فصل ۱۶

انتقال گرما

جان سوچوکی (*John Suchocki*) با پاهای برهنه‌اش رسانندگی گرمایی کم زغال‌های گداخته را نشان می‌دهد.

انتقال خودبه‌خود گرما همواره از اجسام گرم‌تر به اجسام سردتر صورت می‌گیرد. اگر چند جسم نزدیک به هم دماهای متفاوتی داشته باشند، اجسام گرم خنک‌تر می‌شوند، و اجسام خنک گرم‌تر، تا تمام آنها دارای دمای یکسانی شوند. این تساوی دما به سه روش صورت می‌گیرد: رسانش، همرفت، و تابش.

فیزیک‌سرا

راز قدم‌زدن روی زغال‌های داغ

شکل ۱۶-۱

وقتی به میخی دست می‌زنید که در یخ فرورفته است، سرما از میخ به دست شما جریان می‌یابد، یا انرژی از دست شما به میخ جریان می‌یابد؟

رسانش

یک سر میخ آهنی را در شعله نگه دارید. طولی نمی‌کشد، که سر دیگر آن که در دست شماست به‌سرعت به‌قدری داغ می‌شود که دیگر نمی‌توانید آن را نگه دارید. گرما از سری که در شعله است وارد میخ شده و در تمام طول میخ منتقل می‌شود. انتقال گرما بدین‌ترتیب را **رسانش** می‌نامند. آتش باعث می‌شود که اتم‌های سرِگرم‌شدهٔ میخ تندتر حرکت کنند. این اتم‌ها درکنار اتم‌های مجاور ارتعاش، و آنها هم همین کار را می‌کنند. مهم‌تر آنکه الکترون‌های آزاد که می‌توانند در فلز رانده شوند به هم تنه می‌زنند و در برخورد با اتم‌ها و دیگر الکترون‌های آزاد دیگر، انرژی را در میخ منتقل می‌کنند.

رسانش خوب گرما در یک جسم به پیوندهای ساختار اتمی یا مولکولی آن جسم بستگی دارد. جامدهایی که از اتم‌های با یک یا چند الکترون خارجی «سُست» تشکیل شده باشند، گرما (و الکتریسیته) را خوب هدایت می‌کنند. فلزها «سُست‌ترین» الکترون‌های خارجی را دارند، که می‌توانند انرژی را آزادانه از طریق برخورد در فلز منتقل کنند. بدین دلیل، آنها رساناهای عالی گرما و الکتریسیته‌اند. نقره بهترین رساناست و مس پس از آن قرار دارد. در میان فلزهای معمولی آلومینیم و آهن به‌ترتیب در مرتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. از طرف دیگر، پشم، چوب، کاه، کاغذ، چوب‌پنبه، و پلاستیک رسانای ضعیف گرمایند. الکترون‌های خارجی این مواد دارای پیوند محکمی با اتم‌ها هستند. رساناهای ضعیف را عایق می‌نامند.

چون چوب عایق خوبی است، از آن در دستهٔ وسایل آشپزخانه استفاده می‌شود. می‌توانید دستهٔ چوبی یک قابلمهٔ داغ را با دست بگیرید و آن را بدون هیچ آسیبی از روی اجاق داغ بردارید. گرفتن دستهٔ آهنی با همان دما حتماً دستتان را می‌سوزاند. چوب حتی وقتی‌که گداخته باشد عایق خوبی است، بدین سبب استاد آتش‌نورد جان سوچوکی می‌تواند پابرهنه روی زغال‌های گداخته راه برود بدون اینکه پاهایش بسوزد (تصویر شروع فصل). (**هشدار**: این کار را به‌تنهایی امتحان نکنید؛ حتی آتش‌نوردان باتجربه گاهی در وضعیتی نامساعد ــ مثلاً، چسبیدن تکه‌های زغال به پا ــ دچار سوختگی شدید شده‌اند.) عامل اصلی در آتش‌نوردی رسانندگی پایین چوب ــ حتی چوب گداخته ــ است. گرچه دمای آن بالاست، اما گرمای نسبتاً کمی به پا منتقل می‌شود، درست همان‌قدر که هوا هنگام قرار دادن دستتان برای مدت کوتاهی در تنور پیتزا به آن منتقل می‌کند. اگر در تنور داغ به فلز دست بزنید ــ **اوخ!** همین‌طور، آتش‌نوردی که روی قطعه فلز یا رسانای داغ دیگری قدم می‌گذارد دچار سوختگی خواهد شد. تبخیر رطوبت روی پاهای مرطوب نیز، چنانکه در فصل بعد خواهیم دید، در آتش‌نوردی نقش دارد.

اغلب جامدها وگازها رساناهای ضعیف گرمایند. هوا رسانای بسیار ضعیف است، بدین سبب است که اگر دستتان را مدت کوتاهی در تنور پیتزا بگذارید آسیب نمی‌بیند. ویژگی‌های اجسامی چون پشم، پوست، و پر به‌عنوان عایق خوب بیشتر به‌واسطهٔ هوای موجود در آنهاست. سایر مواد متخلخل نیز به‌علت فضاهای کوچک بسیار زیاد حاوی هوا در آنها عایق‌هایی بسیار خوب‌اند. خوشحال باشید که هوا رسانای ضعیفی است؛ اگر چنین نبود، در یک روز با دمای ۲۰°C (۶۸°F) کاملاً احساس سرما می‌کردید!

برف رسانایی ضعیف (و عایقی خوب) است ــ تقریباً مانند چوب خشک. بنابراین، لحافی از برف در زمستان عملاً زمین را گرم نگه می‌دارد. دانه‌های برف از بلورهایی تشکیل شده‌اند، که به‌شکل توده‌های پر مانند به‌هم متصل می‌شوند، و هوا را محبوس می‌سازند، در نتیجه مانع فرار گرما از سطح زمین می‌شوند. اقامتگاه‌های قطبی سنتی با پوشش برف خود در مقابل سرما محافظت می‌شوند. پشته‌های برف و سوراخ‌های موجود در آن حیوانات جنگل را از سرما محافظت می‌کنند. برف گرمایی تولید نمی‌کند؛ بلکه صرفاً اتلاف گرمایی را که حیوانات تولید می‌کنند کُند می‌سازد.

گرما از دمای بالاتر به دمای پایین‌تر منتقل می‌شود. اغلب می‌شنویم که مردم می‌گویند می‌خواهند سرما را بیرون از خانه‌های خود نگه دارند. راه بهتر آن است که بگویند می‌خواهند مانع از فرار گرما شوند. «سرمایی» وجود ندارد که وارد خانهٔ گرم شود (مگر اینکه باد به درون آن بوزد). اگر خانه سردتر می‌شود، به‌علت خروج گرماست. به‌جای جلوگیری از ورود سرما، خانه‌ها را برای جلوگیری از خروج گرما با پشم سنگ یا پشم شیشه عایق‌بندی می‌کنند.

در احساس گرم و سردی مواد مختلف آهنگ انتقال گرما دخیل است، نه الزاماً دما.

جرقه‌ها

شکل ۱۶-۲
کف کاشی سردتر از کف چوبی احساس می‌شود، گرچه هر دو ماده دمایی یکسان دارند. علت این امر آن است که کاشی رسانایی بهتر از چوب برای گرماست، و در نتیجه گرما راحت‌تر از پای در تماس با کاشی خارج می‌شود.

مهم است توجه کنیم که هیچ عایقی نمی‌تواند به‌طور کامل از عبور گرما جلوگیری کند. عایق فقط آهنگ نفوذ گرما را کم می‌کند. در زمستان، حتی بهترین خانه‌های گرم عایق‌بندی‌شده به‌تدریج سرد خواهند شد. عایق‌بندی انتقال گرما را کُند می‌سازد.

فیزیک‌سرا

هوا رسانایی ضعیف است

شکل ۱۶-۳

طرح‌های برف روی بام خانه ناحیه‌های رسانش و عایق‌بندی را نشان می‌دهد. بخش‌های تهی نشان می‌دهد کجا گرمای داخل خانه از بام به خارج نشت و برف را ذوب کرده است.

خود را بیازمایید

۱. در ناحیه‌های کویری که روزها گرم و شب‌ها سردند، دیوارهای خانه‌ها را اغلب از گل می‌سازند. چرا مهم است که دیوارهای گلی ضخیم باشند؟

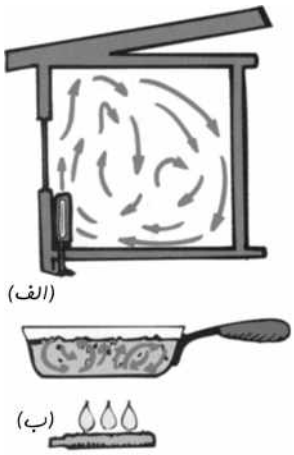
۲. چرا می‌توانید دست خود را برای مدت کوتاهی، بدون آسیب دیدن، داخل تنور پیتزا بگذارید، اما اگر به دیواره‌های فلزی تنور دست بزنید، دستتان می‌سوزد؟

همرفت

مایع‌ها و گازها گرما را بیشتر با **همرفت** منتقل می‌کنند، که انتقال گرمای ناشی از حرکت واقعی خود شاره است. در همرفت، برخلاف رسانش (که در آن گرما با برخوردهای متوالی الکترون‌ها و اتم‌ها منتقل می‌شود)، حرکت «تکه‌های» ماده ــ حرکت کلی شاره ــ دخیل است. همرفت می‌تواند در همهٔ شاره‌ها، چه مایع و چه گاز، به‌وقوع بپیوندد. چه آب را در ماهی‌تابه گرم کنیم و چه هوا را در اتاق، فرایند یکسان است (شکل ۱۶-۴). وقتی شاره از زیر گرم می‌شود، مولکول‌های ته ظرف تندتر حرکت می‌کنند و بیشتر از هم دور می‌شوند، چگالی آنها کاهش می‌یابد، و به بالا رانده می‌شوند. شارهٔ خنک‌تر و چگال‌تر جای شارهٔ گرم‌شده در قسمت پایین را می‌گیرد.

فِرهای همرفتی صرفاً فرهای دارای بادبزن‌اند که با گردش هوای گرم‌شده به آشپزی شتاب می‌دهند.

جرقه‌ها



شکل ۱۶-۴
الف) جریان‌های همرفتی در هوا.
ب) جریان‌های همرفتی در مایع.

بدین‌ترتیب، جریان‌های همرفتی با گرم شدن شاره را مخلوط می‌کنند ــ شارهٔ گرم‌تر از منبع گرما دور می‌شود و شارهٔ خنک‌تر به طرف چشمهٔ گرما حرکت می‌کند.

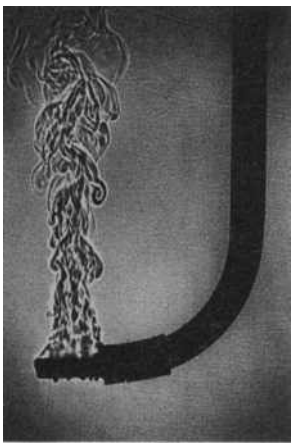
جریان‌های همرفتی جو در آب و هوا مؤثرند. وقتی هوا گرم شود، منبسط می‌شود. چگالی آن بر اثر انبساط کمتر از هوای اطراف می‌شود. مانند یک بالون به‌طرف بالا حرکت می‌کند. وقتی هوای در حال بالا رفتن به ارتفاعی رسید که چگالی آن برابرِ چگالی هوای اطراف شد، دیگر بالا نمی‌رود. این موضوع هنگام بالا رفتن دود از آتش و سپس هموار شدن آن به‌هنگام خنک شدن و برابری چگالی آن با هوای اطراف نمایان می‌شود. (آزمایش زیر را همین حالا انجام دهید. با دهان باز، روی دستتان فوت کنید. نفستان گرم است. اکنون آن را تکرارکنید، اما این بار لب‌هایتان را غنچه کنید تا سوراخ کوچکی به‌وجود آید و نفستان هنگام خروج از دهان منبسط شود. توجه کنید که نفستان به‌طور قابل ملاحظه‌ای خنک‌تر است! هوای در حال انبساط خنک می‌شود.) این عکس چیزی است که هنگام تراکم هوا رخ می‌دهد. اگر تاکنون هوا را با تلمبه متراکم کرده باشید، احتمالاً متوجه شده‌اید که هم هوا و هم تلمبه کاملاً داغ می‌شوند.

می‌توان با در نظرگرفتن مولکول‌های هوا به‌صورت توپ‌های کوچک پینگ‌پونگ که به‌هم می‌خورند خنک شدن هوای در حال انبساط را فهمید. توپ در برخورد با توپ دیگری که با سرعت بیشتر به آن نزدیک می‌شود شتاب می‌گیرد. اما وقتی به توپی می‌خورد که از آن دور می‌شود، سرعتش کم می‌شود. توپی که به‌طرف راکت حرکت می‌کند نیز همین‌طور است؛ در برخورد با راکتی که نزدیک می‌شود، سرعت می‌گیرد، و در برخورد با راکتی که از آن دور می‌شود،

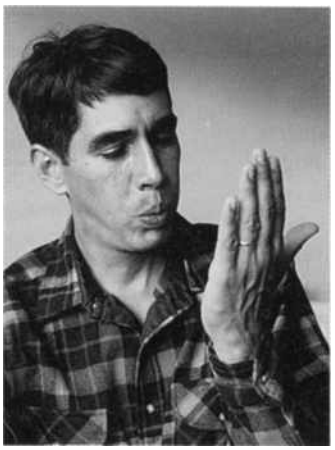
پاسخ خود را وارسی کنید

۱. دیواری با ضخامت مناسب با کند کردن جریان هوا از داخل به خارج، در شب خانه را گرم، و هنگام روز با کند کردن جریان گرما از خارج به داخل آن را خنک نگه می‌دارد. این دیوار دارای «لختی گرمایی» است.

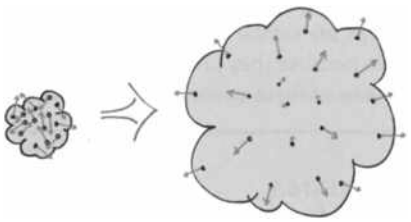
۲. وقتی دست شما در هوای تنور داغ است، از این‌رو آسیب نمی‌بینید که هوا رسانای ضعیفی است ــ گرما به‌خوبی بین هوای گرم و دست شما حرکت نمی‌کند. هوا ظرفیت گرمایی ویژهٔ پایینی نیز دارد، در نتیجه، مقدار انرژی گرمایی موجود در هوا که می‌تواند به دست شما منتقل شود ناچیز است. دست‌زدن به دیواره‌های فلزی تنور حکایت دیگری است، چون فلزها رساناهایی عالی و دارای ظرفیت گرمایی ویژهٔ بزرگ‌ترند، در نتیجه، گرمای قابل ملاحظه‌ای به‌دست شما منتقل می‌شود.



شکل ۱۶-۵
یک گرم‌کننده در نوک لوله‌ای به شکل J در زیر آب جریان‌های همرفتی تولید می‌کند که به صورت سایه‌هایی (ناشی از انحراف نور در آب با دماهای مختلف) نمایان می‌شوند.



شکل ۱۶-۶
هوای گرم را با دهان باز به دستتان بدمید. اکنون لب‌هایتان را غنچه کنید تا هوا هنگام فوت کردن شما منبسط شود. آیا متوجه اختلاف دمای هوا می‌شوید؟



شکل ۱۶-۷
برخورد مولکول‌های هوای ناحیهٔ در حال انبساط با مولکول‌های دور شونده بیشتر از مولکول‌هایی است که به آنها نزدیک می‌شوند. پس سرعت واجهش آنها کاهش می‌یابد، و در نتیجه هوای در حال انبساط خنک می‌شود.

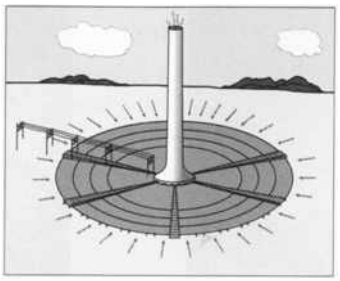
شکل ۱۶-۸
بخار داغ خروجی از دیگ‌زودپز منبسط می‌شود و هنگام تماس با دست میلی (Millie) خنک است.

سرعتش کاهش می‌یابد. همین مفهوم را می‌توان در مورد هوایی که منبسط می‌شود به‌کار برد؛ برخورد مولکول با مولکول‌هایی که از آن دور می‌شوند، به‌طور میانگین بیشتر از مولکول‌هایی است که به آن نزدیک می‌شوند (شکل ۱۶-۷). بنابراین، در هوای در حال انبساط، سرعت متوسط مولکول‌ها کاهش می‌یابد و هوا خنک می‌شود.[۱]

یک مثال بارز خنک شدن بر اثر انبساط بخاری است که از دهانهٔ دیگ‌زودپز خارج می‌شود (شکل ۱۶-۸). اثر خنک‌کنندهٔ انبساط و اختلاط سریع با هوای خنک‌تر امکان راحت نگه داشتن دستتان در فوران بخار متراکم را فراهم می‌سازد. (هشدار: اگر این کار را انجام می‌دهید، اطمینان حاصل کنید که ابتدا دستتان خیلی بالاتر از دهانه است و سپس آن را تا فاصلهٔ مناسب پایین بیاورید. اگر دستتان را بر دهانه می‌گذارید که ظاهراً در آن بخاری وجود ندارد، مواظب باشید! بخار در نزدیکی دهانه که هنوز به اندازهٔ کافی منبسط و خنک نشده نامرئی است. ابر «بخار»ی که مشاهده می‌کنید در واقع بخار آب چگالیده و بسیار خنک‌تر است.)

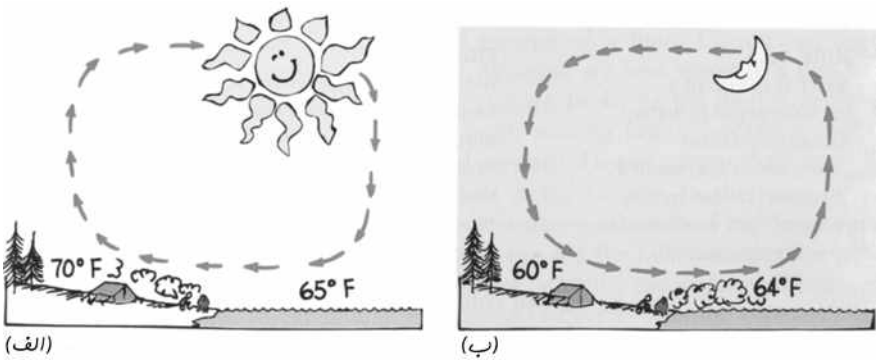
۱. در این مورد انرژی کجا می‌رود؟ در فصل ۱۸، خواهیم دید که این انرژی با حرکت هوای در حال انبساط به طرف خارج روی هوای اطراف کار انجام می‌دهد.

برج توان همرفتی



گلخانه‌ای عظیم را در یک کویر داغ در نظر بگیرید ــ محوطهٔ دایره‌ای محصور با سقف شیشه‌ای به قطر چند کیلومتر با دودکشی به ارتفاع یک کیلومتر در وسط آن. این گلخانهٔ عظیم باعث گرم شدن هوای کویر می‌شود، این هوا به طرف مرکز گلخانه جریان پیدا می‌کند و در دودکش بالا می‌رود. در این هوای صعودی توربین‌های بادی قرار دارند که چند مگاوات توان پاک تولید می‌کنند. این نیروگاه‌ها مانند توربین‌های بادی، اما مطمئن‌ترند زیرا خودشان باد تولید می‌کنند. منتظر ورود این منابع توان پاک قرن بیست‌ویکم باشید.

جریان‌های همرفتی جو را به حرکت درمی‌آورند و بادها را تولید می‌کنند. برخی بخش‌های زمین، گرمای خورشید را راحت‌تر از بخش‌های دیگر جذب می‌کنند، در نتیجه، هوای مجاور سطح به طور غیریکنواخت گرم و جریان‌های همرفتی تشکیل می‌شود. این موضوع در ساحل دریا آشکار است. در طول روز، ساحل راحت‌تر از آب گرم می‌شود؛ هوای خنک‌تر بالای آب به طرف ساحل می‌آید و هوای گرم روی آن را به طرف بالا می‌راند (می‌گوییم هوای گرم صعود می‌کند). حاصل آن نسیم دریاست. هنگام شب، فرایند معکوس می‌شود، زیرا ساحل سریع‌تر از آب خنک می‌شود، و در این حالت هوای گرم‌تر روی دریاست (شکل ۱۶-۹). اگر روی ساحل آتش روشن کنید، متوجه می‌شوید که در طول روز دود به طرف خشکی و در طول شب به طرف دریا کشیده می‌شود.



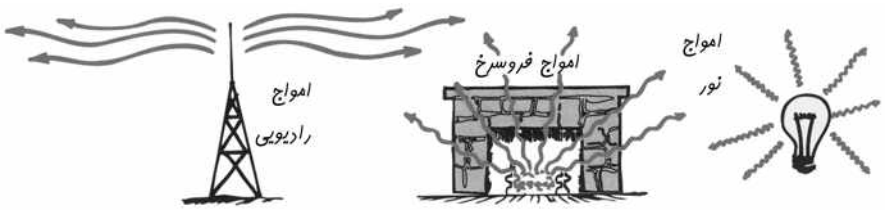
شکل ۱۶-۹
گرم شدن غیریکنواخت خشکی و آب جریان‌های همرفتی تولید می‌کند. الف) در طول روز، هوای گرم روی خشکی بالا می‌رود، و هوای خنک‌تر روی آب جای آن را می‌گیرد. ب) در طول شب جهت جریان هوا معکوس می‌شود، زیرا آب گرم‌تر از خشکی است.

خود را بیازمایید

می‌توانید انگشتان خود را بدون آسیب دیدن در کنار شعلهٔ شمع نگه دارید، اما نه روی آن. چرا؟

تابش

انرژی خورشید از فضا و جو زمین می‌گذرد و سطح زمین را گرم می‌کند. عبور این انرژی از جو به‌واسطهٔ رسانش نیست، زیرا هوا رسانایی ضعیف است. همرفت هم نیست، زیرا همرفت فقط وقتی شروع می‌شود که زمین گرم شده باشد. همین‌طور می‌دانید که نه همرفت در فضای خالی بین جو و خورشید امکان‌پذیر است و نه رسانش. پس انرژی باید به‌صورت دیگری منتقل شود که توسط **تابش** است.[۲] انرژی‌ای را که بدین‌گونه می‌تابد انرژی تابشی می‌نامند.



شکل ۱۶-۱۰
انواع انرژی تابشی (امواج الکترومغناطیسی).

انرژی تابشی به‌صورت امواج الکترومغناطیسی است. این تابش شامل امواج رادیویی، تابش فروسرخ، نور مرئی، تابش فرابنفش، پرتوهای X، و پرتوهای گاماست. انواع انرژی تابشی را به‌ترتیبِ طول‌موج، از بلندترین به کوتاه‌ترین، فهرست می‌کنند. تابش فروسرخ (پایین‌تر از سرخ) طول موجی بلندتر از نور مرئی دارد. بلندترین طول‌موج مرئی مربوط به نور سرخ است، و کوتاه‌ترین آن نور بنفش. تابش فرابنفش (فراتر از بنفش) کوتاه‌ترین طول‌موج را دارد. (طول‌موج‌ها را در فصل ۱۹ با تفصیل بیشتر بررسی می‌کنیم، و تابش الکترومغناطیسی را در فصل‌های ۲۵ و ۲۶ مفصل‌تر بررسی خواهیم کرد.)

طول‌موج تابش به بسامد آن وابسته است. بسامد آهنگ ارتعاش موج است. دختر شکل ۱۶-۱۱ طنابی را با بسامد کم (چپ)، و بسامد بالاتر (راست) تکان می‌دهد. توجه کنید چگونه تکان دادن پایین‌بسامد یک موج بلند کم‌تحرک و تکان دادن بالابسامد امواج کوتاه‌تری تولید می‌کند. برای امواج الکترومغناطیسی هم همین‌طور است. در فصل ۲۶ خواهیم دید

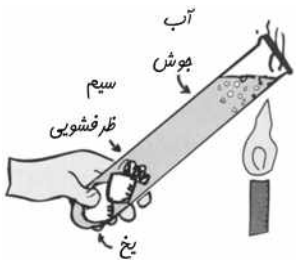
پاسخ خود را وارسی کنید

هوای گرم بر اثر همرفت بالا می‌رود. چون هوا رسانای ضعیفی است، گرمای کمی از کنار شعله به‌دست شما می‌رسد.

۲. تابشی که درباره‌اش صحبت می‌کنیم تابش الکترومغناطیسی، شامل نور مرئی است. این تابش را با پرتوزایی اشتباه نگیرید، که فرایندی مربوط به هستهٔ اتم است که در بخش هفتم کتاب بررسی خواهیم کرد.

تمرین فیزیک

ته لولهٔ آزمایش پر از آب سردی را در دست خود نگه دارید. قسمت بالای آن را در شعله بگیرید تا آب به جوش آید. این واقعیت که هنوز می‌توانید ته لولهٔ آزمایش را نگه دارید نشان می‌دهد که شیشه و آب رساناهای ضعیف گرمایند و همرفت باعث حرکت آب داغ به طرف پایین نمی‌شود. این موضوع وقتی قطعه‌های یخ را با مقداری سیم ظرفشویی در ته لوله قرار دهید، شگفت‌انگیزتر هم می‌شود؛ دراین صورت می‌توان آب بالای لوله را به جوش آورد بدون اینکه یخ ذوب شود. امتحان کنید و ببینید.



شکل ۱۶-۱۱
موج با طول‌موج بلند وقتی تولید می‌شود که طناب به آرامی تکان داده شود (بسامد پایین). وقتی طناب شدیدتر تکان داده شود (با بسامد بالا) موجی با طول‌موج کوتاه‌تر تولید می‌شود.

که الکترون‌های مرتعش امواج الکترومغناطیسی گسیل می‌دارند. ارتعاش‌های بالابسامد امواج با طول‌موج کوتاه و ارتعاش‌های پایین‌بسامد امواج با طول‌موج‌های بلندتر تولید می‌کنند.

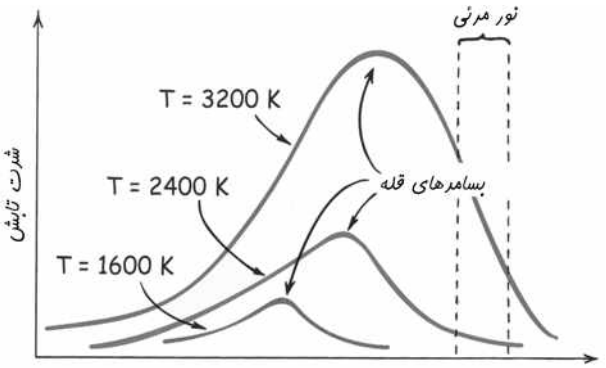
گسیل انرژی تابشی

همهٔ مواد در هر دمای بالاتر از صفر مطلق انرژی تابشی گسیل می‌کنند. بسامد قلهٔ $\overline{f}$ انرژی تابشی با دمای مطلق (کلوین) T گسیلنده نسبت مستقیم دارد (شکل ۱۶-۱۲):

$$\overline{f} \sim T$$

سطح خورشید دارای دمای بالا (در مقایسه با استانداردهای زمینی) است و در نتیجه انرژی تابشی با بسامد بالا گسیل می‌دارد ــ که بیشتر آن در بخش مرئی طیف الکترومغناطیسی قرار دارد. سطح زمین، در مقایسه با آن، نسبتاً خنک است، و در نتیجه انرژی تابشی گسیلیده از آن بسامدی پایین‌تر از نور مرئی دارد. تابش گسیلیده از زمین به‌صورت امواج فروسرخ است، که زیر آستانهٔ دید ما قرار دارند. انرژی تابشی گسیلیده از زمین را **تابش زمینی** می‌نامند.

اغلب مردم می‌دانند که خورشید می‌درخشد و انرژی تابشی گسیل می‌دارد، و بسیاری از



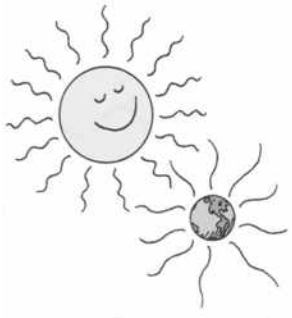
شکل ۱۶-۱۲

تصویر تعاملی

منحنی‌های تابش برای دماهای مختلف قلهٔ بسامد انرژی تابشی با دمای مطلق گسیلنده نسبت مستقیم دارد.

افراد تحصیل‌کرده می‌دانند که چشمهٔ انرژی خورشید واکنش‌های هسته‌ای در عمق آن است. با این همه، تعداد نسبتاً کمی از افراد می‌دانند که زمین هم به همین ترتیب، به‌واسطهٔ واکنش‌های هسته‌ای (با تابش زمینی) می‌درخشد. این واکنش‌های هسته‌ای واپاشی سادهٔ اورانیم و دیگر عناصر موجود داخل زمین است. نوع بسیار متفاوتی از واکنش هسته‌ای، همجوشی گرما هسته‌ای، توان خورشید را تأمین می‌کند. (واپاشی پرتوزا را در فصل ۳۳ و همجوشی گرما هسته‌ای را در فصل ۳۴ بررسی خواهیم کرد.)

از هر معدن عمیقی که دیدن کنید آن را ــ در تمام طول سال ــ گرم خواهید یافت. علت آن در نهایت پرتوزایی درون زمین است. بیشتر گرما به سطح زمین هدایت و از آنجا به‌صورت تابش زمینی گسیل می‌شود. بنابراین هم خورشید و هم زمین انرژی تابشی گسیل می‌دارند، تنها فرق آنها این است که خورشید انرژی بسیار بیشتری را در بسامد بالاتر گسیل می‌کند. به‌زودی خواهیم دید که چگونه جو برای تابش خورشیدی بالابسامد، که درست از میان آن می‌گذرد، شفاف است، ولی برای بیشتر تابش‌های زمینی پایین‌بسامد مات است، در نتیجه این تابش در جو باقی می‌ماند. این موضوع در «اثر گلخانه‌ای» مؤثر است. و احتمالاً، باعث گرم شدن سراسری زمین می‌شود.



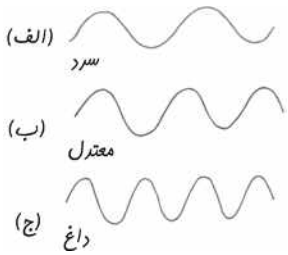
شکل ۱۶-۱۳

خورشید و زمین هر دو یک نوع انرژی تابشی گسیل می‌کنند. نور خورشید برای چشم ما مرئی است؛ نور زمین دارای طول‌موج‌های بلندتر و در نتیجه برای چشم ما نامرئی است.

تمام اشیا ــ من و شما و هر چیز در اطراف ما ــ پیوسته انرژی تابشی را در مخلوطی از بسامدها و طول‌موج‌های نظیر آن گسیل می‌دارند. اشیای دمابالایی چون خورشید امواج بالابسامدی با طول‌موج‌های کوتاه، مانند امواج کم‌بسامد انتهای ناحیهٔ فروسرخ، گسیل می‌کنند. جذب پرتوهای فروسرخ در پوستمان احساس گرما به‌وجود می‌آورد. در نتیجه، تابش فروسرخ اغلب تابش گرمایی خوانده می‌شود. چشمه‌های متداولی که اغلب احساس گرما به‌وجود می‌آورند اخگرهای سوزان در بخاری، رشته‌های درون لامپ، و خورشیدند. همهٔ آنها، علاوه‌بر تابش مرئی، تابش فروسرخ گسیل می‌دارند. وقتی این انرژی تابشی به جسم برخورد کند، بخشی از آن بازمی‌تابد و بخشی جذب می‌شود. بخش جذب‌شده باعث افزایش انرژی داخلی جسم می‌شود. اگر این جسم پوست بدن شما باشد، تابش را به‌صورت گرما حس می‌کنید.

وقتی جسم به اندازهٔ کافی داغ باشد، بخشی از انرژی تابشی گسیلیده از آن در گسترهٔ نور مرئی است. نور گدازه‌های جاری مثال خوبی در این زمینه است. گدازه‌ها (یا چیزهای دیگر) در دماهای حدود $500^\circ C$ بلندترین طول‌موج‌ها، نور سرخ کم‌بسامد، را گسیل می‌کنند که می‌توانیم

ببینیم. اگر دماها بالاتر روند، نوری متمایل به زرد مشاهده می‌کنیم ــ که آمیزه‌ای از سرخ و بسامدهای بالاتر نور است. در دماهای باز هم بالاتر، که از حدود $1200^\circ C$ شروع می‌شود، آمیزه‌ها نور سفید تولید می‌کنند (مطالب بیشتر در این مورد در فصل ۲۷ آمده است): تمام موج‌های مختلفی که چشم به آنها حساس است گسیل می‌شوند، و جسم داغ را به‌صورت «داغ سفید» می‌بینیم. رشتهٔ یک لامپ رشته‌ای وقتی نور سفید گسیل می‌کند دست‌کم $1200^\circ C$ است، و معمولاً به نزدیکی $2500^\circ C$ هم می‌رسد.



شکل ۱۶-۱۴
الف) چشمهٔ دماپایین (سرد) بیشتر موج‌های کم‌بسامد با طول‌موج‌های بلند گسیل می‌کند. ب) چشمهٔ با دمای معتدل، بیشتر بسامدهای متوسط با طول‌موج‌های متوسط گسیل می‌کند. ج) چشمهٔ دمابالا (داغ) بیشتر موج‌های بالابسامد با طول‌موج‌های کوتاه گسیل می‌کند.

خود را بیازمایید

آیا هیچ موردی در زیر وجود دارد که انرژی تابشی گسیل نکند؟ الف) خورشید. ب) گدازه‌های آتشفشانی. ج) زغال‌های سرخ گداخته. د) کتابی که می‌خوانید.

جذب انرژی تابشی

اگر همهٔ اشیا انرژی گسیل می‌کنند، پس چرا سرانجام انرژی آنها تمام نمی‌شود؟ پاسخ آن است که همهٔ آنها انرژی را جذب هم می‌کنند. گسیلنده‌های خوب انرژی جذب‌کننده‌هایی خوب هم هستند؛ گسیلنده‌های ضعیف، جذب‌کننده‌های ضعیف‌اند. مثلاً، آنتن رادیو که طوری ساخته شده است که گسیلندهٔ موج‌های رادیویی باشد، به‌واسطهٔ طراحی خود، گیرندهٔ (جذب‌کنندهٔ) خوبی است. آنتن فرستنده‌ای که خوب طراحی نشده باشد، گیرنده‌ای ضعیف است.

جالب است توجه کنیم که اگر گسیلندهٔ خوب جذب‌کنندهٔ خوبی نبود، اشیای سیاه گرم‌تر از اشیای سفیدرنگ می‌ماندند، و هرگز به دمای مشترک نمی‌رسیدند. اگر به اجسام در تماس با یکدیگر زمان کافی داده شود، به دمای مشترکی می‌رسند. ممکن است دمای پیاده‌روی سیاه و بدنهٔ اتومبیل سیاه در یک روز داغ از محیط اطراف داغ‌تر باشند، اما، با فرارسیدن شب، این اشیای سیاه سریع‌تر خنک می‌شوند! دیر یا زود، همهٔ اجسام به تعادل گرمایی می‌رسند. بنابراین جسم سیاهی که مقدار زیادی انرژی تابشی جذب می‌کند باید مقدار زیادی از آن را تابش کند.

تمام چیزهای اطراف ما همواره انرژی تابش و آن را جذب می‌کنند.

پاسخ خود را وارسی کنید

امیدوارم که پاسخ شما (د)، یعنی کتاب، نباشد. چرا؟ چون کتاب هم، مثل دیگر مواد فهرست، دارای دمایی ــ گرچه نه چندان زیاد است. پس طبق قاعدهٔ $\overline{f} \sim T$، تابش گسیل می‌کند که بسامد قلهٔ آن $\overline{f}$ در مقایسه با بسامدهای گسیلیده از مواد دیگر کاملاً پایین است. هر چیز با هر دمایی بالاتر از صفر مطلق تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. درست است ــ هر چیزی!

شکل ۱۶-۱۵
وقتی ظرف‌ها با آب داغ (یا سرد) پر شوند، ظرف سیاه‌شده سریع‌تر خنک (یا گرم) می‌شود.

می‌توان با یک جفت ظرف فلزی یک‌اندازه و یک‌شکل، که یکی دارای سطح سفید یا آینه‌مانند و دیگری دارای سطح سیاه‌شده باشد، درستی این موضوع را بررسی کرد (شکل ۱۶-۱۵). ظرف‌ها را با آب داغ پر کنید و دماسنجی را در هر یک از آنها بگذارید. درمی‌یابید که ظرف سیاه‌شده تندتر خنک می‌شود. سطح سیاه‌شده گسیلندهٔ بهتری است. قهوه یا چای در یک قوری براق بیشتر از قوری سیاه‌شده داغ می‌ماند. همین آزمایش را می‌توان برعکس انجام داد. این بار، ظرف‌ها را پر از آب یخ کنید و آنها را جلوی بخاری یا در یک روز آفتابی در فضای آزاد ــ یا هر جا که چشمه‌ای از انرژی تابشی وجود دارد ــ بگذارید. درمی‌یابید که ظرف سیاه تندتر گرم می‌شود. جسمی که خوب گسیل می‌کند خوب هم جذب می‌کند.

اینکه جسمی گسیلندهٔ خالص باشد یا جذب‌کنندهٔ خالص بستگی به این دارد که دمای آن بالاتر از محیط اطراف است یا پایین‌تر؟ اگر جسم از محیط اطراف داغ‌تر باشد، سطح آن گسیلندهٔ خالص است و خنک خواهد شد. اگر سردتر از محیط اطراف باشد، سطح آن جذب کنندهٔ خالص است و گرم‌تر می‌شود. هر سطح، داغ یا سرد، انرژی تابشی را هم جذب می‌کند و هم گسیل.

پیتزای داغی که در یک روز زمستان بیرون گذاشته شود، گسیلندهٔ خالص است. همان پیتزا در تنور داغ‌تر جذب‌کنندهٔ خالص است.

جرقه‌ها

خود را بیازمایید

۱. اگر یک جذب‌کنندهٔ خوب انرژی تابشی گسیلنده‌ای ضعیف بود، دمای آن در مقایسه با دمای محیط اطراف آن چگونه می‌شد؟

۲. کشاورزی در یک صبح سرد چراغ پروپان را در طویلهٔ خود روشن و هوای آن را تا $20^\circ C$ ($68^\circ F$) گرم می‌کند. چرا هنوز احساس سرما می‌کند؟

پاسخ خود را وارسی کنید

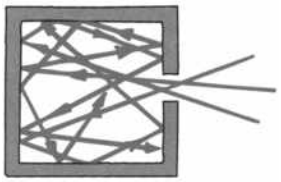
۱. اگر جذب‌کنندهٔ خوب گسیلندهٔ خوبی نبود، جذب خالص انرژی تابشی صورت می‌گرفت و دمای جذب‌کننده بالاتر از دمای محیط اطراف می‌شد. اشیای اطراف ما فقط به این سبب به دمای مشترک می‌رسند که جذب‌کننده‌های خوب، طبیعتاً، گسیلنده‌هایی خوب‌اند.

۲. دیوارهای طویله هنوز سردند. انرژی‌ای که کشاورز به دیوارها می‌تاباند بیش از چیزی است که دیوارها تابش می‌کنند، و در نتیجه سردش می‌شود. (در خانه یا کلاس درس، فقط وقتی احساس راحتی می‌کنید که، نه فقط هوا، بلکه دیوارها هم گرم باشند.)

بازتاب انرژی تابشی

جذب و بازتاب فرایندهای مخالف یکدیگرند. یک بازتابندهٔ خوب انرژی تابشی مقدار کمی از این انرژی، از جمله نور مرئی، را بازمی‌تاباند. در نتیجه، سطحی که انرژی تابشی را بازنمی‌تاباند، یا مقدار کمی از آن را بازمی‌تاباند تیره به‌نظر می‌رسد. پس یک جذب‌کنندهٔ خوب تیره به‌نظر می‌رسد. جذب‌کنندهٔ کامل هیچ انرژی تابشی را بازنمی‌تاباند و کاملاً سیاه به‌نظر می‌رسد. مثلاً مردمک چشم ورود نور بدون بازتاب را ممکن می‌سازد، و بدین دلیل سیاه به‌نظر می‌رسد. (یک استثنا در این مورد عکاسی با فلاش است، که در آن مردمک‌ها صورتی به‌نظر می‌رسند، این واقعه وقتی رخ می‌دهد که نور بسیار درخشان از سطح صورتی‌رنگ داخل چشم بازبتابد و وارد مردمک شود.)

به دو سر باز لوله‌های موجود در توده‌ای از آنها توجه کنید؛ سوراخ‌ها سیاه به‌نظر می‌رسند. اگر در طول روز به درها و پنجره‌های باز خانه‌های دوردست بنگرید، آنها هم سیاه به‌نظر می‌آیند. دهانه‌ها از این‌رو سیاه به‌نظر می‌رسند که نور ورودی به آنها بارها و بارها روی دیواره‌های داخلی بازمی‌تابد و در هر بازتاب تا اندازه‌ای جذب می‌شود. در نتیجه، نور کمی باقی می‌ماند یا اصلاً نوری باقی نمی‌ماند که از دهانه خارج شود و به چشم ما برسد (شکل ۱۶-۱۶).



شکل ۱۶-۱۶
تابشی که وارد کاواک شود شانس کمی برای خروج از آن دارد چون بیشتر آن جذب می‌شود. بدین دلیل، روزنهٔ هر کاواک سیاه به‌نظر می‌رسد.

از طرف دیگر، بازتابنده‌های خوب جذب‌کننده‌هایی ضعیف‌اند. برف تمیز بازتابندهٔ خوبی است و در نتیجه در آفتاب به‌سرعت ذوب نمی‌شود. اگر برف کثیف باشد، انرژی تابشی خورشید را بهتر جذب می‌کند و تندتر ذوب می‌شود. ریختن دودهٔ سیاه از هواپیما بر کوه‌های پوشیده از برف در اواخر زمستان روشی است که گاهی برای جلوگیری از سیل در بهار به‌کار می‌رود. دوده باعث می‌شود برف در بهار زودتر شروع به ذوب شدن کند. این موضوع دورهٔ زمانی تخلیه را طولانی‌تر می‌کند. بدین‌ترتیب، به‌جای تخلیهٔ ناگهانی برف هنگام افزایش دمای خارج، جریان ثابتی از این ذوب شدن خواهیم داشت.

خود را بیازمایید

اگر رادیاتورهای خانهٔ خود را رنگ سیاه بزنید کارایی بیشتری دارد یا رنگ نقره‌ای؟

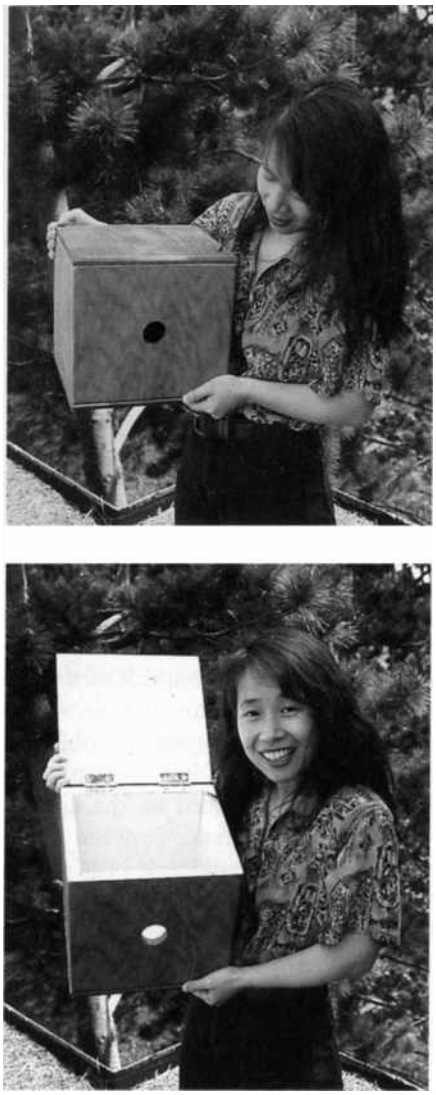
گسیل و جذب در بخش مرئی طیف تابع رنگ است. ولی گسیل و جذب در بخش فروسرخ طیف بیشتر از بافت سطح تأثیر می‌پذیرد. پرداخت مات، هر آنچه رنگی است، در فروسرخ بهتر از صیقلی گسیل/جذب می‌کند.

جرقه‌ها

خنک‌شدن در شب بر اثر تابش

اجسامی که بیش از انرژی دریافتی تابش کنند خنک‌تر می‌شوند. این در شب یعنی هنگامی رخ می‌دهد که انرژی خورشید وجود ندارد. جسمی که در شب بیرون گذاشته شود به فضا انرژی تابش می‌کند، و در نبود اجسام گرم‌تر در آن حوالی، انرژی بسیار کمی از فضا دریافت می‌دارد. پس بیش از مقدار انرژی دریافتی از خود انرژی گسیل می‌کند و خنک‌تر می‌شود. اما اگر جسم رسانای خوب گرما باشد ــ مانند فلز، سنگ، یا بتون ــ گرما از زمین وارد آن می‌شود و تا حدی دما را تثبیت می‌کند. از طرف دیگر، موادی چون چوب، کاه، و علف رساناهایی ضعیف‌اند و گرمای کمی از زمین وارد آنها می‌شود. این مواد عایق تابشگرهای خالص‌اند و از هوا خنک‌تر می‌شوند. معمولاً حتی وقتی که دمای هوا تا نقطهٔ انجماد پایین نرفته است روی این مواد برفک تشکیل می‌شود. آیا هرگز چمن یا مزرعهٔ پوشیده از برفکی را در یک صبح سرد که دما بالاتر از نقطهٔ انجماد است پیش از بالا آمدن خورشید دیده‌اید؟ دفعهٔ بعد که این منظره را می‌بینید، توجه کنید که برفک فقط روی علف، کاه، و رساناهای ضعیف تشکیل می‌شود، و روی سیمان، سنگ، و رساناهای خوب تشکیل نمی‌شود.

باغبان‌های خوب وقتی احتمال یخبندان می‌رود گیاهان مورد علاقهٔ خود را با برزنت می‌پوشانند. گیاه درست مانند قبل تابش می‌کند، اما اکنون انرژی تابشی را به جای آسمان تاریک شب از برزنت می‌گیرد. چون تابش برزنت در دمای محیط اطراف است و نه در دمای آسمان تاریک شب، برفک روی برگ درختان تشکیل نمی‌شود. به همین دلیل است که در ایوان‌های سرپوشیده روی گیاهان برفک تشکیل نمی‌شود، در حالی‌که روی گیاهان در معرض آسمان باز تشکیل می‌شود.



شکل ۱۶-۱۷

سوراخ موجود در جعبه‌ای که در دست هلن (Helen) است کاملاً سیاه به نظر می‌رسد و ظاهراً باید نشان‌دهندهٔ درون سیاه رنگ آن باشد، در حالی‌که درون جعبه در واقع به رنگ سفید براق رنگ‌آمیزی شده است.

پاسخ خود را وارسی کنید

بیشتر گرمای حاصل از یک رادیاتور گرم‌کننده از طریق همرفت تأمین می‌شود، بنابراین رنگ تأثیر چندانی ندارد (نام بهتر برای این نوع گرم‌کننده کونوکتور است). با این همه، برای کارایی بهینه، رادیاتور به رنگ نقره‌ای کمتر تابش می‌کند و در نتیجه داغ‌تر باقی می‌ماند و هوا را بهتر گرم می‌کند. پس نقره‌ای را انتخاب کنید!

شکل ۱۶-۱۸
تکه‌هایی از بلورهای برفک ورودی‌های پنهان سوراخ موش را برملا می‌سازد. هر خوشه از بلورها نفس یخ‌زدهٔ موش است!

تبادل تابش بین خود زمین و محیط اطراف نیز صورت می‌گیرد. در طول روز، خورشید بخش غالب محیط اطراف زمین را تشکیل می‌دهد. نیمهٔ روشن کرهٔ زمین انرژی تابشی بیشتری از مقدار گسیل کرده دریافت می‌دارد. در طول شب هوا نسبتاً شفاف است و زمین تابشی بیش از انرژی دریافتی به عمق فضا گسیل می‌دارد. همان‌طور که آرنو پنزیاس[3] و رابرت ویلسون[4]، پژوهشگران آزمایشگاه‌های بل، در سال ۱۹۶۵ متوجه شدند، دمای فضا حدود ۲٫۷ K (۲٫۷ درجه بالاتر از صفر مطلق) است. خود فضا تابش ضعیفی گسیل می‌دارد که مشخصهٔ این دماست.[5]

خود را بیازمایید

۱. کدام‌یک احتمالاً سردتر است: شبی که می‌توانید ستارگان را ببینید یا شبی که نمی‌توانید آنها را ببینید؟

۲. چرا در زمستان سطح یک پل معمولاً یخ‌زده‌تر از سطح دو انتهای آن است؟

قانون خنک‌شدن نیوتون

جسمی که دمای آن با محیط اطراف فرق داشته باشد، سرانجام دارای دمای مساوی با آن خواهد شد. جسم نسبتاً داغ با گرم کردن اطراف خود خنک می‌شود. وقتی سریع (یا کند) خنک‌شدن یک جسم موردنظر ما باشد، از آهنگ خنک‌شدن ــ چند درجه تغییر در واحد زمان ــ صحبت می‌کنیم.

3. Arno Penzias 4. Robert Wilson

۵. پنزیاس و ویلسون برای این کشف، با این فرض که اثری از مهبانگ باشد، جایزهٔ نوبل مشترکی دریافت داشتند. دانشمندان با مطالعهٔ این «تابش زمینهٔ کیهانی» به چیزهای زیادی دربارهٔ تاریخچهٔ اولیهٔ عالم و شکل کنونی آن دست یافتند.

آهنگ خنک شدن جسم بستگی به این دارد که جسم چقدر از محیط اطرافش داغ‌تر است. تغییر دمای پای سیب داغ در فریزر سرد بیش از روی میز آشپزخانه است. وقتی پای در فریزر خنک می‌شود، اختلاف دمای آن با محیط اطرافش بیشتر است. در یک روز سرد نشت گرما از یک خانهٔ گرم به خارج با آهنگ بیشتری صورت می‌گیرد زیرا اختلاف دماهای داخل و خارج زیاد است. گرم نگه داشتن داخل خانه در دمای زیاد در یک روز سرد پرهزینه‌تر از گرم نگه داشتن آن در دمایی کمتر است. اگر اختلاف دما کم باشد، آهنگ خنک شدن نظیر آن نیز کم خواهد بود.

آهنگ خنک شدن یک جسم ــ با رسانش، همرفت یا تابش ــ تقریباً با اختلاف دمای ΔT بین جسم و محیط اطراف متناسب است.

$$\text{آهنگ خنک شدن} \sim \Delta T$$

که به **قانون خنک‌شدن نیوتون** معروف است. (حدس بزنید امتیاز کشف آن مربوط به کیست؟) این قانون برای گرم شدن هم صادق است. اگر جسمی سردتر از محیط اطراف باشد، آهنگ گرم شدن آن نیز با ΔT متناسب است.[۶] غذای یخ‌زده در اتاق گرم سریع‌تر از اتاق سرد گرم می‌شود. آهنگ خنک شدن در یک روز سرد را می‌توان با افزودن اثر همرفتی باد زیاد کرد. از این

شکل ۱۶-۱۹
پایهٔ بلند لیوان نوشابه مانع از رسیدن گرمای دست به نوشابه و گرم شدن آن می‌شود.

شگفت اینکه قانون خنک شدن نیوتون رابطه‌ای تجربی است، و نه قانونی بنیادی چون قانون‌های حرکت نیوتون.

جرقه‌ها

پاسخ خود را وارسی کنید

۱. هوای یک شب پرستاره، که سطح زمین مستقیماً به عمق فضای یخ‌زده تابش می‌کند، سردتر است. در یک شب ابری، تابش خالص کمتر است، زیرا ابرها انرژی را به سطح زمین بازمی‌گردانند.

۲. جای انرژی تابیده از جاده‌ها به زمین را گرمای هدایت‌شده از زمین گرم‌تر زیر پیاده‌رو تا اندازه‌ای پر می‌کند. اما بین سطح پل‌ها و زمین تماس گرمایی وجود ندارد، بنابراین، این سطوح انرژی جایگزین از زمین را یا اصلاً دریافت نمی‌کنند یا به میزان اندکی دریافت می‌دارند. بدین‌سبب است که سطح جادهٔ روی پل‌ها از جاده‌های روی زمین سردترند، که احتمال تشکیل یخ روی پل‌ها را زیاد می‌کند. درک انتقال گرما می‌تواند شما را رانندهٔ محتاط‌تری سازد!

۶. جسم گرمی که حاوی چشمهٔ انرژی است می‌تواند به طور نامحدود گرم‌تر از محیط اطرافش باقی بماند. گرمایی که گسیل می‌دارد الزاماً آن را سرد نمی‌سازد و قانون خنک شدن نیوتون در مورد آن صادق نیست. بنابراین موتور اتومبیل در حال کار گرم‌تر از بدنهٔ اتومبیل و هوای اطراف است. اما، پس از خاموش کردن موتور، طبق قانون خنک شدن نیوتون سرد می‌شود و به تدریج به دمای محیط اطراف می‌رسد. همین‌طور، خورشید مادامی که کورهٔ هسته‌ای آن کار کند ــ یعنی حدود پنج میلیارد سال دیگر ــ داغ‌تر از محیط اطرافش باقی خواهد ماند.