



Fig. 2. A depiction of hotness as a function of the absolute temperature. The vertical line at $T = 0$ represents both a barrier for the arrows and an unattainable value. One cannot cool a system to absolute zero from above nor heat it to zero from below.

So far as one knows, one may not achieve absolute zero by approaching it from either side. Figure 2 offers a picture.

The coldest temperatures are just above 0 K on the positive side. The hottest temperatures are just below 0 K on the negative side.

Bizarre results, indeed, and there is yet another surprise.

Compression: Maybe Hotter, Maybe Colder

Imagine mechanically compressing a physical system. (A bicycle pump provides an example wherein the air is compressed by the plunger.) Specify that no heating (as with a Bunsen burner or electric current) accompanies the compression. (Thus, in technical language, we are examining adiabatic compression.) The mechanical work associated with the compression increases the physical system's energy. As a consequence of all of this, does the temperature increase? Most often the temperature does increase, but—amazingly—sometimes it decreases.

If the system is any dilute gas, then the temperature certainly increases. If, however, the system is the isotope ^3He in the form of coexisting liquid and solid at temperatures below 0.3 K, then the temperature decreases.

Another technical aside. The nuclei in the solid phase of ^3He are located at specific lattice sites, and so in some respects the nuclei act independently of each other. Their spins need not be correlated by the Pauli exclusion principle. Nuclei in the liquid phase do not enjoy this quasi-independence, and so the Pauli principle (or antisymmetry for a total wave function) causes the spins to be correlated and reduces their contribution to the entropy.

Because of the correlations, the spin contribution to the entropy per atom is less for the liquid than for the solid. At very low temperatures, the spin contribution dominates over motional and positional contributions. Thus the entropy per atom of the liquid is less than that of the solid. (This inequality holds when the temperature is 0.3 K or less.)

The solid phase has a smaller volume per atom than does the liquid phase. Thus, when a coexisting mixture of liquid and solid is compressed adiabatically, solid is

formed at the expense of liquid. The adiabatic (and reversible) compression leaves the total entropy constant. Yet the phase of higher entropy per atom (the solid) is being formed at the expense of the phase of lower entropy. Consistency is possible if the entropy per atom of both phases is simultaneously decreasing (slightly), and that common decrease can occur if the temperature decreases. (The Clausius-Clapeyron equation offers a rigorous route to the conclusion that the temperature decreases.)

Although this description does not provide all the microscopic explanation that one would like to see, it does outline the logic of why the reversible, adiabatic compression of coexisting phases of ^3He causes the temperature to decrease.]

In the case of ^3He , theory preceded experiment. The decrease in temperature was predicted by Soviet physicist I. Pomeranchuk in 1950, but the effect was realized experimentally only in the late 1960s. Research "refrigerators" based on the effect work in the temperature range of 0.3 to 0.002 K.^{8,9} While the system's energy increases, its temperature decreases, but this need not be a paradox.

Recapitulation

Many texts, including some of the very best, contain statements like this: Temperature "is a measure of the average kinetic energy of the molecules or atoms in a substance."¹⁰ Such a statement is misleading, if not downright wrong. The function of temperature is not to tell us about a physical system's amount of energy. Rather, it is to tell us about a system's tendency to transfer energy (as heat). To be sure, a quantitative knowledge of the tendency to transfer, together with some statistical reasoning, sometimes enables us to infer the amount of energy. Equations (6), (7), and (8) are cases in point. We reason from temperature to energy. None of those equations, however, captures the essential meaning of temperature. For that we must return to "temperature is hotness measured on some definite scale."

References

1. Eric M. Rogers, *Physics for the Inquiring Mind* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1960), p. 412.
2. Ralph Baierlein, *Atoms and Information Theory* (Freeman, San Francisco, 1971), p. 307.
3. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Statistical Physics* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1958), pp. 158–159.
4. E.M. Purcell and R.V. Pound, *Phys. Rev.* **81**, 279 (1951).
5. J.H. Van Vleck, *Nuovo Cimento Supplement* **6** (10), 1081 (1957).
6. Norman F. Ramsey, *Phys. Rev.* **103**, 20 (1956).
7. Mark W. Zemansky, *Temperatures Very Low and Very High* (Van Nostrand, Princeton, NJ, 1964), p. 112.
8. D.S. Betts, *Refrigeration and Thermometry Below One Kelvin* (Sussex University Press, England, 1976), p. 52.
9. K. Mendelssohn, *The Quest for Absolute Zero*, 2nd ed. (Halsted-Wiley, New York, 1977), p. 267.
10. Paul G. Hewitt, *Conceptual Physics, Teacher's Edition* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1987), p. 301.

meno. De la misma manera, existe un movimiento browniano, un movimiento irregular, del gas alrededor de las aspas, sea cual fuere el material con el que está construido el aparato, éste, al ir calentándose, empezará a moverse de manera más irregular. Llegará un momento en que la rueda estará tan caliente que el retén se moverá debido simplemente al movimiento de las moléculas de su interior, es decir, debido a lo mismo que hace mover las aspas. El retén saltará sobre la rueda hacia arriba y hacia abajo y como estará tanto tiempo bajado como levantado, los dientes de la rueda se moverán tanto en un sentido como en otro. Con lo cual el instrumento dejará de ir solamente en una dirección. [En realidad el aparato puede llegar a moverse únicamente en sentido opuesto! Si la rueda está caliente y las aspas frías, la rueda que nosotros creamos giraba en un sentido, empezará a girar en el otro, porque cada vez que el retén caiga, resbalará sobre el plano inclinado de un diente de la rueda y la empujará "hacia atrás". Saltará luego el retén hacia arriba para volver a caer sobre el plano inclinado siguiente y así sucesivamente. De manera que si la rueda está más caliente que las aspas girará en sentido opuesto.]

¿Qué tiene esto que ver con la temperatura del gas que rodea las aspas? Supongamos por un momento que el mecanismo carece de aspas. La rueda será empujada por el retén al caer éste sobre el plano inclinado pero, acto seguido, la rueda chocará con el retén y rebotará hacia atrás. Con el fin de evitar que la rueda rebote ponemos un amortiguador en forma de aspas frenadas por el aire, que impedirá el rebote de la rueda. De esta manera la rueda sólo girará en un sentido, pero en sentido opuesto al previsto. Así pues, sea cual sea el diseño del aparato, una rueda de este tipo girará en un sentido cuando una de las partes sea la más caliente y en el otro sentido en el caso contrario. Pero una vez haya tenido lugar un intercambio térmico entre las dos partes y ambas posean la misma temperatura, la rueda no se moverá por término medio, ni en un sentido ni en el otro. Esta es la forma técnica que tienen los fenómenos de la naturaleza de seguir en una dirección única mientras se hallen en desequilibrio, es decir, mientras un lado esté más caliente que el otro, o mientras un lado sea más azul que el otro.

Podría parecer como si el principio de conservación de la energía indicara que disponemos de toda la energía que queramos. La naturaleza ni gana ni pierde energía. Sin embargo, la energía del mar, por poner un ejemplo, el movimiento térmico de todos los átomos del mar, está prácticamente fuera de nuestro alcance. Con el fin de organizar y dominar esta energía, de poder utilizarla, tenemos que poseer una

diferencia de temperatura, porque si no resulta que aunque la energía está allí, permanece inutilizable.

El principio de conservación de la energía indica que la energía total del mundo se mantiene constante. Pero debido a los movimientos erráticos de las partículas, esta energía puede distribuirse de manera tan uniforme que, en determinadas circunstancias, no sea posible extraer más energía de la que se añade, es decir, que no haya forma de controlarla.

Creo que mediante una analogía podré dar cuenta mejor de cuál es la dificultad. No sé si alguno de ustedes habrá pasado por la experiencia, que yo conozco bien, de estar sentado en la playa con varias toallas cuando de pronto empieza a caer una tormenta. Rápidamente agarramos las toallas y corremos a ponernos a cubierto. Una vez protegidos de la lluvia empezamos a secarnos y descubrimos que una toalla está un poco húmeda, pero relativamente más seca que nuestro cuerpo, con lo que vamos secándonos con ella hasta que llega un momento en que está demasiado empapada, es decir, que nos seca tanto como nos moja. Probamos con la siguiente toalla y muy pronto descubrimos algo terrible, que todas las toallas están tan mojadas como nuestro cuerpo. Ya no hay, pues, manera de secarse un poco más a pesar de poseer varias toallas, porque en algún sentido ya no hay diferencia entre lo mojados que estamos nosotros y lo mojadas que están las toallas. Podría inventar una expresión de cantidad y llamarla "facilidad de secar el agua". La toalla posee la misma facilidad de secar el agua que nosotros, con lo cual cada vez que paso la toalla por encima de mi cuerpo tanta agua pasa de la toalla a mi piel como de mi piel a la toalla.

Esto no significa que haya la misma cantidad de agua en la toalla que sobre mi cuerpo —una toalla grande contendrá más agua que una pequeña— pero tienen la misma humedad. Cuando todo adquiere el mismo grado de humedad ya no hay nada que hacer.

El agua es como la energía, porque la cantidad total de agua no cambia. (Si de pronto aparece el sol y nos podemos secar o si encontramos otra toalla, entonces estamos salvados, pero suponemos que estamos en un lugar cerrado y no hay forma de conseguir nuevas toallas.) De manera análoga, si imaginamos una parte del mundo como cerrada y esperamos el tiempo suficiente, la energía, como el agua, acabará distribuida de manera uniforme (desaparecerá el movimiento en sentido único), hasta el punto de que el mundo perderá todo su interés.

Así pues, en el caso de la rueda de trinquete con aspas, que es un

OREKA TERMİKOAREN
ADIBIDEA

"El carácter de la Ley física", Richard Feynman
CONJETURAS, Antoni Bosch Editor, 1983