

Transferencia de calor



John Suchocki demuestra la baja conductividad de las brasas caminando descalzo sobre ellas.

La transferencia espontánea de calor siempre ocurre de los objetos más calientes a los más fríos. Si están en contacto varios objetos con temperaturas distintas, los que están más calientes se enfrían y los que están más fríos se calientan, hasta que alcancen una temperatura común. Esta igualación de temperaturas se lleva a cabo de tres maneras: por *conducción*, por *convección* y por *radiación*.

Conducción

Toma un clavo de acero y coloca la punta en una llama. Se calentará tan rápido que ya no podrás sujetarlo. El calor entra al clavo metálico en el extremo que está en la llama, y el calor se transmite por toda su longitud. A esta clase de transmisión de calor se le llama **conducción**. El fuego hace que los átomos en el extremo caliente del clavo se muevan con mayor rapidez. Esos átomos vibran y chocan con sus vecinos, los cuales a la vez hacen lo mismo, y así sucesivamente. Lo más importante es que los electrones libres se mueven a través del metal, empujándose y transfiriendo energía por colisión a los átomos y a los demás electrones libres por todo el clavo.

Lo bien que un objeto sólido conduzca el calor depende del enlace dentro de su estructura atómica o molecular. Los sólidos formados por átomos que tienen uno o más electrones externos “suelos” conducen bien el calor (y la electricidad). Los metales tienen los electrones externos “más suelos”, los cuales se liberan para conducir energía por colisiones a través del metal. Por esta razón son conductores excelentes del calor y la electricidad. La plata es el mejor conductor y le sigue el cobre, y entre los metales comunes están a continuación el aluminio y el hierro. Por otro lado, la lana, la madera, la paja, el papel, el corcho y la espuma de estireno son malos conductores del calor. Los electrones externos en los átomos de esos materiales están bien fijos. A los malos conductores se les llama **aislantes**.

Como la madera es buen aislante se emplea en las asas de los utensilios de cocina. Aun cuando esté caliente, con la mano puedes sujetar el mango de madera de una olla, para sacarla con rapidez de un horno caliente, sin sufrir ningún daño. Tomar con la mano un mango de hierro a la misma temperatura seguramente quemaría tu mano. La madera es buen aislante, aun cuando esté al rojo vivo, y es la causa por la que el profesor John Suchocki pueda caminar descalzo sobre carbones de madera ardientes sin quemarse los pies (fotografía inicial del capítulo). (**PRECAUCIÓN:** no lo intentes; aun los experimentados que caminan descalzos sobre brasas a veces sufren graves quemaduras cuando las condiciones



FIGURA 16.1

Cuado tocas un clavo unido a un bloque de hielo, ¿el frío fluye del clavo a tu mano o la energía fluye de tu mano al clavo?



FIGURA 16.2

El piso de loseta se siente más frío que el de madera, aunque los dos estén a la misma temperatura. Esto se debe a que la loseta es mejor conductor del calor que la madera, por lo que el calor pasa con más facilidad del pie y a la loseta.



El aire es un mal conductor

no son las adecuadas: se les adhieren trocitos de carbón ardiente a los pies, por ejemplo.) El factor principal en la caminata sobre el fuego es la mala conductividad de la madera, aun cuando esté al rojo vivo. Aunque su temperatura es alta, conduce relativamente poco calor a los pies, de igual modo que se conduce poco calor en el aire cuando introduces la mano y la sacas rápidamente de un horno caliente de preparar pizzas. Si tocas el metal del horno, ¡ouch! Asimismo, se quema los pies quien de ordinario camina sobre brasas, y ahora pisa un trozo caliente de metal u otro material buen conductor. También, la evaporación de la humedad de los pies desempeña un papel en esas caminatas, como veremos en el siguiente capítulo.

La mayoría de los líquidos y los gases son malos conductores del calor. El aire es muy mal conductor y, por eso, la mano no se daña cuando la metes brevemente en un horno caliente para pizzas. Las buenas propiedades aislantes de materiales como la madera, la piel y las plumas se deben por mucho a los espacios de aire que contienen. Otras sustancias porosas son igualmente buenos aisladores, ya que tienen muchos espacios pequeños de aire. Debemos dar gracias de que el aire sea mal conductor, porque si no lo fuera, sentirías mucho frío ¡en un día con temperatura de 20 °C (68 °F)!

La nieve también es mala conductora (un buen aislador), más o menos igual que la madera seca. Por ello, un manto de nieve, literalmente, puede evitar que el suelo se enfríe mucho en invierno. Los copos de nieve están formados por cristales, que se acumulan formando masas plumosas, aprisionan el aire y con ello interfieren con el escape del calor de la superficie terrestre. Las viviendas tradicionales del Ártico se protegen del frío por sus cubiertas de nieve. Los animales del bosque encuentran refugio contra el frío en los bancos de nieve y en agujeros en la nieve. La nieve no da calor, sólo evita la pérdida del calor que generan los animales.

El calor se transmite de las temperaturas mayores a las menores. Con frecuencia se escucha que las personas quieren evitar que entre el frío a sus casas. Una mejor forma de plantearlo es decir que quieren evitar que el calor se escape. No hay “frío” que fluya hacia un hogar caliente (a menos que entre un aire frío). Si una casa se enfría se debe a que el calor sale. Las casas se aíslan con lana mineral o vidrio hilado para evitar que escape el calor, y no para evitar que entre el frío.

Es importante destacar el hecho de que en realidad el aislamiento de cualquier tipo no evita que el calor pase por él, simplemente disminuye la rapidez con que penetra el calor. En invierno, hasta una casa caliente, bien aislada, se enfriará en forma gradual. El aislamiento desacelera la transferencia de calor.



FIGURA 16.3

Los depósitos de nieve sobre el techo de una casa muestran las zonas de conducción y de aislamiento. Las partes sin nieve muestran dónde se fugó el calor del interior por el techo, y fundió la nieve.

EXAMÍNATE

1. En regiones desérticas que son cálidas en el día y frías durante la noche, las paredes de las casas con frecuencia son de adobe. ¿Por qué es importante que esas paredes sean gruesas?
2. ¿Por qué puedes colocar brevemente tu mano dentro de un horno caliente para pizzas sin lastimarte, pero te quemarías si tocaras el metal interior del horno?

Convección

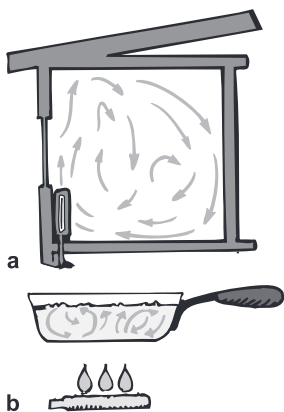
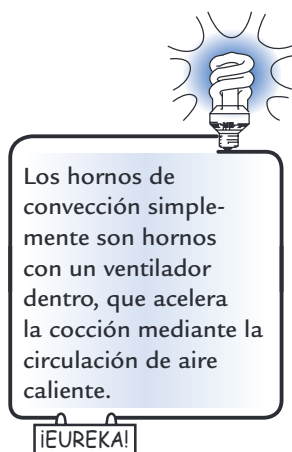


FIGURA 16.4

a) Corrientes de convección en el aire. b) Corrientes de convección en el líquido.

Los líquidos y los gases transmiten el calor principalmente por **convección**, que es la transferencia de calor debida al movimiento real del fluido mismo. A diferencia de la conducción (en la cual el calor se transmite por choques sucesivos de electrones y átomos), la convección implica el movimiento de “gotas” de materia, el movimiento general de un fluido. La convección puede ocurrir en todos los fluidos, sean líquidos o gases. Si calentamos agua en un recipiente, o si calentamos el aire de un recinto, el proceso es el mismo (figura 16.4). A medida que el fluido se calienta por abajo, las moléculas de la parte inferior comienzan a moverse con mayor rapidez, se apartan más entre sí, se vuelven menos densas y se mueve hacia arriba por flotación. Por lo tanto, baja el fluido más frío y denso en el lugar del que ya está caliente. De esta manera se forman corrientes de convección que mantienen agitado el fluido conforme se calienta: el fluido más caliente se aleja de la fuente de calor, y el fluido más frío se mueve hacia la fuente de calor.

Corrientes de convección se forman en la atmósfera y afectan el clima. Cuando se calienta el aire, éste se dilata. Al hacerlo se vuelve menos denso que el aire que lo rodea. Como un globo, sube por flotación. Cuando el aire que sube llega a una altura en la que su densidad coincide con la del aire que lo rodea, deja de subir. Esto se observa cuando el humo de una fogata sube, y después se detiene cuando se enfría y su densidad coincide con la del aire que le rodea. El aire que sube se expande, porque hay menos presión atmosférica que lo comprime cuando llega a mayores alturas. A medida que se expande, se enfría. (Haz ahora el siguiente experimento: Con la boca abierta exhala sobre la mano. Tu aliento es tibio. Ahora repítelo, pero esta vez junta los labios para que el aire salga por una abertura pequeña y se expanda al momento de salir de la boca. ¡Nota que la exhalación es bastante más fría! El aire se enfría al expandirse.) Es lo contrario de lo que sucede cuando el aire se comprime. Si alguna vez comprimiste aire con una bomba de neumático, es posible que hayas notado que tanto el aire como la bomba se calientan bastante.

Se entiende mejor el enfriamiento del aire cuando se expande imaginando que las moléculas de aire son pequeñas pelotas de ping pong que rebotan entre sí. Una de ellas adquiere rapidez cuando la golpea otra que llega con mayor rapidez.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

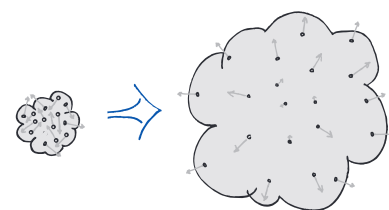
1. Una pared del grosor adecuado mantiene la casa caliente durante la noche al reducir el flujo de calor del interior al exterior, y mantiene la casa fresca durante el día al reducir el flujo de calor desde el exterior hacia el interior. Esa pared tiene “inercia térmica”.
2. Cuando tu mano está en el aire del horno caliente, no te quemas porque el aire es un mal conductor: el calor no viaja bien entre el aire caliente y tu mano. Además, el aire tiene una baja capacidad calorífica específica, de manera que la cantidad total de energía térmica en el aire que se puede transferir a tu piel es muy pequeña. Tocar las paredes de metal calientes del horno sería otra historia, ya que el metal es un excelente conductor y tiene una mucho mayor capacidad calorífica específica, por lo que fluiría mucho calor hacia tu mano.

**FIGURA 16.5**

Un calentador en la punta del tubo en forma de J sumergido en agua produce corrientes de convección, las cuales se ven como sombras (causadas por deflexiones de la luz en el agua a distintas temperaturas).

**FIGURA 16.6**

Exhala aire sobre la palma de la mano con la boca bien abierta. Ahora reduce la abertura entre tus labios y sopla, para que el aire se expanda al soplar. ¿Notas la diferencia de las temperaturas del aire?

**FIGURA 16.7**

Las moléculas de una región de aire que se expande chocan con más frecuencia con moléculas que se alejan que con moléculas que se acercan. En consecuencia, sus rapidezces después del rebote tienden a disminuir y el resultado es que se enfría el aire en expansión.

Pero cuando una pelota choca con otra que está retrocediendo, se reduce su velocidad de rebote. Lo mismo sucede cuando una pelota de ping pong se acerca a la raqueta: Aumenta su rapidez al chocar con la raqueta que se le acerca, pero la pierde si la raqueta va hacia atrás. Esta idea también se aplica a una región del aire que se expande: Las moléculas chocan, en promedio, con más moléculas que se están alejando que las que se están acercando (figura 16.7). Así, en el aire en expansión, la rapidez promedio de las moléculas disminuye y el aire se enfría.¹

Un ejemplo notable del enfriamiento por expansión se tiene en el vapor que se expande cuando sale por el agujero de una olla de presión (figura 16.8). El efecto de enfriamiento, tanto de la expansión como la mezcla rápida con aire más frío, te permite mantener la mano cómodamente en el chorro del vapor condensado. (*Precaución:* si haces la prueba, asegúrate de poner la mano a cierta altura sobre la boquilla, primero, para después ir la bajando hasta una distancia segura. Si pones la mano junto a la boquilla, donde no se ve que haya vapor, ¡cuidado! El vapor es invisible cerca de la boquilla, cuando no se ha expandido y enfriado lo suficiente. La nube de “vapor” que ves en realidad es vapor condensado en agua y está mucho más frío.)

Las corrientes de convección agitan la atmósfera y causan los vientos. Algunas partes de la superficie terrestre absorben el calor solar con más facilidad que otras y, en consecuencia, el aire cercano a la superficie se calienta en forma dispareja, por lo que se forman las corrientes de convección. Esto se ve en la costa. Durante el día, la playa se calienta con más facilidad que el agua; el aire sobre la costa es empujado hacia arriba (decimos que sube), por el aire más frío que llega desde el agua para tomar su lugar. El resultado es la brisa del mar. Durante la noche el proceso se invierte, porque la playa se enfría con más rapidez que el agua y, entonces, el aire más cálido sopla hacia el mar (figura 16.9). Haz una fogata en la playa y verás que el humo sale hacia tierra, durante el día; y hacia el mar, durante la noche.

**FIGURA 16.8**

El vapor caliente se expande al salir de la olla de presión y ella lo siente frío.

¹ En este caso, ¿adónde va a parar la energía? En el capítulo 18 veremos que se transforma en trabajo efectuado sobre el aire de los alrededores, al cual debe empujar el aire que se expande.

TORRE DE POTENCIA DE CONVECCIÓN

Imagina que en un desierto caluroso hay un enorme invernadero: un espacio cerrado de varios kilómetros de diámetro, de forma circular con techo de vidrio y con una chimenea de un kilómetro de altura en el centro. Un invernadero de grandes dimensiones como éste precalienta el aire del desierto, que luego fluye hacia el centro y se eleva por la chimenea. En la chimenea, la corriente de aire acciona unas turbinas de viento, que generan megawatts de energía limpia. Tales plantas de potencia son similares a las turbinas de viento; pero son más confiables porque generan su propio viento. Espera la llegada de estas fuentes de energía limpia del siglo XXI.

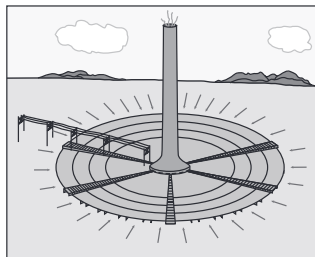
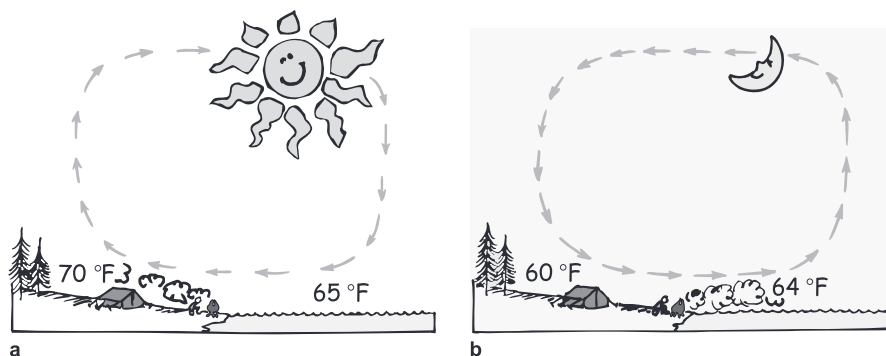


FIGURA 16.9

Corrientes de convección debidas a calentamiento desigual de la tierra y el agua. a) Durante el día, el aire caliente sobre la tierra sube; y el aire más frío sobre el agua entra para reemplazarlo. b) Por la noche, se invierte la dirección del flujo del aire, porque el agua está más caliente que la tierra.



EXAMÍNA

Puedes acercar los dedos a un lado de la llama de una vela, sin dañarte, pero no por arriba de la llama. ¿Por qué?

Radiación

La energía solar atraviesa primero el espacio y después la atmósfera terrestre, y calienta la superficie de la Tierra. Esa energía no atraviesa la atmósfera por conducción, porque el aire es mal conductor. Tampoco pasa por convección, porque ésta sólo comienza después de que la Tierra se calentó. También sabemos que ni la conducción ni la convección son posibles en el espacio vacío, entre nuestra atmósfera y el Sol. Se puede apreciar que la energía debe transmitirse por otra forma, que es por **radiación**.² Cuando la energía se transmite así, es decir, se *irradia*, se llama *energía radiante*.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

El calor va hacia arriba debido a la convección del aire. Como el aire es mal conductor, muy poco calor va hacia los lados.

² La radiación de la que hablamos es radiación electromagnética, que incluye la luz visible. No la confundas con la radiactividad, que es un proceso del núcleo atómico que describiremos en la séptima parte.

PRÁCTICA DE FÍSICA

Sujeta en la mano el fondo de un tubo de ensayo lleno de agua fría. Calienta la parte superior en una llama hasta que hierva. El hecho de que todavía puedas sujetar el fondo del tubo demuestra que el vidrio y el agua son malos conductores de calor, y que la convección no mueve el agua caliente hacia abajo. Es todavía más notable si pones unos pedazos de hielo y los sumerges en el fondo con algo de lana metálica; el agua de arriba puede llegar a hervir sin fundir el hielo. Haz la prueba y mira.

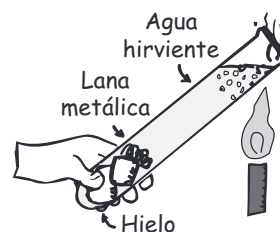
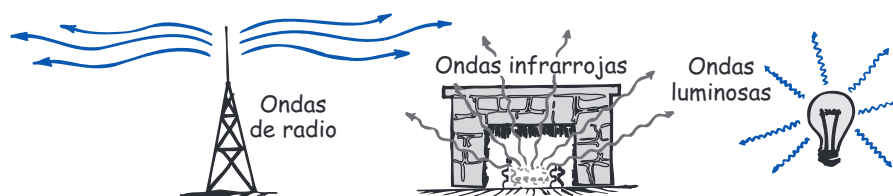


FIGURA 16.10

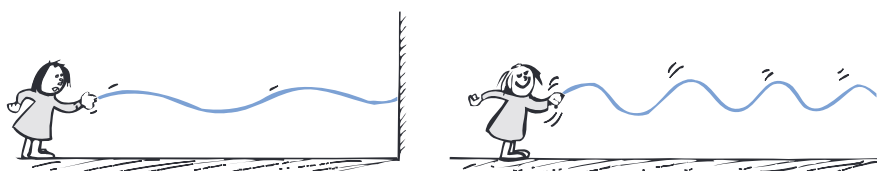
Clases de energía radiante (ondas electromagnéticas).



La energía radiante está en forma de *ondas electromagnéticas*. Incluye las ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Esas clases de energía radiante se citaron en orden por su longitud de onda, desde la más larga hasta la más corta. La radiación infrarroja (abajo del rojo) tiene mayor longitud de onda que la luz visible. Las longitudes de onda mayores que son visibles son las de la luz roja, y las más cortas son las de la luz violeta. La radiación ultravioleta (más allá del violeta) tiene longitudes de onda menores. (En el capítulo 19 examinaremos con más detalle la longitud de onda, y las ondas electromagnéticas las veremos en los capítulos 25 y 26.)

FIGURA 16.11

Se producen ondas de gran longitud cuando se mueve una cuerda con suavidad (a baja frecuencia). Cuando se mueve con más vigor (a alta frecuencia) se producen ondas más cortas.



La longitud de onda de la radiación se relaciona con su *frecuencia*. La frecuencia es la rapidez de vibración de una onda. La niña de la figura 16.10 agita una cuerda con baja frecuencia en el lado izquierdo, y con mayor frecuencia en el lado derecho. Observa que el movimiento de baja frecuencia produce una onda larga y perezosa, y que la de mayor frecuencia produce ondas más cortas. Es igual en las ondas electromagnéticas. En el capítulo 26 veremos que los electrones en vibración emiten ondas electromagnéticas. Las vibraciones de alta frecuencia producen ondas cortas; y las vibraciones de baja frecuencia, ondas largas.

Emisión de energía radiante

Todas las sustancias, a cualquier temperatura mayor que el cero absoluto, emiten energía radiante. La frecuencia $\bar{f}$ para el máximo de la energía radiante es directamente proporcional a la temperatura (Kelvin) absoluta T del emisor (figura 16.12).

$$\bar{f} \sim T$$

La superficie solar tiene una temperatura muy alta (según los estándares de la Tierra) y por ello emite energía radiante con alta frecuencia, mucha de ella en

la parte visible del espectro electromagnético. En cambio, la superficie terrestre está relativamente fría y así la energía radiante que emite tiene una frecuencia menor que la de la luz visible. La radiación emitida por la Tierra tiene la forma de ondas infrarrojas, por debajo del umbral de la visión. La energía radiante emitida por la Tierra se llama **radiación terrestre**.

La mayoría de la gente sabe que el Sol brilla y emite energía radiante, y muchas personas instruidas saben que la fuente de esa energía implica reacciones nucleares en las profundidades del Sol. Sin embargo, son relativamente pocos quienes saben que la Tierra brilla de forma parecida (radiación terrestre), debido principalmente a reacciones nucleares en su interior.

Esas radiaciones nucleares no son más que el decaimiento radiactivo del uranio y de otros elementos en el interior de la Tierra. Al Sol lo energiza una reacción nuclear muy distinta, la fusión termonuclear. (En el capítulo 33 estudiaremos la desintegración radiactiva, y la fusión termonuclear en el capítulo 34.)

Si entras a una mina profunda encontrarás que está caliente todo el año. Ello se debe a final de cuentas a la radiactividad del interior de la Tierra. Gran parte de ese calor se conduce hasta la superficie, de donde es irradiado como radiación terrestre. Así, la energía radiante es emitida tanto por el Sol como por la Tierra. La diferencia principal es que el Sol emite mucho más energía y de alta frecuencia. Más adelante veremos por qué la atmósfera es transparente a la radiación solar de alta frecuencia, que la atraviesa sin problema; pero es opaca a gran parte de la radiación terrestre de baja frecuencia que, en consecuencia, se queda en la atmósfera. Esto es lo que se llama “efecto invernadero” y es probable que cause el calentamiento global.

Todos los objetos —tú, yo y todo cuanto nos rodea— emiten continuamente energía radiante, en forma de una mezcla de frecuencias y sus longitudes de onda correspondientes. Los objetos con alta temperatura, como el Sol, emiten ondas de alta frecuencia y cortas longitudes de onda, así como ondas de menor frecuencia y mayor longitud de onda en el extremo de la región del infrarrojo. Las ondas infrarrojas que absorbe nuestra piel generan la sensación de calor. En consecuencia, la radiación infrarroja se llama con frecuencia *radiación térmica*. Las fuentes comunes que dan la sensación de calor son las brasas ardientes de un fogón, el filamento de una lámpara y el Sol. Todo ello emite radiación infrarroja, además de luz visible. Cuando esta radiación infrarroja encuentra un objeto, se refleja en parte y se absorbe en parte. La parte que se absorbe aumenta la energía térmica del objeto. Si ese objeto es tu piel, sientes la radiación como calentamiento.

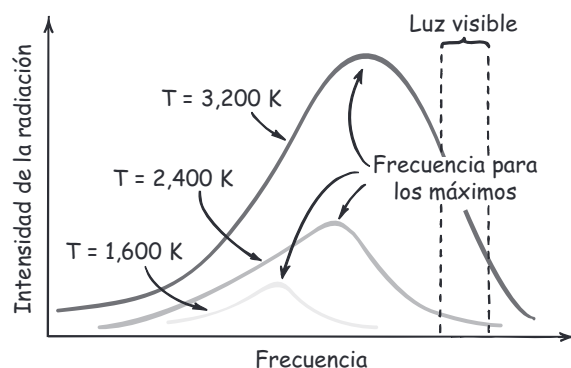


FIGURA 16.12

Figura interactiva

Curvas de radiación para distintas temperaturas. La frecuencia para la máxima energía radiante es directamente proporcional a la temperatura absoluta del emisor.

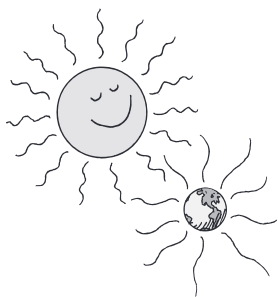
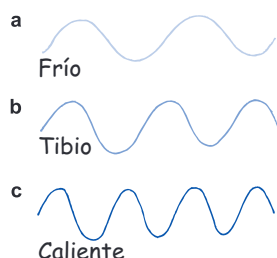


FIGURA 16.13

Tanto el Sol como la Tierra emiten la misma clase de energía radiante. El brillo del Sol es visible al ojo; el brillo de la Tierra es a mayores longitudes de onda, por lo que no es visible al ojo.

**FIGURA 16.14**

a) Una fuente con baja temperatura (fría) emite principalmente ondas largas, de baja frecuencia. b) Una fuente a temperatura intermedia emite principalmente ondas de longitud intermedia y frecuencia intermedia. c) Una fuente de alta temperatura (caliente) emite principalmente ondas cortas, de alta frecuencia.

**FIGURA 16.15**

Cuando se llenan los recipientes con agua caliente (o fría) el negro se enfría (o se calienta) más rápido.



¡Todo a tu alrededor irradia y absorbe energía continuamente!

¡EUREKA!

Cuando un objeto está bastante caliente, emite algo de energía radiante en el espectro de la luz visible. El resplandor de la lava que fluye es un buen ejemplo de lo que decimos. A una temperatura aproximada de 500 °C, la lava (o cualquier otra cosa) emite las ondas más largas que se puedan ver: luz roja de baja frecuencia. Cuando las temperaturas son mayores, vemos una luz amarillenta, mezcla de las frecuencias de la luz roja y frecuencias mayores. A temperaturas aún mayores, a partir de unos 1,200 °C, las mezclas producen luz blanca (en el capítulo 27 detallaremos esto). Se emiten todas las ondas distintas a las cuales es sensible el ojo humano y vemos que el objeto está al “rojo blanco”. El filamento de una lámpara incandescente está cuando menos a 1,200 °C cuando emite luz blanca, y es muy frecuente que alcance cerca de los 2,500 °C.

EXAMÍNA TE

¿En alguno de los siguientes casos no se emite energía radiante? a) El Sol. b) Lava de un volcán. c) Carbones al rojo vivo. d) Este libro que estás leyendo.

Absorción de energía radiante

Si todo está emitiendo energía, ¿por qué no termina por agotarse la energía? La respuesta es que también todo está absorbiendo energía. Los buenos emisores de energía radiante también son buenos absorbedores; los malos emisores son malos absorbedores. Por ejemplo, una antena de radio construida para emitir ondas de radio es, por su diseño, un buen receptor (absorbedor) de ellas. Una antena de transmisión mal diseñada también será mala receptora.

Es interesante observar que si un buen emisor no fuera también un buen absorbedor, los objetos negros permanecerían más calientes que los objetos de color claro, y nunca llegarían los dos a alcanzar la misma temperatura. Los objetos en contacto térmico, con el tiempo suficiente, alcanzan la misma temperatura. Un pavimento negro y un automóvil oscuro pueden calentarse más que sus alrededores en un día cálido. Pero cuando llega la noche, ¡esos objetos oscuros se enfrían más rápido! Más temprano o más tarde, todos los objetos alcanzan el equilibrio térmico. Así, un objeto oscuro que absorbe mucha energía radiante, también debe emitir mucha energía.

Esto lo puedes comprobar con un par de recipientes metálicos del mismo tamaño y forma, uno que tenga una superficie blanca y pulida, y el otro una superficie oscura y mate (figura 16.15). Llénalos con agua caliente y en cada uno pon un termómetro. Verás que el recipiente negro se enfría con más rapidez. La superficie ennegrecida es mejor emisor. El café o el té permanecen calientes durante más tiempo en una olla brillante, que en una ennegrecida. Puedes hacer el inverso de este experimento. Esta vez, llena cada recipiente con agua helada y déjalos frente a un fogón o en el exterior, en un día soleado, donde haya una

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Esperamos que no hayas dicho que d), el libro. ¿Por qué? Porque el libro, como cualquier otra sustancia, tiene temperatura, aunque no mucha. De acuerdo con la regla f , emite en un máximo de radiación cuya frecuencia $f \sim T$ es muy baja en comparación con las frecuencias de la radiación emitida por las demás sustancias. Todas las cosas que tengan cualquier temperatura mayor que el cero absoluto emiten radiación electromagnética. Recuérdalo bien, ¡todo!