

Comencemos con la Entropía

Friedrich Herrmann

Abstract. When dealing with the concept of heat, the layman does not have particular problems: Heat is contained in hot bodies. The greater and the hotter a body, the more heat it contains. Heat goes or flows by itself from hot to cold, or from hot to less hot. Heat is produced within a flame, by mechanical friction or in the wire of a light bulb. It is strange, that physics has trouble with the concept of heat. Simple statements about the every-day concept of heat become incorrect, when interpreted in terms of the physical process quantity Q . They become correct, however, when the everyday heat concept is identified with the physical quantity "entropy" instead of Q . At the same time, one gets a simple intuition about entropy, otherwise infamous for its abstractness. A teaching sequence corresponding to the first five lessons of a thermodynamics course for beginners is presented, where entropy is introduced from the very beginning. In this short period of teaching time, not only the second and the third principle are introduced, but we also come to a physical description of basic processes of our everyday "thermal experience". Entropy appears as a quantity no more difficult than length, time or mass.

Sumario. Al tratar con el concepto de calor, el hombre común no tiene demasiados problemas; él considera que el calor está contenido en los cuerpos calientes. Cuanto más grande y más caliente sea un cuerpo, tanto más calor contiene. El calor pasa por sí sólo desde lo más caliente a lo más frío, o desde lo caliente a lo menos caliente. El calor se puede generar de diversas formas: en una llama, por fricción mecánica o en el filamento de una lámpara incandescente, entre otras. Puede parecer extraño que la Física tenga dificultades con dicho concepto. Proposiciones sencillas de la vida cotidiana sobre el calor resultan incorrectas, cuando se las interpreta en términos de la magnitud física Q . Sin embargo, se vuelven correctas al identificar el calor del profano con la magnitud física "entropía", en lugar de Q . Así se logra al mismo tiempo un concepto intuitivo y simple sobre la entropía, magnitud normalmente conocida por su alto grado de abstracción. Presentamos las cinco primeras lecciones de un curso de termodinámica para principiantes, introduciendo la entropía desde el comienzo del curso. Se muestra que en pocas horas de clase es posible enseñar y analizar el segundo y tercer principios, y que se puede llegar a una descripción física de procesos típicos de la vida cotidiana. La entropía se presenta como una magnitud que no es más difícil de entender y aprender que la longitud, el tiempo o la masa.

Palabras clave. Teaching methods in Physics education 01.40.gb, entropy thermodynamics 05.70.-a

1 Introducción

"Comencemos con la entropía". El título quiere decir: cuando enseñamos la termodinámica, es decir la ciencia del calor, introduzcamos desde el comienzo no solamente la temperatura, sino también la entropía.

¿Pero no es la entropía un concepto demasiado difícil para empezar? ¿Y no se puede hacer una buena termodinámica sin entropía? Intentaremos demostrar que la respuesta a ambas preguntas es "no". En la primera parte del artículo veremos porqué. En la segunda parte esbozaremos las lecciones iniciales de un curso de termodinámica.

Este curso ha sido concebido inicialmente para la Universidad. Pero hoy existen también versiones para la escuela secundaria I y II. La versión escolar existe en varios idiomas: Aparte de la versión original en alemán hay una en inglés, en italiano y en chino y el curso ha sido traducido parcialmente al español. Las versiones inglés, italiana y española se pueden descargar libremente de la red¹.

El curso, conocido con el nombre *Curso de Física de Karlsruhe*, o *KPK* (las iniciales en alemán), engloba no solamente la termodinámica, sino toda la física. Sin

embargo, todos los sub-campos de la física están hechos según el patrón de la termodinámica. Hay razones para escoger la termodinámica como modelo. De hecho, la termodinámica es esa parte de la física que ha sobrevivido casi indemne a la tormenta de la teoría de la relatividad y al huracán de la mecánica cuántica. Mientras en la mecánica tradicional los conceptos básicos son: el cuerpo o la partícula, así como las fuerzas de interacción, los conceptos básicos de la termodinámica son el "sistema", el "estado" y el "proceso" (o la transición). Estos son los mismos conceptos que más tarde se aplicarán en la mecánica cuántica.

2 Una analogía

En la física existen varias analogías. Veamos algunos ejemplos:

- la analogía entre los campos eléctrico y magnético, que refleja la simetría de las ecuaciones de Maxwell;
- la analogía entre la mecánica de los movimientos de traslación y rotación.

Consideramos en lo siguiente una analogía que comprende una parte sustancial de toda la física. La tabla 1 muestra cómo funciona. En esta analogía las magnitudes extensivas cantidad de movimiento p , carga eléctrica Q , entropía S y cantidad de sustancia n se corresponden. Se corresponden también las magnitudes intensivas "conjugadas" velocidad v , potencial eléctrico ϕ , temperatura absoluta T y potencial químico μ . A cada magnitud extensiva le corresponde también un flujo o una corriente: la corriente mecánica o fuerza F , la corriente eléctrica I , la corriente de entropía I_S y la corriente de sustancia I_n .

Muchas relaciones que existen entre las magnitudes de un campo de la ciencia (una línea en la tabla) tiene una contraparte en otro campo. La última columna de la tabla 1 muestra un ejemplo. Cada una de las ecuaciones de esta columna corresponde a un flujo de energía P . Si la ecuación pertinente es la de la segunda línea, entonces el intercambio de energía es llamado "trabajo". La segunda ecuación (tercera línea) corresponde a lo que se llama energía eléctrica. (La letra U significa una diferencia del potencial eléctrico.) La ecuación de la cuarta línea describe un transporte en forma de calor, y la última línea corresponde a energía química.

En el KPK^{1,2} se aprovecha esta analogía. Por el momento sacamos una sola conclusión de la tabla 1: si tomamos en serio esta analogía, entonces podemos decir que cada una de las magnitudes extensivas debería ser el protagonista del campo de física correspondiente:

La mecánica es la parte de la física que trata sobre la cantidad de movimiento y las corrientes de la cantidad de movimiento (las fuerzas). La ciencia de la electricidad es la parte de la física que trata sobre la carga eléctrica y las corrientes eléctricas. La física térmica se ocupa de la entropía y de las corrientes de entropía.

Podemos ir aun más lejos con nuestras conclusiones:

Enseñar la termodinámica sin entropía y sin corrientes de entropía es como enseñar la mecánica sin cantidad de movimiento y sin fuerzas o es como enseñar la electricidad sin carga eléctrica y sin corriente eléctrica.

Para la enseñanza de la termodinámica esto significa: *Enseñamos la entropía desde el comienzo.*

Tabla 1				
Analogías en la Física				

	Magnitud extensiva	Magnitud intensiva	Corriente	Corriente de energía
Mecánica	cantidad de movimiento p	velocidad v	corriente de momento (= fuerza) F	$P = v.F$
Electricidad	carga eléctrica Q	Potencial eléctrico ϕ	Corriente eléctrica I	$P = U.I$
Termodinámica	entropía S	Temperatura absoluta T	corriente de entropía I_S	$P = T.I_S$
Química	cantidad de sustancia n	Potencial químico μ	corriente de sustancia I_n	$P = \mu.I_n$

3 El concepto tradicional del calor

La termodinámica o física térmica tal como se la enseña normalmente es una de las partes 'feas' de la física. ¿Por qué?

La física térmica tiene que ver con la temperatura y el calor. El hombre común tiene una intuición sana para ambos conceptos: La temperatura mide lo que se caracteriza cualitativamente con los términos "caliente" y "frío", y el calor es algo que se encuentra por ejemplo en una bolsa de agua caliente: Si hay mucha agua en la bolsa y si el agua está muy caliente, entonces hay mucho calor en la bolsa. El hombre común también sabe que el calor sale de la bolsa y se va al ambiente, si espera un rato. Sabe además que se puede producir o generar o crear calor de varios modos: en una llama, en un filamento eléctrico o por fricción.

Pasamos al físico, al experto: en cuanto a la temperatura tiene el mismo concepto que el hombre común. Sin embargo, su concepto del calor es distinto. Para él, un cuerpo, después de haber recibido cierta cantidad de calor, no contiene más calor. Se agrega calor a un cuerpo, pero después el cuerpo no contiene más calor. ¿Cómo es posible? El físico nos explica que no es el calor, sino la energía interna que ha aumentado.

Muchos estudiantes están convencidos que en realidad el calor del cuerpo aumenta al suministrar calor. Creen que solamente no es permitido decirlo. En realidad, no es solamente una manera de hablar.

Consideremos un ejemplo que es aun más intrincado. Hay agua a 100 °C en un recipiente. Agregamos una cantidad de calor de 15 kJ de modo que se vaporiza una parte del agua. Parece razonable pensar que el vapor que ha surgido contiene 15 kJ más de calor que el que tenía antes, al estar todavía en forma de agua líquida. Sin embargo, esto no es correcto. Como todos sabemos no es el calor del vapor quien es mayor en 15 kJ respecto al agua líquida sino la entalpía.

Nosotros, los físicos, estamos acostumbrados a esta clase de fealdades, y estamos convencidos de que se trata de una dificultad intrínseca y inevitable de la termodinámica. Y probablemente muchos físicos piensan que el hombre común sencillamente está equivocado.

Veremos más tarde que el hombre común no está tan equivocado. Veremos además que las acrobacias verbales no son una consecuencia necesaria de las leyes de la física y veremos también que la física térmica no es intrínsecamente difícil. Las complicaciones mencionadas resultan solamente de una presentación inapropiada de la termodinámica. Están debido al hecho de que la termodinámica tradicional no se aprovecha de las propiedades sencillas y del comportamiento sencillo de la entropía.

Para ver lo que no va bien, tenemos que echar una mirada en la historia del concepto de calor.

4 Algunas observaciones sobre la historia del concepto de calor

El concepto de calor ha asumido el carácter de una magnitud física a finales del siglo XVIII. El paso decisivo lo dio el químico escocés Joseph Black (1728-1799)^{3,4}.

Fue Black quien distinguió claramente entre una magnitud intensiva "temperatura" y la magnitud extensiva "calor". También introdujo los conceptos de calor específico y calor latente. No hay que decir que su calor era una magnitud de estado.

Este concepto de calor era una construcción sana, según los criterios de la física, y fue aceptado en su época. Ha sido este mismo concepto el que utilizó Carnot⁵ en sus famosas *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas aptas para desarrollar esta potencia* donde estudia cuanto trabajo se puede realizar al pasar el calor en una máquina térmica de una temperatura alta a una baja. Esto ocurrió en el año 1824.

Más adelante, 25 años más tarde, al concepto de calor le ocurrió el percance: Cuando Joule (1818-1889), Mayer (1814-1878), Helmholtz (1821-1894) y Lord Kelvin (1824-1907) introdujeron la energía.

En realidad el percance no era la introducción de la energía. Más bien era el hecho que la comunidad científica era demasiado entusiasta de la nueva magnitud. Introdujeron un concepto nuevo para la descripción de transportes térmicos de energía. Este concepto era análogo al concepto de trabajo, que ya existía antes, y que servía para la descripción de transmisiones mecánicas de energía. Ambos conceptos – calor y trabajo – han sido llamados más tarde magnitudes de proceso, para contrastarlas con todas las demás magnitudes físicas, que a veces son llamadas magnitudes de estado. El percance era que llamaron a esta nueva magnitud “calor”. Se puede preguntar porqué se escogía un nombre que ya era en uso para otra magnitud. La respuesta es sencilla: Se pensaba que la antigua magnitud de Black y Carnot era la misma que la nueva magnitud de proceso. Creyeron que Black y Carnot no se habían dado cuenta que su calor era una forma de energía, o sea, una magnitud del tipo del trabajo mecánico.

Sin embargo con esta interpretación, algunas conclusiones de Black y de Carnot entraron en contradicción con las de los energeticistas. Se concluía que algunos resultados de Black y Carnot eran erróneos. Nadie se dio cuenta de que se tratase de dos magnitudes distintas. Desde un punto de vista moderno, la magnitud de Black no es otra cosa que lo que hoy llamamos entropía⁴.

Resumiendo: El nombre “calor” fue atribuido a una forma de energía recién inventada, y se imputó a Black y Carnot que ellos habían aspirado a introducir la energía, pero sin lograrlo.

Las consecuencias de esta desgracia eran catastróficas para la termodinámica⁶. No solamente que una magnitud desapareció de la física, sino – lo que es más grave – su nombre ha sido robado. El nombre “calor” (calore, heat, chaleur, wärme) fue atribuido a una forma de energía. De ahora en adelante era imposible decir que un cuerpo o un sistema *contiene* calor.

La magnitud que ahora portaba el nombre calor, era difícil de manejar. Además la magnitud sencilla e importantísima de Black había desaparecido de la física.

No había modo de expresar la cantidad de calor contenida en un cuerpo. Sin embargo, era evidente que tal medida era indispensable para la física y aun más para la química. Como consecuencia aparecieron varios sustitutos poco satisfactorios. Lo más conocido es la entalpía. Pero esto no cambió en nada el hecho de que la antigua magnitud de Black y Carnot seguía faltando. Desde el punto de vista de hoy no es una sorpresa que la antigua magnitud haya encontrado su camino de retorno a la física. Sin embargo apareció como algo nuevo y se le dio un nombre nuevo: Era la *entropía* introducida por Clausius en 1865. En este momento nadie, ni el mismo Clausius se dio cuenta de que la magnitud no era nada nueva sino era la resurrección del calor de Black. Y nadie se dio cuenta de que la entropía no era otra cosa que el concepto de calor del hombre común.

Este raro estado permaneció por casi medio siglo. Solamente en el 1911 el termodinámico inglés H. L. Callendar (1863-1930) se percató del embrollo y reveló su descubrimiento en un artículo muy bello en los *Proceedings of the Physical Society of London*⁷. Citamos solamente algunas frases de este artículo: “Finalmente, en 1865, cuando su importancia [la importancia del calórico] fue más ampliamente reconocida, Clausius le atribuyó el nombre ‘entropía’ y lo definió como la integral dQ/T . Tal definición gusta solamente al matemático. Haciendo justicia a Carnot, se le debería llamar calórico, y definir directamente por su ecuación $W = AQ(T - T_0)$, que cualquier escolar puede comprender. Pero también el matemático puede ganar imaginándose el calórico como fluido, como la electricidad, capaz de ser producido por fricción o otros procesos irreversibles.”

Desafortunadamente, este descubrimiento vino tarde. Aparentemente, un concepto que es establecido desde hace más de 50 años no tiene ninguna posibilidad de ser cambiado. Por lo tanto, este trabajo de Callendar pasó casi inadvertido, y la comunidad de los físicos continuaba luchando con un concepto de calor inapropiado y un concepto de entropía aparentemente incomprensible.

La historia no se termina aquí. Sesenta años después de la publicación de Callendar, la incoherencia ha sido descubierta de nuevo. En 1972 apareció un libro

con el título⁸ "Nueva representación de la termodinámica – la entropía como calor". Cuando escribió el libro, el autor, Georg Job, no conocía la publicación de Callendar. Más tarde, en 1996, apareció el libro „The dynamics of heat“ de Hans Fuchs⁹, que está basado en las mismas ideas.

La entropía como calor

Volvamos a la pregunta: ¿Pero, no es la entropía demasiado difícil para el principiante? La entropía es la magnitud que antaño se llamaba calor. Este nombre era absolutamente justificado, porque la correspondencia entre el concepto cotidiano de calor y la entropía de la física es casi perfecta. Si se aprovecha de esta correspondencia la enseñanza de la entropía se vuelve más fácil que la de la mayoría de las demás magnitudes físicas. Conforme a nuestra experiencia podemos confirmar que la entropía es una de las magnitudes más fáciles de enseñar, comparable a las magnitudes longitud, tiempo o masa. Podemos confirmar que el hombre común y por consiguiente también nuestros estudiantes antes de su primera clase de termodinámica tienen un sólido saber del segundo principio.

6 Las cinco primeras lecciones

En lo siguiente esbozaremos las cinco primeras lecciones de la termodinámica del KPK. Inicialmente, el curso había sido concebido para estudiantes de 14 a 15 años de edad. Sin embargo, en los últimos 20 años ha sido puesto a prueba y aplicado a estudiantes mayores y menores, empezando con alumnos de 11 años hasta estudiantes de la universidad.

Las cinco lecciones tal como las presentaremos aquí están comprimidas en un factor 10 aproximadamente. Se las presentan en forma de un diálogo tal como se puede desarrollar en el aula. Reproducimos respuestas y comentarios típicos de los alumnos tal como lo hemos experimentado enseñando el curso muchas veces.

Primera lección. Profesor (P): Hoy empezamos con un tema nuevo: La física del calor, o la termodinámica. Sabéis que en física se utilizan magnitudes físicas, o sea describimos el mundo cuantitativamente, con números. Todos ustedes conocen una magnitud que sirve para describir el estar frío o caliente.

Estudiante (E): La temperatura. **P:** Correcto, la temperatura

Introducimos el símbolo y la unidad de medición, los centígrados.

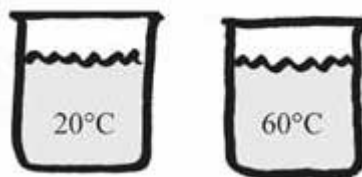
En física se establecen relaciones entre magnitudes. Entonces hace falta por lo menos una magnitud más para describir el estar frío o caliente. Esta magnitud ya la conocen también. Nos dice cuanto calor hay dentro de un cuerpo, cuanto calor está contenido en un objeto. En otros términos: la cantidad de calor. Por ejemplo: Dentro de una bolsa de agua caliente hay calor. Esta es nuestra segunda magnitud.

A menudo, los físicos dan nombres particulares a las magnitudes para que no se confunden con otra cosa. Al calor contenido en un cuerpo caliente llaman entropía. La abreviación o el símbolo de la entropía es "S". Su unidad de medición es el Carnot, abreviado Ct. Veremos más tarde cuanto vale un Carnot. Bueno, a ver si han comprendido. Voy a hacer preguntas en las cuales aparece la palabra "entropía". Cada vez que digo entropía ustedes piensan "cantidad de calor", en el sentido común.

Aquí (*Figura 1*) hay agua fría, veinte grados..., y aquella agua está caliente, sesenta grados. Las cantidades son iguales. ¿En qué recipiente hay más entropía?

E: En el que contiene agua caliente. **P:** Ahora otra cosa (*Figura 2*): El agua en los dos recipientes tiene la misma temperatura. ¿En qué vaso hay más entropía? **E:** En el que hay más agua.

Figura 1. En el recipiente con el agua caliente hay más entropía.



P: Imaginan que en esta agua (*Figura 3*) hay 1200 Carnot. Ahora, vierto un tercio en el otro vaso. ¿Cuántos Carnot quedan en este vaso?

E: Ocho cientos. **P:** Ocho cientos Carnot, exacto. Pero, ¿donde han quedado los otros cuatro cientos? **E:** En el otro. **P:** Correcto.

Segunda lección. P: Queremos estudiar algunas propiedades de la entropía. Otra vez voy a hacer preguntas y no olviden: Cada vez que digo entropía ustedes traducen mentalmente en cantidad de calor.

Aquí tengo una fuente (*Figura 4*), con agua del grifo, fría. En este vaso hay agua caliente. Se ve: 15 grados y 80 grados. ¿Pueden decirme qué pasa si pongo el vaso aquí dentro del agua fría?

E: El agua se enfría. **P:** ¿Cual agua? **E:** Él del vaso.

P: ¿Y él en la fuente? **E:** Se calienta..., pero solamente un poco. **P:** ¿Porqué solamente un poco? **E:** Porque en la fuente hay mucho más agua. **P:** Bueno, ahora cuidado. Quiero una explicación de lo que hemos observado. Y cuando digo explicación, quiero saber qué es lo que hace la entropía. Entonces aquí, en este proceso, ¿qué pasa con la entropía? **E:** La entropía va del uno al otro. **P:** ¿Qué entiendes por el uno y por el otro? **E:** Del pequeño al más grande. **P:** Entonces, deducimos la regla: "La entropía siempre va del más pequeño al más grande", ¿correcto? **E:** ¡Pues no! No tiene sentido. **P:** ¿Como no? **E:** La entropía va del más caliente al más frío. **P:** Correcto.

Apuntamos: "La entropía fluye por si sola de los cuerpos calientes a los fríos." Pero el agua caliente no queda caliente. ¿Qué pasa con ella? **E:** Se enfría. **P:** ¿Se enfría cada vez más? **E:** No. Solamente hasta que las temperaturas sean iguales. **P:** ¡Sí! Este estado se llama equilibrio térmico.

Vemos que la entropía fluye solamente tanto que existe una diferencia de temperatura. Entonces podemos considerar la diferencia de temperatura como una especie de fuerza motriz de la corriente de entropía.

Tercera lección. P: En la última lección hemos aprendido que la entropía fluye espontáneamente de un cuerpo caliente a un cuerpo frío. Imaginen ahora que alguien quiere que la entropía vaya en la dirección opuesta, subiendo la colina térmica. Especulamos que cuando logramos hacerlo podríamos hacer mucho dinero. ¿Tienen una idea como se podría hacer? **E:** ...¿?... *No hay respuesta.* **P:** En el fondo, es un problema que ya conocemos. Algo va espontáneamente de aquí allá. Por ejemplo: el aire va desde aquí allá si aquí la presión es alta y allá baja. Piensen en un neumático de auto. El aire sale por si solo. Si queremos que entre en el neumático, o sea que vaya de la presión baja a la alta, entonces nos hace falta un... **E:** Una bomba de aire. **P:** Y si queremos que la entropía vaya de la temperatura baja a la alta, hace falta de una... **E:** Bomba de entropía. **P:** ¡Bravo! Quizás, si la inventáramos nosotros, podríamos hacer un montón de dinero. Desgraciadamente alguien ya nos ha adelantado. Todos ustedes tienen una bomba de entropía en su casa. **E:** ...¿?...

No hay respuesta..., entonces el profesor ayuda. **P:** Está en la cocina. **E:** ¿En la cocina?... ah ya ... la nevera. **P:** Sí, o más exactamente, la máquina negra en la nevera.

El profesor lleva una auténtica nevera desde la sala de preparación en el aula. La muestra. **P:** El término técnico de la bomba de entropía es "bomba de calor". Pero la bomba ¿de dónde a dónde transporta la entropía? **E:** Del interior al exterior. **P:** ¿Y dónde entra la entropía en la máquina?

Se descubren los tubos en el interior de la nevera (*se ven solamente en las antiguas neveras*). ¿Y por dónde sale? **E:** Detrás, hay tubos también.

Cuarta lección. P: ¿Notan este libro? **E:** ¿Y qué?

P: ¿Cuánta entropía hay dentro? ¿Cuánta entropía puedo sacar? **E:** ...¿?... *No hay respuesta.*

P: ¿Han notado por lo menos que he hecho dos preguntas? **E:** ¿Porqué dos? Era una sola.

P: No, eran dos. La primera: ¿Cuánta entropía hay dentro?, y la segunda ¿Cuánta entropía puedo sacar?

E: Pero es la misma cosa. Si en una botella hay medio litro de agua mineral, puedo beber solamente medio litro.

P: Parece correcto..., pero yo conozco una cosa de la cual se puede sacar más de lo que contiene. **E:** ¡Ah ya! Mi cuenta bancaria. **P:** Si hay 800 Pesos en su cuenta y si retira 1000, ¿cuántos quedan? **E:** 200 Pesos de débito. **P:** 200 Pesos de dinero negativo. Ahora, ¿cómo es con la entropía? **E:** ...¿?... *No hay respuesta.*

P: Para saberlo, habría que sacar toda la entropía del libro. Desgraciadamente, haría falta de una bomba de calor muy eficiente y muy costosa. Sin embargo, otra gente ya ha hecho el experimento. Desde hace 150 años, los científicos y técnicos establecieron nuevos récords con las bombas de calor. Haciendolo, han observado una cosa rara. Aun con las mejores bombas de calor no han podido enfriar un cuerpo debajo de cierta temperatura, por mucho que se bombee. Esta temperatura es menos dos cientos setenta y tres grados. Ahora, ¿alguien de ustedes me lo puede explicar?

Figura 2. En el recipiente con mayor cantidad de agua hay más entropía.

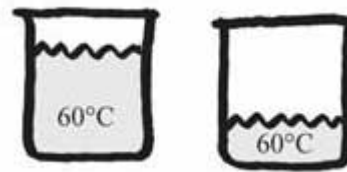


Figura 3. La entropía es una magnitud extensiva.

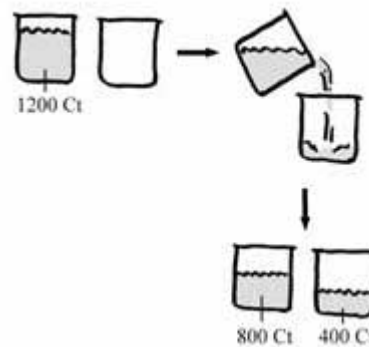
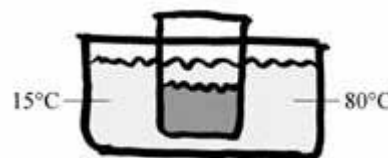


Figura 4. La entropía fluye por sí sola del más caliente al más frío.



E: La temperatura ya no baja, porque ya no hay entropía dentro del cuerpo. No se puede sacar más entropía si ya no hay dentro. **P:** ¿Notan que ahora hemos contestado a una de las dos preguntas que hice al inicio? O más bien, sabemos que la respuesta a las dos es la misma: Se puede sacar tanta entropía como hay dentro y no más. Es diferente para el dinero en la cuenta bancaria o para la carga eléctrica en un cuerpo cargado. Y vemos que para la temperatura hay un valor mínimo. Es razonable y práctico escoger esta temperatura mínima como origen de una nueva escala de temperatura, la temperatura absoluta. Cuando se da una temperatura en esta escala, se emplea la unidad Kelvin.

Quinta lección. **P:** Imaginemos que haya frío y que queremos calentar la habitación. **E:** Hay que meter entropía en la habitación. **P:** Justo. ¿Y cómo hacemos? **E:** Abrir la calefacción. **P:** Correcto. Y en este caso, ¿de dónde viene la entropía? **E:** Del radiador. **P:** ¿Y cómo llega al radiador? **E:** Con el agua. **P:** ¿Y cómo ha llegado al agua? **E:** Abajo en el sótano hay una caldera. **P:** Sí, así es. ¿Pero allá, de dónde viene la entropía? **E:** En la caldera hay una llama. **P:** ¿Viene de la llama la entropía?,

¿Cómo ha llegado a la llama? **E:** Se origina en la llama. **P:** Muy bien. Esta produce, en la combustión, en una reacción química. Se hubiera podido calentar la habitación también de otro modo... **E:** Con una calefacción eléctrica. **P:** ¿De dónde viene la entropía en este caso? **E:** Del calentador, o termoventilador. **P:** ¿Y qué hay dentro del calentador? **E:** Un alambre eléctrico que se calienta. **P:** Sí. Cuando una corriente eléctrica atraviesa un resistor eléctrico se genera entropía.

P se frota las manos, al inicio despacio y después cada vez más vigorosamente. Hay un otro modo para producir entropía. **E:** Con el rozamiento. **P:** Sí. Resumiendo: Se puede producir entropía en una reacción química, en un resistor eléctrico y por rozamiento.

Pasamos a un tema más interesante. Imaginemos que queremos enfriar algo, no calentar. Por ejemplo: Tenemos una taza de té que es demasiado caliente para beber. ¿Qué hacemos?

E: Esperamos que se enfríe. **P:** Sí. ¿Y qué le pasa a la entropía? **E:** Sale del té. **P:** ¿Y a dónde va? **E:** Al ambiente. **P:** Pero, entonces al ambiente debería calentarse. **E:** Sí, lo hace. **P:** Pero no lo notamos. **E:** El ambiente es tan grande, ..., la entropía se distribuye, se diluye. **P:** Muy bien. Pero, ¿no hubiéramos podido desembarazarnos de la entropía de otro modo? **E:** Poner el té en la nevera. **P:** ¿Y qué sucede con la entropía? **E:** Sale de la nevera por detrás. **P:** Justo.

...Hasta ahora han mencionado métodos donde la entropía del té termina en otro lugar. Antes está en el té, después en el ambiente. Pero cuando discutimos el calentamiento, era distinto. La entropía que apareció en la habitación no ha venido de otro lugar, sino ha sido producida. Antes no existía, después existía. ¿No se puede hacer la misma cosa al al revés? Es decir: hacer desaparecer la entropía del té, y no traerla en otro lugar. Hacerla desaparecer definitivamente. **E:** No, no se puede. **P:** ¿Y por qué no? **E:** Porque es así. Sabemos que no es posible. **P:** Es correcto. Tienen razón. Concluimos que: La entropía puede ser producida pero no destruida. Probablemente no han notado lo increíble que es esta afirmación.

E: ¿Por qué increíble? **P:** Los científicos han intentado demostrar, por más de cien años, que no es cierta. Han hecho todo para regatear la naturaleza. Pero sin éxito.

P: ¡Ah ya! Comprendo...la Tierra debería calentarse cada vez más... el efecto invernadero. **E:** Ya ven que es interesante. Pero con el efecto invernadero nada tiene que ver. **P:** ¿Por qué no? **E:** Es cierto que en la Tierra se está creando cada vez más entropía, con todos los procesos imaginables, en particular en los procesos de combustión. Pero, en realidad es aun peor: Llega también entropía del Sol con la luz. Por otra parte, esto no representa un problema para la Tierra. La Tierra cede entropía con la radiación infrarroja que está emitiendo continuamente. Con esta radiación toda la entropía se va de la Tierra: La entropía recibida del Sol más la entropía producida. ¿Es resuelto el problema? **P:** ¡En absoluto! Si es así, el espacio debería calentarse cada vez más. **E:** Ahora estamos llegando a los problemas verdaderamente interesantes.

Del problema de la entropía del universo se ocupan los astrofísicos y los cosmólogos. Pero el problema no está resuelto todavía. La afirmación tiene otra consecuencia singular: Nos dice en qué dirección corre el tiempo. Imaginen que he filmado algo, sin sonido. Les muestro a ustedes la película. Pero no les digo si la muestro en la dirección correcta o al revés. ¿Serían capaces de decirme si la película corre en la dirección correcta? **P:** Depende. **E:** Sí, depende. Pero, ¿de qué depende? **P:** A veces se puede decidir, a veces no.

Sigue la discusión de varios ejemplos: Una pelota que sube, da la vuelta y baja; una torre de cubos que se derrumba; una vela que se consume. Siempre preguntamos: ¿Cómo sería el proceso al revés? ¿Y qué hay de particular en los procesos que pueden transcurrir adelante y al revés? Estos procesos se llaman reversibles. ¿Y qué hay de particular en los procesos que no pueden transcurrir en ambas direcciones? Estos se llaman irreversibles. Encontramos que en los últimos siempre hay producción de entropía.

Referencias

1. F. Herrmann, "Der Karlsruher Physikkurs," en alemán: Aulis-Verlag, Köln, 2003. en italiano, español y inglés: descargar de www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de
2. F. Herrmann, "The Karlsruhe Physics Course," Eur. J. Phys., 2000, vol. 21, p. 49-58.
3. J. Black, "Lectures on the elements of chemistry," William Creech, Edinburgh, 1803.
4. G. Falk, "Entropy, a resurrection of caloric—a look at the history of thermodynamics," Eur. J. Phys., 1985, vol 6, p. 108-115.
5. S. Carnot, "Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas aptas para desarrollar esta potencia," Cuadernos de ciencia y de cultura, Madrid 1927.
6. H. Fuchs, "A surrealistic tale of electricity," Am. J. Phys., 1986, vol. 54, p. 907-909.
7. H. L. Callendar, "The Caloric Theory of Heat and Carnot's Principle," Proc. Phys. Soc. London, 1911, vol. 23, p. 153-189.
8. G. Job, "Neudarstellung der Wärmelehre – die Entropie als Wärme," Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1972 (exhausted), available at: georg.job@gmx.de
9. H. Fuchs, "The dynamics of heat," Springer, New York, 1996.

F. Herrmann
Universidad de Karlsruhe, Alemania
friedrich.herrmann@physik.uni-karlsruhe.de

*(Publicado originalmente en la Revista Cubana de Física,
vol. 27, No.2A, 2010, p.113-118, Como conferencia invitada)*