Cavendish, Henry, 387
 Cedencia, límite de, 342
 Celsius, Anders, 550
 escala de, 550-551
 Centígrada, escala, 550-551
 Centrífuga, fuerza, 134
 Centrípeta, aceleración, 68-70
 en el movimiento circular, 68-70
 Centrípeta, fuerzas, 10, 123
 Centro de masa, 211-214
 aceleración, 207
 centro de gravedad, 333
 ecuación, 218
 marco de referencia, 244-248
 objetos sólidos, 209-212
 sistema Tierra-Luna, 207
 trabajo, 218
 velocidad, 245-246

Centro de flotación, 429
 Centro de oscilación, 364
 Cero absoluto, 645-646
 Cesio, reloj de, 4-5
 Charles, ley de, 567
 Cicloide, 290
 Cifras significativas, 8-9
 Cinemática, partículas, 17

Clarke, órbita geosíncrona de, 399-400
 Clausius, forma de, segunda ley de la termodinámica,
 640-641, 650-651

Coeficiente:
 de dilatación lineal, 556
 de expansión volumétrica, 557
 de fricción, variables, 120
 de fricción cinética, 119
 estática, 119
 de rendimiento, 639
 refrigerador de Carnot, 642
 de viscosidad, 453

Cohete:
 ecuación, 222-224
 lanzamiento, 449-450

Colapso, estrellas en, conservación del ímpetu angular, 316-
 317

Colisiones, 233-250
 bidimensionales, 241-244
 centro de masa, marco de referencia, 244-248
 conservación del ímpetu, 236-237
 lineal, 237
 definición, 233-234
 elásticas, 238-240
 bidimensionales, 241-243
 centro de masa, marco de referencia, 249
 blanco masivo, 240
 conservación del ímpetu, 239
 masas iguales, 239
 proyectil masivo, 240
 unidimensional, 237-241
 centro de masa, marco de referencia, 244-245
 gas ideal, 568-569
 impulso e ímpetu, 234-236
 inelásticas, 240-241
 bidimensional, 241-244
 completamente inelásticas, 238, 240
 partículas que se adhieren entre sí, 240
 unidimensional, 240-241
 centro de masa, marco de referencia, 245-246
 molecular, recorrido libre medio, 591-593
 parámetro del impacto, 242
 procesos de desintegración espontáneos, 248-250
 unidimensionales, 237-241

Compresión, 342-343
 Computadora, programas para la, A-16-A-19
 Conducción de calor, 622-624, 652
 Conductividad térmica, 496, 622-624

Conservación:
 de la energía mecánica, 174, 176-177
 de la masa, 188, 443
 de la paridad, 53
 del ímpetu angular, 313-319
 del ímpetu lineal, 214-217
 del ímpetu, 236-237
 leyes de, 157

Constante de torsión, 361
 Constantes del movimiento, 401
 Constantes fundamentales, A-3
 Contacto, fuerzas de, 101

Convección, calor, 624
 Convención de signos, 184
 Conversión, factores de, A-10-A-13
 Coordenadas espacio-tiempo, 529
 Coordenadas, sistemas de, 45-46
 Copérnico, Nicolas, 384
 Coriolis, fuerza, 134-135
 Corriente, líneas de flujo, 442-445, 449
 Coulomb, Charles Augustin, leyes de fricción, 119
 Cuadrática, fórmula, A-14
 Cuanto, 190
 distribuciones estadísticas del, 600-603
 teoría del, capacidad calorífica molar del gas ideal,
 615-616

Cuarzo, reloj de, 4
 Cuerda, instrumentos de, 503-505
 Cuerpo libre, diagrama del, 92-93
 Cuerpo rígido:
 centro de gravedad, 332-334
 dinámica rotatoria, 286-290
 elasticidad, 341-344
 energía cinética rotatoria, 278-279
 movimiento de traslación, 262
 rotación pura, 261-262
 véase también Equilibrio, cuerpos rígidos

Cuerpos asimétricos, ímpetu angular, 313
 Cuerpos simétricos, ímpetu angular, 313
 Curva peraltada, 125-126

D

da Vinci, Leonardo, leyes de fricción, 119
 Darcy, ley de, 15
 Datos astronómicos, A-4
 Debye, temperatura, 611
 Desaceleración, 24
 Decibeles, 500
 Deformación, 342
 medidor de la, 343

Densidad:
 estática de los fluidos, 421-422
 factores de conversión, A-11
 gas, 425
 relativa, 425-426

Densidad de masa lineal, 472
 Depósito térmico, 565
 Derivadas, A-15
 Desarrollo exponencial, A-15
 Desintegraciones beta, 53
 Desintegración espontánea, procesos de, 248-250
 Desintegración radiactiva, procesos de, 248-250
 Desplazamiento, 41
 movimiento en dos y tres dimensiones, 59-61

Detergentes, 432
 Diagrama pV, 572-573
 Dilatación del tiempo, 520, 523, 531
 Dilatación térmica, 554-558
 bases microscópicas, 558

Dinámica caótica, 136-137

Dinámica rotatoria, 277-296
 movimientos de traslación y rotación combinados,
 290-296
 comparación de ecuaciones dinámicas y lineales, 286-287
 energía, gas ideal, 615
 energía cinética, 278-281
 teorema de ejes paralelos, 280
 cuerpo rígido, 286-290
 rodamiento sin deslizamiento, 292-293
 inercia rotacional, 278-281
 resumen de ecuaciones, 322
 torca sobre una partícula, 283-286
 teorema de trabajo y energía, 228

Disociación, energía de, 180-181
 Dispersión, ondas de, 470-471
 Distribución estadística, 587-589
 cuántica, 600-603

Doppler, efecto, 508-511
 a alta velocidad, 510-511
 efecto transversal, 533
 fuente en movimiento, observador en reposo, 509-510
 fuente en reposo, observador en movimiento, 508-509
 transformación de Lorentz, 531
 consecuencias, 531-535
 inversa, 528
 relatividad de longitud, 533-534
 relatividad de tiempo, 531-533
 velocidad, 529-530

E

Ecuación de estado, 547
 gas, 567
 van der Waals, 579-581

Ecuación de continuidad, 444-445
 aplicaciones, 447

Ecuación del movimiento, 126-128
 oscilador armónico simple, 356-357

Ecuación de onda, 474-475
 Efecto de honda, 234
 Einstein, Albert:
 paradoja de, 521
 teoría del movimiento browniano, 599
 teoría especial de la relatividad, 135
 transformación de velocidades, 74

Elasticidad:
 cortante, 343
 compresión, 342-343
 cuerpos rígidos, 341-344
 propiedades de los materiales, 343
 tensión, 342-343

Electromagnética, fuerza, 117
 Electrón-positrón, aniquilación, 187
 Electronvolt, 151
 Elementos: propiedades de los, A-5-A-6
 tabla periódica, A-7

Energía:
 cuantización, 189-190
 de amarre o sujeción, 200, 396
 distribución, 597-598
 en el movimiento de planetas y satélites, 400-402

en reposo, 188
factores de conversión, A-12
interna, 184
 base microscópica, 186-187
 gas ideal, 576, 598, 616-617
masa y, 187-189
mecánica, conservación de la, 174, 176-177
 sistema de partículas, 185-186
movimiento armónico simple, 359-361
relativista, 537-540
sistema de partículas, 217-220
transferencia en la máquina de calor, 637-638

Energía, conservación de la, 171-190
 escala microscópica, 189-190
 fuerza de fricción, 172
 fuerza de resorte, 171-172, 185
 gravidad, 172
 ley de, 185
 ley generalizada, 185
 límite cuántico, 189
 sistemas conservativos bi y tridimensionales, 182-183
 sistema de partículas, 183-187
 solución analítica, 181
 solución numérica, 181-182

Energía cinética, 157-159
 colisiones, 238-239
 definición, 157
 molécula diatómica, 576-577
 fórmula general, 162
 alta velocidad, 162-163
 neutrones, 158-159
 expresión relativista, 537-538
 rodada sin deslizamiento, 292-293
 rotatoria, 278-281
 en el movimiento armónico simple, 359-361

Energía potencial, 174-176
 átomos adyacentes, distancia de separación internuclear, 558
 cambio en, 175
 función de la:
 fuerzas conservativas, 339-340
 oscilaciones, 353-355
 gravitación, 393-396
 gravidad, 177-179
 sistema de muchas partículas, 395-396
 gravitatoria, 393
 sistemas conservativos
 unidimensionales, 176-177
 movimiento armónico simple, 359-360
 fuerza en resortes, 177
 Yukawa, 198

Entropía, 635-653
 conducción de calor, 652
 definición, 646
 expansión libre, 651-652
 proceso irreversible, 648-649
 probabilidad, 651-653
 segunda ley de la termodinámica, 650-651

Epíclis, 383-384

Equilibrio:
 cuerpos rígidos, 331-344
 condiciones de, 331-332
 centro de gravedad, 332-334
 ejemplos, 334-339
 en campo gravitacional 339-341
 estable, 180
 inestable, 180
 mecánico, 331
 neutro, 180

Equipartición de la energía, 577

Equivalencia, principio de, 405-406

erg, 151

Escalares, 42

Escape, velocidades de, 395

Esfuerzo cortante, 343

Esfuerzo, 342
 definición, 342

Esfuerzo-deformación, curva, 342

Espín, número cuántico del, 320

Estabilidad direccional, 316

Estabilidad de orientación, 316

Estabilidad, objetos en giro, 316

Estrella pulsante, 273

Estrellas, desviación de la luz cerca del Sol, 407

Estrellas:
 en colapso, conservación del momento angular, 316-317
 velocidades tangenciales, 403

Euler, Leonhard, 441

Excentricidad, 398

Expansión libre, 648-649
 entropía, 651-652
 primera ley de la termodinámica, 616-619

Expansión logarítmica, A-15

F

Factor de separación, 572

Factorial, 589

Fahrenheit, Daniel, 550

Fahrenheit, escala, 550-551

Fase, constante, 357, 470
 combinaciones de movimientos armónicos, 367

Fase:
 diferencia, movimiento ondulatorio, 479
 onda viajera, 470
 velocidad, 468

Fermi National Accelerator Laboratory, 248

Fermi-Dirac, distribución de, 601-602

Fermiones, 601

Física clásica, problemas con la, 519-521

Fluidos, dinámica de los: 441-456
 arranque del cohete, 449-450
 campos de flujo, 450-453
 capa frontera, 448
 ecuación de Bernoulli, 445-447
 ecuación de continuidad, 444-445, 447
 elevación dinámica, 448-449
 flujo caótico, 455-456
 gradiente de velocidad, 453

 ley de, 454
 líneas de corriente, 442-444, 448-449
 medidor Venturi, 448
 presión dinámica, 446
 presión estática, 446
 teorema de trabajo y energía, 445-446 tubo pitot, 448
 turbulencia, 454-455
 viscosidad, 453-454

Fluidos, estática de los: 419-433
 Principio de Arquímedes, 428-429
 densidad, 421-422
 palanca hidráulica, 427-428
 principio de Pascal, 426
 presión, 420-421
 medida, 429-431
 variación, fluido en reposo, 422-426
 tensión superficial, 431-433
 densidad de peso, 422

Fluido no rotatorio, 442

Flujo bipolar lineal, 452

Flujo caótico, 455-456

Flujo de los fluidos, conceptos, 441-442

Flujo en película, 542

Flujo estacionario, 453

Flujo rotatorio uniforme, 451-452

Fotósfera, 624

Fourier, análisis de, 471

Frecuencia angular:
 movimiento armónico simple, 357
 ondas, 469
 resonante, 371

Frecuencia relativa, 587

Frecuencia, 354

Frente de onda, 467

Fricción cinética, 119

Fricción de deslizamiento, 120

Fricción estática, 119-120

Fricción:
 base microscópica, 120-121
 fuerzas de, 118-123
 cinética, 119
 conservación de la energía, 172
 estática, 119-120
 resistencia, 120

Fuerza, 90
 básica, 117
 bidimensional, trabajo efectuado por, 155-157
 centrífuga, 134
 centrípeta, 123-124
 conservativa contra no conservativa, 172-173
 constante:
 ecuaciones del movimiento, 126-127
 trabajo, 149-153
 constante de, 153
 Coriolis, 134-135
 de contacto, 101
 definición, 88, 89
 de fricción:
 cinética, 119
 conservación de la energía, 172

 estática, 119-120
 de arrastre, 130-133
 de resorte:
 conservación de la energía, 171-173, 183-186
 energía potencial, 177
 de restitución, 154
 dependiente del tiempo, 127, 128-129
 electrodébil, 117
 fuerte, 117
 impulsiva, 233
 intermolecular, gas ideal, 578-579
 interna, 185
 medición:
 método dinámico, 90
 método estático, 98-99
 momento de la, 285
 no constante, ecuaciones de movimiento, 126-128
 normal, 101
 nuclear débil, 117
 leyes de la, 88, 117-118
 unidades de, 96-97
 unidimensional, trabajo efectuado por, 155-157

Fuerza impulsiva, colisiones en la, 234-235

Fuerzas inerciales, 133-135
 véase también Fuerza Centrífuga; Fuerza Coriolis

Función de estado, 617

Fusión, calor de, 610

G

Galaxia:
 enjambres, 403-404
 materia oscura, 404

Galileo, aceleración en caída libre, 29-30

Ganancia, amplificador de transistores, 560

Gas:
 diatómico, 576
 densidad, 424
 ecuación de estado, 567
 equipartición de la energía, 577
 función de estado, 617
 grados de libertad, 577
 ley de Avogadro, 566
 ley de Boyle, 566-567
 ley de Charles, 567
 Maxwell-Boltzmann, distribución de la energía, 597-598
 propiedades macroscópicas, 565-567
 razón de los calores específicos, 574
 recorrido libre medio, 591-593
 volumen, dependencia de
 número de moléculas, 566-567
 presión, 565-567
 temperatura, 565-567
 véase también Primera ley de la termodinámica; Gas ideal; Segunda ley de la termodinámica

Gas ideal:
 capacidad calorífica molar:
 a presión constante, 613-615
 a volumen constante, 613
 efecto de la teoría cuántica, 615-616
 cálculo de la presión, 569-571

- colisiones, 568-569
ecuación de estado, 567
 van der Waals, 579-581
energía cinética de traslación, 571
energía interna, 576, 598, 616-617
energía potencial mutua de dos moléculas, 578-579
energía rotacional, 615
energía vibratoria, 615
factor de separación, 572
fuerzas intermoleculares, 578-579
hipótesis, 568
isotermas, 580-581
modelo, 568-569
presión sobre las paredes de un recipiente, 579
razón de las capacidades caloríficas molares, 613-614
razón del calor específico, 614
temperatura, 571-572
teoría cinética, 569
trabajo, 572-576
 a presión constante, 573-574
 a temperatura constante, 574
 a volumen constante, 573
 en aislamiento térmico, 574-575
velocidad media cuadrática, 570, 594
velocidades moleculares, 570
 distribución, 593-597
 véase también Gas
- Gases diatómicos, 576
Gay-Lussac, ley de, 567
Geometría, fórmulas, A-14
Giro, objetos en:
 estabilidad, 316
 ímpetu angular, 320-321
Gotas de lluvia, 130
Gradiente de temperatura, 624
Grados de libertad, 577, 611
Gran unificación, teorías de la, 117-118, 541
Gravedad, 383-408
 aceleración debida a, 28-29
 centro de gravedad, cuerpo rígido, 332-334
 cerca de la superficie de la Tierra, 388-390
 conservación de la energía, 172
 constante fundamental, 10-11
 distribución esférica de la materia, 390-393
 energía potencial, 177-179, 393-396
 específica, 425
 fuerza, 117
 sobre la partícula interior, 391-392
 historia, 383-384
 ley del inverso de los cuadrados, 392-393
 masa, 405
 Newton, Isaac, 384, 385-386
 carga debida a la, 333
 planetas, 397-402
 potencial, 397
 radiación, 407-408
 satélites, 397-402
 universal, 402-404
 variación con la:
 altitud, 389
 latitud al nivel del mar, 390
Gravitación universal, 402-404
Gravitatoria, constante, 10-11, 386-388
 determinación de la, 387-388
Gravitatorio, campo, 396-397
 equilibrio de los cuerpos rígidos en el, 339-341
Grupo de ondas, velocidad del, 470-471
- H**
Halley, cometa, 400
Helio, superfluidez, 602
Hertz, 354
Hidrógeno, modelo Bohr del átomo, 143
Hooke, ley de, 154, 359, 361
- I**
Impacto, parámetro del, 242
Ímpetu:
 a altas velocidades, 212-214
 conservación, 236-238
 de fuerza, 285
 brazo del, 285
 de la inercia, 245
 definición, 482
 en colisiones, 234
 partículas, 212-213
 relativista, 535-537
 segunda ley de Newton, 221
 véase también Ímpetu angular, Ímpetu lineal
Ímpetu angular, 305-321
 conservación, 313-319
 clavadista en el trampolín, 314-315
 estabilidad de los objetos al girar, 316
 estrellas en colapso, 316-317
 patinador que gira, 314
 rueda de bicicleta girando, 315-316
 cuantización, 320-321
 cuerpos simétricos vs. asimétricos, 313
 definición, 305
 intrínseco, 320
 partículas, 305-307
 regla de la mano derecha, 306
 relación en torca, 306
 sistema de partículas, 307-309
 torca, 307
 trompo, 319-320
 velocidad angular ω , 309-313
Ímpetu angular orbital, 320
Ímpetu lineal, 235
 conservación, 214-217
 partículas, 213-214
 sistema de partículas, 213-214
Ímpetu relativista, 482-483
Impulso angular, 324
Impulso-ímpetu, teorema, 235
Incertidumbre, 8-9
Incompresible, flujo, 442
Inelásticas, colisiones, 240-241
Inercia rotatoria, 277-281
- Inercia, 89
 momento de, 277
Integrales, A-15
Intensidad:
 movimiento ondulatorio, 478-481
 ondas de sonido, 499-501
Ingravidez del astronauta, 98-99
Interferencia:
 constructiva, 479-480
 destruictiva, 479
 en el espacio, 506
 en el tiempo, 506
 movimiento ondulatorio, 478-482
Intermolecular, fuerzas, gas ideal, 578-579
Intrínseco, ímpetu angular, 320
Inversa, transformación de Lorentz, 528
Isotermas, 574
 críticas, 580-581
 gas ideal, 581
 módulo volumétrico, 496, 612
Isotérmicos, procesos, 574
 primera ley de la termodinámica, 620
Isotrópicos, sólidos, dilatación lineal, 556
- J**
Joule, 151, 607
Joule, aparato de, 608
- K**
Kelvin, William Thomson, 551
 escala de temperatura, 551-552, 644-646
Kelvin-Planck, forma, segunda ley de la termodinámica, 640-641, 650.
Kepler, Johannes, 384
 tercera ley, 399, 403
Kilowatt-hora, 160
- L**
Lagrange, Joseph Louis, 441
Laminilla bimetalica, 554, 555
Lengüeta, instrumentos de, 505
Leptones, A-8
Ley:
 asociativa, adición vectorial, 42-43
 cero de la termodinámica, 548-549
 conmutativa, suma de vectores, 42-43
 de la conservación de la energía, 185
 de la conservación de la masa, 443
 de la gravitación universal, 385-386
 de la inercia, 89
 de la transformación de velocidades, 72
 de las áreas, 398-399
 de las órbitas, 398
 de los periodos, 399
 del inverso de los cuadrados, 392-393
Límite de cedencia, 342
Límite elástico, 342
Límites de un sistema, 183-184
Línea, integrales de, 156
- Lissajous, curva de, 380
 figura de, 369
Longitud:
 contracción, 524
 factores de conversión, A-10
 medición, 5-7
 problemas con nuestras ideas sobre la, 520
 relatividad, 524-525
 transformación de Lorentz, 533-534
Longitud propia, 524
Lorentz, factor de, 527-528
 transformación de, 526-529
 consecuencias, 531-535
 inversa, 528
 relatividad de la longitud, 533-534
 relatividad del tiempo, 531-533
 velocidad, 529-530
Lubricación, 120
Luna:
 datos astronómicos, A-4
 presión atmosférica, 595
Luz:
 problemas con nuestras ideas sobre la, 520-521
 velocidad de la, 6
 principio de constancia, 521
- M**
Mach, Ernst, 599
Mach, cono de, 511
Mach, número, 511
Magnética, resonancia, imagen de la, 321
Magnético, campo, factores de conversión, A-13
Magnético, flujo, factores de conversión, A-13
Mano derecha, regla de la:
 ímpetu angular, 306
 ímpetu rotatorio, 267
 productos vectoriales, 49
Manómetro, tubo abierto, 430
Máquina de calor, 637-639 Ciclo de Carnot, 641-644
 coeficiente de rendimiento, 639
 eficiencia, 638
Marcos de referencia, 160-162
Mareas, fuerza de las, 412
Mareas vivas, 409
Masa, 90-92
 conservación de la, 188, 443
 de la Tierra, 388
 energía y, 187-189R factores de conversión, A-11
 flujo de, 443
 ley de la conservación de la, 443
 norma del SI, 7-8
 reducida, 372
 relación a peso, 97-98
 reposo, 538
 total, 204
Matemáticas, fórmulas, A-14-A-15
Materia oscura en la galaxia, 404
Materia oscura, 135
Maxwell-Boltzmann, distribución de la energía, 597-598, 601-602, 646

- Mecánica:
 aplicación de las leyes de Newton, 100-106
 clásica, 87-88
 marcos no inerciales, 133-135
 estadística, 547, 587-603
 movimiento browniano, 599-600
 energía interna, gas ideal, 598
 distribución Maxwell-Boltzmann de energía, 597-598
 trayectoria libre media, 589-591
 distribución velocidad molecular, 593-597
 probabilidad, 588
 distribuciones estadísticas cuánticas, 600-603
 velocidad media cuadrática, 596
 distribución estadística 587-589
 fuerza, 90
 masa, 90-92
 primera ley de Newton, 88-90
 segunda ley de Newton, 92-94
 tercera ley de Newton, 94-96
- Medición, 1-11
 Análisis dimensional 10-11
 longitud, 5-7
 masa, 7-8
 precisión y cifras significativas, 8-9
 patrones, 1-2
 sistema internacional de unidades, 2-3
 tiempo, 3-5
- Membrana vibratoria, 506
 Mercurio, barómetro de, 480
 Mercurio, precesión del perihelio, 406-407
 Mesones, A-9
 Método de componentes en la suma vectorial, 46-48
 Metro, patrón, 5-7
 Michelson-Morley, experimento de, 520
 Movimiento armónico, 356-359
 amortiguado, 368-370
 combinaciones, 367-368
 Modelaje, 433, 568-569
 Módulo de Young, 343
 Módulo de corte, 343
 Módulo de elasticidad, 342
 Módulo volumétrico adiabático, 496
 Mol, definición, 8
 Molécula diatómica, energía cinética, 576
 Molecular, velocidad:
 distribución, 593-597
 confirmación experimental, 596-597
 gas ideal, 570
 selector de la velocidad, 597
- Movimiento, 17-32
 a velocidad constante, 18
 aceleración, 18, 22, 23-25, 59-61
 aceleración constante, 25-28
 en dos y tres dimensiones, 61-63
 armónico simple angular, 361
 armónico simple, 356-359
 automóvil en aceleración y frenado, 18-19, 22
 bola de arcilla pegajosa, 19, 23
 browniano, 599-600
 centro de masa, 218
 circular uniforme, 67-69
 curva peraltada, 125-126
 aceleración centrípeta, 366
 péndulo cónico, 124-125
 dinámica, 123-126
 rotor, 125
 con respecto al centro de masa, 400
 cuerpos en caída libre, 28-32
 descripción, 17-20
 desplazamiento, 59-60
 disparo a un blanco en caída, 65-67
 en dos y tres dimensiones, 59-74
 partículas, 17
 principio de exclusión de Pauli, 601
 proyectiles, 63-65, 130-133
 puntos de retorno, 179
 rebote del disco de goma en el hockey, 19, 22-23
 relativo, 71-74
 rotatorio, 261-270
 a altas velocidades, 74
 segunda ley, 212-213
 velocidad, 59-60
 velocidad instantánea, 21-23
 velocidad media, 20
- Movimiento armónico simple, 356-359
 angular, 361
 frecuencia angular, 357
 aplicaciones, 361-365
 péndulo físico, 363-365
 péndulo simple, 362-363
 oscilador de torsión, 361-362
 consideraciones energéticas, 359-361
 energía cinética, 359
 energía potencial, 359
 movimiento circular uniforme, 365-367
- Movimiento circular:
 aceleración tangencial, 69-71
 uniforme, 67-69
 dinámica, 123-126
 vectores de velocidad y de aceleración, 69-71
- Movimiento ondulatorio, 465-487
 amplitud, 469
 elementos concentrados, 486
 elementos distribuidos, 486
 frecuencia, 469
 intensidad, 476
 interferencia, 478-481
 resortes unidos con densidad de masa diferente, 483-484
 frecuencias naturales, 485
 diferencia de trayectoria, 481
 periodo, 421
 diferencia de fase, 481
 plano polarizado, 488
 potencia e intensidad, 475-476
 resonancia, 485-487
 principio de superposición, 476-478
 transmisión de ondas, 484
 ondas viajeras, 467-471

- ecuación de onda, 474-475
 longitud de onda, 469
 velocidad de onda, 471-474
- Movimiento rotatorio, 261-270
 de aceleración angular, 263, 269
 de componentes tangencial y radial, 268
 desplazamiento angular, 263
 velocidad angular, 263
 con constante de aceleración angular, 264-265
 puro, en el cuerpo rígido, 261-262
 cantidades como vectores, 265-268
 relación entre variables lineal y angular,
 forma escalar, 268-269
 forma vectorial, 269-270
 regla de la mano derecha, 267
 variables, 262-264
- Muones, 525-526
- N**
 Neutrino, 186
 Neutrones, energía cinética, 158
 Neutrónica, estrella, 317, 390
 Newton, 89, 96
 Newton, leyes:
 de la gravitación universal, 385-386
 primera ley de, 88-90
 segunda ley de, 51, 92-94
 forma angular, 361
 curva peraltada, 125-126
 péndulo cónico, 124-125
 movimiento armónico amortiguado, 369
 fuerzas de arrastre, 130-131
 flujo fluido, 444
 fricción, 120-121
 analogía rotatoria, 277
 rotor, 125
 ondas sonoras, 496-497
 movimiento de translación, 294
 dinámica rotatoria de dos cuerpos, 371
 movimiento circular uniforme, 123-124
 unidades, 96-97
 validez, 136
 ecuación de onda, 474-475
 tercera ley de, 94-96
 forma fuerte de la, 307
- Newton-metro, 151
 Nivel de compensación, 437
 Nivel del sonido, 500
 No-inerciales, marcos, 133-135
 No-viscosidad, 442
 Nobel, premios de Física, A-20-A-23
 Nodos, 482
 Normal, fuerza, 101, 119-120
 Nuclear, resonancia magnética, 321
- O**
 Onda, número de, 469
 Onda:
 armónica, 467
 clasificación, 466-467
- complejas, principio de superposición, 477-478
 esférica, 467
 estacionarias, 482-485
 sistema bloque-resorte, 483
 sonido longitudinal, 501-503
 pulsación reflejada, 483-484
 frecuencia angular de la, 469
 frente de la, 467
 longitudinal, 466
 mecánicas, 465
 plana, 467
 sinusoidales, 469-470
 sonoras, 495-511
 transmitida, 484
 transversal, 466
 viajeras, 467-471
 velocidad de la, 471-474
 análisis dimensional, 471-472
 análisis mecánico, 472-473
 velocidad transversal de la partícula, 473
- Ondas sonoras, 495-511
 alcance del oído humano, 500
 amplitud de la presión, 498
 análisis mecánico, 472-473
 columnas de aire vibratorias, 504-505
 cuerdas vibratorias, 504
 desplazamiento longitudinal, 497
 efecto Doppler, 508-511
 modulación de la amplitud, 507
 nodos y antinodos de presión, 502
 ondas longitudinales estacionarias, 501-503
 ondas longitudinales viajeras, 497-499
 potencia e intensidad, 499-501
 pulsaciones, 506-508
 principio de superposición, 506
 velocidad, 495-497
 sistemas vibratorios, 503-506
 umbral de dolor, 500
- Órbitas, ley de las, 398
- Oscilaciones, 353-373
 armónicas, 355
 combinaciones de frecuencias diferentes, 367-368
 condiciones, 353-354
 de dos cuerpos, 371-373
 forzadas, 370-371
 frecuencias naturales, 485
 fuerza de restitución, 356
 función de la energía potencial, 354-355
 puntos de retorno, 354
véase también movimiento armónico simple
- Oscilador armónico simple, 355-356
 Oscilador de torsión, 361-362
 Osciladores de dos cuerpos, 371-373
 Oscilatorios, sistemas, 353-355
 Ostwald, Wilhelm, 599
- P**
 Palanca hidráulica, 427-428
 Par, producción del, 187
 Paradoja de los gemelos, 524, 533

- Paradoja hidrostática, 434
 Pared adiabática, 548
 Pared diatérmica, 548
 Paridad, conservación de la, 53
 Parsec, 402
 Partículas:
 aceleradores de, 247-248
 cinemática de las, 17
 compuestas, A-9
 conservación de la energía, 183-187
 distribución estadística, 600-601
 efecto de la gravitación de la distribución esférica de la materia, 390-393
 elementales, A-8
 elementales, colisiones entre, 234
 energía de sujeción, 396
 fluidos, 441
 fundamentales, A-8
 ley de la gravitación universal de Newton, 385
 ímpetu lineal, 212-213
 movimiento en trayectoria circular, torca, 312-313
 torca que actúa sobre, 283-286
 velocidad trasversal, ondas, 473
 véase también Sistemas de partículas
 Pascal, 421
 principio de, 426
 Patinador, giro, conservación del ímpetu angular, 314
 Pauli, principio de exclusión de, 601
 Péndulo:
 balístico, 241
 centro de oscilación, 364
 cónico, 124-125
 de torsión, 362
 físico, 363-365
 método de, medición de la aceleración en caída libre, 30-32
 torca de restitución, 362
 simple, 362-363
 Perigeo, 398
 Perihelio, 398
 precesión, Mercurio, 406-407
 Periódica, tabla, A-7
 Periodo: 354
 ley del, 399
 Perrin, Jean, 600
 Peso, 97
 carencia de, 98
 densidad, 422-423
 relación con la masa, 97-98
 Pión, 519-520
 Pitágoras, teorema de, A-14
 Pitot, tubo de, 448
 Planetas:
 movimiento, 397-402
 consideraciones energéticas, 400-402
 en torno al centro de masa, 400
 propiedades, A-4
 Planck; constante de, 11, 190
 Planetas: movimiento, 397-402
 con respecto al centro de masa 400
- consideraciones de energía 400-402
 propiedades A-4
 Plasma, 419-420
 Plasticidad, 342
 Poder ascensional dinámico, 448-449
 Poise, 453
 Poiseuille, ley de, 454
 Polar, ángulo, 44
 Polar, vector, 52
 Posición, fuerzas dependientes de la, 128
 programas de computación, A-18—A-19
 Positrón, emisión, 187
 Potencia, 159-160
 definición, 160
 factores de conversión, A-13
 movimiento ondulatorio, 475-476
 Precesión, perihelio de Mercurio, 406-407
 Presión:
 absoluta, 430
 amplitud, ondas sonoras, 498
 cálculo, gas ideal, 569-571
 estática, 446
 estática de los fluidos, 420-421
 factores de conversión, A-13
 manométrica, 430
 medición, fluidos, 429-431
 onda de, 498
 variación atmosférica, 424-426
 variación, fluido en reposo, 422-426
 Presión atmosférica, variación de la, 424-426
 Presión dinámica, 446
 Primera ley de la termodinámica, 616-619
 procesos adiabáticos 619-620
 aplicaciones, 619-622
 procesos a volumen constante 620
 procesos cíclicos 620
 expansión libre 620-621
 procesos isotérmicos 620
 Principio de equivalencia, 405-406
 Principio de la constancia de la velocidad de la luz, 521, 540
 Principio de relatividad, 521, 538
 Principio de superposición, 476-478
 Probabilidad, 588
 entropía, 646-648
 Proceso adiabático, 574-575, 636
 primera ley de la termodinámica, 619-620
 Procesos cíclicos, primera ley de la termodinámica, 620
 Proceso reversible, 635-637
 entropía 646-648
 Proceso irreversible, 635-637
 entropía, 648-650
 Producto punto, vectores, 48
 Propiedad termométrica, 550
 proyectiles
 movimiento, 397
 en torno al centro de masa, 400
 consideraciones energéticas, 400-402
 propiedades, A-4
 Proyección, 44
 Ptolomeo, 383-384

- Pulsaciones, 506-508
 Pulsar, 273
 Punto silla, 341
 Punto triple del agua, 551
 Puntos de retorno, 354
- Q
 Quarks, A-8
- R
 Radar, retardo del eco, 407
 Radiación gamma, 187, 522
 Radiación:
 calor, 624
 gravitatoria, 407-408
 presión, 317
 Radiactividad, 187-189
 Rayo, 467
 Razón de las capacidades caloríficas molares, 613-614
 Razón de los calores específicos, 574, 614
 Recorrido libre medio, 589-593
 cálculo microscópico 591-593
 Red cristalina, 341
 Referencia, marcos de, 160-162
 centro de masa, 244-248
 no inercial, 133-135
 transformación de la velocidad entre, 245-246
 Refrigeradores, segunda ley de la termodinámica, 639-641
 Regulador, 169
 Relatividad de la simultaneidad, 532
 Relatividad de la longitud, transformación de Lorentz, 533-534
 Relatividad del tiempo, 522-524
 transformación de Lorentz, 531-534
 Relatividad especial, 135-136
 Relatividad, 135-136
 teoría general de la, 404-408
 principio de, 521, 538
 Reloj de cesio, 4-5
 Relojes atómicos, 4-5
 Reposo, energía de, 188
 Reposo, longitud, 524
 Reposo, masa, 538
 Resistencia del aire, movimiento de proyectiles, 132-133
 Resistencia térmica, 624
 Resistencia, friccional, 120
 Resistencia, termómetro de, 558-559
 Resonancia, 370-371
 definición, 371
 movimiento ondulatorio, 485-487
 Resorte, fuerza del:
 Resortes:
 energía potencial, 174-176 ley de la fuerza, 154
 Reverberación, tiempo de, salas de concierto, 515
 Reynolds, número de, 455
 Roche, límite de, 418
 Rodamiento, sin deslizamiento, 292-296
 Sistemas vibratorios, 503-506
 Rotación:
 del sistema de coordenadas, 45-46
 véase también Ímpetu angular

- Rueda:
 en rotación, conservación del ímpetu angular, 315-316
 Rueda rodante, dinámica, 291
 Ruido, termómetro de, 645

S

- SI: *véase* Sistema Internacional de Unidades
 Satélites:
 en órbita de la Tierra, 95
 movimientos, 397-402
 consideraciones de energía, 400-402
 en torno al centro de masa, 400
 Segunda ley de la termodinámica, 639-640
 compresión libre, 650
 entropía, 650-651
 flecha del tiempo, 651
 forma de Clausius, 640-641, 650-651
 forma de Kelvin-Planck, 640-641, 650
 refrigeradores, 639-641
 teorema de Carnot, 642-643
 Segunda ley del movimiento, 212-213
 Selector de velocidad, 597
 Semieje mayor, 398, 402
 Seudofuerzas, 133-135
 véase también Fuerza Centrifuga; fuerza Coriolis"
 Seudotrabajo, 218
 Seudovector, 52
 Signos y símbolos matemáticos, A-14
 Simetría axial, 310
 Simultaneidad, relatividad, 531-532
 Sistema Internacional de Unidades, 2-3, A-1-A-2
 calor, 607
 hertz, 354
 masa 7-8
 metro, 5-7
 presión, 420-421
 temperatura, 549-550
 trabajo, 151
 unidades de base, A-1
 unidades de fuerza, 97
 viscosidad, 453
 Sistema binario de estrellas, 400
 Sistema bola-cascarón, fuerzas externas, 212
 Sistema inglés:
 trabajo, 151
 unidades de fuerza, 97
 unidades térmicas, 607
 Sistema cgs:
 trabajo, 151
 unidades de fuerza, 97
 Sistema de partículas:
 de dos partículas, 203-206
 giro de, 313
 energía, 217-220
 energía potencial, gravitación, 393-396
 energía relativista total, 538
 masa variable, 220-224
 ímpetu angular, 307-308
 ímpetu lineal, 213-214
 muchas partículas, 206-209

- torca externa, 307-308
- trabajo, 217-220
- Sistema solar, ley de los periodos, 399
- Sistemas de dos partículas, 203-206
- Sistemas de muchas partículas, 206-209
- Sistemas vibratorios, 503-506
- Sol:
 - cambio en masa, 188
 - datos astronómicos, A-4
 - desviación de la luz de las estrellas, 407
- Sólido cristalino, expansión y contracción, 554-556
- Sólidos, 419-420
 - capacidad calorífica, 611-612
 - centro de masa, 209-212
 - inercia rotatoria, 281-283
- Stanford Linear Accelerator Center, 247-248
- Sublimación, 626
- Sustancia plástica, 419
- Sustancia termométrica, 550
- Superconductividad, 602-603
- Superfluidez, 603-603
- Supergrupos, ligados gravitatoriamente, 404
- Superposición, principio de, 476-478
 - ondas complejas, 477-478
 - análisis de Fourier, 478
 - interferencia en el tiempo, 506
- T**
- Tacoma Narrows, puente de Bridge, 371
- Tambor, parche de, 505-506
- Tangencial, aceleración, movimiento circular, 70-71
- Tangencial, fuerza, 309
- Temperatura:
 - cambio de volumen en los fluidos, 557
 - cero absoluto, 645-646
 - coeficiente de dilatación lineal, 556
 - Debye, 611
 - definición, 549
 - descripciones macroscópica y microscópica, 547-548
 - dilatación térmica, 554-558
 - equilibrio térmico, 548-549
 - escala Celsius, 550-551
 - escala de temperatura del gas ideal, 552-554
 - escala Fahrenheit, 550-551
 - escala internacional, 554
 - escala Kelvin, 551-552
 - gas ideal, 571-572
 - medición, 549-552
 - negativa, 645-646
 - punto triple del agua, 551
 - termodinámica, definición, 644
 - véase también* termodinámica
- Temperatura termodinámica, definición, 644
- Temperaturas negativas, 645-646
- Tensión, 100, 342-343
 - definición, 343
- Tensión superficial, 432
- Tensor, 50
- Teorema de los ejes paralelos, 280-281

- Teoría especial de la relatividad, 519-541
 - y el sentido común, 540-541
 - transformación de Lorentz, 526-529, 530
 - consecuencias, 531-535
 - coordenadas de medición espacio-tiempo, 529
 - postulados, 521-522, 540-541
 - suma relativista de velocidades, 524-525
 - energía relativista, 537-540
 - ímpetu relativista, 535-537
 - relatividad de longitud, 524
 - relatividad del tiempo, 522-524
 - transformación de velocidades, 529-531
- Tercera ley de la termodinámica, 645
- Térmica, máquina, 637-639
- Termómetros, 549
 - gas a volumen constante, 552-553
 - laminilla bimetálica, 554-555
 - resistencia, 559-560
- Tiempo:
 - factores de conversión, A-11
 - medición, 3-5
 - problemas con nuestras ideas acerca del, 519-520
 - propio, 523
 - relatividad, 522-524
 - transformación de Lorentz, 531-533
- Tiempo de vuelo, método, 158
- Tiempo propio, 523
- Tierra: datos astronómicos, A-4
 - masa de la, 388
- Tierra-Luna (sistema), centro de masa, 207-208
- Torca:
 - actuación sobre partículas, 283-286
 - ímpetu angular, 307-308
 - debido a la gravedad, 333
 - definición, 277
 - externo, 307-308
 - partícula moviéndose en una trayectoria circular, 312-313
 - relación con el ímpetu angular, 306
 - unidades, 285
- Torr, 421
- Torricelli, Evangelista, 431
 - ley de, 459
- Trabajo, 572-576
 - definición, 149-151
 - factores de conversión, A-13
 - fuerza constante, 149-152
 - fuerza variable:
 - bidimensional, 155-157
 - unidimensional, 153-155
 - sistema de partículas, 217-220
 - unidad de, 151
- Trabajo-energía, teorema, 157-159
 - dinámica de los fluidos, 445
 - dinámica rotatoria, 278
 - dinámica rotatoria del cuerpo rígido, 286
 - limitación, 159
 - prueba general, 158-159
- Transformación, ecuaciones, 50
 - teoría especial de la relatividad, 526-529
- Transformación galileana, ecuaciones de, 526-527

- Traslación:
 - combinada con movimiento rotatorio, 290-296
 - cuerpo rígido, 262
 - del sistema de coordenadas, 45-46
 - segunda ley de Newton, 294
- Tren de ondas, 467
- Triángulos, formulas, A-14
- Trigonometría:
 - desarrollos, A-15
 - funciones, A-14
 - identidades, A-15
- Tren de ondas periódico, 467
- Trompo, giro, ímpetu angular, 319-320
- Tubo de flujo, 443
- Turbulencia, 454-455
- U**
- Unidad astronómica, 14, 402
- V**
- Valor medio, 587-589
- Valor-R, 624
- van der Waals, ecuación de estado, 579-581
- Vaporización, calor de, 610
- Variable de estado, 647
- Vectores, 41-53
 - axiales, 52-53
 - cantidades rotatorias como, 265-268
 - componentes, 43-45
 - en dos o tres dimensiones, 63-64
 - definición, 42-52
 - ecuaciones, aceleración constante, dos y tres dimensiones, 60-63
 - ecuaciones de transformación, 50
 - en dos y tres dimensiones, 60-63
 - fuerzas como, 90
 - invariantes, 51
 - leyes, 50-52, 386
 - multiplicación, 48-50
 - polares, 52-53
 - producto escalar, 150
 - productos, A-15
 - productos generalizados, 50
 - proyección, 44
 - simetría de reflexión, 52-53
 - sistemas de coordenadas, 45-46
 - suma de:
 - método de las componentes, 46-48
 - método gráfico, 42-43
- Vectores, suma de:
 - método de las componentes, 46-48
 - método gráfico, 42-43
- Velocidad angular:
 - ímpetu angular, y 309-313
 - movimiento rotacional, 263
 - vector, 52

- Velocidad:
 - crítica, turbulencia, 455
 - factores de conversión, A-12
 - parámetro, 527-528
 - fuerzas dependientes de la, 127-128
 - gradiente, dinámica de los fluidos, 453
 - instantánea, 21-23
 - ley de transformación, 72
 - media, promedio, 20
 - media cuadrática, 570, 594
 - movimiento en dos y tres dimensiones, 59-60
 - onda transversal, 473
 - problemas con nuestras ideas sobre, 520
 - proceso límite, 21
 - suma relativista, 524-525
 - transformación:
 - entre marcos de referencia, 245-246
 - ley de, 72
 - teoría especial de la relatividad, 529-531
 - vectores, movimiento circular, 69-71
 - véase también* Velocidad angular
- Velocidad de Maxwell.
- Véase* Velocidad molecular
- Velocidad molecular:
 - distribución, 593-597
 - confirmación experimental, 596-597
 - en el gas ideal, 569-570
 - selector de velocidad en la, 597
- Velocidad terminal, cuerpo en caída, 130-133
- Velocidad transversal, partículas, ondas, 473
- Velocidad, ley de la suma, 525
- Venturi, medidor, 448
- Vibratoria, energía, gas ideal, 615
- Vibratoria, membrana, 506
- Vibratorias, columnas de aire, 504-505
- Vibratorias, cuerdas, 504
- Vibratorios, sistemas, 503-506
- Viscosidad, 442, 453-454
- Volumen:
 - factores de conversión, A-11
 - caudal, flujo, 443
- Volumen constante, procesos, primera ley de la termodinámica, 620
- Volumen constante, termómetros de gas a, 552-553
- Volumen específico, 557
- Volumétrico, módulo, 422
- Vórtice, campo de flujo, 451
- W**
- Watt, 160
- Y**
- Yarda, definición, 5
- Young, módulo de, 343
- Yukawa, energía potencial de, 198