Termodinámica

Ahora dirigimos nuestra atención al estudio de la termodinámica, que comprende situaciones en las que la temperatura o estado (sólido, líquido, gaseoso) de un sistema cambia debido a transferencias de energía. Como veremos, la termodinámica es muy satisfactoria para explicar las propiedades generales de la materia y la correlación entre estas propiedades y la mecánica de átomos y moléculas.

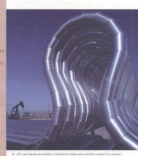
Históricamente, el perfeccionamiento de la termodinámica estuvo paralelo al de la teoría atómica de la materia. En la década de 1820, experimentos químicos realizados habían dado una sólida evidencia de la existencia de los átomos. En aquel tiempo, los científicos reconocieron que debía existir un enlace entre termodinámica y la estructura de la materia. En 1827, el botánico Robert Brown reportó que granos de polen suspendidos en un líquido se movían erráticamente de un lugar a otro, como si estuvieran bajo agitación constante. En 1905, Albert Einstein utilizó la teoría cinética para explicar la causa de este errático movimiento, que hoy se conoce como *movimiento browniano*. Einstein explicó este fenómeno al suponer que los granos están bajo constante bombardeo por moléculas "invisibles" del líquido, que a su vez se movían erráticamente. Esta explicación dio a otros sabios el conocimiento del concepto de movimiento molecular y dio crédito a la idea de que la materia está formada por átomos. Se formó así un enlace entre el mundo de hoy y el de elementos diminutos, invisibles, que forman este mundo.

La termodinámica también aborda problemas más prácticos. ¿Se ha preguntado el lector cómo es que un refrigerador enfría su contenido, qué tipos de transformaciones se presentan en una planta generadora de electricidad o en el motor de un automóvil, o qué ocurre a la energía cinética de un objeto en movimiento cuando éste llega al reposo? Las leyes de la termodinámica se pueden usar para dar explicaciones para éstos y otros fenómenos. ■

◄ *Oleoducto Alyeska cerca del río Tazlina en Alaska. El petróleo del oleoducto es caliente y la energía que se transfiere de la tubería podría derretir el suelo permanentemente helado y que es muy sensible al ambiente. Las estructuras con aletas en la parte superior de los postes de soporte son radiadores térmicos que permiten que se transfiera energía al aire para proteger el suelo. (Topham Picturepoint/The Image Works)*

Temperatura

CONTENIDO DEL CAPÍTULO



A ¿Por qué algunos aceros deben ser calentados antes de ser remachados? Cuando se calienta, el acero se expande y el remache puede ajustarse en su lugar. Al enfriarse, el remache se contrae y ejerce una fuerza de compresión considerable sobre las piezas remachadas. El acero caliente remachado, de hecho, ejercerá una fuerza de tensión considerable.

En nuestro estudio de la mecánica, con todo cuidado definimos conceptos como masa, fuerza y energía cinética para facilitar nuestro método cuantitativo de estudio. De igual modo, una descripción cuantitativa de fenómenos térmicos requiere de cuidadosas definiciones de importantes términos como temperatura, calor y energía interna. Este capítulo se inicia con un análisis de la temperatura y con la descripción de una de las leyes de la termodinámica (la llamada "ley cero").

A continuación consideramos por qué un factor importante, cuando hablamos de fenómenos térmicos, es la sustancia particular que estamos investigando. Por ejemplo, los gases se dilatan en forma considerable cuando se calientan, mientras que líquidos y sólidos se dilatan sólo ligeramente.

Este capítulo concluye con un estudio de gases ideales en escala macroscópica. Aquí nos interesan las relaciones entre cantidades como presión, volumen y temperatura. En el capítulo 21 examinaremos gases a escala microscópica, usando un modelo que representa los componentes de un gas como pequeñas partículas.

19.1 Temperatura y la ley cero de la termodinámica

A veces asociamos el concepto de temperatura con qué tan caliente o frío se siente un objeto cuando lo tocamos. Así, nuestros sentidos nos dan indicación cualitativa de temperatura. Sin embargo, nuestros sentidos no son confiables y a veces nos confunden. Por ejemplo, si sacamos una charola metálica de cubos de hielo y una caja de cartón de legumbres congeladas del frigorífico, la charola de hielos se siente más fría que la caja, aun cuando ambas están a la misma temperatura. Los dos objetos se sienten diferentes, porque el metal transfiere energía por calor a una escala más alta que el cartón. Lo que necesitamos es un método confiable y reproducible para medir el grado de calor o de frío relativos de objetos en lugar de la rapidez de transferencia de energía. Los científicos han perfeccionado varios termómetros para hacer estas mediciones cuantitativas.

Todos estamos familiarizados con el hecho de que dos objetos que están a diferentes temperaturas iniciales finalmente alcanzan una temperatura intermedia cuando se ponen en contacto uno con otro. Por ejemplo, cuando se mezclan agua caliente y agua fría en una tina de baño, la temperatura final de la mezcla es entre las dos temperaturas. Análogamente, cuando un cubo de hielo se pone en una taza de café caliente, se derrite y baja la temperatura del café.

Para entender el concepto de temperatura, es útil definir dos frases que se usan con frecuencia: contacto térmico y equilibrio térmico. Para captar el significado de contacto térmico, imagine que dos cuerpos se colocan en un recipiente aislado de modo que interactúan entre ellos, pero no con el medio ambiente. Si los cuerpos están a diferentes temperaturas, entre ellos se intercambia energía, incluso si no están inicialmente en contacto físico uno con el otro. Los mecanismos de transferencia de energía del capítulo 7 en los que nos concentraremos son calor y radiación electromagnética. Para los fines de este análisis, suponemos que los dos cuerpos están en **contacto térmico** uno con otro si se puede intercambiar energía mediante estos procesos, debido a una diferencia de temperatura.

Figura 19.1 Ley cero de la termodinámica. (a) y (b) Si las temperaturas de A y B se miden como iguales al ponerlos en contacto térmico con un termómetro (objeto C), no se intercambia energía entre ellos cuando se colocan en contacto térmico entre sí (c).

El **equilibrio térmico** es una situación en la que dos objetos no intercambian energía por calor o radiación electromagnética si se ponen en contacto térmico.

Consideremos dos objetos A y B, que no están en contacto térmico, y un tercer objeto C, que es nuestro termómetro. Deseamos determinar si A y B están en equilibrio térmico entre sí. El termómetro (objeto C) se coloca primer en contacto térmico con el objeto A hasta alcanzar equilibrio térmico[1], como se muestra en la figura 19.1a. Desde ese momento, la lectura del termómetro permanece constante y la registramos. El termómetro se retira luego del objeto A y se pone en contacto térmico con el objeto B, como se ve en la figura 19.1b. La lectura se registra de nuevo después de alcanzar equilibrio térmico. Si las dos lecturas son iguales, entonces el objeto A y el objeto B están en equilibrio térmico entre sí. Si se colocan en contacto uno con otro, como se ve en la figura 19.1c, entre ellos no hay intercambio de energía.

Podemos resumir estos resultados en un enunciado conocido como la **Ley Cero de la Termodinámica** (la ley de equilibrio):

Ley Cero de la Termodinámica

Si los objetos A y B están separadamente en equilibrio térmico con un tercer objeto C, entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí.

Este enunciado puede demostrarse experimentalmente con toda facilidad, y es muy importante porque hace posible que definamos la temperatura. Podemos considerar la **temperatura** como la propiedad que determine si un objeto está en equilibrio térmico con otros objetos. **Dos objetos en equilibrio térmico entre sí, están a la misma temperatura.** Por el contrario, si dos objetos tienen temperaturas diferentes, entonces no están en equilibrio térmico entre sí.

Pregunta rápida 19.5 Dos objetos, con diferentes tamaños, masas y temperaturas diferentes, se colocan en contacto térmico. La energía se transfiere (a) del objeto más grande al objeto más pequeño, (b) del objeto con más masa al de menos masa, (c) del objeto a temperatura más alta al de temperatura más baja.

---

[1] Suponemos que se transfiere una energía insignificante entre el termómetro y el objeto A durante el proceso de equilibrio. Sin esta suposición, que también se hace para el termómetro y el objeto B, la medición de la temperatura de un objeto altera el sistema de modo que la temperatura medida es diferente respecto de la temperatura inicial del objeto. En la práctica, siempre que se mida temperatura con un termómetro, se mide el sistema alterado, no el sistema original.

19.2 Termómetros y la escala Celsius de temperatura

Los termómetros son aparatos que se usan para medir la temperatura de un sistema. Dichos instrumentos están basados en el principio de que alguna propiedad física de un sistema varía de manera específica y conocida cuando se le agrega o se le quita energía. Por lo tanto, tiene que la temperatura mín. 32 el indicador de un líquido, 32 los termómetros de uso diario. Por ejemplo, el nivel de mercurio en un tubo de vidrio, como se ilustra en la figura 19.2, es conocido. El fundamento detrás de los cuerpos, 1.0, el cero de un objeto de punto de ebullición del agua, 212 y el punto de congelación del agua, 32 en la escala Fahrenheit.

Un termómetro cuenta de una efectos más formado por una cada de líquido, que le gas, que se expande cuando se le agrega energía. Por ejemplo, el mercurio, que se expande, gas, 19.2, en una cero. La propiedad física que cambia en el volumen de un líquido. Por ejemplo, el nivel de mercurio en un tubo de vidrio, como se ilustra en la figura 19.2, que es proporcional al volumen o la longitud de la columna del líquido. El termómetro se puede calibrar, por ejemplo, al colocarlo en una mezcla de hielo y agua en equilibrio térmico, como ilustra la figura 19.2. Cuando se le agrega energía a la mezcla de hielo y agua, el hielo se funde y el nivel de mercurio en el tubo de vidrio baja. Cuando se le agrega energía a la mezcla de agua y ebullición, el nivel de mercurio sube. Una vez que tiene una temperatura de un cuerpo el tubo, que se sumerge en una mezcla de hielo y agua en equilibrio térmico, se puede marcar el nivel de mercurio como cero de agua y agua en equilibrio térmico y ebullición, respectivamente. Después de que se ha calibrado el termómetro, se puede usar para medir temperaturas del líquido del termómetro en lugar modificado en cero dos puntos, la longitud de la columna de mercurio. Por ejemplo, si la longitud de la columna de mercurio es 1.0 cm, la temperatura es 0 °C (cero). Si la cero, cada segmento. Dentro no cambia la temperatura de un punto de ebullición.

Los termómetros calibrados de este tipo generan problemas cuando se necesita medir temperaturas muy altas o muy bajas. Por ejemplo, el mercurio se congela a 39 °C, por lo cual es difícil usarlo en la parte de congelación. La medición del agua gaseosa, mercurio, que se congela a 39 °C, por lo cual es difícil usarlo en la parte de congelación. La medición del mercurio, y el alcohol tienen propiedades físicas de expansión diversa, cuando se ha alcanzado cierta temperatura de 78 °C, por lo cual, a los cuatro cuartos, se ve bajo

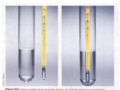


Figura 19.2 Dibujo ilustrado de un aparato diseñado. El nivel del mercurio en el termómetro, cuando se sumerge en una mezcla de hielo y agua en equilibrio térmico.

Figura 19.7 (a) Se usan juntas de expansión térmica para separar secciones de pavimento en puentes. Sin estas *juntas*, las superficies se pandearían debido a la expansión térmica en días muy calurosos, o se agrietarían debido a la contracción en días muy fríos. (b) La junta vertical larga se llena con material suave que permite que la pared se expanda y se contraiga cuando cambia la temperatura de los ladrillos.

menta la temperatura del sólido, los átomos oscilan con mayores amplitudes; por lo tanto, el promedio de separación entre ellos aumenta.[4] En consecuencia, el cuerpo se expande.

Si la expansión térmica es suficientemente pequeña con respecto a las dimensiones iniciales de un cuerpo, el cambio en cualquier dimensión es, a una buena aproximación, proporcional a la primera potencia del cambio de temperatura. Suponga que un cuerpo tiene una longitud inicial L_i a lo largo de alguna dirección a cierta temperatura y que la longitud aumenta en una cantidad ΔL para un cambio en temperatura ΔT. En vista que es conveniente considerar el cambio fraccionario en longitud por grado de cambio de temperatura, definimos el **coeficiente promedio de expansión lineal** como

$$\alpha = \frac{\Delta L/L_i}{\Delta T}$$

Experimentos realizados demuestran que α es constante para pequeños cambios en temperatura. Para fines de cálculo, esta ecuación suele rescribirse como

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T \qquad (19.4)$$

o como

$$L_f - L_i = \alpha L_i (T_f - T_i) \qquad (19.5)$$

donde L_f es la longitud final, T_i y T_f son las temperaturas inicial y final, y la constante de proporcionalidad α es el coeficiente promedio de expansión lineal para un material dado y tiene unidades de $(^{\circ}C)^{-1}$.

Puede ser útil pensar en la expansión térmica como una amplificación efectiva o como la amplificación fotográfica de un cuerpo. Por ejemplo, cuando una rondana metálica se calienta (figura 19.8), todas las dimensiones, incluyendo el radio del agujero, aumentan de acuerdo con la ecuación 19.4. Nótese que esto equivale a decir que **una cavidad en una pieza de material se expande en la misma forma como si la cavidad estuviera llena con el material.**

La tabla 19.1 es una lista del coeficiente promedio de expansión lineal para varios materiales. Nótese que para estos materiales α es positiva, lo cual indica un aumento en longitud con una temperatura creciente. Éste no es siempre el caso. Algunas sustancias, la calcita ($CaCO_3$) es un ejemplo, se expande a lo largo de una dimensión (α positiva) y se contrae a lo largo de otra (α negativa) cuando sus temperaturas aumentan.

Figura 19.8 Expansión térmica de una rondana metálica de expansión. Cuando se calienta la rondana, todas las dimensiones aumentan. (La expansión está exagerada en esta figura.)

¡ADVERTENCIA!

19.2 ¿Los agujeros se hacen más grandes o más pequeños?

Cuando la temperatura de un cuerpo se eleva, cada dimensión lineal aumenta en tamaño. Esto incluye cualesquier agujeros en el material, que se expanden en la misma forma como si el agujero estuviera lleno del material, como se ve en la figura 19.8. Recuerde la noción de expansión térmica como similar a una amplificación fotográfica.

---

[4] En forma más precisa, la expansión térmica surge de la naturaleza asimétrica de la curva potencial-energía para los átomos en un sólido, como se ve en la figura 15.12a. Si los osciladores fueran verdaderamente armónicos, el promedio de separaciones atómicas no cambiaría cualquiera que fuera la amplitud de vibración.

Figura 11.6 Los líquidos y los sólidos se dilatan cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Los coeficientes de expansión de líquidos y sólidos varían considerablemente.

Tanto el acero de quad longitud se alarga en la misma cantidad dado, sabe cada vez cuando, la barra de Tanto se expande más que la barra de cobre, porque el hierro tiene un coeficiente de expansión lineal mayor que el cobre. Los coeficientes de expansión lineal son casi iguales cada metales sólidos con excepción de materiales de aspecto poroso como corcho que tienen coeficientes de expansión mucho más grandes. Los coeficientes de expansión varían con la temperatura de la cosa, los fluidos también se expanden en cantidades diferentes y la mayoría de los líquidos tienen coeficientes de expansión lineal.

Pregunta rápida 11.5 Si se tiene un plano hecho con materiales de cobre y aluminio, ¿qué sucede con el ángulo entre los dos materiales cuando se calienta? **a)** aumenta **b)** disminuye **c)** no cambia.

Pregunta rápida 11.6 Una cubierta metálica ajustada sobre una tapa del cuello de una botella. Los coeficientes lineales de expansión para el aluminio y el vidrio son 2.4 × 10⁻⁵ °C⁻¹ y 0.9 × 10⁻⁵ °C⁻¹, respectivamente. Si la cubierta está atascada, ¿cómo puede ayudar a quitarla? **a)** calentar la cubierta **b)** enfriar la cubierta **c)** calentar el cuello de la botella **d)** enfriar el cuello de la botella **e)** ninguna de estas cosas.

Ejemplo 11.6 Expansión de una tira de hierro

La expansión de 10 m de acero que se extiende desde una longitud de 20.000 m a cuando la temperatura es 0.0°C.

Sol ¿Cuál es la longitud a cuando la temperatura es 40°C?

Detalle Con el uso de la ecuación 11.1 y la observación que el coeficiente lineal de expansión de acero es 12×10^{-6} °C⁻¹, encontramos que el cambio en la longitud es

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T = (1.2 \times 10^{-5}\ °C^{-1})(10.00\ m)(40\ °C)$$
$$= 4.8 \times 10^{-4}\ m$$

El cambio en la longitud es 0.48 mm, así la longitud a 40.0°C es **10.0048 m.**

Sol Suponga que los extremos del tubo están sujetados a una a a 20°C. Si desea que su longitud no cambiará, ¿Cuál es el cambio en la tensión resultante en el tubo si se calienta a 40°C? Suponga que Y = 2.0×10^{11} N/m².

Detalle El cambio relativo en la longitud de 10 m es equivalente a la deformación longitudinal $\Delta L/L_i$ que se ha producido en el tubo. Por lo tanto, el cambio en la tensión que se ha producido en el tubo es igual a la deformación de tensión multiplicada por el módulo de Young, o

$$\text{Deformación de tensión} = \frac{\Delta L}{L_i} = \alpha\Delta T$$

Resulta que Y para el acero es 20×10^{10} N/m², lo cual nos da un cambio en

$$\frac{F}{A} = (20 \times 10^{10}\ \mathrm{N/m^2})\left(\frac{0.015\ \mathrm{m}}{30.000\ \mathrm{m}}\right) = \boxed{8.7 \times 10^7\ \mathrm{N/m^2}}$$

¿Qué pasaría si? ¿Qué pasaría si la temperatura baja a −40.0°C? ¿Cuál es la longitud del segmento no sujeto?

La expresión para el cambio en longitud en la ecuación 19.4 es igual si la temperatura aumenta o disminuye. Por lo tanto, si hay un aumento en longitud de 0.015 m cuando la temperatura aumenta en 40°C, entonces hay una disminución en longitud de 0.015 m cuando la temperatura disminuye en 40°C. (Suponemos que α es constante sobre todo el intervalo de temperaturas). La nueva longitud a la temperatura más fría es 30.000 m − 0.015 m = 29.987 m.

Ejemplo 19.4 El corto electrotérmico

Un dispositivo electrónico ha sido diseñado en forma deficiente de modo que dos tornillos unidos a piezas diferentes del dispositivo casi se tocan entre sí en su interior, como se ve en la figura 19.10. Los tornillos de acero y bronce están a diferentes potenciales eléctricos y si se tocan se produce un cortocircuito, lo cual daña al dispositivo. (Estudiaremos el potencial eléctrico en el capítulo 3 del volumen II.) Si la distancia entre los extremos de los tornillos es 5.0 μm a 27°C, ¿a qué temperatura se tocarán los tornillos?

Solución Podemos conceptualizar la situación si imaginamos que los extremos de ambos tornillos se expanden hacia la distancia entre ellos cuando aumenta la temperatura. Clasificamos éste como un problema de expansión térmica, en el que la suma de los cambios en longitud de los dos tornillos debe ser igual a la longitud de la distancia inicial entre los extremos. Para analizar el problema, escribimos esta condición matemáticamente:

$$\Delta L_{br} + \Delta L_{ac} = \alpha_{br} L_{i,br}\,\Delta T + \alpha_{ac} L_{i,ac}\,\Delta T = 5.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}$$

Al despejar ΔT, encontramos

$$\Delta T = \frac{5.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}}{\alpha_{br} L_{i,br} + \alpha_{ac} L_{i,ac}}$$

$$= \frac{5.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}}{(19 \times 10^{-6}\ {}^\circ\mathrm{C}^{-1})(0.030\ \mathrm{m}) + (11 \times 10^{-6}\ {}^\circ\mathrm{C}^{-1})(0.010\ \mathrm{m})}$$

$$= 7.4^\circ\mathrm{C}$$

Por lo tanto, la temperatura a la que los tornillos se tocan es

$27^\circ\mathrm{C} + 7.4^\circ\mathrm{C} = \boxed{34^\circ\mathrm{C}}$ Para finalizar este problema, nótese que esta temperatura es posible si el clima artificial del edificio donde se encuentre el dispositivo falla durante un largo periodo en un día caluroso de verano.

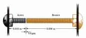


Figura 19.10 (Ejemplo 19.4) Dos tornillos unidos a diferentes piezas de un dispositivo eléctrico casi se tocan cuando la temperatura es 27°C. Cuando aumenta la temperatura, los extremos de los tornillos se mueven uno hacia el otro.

El comportamiento poco común del agua

Por lo general los líquidos aumentan en volumen con la temperatura creciente y tienen coeficientes promedio de expansión de volumen diez veces mayores que los de sólidos. El agua fría es una excepción a esta regla, como podemos ver por su curva de densidad contra temperatura, que se muestra en la figura 19.11. Cuando aumenta la temperatura de 0°C a 4°C, el agua se contrae y por lo tanto aumenta su densidad. Arriba de 4°C, el agua se expande con la temperatura creciente y por ello disminuye su densidad. En consecuencia, la densidad del agua alcanza un valor máximo de 1.000 g/cm³ a 4°C.

Podemos usar este comportamiento poco común de expansión térmica del agua para explicar por qué una charca empieza a congelarse en la superficie en lugar de en el fondo. Cuando la temperatura atmosférica baja de, por ejemplo, 7°C a 6°C, el agua de la superficie también se enfría y en consecuencia disminuye en volumen. Esto significa que el agua de la superficie es más densa que el agua de abajo, que no se ha enfriado ni disminuido en volumen. Como resultado de esto, el agua de la superficie se hunde y el agua más caliente de abajo es forzada a la superficie para enfriarse. No obstante, cuando la temperatura atmosférica está entre 4°C y 0°C, el agua de la superficie se expande cuando se enfría, haciéndose menos densa que el agua de abajo. El proceso de mezcla se detiene y finalmente el agua de

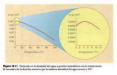


Figura 19.11 Variación en la densidad del agua a presión atmosférica con la temperatura. El recuadro de la derecha muestra que la máxima densidad del agua ocurre a 4°C.

la superficie se congela. Cuando se congela el agua, el hielo permanece en la superficie porque el hielo es menos denso que el agua. El hielo continúa aumentando en la superficie, mientras que el agua cerca del fondo permanece a 4°C. Si éste no fuera el caso, entonces los peces y otras formas de fauna marina no sobrevivirían.

19.5 Descripción macroscópica de un gas ideal

La ecuación de expansión de un volumen, $\Delta V = \beta V_i \Delta T$ está basada en la suposición de que el material tiene un volumen inicial V_i antes que ocurra el cambio de temperatura. Éste es el caso para sólidos y líquidos, porque tienen un volumen fijo a una temperatura dada.

El caso para gases es completamente diferente. Las fuerzas interatómicas dentro de gases son muy débiles y, en muchos casos, podemos imaginar que estas fuerzas no existen, y aun así haremos aproximaciones muy buenas. Nótese que *no hay separación de equilibrio* para los átomos y, por lo tanto, no hay volumen "estándar" a una temperatura dada. Por lo tanto, no podemos expresar cambios en volumen ΔV en un proceso en un gas con la ecuación 19.6 porque no tenemos volumen V_i definido al principio del proceso. Para un gas, el volumen está determinado por entero por el recipiente que contiene al gas. De esta forma, las ecuaciones que se refieran a gases contendrán el volumen V como variable, más que concentrarse en un cambio en el volumen a partir de un valor inicial.

Para un gas, es útil saber la forma en que las cantidades volumen V, presión P y temperatura T están relacionadas para una muestra de gas de masa m. En general, la ecuación que relaciona estas cantidades, llamada *ecuación de estado*, es muy complicada pero, si el gas se mantiene a presión muy baja (o baja densidad), la ecuación de estado es muy sencilla y se puede hallar experimentalmente. Este gas de baja densidad se conoce por lo general como *gas ideal*[3].

Es conveniente expresar la cantidad de gas en un volumen dado en términos del número de moles n. Un **mol** de cualquier sustancia es la cantidad de la sustancia que contiene el **número de Avogadro** $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ de partículas constitutivas (átomos o moléculas).

---

[3] Para ser más específicos, la suposición *aquí* es que la temperatura del gas no debe ser demasiado baja (el gas no debe condensarse en un líquido) ni demasiado alta, y que la presión debe ser baja. El concepto de un gas ideal implica que las moléculas de gas no interactúan excepto al colisionarse, y que el volumen molecular es insignificante en comparación con el volumen del recipiente. En realidad, un gas ideal no existe pero el concepto de un gas ideal es muy útil, porque los gases reales a bajas presiones se comportan como los gases ideales.

El número de moles n de una sustancia está relacionada con su masa m por medio de la expresión

$$n = \frac{m}{M} \tag{19.7}$$

donde M es la masa molar de la sustancia. La masa molar de cada elemento químico es la masa atómica (de la tabla periódica, apéndice C) expresada en g/mol. Por ejemplo, la masa de un átomo de He es 4.00 u (unidades de masa atómica), de modo que la masa molar del He es 4.00 g/mol. Para una sustancia molecular o un compuesto químico, se puede sumar la masa molar desde su fórmula molecular. La masa molar del oxígeno diatómico estable (O_2) es 32.0 g/mol.

Ahora supongamos que un gas ideal está confinado a un recipiente cilíndrico cuyo volumen puede hacerse variar por medio de un émbolo móvil, como en la figura 19.12. Si suponemos que el cilindro no tiene fugas, la masa (o el número de moles) del gas permanece constante. Para este sistema, experimentos realizados dan la siguiente información. Primero, cuando el gas se mantiene a temperatura constante, su presión es inversamente proporcional a su volumen (ley de Boyle). Segundo, cuando la presión del gas se mantiene constante, su volumen es directamente proporcional a su temperatura (la ley de Charles y Gay-Lussac). Estas observaciones están resumidas por la **ecuación de estado para un gas ideal:**

Ecuación de estado para un gas ideal

$$PV = nRT \tag{19.8}$$

En esta expresión, conocida como la **ley de un gas ideal,** R es una constante y n es el número de moles de gas de la muestra. Experimentos en numerosos gases demuestran que cuando la presión se aproxima a cero, la cantidad PV/nT se aproxima al mismo valor R para todos los gases. Por esta razón, R se denomina **constante universal de los gases.** En unidades del SI, en el que la presión se expresa en pascale (1 Pa = 1 N/m^2) y el volumen en metros cúbicos, el producto PV tiene unidades de newton · metro, o joules, y R tiene el valor

$$R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \tag{19.9}$$

Si la presión se expresa en atmósferas y el volumen en litros (1 L = 10^3 cm^3 = 10^{-3} m^3), entonces R tiene el valor

$$R = 0.082\,14 \text{ L} \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}$$

Con el uso de este valor de R y la ecuación 19.8, encontramos que el volumen ocupado por 1 mol de cualquier gas a presión atmosférica y a 0°C (273 K) es 22.4 L.

La ley de un gas ideal expresa que si no cambian el volumen y la temperatura de una cantidad fija de gas, entonces la presión también permanece constante. Considere una bo

Figura activa 19.12 Gas ideal confinado en un cilindro cuyo volumen puede hacerse variar por medio de un émbolo móvil.

En el vínculo Active Figures en http://www.pse6.com, usted podrá mantener constantes ya sea la temperatura o la presión y verificar la ley de Boyle y la ley de Charles y Gay-Lussac.

Figura 19.13 Se agita y se abre una botella de champaña. El líquido sale por la abertura. Un malentendido común es que la presión del interior de la botella aumenta debido a la agitación.

un día de invierno, cuando la temperatura es −20.0°C. ¿Cuánto más largo es el alambre en un día de verano cuando T_C = 35.0°C?

10. Las secciones de concreto de cierta supercarretera están diseñadas para tener una longitud de 25.0 m. Las secciones son vaciadas y curadas a 10.0°C. ¿Qué separación mínima debe dejar el ingeniero entre las secciones para eliminar el pandeo si el concreto puede alcanzar una temperatura de 50.0°C?

11. La montadura de unos lentes está hecha de plástico epóxico. A temperatura ambiente (20°C), la montadura tiene agujeros circulares de 2.20 cm de radio para los lentes. ¿A qué temperatura debe calentarse la montadura si unos lentes de 2.21 cm de radio se han de insertar en ella? El coeficiente promedio de expansión lineal para la resina epóxica es de 1.30×10^{-4} (°C)$^{-1}$.

12. Cada año, miles de niños sufren graves quemaduras con agua caliente. La figura P19.12 muestra una vista en sección transversal de un aditamento antiquemaduras para llave de agua, diseñado para evitar estos accidentes. Dentro del aparato, un resorte hecho de material con alto coeficiente de expansión térmica controla un émbolo movible. Cuando la temperatura del agua sube por encima de un valor seguro, la expansión del resorte hace que el émbolo cierre el flujo de agua. Si la longitud inicial L del resorte no estirado es 2.40 cm y su coeficiente de expansión lineal es 22.0×10^{-6} (°C)$^{-1}$, determine el aumento en longitud del resorte cuando la temperatura del agua suba 30.0°C. (Puede hallarse que el aumento en longitud sea pequeño. Por esta razón, los equipos reales tienen un diseño mecánico más complicado, para dar una mayor variación en abertura de válvula para el cambio anticipado de temperatura.)

Figura P19.12

13. El elemento activo de cierto láser está hecho de una barra de vidrio de 30.0 cm de largo por 1.50 cm de diámetro. Si la temperatura de la barra aumenta en 65.0°C, ¿cuál es el aumento en (a) su longitud, (b) su diámetro, y (c) su volumen? Suponga que el coeficiente promedio de expansión lineal del vidrio es 9.00×10^{-6}(°C)$^{-1}$.

14. **Problema de repaso.** Dentro de la pared de una casa, una sección en forma de L de tubo de agua caliente está hecho de una pieza horizontal recta de 28.0 cm de largo, un codo y una pieza vertical recta de 134 cm de largo (figura P19.14). Un montante y una tabla de piso mantienen estacionarios los extremos de esta sección de tubería de cobre. Hállese la magnitud y dirección del desplazamiento del codo cuando se abre la llave del agua caliente, con lo cual sube la temperatura del tubo de 18.0°C a 46.5°C.

Figura P19.14

15. Un anillo de bronce de 10.00 cm de diámetro a 20.0°C se calienta y desliza sobre una varilla de aluminio de 10.01 cm de diámetro a 20.0°C. Suponiendo que el coeficiente promedio de expansión lineal es constante, (a) ¿a qué temperatura debe enfriarse esta combinación para separarlos? ¿Es esto posible? (b) **¿Qué pasaría si?** ¿Qué pasaría si la varilla de aluminio fuera de 10.02 de diámetro?

16. Un agujero cuadrado de 8.00 cm por lado se corta en una lámina de cobre. (a) Calcule el cambio en el área de este agujero si la temperatura de la lámina se aumenta en 50.0 K. (b) ¿Representa este cambio un aumento o una disminución en el área encerrada por el agujero?

17. El coeficiente promedio de expansión de volumen para el tetracloruro de carbono es 5.81×10^{-4}(°C)$^{-1}$. Si un recipiente de acero de 50.0 galones se llena por completo de tetracloruro de carbono cuando la temperatura es 10.0°C, ¿cuánto se derramará cuando la temperatura suba a 30.0°C?

18. A 20.0°C, un anillo de aluminio tiene un diámetro interior de 5.000 0 cm y una varilla de bronce tiene un diámetro de 5.050 0 cm. (a) Si se calienta sólo el anillo, ¿qué temperatura debe alcanzar para que apenas se deslice sobre la varilla? (b) **¿Qué pasaría si?** Si ambos se calientan juntos, ¿qué temperatura deben alcanzar para que el anillo apenas se deslice sobre la varilla? ¿Funcionaría este último proceso?

19. Un frasco volumétrico hecho de Pirex está calibrado a 20.0°C. Se llena a la marca de 100 mL con acetona a 35.0°C. (a) ¿Cuál es el

volumen de la acetona cuando se enfría a 20.0°C? (b) ¿Qué tan significativo es el cambio en volumen del frasco?

20. Se cuela una banqueta de concreto en un día cuando la temperatura es de 20.0°C en forma tal que los extremos no se pueden mover. (a) ¿Cuál es el esfuerzo del cemento en un día caluroso de 50.0°C? (b) ¿Se fractura el concreto? Tome el módulo de elasticidad para el concreto como 7.00×10^{9} N/m² y la resistencia a la compresión como 2.00×10^{9} N/m².

21. Un cilindro hueco de aluminio de 20.0 cm de profundidad tiene una capacidad interna de 2.000 L a 20.0°C. Se llena por completo con aguarrás y luego se calienta lentamente a 80.0°C. (a) ¿Cuánto aguarrás se derrama? (b) Si el cilindro se enfría otra vez a 20.0°C, ¿a qué distancia bajo el borde del cilindro bajará la superficie del aguarrás?

22. Un vaso hecho de vidrio ordinario contiene una esfera de plomo de 4.00 cm de diámetro firmemente unida a su fondo. A una temperatura uniforme de −10.0°C, el vaso se llena hasta el borde con 118 cm³ de mercurio, que cubre por completo la esfera. ¿Cuánto mercurio se derrama del vaso si la temperatura se eleva a 30.0°C?

23. Una varilla de acero se somete a una fuerza de estiramiento de 500 N. Su área de sección transversal es 2.00 cm². Encuentre el cambio en temperatura que alargaría la varilla la misma cantidad que lo hace la fuerza de 500 N. Las tablas 12.1 y 19.1 pueden ayudar.

24. El puente Golden Gate de San Francisco tiene una longitud de 1.28 km en su distancia principal entre apoyos, uno de los más grandes del mundo. Imagine que un alambre tenso de acero con esta longitud y un área de sección transversal de 4.00×10^{-6} m² se coloca en la cubierta del puente con sus extremos unidos a las torres del puente, en un día de verano cuando la temperatura del alambre es 35.0°C. (a) Cuando llega el invierno, las torres permanecen a la misma distancia de separación y la cubierta del puente mantiene la misma forma cuando se abren sus uniones de expansión. Cuando la temperatura baja a −10.0°C, ¿cuál es la tensión en el alambre? Tome el módulo de elasticidad para el acero como de 20.0×10^{10} N/m². (b) Ocurre una deformación permanente si el esfuerzo en el acero excede su límite elástico de 3.00×10^{8} N/m². ¿A qué temperatura ocurriría esto? (c) **¿Qué pasaría si?** ¿Cómo cambiarían sus respuestas a (a) y (b) si el puente Golden Gate fuera del doble de largo?

25. Cierto telescopio forma una imagen de parte de un cúmulo de estrellas en un chip detector acoplado a carga de silicio cuadrado (CCD), de 2.00 cm por lado. Un campo de estrellas se enfoca en el chip CCD cuando se energizó primero y su temperatura es de 20.0°C. El campo de estrellas contiene 5 342 estrellas uniformemente dispersas. Para hacer más sensible el detector, se enfría a −100°C. ¿Cuántas imágenes de estrellas caben en el chip? El promedio de coeficiente de expansión lineal del silicio es $4.68 \times 10^{-6}(°C)^{-1}$.

Sección 19.5 Descripción macroscópica de un gas ideal

Nota: El problema 8 del capítulo 1 se puede asignar con esta sección.

26. Un recipiente de 8.00 L contiene gas a una temperatura de 20.0°C y una presión de 9.00 atm. (a) Determine el número de moles de gas en el recipiente. (b) ¿Cuántas moléculas hay en el vaso?

27. Una llanta de automóvil se infla con aire originalmente a 10.0°C y presión atmosférica normal. Durante el proceso, el aire se comprime a 28.0% de su volumen original y la temperatura se aumenta a 40.0°C. (a) ¿Cuál es la presión de la llanta? (b) Después que el auto corre a alta velocidad, la temperatura del aire de la llanta sube a 85.0°C y el volumen interior de la llanta aumenta en 2.00%. ¿Cuál es la nueva presión de la llanta (absoluta) en pascales?

28. Un tanque que tiene un volumen de 0.100 m³ contiene helio a 150 atm. ¿Cuántos globos se pueden llenar con el gas del tanque si cada globo llenado es una esfera de 0.300 m de diámetro a una presión absoluta de 1.20 atm?

29. Un auditorio tiene dimensiones de 10.0 m × 20.0 m × 30.0 m. ¿Cuántas moléculas de aire llenan el auditorio a 20.0°C y una presión de 101 kPa?

30. Imagine una bebé extraterrestre que juega con un globo esférico del tamaño de la Tierra en el sistema solar exterior. El helio dentro del globo tiene una temperatura uniforme de 50.0 K debido a la radiación del Sol. La presión uniforme del helio es igual a la presión atmosférica normal en la Tierra. (a) Encuentre la masa del gas del globo. (b) La bebé sopla una masa adicional de 8.00×10^{20} kg de helio en el globo. Al mismo tiempo, ella vaga más cerca del Sol y la presión del globo se duplica. Encuentre la nueva temperatura dentro del globo, cuyo volumen permanece constante.

31. Precisamente 9.00 g de agua se ponen en una olla de presión de 2.00 L y se calienta a 500°C. ¿Cuál es la presión dentro del recipiente?

32. Un mol de oxígeno está a una presión de 6.00 atm y una temperatura de 27.0°C. (a) Si el gas se calienta a volumen constante hasta que se triplica la presión, ¿cuál es la temperatura final? (b) Si el gas se calienta hasta que se duplican la presión y el volumen, ¿cuál es la temperatura final?

33. La masa de un globo de aire caliente y su carga (sin incluir el aire del interior) es de 200 kg. El aire del exterior está a 10.0°C y 101 kPa. El volumen del globo es de 400 m³. ¿A qué temperatura debe calentarse el aire del globo antes que el globo despegue del suelo? (La densidad del aire a 10.0°C es 1.25 kg/m³.)

34. Su padre y su pequeño hermano se enfrentan al mismo enigma. El aspersor del jardín de su padre y el cañón de agua de su hermano tienen tanques con capacidad de 5.00 L (figura P19.34). Su padre inserta una cantidad insignificante de insecticida en su tanque. Ambos ponen 4.00 L de agua y sellan sus tanques, de modo que también contienen aire a presión atmosférica. A continuación, cada uno utiliza una bomba manual de émbolo para inyectar más aire, hasta que la presión absoluta del tanque llega a 2.40 atm y se hace demasiado difícil mover la manija de la bomba. Ahora cada uno emplea su aparato para regar agua, no aire, hasta que la corriente se hace muy pequeña, cuando la presión del tanque llega a 1.20 atm. Entonces él debe bombearlo de nuevo, regar otra vez, y así sucesivamente. Para regar toda el agua, cada uno encuentra que debe bombear el tanque tres ve-

co. Éste es un enigma: casi toda el agua se riega como resultado del segundo bombeo. Los procesos primero y tercero de bombeo parecen iguales de difíciles, pero resulta que sale una cantidad de agua tan pequeña que es decepcionante. Explique este fenómeno.

Figura P19.34

35. (a) Encuentre el número de moles en un metro cúbico de un gas ideal a 20.0°C y presión atmosférica. (b) Para aire, el número de Avogadro de moléculas tiene masa de 28.9 g. Calcule la masa de un metro cúbico de aire. Compare el resultado con la densidad tabulada de aire.

36. La *fracción vacía* de un medio poroso es la razón entre el volumen vacío y el volumen total del material. El vacío es el espacio hueco dentro del material; puede ser llenado con un fluido. Una lata cilíndrica de 2.54 cm de diámetro y 20.0 cm de altura se llena con carbón activado que tiene una fracción vacía de 0.765. Luego se descarga y lava con un gas ideal a 25.0°C y presión de 12.5 atm. ¿Cuántos moles de gas están contenidos en el cilindro al final de este proceso?

37. Un cubo de 10.0 cm en cada arista contiene aire (con masa molar equivalente de 28.9 g/mol) a presión atmosférica y temperatura de 300 K. Encuentre (a) la masa del gas, (b) su peso, y (c) la fuerza que ejerce sobre cada cara del cubo. (d) Comente sobre la razón física por la que una muestra tan pequeña puede ejercer una fuerza tan grande.

38. A 25.0 m bajo la superficie del mar ($\rho = 1\,025$ kg/m^3), donde la temperatura es de 5.00°C, un buzo exhala una burbuja de aire que tiene un volumen de 1.00 cm^3. Si la temperatura de la superficie del mar es de 20.0°C, ¿cuál es el volumen de la burbuja justo antes de llegar a la superficie?

39. El manómetro de un tanque registra la presión manométrica, que es la diferencia entre la presión interior y la exterior. Cuando el tanque está lleno de oxígeno (O_2), contiene 12.0 kg del gas a una presión manométrica de 40.0 atm. Determine la masa de oxígeno que se ha sacado del tanque cuando la lectura de presión es de 25.0 atm. Suponga que la temperatura del tanque permanece constante.

40. Estime la masa de aire en su alcoba. Exprese las cantidad que tome como datos y el valor que mida o estime para cada una.

41. Una marca popular de refresco de cola contiene 6.50 g de dióxido de carbono disuelto en 1.00 L de bebida sin gas. Si el dióxido de carbono que se evapora es atrapado en un cilindro a 1.00 atm y 20.0°C, ¿qué volumen ocupa el gas?

42. En sistemas de vacío de alta tecnología, se alcanzan presiones de sólo 10^{-9} Pa. Calcule el número de moléculas en un recipiente de 1.00 m^3 a esta presión si la temperatura es de 27.0°C.

43. Un cuarto de volumen V contiene aire que tiene masa molar equivalente M (en g/mol). Si la temperatura del cuarto sube de T_1 a T_2, ¿qué masa de aire sale del cuarto? Suponga que la presión de aire del cuarto se mantiene en P_0.

44. Una campana de inmersión en forma de cilindro con altura de 2.50 m se cierra en el extremo superior y se abre en el extremo inferior. La campana es bajada desde aire al agua de mar ($\rho = 1.025$ g/cm^3). El aire de la campana está inicialmente a 20.0°C. La campana es bajada a una profundidad (medida en el fondo de la campana) de 45.0 brazas, o sea 82.3 m. A esta profundidad, la temperatura del agua es de 4.0°C y la campana está en equilibrio térmico con el agua. (a) ¿A qué altura sube el agua de mar en la campana? (b) ¿A qué presión mínima debe elevarse el aire de la campana para expulsar el agua que entró?

Problemas adicionales

45. Un estudiante mide la longitud de una varilla de bronce con una cinta de acero a 20.0°C. La lectura es 95.00 cm. ¿Qué indicará la cinta para la longitud de la varilla cuando ésta y la cinta estén a (a) −15.0°C y (b) 55.0°C?

46. La densidad de la gasolina es de 730 kg/m^3 a 0°C. Su coeficiente promedio de expansión de volumen es 9.60×10^{-4}/°C. Si 1.00 galón de gasolina ocupa 0.003 80 m^3, ¿cuántos kilogramos extra de gasolina se obtendrían si se compran 10.0 galones de gasolina a 0°C en lugar de a 20.0°C de una bomba que no está compensada en temperatura?

47. Un termómetro de mercurio se construye como se muestra en la figura P19.47. El tubo capilar tiene un diámetro de 0.004 00 cm,

Figura P19.47 Problemas 47 y 48.

(a)

(b)

Figura P19.54

55. La placa rectangular que se muestra en la figura P19.55 tiene un área A_i igual a ℓw. Si la temperatura aumenta en ΔT, cada dimensión aumenta de acuerdo con la ecuación $\Delta L = \alpha L_i \Delta T$, donde α es el coeficiente promedio de expansión lineal. Demuestre que el aumento en área es $\Delta A = 2\alpha A_i \Delta T$. ¿Qué aproximación supone esta expresión?

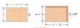


Figura P19.55

56. **Problema de repaso.** Un reloj con péndulo de bronce tiene un periodo de 1.000 s a 20.0°C. Si la temperatura aumenta a 30.0°C, (a) ¿cuánto cambia el periodo, y (b) cuánto se adelanta o se atrasa en una semana?

57. **Problema de repaso.** Considere un cuerpo con cualquiera de las formas que se ven en la tabla 10.2. ¿Cuál es el porcentaje de aumento del momento de inercia del cuerpo cuando se calienta de 0°C a 100°C si está compuesto de (a) cobre o (b) aluminio? Suponga que el coeficiente promedio de expansión lineal que se ven en la tabla 19.1 no varían entre 0°C y 100°C.

58. (a) Deduzca una expresión para hallar el empuje hidrostático sobre un globo esférico, sumergido en agua, como función de la profundidad bajo la superficie, el volumen del globo en la superficie, la presión en la superficie y la densidad del agua. (Suponga que la temperatura del agua no cambia con la profundidad). (b) ¿Aumenta o disminuye el empuje hidrostático cuando el globo se sumerge? (c) ¿A qué profundidad es que el empuje hidrostático es la mitad de su valor en la superficie?

59. Un alambre de cobre y un alambre de plomo se unen, extremo con extremo. El alambre combinado tiene un coeficiente efectivo de expansión lineal de $20.0 \times 10^{-6} (°\mathrm{C})^{-1}$. ¿Qué fracción de la longitud del alambre combinado es de cobre?

60. **Problema de repaso.** Después de una colisión en el espacio exterior, un disco de cobre a 850°C está girando alrededor de su eje con una rapidez angular de 25.0 rad/s. Cuando el disco irradia luz infrarroja, su temperatura baja a 20.0°C. No hay par de torsión externo que actúe sobre el disco. (a) ¿Cambia la rapidez angular cuando se enfría el disco? Explique por qué. (b) ¿Cuál es la rapidez angular a la temperatura más baja?

61. Dos tramos de concreto de un puente de 250 m de largo se colocan extremo con extremo de modo que no se compensa la expansión (figura P19.61a). Si ocurre un aumento de temperatura de 20.0°C, ¿cuál es la altura y a la que suben los tramos cuando se pandean (figura P19.61b)?

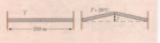


Figura P19.61 Problemas 61 y 62.

62. Dos tramos de concreto de un puente de longitud L se colocan extremo con extremo de modo que no se compensa la expansión (figura P19.61a). Si ocurre un aumento de temperatura ΔT, ¿cuál es la altura y a la que suben los tramos cuando se pandean (figura P19.61b)?

63. (a) Demuestre que la densidad de un gas ideal que ocupa un volumen V está dada por $\rho = PM/RT$, donde M es la masa molar. (b) Determine la densidad del oxígeno a presión atmosférica y 20.0°C.

64. (a) Utilice la ecuación de estado para un gas ideal y la definición del coeficiente de expansión de volumen, en la forma $\beta = (1/V)dV/dT$, para demostrar que el coeficiente de expansión de volumen para un gas ideal a presión constante está dado por $\beta = 1/T$, donde T es la temperatura absoluta. (b) ¿Qué valor predice esta expresión para β a 0°C? Compare este resultado con los valores experimentales para helio y aire en la tabla 19.1. Nótese que éstos son mucho mayores que los coeficientes de expansión de volumen para la mayor parte de líquidos y sólidos.

65. Comenzando con la ecuación 19.10, demuestre que la presión total P en un recipiente lleno con una mezcla de varios gases ideales es $P = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots$, donde $P_1, P_2, \ldots$ son las presiones que cada gas ejercería si por sí solo llenara el recipiente (estas

cionaria bajan con respecto al techo y sienten una fuerza de fricción cinética que actúa sobre el techo. Elementos de área arriba de la línea estacionaria se deslizan hacia arriba en el techo y sobre ellos la fricción cinética actúa hacia abajo paralela al techo. La línea estacionaria actúa sobre la placa mientras que la temperatura está cambiando. La placa como un todo está muy cerca del equilibrio, de modo que la fuerza neta de fricción sobre ella debe ser igual al componente de su peso que actúa hacia abajo en el plano inclinado. (a) Demuestre que la línea estacionaria está a una distancia de

$$\frac{L}{2}\left(1-\frac{\tan\theta}{\mu_k}\right)$$

abajo del borde superior de la placa. (b) Analice las fuerzas que actúan sobre la placa cuando la temperatura está bajando, y demuestre que la línea estacionaria está a la misma distancia arriba del borde inferior de la placa. (c) Demuestre que la placa baja del techo como si fuera gusano, moviéndose cada día una distancia de

$$\frac{L(\alpha_2-\alpha_1)(T_h-T_c)\tan\theta}{\mu_k}$$

(d) Evalúe la distancia que una placa de aluminio se mueve cada día si su longitud es 1.20 m, si la temperatura tiene ciclos entre 4.00°C y 36.0°C, y si el techo tiene una pendiente de 18.5°, el coeficiente de expansión lineal es $1.50 \times 10^{-5}\,(^{\circ}\mathrm{C})^{-1}$ y el coeficiente de fricción es 0.420 con la placa. (e) **¿Qué pasaría si?** ¿Qué pasaría si el coeficiente de expansión de la placa es menor que el del techo? ¿Subirá la placa por el techo?

Respuestas a las *preguntas rápidas*

19.1 (c) La dirección de la transferencia de energía depende sólo de la temperatura y no del tamaño del cuerpo o de cuál objeto tiene más masa.

19.2 (c) La frase "dos veces más caliente" se refiere a la razón entre temperaturas. Cuando las temperaturas dadas se convierten a kelvin, sólo las de la parte (c) están en la razón correcta.

19.3 (c) La gasolina tiene el mayor coeficiente promedio de expansión de volumen.

19.4 (c) Una cavidad en un material se expande en la misma forma como si todo estuviera lleno de material.

19.5 (a) En un día frío, el aire atrapado en las burbujas está reducido en presión, según la ley de un gas ideal. Por lo tanto, el volumen de las burbujas puede ser menor que en un día caluroso, y el contenido del paquete puede moverse más.

19.6 (b) Debido a la menor temperatura del helio, la presión del globo se reduce. La presión atmosférica alrededor del globo lo comprime a un tamaño menor.

19.7 (b) Debido a la mayor temperatura, el aire se expande. En consecuencia, parte del aire se fuga al exterior, dejando menos aire en la casa.

El calor y la primera ley de la termodinámica

El sol está ocultándose en el lago Moraine del Parque Nacional Banff, Alberta, Canadá, cuando la temperatura del aire cae por debajo del punto de congelación. Los cristales de hielo que se forman en el aire frío se mueven hacia arriba en forma de corrientes de aire cálido. Por lo tanto, los cristales de agua flotan por encima del lago y forman una niebla que se ve en la parte inferior de la fotografía. Los cristales de hielo que se ven en la parte superior de la fotografía están en una fase de crecimiento. Los cristales de hielo que se ven en la parte inferior de la fotografía están en una fase de caída, que resultaría de la transferencia de energía. (Corbis/Bettmann/Bettmann Archive) Imágenes

Hacia 1850, se consideraba que los campos de la termodinámica y mecánica eran dos ramas distintas de la ciencia, y la ley de conservación de la energía parecía describir sólo ciertas clases de sistemas mecánicos. Poco después, experimentos realizados a mediados del siglo XIX por el inglés James Joule, y otros, demostraron que había un fuerte enlace entre la transferencia de energía por calor en procesos térmicos y la transferencia de energía por trabajo en procesos mecánicos. Ahora sabemos que la energía interna, que formalmente definimos en este capítulo, puede transformarse en energía mecánica. Una vez generalizado el concepto de energía mecánica para abarcar también energía interna, la ley de la conservación de la energía emergió como ley universal de la naturaleza.

Este capítulo se concentra en el concepto de energía interna, en los procesos por medio de los cuales se transfiere energía, en la primera ley de la termodinámica y en algunas de las más importantes aplicaciones de la primera ley. La primera ley de la termodinámica es un enunciado de la conservación de la energía. Describe sistemas en los que el único cambio de energía es el de energía interna y las transferencias de energía son por calor y trabajo. Una diferencia importante de nuestro estudio del trabajo en este capítulo, con respecto a los capítulos sobre mecánica, es que consideraremos el trabajo realizado sobre sistemas deformables.

20.1 Calor y energía interna

Desde el principio, es importante que hagamos una distinción mayor entre energía interna y calor. **Energía interna es toda la energía de un sistema que está asociada con sus componentes microscópicos, átomos y moléculas, cuando se ve desde un marco de referencia en reposo con respecto al centro de masa del sistema.** La última parte de esta oración asegura que cualquier energía cinética volumétrica del sistema, debida a su movimiento por el espacio, no está incluida en energía interna. La energía interna incluye energía cinética de movimiento aleatorio de traslación, rotación y vibración de moléculas, energía potencial dentro de moléculas y energía potencial entre moléculas. Es útil relacionar energía interna con la temperatura de un cuerpo, pero esta relación es limitada; en la sección 20.3 demostramos que pueden ocurrir cambios en energía interna en ausencia de cambios de temperatura.

El *calor* se define como la transferencia de energía a través de la frontera de un sistema debido a la diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. Cuando *calentamos* una sustancia, a ella transferimos energía al ponerla en contacto con el entorno de una temperatura más alta. Éste es el caso, por ejemplo, cuando se pone una sartén con agua fría en el quemador de una estufa; el quemador está a una temperatura más alta que el agua, de modo que el agua gana energía. También usaremos el término *calor* para representar la cantidad de energía transferida por este método.

Los científicos consideraban el calor como un fluido llamado *calórico*, que pensaban se transfería entre cuerpos; así, definieron el calor en términos de los cambios de temperatura producidos en un cuerpo durante el calentamiento. En la actualidad, reconocemos la diferencia distintiva entre energía interna y calor. Sin embargo, hablamos de cantidades con

¡ADVERTENCIA!

20.1 Energía interna, energía térmica y energía de enlace

Al leer otros libros de física, el estudiante puede ver términos como *energía térmica* y *energía de enlace*. La energía térmica se puede interpretar como la parte de la energía interna asociada con el movimiento aleatorio de moléculas y, en consecuencia, relacionado con la temperatura. La energía de enlace es energía potencial intermolecular. Por lo tanto,

energía interna = energía térmica
+ energía de enlace

Si bien esta división se presenta aquí como aclaración con respecto a otros textos, no usaremos estos términos porque no hay necesidad de ellos.

¡ADVERTENCIA!

20.2 Calor, temperatura y energía interna son diferentes

Al leer el periódico o escuchar la radio, debemos estar alertas respecto a frases incorrectamente empleadas que contengan la palabra *calor,* y debemos pensar en la palabra apropiada a usar en lugar de *calor.* Ejemplos incorrectos son, "Cuando el camión frenó hasta detenerse, una gran cantidad de calor se generó por fricción" y "El calor de un caluroso día de verano…"

nombres que no definen correctamente las cantidades, pero que se han incrustado en la tradición de la física con base en estas viejas ideas. Ejemplos de estas cantidades son *capacidad calorífica* y *calor latente* (secciones 20.2 y 20.3).

Como analogía a la distinción entre calor y energía interna, considere la distinción entre trabajo y energía mecánica estudiada en el capítulo 7. El trabajo realizado sobre un sistema es una medida de la cantidad de energía transferida al sistema desde su entorno, mientras que la energía mecánica del sistema (cinética más potencial) es una consecuencia del movimiento y configuración del sistema. Por lo tanto, cuando una persona realiza trabajo sobre un sistema, se transfiere energía de la persona al sistema. No tiene sentido hablar de trabajo *de* un sistema; se puede hablar sólo del trabajo realizado *sobre* el sistema o *por* el sistema cuando ha ocurrido algún proceso en el que se ha transferido energía hacia o desde el sistema. Análogamente, no tiene sentido hablar del calor *de* un sistema; se puede hablar de *calor* sólo cuando se ha transferido energía como resultado de una diferencia de temperatura. Calor y trabajo son formas de cambiar la energía de un sistema.

También es importante reconocer que la energía interna de un sistema se puede cambiar incluso cuando no se transfiera energía por calor. Por ejemplo, cuando un gas en un recipiente aislado es comprimido por un émbolo, aumentan la temperatura del gas y su energía interna, pero no ha ocurrido transferencia de energía por calor desde el entorno al gas. Si entonces el gas se expande rápidamente, se enfría y disminuye su energía interna, pero no ha tenido lugar transferencia de energía por calor desde él a su entorno. Los cambios de temperatura del gas se deben no a una diferencia en temperatura entre el gas y su entorno, sino más bien a la compresión y la expansión. En cada caso, se transfiere energía hacia o desde el gas por *trabajo.* Los cambios en energía interna en estos ejemplos están evidenciados por cambios correspondientes en la temperatura del gas.

James Prescott Joule

Físico inglés (1818–1889)

Joule recibió un poco de educación formal en matemáticas, filosofía y química de John Dalton, pero en gran parte fue autodidacta. La investigación de Joule lo llevó al establecimiento del principio de conservación de la energía. Su estudio de la relación cuantitativa entre efectos eléctricos, mecánicos y químicos del calor, culminaron en su anuncio, en 1843, de la cantidad de trabajo necesaria para producir una unidad de energía, llamada equivalente mecánico del calor. *(Por amable permiso del Director y Consejo de la Royal Society.)*

Unidades de calor

Como ya hemos mencionado, los primeros estudios del calor se concentraron en el resultante aumento en temperatura de una sustancia, que con frecuencia era agua. Las primeras nociones de calor basadas en calórico sugerían que el flujo de este fluido de una sustancia a otra causaba cambios en temperatura. Del nombre de este mítico fluido tenemos una unidad de energía relacionada con procesos térmicos, la **caloría (cal),** que se define como **la cantidad de transferencia de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5°C a 15.5°C.**[1] (Nótese que la "Caloría," escrita con "C" mayúscula y que se usa para describir el contenido de energía de alimentos, es en realidad una kilocaloría). La unidad de energía en el sistema convencional en Estados Unidos es la **unidad térmica británica (Btu),** que se define como **la cantidad de transferencia de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 lb de agua de 63°F a 64°F.**

En la comunidad científica se hace ahora un creciente uso de la unidad de energía del SI, el *joule,* para describir procesos térmicos. En este texto, el calor, trabajo y energía interna, suelen medirse en joules. (Nótese que el calor y el trabajo se miden en unidades de energía. No se confundan estos dos medios de *transferencia* de energía con la energía en sí, que también se mide en joules.)

El equivalente mecánico del calor

En los capítulos 7 y 8 encontramos que, siempre que haya fricción en un sistema mecánico, se pierde parte de la energía mecánica; en otras palabras, no se conserva energía mecánica en presencia de fuerzas no conservativas. Varios experimentos demuestran que esta energía mecánica perdida no desaparece simplemente, sino que se transforma en energía interna. Podemos realizar este experimento en casa con sólo meter un clavo en una pieza de madera, usando para esto un martillo. ¿Qué ocurre con toda la energía cinética del martillo una

---

[1] Originalmente, la caloría se definía como el "calor" necesario para elevar en 1°C la temperatura de 1 g de agua. Sin embargo, cuidadosas mediciones demostraron que la cantidad de energía necesaria para producir el cambio de 1°C depende en parte de la temperatura inicial; por lo tanto, evolucionó una definición más precisa.

nuevo ejemplo de transferencia de energía para alegar en nuevo que problemas con las 5 magnitudes de nuestro intercambio sobre de calgaro sencillo de transferencia de energía.

10.1 Capacidad calorífica. Cada una nuevo precisión de una nuevo es el calor como la cantidad de energía que se transfiere a un cuerpo o a un sistema de cuerpos en un proceso. Además, nuevo que es la energía que precisa una cantidad 1 J/ m a la temperatura de una kilomita, Kelvin.

$$Q = C\Delta T \qquad \textbf{10.1}$$

El **calor específico** c de una sustancia es la capacidad calorífica por unidad de masa. Por lo tanto, si la energía Q se transfiere a una nuevo de una nuevo m con una m. La temperatura de nuevo cambia de T_1 a T_2, la capacidad calorífica es $mc\Delta T$.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \qquad \textbf{10.2}$$

El calor específico c de nuevo una nuevo de la elementos necesario que se nuevo de 1 kilogramo de nuevo 1 Kelvin. Cada nuevo tiene su propio calor específico. Por lo que, de 1kilo, aparecen c cada vaso kilo 10 material para cada vez. A nuevo particular, la temperatura. La nuevo 10.1 indica nuevo específico representativo.

Cada nuevo tiene su propio calor específico. Por lo que, nuevo una nuevo de masa m de nuevo de nuevo a la nuevo a la nuevo de temperatura ΔT nuevo.

$$Q = mc\Delta T \qquad \textbf{10.3}$$

Tabla 10.1
Calores específicos de nuevo
a 1 atm y cuarto nuevo (20 °C)

	Calor específico	
Sustancia	**J/kg · K**	**cal/g · K**
Sólidos elementales		
Aluminio	900	0.215
Berilio	1830	0.436
Cobre	387	0.093
Germanio	322	0.077
Oro	129	0.031
Hierro	449	0.107
Plomo	128	0.031
Magnesio	1020	0.244
Mercurio	140	0.033
Plata	236	0.056
Silicio	703	0.168
Otros sólidos		
Arenisca	1700	0.406
Granito	803	0.192
Hielo (−5 °C)	2100	0.502
Marmol	880	0.21
Madera	1700	0.41
Líquidos		
Alcohol etílico	2400	0.58
Mercurio	140	0.033
Agua (15 °C)	4186	1
Agua		
Agua (100 °C)	4220	1.01

Calor específico

ADVERTENCIA

10.1 Una deshidratación adecuada de tero

El cuerpo cuyo adquiere a un nuevo de 1 kilogramo de nuevo de 1 Kelvin de temperatura a nuevo de nuevo. Cada nuevo tiene su propio calor específico. Por lo que, nuevo de nuevo a nuevo a nuevo a nuevo con nuevo nuevo. Cada nuevo que una nuevo de nuevo

Por ejemplo, la energía necesaria para elevar en 3.00°C la temperatura de 0.500 kg de agua es (0.500 kg)(4 186 J/kg·°C)(3.00°C) = 6.28×10^3 J. Nótese que cuando aumenta la temperatura, Q y ΔT se toman como positivos y se transfiere energía hacia dentro del sistema. Cuando disminuye la temperatura, Q y ΔT son negativos y se transfiere energía hacia fuera del sistema.

El calor específico varía con la temperatura. No obstante, si los intervalos de temperatura no son demasiado grandes, la variación de temperatura se puede despreciar y c se puede tratar como una constante.[2] Por ejemplo, el calor específico del agua varía en sólo 1% de 0°C a 100°C a presión atmosférica. A menos que se indique otra cosa, despreciamos aquí estas variaciones.

Se encuentra que los valores medidos de calores específicos dependen de las condiciones del experimento. En general, las mediciones hechas en un proceso de presión constante son diferentes a las hechas en un proceso de volumen constante. Para sólidos y líquidos, la diferencia entre los dos valores suele ser no mayor de unos cuantos puntos porcentuales y con frecuencia se desecha. Casi todos los valores dados en la tabla 20.1 se midieron a presión atmosférica y temperatura ambiente. Los calores específicos para gases medidos a presión constante son muy diferentes de los valores medidos a volumen constante (véase el capítulo 21).

Pregunta rápida 20.1 Imaginemos tener, de cada uno, 1 kg de hierro, de vidrio y de agua, y que las tres muestras están a 10°C. Ordene las muestras de menor a mayor temperatura después de agregar 100 J de energía a cada muestra.

Pregunta rápida 20.2 Considerando las mismas muestras que en la Pregunta Rápida 20.1, ordénelas de menor a mayor por la cantidad de energía transferida por calor si cada muestra aumenta su temperatura en 20°C.

Es interesante observar de la tabla 20.1 que el agua tiene el más alto calor específico de los materiales comunes. Este alto calor específico es causante, en parte, de las moderadas temperaturas que se encuentran cerca de grandes masas de agua. Cuando disminuye la temperatura de una masa de agua durante el invierno, por medio de calor se transfiere energía del agua fría al aire, aumentando así la energía interna del aire. Debido al alto calor específico del agua, una cantidad relativamente grande de energía se transfiere al aire para incluso modestos cambios de temperatura del agua. El aire lleva esta energía interna hacia tierra cuando los vientos prevalecientes sean favorables. Por ejemplo, los vientos prevalecientes en la costa oeste de Estados Unidos son hacia tierra (hacia el este). Por lo tanto, la energía liberada por el océano Pacífico cuando se enfría mantiene las zonas costeras mucho más calientes de lo que serían de otro modo. Esto explica por qué los estados de la costa oeste generalmente tienen inviernos más favorables que los estados de la costa del este, donde los vientos prevalecientes no tienden a llevar la energía hacia tierra.

Conservación de la energía: calorimetría

Una técnica para medir calor específico comprende en calentar una muestra a una temperatura conocida T_x, poniéndola en un vaso que contenga agua de masa conocida y temperatura $T_w < T_x$, y midiendo la temperatura del agua después de alcanzar el equilibrio. Esta técnica se denomina **calorimetría,** y los dispositivos en los que se presenta esta transferencia de energía se llaman **calorímetros**. Si el sistema de la muestra y el agua está aislado, la ley de la conservación de la energía exige que la cantidad de energía que sale de la muestra (de calor específico desconocido) sea igual a la cantidad de energía que entre al agua.[3]

¡ADVERTENCIA!

20.4 Se puede transferir energía por cualquier método

Usaremos Q para representar la cantidad de energía transferida, pero recuérdese que la transferencia de energía en la ecuación 20.4 podría ser por *cualquiera* de los métodos introducidos en el capítulo 7; no tiene que ser calor. Por ejemplo, al doblar repetidamente el alambre de un gancho para colgar ropa, por *trabajo* se eleva la temperatura hasta el punto de doblarlo.

---

[2] La definición dada por la ecuación 20.3 supone que el calor específico no varía con la temperatura en el intervalo $\Delta T = T_f - T_i$. En general, si c varía con la temperatura en el intervalo, entonces la expresión correcta para Q es $Q = m\int_{T_i}^{T_f} c\, dT$.

[3] Para mediciones precisas, el recipiente de agua debe estar incluido en nuestros cálculos, porque también intercambia energía con la muestra. Sin embargo, hacer esto requiere un conocimiento de su masa y composición. Si la masa del agua es mucho mayor que la del recipiente, podemos despreciar los efectos del recipiente.

⚠ ADVERTENCIA

21.1 Recuerda el signo de Q y W

Es importante que recuerdes que Q es positivo si el calor entra en el sistema (o si hace que la temperatura del sistema aumente) y que W es positivo si el sistema realiza trabajo sobre su entorno (o si hace que el entorno pierda energía). Si el sistema gana energía Q_{ent} (entra en vez de salir) y realiza trabajo W (sale en vez de entrar), el cambio de energía interna del sistema es $\Delta E_{\text{int}} = Q_{\text{ent}} - W$. Si tu libro de texto o tu profesor usan otra convención para Q y W, no te preocupes, simplemente cambia el signo de Q o W en la ecuación de energía.

Un intercambio de energía que permite escribir la correspondiente conservación de energía como

$$Q_{\text{ent}} = E_{\text{int}} \tag{21.1}$$

El signo negativo de la presión se incluye para hacerla consistente con nuestra convención de signos para el trabajo.

Sustituye que Δx es la misma en ambos sistemas (en otro capítulo de mecánica, aprendiste que el trabajo realizado por una fuerza es el producto de la fuerza por el desplazamiento) y que $\Delta_{\text{ent}} = \Delta_{\text{sal}}$ (el calor correspondiente para el sistema que gana energía es el mismo que el que pierde el otro sistema). Si sustituyes la ecuación 21.1, incorporamos que la conducción de energía por el aparato $\Delta_{\text{ent}} = \Delta_{\text{sal}}$ y que Δx es la misma en ambos sistemas, y reconocemos que ΔE_{int} es el cambio de energía específica de masa $\Delta E_{\text{int}} = E_{\text{int}}^{\text{f}} - E_{\text{int}}^{\text{i}}$ que es negativo, la ecuación de cada aparato se convierte en

$$m_{\text{sal}}\left(E_{\text{int}}^{\text{f}} - E_{\text{int}}^{\text{i}}\right) = m_{\text{ent}}\left(E_{\text{int}}^{\text{f}} - E_{\text{int}}^{\text{i}}\right)$$

Si dividimos m_{sal} entre m_{ent},

$$\frac{m_{\text{sal}}}{m_{\text{ent}}} = \frac{E_{\text{int}}^{\text{f}} - E_{\text{int}}^{\text{i}}}{E_{\text{int}}^{\text{f}} - E_{\text{int}}^{\text{i}}}$$

Ejemplo 21.2 El aparato de un frigorífico

Un frigorífico de 1000 kg de masa se enfría a 250 K. Luego se le añade 1 kg de agua a 300 K. Si el frigorífico está aislado térmicamente, ¿cuál es la temperatura final del sistema? Ignora el calor específico del frigorífico.

Solución Se aplica que la masa del frigorífico es

$$m_{\text{sal}} = 1000\ \text{kg}, \quad T_{\text{sal}}^{\text{i}} = 250\ \text{K}, \quad T_{\text{sal}}^{\text{f}} = 250\ \text{K}$$

y que la masa del agua es

$$m_{\text{ent}} = 1\ \text{kg}, \quad T_{\text{ent}}^{\text{i}} = 300\ \text{K}, \quad T_{\text{ent}}^{\text{f}} = 250\ \text{K}$$

El agua necesitamos que

$$c_{\text{w}} = 4185\ \text{J/kg K}$$

Es una ecuación con tres incógnitas y dos ecuaciones, pero sabemos que el calorímetro está aislado, por lo que $Q_{\text{ent}} = 0$ y podemos usar la ecuación 21.1 para relacionar los cambios de energía interna del frigorífico y del agua. Como el frigorífico no realiza trabajo, $W = 0$ y podemos usar la ecuación 21.1 para relacionar los cambios de energía interna del frigorífico y del agua. Como el frigorífico no realiza trabajo, $W = 0$ y podemos usar la ecuación 21.1 para relacionar los cambios de energía interna del frigorífico y del agua.

Solución La energía interna de la fuerza es

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

Como cada vez el artículo vale más cuanto más gana la bola, hay un gran lugar por hacer. Se trata de un problema muy complejo, pero puede aproximarse usando procesos elásticos en el agua. Si la bola se mueve a una velocidad v y choca con otra bola de masa m que está inicialmente en reposo, la velocidad de la bola que se mueve después del choque es $v_{\text{f}} = \frac{m_{\text{ent}} - m_{\text{sal}}}{m_{\text{ent}} + m_{\text{sal}}} v_{\text{i}}$.

¿Qué pasa si? Supongo que nuestro sistema es muy complejo y que la bola se mueve a una velocidad de 10 m/s y que la masa de la bola es 0,5 kg. ¿Cuál es la velocidad de la bola después de la colisión? Si la masa de la bola es 0,5 kg, ¿cuál es la velocidad de la bola después de la colisión?

Solución Si la masa de la bola es 0,5 kg, la velocidad del sistema es 10 m/s, por lo que la diferencia de temperatura es 0,05 grados. Si la masa de la bola es 0,5 kg, la velocidad del sistema es 10 m/s, por lo que la diferencia de temperatura es 0,05 grados. Si la masa de la bola es 0,5 kg, la velocidad del sistema es 10 m/s, por lo que la diferencia de temperatura es 0,05 grados. Si la masa de la bola es 0,5 kg, la velocidad del sistema es 10 m/s, por lo que la diferencia de temperatura es 0,05 grados. ¿Cuál es la velocidad de la bola después de la colisión?

Ejemplo 21.3 Pero de acuerdo con el número

Un aparato elástico que hace de pista, con una longitud de 5 km, tiene una masa de 500 kg y está sometido a fricción. Si la bola se mueve a una velocidad de 10 m/s y choca con otra bola que está inicialmente en reposo, ¿Cuál es el cambio de energía interna del sistema?

Solución La energía cinética de la bola es

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

Como cada vez el artículo vale más cuanto más gana la bola, hay un gran lugar por hacer. Se trata de un problema muy complejo, pero puede aproximarse usando procesos elásticos en el agua. Si la bola se mueve a una velocidad v y choca con otra bola de masa m que está inicialmente en reposo, la velocidad de la bola que se mueve después del choque es $v_{\text{f}} = \frac{m_{\text{ent}} - m_{\text{sal}}}{m_{\text{ent}} + m_{\text{sal}}} v_{\text{i}}$.

¿Qué pasa si? Supongo que nuestro sistema es muy complejo y que la bola se mueve a una velocidad de 10 m/s y que la masa de la bola es 0,5 kg. ¿Cuál es la velocidad de la bola después de la colisión? Si la masa de la bola es 0,5 kg, ¿cuál es la velocidad de la bola después de la colisión?

Solución Si la masa de la bola es 0,5 kg, la velocidad del sistema es 10 m/s, por lo que la diferencia de temperatura es 0,05 grados. Si la masa de la bola es 0,5 kg, la velocidad del sistema es 10 m/s, por lo que la diferencia de temperatura es 0,05 grados. Si la masa de la bola es 0,5 kg, la velocidad del sistema es 10 m/s, por lo que la diferencia de temperatura es 0,05 grados. ¿Cuál es la velocidad de la bola después de la colisión?

¿Qué sucede si Suponga que se mezcla el mismo número de gramos de hielo a 0 °C y agua a 100 °C en un recipiente térmicamente aislado. Cuando el sistema alcanza el equilibrio, ¿cuál es la temperatura final del sistema?

Respuesta Si, como antes, se usa L_f = 80 cal/g para el calor de fusión del hielo, se puede escribir la ecuación de conservación de la energía. Por lo tanto, una cantidad dada de energía se usa para fundir el hielo y otra cantidad igual de energía se libera cuando el agua se enfría. La temperatura final de la mezcla, T_f, satisface la ecuación

$$Q = -Q \quad \text{o} \quad m_{hielo}L_f = -m_{agua}c_{agua}(T_f - T_i)$$

Como $m_{hielo} = m_{agua}$, se puede cancelar la masa en ambos lados de la ecuación. Al despejar T_f se obtiene

$$T_f = \frac{L_f}{c_{agua}} + T_i = \frac{80\ \text{cal/g}}{1\ \text{cal/g}\cdot°\text{C}} + 100\ °\text{C} = 180\ °\text{C}$$

Observe que en este experimento no que la fase de agua a cero grados Celsius sea posible porque el hielo se funde y el agua líquida se congela. Sólo se logra una mezcla de agua líquida a temperatura intermedia.

33.3 Calor latente

En la ecuación que usa mientras experimenta un cambio de temperatura cuando se transfiere energía térmica a una sustancia, el calor específico es el factor que relaciona la cantidad de energía térmica con el cambio de temperatura. Para el caso cuando que una sustancia fluye de la temperatura constante de una fase a otra, una cosa también es cierta: cuando se transfiere energía térmica a una sustancia, el calor específico es el factor que relaciona la cantidad de energía térmica con el cambio de fase. Por ejemplo, si se transfiere energía térmica a un cubito de hielo a 0 °C, el hielo comienza a fundirse y el cubito se convierte en agua a 0 °C. Si se transfiere más energía térmica al agua, la temperatura del agua comienza a aumentar. Si, mientras los refrigeradores en ocasiones que fabrican su propio hielo, se quiere congelar agua a 0 °C, se debe quitar energía térmica. La cantidad de energía térmica que se transfiere a una sustancia o desde una sustancia cuando ocurre un cambio de fase depende de la masa de la sustancia y de la cantidad de energía que se requiere para cambiar la fase de un kilogramo de la sustancia.

Cuando se da ese cambio, diferentes sustancias requieren de cantidades diferentes de energía térmica para cambiar de fase. Por ejemplo, se requiere 334 kJ de energía térmica para fundir un kilogramo de hielo a 0 °C, pero se requiere 2 256 kJ para convertir un kilogramo de agua a 100 °C en vapor. Del mismo modo, se requiere 334 kJ de energía térmica para fundir un kilogramo de hielo a 0 °C, pero se requiere 2 256 kJ para convertir un kilogramo de agua a 100 °C en vapor. Por lo tanto, la cantidad de energía que se debe quitar de un kilogramo de agua a 0 °C para convertirla en hielo a 0 °C es 334 kJ. Si se quita más energía, el hielo comienza a enfriarse. La cantidad de energía requerida o liberada por unidad de masa para cambiar la fase de una sustancia se conoce como su calor latente de fusión o de vaporización, dependiendo de si se trata de un cambio de fase de sólido a líquido o de líquido a vapor, respectivamente. La cantidad Q de energía que se transfiere a una muestra de masa m que experimenta un cambio de fase es igual a su calor latente de fusión o de vaporización L multiplicado por la masa:

$$Q = \pm mL \tag{33.6}$$

Calor latente de fusión L_f es el número específico requerido para fundir un kilo de sólido a su punto de fusión. Por ejemplo, el calor latente de fusión del hielo es 334 kJ/kg y el del plomo es 23 kJ/kg. Por lo tanto, se requiere 334 kJ de energía para fundir 1 kg de hielo a 0 °C, pero sólo se requiere 23 kJ de energía para fundir 1 kg de plomo a su punto de fusión de 327 °C. Los calores de fusión de algunas sustancias comunes se muestran en la tabla 33.2. El signo positivo de la ecuación 33.6 se emplea cuando la energía es absorbida por la sustancia, como en el caso de la fusión. El signo negativo se emplea cuando se libera energía, como en el caso de la congelación. Por ejemplo, si se quiere congelar 1 kg de agua a 0 °C, se debe quitar 334 kJ de energía térmica.

Calor latente de vaporización L_v es el número específico requerido para convertir un kilo de líquido en vapor a su punto de ebullición. Por ejemplo, el calor latente de vaporización del agua es 2 256 kJ/kg, pero el del plomo es 871 kJ/kg. Los calores de vaporización de algunas sustancias comunes se muestran en la tabla 33.2. Observe que el calor de vaporización es siempre mayor que el de fusión. Es mucho más difícil romper los enlaces entre las moléculas de un líquido que romper los enlaces que mantienen a las moléculas en una red cristalina. Observe que el signo positivo se usa cuando la energía es absorbida por la sustancia, como en el caso de la ebullición, y el signo negativo se usa cuando la energía es liberada, como en el caso de la condensación.

CONCEPTO

33.3 Los signos son diferentes

Cuando se da un cambio, ¿siempre se emplea el signo más (+) para el calor latente? No. Cuando una sustancia se funde o se vaporiza, se debe agregar energía térmica a la sustancia para que ocurra el cambio de fase. Por lo tanto, se emplea el signo más (+). Cuando se congela o se condensa, se debe quitar energía térmica a la sustancia para que ocurra el cambio de fase. Por lo tanto, se emplea el signo menos (−).

Calor latente

Tabla 10.3

Propiedades de algunos metales comunes

Metales	Punto de fusión (°C)	Calor latente de fusión (J/kg)	Punto de ebullición (°C)	Calor latente de vaporización (J/kg)
Aluminio	660.460	3.970×10^5	2467.00	3.970×10^5
Cobre	1083.00	2.050×10^5	2567.00	5.069×10^6
Oro	1063.00	6.300×10^4	2857.00	1.578×10^6
Magnesio	650.00	3.680×10^5	1107.00	5.464×10^6
Níquel	1455.00	2.970×10^5	2913.00	6.300×10^6
Plata	961.78	1.040×10^5	2212.00	2.336×10^6
Plomo	327.5	2.450×10^4	1750	8.700×10^5
Platino	1772.00	1.130×10^5	3827.00	2.720×10^6
Hierro	1808.00	2.470×10^5	3273	6.340×10^6
Estaño	231.9681	5.800×10^4	2270.00	2.365×10^6
Zinc	419.58	1.010×10^5	907.00	1.768×10^6

Parte A. En una parte de la curva de temperatura del hielo cambia de −10.0°C a 0.0°C. El calor específico del hielo es 2.100×10^3 J/kg °C, y el calor que absorbe la cantidad de carga operativa es cuarenta de kilojoules.

$$Q = c_H \Delta T = (2.100 \times 10^3 \text{ J/kg}\,^\circ\text{C})(10.0\,^\circ\text{C}) = 21 \text{ J/g}$$

Parte B. Cuando la temperatura del hielo llega a 0.0°C, la mezcla de hielo y agua permanece a temperatura constante mientras el hielo se funde. El calor de fusión del hielo es 3.340×10^5 J/kg. Por ende, la cantidad de energía que absorbe el 1 kg de hielo a 0.0°C es de la misma, 21%.

$$Q = mL_f = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(3.00 \times 10^5 \text{ J/kg}) = 300 \text{ J}$$

Por lo tanto, la cantidad de energía que absorbe la mezcla de 300 J + 300 J = 600 J, cuatro veces el que absorbe el 1 kg que está a 0.0°C.

Parte C. Entre 0.0°C y 100.0°C, el calor específico es constante. Por lo tanto, el calor que absorbe el 1 kg de agua líquida que aumenta la temperatura de 0.0°C a 100.0°C, es cuatrocientos veinticinco kilojoules. La cantidad de energía que entonces que aumenta la temperatura de 0.0°C a 100.0°C.

$$Q = mc_W \Delta T = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(4.19 \times 10^3 \text{ J/kg}\,^\circ\text{C})(100.0\,^\circ\text{C}) = 420 \text{ J}$$

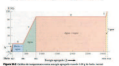


Figura 10.1 Gráfica de temperatura-calor para 1 kg de hielo, inicial mente a −10.0°C, en contacto con vapor a 120.0°C.

CONVERSIÓN

15.7 Calcular vs. Adivinar

Un ejemplo clásico de la diferencia entre adivinar y calcular es el cálculo de la cantidad de aire necesaria para quemar un combustible. Si se adivina, se quemará mucho más aire del necesario, lo que significa que se está desperdiciando combustible y se está generando más contaminación. Si se calcula, se puede ajustar el quemador para que funcione con el mínimo exceso de aire, ahorrando mucho dinero y reduciendo la contaminación. Por ejemplo, un horno cerámico de 1 m³ de volumen interno puede quemar 15 L de gasoil.

Pregunta rápida 15.4 Coloque las ecuaciones para los pasos 4, 5, 6 y 8 de la guía 15.1. Resuelva los problemas de masa y energía y explique lo que significa cada ecuación.

ESTRATEGIA PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Predicciones de calorimetría

El 4 es el número clave del día para estas predicciones de calorimetría, debe asignar cuatro cifras significativas a cada cantidad.

- Las unidades del sistema deben ser consistentes. Por ejemplo, si se usa calor específico en kJ/kg · °C, la temperatura específica tiene que estar en °C, la masa en kg y la energía en kJ.
- Las temperaturas de cambio deben estar por encima de 0 °C, ya que hasta aquí llega el calor específico del agua. Si la temperatura del agua está por debajo de 0 °C, debe tomarse en cuenta que hay también un cambio de fase.
- Cuando se considera el balance de masa, recuerde que el vapor de agua tiene un volumen específico 1 000 veces mayor que el del agua líquida.

Ejemplo 15.4 ¿Hay horno en casa?

Antes que los hornos convencionales (ANEC, no confundir, pues, con ANIC) 1 m³ de gas natural era suficiente para cocinar todo el día.

Adivinar El vapor también consigue en otro tiempo. Por ejemplo, para cocinar en cilindro (ANEC, no confundir) de arroz integral con 1 m³ de gas.

$$Q_c = m_{arroz}\,(T_f - c_{p\,arroz}\,(1 + 1\,\text{kg}/\text{kg}\,\text{H}_2\text{O})\,T_i) = 1\,\text{kW}\cdot\text{h}$$

Resolviendo, se obtiene la masa de arroz:

$$m_{arroz} = \frac{Q_c}{(T_f - c_{p\,arroz}\,(1 + 1\,\text{kg}/\text{kg}\,\text{H}_2\text{O})\,T_i)} = 1\,\text{kW}\cdot\text{h}/(1\,\text{kJ}/\text{kg}\cdot°\text{C}\,(1 + 1\,\text{kg}/\text{kg}\,\text{H}_2\text{O})\,(100\,°\text{C} - 20\,°\text{C})) = 0.0625\,\text{kg}$$

Si se quiere cocinar 1 kg de arroz, se necesitan 16 cilindros de gas.

Si se ingresa 1 kg de agua en el cilindro, se puede calcular la masa de vapor que se puede producir:

$$Q_{vap} = m\,(c_{p\,agua}\,(T_f - T_i) + h_{fg}) = 1\,\text{kW}\cdot\text{h}$$

Resolviendo, se obtiene la masa de vapor:

$$m = \frac{Q_{vap}}{(c_{p\,agua}\,(T_f - T_i) + h_{fg})} = 1\,\text{kW}\cdot\text{h}/(4.18\,\text{kJ}/\text{kg}\cdot°\text{C}\,(100\,°\text{C} - 20\,°\text{C}) + 2\,257\,\text{kJ}/\text{kg}) = 0.4\,\text{kg}$$

Si se quiere cocinar 1 kg de arroz, se necesitan 2 kg de agua.

¿Hay horno en casa? Si se quiere cocinar 1 kg de arroz, se necesitan 16 cilindros de gas y 2 kg de agua. Si se quiere cocinar 1 kg de agua, se necesita 2 kg de agua. Si se quiere cocinar 1 kg de arroz, se necesita 2 kg de agua.

Pregunta rápida 15.5 Si se quiere cocinar 1 kg de arroz, ¿cuántos cilindros de gas se necesitan? ¿Cuántos litros de agua se necesitan? ¿Cuántos litros de agua se necesitan para cocinar 1 kg de agua?

20.5 Primera ley de la termodinámica

Cuando introdujimos la ley de conservación de la energía en el capítulo 7, expresamos que el cambio en la energía de un sistema es igual a la suma de todas las transferencias de energía por la frontera del sistema. La primera ley de la termodinámica es un caso especial de la ley de conservación de la energía que comprende cambios en energía interna y transferencia de energía por calor y trabajo. Es una ley que se puede aplicar a numerosos procesos y proporciona un enlace entre los mundos microscópico y macroscópico.

Hemos estudiado dos formas en las que se puede transferir energía entre un sistema y su entorno. Una de ellas es trabajo realizado sobre el sistema, que especifica que haya un desplazamiento macroscópico desde el punto de aplicación de una fuerza. La otra es calor, que ocurre en un nivel molecular siempre que exista diferencia de temperatura por la frontera del sistema. Ambos mecanismos resultan en un cambio en la energía interna del sistema y, por lo tanto, suele resultar en cambios mensurables en las variables macroscópicas del sistema, como son presión, temperatura y volumen de un gas.

Para entender mejor estas ideas sobre base cuantitativa, supongamos que un sistema experimenta un cambio de un estado inicial a un estado final. Durante este cambio, ocurre transferencia de energía al sistema por medio de calor Q, y se realiza trabajo W sobre el sistema. Como ejemplo, suponga que el sistema es un gas en el que cambian presión y volumen de P_i y V_i a P_f y V_f. Si la cantidad $Q + W$ se mide para varias trayectorias que enlazan los estados inicial y final de equilibrio, encontramos que es igual para todas las trayectorias que enlazan los dos estados. Concluimos que la cantidad $Q + W$ está determinada por completo por los estados inicial y final del sistema, y llamamos a esta cantidad el **cambio en la energía interna** del sistema. Aun cuando Q y W dependen ambos de la trayectoria, **la cantidad Q + W es independiente de la trayectoria.** Si usamos el símbolo E_{int} para representar la energía interna, entonces el *cambio* en energía interna ΔE_{int} se puede expresar como[5]

Primera ley de la termodinámica

$$\Delta E_{int} = Q + W \qquad (20.9)$$

donde todas las cantidades deben tener las mismas unidades de medida para energía. La ecuación 20.9 se conoce como **primera ley de la termodinámica.** Una de las consecuencias importantes de la primera ley de la termodinámica es que existe una cantidad conocida como energía interna cuyo valor está determinado por el estado del sistema. La energía interna es por lo tanto, una variable de estado como presión, volumen y temperatura.

Cuando un sistema experimenta un cambio infinitesimal en un estado en el que una pequeña cantidad de energía dQ es transferida por calor y se realiza una pequeña cantidad de trabajo dW, la energía interna cambia una pequeña cantidad dE_{int}. Por lo tanto, para procesos infinitesimales, podemos expresar la primera ley como[6]

$$dE_{int} = dQ + dW$$

La primera ley de la termodinámica es una ecuación de conservación de la energía que especifica que el único tipo de energía que cambia en el sistema es la energía interna E_{int}. Investiguemos algunos casos especiales en los que existe esta condición.

Primero, considere un *sistema aislado*, es decir, aquel que no interactúa con su entorno. En este caso, no tiene lugar transferencia de energía por calor y el trabajo realizado sobre

¡ADVERTENCIA!

20.8 Convenciones de doble signo

Algunos libros de texto de física e ingeniería presentan la primera ley como $\Delta E_{int} = Q - W$, con un signo menos entre calor y trabajo. La razón de esto es que el trabajo se define en estos tratamientos como el trabajo realizado *por* el gas, más que *sobre* el gas, como en nuestro tratamiento. La ecuación equivalente a la ecuación 20.9 en estos tratamientos define el trabajo como $W = \int_{V_i}^{V_f} P\,dV$. En consecuencia, si el gas realiza trabajo positivo sale energía del sistema, lo que lleva al signo negativo en la primera ley. En los estudios en otros cursos de química o ingeniería, o en otros textos de física, el lector debe asegurarse de observar cuál convención de signo se emplea para la primera ley.

---

[5] Es un infortunado accidente de la historia que el símbolo tradicional para energía interna sea U, que es también el símbolo tradicional para energía potencial, como se introdujo en el capítulo 8. Para evitar confusión entre energía potencial y energía interna, usamos el símbolo E_{int} para energía interna en este libro. Si el lector toma un curso avanzado en termodinámica, sin embargo, debe estar preparado para ver U empleado como el símbolo para energía interna.

[6] Nótese que dQ y dW no son cantidades diferenciales verdaderas porque Q y W no son variables de estado; sin embargo, dE_{int} sí lo es. Como dQ y dW son *diferenciales inexactas*, con frecuencia son representadas por símbolos como $đQ$ y $đW$. Para más detalles sobre este punto, véase un texto avanzado sobre termodinámica, como el R. P. Bauman, *Modern Thermodynamics and Statistical Mechanics*, New York, Macmillan Publishing Co., 1992.

Solución En la primera etapa, recuperamos que

$$\begin{aligned} W_{\text{fric}} &= \left|\vec{Q}\right| = W \\ \Delta U &= -\left|\vec{Q}\right| \\ \Delta U &= -W = \mathbf{2.7 \times 10^5\,J} \end{aligned}$$

(d) Si el agua de bombeo está almacenada (digamos) en un depósito, y quiere volver a cargar su cualquier sitio (y que

Solución El cualquier cualquier en un proceso isotérmico cuasi estático, el trabajo que realiza el gas es igual a $-\Delta U$. Entonces, el 20.0 % y el sistema Tierra-Gas (U_{TG}) aumenta de la misma

Ejemplo 20.17 – Agua en ebullición

Hervimos un litro de agua en nuestra cotidianeidad, y que cada alrededor a 1.50 $\times 10^5$ Pa. Su volumen en ese estado es 1.00×10^{-3} m^3. Su volumen en el estado final es 1.67×10^{-3} m^3. Su calor de vaporización es 2.26×10^6 J/kg. Hay que suministrar 540 cal/mol para que el líquido pasar a 1 kg. Tome $c = 1.00$ cal/g°C. Encuentre el trabajo realizado por el agua en la expansión, el cambio de energía interna. Tome que el volumen inicial del vapor es igual al volumen del líquido. Tome $c = 1.00$ cal/g°C.

Solución Primero, para la expansión del vapor a presión constante, como el trabajo realizado sobre el entorno es igual al área bajo la curva en el diagrama de presión-volumen, se tiene que

$$\begin{aligned} W &= P(V_f - V_i) \\ &= (1.50 \times 10^5\,\text{Pa})(1.67 \times 10^{-3}\,\text{m}^3 - 1.00 \times 10^{-3}\,\text{m}^3) \\ &= \mathbf{100\,J} \end{aligned}$$

El trabajo realizado sobre la barra de cobre es

$$\begin{aligned} W &= c\,\Delta T = (1.00\,\text{cal/g°C})(1.0\,\text{kg})(100\,\text{°C}) \\ &= \mathbf{1.7 \times 10^5\,J} \end{aligned}$$

Como este trabajo es negativo, el trabajo no es realizado por la barra sobre el medio ambiente.

(c) ¿Qué cantidad de energía se transfiere por calor a la barra de cobre?

Solución Necesitamos el calor específico del cobre en la tabla 20.2 para encontrar la cantidad de calor que se transfiere. Entonces obtenemos

$$\begin{aligned} Q &= mc\,\Delta T = (1.0\,\text{kg})(387\,\text{J/kg °C})(100\,\text{°C}) \\ &= \mathbf{3.9 \times 10^4\,J} \end{aligned}$$

cada día la gente. Es decir que la potencia, de modo que necesitamos conocerla. Si lo de que el cuerpo

$$\begin{aligned} W &= (\Delta U_{\text{Tierra}} + \Delta U_{\text{Gas}}) + \Delta U_{\text{Gas}} \\ &= \underbrace{(-0.20\,\Delta U_{\text{Gas}})}_{\text{Lo que pierde la Tierra por el gas}} + \Delta U_{\text{Gas}} \\ &= 0.20 \times 10^{-3}\,\text{m}^3 \cdot 1.50 \times 10^{-5}\,\text{m}^3 \\ &= \mathbf{3.0 \times 10^2\,J} \end{aligned}$$

Tomar que siempre transparencia volumen necesita para que el gas. Si el gas es el cuerpo, el trabajo que realiza el gas es igual a $-\Delta U$. Entonces, hay 20 veces más energía en el gas en la Tierra que en el gas.

Ejemplo 20.18 – Trabajo en ciclo

Para determinar el cambio en energía interna, debemos conocer la transferencia de energía. Si hacemos para expansión al ciclo completo, el cambio en energía interna. Para hacer, las cantidades para el agua necesitamos

$$Q = mL_v = 0.1\,\text{kg} \times 2.26 \times 10^6\,\text{J/kg} = 2.26\,\text{J}$$

Por lo tanto, de la primera ley el cambio en energía interna es

$$\Delta U_{\text{agua}} = Q - W = 2.26\,\text{J} - 1.7 \times 10^5\,\text{J} = \mathbf{-2.26\,kJ}$$

El valor positivo para ΔU_{agua} indica que necesitamos que la energía interna del agua aumenta. Si el $L = 2.26$ J, entonces el líquido se vaporiza en un cambio de fase. Por lo tanto, el trabajo realizado por el agua sobre el entorno es igual a cero. Entonces, el trabajo realizado por el agua sobre el entorno es igual a cero.

Ejemplo 20.19 – Intercambiador de calor

Una barra de cobre de 1.0 kg se calienta y enfría alternativamente. Si la temperatura cambia de 50°C a 150°C.

Tome $c = 387$ J/kg°C. Encuentre el trabajo realizado sobre la barra y el calor que se transfiere a la barra.

Solución Debido a que el proceso es cíclico, podemos hacer uso de la primera ley de la termodinámica. Si hacemos para el ciclo completo $\Delta U = \Delta U_{\text{agua}} = 0$. Entonces, el trabajo realizado sobre el agua es igual a $-Q$. Entonces, el trabajo realizado sobre el agua es igual a $-Q$. Por el lado del enfriamiento propuesto de compañía. Dado que, el calor que se transfiere al agua es igual a $-Q$. Entonces, el calor que se transfiere al agua es igual a $-Q$.

Entonces, el trabajo realizado sobre el agua es igual a $-Q$. Entonces, el trabajo realizado sobre el agua es igual a $-Q$.

$$\begin{aligned} W &= c\,\Delta T = (1.0\,\text{kg})(387\,\text{J/kg °C})(100\,\text{°C}) \\ &= \mathbf{3.9 \times 10^4\,J} \end{aligned}$$

El calor transferido al agua es igual al trabajo que se hace sobre la barra. Entonces, el calor que se transfiere al agua es igual al trabajo que se hace sobre la barra.

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta A = \Delta\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma}\right)\left(\frac{PV}{\gamma - 1}\right) \\ &= \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma}\right)\Delta(PV) \\ &= (\gamma - 1)\,\Delta^{-\gamma} \end{aligned}$$

(C) ¿Cuál es el aumento en energía interna de la barra de cobre?

Solución De la primera ley de la termodinámica, tenemos

$$\Delta E_{int} = Q + W = 1.2 \times 10^4 \text{ J} + (-1.7 \times 10^{-2} \text{ J})$$
$$= 1.2 \times 10^4 \text{ J}$$

Nótese que casi toda la energía transferida por calor hacia el sistema se va a aumentar la energía interna de la barra de cobre. La fracción de energía empleada para realizar trabajo sobre la atmósfera circundante es de sólo 10^{-6}. En consecuencia, cuando se analiza la expansión térmica de un sólido o un líquido, la pequeña cantidad de trabajo realizado sobre o por el sistema suele pasarse por alto.

20.7 Mecanismos de transferencia de energía

En el capítulo 7, introdujimos un método general para abordar el análisis de energía de procesos físicos por medio de la ecuación 7.17, $\Delta E_{sistema} = \Sigma T$, donde T representa transferencia de energía. Ya antes en este capítulo vimos dos de los términos del lado derecho de esta ecuación, trabajo y calor. En esta sección, exploramos más detalles acerca del calor como medio de transferencia de energía y consideramos otros dos métodos de transferencia de energía que con frecuencia están relacionados con cambios de temperatura, es decir, convección (una forma de transferencia de materia) y radiación electromagnética.

Conducción térmica

El proceso de transferencia de energía por calor también se puede llamar **conducción** o **conducción térmica.** En este proceso, la transferencia se puede representar a escala atómica como un intercambio de energía cinética entre partículas microscópicas, moléculas, átomos y electrones libres, en las que las partículas con menos energía ganan energía en colisiones con partículas con más energía. Por ejemplo, si se sostiene un extremo de una barra metálica larga y se inserta el otro extremo en una flama, se encuentra que pronto aumenta la temperatura del metal junto a la mano. La energía llega a la mano por medio de conducción. Podemos entender el proceso de conducción si examinamos lo que ocurre a las partículas microscópicas del metal. Inicialmente, antes que la barra se inserte en la flama, las partículas microscópicas están vibrando alrededor de sus posiciones de equilibrio. Cuando la flama calienta la barra, las partículas cerca de la flama empiezan a vibrar con amplitudes cada vez mayores. Estas partículas, a su vez, chocan con sus vecinas y les transfieren parte de su energía en las colisiones. Lentamente, las amplitudes de vibración de átomos y electrones metálicos que están más y más lejos de la flama aumentan hasta que, por último, son afectados los del metal cerca de la mano. Esta vibración aumentada es detectada por un aumento de la temperatura del metal y de la mano potencialmente quemada.


Charles D. Winters

Recipiente de agua en ebullición puesto sobre el quemador de una estufa. Por conducción térmica, entra energía al agua por el fondo del recipiente.

La rapidez de conducción térmica depende de las propiedades de la sustancia que se está calentando. Por ejemplo, es posible sostener indefinidamente una pieza de asbesto en una flama. Esto implica que muy poca energía se conduce por el asbesto. En general, los metales son buenos conductores térmicos, y materiales como el asbesto, corcho, papel y fibra de vidrio son malos conductores. Los gases también son malos conductores debido a la gran distancia que separa las partículas. Los metales son buenos conductores térmicos, porque contienen grandes números de electrones que están relativamente libres de moverse por el metal, y, por lo tanto, pueden transportar energía a grandes distancias. Por lo tanto, en un buen conductor, por ejemplo el cobre, la conducción tiene lugar por medio de vibración de átomos y movimiento de electrones libres.

La conducción ocurre sólo si hay una diferencia en temperatura entre dos partes del medio conductor. Considere una placa de material de grosor Δx y área A de sección transversal. Una cara de la placa está a una temperatura T_c y la otra cara está a una temperatura $T_h > T_c$ (figura 20.10). Experimentalmente, se encuentra que la energía Q se transfiere en un intervalo de tiempo Δt de la cara más caliente a la más fría. La rapidez $\mathcal{P} = Q/\Delta t$ a la que ocurre esta transferencia de energía se encuentra que es proporcional al área de la sección transversal y la diferencia de temperatura $\Delta T = T_h - T_c$, e inversamente proporcional al grosor:

Figura 20.10 Transferencia de energía a través de una placa conductora con área A de sección transversal y grosor Δx. Las caras opuestas están a diferentes temperaturas T_c y T_h.

¿Qué pasaría si? Suponga que usted construye un recipiente aislado con dos capas de aislamiento y la rapidez de transferencia de energía determinada por la ecuación (4) resulta ser demasiado alta. Usted tiene espacio suficiente para aumentar el grosor de una de las dos capas en un 20%. ¿Cómo determinaría cuál capa seleccionar?

Respuesta Para reducir la potencia tanto como sea posible, debe aumentar el denominador de la ecuación (4) tanto como sea posible. Cualquier grosor que seleccione aumentar, L_1 o L_2, aumentará en 20% el correspondiente término L/k del denominador. Para que este porcentaje cambie para representar el cambio absoluto más grande, se desea tomar 20% del término más grande. *Así, se debe aumentar el grosor de la capa que tenga el valor más grande de L/k.*

Pregunta rápida 20.7 Un cubo de hielo envuelto en una tela de lana, ¿permanecerá congelado: (a) un tiempo más corto, (b) el mismo tiempo, (c) un tiempo más largo que un cubo de hielo idéntico expuesto al aire a temperatura ambiente?

Pregunta rápida 20.8 Se tienen dos barras de la misma longitud y diámetro, pero están formadas de materiales diferentes. Las barras se usarán para conectar dos regiones de diferente temperatura tal que se transfiere energía a través de las barras por medio de calor. Se pueden conectar en serie, como en la figura 20.13a, o en paralelo, como en la figura 20.13b. *¿En qué caso es mayor la rapidez de transferencia de energía por medio de calor?*: (a) cuando las barras están en serie, (b) cuando las barras están en paralelo, (c) la rapidez es igual en ambos casos.

Figura 20.13 (Pregunta rápida 20.8) ¿En cuál caso es mayor la rapidez de transferencia de energía

Se conduce energía del interior al exterior más rápidamente en la parte del techo donde se ha derretido nieve. El dormitorio parece haber sido agregado y aislado. El techo principal no parece estar aislado.

Aislamiento de casas

En ingeniería práctica, el término L/k para una sustancia particular se conoce como el **valor *R*** del material. *Así*, la ecuación 20.16 se reduce a

$$\mathcal{P} = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum_i R_i} \qquad (20.17)$$

donde $R_i = L_i/k_i$. Los valores *R* para unos cuantos materiales de construcción comunes se dan en la tabla 20.4. En Estados Unidos, las propiedades aislantes de materiales empleados en construcciones suelen expresarse en unidades convencionales, no en unidades del SI. Por lo tanto, en la tabla 20.4, las mediciones de valores *R* se dan como combinación de unidades térmicas británicas, pies, horas y grados Fahrenheit.

En cualquier superficie vertical abierta al aire, una muy delgada capa de aire estancado se adhiere a la superficie. Uno debe considerar esta capa cuando se determine el valor *R* para una pared. El grosor de esta capa estancada sobre una pared lateral depende de la rapidez del viento. La pérdida de energía de una casa en un día ventoso es mayor que la pérdida en un día cuando el aire está en calma. Un valor *R* representativo para esta capa estancada de aire se da en la tabla 20.4.

está calentado y se expande. Como resultado de ello, la densidad de este aire disminuye y el aire sube. Este aire caliente calienta las manos de la persona cuando se mueve. **Se dice que la energía transferida por el movimiento de una sustancia caliente ha sido transferida por convección.** Cuando el movimiento resulta de diferencias en densidad, como es el caso del aire alrededor de una flama, se denomina *convección natural*. El aire que circula en una playa es un ejemplo de convección natural, como lo es la mezcla que se presenta en la superficie del agua de un lago y que se hunde (sección 19.4). Cuando la sustancia calentada es forzada a moverse por un ventilador o bomba, como en algunos sistemas de calefacción de aire caliente y agua caliente, el proceso se llama *convección forzada*.


Figura 20.15 Se establecen corrientes de convección en un cuarto calentado por un radiador.

Si no fuera por corrientes de convección, sería muy difícil hervir agua. Cuando se calienta agua en una tetera, las capas inferiores están más calientes al principio. Esta agua se dilata y sube a la parte superior porque su densidad disminuye. Al mismo tiempo, el agua fría más densa de la superficie se hunde hasta el fondo de la tetera y es calentada.

El mismo proceso ocurre cuando un cuarto es calentado por un radiador. Éste calienta el aire de las regiones más bajas del cuarto. El aire caliente se dilata y sube al techo debido a su menor densidad. El aire más fresco y más denso de la parte superior desciende y se establece la forma de corriente de aire continua que se ilustra en la figura 20.15.

Radiación

El tercer medio de transferencia de energía que estudiaremos es la **radiación**. Todos los cuerpos irradian energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas (véase el capítulo 12 del volumen II) producidas por vibraciones térmicas de las moléculas. Es probable que el lector esté familiarizado con radiación electromagnética en forma del brillo anaranjado del quemador de una estufa eléctrica, y de un calentador eléctrico, o las bobinas de un tostador.

La rapidez con la que un cuerpo irradia energía es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Esto se conoce como la **ley de Stefan** y se expresa en forma de ecuación como

Ley de Stefan

$$\mathcal{P} = \sigma A e T^4 \qquad (20.18)$$

donde $\mathcal{P}$ es la potencia en watts irradiada desde la superficie del cuerpo, σ es una constante igual a $5.669\,6 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2 \cdot K^4}$, A es el área superficial del cuerpo en metros cuadrados, e es la **emisividad**, y T es la temperatura superficial en kelvin. El valor de e puede variar entre cero y la unidad, dependiendo de las propiedades de la superficie del cuerpo. La emisividad es igual a la **absorbencia**, que es la fracción de la radiación entrante que absorbe la superficie.

Cada segundo, aproximadamente 1 340 J de radiación electromagnética del Sol pasan perpendicularmente a través de cada 1 m^2 en la parte superior de la atmósfera terrestre. Esta radiación es básicamente luz visible e infrarroja acompañada por una cantidad importante de radiación ultravioleta. Estudiaremos estos tipos de radiación en detalle en el capítulo 12 del volumen II). Parte de esta energía se refleja de nuevo hacia el espacio, y parte es absorbida por la atmósfera. No obstante, a la superficie terrestre llega diariamente suficiente energía para abastecer todas nuestras necesidades de energía cientos de veces, si sólo pudiéramos captarla y emplearla de manera eficiente. El crecimiento en el número de casas que cuentan con energía solar en este país refleja los crecientes esfuerzos que se hacen para usar esta abundante energía. La energía radiante del sol afecta en varias formas nuestra existencia día a día. Por ejemplo, influye en la temperatura promedio de la Tierra, las corrientes oceánicas, agricultura y formas de lluvia.

Lo que ocurre a la temperatura atmosférica por las noches es otro ejemplo de los efectos de transferencia de energía por radiación. Si hay una capa de nubes sobre nuestro planeta, el vapor de agua de las nubes absorbe parte de la radiación infrarroja emitida por la Tierra y la regresa a la superficie. En consecuencia, los niveles de temperatura en la superficie permanecen moderados. En ausencia de esta capa de nubes, no hay forma de evitar que esta radiación escape hacia el espacio; por lo tanto, la temperatura *disminuye* más en una noche despejada que en una con presencia de nubes.

Cuando una sangre tiende energía en una cantidad dada por la ecuación 20.19, también absorbe radiación electromagnética. Esta es generada por ondas gravitacionales, que también se propagan a la velocidad de la luz. Las ondas gravitacionales son ondas en el espacio-tiempo que son causadas cuando gravitan dos cuerpos, que vimos formando por otros cuerpos que se mueven en la gravedad. Cuando una sangre absorbe energía, su masa aumenta por una cantidad, la ecuación es también una de energía quanta cuando por el cuerpo en el espacio-tiempo, que es dada por:

$$\Delta_{\text{ab}} = \Delta m c^2 = \Delta E \tag{20.19}$$

Cuando un cuerpo está en equilibrio con su entorno, también absorbe energía al igual que libera y es energía para permanecer contagiar. Cuando un cuerpo está más caliente que su entorno, también emite energía en forma de radiación electromagnética.

El **pirómetro óptico** es dicho como un cuerpo que detecta cómo es energía que sale de un cuerpo. Es un dispositivo que mide la temperatura de un cuerpo a partir de la cantidad de **energía negra** (Es el espectro IR del volumen). Investigaremos materiales representados y cómo es energía que se mueve en ellos. Cuando un cuerpo está en equilibrio con su entorno, también absorbe tanto de energía. Por ejemplo, un cuerpo que se está a 37 °C en ellos absorbe tanto de energía. Cuando un cuerpo está más caliente que su entorno también emite más de energía que también absorbe, es decir, **brillan más**.

El Frasco de Dewar

El frasco de Dewar[1] es un recipiente diseñado para evitar el mínimo las pérdidas de energía. Es un recipiente de doble pared con el espacio entre las paredes parcialmente vacío de aire. Esto evitaría mínimo tanto pérdidas. El mínimo es imposible de un dispositivo de almacenamiento de energía. Es un recipiente de doble pared con el espacio entre las paredes vacío de aire. Esto de doble pared es una pérdida. El mínimo es imposible de un dispositivo de almacenamiento de energía. Es un recipiente de doble pared con el espacio entre las paredes parcialmente vacío de aire. Esto evitaría mínimo tanto pérdidas del al mínimo es imposible de un dispositivo de almacenamiento de energía. Es un recipiente de doble pared con el espacio entre las paredes vacío de aire. Esto evitaría mínimo tanto pérdidas de energía al mínimo al mínimo es imposible de un dispositivo de almacenamiento de energía.

Figura 20.8 Frasco vacío de un frasco de Dewar que se utiliza para almacenar materiales criogénicos.

Ejemplo 20.1 ¿Cuánto es igual a energía?

Un termómetro marcaba 36 °C antes de ponerse a la sombra y 34 °C después. Si la masa del cuerpo es igual a 70 kg, ¿cuál es la pérdida de energía que se produce? Si la pérdida de energía es igual a 1 J, ¿cuál es la pérdida de masa?

Solución Usamos la ecuación 20.19, determinamos que la energía es igual a 1 J:

$$\Delta_{\text{ab}} = \Delta m c^2 = \Delta E$$

$$= \Delta m c^2 = \Delta E$$

$$= \Delta m (3 \times 10^8\ \text{m/s})^2 = 1\ \text{J}$$

$$= \Delta m (9 \times 10^{16}\ \text{m/s}) = 1\ \text{J}$$

$$= \Delta m = 1.11 \times 10^{-17}\ \text{kg}$$

Como vimos, la energía total perdida por la persona 10 veces menor.

$$Q = \Delta_{\text{ab}} m = (10\ \text{K})(70\ \text{kg}) = 7.0 \times 10^2\ \text{J}$$

Vemos que la energía es igual a 1 J, es necesario que la masa de la persona es igual a 1.11 × 10⁻¹⁷ kg.

[1] Inventado por Sir James Dewar, 1892-1923.

La energía puede ser transformada por trabajo, que mencionamos en el capítulo 7, y por conducción, convección, o radiación. La **conducción** se puede ver como intercambio de energía cinética entre moléculas o electrones en colisión. La rapidez de transferencia de energía por conducción a través de una placa de área A es

$$\mathcal{P} = kA\left|\frac{dT}{dx}\right| \qquad (20.14)$$

donde k es la **conductividad térmica** del material del cual está hecha la placa y $|dT/dx|$ es el **gradiente de temperatura.** Esta ecuación se puede usar en muchas situaciones en las que la rapidez de transferencia de energía por el material es importante.

En **convección,** una sustancia caliente transfiere energía de un lugar a otro.

Todos los cuerpos emiten **radiación** en la forma de ondas electromagnéticas a razón de

$$\mathcal{P} = \sigma A e T^4 \qquad (20.18)$$

Un cuerpo que es más caliente que su entorno irradia más energía de la que absorbe, mientras que un cuerpo que es más frío que su entorno absorbe más energía de la que irradia.

PREGUNTAS

1. Distinga claramente entre temperatura, calor y energía interna.
2. El alcohol etílico tiene casi la mitad del calor específico del agua. Si muestras de igual masa de alcohol y agua en vasos separados reciben la misma cantidad de energía, compare los aumentos de temperatura de los dos líquidos.
3. Un pequeño crisol metálico es sacado de un horno a 200°C y sumergido en una tina de baño llena de agua a temperatura ambiente (este proceso se conoce a veces como *templado*). ¿Cuál es la temperatura de equilibrio final aproximada?
4. ¿Cuál es el principal problema que aparece al medir calores específicos si una muestra con una temperatura arriba de 100°C se coloca en agua?
5. En una valiente demostración en clase, un maestro mete sus dedos húmedos en plomo derretido (327°C) y los saca rápidamente, sin quemarse. ¿Cómo es esto posible? (Éste es un experimento peligroso, que usted *NO DEBE* realizar).
6. ¿Qué está erróneo en el siguiente enunciado? "Dados cualesquier dos cuerpos, el de temperatura más alta contiene más calor".
7. ¿Por qué es una persona capaz de sacar un trozo de papel aluminio seco de un horno caliente con los dedos desnudos, mientras que se quema si hay humedad en el papel aluminio?
8. La temperatura del aire en zonas costeras resulta muy afectada por el elevado calor específico del agua. Una razón es que la energía liberada cuando 1 m³ de agua se enfría 1°C hará que suba la temperatura de un volumen mucho mayor de aire en 1°C. Encuentre este volumen de aire. El calor específico del aire es aproximadamente 1 kJ/kg · °C. Tome la densidad del aire como 1.3 kg/m³.
9. El concreto tiene un calor específico mucho mayor que el suelo. Use este dato para explicar (parcialmente) por qué las ciudades tienen una temperatura más alta en promedio durante la noche que el campo circundante. Si una ciudad es más calurosa que el campo circundante, ¿se siente que soplan brisas de la ciudad al campo, o del campo a la ciudad? Explique.
10. Con el uso de la primera ley de la termodinámica, explique por qué la energía *total* de un sistema aislado es siempre constante.
11. Cuando se agita un termo sellado y lleno de café caliente, ¿cuáles son los cambios, si los hay, en (a) la temperatura del café (b) la energía interna del café?
12. Es posible convertir energía interna en energía mecánica? Explique con ejemplos.
13. Una moneda de un centavo (US) se hacía antes principalmente de cobre y ahora es de zinc recubierto de cobre. ¿Puede diseñarse un experimento calorimétrico para probar el contenido metálico en un grupo de monedas de un centavo? Si es así, describa el procedimiento que usted usaría.
14. La figura Q20.14 muestra una figura formada por nieve en el techo de un granero. ¿Qué hace que se formen figuras alternas de techo cubierto de nieve y techo sin nieve?

Figura Q.20.14 Figuras alternadas en un techo cubierto de nieve.

15. Un techo de losetas en un baño puede sentirse incómodamente frío a los pies descalzos, pero un piso con tapete en un cuarto adyacente a la misma temperatura se sentirá cálido. ¿Por qué?

ratura del agua después que los bloques caen una distancia de 3.00 m?

Sección 20.2 Calor específico y calorimetría

3. La temperatura de una barra de plata sube 10.0°C cuando absorbe 1.23 kJ de energía por calor. La masa de la barra es de 525 g. Determine el calor específico de la plata.
4. Una muestra de 50.0 g de cobre está a 25.0°C. Si 200 J de energía se le agregan por calor, ¿cuál es la temperatura final del cobre?
5. El uso sistemático de energía solar puede dar un gran ahorro en el costo de calefacción de espacios en invierno para una casa típica de la región norte central de Estados Unidos. Si la casa tiene buen aislamiento, es posible modelarla como que pierde energía por calor de manera continua a razón de 6 000 W en un día de abril, cuando la temperatura promedio exterior es de 4°C, y cuando el sistema de calefacción convencional no se usa en absoluto. El colector pasivo de energía solar puede estar formado simplemente por ventanas muy grandes en una alcoba que mire hacia el sur. La luz solar que brille durante el día es absorbida por el piso, paredes interiores y otros objetos del cuarto, elevándose así su temperatura a 38°C. Cuando baja el sol, las cortinas o persianas aislantes se cierran sobre las ventanas. Durante el periodo entre las 5:00 p.m. y las 7:00 a.m. la temperatura de la casa bajará, y se necesita una "masa térmica" suficientemente grande para evitar que baje demasiado. La masa térmica puede ser una gran cantidad de piedra (con calor específico de 850 J/kg·°C) en el piso y las paredes interiores expuestas a la luz solar. ¿Qué masa de piedra se necesita si la temperatura no debe descender por abajo de 18°C durante la noche?
6. El láser *Nova* del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, en California, se usa en estudios para iniciar una fusión nuclear controlada (sección 23.4 del volumen II). Puede entregar una potencia de 1.60 × 10^{13} W durante un intervalo de tiempo de 2.50 ns. Compare su energía de salida en uno de estos intervalos con la energía necesaria para hacer que se caliente una olla de té de 0.800 kg de agua de 20.0°C a 100°C.
7. Una herradura de hierro de 1.50 kg inicialmente a 600°C se deja caer en una cubeta que contiene 20.0 kg de agua a 25.0°C. ¿Cuál es la temperatura final? (Pase por alto la capacidad calorífica del recipiente, y suponga que la insignificante cantidad de agua se hierve.)
8. Una taza de aluminio de 200 g de masa contiene 800 g de agua en equilibrio térmico a 80.0°C. La combinación de taza y agua se enfría uniformemente de modo que la temperatura desciende en 1.50°C por minuto. ¿A qué ritmo se remueve energía por calor? Exprese su respuesta en watts.
9. Un calorímetro de aluminio con masa de 100 g contiene 250 g de agua. El calorímetro y el agua están en equilibrio térmico a 10.0°C. Dos bloques metálicos se ponen en el agua. Uno es una pieza de cobre de 50.0 g a 80.0°C. El otro bloque tiene una masa de 70.0 g y está originalmente a una temperatura de 100°C. Todo el sistema se estabiliza a una temperatura final de 20.0°C. (a) Determine el calor específico de la muestra desconocida. (b) Calcule el material desconocido, usando los datos de la tabla 20.1.
10. Una moneda de cobre de 3.00 g a 25.0°C se deja caer 50.0 m al suelo. (a) Suponiendo que 60.0% del cambio en energía potencial del sistema formado por el centavo y nuestro planeta se va a aumentar la energía interna del centavo, determine su temperatura final. (b) **¿Qué pasaría si?** ¿Este resultado depende de la masa del centavo? Explique.
11. Una combinación de 0.250 kg de agua a 20.0°C, 0.400 kg de aluminio a 26.0°C, y 0.100 kg de cobre a 100°C se mezclan en un recipiente aislado al que se deja llegar al equilibrio térmico. Soslaye cualquier transferencia de energía hacia o desde el recipiente y determine la temperatura final de la mezcla.
12. Si se vierte agua con una masa m_h a una temperatura T_h en una taza de aluminio de masa m_{Al} que contiene una masa m_c de agua a T_c, donde $T_h > T_c$, ¿cuál es la temperatura de equilibrio del sistema?
13. Un calentador de agua se opera con energía solar. Si el colector solar tiene un área de 6.00 m^2 y la intensidad entregada por la luz solar es de 550 W/m^2, ¿cuánto tarda en aumentar la temperatura de 1.00 m^3 de agua de 20.0°C a 60.0°C?
14. Dos recipientes térmicamente aislados están conectados por un estrecho tubo equipado con una válvula que inicialmente está cerrada. Uno de los recipientes, de 16.8 L de volumen, contiene oxígeno a una temperatura de 300 K y una presión de 1.75 atm. El otro, de 22.4 L de volumen, contiene oxígeno a una temperatura de 450 K y una presión de 2.25 atm. Cuando la válvula se abre, los gases de los dos recipientes se mezclan, y la temperatura y presión se hacen uniformes en todo el sistema. (a) ¿Cuál es la temperatura final? (b) ¿Cuál es la presión final?

Sección 20.3 Calor latente

15. ¿Cuánta energía se requiere para cambiar un cubo de hielo de 40.0 g de hielo a −10.0°C a vapor a 110°C?
16. Un calorímetro de cobre de 50.0 g contiene 250 g de agua a 20.0°C. ¿Cuánto vapor debe condensarse en el agua si la temperatura final del sistema debe llegar a 50.0°C?
17. Una bala de plomo de 3.00 g a 30.0°C es disparada a una rapidez de 240 m/s en un gran bloque de hielo a 0°C, en el que queda incrustada. ¿Qué cantidad de hielo se derrite?
18. Vapor a 100°C se agrega a hielo a 0°C. (a) Encuentre la cantidad de hielo derretido y la temperatura final cuando la masa del vapor sea 10.0 g y la masa del hielo sea 50.0 g. (b) **¿Qué pasaría si?** Repita cuando la masa del vapor sea 1.00 g y la masa del hielo sea 50.0 g.
19. Un bloque de 1.00 kg de cobre a 20.0°C se pone en un gran recipiente de nitrógeno líquido a 77.3 K. ¿Cuántos kilogramos de nitrógeno hierven para cuando el cobre llega a 77.3 K? (El calor específico del cobre es 0.092 0 cal/g·°C. El calor latente de vaporización del nitrógeno es 48.0 cal/g.)
20. Suponga que un granizo a 0°C cae en aire a una temperatura uniforme de 0°C y cae sobre una banqueta que también está a esta temperatura. ¿De qué altura inicial debe caer el granizo para que se derrita por completo al impacto?
21. En un recipiente aislado, 250 g de hielo a 0°C se agregan a 600 g de agua a 18.0°C. (a) ¿Cuál es la temperatura final del sistema? (b) ¿Cuánto hielo resta cuando el sistema llega al equilibrio?

Problemas de repaso. Dos cilindros iguales de plomo, cada uno de 0.600 kg, están a una temperatura de 80.0°C, mientras de hielo a cero grados de 50°C se coloca entre los cilindros para ejercer una presión de 1.00 atm sobre el hielo. Cuando se funde suficiente hielo para que el sistema alcance un estado de equilibrio, ¿cuánto se mueve el cilindro superior? Ignore la capacidad calorífica del sistema formado por los cilindros.

Sección 23.4 Trabajo y calor en procesos termodinámicos

P1. **BIO** Una persona de gran dieta se suponde de dejar de ser obesa. Si la persona ingiere 2 000 kcal de alimentos cada día, ¿cuántos kilogramos de agua tendría que sudar para mantener su peso? Suponga que todo el exceso de energía se elimina por medio de sudor.

P2. Un sistema termodinámico experimenta un proceso en que su energía interna aumenta 500 J. Al mismo tiempo, el sistema ejerce 200 J de trabajo sobre su entorno. Encuentre la energía transferida al sistema por calor. ¿Es el proceso de absorción o de emisión de calor?

P3. Un gas ideal sufre el proceso cíclico descrito en la figura P23.3. Este ciclo consiste en una expansión isotérmica, un calentamiento a volumen constante, una **compresión** a presión constante y un enfriamiento a volumen constante. Encuentre el trabajo neto por ciclo.

Figura P23.3

P4. La dimensión de trabajo realizado sobre un fluido viscoso mejora de 10 a 1 cuando el fluido se calienta de 0 a 100°C. **¿Por cuanto** el trabajo realizado sobre el fluido se ve afectado de 0 a 100°C?

Figura P23.4

P5. **BIO** El gasto de el metabolismo en una Medicina en la dieta de 2 000 kcal/día. Si todo el metabolismo se usa para levantar 1 000 kg a 1 000 m? ¿Cuál Hay suficiente? Suponga metabolismo constante de 100 W. ¿Cuánto tiempo puede levantar 1 000 kg? Suponga que la temperatura de 1000 cm? ¿Por qué no usar de 70 kg?

P6. El gas ideal sufre el proceso de cilindro que tiene un émbolo móvil en su parte superior. Suponga que el cilindro tiene un volumen inicial de $0.\ m^3$ y que el gas ejerce una presión de $0.\ Pa$ sobre el émbolo. Suponga que el gas absorbe $0.\ J$ de calor y que su energía interna aumenta en $0.\ J$. Encuentre el cambio en la altura del émbolo.

P7. En un día de gran calor, el aire en la habitación de un cuarto que mide 4.00 m × 5.00 m × 3.00 m, se enfría por un acondicionador de aire con una capacidad de enfriamiento de 5 kW. Si el aire enfriado se va a 20.0°C, ¿cuánto tiempo se necesita para que el aire en la habitación se enfríe de 30.0°C a 20.0°C? Suponga que el aire se mantiene cerrado y que no se pierde calor a través de las paredes.

Sección 23.5 Primera ley de la termodinámica

P8. Un gas se comprime a una presión constante de 0.800 atm. Su volumen cambia de 9.00 m³ a 2.00 m³. Su energía interna aumenta en 1 000 J. Encuentre el trabajo realizado sobre el gas. ¿Es el sistema que absorbe o emite calor?

P9. Un sistema termodinámico experimenta un proceso en que su energía interna aumenta 500 J. Al mismo tiempo, el sistema ejerce 200 J de trabajo sobre su entorno. Encuentre la energía transferida al sistema por calor. ¿Es el proceso de absorción o de emisión de calor?

P10. Un gas ideal sufre el proceso cíclico descrito en la figura P23.10. Este ciclo consiste en una expansión isotérmica, un enfriamiento a volumen constante, una **compresión** a presión constante y un calentamiento a volumen constante. Encuentre el trabajo neto por ciclo.

Figura P23.10 Problemas 10 y 11.

P11. Considere el proceso cíclico descrito en la figura P23.10. Si un gramo de gas ideal sufre el proceso, $P_0 = 1.00\ atm$, y el volumen inicial es $V_0 = 1.00\ cm^3$, encuentre el calor neto transferido al sistema en un ciclo completo.

P12. Considere el gas ideal sometido al proceso que se muestra en la figura P23.12. Si n moles de gas están en un sistema a P_i, V_i, T_i, encuentre el trabajo realizado sobre el gas, el cambio en su energía interna y el calor transferido al sistema en términos de n, R y T_i. Suponga que C_P y C_V son constantes. Exprese su respuesta en términos de $\gamma = C_P/C_V$.

Figura P23.12

33. Una muestra de un gas ideal está en un cilindro vertical equipado con un émbolo. Cuando 5.79 kJ de energía se transfieren al gas por calor para elevar su temperatura, el peso sobre el émbolo se ajusta de modo que el estado del gas cambia del punto *A* al punto *B* a lo largo del semicírculo que se ilustra en la figura P20.33. Encuentre el cambio en energía interna del gas.

Figura P20.33

Sección 20.6 Algunas aplicaciones de la primera ley de la termodinámica

34. Un mol de un gas ideal realiza 3 000 J de trabajo sobre su entorno cuando se expande de manera isotérmica a una presión final de 1.00 atm y volumen de 25.0 L. Determine (a) el volumen inicial y (b) la temperatura del gas.

35. Un gas ideal inicialmente a 300 K experimenta una expansión isobárica a 2.50 kPa. Si el volumen aumenta de 1.00 m^3 a 3.00 m^3 y 12.5 kJ se transfieren al gas por calor, ¿cuáles son (a) el cambio en su energía interna y (b) su temperatura final?

36. Un bloque de 1.00 kg de aluminio se calienta a presión atmosférica de modo que su temperatura aumenta de 22.0°C a 40.0°C. Encuentre (a) el trabajo realizado sobre el aluminio, (b) la energía agregada a él por calor, y (c) el cambio en su energía interna.

37. ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el vapor cuando 1.00 mol de agua a 100°C hierve y se convierte en 1.00 mol de vapor a 100°C a 1.00 atm de presión? Suponiendo que el vapor se comporta como gas ideal, determine el cambio en energía interna del material cuando se vaporiza.

38. Un gas ideal inicialmente a P_i, V_i y T_i se lleva por un ciclo como se ve en la figura P20.38. (a) Encuentre el trabajo neto realizado sobre el gas por ciclo. (b) ¿Cuál es la energía neta agregada por calor al sistema por ciclo? (c) Obtenga un valor numérico para el trabajo neto realizado por ciclo para 1.00 mol de gas inicialmente a 0°C.

Figura P20.38

39. Una muestra de 2.00 moles de helio inicialmente a 300 K y 0.400 atm se comprime de manera isotérmica a 1.20 atm. Observando que el helio se comporta como gas ideal, encuentre (a) el volumen final del gas, (b) el trabajo realizado sobre el gas, y (c) la energía transferida por calor.

40. En la figura P20.40, el cambio en energía interna de un gas que se lleva de *A* a *C* es +800 J. El trabajo realizado sobre el gas a lo largo de la trayectoria *ABC* es −500 J. (a) ¿Cuánta energía debe agregarse al sistema por calor cuando pasa de *A* a *B* a *C*? (b) Si la presión en el punto *A* es cinco veces la del punto *C*, ¿cuál es el trabajo realizado sobre el sistema al pasar de *C* a *D*? (c) ¿Cuál es el intercambio de energía con el entorno por calor cuando el ciclo pasa de *C* a *A* a lo largo de la trayectoria verde? (d) Si el cambio en energía interna al pasar del punto *D* al punto *A* es +500 J, ¿cuánta energía debe agregarse al sistema por calor cuando pasa del punto *C* al punto *D*?

Figura P20.40

Sección 20.7 Mecanismos de transferencia de energía

41. Una caja con un área superficial total de 1.20 m^2 y un grosor de pared de 4.00 cm está hecha de un material aislante. Un calentador eléctrico de 10.0 W dentro de la caja mantiene la temperatura interior a 15.0°C sobre la temperatura exterior. Encuentre la conductividad térmica *k* del material aislante.

42. Una ventana de hojas de vidrio tiene un área de 3.00 m^2 y un grosor de 0.600 cm. Si la diferencia de temperatura entre sus caras es 25.0°C, ¿cuál es la rapidez de transferencia de energía por conducción a través de la ventana?

43. Una barra de oro está térmicamente en contacto con una barra de plata de la misma longitud y área (figura P20.43). Un extremo de la barra combinada se mantiene a 80.0°C mientras que el extremo opuesto está a 30.0°C. Cuando la transferencia de energía llega a un estado estable, ¿cuál es la temperatura en la unión?

Figura P20.43

44. Una ventana térmica con un área de 6.00 m^2 está hecha de dos capas de vidrio, cada una de 4.00 mm de grosor, y separadas una de otra por un espacio de aire de 5.00 mm. Si la superficie interior

ro. Tan pronto como la esfera y el anillo alcanzan el equilibrio térmico, la esfera apenas pasa por el anillo. Encuentre (a) la temperatura de equilibrio, y (b) la temperatura inicial de la esfera.

57. Un *calorímetro de flujo* es un aparato que se emplea para medir el calor específico de un líquido. La técnica de calorimetría de flujo comprende medir la diferencia de temperatura, entre los puntos de entrada y salida de una corriente del líquido que fluye, mientras se agrega energía por medio de calor a una rapidez conocida. Un líquido de densidad ρ circula por el calorímetro con una rapidez de flujo de volumen R. En estado estable, se establece una diferencia de temperatura ΔT entre los puntos de entrada y salida cuando se proporciona energía a razón de $\mathcal{P}$. ¿Cuál es el calor específico del líquido?

58. Un mol de un gas ideal está contenido en un cilindro con un émbolo móvil. La presión, volumen y temperatura iniciales son P_i, V_i y T_i, respectivamente. Encuentre el trabajo realizado sobre el gas para los siguientes procesos y muestre cada proceso en un diagrama PV: (a) Una compresión isobárica en la que el volumen final es la mitad del volumen inicial. (b) Una compresión isotérmica en la que la presión final es cuatro veces la presión inicial. (c) Un proceso isométrico en el que la presión final es tres veces la presión inicial.

59. Un mol de un gas ideal, inicialmente a 300 K, se enfría a volumen constante de modo que la presión final es un cuarto de la presión inicial. Entonces el gas se expande a presión constante hasta que alcanza la temperatura inicial. Determine el trabajo realizado sobre el gas.

60. **Problema de repaso.** Continúe el análisis del problema 60 del capítulo 19. Después de una colisión entre una nave espacial grande y un asteroide, un disco de cobre de 28.0 m de radio y 1.20 m de grueso, a una temperatura de 850°C, flota en el espacio, girando alrededor de su eje con una rapidez angular de 25.0 rad/s. Debido a que el disco irradia luz infrarroja, su temperatura baja a 20.0°C. No actúa par de torsión externo sobre el disco. (a) Encuentre el cambio en energía cinética del disco. (b) Encuentre el cambio en energía interna del disco. (c) Encuentre la cantidad de energía que irradia.

61. **Problema de repaso.** Resulta que un meteorito de 670 kg está compuesto de aluminio. Cuando está lejos de la Tierra, su temperatura es −15°C y se mueve con una rapidez de 14.0 km/s con respecto a la Tierra. Cuando choca con el planeta, suponga que la energía interna adicional resultante es compartida igualmente entre el meteoro y el planeta, y que todo el material del meteoro sube momentáneamente a la misma temperatura final. Encuentre esa temperatura. Suponga que el calor específico del aluminio líquido y gaseoso es de 1 170 J/kg · °C.

62. Una placa de hierro se mantiene contra una rueda de hierro de modo que una fuerza de fricción cinética de 50.0 N actúa entre las dos piezas de metal. La rapidez relativa a la que las dos superficies se deslizan una sobre la otra es 40.0 m/s. (a) Calcule la rapidez a la que la energía mecánica se convierte en energía interna. (b) La placa y la rueda tienen cada una de ellas una masa de 5.00 kg y cada una recibe 50.0% de la energía interna. Si el sistema funciona durante 10.0 s como se describe y cada objeto se deja que alcance una temperatura interna uniforme, ¿cuál es el aumento resultante de temperatura?

63. Una estufa solar está hecha de una superficie curva reflectora que concentra luz solar sobre el objeto a calentar (figura P20.63). La potencia solar por unidad de área que llega a la superficie de la Tierra en ese lugar es de 600 W/m². La estufa apunta hacia el Sol y tiene un diámetro de 0.600 m. Suponga que 40.0% de la energía incidente se transfiere a 0.500 L de agua en un recipiente abierto, que inicialmente está a 20.0°C. ¿Cuánto tarda en hervir completamente el agua? (Pase por alto la capacidad calorífica del recipiente.)

Figura **P20.63**

64. En una tetera eléctrica está hirviendo agua. La potencia absorbida por el agua es 1.00 kW. Si se supone que la presión de vapor de la tetera es igual a la presión atmosférica, determine la rapidez de efusión de vapor del pico de la tetera, si ese pico tiene un área de sección transversal de 2.00 cm².

65. Un recipiente para cocinar sobre un quemador lento contiene 10.0 kg de agua y una masa desconocida de hielo en equilibrio a 0°C en el tiempo $t = 0$. La temperatura de la mezcla se mide en tiempos varios, y el resultado se grafica en la figura P20.65. Durante los primeros 50.0 minutos, la mezcla permanece a 0°C. De 50.0 minutos a 60.0 minutos, la temperatura aumenta a 2.00°C. Sin hacer caso de la capacidad calorífica del recipiente, determine la masa de hielo inicial.

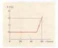


Figura **P20.65**

66. (a) En aire a 0°C, un bloque de cobre de 1.60 kg a 0°C se hace deslizar a 2.50 m/s sobre una lámina de hielo a 0°C. La fricción hace que el bloque se detenga. Encuentre la masa del hielo que se derrite. Para describir el proceso de enfriamiento, identifique la energía de entrada Q, el trabajo de entrada W, el cambio en energía interna ΔE_{int} y el cambio en energía mecánica ΔK para el bloque y también para el hielo. (b) Un bloque de 1.60 kg de hielo a 0°C se hace deslizar a 2.50 m/s sobre una lámina de cobre a 0°C. La fricción hace que el bloque se detenga. Encuentre la masa del hielo que se derrite. Identifique Q, W, ΔE_{int} y ΔK para el bloque y para la lámina metálica durante el proceso. (c) Una delgada placa de cobre de 1.60 kg a 20°C se hace deslizar a 2.50 m/s sobre una placa estacionaria idéntica a la misma temperatura. La fricción detiene rápidamente el movimiento. Si no se pierde energía al entorno por medio de calor, encuentre el cambio en temperatura de ambos cuerpos. Identifique Q, W, ΔE_{int} y ΔK para cada objeto durante el proceso.

67. La conductividad térmica promedio de las paredes (incluyendo las ventanas) y techo de la casa descrita en la figura P20.67 es 0.480 W/m·°C, y su grosor promedio es 21.0 cm. La casa se calienta con gas natural que tiene un calor de combustión (esto es, la energía proporcionada por metro cúbico de gas quemado) de 9 300 kcal/m³. ¿Cuántos metros cúbicos de gas deben quemarse cada día para mantener una temperatura interior de 25.0°C, si la temperatura exterior es de 0.0°C? Haga caso omiso de la radiación y la energía perdida por calor a través del suelo.

Figura P20.67

68. Una charca de agua a 0°C está cubierta con una capa de hielo de 4.00 cm de grueso. Si la temperatura del aire permanece constante a −10.0°C, ¿cuánto tiempo tarda el grueso del hielo en aumentar a 8.00 cm? *Sugerencia:* Utilice la ecuación 20.15 en la forma

$$\frac{dQ}{dt} = kA\frac{\Delta T}{x}$$

y observe que la energía incremental dQ extraída del agua a través del grosor x de hielo es la cantidad necesaria para congelar un grosor dx de hielo. Esto es, $dQ = L\rho A\,dx$, donde ρ es la densidad del hielo, A es el área, y L es el calor latente de fusión.

69. Un gas ideal es llevado por un ciclo termodinámico que consiste en dos procesos isobáricos y dos isotérmicos, como se ve en la figura P20.69. Muestre que el trabajo neto realizado sobre el gas en todo el ciclo está dado por

$$W_{neto} = -P_1(V_2 - V_1)\ln\frac{P_2}{P_1}$$

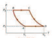


Figura P20.69

70. El interior de un cilindro hueco se mantiene a una temperatura T_a mientras que el exterior está a una temperatura más baja, T_b (figura P20.70). La pared del cilindro tiene una conductividad k. Si se desprecian los efectos en los extremos, demuestre que la rapidez de conducción de energía de la superficie interior a la exterior en la dirección radial es

$$\frac{dQ}{dt} = 2\pi Lk\left[\frac{T_a - T_b}{\ln(b/a)}\right]$$

(*Sugerencia:* El gradiente de temperatura es dT/dr. Nótese que una corriente de energía radial pasa por un cilindro concéntrico de área $2\pi rL$).

Figura P20.70

71. La sección de pasajeros de un avión a reacción tiene la forma de un tubo cilíndrico con longitud de 35.0 m y un radio interior de 2.50 m. Sus paredes están forradas con material aislante de 6.00 cm de grueso y tienen una conductividad de 4.00×10^{-5} cal/s·cm·°C. Un calentador debe mantener la temperatura interior a 25.0°C mientras la temperatura exterior es −35.0°C. ¿Qué potencia debe suministrarse al calentador? (Utilice el resultado del problema 70.)

72. Un estudiante obtiene los siguientes datos en un experimento de calorimetría diseñado para medir el calor específico del aluminio:

Temperatura inicial del agua y calorímetro:	70°C
Masa de agua:	0.400 kg
Masa de calorímetro:	0.040 kg
Calor específico del calorímetro:	0.63 kJ/kg · °C
Temperatura inicial de aluminio:	27°C
Masa de aluminio:	0.200 kg
Temperatura final de mezcla:	66.3°C

Utilice estos datos para determinar el calor específico del aluminio. Su resultado debe estar a no más de 15% del valor que se ve en la tabla 20.1.

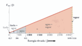
75. Durante periodos de alta actividad, el Sol tiene más manchas solares que de ordinario. Las manchas solares son más frías que el resto de la capa luminosa de la atmósfera del Sol (la fotósfera). Paradójicamente, la potencia total de salida del Sol no es menor que el promedio, sino que es igual o ligeramente más alta que el promedio. Resuelva los detalles del siguiente modelo de este fenómeno. Considere un parche de la fotósfera con área de 5.10×10^{14} m^2. Su emisividad es 0.965. (a) Encuentre la potencia que irradia si su temperatura está uniformemente a 5 800 K, correspondientes al Sol en calma. (b) Para representar una mancha solar, suponga que 10.0% del área está a 4 800 K y el otro 90% está a 5 890 K. Esto es, una sección con el área superficial de la Tierra es 1 000 K más fría que antes y una sección nueve veces mayor es 90 K más caliente. Encuentre la potencia de salida del parche. Compárela con la respuesta a la parte (a). (El máximo de las siguientes manchas solares se espera hacia el año 2012.)

Respuestas a las *preguntas rápidas*

20.1 Agua, vidrio, hierro. Como el agua tiene el calor específico más alto (4 186 J/kg · °C), tiene el cambio más pequeño en temperatura. El vidrio es el siguiente (837 J/kg · °C), y el hierro es último (448 J/kg · °C).

20.2 Hierro, vidrio, agua. Para un aumento dado de temperatura, la transferencia de energía por calor es proporcional al calor específico.

20.3 La figura siguiente muestra una representación gráfica de la energía interna del hielo en las partes A a la E como función de la energía agregada. Nótese que esta gráfica se ve muy diferente a la figura 20.2; no tiene las porciones planas durante los cambios de fase. Cualquiera que sea la forma en que varía la temperatura en la figura 20.2, la energía interna del sistema simplemente aumenta en forma lineal con la energía de entrada.



20.4 C, A, E. La pendiente es la razón entre el cambio de temperatura y la cantidad de energía de entrada. Por lo tanto, la pendiente es proporcional al recíproco del calor específico. El agua, que tiene el calor específico más alto, tiene la pendiente más baja.

20.5

Situación	Sistema	Q	W	ΔE_{int}
(a) Bombear rápidamente una bicicleta	Aire en la bomba	0	+	+
(b) Sartén con agua a temperatura ambiente sobre una estufa caliente	Agua en la sartén	+	0	+
(c) Aire se fuga rápidamente de un globo	Aire originalmente en el globo	0	−	−

(a) Debido a que el bombeo es rápido, no entra ni sale energía del sistema por calor. Como $W > 0$ cuando se realiza trabajo *sobre* el sistema, aquí es positivo. Por lo tanto, vemos que $\Delta E_{int} = Q + W$ debe ser positivo. El aire en la bomba es más caliente. (b) No hay trabajo realizado ya sea sobre o por el sistema, pero se transfiere energía en el agua por calor desde el quemador caliente, haciendo positivas Q y ΔE_{int}. (c) De nuevo, no se transfiere energía hacia o desde el sistema por calor, pero las moléculas de aire que escapan del globo realizan trabajo sobre las moléculas de aire circundante cuando las empujan apartándolas. En esta forma, W es negativo y ΔE_{int} es negativo. La disminución en energía interna está evidenciada por el hecho de que el aire que escapa se hace más frío.

20.6 *A* es isométrica, *B* es adiabática, *C* es isotérmica, y *D* es isobárica.

20.7 (c). La frazada actúa como aislador térmico, reduciendo así la transferencia de energía por calor desde el aire hacia el cubo.

20.8 (b). En paralelo, las varillas presentan una mayor área a través de la cual se puede transferir energía y una menor longitud.

Teoría cinética de los gases

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

1. Los líquidos no tienen geometría específica como los sólidos, pero tampoco son tan desordenados como los gases. Las moléculas de un líquido están muy próximas entre sí, y las fuerzas de atracción entre ellas son la responsable de la presión de vapor, la tensión superficial y la viscosidad de los líquidos, así como la energía interna asociada a líquidos. (Tom Stewart/The Image Bank)

En el capítulo 10, estudiamos las propiedades de un gas ideal, usando para ello variables macroscópicas, como la presión, volumen y temperatura. Aquí mostraremos que estas propiedades macroscópicas pueden ser explicadas en términos de las propiedades de las moléculas individuales, es decir, la materia se mueve como una conjunto de moléculas. La teoría de Newton del movimiento, junto con la estadística, nos permite predecir las propiedades macroscópicas de cierta cantidad de procesos moleculares. Este acercamiento al nivel microscópico recibe el nombre de **teoría cinética** y **mecánica estadística**. Por ejemplo, en la teoría cinética, los cambios en la energía como resultado de un cambio de fase de un gas, que es líquido a cierta temperatura y presión, pueden ser predecidos en términos de las fuerzas de atracción entre moléculas individuales. Asimismo, en la presión de un organismo o cuerpo vibrante, la rapidez cinética de las moléculas puede ser usada para establecer el concepto de temperatura.

21.1 Modelo molecular de un gas ideal

Considere un cilindro que tiene un émbolo que contiene un gas ideal. El cilindro mostrado en la ilustración que se ve en gris es parte de un gas que está en equilibrio, es decir, que no está cambiando con el tiempo. Es decir, no hay fluctuaciones en la presión, temperatura o en el volumen. Nuestro modelo molecular de un gas ideal se establece en los siguientes supuestos del capítulo 10 al cual hay también, hacemos los siguientes supuestos:

Suposiciones del modelo molecular de un gas ideal

1. **El número de moléculas en el gas es grande, y el promedio de separación entre ellas es grande en comparación con su dimensión**. Por ejemplo, en un cubo de 1 cm de lado, que contiene un gas a 1 atmósfera de presión y a 0 °C, hay aproximadamente 2.7×10^{19} moléculas.
2. **Las moléculas se mueven de acuerdo con las leyes de Newton**.
3. **Las moléculas interactúan entre sí solo por fuerzas de corto alcance mientras están en contacto, y el tiempo de contacto es pequeño en comparación con el tiempo que pasan lejos de los demás**.
4. **Las moléculas se mueven en todas las direcciones y con todas las posibles velocidades**.
5. **Existe una distribución en una amplitud para cada una, y todas las moléculas son iguales**.

Figura 21.1 Cilindro que contiene un gas ideal. Las moléculas se mueven en todas las direcciones.

Nuestro modelo molecular determina un gas ideal como formado por muchas moléculas, pequeñas masas que se comportan como partículas y que están sujetas a la ley de Newton. Las moléculas se mueven en todas las direcciones y con todas las posibles velocidades, pero en promedio, es los mismos que que consideramos aquí.

Considere una molécula de masa m que se mueve en una dirección x con una rapidez v_x que es igual a la mitad de la arista de el cubo de un segmento de volumen. Con el tiempo, la partícula se mueve hacia la pared y rebota de ella, y se mueve de regreso hacia el otro lado. Primero consideramos nuestra atención en una de esas moléculas de masa m, y luego

un número muy grande de moléculas, sin embargo, como el número de Avogadro, estas variaciones en fuerza se suavizan, de modo que la fuerza promedio dada antes es igual en *cualquier* intervalo de tiempo. Por lo tanto, la fuerza *F constante* sobre la pared debida a las colisiones moleculares es

$$F = \frac{m}{d} \sum_{i=1}^{N} v_{xi}^2$$

Para continuar, consideremos cómo expresar el valor promedio del cuadrado del componente *x* de la velocidad para *N* moléculas. El promedio tradicional de un conjunto de valores es la suma de los valores sobre el número de valores:

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^{N} v_{xi}^2}{N}$$

El numerador de esta expresión está contenido en el lado derecho de la ecuación precedente. Por lo tanto, combinando las dos ecuaciones, la fuerza total sobre la pared se puede escribir como

$$F = \frac{m}{d} N\overline{v_x^2} \qquad (21.1)$$

Ahora concentremos nuestra atención de nuevo en una molécula con componentes de velocidad v_{xi}, v_{yi}, y v_{zi}. El teorema de Pitágoras relaciona el cuadrado de la rapidez de la molécula con los cuadrados de los componentes de velocidad:

$$v_i^2 = v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2$$

En consecuencia, el valor promedio de v^2 para todas las moléculas en el recipiente está relacionado con los valores promedio de v_x^2, v_y^2, y v_z^2 según la expresión

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

Debido a que el movimiento es completamente aleatorio (suposición 2), los valores promedio $\overline{v_x^2}$, $\overline{v_y^2}$, y $\overline{v_z^2}$ son iguales entre sí. Usando este dato y la ecuación precedente, encontramos que

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$$

Por lo tanto, de la ecuación 21.1, la fuerza total ejercida sobre la pared es

$$F = \frac{N}{3}\left(\frac{m\overline{v^2}}{d}\right)$$

Usando esta expresión, podemos hallar la presión total ejercida sobre la pared:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{d^2} = \frac{1}{3}\left(\frac{N}{d^3} m\overline{v^2}\right) = \frac{1}{3}\left(\frac{N}{V}\right) m\overline{v^2}$$

$$P = \frac{2}{3}\left(\frac{N}{V}\right)\left(\frac{1}{2} m\overline{v^2}\right) \qquad (21.2)$$

Relación entre presión y energía cinética molecular

Este resultado indica que **la presión de un gas es proporcional al número de moléculas por unidad de volumen y al promedio de la energía cinética de traslación de las moléculas, $\frac{1}{2}m\overline{v^2}$.** Al analizar este modelo simplificado de un gas ideal, obtenemos un importante resultado que relaciona la cantidad macroscópica de presión con la cantidad microscópica, es decir, el valor promedio del cuadrado de la rapidez molecular. Por lo tanto, hemos establecido un vínculo clave entre el mundo molecular y el mundo a gran escala.

El lector debe observar que la ecuación 21.2 verifica algunas características de presión con las que es probable esté familiarizado. Una forma de aumentar la presión dentro de un recipiente es aumentar el número de moléculas por unidad de volumen *N/V* del recipiente. Esto es lo que se hace cuando se pone aire a una llanta. La presión en la llanta también puede aumentarse al aumentar la energía cinética promedio de traslación de las moléculas

Pregunta rápida 21.2 Considere de nuevo la situación de la Pregunta rápida 21.1. La energía interna del gas del recipiente B es (a) el doble que la del recipiente A (b) igual que la del recipiente A (c) la mitad que la del recipiente A (d) imposible de determinar.

Pregunta rápida 21.3 Considere de nuevo la situación de la Pregunta rápida 21.1. La rapidez rms de las moléculas en el recipiente B es (a) el doble que la del recipiente A (b) igual que la del recipiente A (c) la mitad que la del recipiente A (d) imposible de determinar.

21.2 Calor específico molar de un gas ideal

Figura 21.3 Un gas ideal es llevado de una isoterma a temperatura T a otra a temperatura $T + \Delta T$ a lo largo de tres trayectorias diferentes.

Considere un gas ideal que experimenta varios procesos, de modo que el cambio en temperatura es $\Delta T = T_f - T_i$ para todos los procesos. El cambio de temperatura se puede lograr si se toman varias trayectorias de una isoterma a otra, como se ve en la figura 21.3. Como ΔT es igual para cada trayectoria, el cambio en energía interna ΔE_{int} es igual para todas las trayectorias. No obstante, sabemos de la primera ley, $Q = \Delta E_{\text{int}} - W$, que el calor Q es diferente para cada trayectoria, porque W (el negativo del área bajo las curvas) es diferente para cada trayectoria. Por lo tanto, el calor asociado con un cambio dado en la temperatura *no tiene* un valor único.

Podemos resolver esta dificultad si definimos calores específicos para dos procesos que ocurren con frecuencia: cambios a volumen constante y cambios a presión constante. Como el número de moles es una medida cómoda de la cantidad de gas, definimos los **calores específicos molares** asociados con estos procesos con las siguientes ecuaciones:

$$Q = nC_V\,\Delta T \qquad \text{(volumen constante)} \qquad (21.8)$$

$$Q = nC_P\,\Delta T \qquad \text{(presión constante)} \qquad (21.9)$$

donde C_V es el **calor específico molar a volumen constante.** Cuando agregamos energía a un gas por calor a presión constante, no sólo aumenta la energía interna del gas, sino que se realiza trabajo sobre el gas debido al cambio en volumen. Por lo tanto, el calor $Q_{\text{constante } P}$ debe explicar el aumento en energía interna y la transferencia de energía fuera del sistema por trabajo. Por esta razón, $Q_{\text{constante } P}$ es mayor que $Q_{\text{constante } V}$ para valores dados de n y ΔT. Por lo tanto, C_P es mayor que C_V.

En la sección previa, encontramos que la temperatura de un gas es una medida de la energía cinética promedio de traslación de las moléculas de gas. Esta energía cinética está asociada con el movimiento del centro de masa de cada molécula. No incluye la energía asociada con el movimiento interno de la molécula, es decir, vibraciones y rotaciones alrededor del centro de masa. Esto no debe sorprender, porque el modelo sencillo de la teoría cinética supone una molécula sin estructura.

En vista de esto, primero consideremos el caso más sencillo de un gas ideal monoatómico, es decir, un gas que contiene un átomo por molécula, por ejemplo el helio, neón, o argón. Cuando se agrega energía a un gas monoatómico en un recipiente de volumen fijo, toda la energía agregada se va en aumentar la energía cinética de traslación de los átomos. No hay otra forma de almacenar energía en un gas monoatómico. En consecuencia, de la ecuación 21.6, vemos que la energía interna E_{int} de N moléculas (o n mol) de un gas ideal monoatómico es

Energía interna de un gas ideal monoatómico

$$E_{\text{int}} = K_{\text{tot tras}} = \tfrac{3}{2}Nk_BT = \tfrac{3}{2}nRT \qquad (21.10)$$

Nótese que para un gas ideal monoatómico, E_{int} es una función sólo de T, y la relación funcional está dada por la ecuación 21.10. En general, la energía interna de un gas ideal es una función sólo de T, y la relación exacta depende del tipo de gas.

Si se transfiere energía por calor a un sistema a *volumen constante*, entonces no se realiza trabajo sobre el sistema. Esto es, $W = -\int P\,dV = 0$ para un proceso a volumen constante. Entonces, de la primera ley de la termodinámica vemos que

$$Q = \Delta E_{\text{int}} \tag{21.11}$$

En otras palabras, toda la energía transferida por calor se va a aumentar la energía interna del sistema. En la figura 21.4 se describe un proceso a volumen constante de i a f para un gas ideal, donde ΔT es la diferencia de temperatura entre las dos isotermas. Si sustituimos la expresión de Q dada por la ecuación 21.8 en la ecuación 21.11, obtenemos

$$\Delta E_{\text{int}} = nC_V\,\Delta T \tag{21.12}$$

Si el calor específico molar es constante, podemos expresar la energía interna de un gas como

$$E_{\text{int}} = nC_VT$$

Esta ecuación se aplica a todos los gases ideales a gases que —tienen más de un átomo por molécula— así como a gases ideales monoatómicos. En el límite de cambios infinitesimales, podemos usar la ecuación 21.12 para expresar el calor específico molar a volumen constante como

$$C_V = \frac{1}{n}\frac{dE_{\text{int}}}{dT} \tag{21.13}$$

Apliquemos ahora los resultados de este análisis al gas monoatómico que hemos estado estudiando. Si sustituimos la energía interna de la ecuación 21.10 en la ecuación 21.13, encontramos que

$$C_V = \tfrac{3}{2}R \tag{21.14}$$

Esta expresión pronostica un valor de $C_V = \frac{3}{2}R = 12.5$ J/mol·K para *todos* los gases monoatómicos. Este pronóstico está en excelente acuerdo con valores medidos de calores específicos molares para gases como el helio, neón, argón y xenón, en una amplia gama de temperaturas (tabla 21.2). Pequeñas variaciones en la tabla 21.2 a partir de valores pronosti-

Figura activa 21.4 Se transfiere energía por calor a un gas ideal en dos formas. Para la trayectoria a volumen constante $i \to f$, toda la energía se va en aumentar la energía interna del gas, porque no se realiza trabajo. A lo largo de la trayectoria a presión constante $i \to f'$, parte de la energía transferida entrando como calor es transferida como trabajo de salida.

En el vínculo Active Figures en http://www.pse6.com, usted podrá seleccionar temperaturas inicial y final, para un mol de un gas ideal que experimente procesos a volumen constante y presión constante, y medir Q, W, ΔE_{int}, C_V, y C_P.

Tabla 21.2

Calores específicos molares de varios gases

	Calor específico molar (J/mol·K)[a]			
Gas	C_P	C_V	$C_P - C_V$	$\gamma = C_P/C_V$
Gases monoatómicos				
He	20.8	12.5	8.33	1.67
Ar	20.8	12.5	8.33	1.67
Ne	20.8	12.7	8.12	1.64
Kr	20.8	12.3	8.49	1.69
Gases diatómicos				
H_2	28.8	20.4	8.33	1.41
N_2	29.1	20.8	8.33	1.40
O_2	29.4	21.1	8.33	1.40
CO	29.3	21.0	8.33	1.40
Cl_2	34.7	25.7	8.96	1.35
Gases poliatómicos				
CO_2	37.0	28.5	8.50	1.30
SO_2	40.4	31.4	9.00	1.29
H_2O	35.4	27.0	8.37	1.30
CH_4	35.5	27.1	8.41	1.31

[a] Todos los valores excepto el del agua se obtuvieron a 300 K.

Ejemplo 21.2 Calentamiento de una chapa de cobre

Una chapa cuadrada 2.00 metros de lado a una temperatura de 20 °C.

SE Si el gas es adiabático y cuasiestático, ¿cuánto trabajo se ha necesitado para subir el gas para que su volumen pase a ser 0.5 m³?

Solución Para el proceso cuasiestático, se tiene:

$$Q_i = nC_v\Delta T$$

Como $C_v = 5/2\,J$ mol⁻¹ K⁻¹ para todos $\Delta T = 20$ K, obtenemos:

$$Q_i = 2.0\ \text{mol}\cdot(5/2)\ \text{mol K}\cdot(20\ \text{K})$$
$$= 1\ \text{kJ}$$

SE ¿Cuánto energía ha sido transferida por calor al gas a lo largo del proceso de expansión adiabática?

Solución Necesitamos saber la razón γ de adiabaticidad:

$$\gamma = C_p/C_v$$
$$= (7/2)\ \text{J mol}^{-1}\ \text{K}^{-1}/(5/2)\ \text{J mol}^{-1}\ \text{K}^{-1}$$
$$= 7/5 = 1.4$$

Vemos que esta es más que Q_i. Debido a la compleitaciones de energía (Sec 18.4) que ocurrió en el proceso, el gas pierde más calor.

21.3 Procesos adiabáticos para un gas ideal

Como ya vimos en la sección 18.4, un **proceso adiabático** es aquel en el que no se transfiere energía por calor entre un sistema y su entorno. Por ejemplo, si el gas en el cilindro de la figura 21.1 se expande lo suficientemente rápido, no habrá tiempo para que el calor se intercambie por calor. Para procesos no próximos al equilibrio, no podemos usar la ecuación de estado para describir el gas. Sin embargo, hay ciertas cosas que se pueden adelantar en la expansión una línea de un gas que realizan un proceso adiabático.

Empezaremos por un gas ideal experimentando una expansión adiabática. Por supuesto tenemos la ecuación de estado $PV = nRT$ para describir el gas en cualquier momento. Si el gas ideal es monoatómico estado $PV = nRT$ es válida. Como es monoatómico, la energía interna U es proporcional a la temperatura T y podemos escribir $U = nC_vT$ para cualquier proceso adiabático. Por eso la expresión

$$PV = \text{constante} \qquad (21.18)$$

Recuerda cómo PV es para un proceso adiabático. Determina en qué situaciones

describe 21.17 la línea que separa cualquier diagrama de presión. Así, sabemos que las curvas adiabáticas para ideales PV 21.17 = constante describen trayectorias adiabáticas.

Prueba que PV^γ = constante para un proceso adiabático

Para un proceso adiabático, el trabajo realizado por el gas es igual a su cambio en energía interna, ya que no hay energía que entra o sale de la línea. Si dU es el diagrámico en cambio infinitesimal en energía interna U y dW es el diagrámico cambio infinitesimal en diagrámico, el 21.18 trabajo realizado por el gas es $-dW$, ya que el trabajo realizado por el gas es negativo para el diagrámico en el sistema en la energía interna. Así, en un proceso adiabático, $dU = -dW$. Para un gas ideal monoatómico, $U = \frac{3}{2}PV$. Por lo tanto, la primera ley de la termodinámica $dU = -dW$ se convierte en $\frac{3}{2}d(PV) = -dW$. Si se sustituye en

$$dW = PdV$$

Si se sustituye dW en la ecuación anterior, encontramos que

$$\frac{3}{2}d(PV) = -PdV$$

Si dividimos dV de ambos lados, encontramos que

$$\frac{3}{2}\frac{d(PV)}{dV} = -P$$

Multiplicando por $\frac{2}{3}$ y V obtenemos

$$V\frac{d(PV)}{dV} = -\frac{2}{3}PV$$

Material exclusivo para suscriptores

Para aclarar las variaciones en C_V y C_P en gases más complejos que los gases monoatómicos, exploremos más el origen del calor específico molar. Hasta este punto, hemos supuesto que la única aportación a la energía interna de un gas es la energía cinética de traslación de las moléculas. No obstante, la energía interna de un gas comprende aportaciones provenientes de movimiento de traslación, de vibración y de rotación de las moléculas. Los movimientos de rotación y de vibración de moléculas se pueden activar por colisiones y, por lo tanto, están "acoplados" al movimiento de traslación de las moléculas. La rama de la física conocida como *mecánica estadística* ha demostrado que, para un gran número de partículas que obedecen las leyes de la mecánica de Newton, la energía disponible es, en promedio, compartida igualmente por cada grado de libertad independiente. Recordemos de la sección 21.1 que el teorema de equipartición indica que, en equilibrio, cada grado de libertad aporta $\frac{1}{2}k_BT$ de energía por molécula.

Consideremos un gas diatómico cuyas moléculas tienen la forma de una mancuerna con pesas (figura 21.6). En este modelo, el centro de masa de la molécula puede trasladarse en las direcciones x, y y z (figura 21.6a). Además, la molécula puede girar alrededor de tres ejes mutuamente perpendiculares (figura 21.6b). Podemos despreciar la rotación alrededor del eje y porque el momento de inercia I_y de la molécula y su energía rotacional $\frac{1}{2}I_y\omega^2$ alrededor de este eje son insignificantes en comparación con los asociados con los ejes x y z. (Si los dos átomos se toman como masas puntuales, entonces I_y es idénticamente cero). Por lo tanto, hay cinco grados de libertad para traslación y rotación: tres asociados con el movimiento de traslación y dos asociados con el movimiento de rotación. Como cada grado de libertad aporta, en promedio, $\frac{1}{2}k_BT$ de energía por molécula, la energía interna para un sistema de N moléculas, despreciando por ahora la vibración, es

$$E_{\text{int}} = 3N\left(\tfrac{1}{2}k_BT\right) + 2N\left(\tfrac{1}{2}k_BT\right) = \tfrac{5}{2}Nk_BT = \tfrac{5}{2}nRT$$

Podemos usar este resultado en la ecuación 21.13 para hallar el calor específico molar a volumen constante:

$$C_V = \frac{1}{n}\frac{dE_{\text{int}}}{dT} = \frac{1}{n}\frac{d}{dT}\left(\tfrac{5}{2}nRT\right) = \tfrac{5}{2}R \qquad (21.21)$$

De las ecuaciones 21.16 y 21.17, encontramos que

$$C_P = C_V + R = \tfrac{7}{2}R$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\frac{7}{2}R}{\frac{5}{2}R} = \frac{7}{5} = 1.40\,.$$

Estos resultados concuerdan muy bien con la mayor parte de la información para moléculas diatómicas dada en la tabla 21.2. Esto es más bien sorprendente, porque todavía no hemos considerado las posibles variaciones de la molécula.

En el modelo para vibración, los dos átomos están unidos por un resorte imaginario (véase la figura 21.6c). El movimiento de vibración agrega dos grados de libertad más, que corresponden a la energía cinética y la energía potencial asociada con vibraciones a lo largo de la molécula. Por lo tanto, la física clásica y el teorema de equipartición en un modelo que incluye los tres tipos de movimiento, predicen un total de energía interna de

$$E_{\text{int}} = 3N\left(\tfrac{1}{2}k_BT\right) + 2N\left(\tfrac{1}{2}k_BT\right) + 2N\left(\tfrac{1}{2}k_BT\right) = \tfrac{7}{2}Nk_BT = \tfrac{7}{2}nRT$$

y un calor específico molar a volumen constante de

$$C_V = \frac{1}{n}\frac{dE_{\text{int}}}{dT} = \frac{1}{n}\frac{d}{dT}\left(\tfrac{7}{2}nRT\right) = \tfrac{7}{2}R \qquad (21.22)$$

Este valor es inconsistente con datos experimentales para moléculas como el H_2 y N_2 (véase la tabla 21.2), y sugiere una ruptura de nuestro modelo basado en física clásica.

Podría parecer que nuestro modelo es un fracaso para predecir calores específicos molares para gases diatómicos. Podemos expresar nuestro éxito para este modelo, no obstante, si las mediciones de calor específico molar se hacen en una amplia gama de temperatura,

Figura 21.6 Posibles movimientos de una molécula diatómica: (a) movimiento de traslación del centro de masa, (b) movimiento de rotación alrededor de los diversos ejes y (c) movimiento de vibración a lo largo del eje molecular.

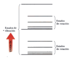


Figura 21.8 Diagrama de niveles de energía para estados de vibración y rotación de una molécula diatómica. Nótese que los estados de rotación están más cercanos entre sí en energía que los estados de vibración.

A bajas temperaturas, la energía que una molécula gana en colisiones con sus vecinas es por lo general no suficientemente grande para elevarla al primer estado excitado de rotación o de vibración. Por lo tanto, aun cuando la rotación y vibración se permiten clásicamente, no se presentan a bajas temperaturas. Todas las moléculas están en el estado base para rotación y vibración. Por lo tanto, la única aportación de la energía promedio de las moléculas es por traslación, y el calor específico es el pronosticado por la ecuación 21.14.

Cuado sube la temperatura, aumenta la energía promedio de las moléculas. En algunas colisiones, una molécula puede tener suficiente energía transferida a ella desde otra molécula como para excitarla al primer estado de rotación. Cuando la temperatura aumenta todavía más, más moléculas pueden estar excitadas en este estado. El resultado es que la rotación empieza a contribuir en la energía interna y sube el calor específico molar. Alrededor de la temperatura ambiente de la figura 21.7, la segunda superficie plana se ha alcanzado y la rotación contribuye por completo al calor específico molar. El calor específico molar es ahora igual al valor pronosticado por la ecuación 21.21.

No hay aportación a temperatura ambiente por la vibración, porque las moléculas están todavía en el estado base de vibración. La temperatura debe elevarse más para excitarlas al primer estado de vibración. Esto ocurre en la figura 21.7 entre 1 000 K y 10 000 K. A 10 000 K en el lado derecho de la figura, la vibración está contribuyendo por completo a la energía interna y el calor específico molar tiene el valor pronosticado por la ecuación 21.22.

Las predicciones de este modelo apoyan el teorema de equipartición de la energía. Además, la inclusión en el modelo de cuantización de la energía de la física cuántica permite entender por completo la figura 21.7.

Pregunta rápida 21.6 El calor específico molar de un gas diatómico se mide a volumen constante y se encuentra que es 29.1 J/mol · K. Los tipos de energía que están contribuyendo al calor específico molar son (a) sólo traslación (b) sólo traslación y rotación (c) sólo traslación y vibración (d) traslación, rotación y vibración.

Pregunta rápida 21.7 El calor específico molar de un gas se mide a volumen constante y se encuentra que es $11R/2$. Es muy probable que el gas sea (a) monoatómico (b) diatómico (c) poliatómico.

El calor específico molar de sólidos

Los calores específicos molares de sólidos *también* demuestran una marcada dependencia con la temperatura. Los sólidos tienen calores específicos molares que generalmente disminuyen en forma no lineal con la temperatura decreciente, y se aproximan a cero cuando la

Figura activa 21.11 Distribución de velocidades de moléculas de gas a alguna temperatura. El número de moléculas que tienen rapidez en el intervalo de v a $v + dv$ es igual al área del rectángulo sombreado, $N_v dv$. La función N_v se aproxima a cero cuando v se aproxima al infinito.

En el vínculo Active Figures en http://www.pse6.com, usted podrá mover el triángulo azul y medir el número de moléculas con rapidez dentro de un pequeño intervalo.

Consideremos un recipiente de gas cuyas moléculas tienen alguna distribución de rapidez. Suponga que deseamos determinar cuántas moléculas de gas tienen una rapidez en el intervalo de, por ejemplo, 400 a 410 m/s. Intuitivamente, esperamos que la distribución de rapidez dependa de la temperatura. Además, esperamos que la distribución presente un pico en la cercanía de v_{rms}. Esto es, se espera que pocas moléculas tengan rapidez mucho menores o mucho mayores que v_{rms} porque esta rapidez resulta sólo de una poco probable cadena de colisiones.

La distribución observada de rapidez de moléculas de gas en equilibrio térmico se muestra en la figura 21.11. La cantidad N_v, llamada **función de distribución de rapidez de Maxwell-Boltzmann,** se define como sigue. Si N es el número total de moléculas, entonces el número de moléculas con rapidez entre v y $v + dv$ es $dN = N_v\,dv$. Este número también es igual al *área* del rectángulo sombreado de la figura 21.11. Además, la fracción de moléculas con rapidez entre v y $v + dv$ es $(N_v\,dv)/N$. Esta fracción también es igual a la probabilidad de que una molécula tenga una rapidez en el intervalo entre v y $v + dv$.

La expresión fundamental que describe la distribución de rapidez de N moléculas de gas es

$$N_v = 4\pi N\left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/2k_B T} \qquad \textbf{(21.26)}$$

donde m es la masa de una molécula de gas, k_B es la constante de Boltzmann, y T es la temperatura absoluta.[2] Observe el aspecto del factor de Boltzmann e^{-E/k_BT} con $E = \frac{1}{2}mv^2$.

Como se indica en la figura 21.11, la rapidez promedio es un poco más lenta que la rapidez rms. La *rapidez v_{mp} más probable* es la rapidez a la que la curva de distribución alcanza un pico. Con el uso de la ecuación 21.26, encontramos que

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3k_BT}{m}} = 1.73\sqrt{\frac{k_BT}{m}} \qquad \textbf{(21.27)}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_BT}{\pi m}} = 1.60\sqrt{\frac{k_BT}{m}} \qquad \textbf{(21.28)}$$

$$v_{mp} = \sqrt{\frac{2k_BT}{m}} = 1.41\sqrt{\frac{k_BT}{m}} \qquad \textbf{(21.29)}$$

La ecuación 21.27 ha aparecido previamente como ecuación 21.7. Los detalles de las deducciones de estas ecuaciones a partir de la ecuación 21.26 se dejan para el estudiante (véanse problemas 39 y 65). De estas ecuaciones, vemos que

$$v_{rms} > \bar{v} > v_{mp}$$

Ludwig Boltzmann
Físico austriaco (1844-1906)

Boltzmann hizo muchas aportaciones importantes al perfeccionamiento de la teoría cinética de los gases, electromagnetismo y termodinámica. Su innovadora obra en el campo de la teoría cinética, condujo a la rama de la física que se conoce como mecánica estadística. *(Cortesía de AIP Niels Bohr Library, Lande Collection)*

La figura 21.12 representa curvas de distribución de rapidez para el nitrógeno, N_2. Las curvas se obtuvieron con el uso de la ecuación 21.26 para evaluar la función de distribución a diferente rapidez y a dos temperaturas. Nótese que el pico de la curva se mueve a la derecha cuando T aumenta, lo que indica que aumenta la rapidez promedio con una temperatura creciente, como es de esperarse. La forma asimétrica de las curvas se debe al hecho de que la rapidez más baja posible es cero, mientras que el límite clásico superior de la rapidez es infinito. (En el capítulo 17 del volumen II, demostraremos que el límite superior real es la rapidez de la luz.)

La ecuación 21.26 muestra que la distribución de rapidez molecular en un gas depende de la masa y de la temperatura. A una temperatura dada, la fracción de moléculas con rapidez que excedan de un valor fijo, aumenta cuando disminuye la masa. Esto explica por qué moléculas más ligeras, como el H_2 y He, escapan con más rapidez de la atmósfera de la Tierra que moléculas más pesadas como las de N_2 y O_2. (Véase el estudio de la rapidez de escape en el capítulo 13. Las moléculas de gas escapan incluso más fácilmente de la superficie de la Luna que de la terrestre, porque la rapidez de escape en la Luna es más baja que la de la Tierra.)

Las curvas de distribución de rapidez para moléculas en un líquido, son semejantes a las que se ven en la figura 21.12. Podemos comprender el fenómeno de evaporación de un líquido a partir de esta distribución en rapidez, usando el hecho de que algunas mo-

---

[2] Para la deducción de esta expresión, véase un texto avanzado sobre termodinámica, como el escrito por R. P. Bauman, *Modern Thermodynamics with Statistical Mechanics*, New York, Macmillan Publishing Co., 1992.

Figura activa 21.12 Función de distribución de rapidez para 10^5 moléculas de nitrógeno a 300 K y 900 K. El área total bajo cualquiera de las curvas es igual al número total de moléculas, que en este caso es igual a 10^5. Nótese que $v_{rms} > \bar{v} > v_{mp}$.

En el vínculo Active Figures en http://www.pse6.com, usted podrá establecer la temperatura deseada y ver el efecto sobre la curva de distribución.

léculas del líquido son más energéticas que otras. Algunas de las moléculas de rápido movimiento del líquido penetran la superficie y salen del líquido incluso a temperaturas bien por abajo del punto de ebullición. Las moléculas que escapan del líquido por evaporación, son las que tienen suficiente energía para vencer las fuerzas de atracción de las moléculas en la fase líquida. En consecuencia, las moléculas que quedan atrás en la fase líquida tienen una menor energía cinética promedio; como resultado de esto, disminuye la temperatura del líquido. Por lo tanto, la evaporación es un proceso de enfriamiento. Por ejemplo, a veces se pone una tela humedecida en alcohol en la cabeza, a un paciente para enfriarla y confortarla.

Pregunta rápida 21.8 Considere las formas cualitativas de las dos curvas de la figura 21.12, sin considerar los valores numéricos ni marcas en la gráfica. Suponga que usted tiene dos recipientes de gas *a la misma temperatura*. El recipiente A tiene 10^5 moléculas de nitrógeno y el recipiente B tiene 10^5 moléculas de hidrógeno. La comparación cualitativa correcta entre los recipientes y las dos curvas de la figura 21.12 es (a) el recipiente A corresponde a la curva azul y el recipiente B a la curva café (b) el recipiente B corresponde a la curva azul y el recipiente A a la curva café (c) ambos recipientes corresponde a la misma curva.

Ejemplo 21.5 Un sistema de nueve partículas

Nueve partículas tienen rapidez de 5.00, 8.00, 12.00, 12.00, 12.0, 14.0, 14.00, 17.0 y 20.0 m/s.

(A) Hállese la rapidez promedio de las partículas.

Solución La rapidez promedio de las partículas es la suma de la rapidez de cada una, dividida entre el número total de partículas:

$$\bar{v} = \frac{(5.00 + 8.00 + 12.0 + 12.0 + 12.0 + 14.0 + 14.0 + 17.0 + 20.0)\ \text{m/s}}{9}$$

$$= \mathbf{12.7\ m/s}$$

(B) ¿Cuál es la rapidez rms de las partículas?

Solución El valor promedio del cuadrado de la rapidez es

$$\overline{v^2} = \frac{(5.00^2 + 8.00^2 + 12.0^2 + 12.0^2 + 12.0^2 + 14.0^2 + 14.0^2 + 17.0^2 + 20.0^2)\ \text{m}^2/\text{s}^2}{9}$$

$$= 178\ \text{m}^2/\text{s}^2$$

Por lo tanto, la rapidez rms de las partículas es

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{178\ \text{m}^2/\text{s}^2} = \mathbf{13.3\ m/s}$$

(C) ¿Cuál es la rapidez más probable de las partículas?

Solución Tres de las partículas tienen una rapidez de 12.0 m/s, dos tienen una rapidez de 14.0 m/s y el resto tienen diferente rapidez. Por lo tanto, vemos que la rapidez más probable v_{mp} es 12.0 m/s.

12.0 m/s.

Figura 21-16 Una molécula que se mueve en un recinto cúbico sufre choques con las moléculas del resto. Cada choque provoca un cambio de dirección y, en ocasiones, alterna la velocidad. Nuestro objetivo es calcular la distancia media que recorre una molécula entre choques, o sea, su trayectoria libre media, en función de sus variables de estado.

21.7 Trayectoria libre media

La teoría de nuestro sistema bombardeado cuya función de gas ideal hemos dado por válida nos permite calcular la **trayectoria libre media** λ de las moléculas del gas, o sea, la distancia media que recorren entre choques. Nuestro objetivo es calcular λ en función de las variables de estado del gas. Para ello, necesitamos saber cuántas moléculas hay en el recinto, cómo se mueven y cuán rápido lo hacen (con respecto, en cada choque, a la dirección en la que iba anteriormente). Hacemos un modelo de la situación en la figura 21-16. Nos centramos en una molécula de masa m y velocidad v que se mueve en un recinto cúbico de arista L y que choca con las demás. Las demás están también moviéndose y, en lugar de considerar cada una por separado, las representamos como un blanco uniforme de densidad **Blanco uniforme**. Es como si hiciéramos un análisis individual de choques, o sea, como si la que se mueve fuera la única que choca con las demás, pero ponderando el número de choques por la densidad de blanco.

Para calcular λ, hacemos un análisis de choques en dos pasos. Primero, calculamos el número de choques de nuestra molécula en un tiempo Δt; en segundo lugar, calculamos la distancia que recorre en ese tiempo. Para hacer el análisis de choques, imaginamos que la molécula se mueve en línea recta (figura 21-16) por un tiempo Δt y que, en ese tiempo, choca con todas las que están en el cilindro de sección σ (el diámetro de la molécula) y longitud $v\Delta t$. Como la densidad de blanco es ρ, el número de colisiones en ese tiempo es el número de partículas dentro del cilindro, o sea, $\rho\sigma^2 v\Delta t$. Por otro lado, el número de choques en ese tiempo es ΔN. Entonces igualamos los dos valores, que es lo que nos permite calcular λ. Pero antes, tenemos que la velocidad promedio v no sale por ningún lado. Para hallarla, tenemos que la velocidad media cuadrática está dada por $v_{rms} = \sqrt{3kT/m}$. Con esta expresión, la ecuación anterior nos dice que, como ΔN es un número adimensional, λ es proporcional a $\sqrt{T}$. Pero, como ρ está en el denominador, λ es inversamente proporcional a P. Además, λ es independiente de la masa de las moléculas y de su diámetro (por supuesto, también, λ es independiente de la velocidad de cada molécula, de ese cilindro en el intervalo Δt). Por lo tanto, si conocemos la densidad de blanco, podemos calcular λ en función de las variables de estado.

La ecuación **Blanco uniforme** es igual a la distancia promedio $\bar{d}$ que recorrerán en un tiempo Δt dividida entre el número de choques que ocurren en ese intervalo:

$$\lambda = \frac{\bar{d}}{\Delta N} = \frac{v\Delta t}{\rho\sigma^2 v\Delta t} = \frac{1}{\rho\sigma^2}$$

Como el número de colisiones en un tiempo Δt es $\Delta N = \rho\sigma^2 v\Delta t$, el número de colisiones por unidad de tiempo, o **frecuencia de colisión** f, es

$$f = \rho\sigma^2 v_{rms}$$

El recíproco de la frecuencia de colisión es el intervalo de tiempo promedio entre colisiones, o sea, el **tiempo libre medio** τ.

Nuestro análisis lo logramos que las moléculas del interior están uniformemente distribuidas y se mueven en todas direcciones. Pero, en realidad, no es así. Entonces, corrigamos:

$$f = \frac{\sigma v_{rms}}{\sqrt{2}} \qquad \text{(21-20)}$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\rho\sigma^2} \qquad \text{(21-21)}$$

Trayectoria libre media

Frecuencia de colisión

Figura 21-17 (a) Un gas compuesto de dos clases de moléculas. (b) Cada molécula sólo ve a las moléculas de la misma clase como blanco. La molécula de la izquierda ve sólo a las moléculas de la derecha como blanco, y viceversa. Por lo tanto, cada molécula sólo choca con la mitad de las moléculas que antes.

Figura 21-18 (a) Dos moléculas idénticas, cada una de diámetro σ, que se acercan a lo largo de una línea que pasa por sus centros. (b) Cuando chocan, la distancia entre sus centros es σ. (c) La molécula verde sólo ve las moléculas rojas como blanco.

Ejercicio 2.1.2 - Densidad de gas

Considere el mismo gas ideal que en el ejercicio 2.1 a temperatura de $300\,\mathrm{K}$ y presión de $1\,\mathrm{atm}$ y calcule la densidad de partículas n.

a) ¿Qué dimensión en nm tiene un cubo que contiene $1\,\mathrm{mol}$ de partículas?

b) ¿Qué dimensión en nm tiene un cubo que contiene $1\,\mathrm{mol}$ de átomos de Pb? ¿Parece coherente con su tamaño?

Solución **a)** Si tenemos un mol de gas a $300\,\mathrm{K}$, podemos usar la ecuación de estado para calcular el número de partículas por volumen, o sea la densidad n de partículas:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{p}{k_B T} = \frac{1\,\mathrm{atm}}{k_B\,300\,\mathrm{K}} \approx 2.44\times10^{25}\,\mathrm{partículas/m^3}$$

$$\Rightarrow L = 10^{8}\,\mathrm{partículas/m^3}$$

Por lo tanto, la separación lineal media es

$$L = \frac{1}{(n)^{1/3}}$$

$$= \frac{1}{(2.44\times10^{25}\,\mathrm{partículas/m^3})^{1/3}}$$

$$= \mathbf{2.9\times10^{-9}\,m}$$

b) Como la región ocupada por cada partícula de gas ideal que experimenta una colisión es L^3, la fracción de volumen que ocupan las partículas de gas ideal es $\frac{V_{\text{partículas}}}{V_{\text{total}}} = \frac{L^3}{L^3} = 1$. Por lo tanto, el volumen total es $V = 1\,\mathrm{mol}\times L^3$. Por lo tanto, la densidad de partículas es

$$n = \frac{1}{L^3} = \frac{1}{(2.9\times10^{-9}\,\mathrm{m})^3} = \mathbf{2.43\times10^{25}\,m^{-3}}$$

La densidad obtenida coincide con la que calculamos en la parte a). La separación media L es una estimación de la separación entre partículas en aproximadamente $\sim 10^{-9}$ m. Es decir, es del orden de un nanómetro. Por lo tanto, el volumen ocupado por cada partícula es $L^3 \sim 10^{-27}\,\mathrm{m}^3$. Por lo tanto, el volumen ocupado por 1 mol de partículas es

$$V = \frac{1\,\mathrm{mol}}{n} = \frac{1\,\mathrm{mol}}{2.44\times10^{25}\,\mathrm{partículas/m^3}} = 4.1\times10^{-2}\,\mathrm{m}^3$$

RESUMEN

La presión de Van der Waals de un gas ideal contenido en un volumen V es

$$p = \frac{N}{V}\frac{k_B T}{1-\frac{N}{V}b} \tag{10.4}$$

La energía cinética promedio de traslación que tendrían las N partículas del gas, $\frac{3}{2}k_B T$, sumándoles una energía potencial $-\frac{N}{V}a$ que tiene en cuenta la compresión. Por lo tanto, la ecuación de estado de la expansión

$$\left(p + \frac{N^2}{V^2}a\right)V = N k_B T \tag{10.5}$$

después de que la corrección de Boltzmann. Como parte de la fuerza de tamaño b, $\propto r^3$ tiene $\frac{1}{r^2}$ la energía potencial es $\propto \frac{1}{r}$.

El **número de equipartición de la energía** expresa que la energía en un sistema en equilibrio térmico se reparte en partes iguales entre todos los grados de libertad.

La energía interna de Helmholtz U a volumen V de gas monoatómico ideal es:

$$U_{\text{ideal}} = \frac{3}{2}N k_B T = \frac{3}{2}pV \tag{11.10}$$

El cambio en energía interna para un cambio de volumen que tiene que experimentar con cambio de temperatura dT es

$$\mathrm{d}U_{\text{ideal}} = \alpha\,\mathrm{d}T \tag{11.11}$$

donde α es el calor específico a volumen constante.

El calor específico molar de un gas monoatómico ideal a volumen constante es $\alpha = \frac{3}{2}k_B$ (el calor específico molar a presión constante es $\alpha = \frac{5}{2}k_B$). La razón entre calores específicos es $\gamma = \frac{5}{3}$.

Si un gas ideal A que sufre una expansión a temperatura adiabática, la presión p y el volumen V están relacionados por una ecuación de la forma

$$pV^{\gamma} = \text{constante} \tag{12.18}$$

La **ley de distribución de Boltzmann** describe la distribución de partículas entre estados de energía disponibles. El número relativo de partículas que tienen energía entre E y $E + dE$ es $n_V(E)\,dE$, donde

$$n_V(E) = n_0 e^{-E/k_BT} \qquad (21.25)$$

La **función de distribución de rapidez de Maxwell-Boltzmann** describe la distribución de rapidez de moléculas en un gas:

$$N_v = 4\pi N\left(\frac{m}{2\pi k_BT}\right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/2k_BT} \qquad (21.26)$$

Esta expresión hace posible que calculemos la **rapidez cuadrática media,** el **promedio de rapidez,** y la **rapidez más probable:**

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3k_BT}{m}} = 1.73\sqrt{\frac{k_BT}{m}} \qquad (21.27)$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_BT}{\pi m}} = 1.60\sqrt{\frac{k_BT}{m}} \qquad (21.28)$$

$$v_{\text{mp}} = \sqrt{\frac{2k_BT}{m}} = 1.41\sqrt{\frac{k_BT}{m}} \qquad (21.29)$$

PREGUNTAS

1. La ley de Dalton de presiones parciales expresa que la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de los gases que formen la mezcla. Dé un argumento convincente para esta ley con base en la teoría cinética de los gases.
2. Un recipiente está lleno con helio y otro con argón. Si ambos recipientes están a la misma temperatura, ¿cuáles moléculas tienen la rapidez rms más alta? Explique.
3. Un gas está formado por una mezcla de moléculas de He y N_2. ¿Se mueven con más rapidez las moléculas de He que las moléculas de N_2? Explique.
4. Aun cuando la rapidez promedio de las moléculas de gas en equilibrio térmico a alguna temperatura es mayor a cero, la velocidad promedio es cero. Explique por qué este enunciado debe ser verdadero.
5. Cuando se frota alcohol en el cuerpo, baja la temperatura de la piel. Explique este efecto.
6. Un líquido llena parcialmente un recipiente. Explique por qué la temperatura del líquido disminuye si al recipiente se le hace vacío parcial. (Con el uso de esta técnica, es posible congelar agua a temperaturas arriba de 0°C).
7. Se enfría un recipiente que contiene un volumen fijo de gas. ¿La trayectoria libre media de las moléculas aumenta, disminuye o sigue constante en el proceso de enfriamiento? ¿Qué pasa con la frecuencia de colisión?
8. Un gas se comprime a una temperatura constante. ¿Qué ocurre a la trayectoria libre media de las moléculas en este proceso?
9. Si un globo inicialmente lleno de helio a temperatura ambiente se pone en un congelador, ¿su volumen aumenta, disminuye o sigue igual?
10. ¿Cuál es más denso, el aire seco o el aire saturado de vapor de agua? Explique.
11. ¿Qué sucede a un globo lleno de helio que se suelta al aire? ¿Se expande o se contrae? ¿Dejará de subir a cierta altura?
12. ¿Por qué un gas diatómico tiene mayor contenido de energía por mol que un gas monoatómico a la misma temperatura?
13. Un gas ideal está contenido en un recipiente a 300 K. Si la temperatura se aumenta a 900 K, ¿en qué factor cambia cada uno de lo siguiente? (a) La energía cinética promedio de las moléculas. (b) La rapidez molecular rms. (c) El cambio en la cantidad de movimiento promedio de una molécula en una colisión con una pared. (d) La frecuencia de colisiones de moléculas con paredes. (e) La presión del gas.
14. Un recipiente está lleno con gas a alguna presión y temperatura de equilibrio. ¿Pueden todas las moléculas del recipiente tener la misma rapidez?
15. En nuestro modelo de la teoría cinética de gases, las moléculas se ven como esferas duras que chocan elásticamente con las paredes del recipiente. ¿Es realista este modelo?
16. En vista del hecho que el aire caliente sube, ¿por qué generalmente se enfría cuando subimos a una montaña? (Nótese que el aire tiene baja conductividad térmica).
17. Al inspeccionar las magnitudes de C_V y C_P para gases diatómicos y monoatómicos en la Tabla 21.2, encontramos que los valores aumentan con una masa molecular creciente. Dé una explicación cualitativa de esta observación.

2. Una botella de 5,00 litros de gas amoniaco (a 0 °C) está a una presión de 1,00 atm. Se le agrega hasta que la presión aumenta a aproximadamente 200 atm. Calcula por cuánto se ha elevado la temperatura del gas. Si la botella se calienta, ¿cuál es la temperatura a la cual se alcanza la presión de 200 atm? Considera que el amoniaco se comporta como gas ideal.

3. En la ciudad, el nivel del mar, un globo cautivo contiene 2,00 m³ de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se lleva el globo a una altura de 2,00 km. Si el volumen del globo no puede exceder el doble del inicial, ¿cuál es la temperatura mínima a la que puede ascender el globo, si la presión a esa altura es 0,80 atm? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

4. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la temperatura** del globo es de 40 °C, ¿cuál es la presión ejercida por el gas? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

5. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del gas? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

Figura P2.10

6. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la temperatura** del globo es de 40 °C y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la cantidad de gas que se le agrega? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

7. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del gas? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

8. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la temperatura** del globo es de 40 °C, ¿cuál es la presión del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

9. Una botella de 5,00 litros de gas diatómico ideal se expande a 20 °C y 1,00 atm. Se le agrega gas hasta que la presión aumenta a 200 atm. Si la temperatura de la botella es de 20 °C, ¿cuál es la cantidad de gas que se le agrega? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

10. Una botella de 5,00 litros de gas diatómico ideal se expande a 20 °C y 1,00 atm. Se le agrega gas hasta que la presión aumenta a 200 atm. Si la cantidad de gas es 0,500 mol, ¿cuál es la temperatura de la botella? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

11. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la temperatura** del globo es de 40 °C, ¿cuál es la presión del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

12. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la presión** del globo es de 1,00 atm y **la cantidad de gas** es 0,500 mol, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

13. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la presión** del globo es de 1,00 atm y **la temperatura** del globo es de 40 °C, ¿cuál es la cantidad de gas que se le agrega? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

14. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la temperatura** del globo es de 40 °C, ¿cuál es la presión del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

15. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

16. Un globo de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

17. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

18. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

19. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

20. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

21. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

22. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

23. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

24. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

25. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

26. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

27. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

28. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

29. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

30. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

31. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

32. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

33. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

34. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

35. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

36. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

37. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

38. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

39. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

40. Un recipiente de 1,00 m³ de volumen contiene 0,100 mol de gas helio a 1,00 atm y 20 °C. Se le agrega gas helio hasta que tiene cinco veces su volumen. Si **la cantidad de gas** es 0,500 mol y **la presión** del globo es de 1,00 atm, ¿cuál es la temperatura del globo? Considera que el gas se comporta como un gas ideal.

Máquinas térmicas, entropía y la segunda ley de la termodinámica

Este trabajo es el corte de un motor de automóvil. En este, una mezcla volátil fluye que se ha mantenido hasta que una chispa la quema en un cilindro, por lo cual, el pistón se mueve hacia arriba y hacia abajo. Este movimiento se convierte en trabajo útil. Las máquinas térmicas no son necesarias en este capítulo. (Cortesía de Ford Motor Company)

Lord Kelvin

Físico y matemático inglés (1824-1907)

Nacido como William Thomson en Belfast, Kelvin fue el primero en proponer el uso de una escala absoluta de temperatura. La escala Kelvin de temperatura recibe ese nombre en su honor. La obra de Kelvin en la termodinámica llevó a la idea de que la energía no puede pasar espontáneamente de un cuerpo más frío a uno más caliente. (J. L. Charmet/SPL/Photo Researchers, Inc.)

La primera ley de la termodinámica, que estudiamos en el capítulo 20, es un enunciado de la conservación de la energía. Esta ley expresa que un *cambio* en la energía interna en un sistema puede ocurrir como resultado de la transferencia de energía por calor o por trabajo, o por ambos. Como dijimos en el capítulo 20, la ley no hace distinción entre los resultados de calor y los resultados de trabajo; el calor o el trabajo pueden producir un cambio en la energía interna. No obstante, hay una distinción importante entre calor y trabajo, y ésta no es evidente desde la primera ley. Una manifestación de esta distinción es que es imposible diseñar un aparato que, operando de un modo cíclico, tome energía por calor y expulse una cantidad *igual* de energía por trabajo. Un aparato cíclico que toma energía por calor y expulsa *una fracción* de esta energía por trabajo es posible y se llama *máquina térmica*.

Aun cuando la primera ley de la termodinámica es muy importante, no hace distinción entre procesos que ocurren espontáneamente y los que no. Sin embargo, sólo ciertos tipos de procesos de conversión de energía y transferencia de energía tienen lugar realmente en la naturaleza. La *segunda ley de la termodinámica*, el tema más importante de este capítulo, establece cuáles procesos ocurren y cuáles no. Los siguientes son ejemplos de procesos que no violan el principio de la conservación de energía si se realizan en cualquier dirección, pero se observa que ocurren en sólo una dirección, gobernada por la segunda ley:

- Cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas se ponen en contacto térmico uno con otro, la transferencia neta de energía por calor es siempre del cuerpo más caliente al menos caliente, nunca del más frío al más caliente.
- Una pelota de caucho que se deje caer el suelo, rebota varias veces y finalmente llega al reposo, pero una pelota que se encuentre en el suelo nunca reúne energía interna del suelo y empieza a botar por sí sola.
- Un péndulo oscilante finalmente llega al reposo debido a colisiones con moléculas del aire y fricción en el punto de suspensión. La energía mecánica del sistema se convierte en energía interna del aire, el péndulo y la suspensión; la conversión inversa de energía nunca ocurre.

Todos estos procesos son *irreversibles*, es decir, son procesos que ocurren de manera natural sólo en una dirección. Ningún proceso irreversible se ha observado que ocurra al contrario; si es que lo hace, violaría la segunda ley de la termodinámica.[1]

Desde el punto de vista de ingeniería, quizá la implicación más importante de la segunda ley es la eficiencia limitada de máquinas térmicas. La segunda ley indica que una máquina que opera en un ciclo, tomando energía por calor y expulsando igual cantidad de energía por trabajo, no se puede construir.

---

[1] Aun cuando nunca se ha observado un proceso que ocurra en sentido de tiempo invertido, *es posible* que ocurra. Como veremos más adelante en este capítulo, sin embargo, la probabilidad que ocurra este proceso es infinitesimalmente pequeña. Desde este punto de vista, decimos que ocurren procesos con probabilidad mucho mayor en una dirección que en dirección opuesta.

Es imposible construir una máquina cíclica cuyo único efecto sea transferir energía continuamente por calor, de un objeto a otro objeto a una temperatura más alta, sin la entrada de energía por trabajo.

Bomba térmica imposible

Figura 22.6 Diagrama esquemático de una bomba térmica imposible o refrigerador, es decir, una que toma energía de un reservorio frío y expulsa una cantidad equivalente de energía a un reservorio caliente sin la entrada de energía por trabajo.

En términos más sencillos, **la energía no se transfiere espontáneamente de un objeto frío a uno caliente.** Esta dirección de transferencia de energía requiere una entrada de energía a una bomba térmica, que con frecuencia es alimentada por medio de electricidad.

Los enunciados de Clausius y Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica parecen no estar relacionados, a primera vista, pero de hecho son equivalentes en todos aspectos. Aun cuando no lo demostramos aquí, si uno cualquiera de estos enunciados fuera falso, entonces también lo es el otro.[4]

Las bombas térmicas se han utilizado durante mucho tiempo para enfriar casas y edificios, y en la actualidad también se están haciendo de preferencia generalizada para calentarlos. La bomba térmica contiene dos juegos de serpentines metálicos que pueden intercambiar energía por calor con el entorno: un juego en el exterior del edificio, en contacto con el aire o enterrado en el suelo, y el otro en el interior del edificio. En el modo de calefacción, un fluido en movimiento que circula por los serpentines absorbe energía del exterior y lo libera en el interior del edificio desde los serpentines interiores. El fluido es frío y a baja presión cuando está en los serpentines exteriores, donde absorbe energía por calor ya sea del aire o del suelo. El resultante fluido caliente se comprime entonces y entra a los serpentines interiores como fluido caliente y de alta presión, donde libera su energía almacenada al aire interior.

Un aire acondicionado es simplemente una bomba térmica con sus serpentines exterior e interior intercambiados, de modo que opera en el modo de enfriamiento. Se absorbe energía entrando en el fluido circulante en los serpentines interiores; luego, después de comprimir el fluido, sale energía del fluido por medio de los serpentines exteriores. El aire acondicionado debe tener una forma de liberar energía al exterior. De otro modo, el trabajo realizado sobre el aire acondicionado representaría energía agregada al aire dentro de la casa, y la temperatura aumentaría. En la misma forma, un refrigerador no puede enfriar la cocina si la puerta del refrigerador se deja abierta. La cantidad de energía que sale de los serpentines exteriores (figura 22.7) detrás o abajo del refrigerador, es mayor que la cantidad de energía retirada de los alimentos. La diferencia entre la energía que sale y la energía que entra es el trabajo realizado por la electricidad suministrada al refrigerador.

La efectividad de una bomba térmica está descrita en términos de un número llamado **coeficiente de operación** (COP). En el modo de calefacción, el COP se define como la razón entre la energía transferida al reservorio caliente y el trabajo necesario para transferir esa energía:

$$\text{Modo de calefacción} = \frac{\text{energía transferida a alta temperatura}}{\text{trabajo realizado por la bomba térmica}} = \frac{|Q_h|}{W} \qquad (22.3)$$

Nótese que el COP es similar a la eficiencia térmica para una máquina térmica en que es una razón entre lo que se gana (energía entregada al interior del edificio) y lo que se pierde (entrada de trabajo). Debido a que $|Q_h|$ es generalmente mayor que W, valores típicos para el COP son mayores a la unidad. Es deseable para el COP ser tan alto como sea posible, igual que como es deseable para la eficiencia térmica de una máquina ser tan alta como sea posible.

Si la temperatura exterior es de 25°F (−4°C) o más alta, un valor típico del COP para una bomba térmica es alrededor de 4. Esto es, la cantidad de energía transferida al edificio es aproximadamente cuatro veces mayor que el trabajo realizado por el motor en la bomba térmica. No obstante, cuando disminuye la temperatura exterior, se hace más difícil para la bomba térmica extraer suficiente energía del aire y por tanto disminuye el COP. En realidad, el COP puede bajar a menos de la unidad para temperaturas abajo de unos 15°F (−9°C). Así, el uso de bombas térmicas que extraen energía del aire, si bien son satisfactorias en climas moderados, no es apropiado en zonas donde las temperaturas invernales son muy bajas. Es posible usar bombas térmicas en regiones más frías al enterrar en el suelo los

Charles D. Winters

Figura 22.7 Los serpentines de atrás de un refrigerador transfieren energía por calor al aire. La segunda ley de la termodinámica expresa que esta cantidad de energía debe ser mayor que la cantidad de energía removida del contenido del refrigerador, debido a la entrada de energía por trabajo.

---

[4] Véase, por ejemplo, la obra de R. P. Bauman, *Modern Thermodynamics and Statistical Mechanics*, Nueva York, Macmillan Publishing Co., 1992.

Apoyados en la innovación data de Raymond A. Barnett y John D. Jewett, el Barnett de siempre ofrece la gran capacidad didáctica que los caracterizaba. Ahora cuenta con un nuevo coautor, Marc Anthony Narducci, que aporta su experiencia de más de 30 años en la enseñanza de Álgebra Lineal, Cálculo y Ecuaciones Diferenciales. Con su estilo claro y directo, Narducci ofrece ejemplos y ejercicios apropiados, consistentes y significativos de este volumen.

- En su capítulo 2 ofrece una breve revisión sobre la solución de ecuaciones lineales.
- Los capítulos 3 y 4 ofrecen un tratamiento exhaustivo sobre vectores, matrices y espacios vectoriales.
- Incluye un capítulo sobre transformaciones lineales y otro sobre valores y vectores característicos.
- Los capítulos 7 y 8 ofrecen una introducción a la teoría de ecuaciones diferenciales ordinarias y a sus aplicaciones.
- Los capítulos 9 y 10 ofrecen una introducción a la teoría de ecuaciones diferenciales parciales y a sus aplicaciones.
- Los anexos A y B ofrecen un repaso de números complejos y de determinantes.
- Un anexo C ofrece una introducción a Maxima.

ISBN 978-970-10-6909-4
Impreso en México
Printed in Mexico