

ANALES

DEL

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Las ideas actuales sobre termodinámica

POR

MANUEL ALMEYDA

Conferencia dada en el Instituto el Miércoles 22 de Abril de 1918)

- I. Introducción.—Evolución de las ciencias físicas.—La Racionalización de la Experiencia.—¿Es posible una Física Racional?—La Energética o Termodinámica general como fundamento para una construcción racional de la Física.
- II. El Principio de la Conservación de la Energía.—Diversas interpretaciones.—Sus deficiencias.—Definición formal de la Energía.—Expresión concluyente del Principio.—Consecuencias.—Definición substancial de la Energía.—Consecuencias.—Intentos de demostración deductiva del principio. Su inconsistencia.—Extensión del Principio al Universo. Aforisma de Clausius.—Su interpretación científica según Planck.
- III. El 2.º Principio de la Termodinámica.—Diversidad y vaguedad en su exposición.—La noción de Reversibilidad.—Evolución de los sistemas materiales.—Transformabilidad de la Energía.—Expresión del 2.º Principio con referencia a la Reversibilidad de un proceso físico.—Medida de la Reversibilidad.—La Entropía.—Enunciado concluyente del Principio con referencia a la Entropía.—Extensión del Principio al Universo: aforisma de Clausius.—Interpretación y discusión.
- IV. El 2.º Principio y las Teorías dinámicas del Universo.—Los fenómenos de la mecánica clásica son todos reversibles, los fenómenos reales son todos irreversibles.—Imposibilidad de deducir el 2.º Principio de las leyes de la Mecánica racional.—La tendencia positivista en Física como oposición a las teorías mecanísticas.—Triunfo de la tendencia mecanística. Las pruebas de la Realidad Molecular. Interpretación del 2.º Principio dentro de la concepción mecánica del Universo.—Las ideas de Maxwell y Boltzmann.—Entropía y Probabilidad.—El 2.º Principio es una ley estadística.—Comprobación: fluctuaciones del estado físico de un sistema—Ejemplos.—La tendencia de la Física hacia la objetivación de la experiencia y la Hipótesis de Boltzman, según Planck.
- V. Límites de las Teorías estadísticas en Termodinámica.—La radiación del calor y el equilibrio térmico entre la materia y el éter. Imposibilidad de deducirlo de la mecánica estadística clásica.—Necesidad de una modificación fundamental en las ecuaciones de la Dinámica.—Solución de la dificultad: La Teoría de los Quantum de Energía. Alcance de las ideas de Planck.—Los cambios de estado físicos no se verifican continuamente, sino por saltos bruscos.—Significado físico de los Quantums. ¿Existe un átomo de Energía? Opinión contraria de Planck.—Estado actual de la cuestión. Conclusión.

Introducción

No me habría atrevido a solicitar nuevamente vuestra atención para esponeros un tema que se aparta un tanto de vuestras habituales ocupaciones, si no hubiese observado con verdadera satisfacción cómo ha cambiado durante los últimos dos o tres años el campo de actividad de nuestra profesión. Anteriormente, el ingeniero se dedicaba casi exclusivamente a la construcción; en los últimos años, en cambio, no menos de veinte o treinta colegas han sido llamados por las más poderosas compañías industriales del país a dirigir sus trabajos; y no serán problemas de construcción, de resistencia de materiales, los que pedirán, principalmente, el concurso de su saber y experiencia, sino problemas de mecánica, de física y de química aplicadas; en una palabra, serán, antes que todo, problemas de transformación de energías, problemas de Termodinámica.

Si es exacta la definición que dió un crítico inglés del ingeniero en su más vasta aceptación como el profesional encargado de poner las fuerzas de la naturaleza al servicio del hombre, no nos debe extrañar que, una vez que se le dé al ingeniero en este país, la ingerencia que le corresponde en la explotación y creación de las riquezas pública y privadas, sean las aplicaciones de las ciencias que se ocupan del estudio de los fenómenos naturales las que en mayor número forman el conjunto de su actividad profesional.

Hace diez años, cuando yo era estudiante, la enseñanza de estas ciencias en nuestra Escuela de Ingeniería estaba completamente desprestigiada. Se levantaron voces en ese entonces hasta para pedir la supresión lisa y llana de la cátedra de Física General, y era triste observar cómo caballeros más o menos bien colocados en la profesión parecían inclinados a mirar impasibles el derrumbe de una de las piedras angulares de la ingeniería. Pero la Facultad de Matemáticas, comprendiendo la importancia capital del estudio de esta ciencia, se apresuró a darle el prestigio y rango que le correspondía, y la contratación de un profesor especialista en la materia es la manifestación más evidente de su espíritu progresista y rectamente inspirado en este asunto.

Mis deseos son de que cada día el estudio de la Física adquiera más importancia en la formación de nuestros futuros colegas, y de que los estudiantes amen esta ciencia, no sólo como preparación indispensable para la resolución de los problemas prácticos de Tecnología industrial, sino en cuanto ella tiene de elevado y bello.

Por el momento me sentiría satisfecho si con la Lectura que os voy a hacer consiguiera haceros recordar algunas cuestiones fundamentales de Física que tal vez no habeis tenido ocasión de considerar con la suficiente atención, y os interesara en la exposición de uno de sus últimos progresos que dicen relación con el aspecto filosófico de la ciencia y modifican sustancialmente nuestra concepción del Universo.

I

Si se observa el desarrollo de las ciencias físicas a través de las edades, se ve que su perfeccionamiento estriba en la agrupación de los fenómenos en un número cada vez menor de leyes naturales. Por medio de estas leyes se consigue derivar ciertos hechos de otros; éstos, a su vez, de otros más generales y así, de esta manera, se logra constituir una cadena de fenómenos de los cuales los primeros son los antecedentes necesarios de los que les siguen. En esta etapa interviene el raciocinio matemático y sustituye por símbolos apropiados los elementos objetivos que constituyen los eslabones de la cadena e interpreta por medio de ecuaciones algebráicas o diferenciales las conexiones o relaciones que la experimentación ha descubierto entre aquellos elementos.

Este proceso constituye la Racionalización de la Experiencia, y lo llamo así porque permite deducir, valiéndose exclusivamente de los métodos que la razón humana posee en sí misma, todo el complejo conjunto de los fenómenos observables, de un número reducido de ellos. Las ciencias físicas, en su progreso, van eliminando poco a poco del mundo sensible todos aquellos elementos cuya existencia puede reducirse a la de otros, tendiendo a concentrar y a derivar toda la experiencia posible del conjunto más sencillo de hechos fundamentales, así como el químico trata de concentrar en un pequeño botón, todo el metal precioso esparcido por entre los trozos enormes de su criadero.

Ese conjunto de hechos fundamentales, una vez completamente refinados y eliminados todos aquellos elementos sutiles con que la rutina e inconciencia de nuestra mente cubre todo lo que pensamos, constituye los Principios de la Ciencia, o sea, lo que podremos llamar los Datos puros de la experiencia científica.

Ejemplo completo de esta evolución de las ciencias y modelo actual de una doctrina construida sobre este esquema deductivo, nos lo presenta la Mecánica Racional. Ella posee sus Principios, elaborados inconscientemente, a través de los siglos desde Arquímedes hasta Leonardo da Vinci, y conscientemente de Galileo a Newton en el siglo XVII, de Gauss a Mach, en el último siglo. De esos principios se derivan, por medio del análisis matemático, todos los fenómenos de movimientos observables sobre la Tierra y en el mundo estelar. Se puede decir que la Mecánica Racional es una ciencia cuya evolución ha terminado ya.

Por desgracia, bien lejos se encuentra el resto de las ciencias físicas del modelo que en forma tan acabada les ofrece su hermana mayor.

¿No es, acaso, posible una Física Racional? Indudablemente que lo es, nos contesta nuestra razón; pero el número de fenómenos físicos es tan variado y considerable, que probablemente verán la luz muchos siglos antes que ese ideal pueda verse cumplido, si es que alguna vez el espíritu del hombre se encuentra capaz de llevarlo a término.

Ante los campos aún casi vírgenes de la experiencia, los investigadores se

lanzan a extraer materiales para la gran obra del futuro. Los materiales se acumulan, los descubrimientos brotan incesantes, cada vez más imprevistos, asombrando a la Humanidad, y el edificio no se alza. Se espera tal vez que la experiencia agote sus fuentes para que los obreros de la ciencia acudan a levantar el monumento que ilustrará para siempre sus esfuerzos.

Sin embargo, no todo está por hacer: los cimientos están echados y hay continuamente maestros en la obra que realizan lentamente su tarea.

La experiencia inconsciente de los siglos y el trabajo consciente de los hombres de ciencia, han elaborado, poco a poco, y destilado, por fin, los Datos puros de la experiencia física y con ellos como Principios, se han establecido los fundamentos para una construcción racional de la Física. Estos fundamentos constituyen la Energética o Termodinámica general.

Siendo esto así, es lógico admitir que la Termodinámica debería constituir una de las ramas principales de la enseñanza de la Física. Sin embargo, todos sabemos que ella no es, generalmente, tratada en los cursos, ni en los textos usuales, y cuando se la trata, es más bien en forma de un solaz para alterar la aridez de las descripciones de aparatos y experimentos, que muchas veces no se hacen, como aquellas fantasías que los músicos intercalan para alegrar el oído, fatigado ya por la monotonía del diálogo cantado. Considerada de esta manera, la Termodinámica se cierne por encima de la materia habitual de la Física, como una poesía vaga e indemostrable que, al quererla tocar, se desvanece.

Y en cuanto a los principios, ¡qué vaguedad y qué variedad desconcertante no encontramos en la exposición de su significado, definición y enunciado! La anarquía que reina en ésto, no puede ser más completa, y lo peor es que ella ha contagiado a personalidades de alguna situación en la ciencia, lo que le ha dado el carácter de un hecho natural consumado.

Pero esta situación debe cesar cuanto antes, y mi propósito hoy día es contribuir a ello, dando a conocer, en forma clara y sencilla, las ideas actuales más acabadas sobre la materia.

II

De entre el gran número de expresiones e interpretaciones que corren sobre el Primer Principio de la Termodinámica, o Principio de la Conservación de la Energía, aquellas que toman las direcciones más opuestas, merecen un momento nuestra atención.

Creen algunos que este Principio no tiene sino un valor nominal muy relativo, que es una especie de definición disfrazada dentro de cuyo elástico marco será posible hacer caber casi todo lo que se quiera (1) y, en caso de que algún fenómeno viniera aún así a contradecirlo, bastaría admitir la existencia de una nueva forma de Energía para restablecer otra vez la igualdad que expresa anali-

(1) Poincaré: «Ciencia e Hipótesis». Madrid, 1907. Pág. 156.

ricamente el Principio. ¿Pero, es natural preguntarse, qué concepto se tiene, entonces, de la Energía, si se cree posible crearla a voluntad con este procedimiento? En realidad, los que así piensan, no han partido de una concepción fija, concreta de la Energía y no es raro, entonces, que el resultado a que arriben tenga ese carácter incierto y caprichoso. Poincaré, que parece haber dado prestigio a esta tendencia con su gran personalidad, nos dice, por ej.: «en cada caso particular se ve bien lo que es la energía y se puede dar de ella, al menos, una definición provisoria; pero es imposible encontrar una definición general. Si se quiere enunciar el principio en toda su generalidad y aplicarlo al Universo, se le ve, por decirlo así, esfumarse y no queda más que esto: *Hay algo que permanece constante*. ¿Pero, se pregunta Poincaré, tiene esto mismo algún sentido?». Y qué extraño es que no lo tenga, podemos contestar nosotros, habiéndose sentado como base que es imposible encontrar una definición satisfactoria de la energía; lo raro sería que se pudiese deducir alguna consecuencia lógica de una cosa que no se conoce todavía.

La tendencia opuesta considera al Principio como una verdad evidente a priori, resultado tal vez de una imposición de nuestro espíritu a nuestra experiencia y, por consiguiente, afirma que será imposible encontrarse alguna vez delante de un fenómeno que lo contradiga. Si es así, ¿qué valor heurístico tendría el Principio y cómo se explicarían los muchos frutos que ha dado y está dando constantemente a la Ciencia?

Ambas tendencias son, por consiguiente, erradas y su error proviene de una apreciación común deficiente del concepto de energía. Es imposible establecer en forma satisfactoria el principio de la conservación si no se parte de una definición clara, precisa y concluyente de la energía. Sir W. Thomson ha dicho que sólo conocemos una cosa cuando somos capaces de medirla; por consiguiente, una definición concluyente debe encerrar en sí misma la manera de medir el concepto que se define. El mismo sabio inglés fué el primero que dió a conocer, el año 1852, una definición de la energía que satisface esas condiciones, y hasta hoy día es la única que no ha sido objetada por algún punto. Dice así: *se designa por Energía de un sistema material en un estado determinado, al monto, medido en unidades mecánicas, de todas las acciones que se verifican al exterior del sistema cuando éste es llevado, de cualquier manera, desde el estado en que se encuentra, a otro estado fijado arbitrariamente de antemano como estado origen o de Energía nula*.

Sería imposible, dentro del tiempo de que dispongo, entrar a discutir esta definición. Planck (2) lo ha hecho en forma magistral y ha dejado establecido que ella cumple con todas las condiciones exigibles.

Basándose en esta definición, el Primer Principio se enuncia como sigue: *La Energía de un sistema material en un cierto estado, posee un valor fijo y bien determinado*. De este enunciado se desprende inmediatamente la siguiente proposición:

2) Die Prinzip der Erhaltung der Energie. 3ª ed. Leipzig, 1913. Pág. 104--110.

el monto, expresado en unidades mecánicas, de las acciones que el sistema verifica al pasar de un estado cualquiera a otro, es independiente del camino o de la manera cómo se ha efectuado el paso del primer estado al segundo.

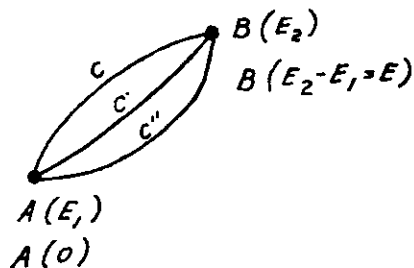


Fig. 1.

En efecto, sean A y B dos estados del sistema y E_1 E_2 las energías correspondientes, cuyos valores se refieren a un estado origen $X = 0$, elegido arbitrariamente. Cambiemos de origen y sea A el nuevo origen elegido; entonces la energía de A será 0 y la de B $E_2 - E_1 = E$. Supongámonos que se pueda pasar de A a B por diversos caminos o procesos físicos c , c' , c'' , y que los equivalentes mecánicos de las acciones externas, según esos diversos caminos, sean distintos.

Entonces, por definición, la energía en el estado B tendría distintos valores lo que es contrario al Principio en la forma expuesta más arriba, y queda demostrada, entonces, la proposición anterior.

Desde luego se ve, al contrario de lo que erróneamente han creído algunos, que el principio no es ni un círculo vicioso, ni una definición disfrazada, pues, en el caso que sea posible pasar de un estado de un sistema material, a otro estado, por medio de diferentes procesos físicos, nadie podría de antemano sostener a priori que los equivalentes mecánicos de las acciones exteriores, en cada una de esas transformaciones, debieran ser iguales; sólo la experiencia puede decirnos si esto es o no efectivo; el principio de la conservación afirma debe ser así.

¡Cuántos errores se habrían evitado los que han opinado precipitadamente sobre el primer principio si hubieran conocido la definición científica de la energía y la expresión verdadera de él! Me bastará recordar un autor muy leído, tal vez demasiado leído por nuestra juventud, el Dr. Lebon, que, al querer demostrar por diversas consideraciones la falsedad del principio que nos ocupa, sólo ha dejado en claro su absoluta ignorancia del tema que estaba tratando.

Partiendo del enunciado del principio dado más arriba, podemos demostrar algunas proposiciones importantes:

1.º) La imposibilidad del movimiento perpetuo.

Sea S un sistema material en un cierto estado y E su energía referida a otro estado $X = 0$ como origen. Cambiemos de origen y sea el nuevo origen el estado mismo que se considera; entonces el valor de su energía se reduce a 0, por definición. Hagamos recorrer el sistema una serie de estados que lo vuelvan finalmente a su estado primitivo. El equivalente mecánico de las acciones externas en esta transformación será evidentemente igual a 0, y lo mismo se tendrá para

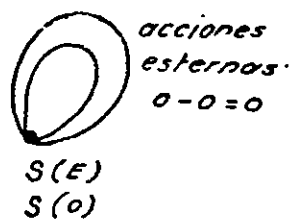


Fig. 2.

esta transformación será evidentemente igual a 0, y lo mismo se tendrá para

cualquiera otra transformación que lleve finalmente al sistema a su punto de partida. Queda así demostrado que es imposible construir una máquina o sistema material que recorriendo un ciclo cerrado de transformaciones dé un valor distinto de cero a las acciones que efectúa a su alrededor.

2.º La energía de un sistema aislado permanece constante. Esta proposición es una consecuencia inmediata de la definición de energía, pues, no existiendo sistemas materiales alrededor del que se considera, necesariamente las acciones externas serán nulas, y por consiguiente, la energía del sistema conservará su valor constante.

Esta consecuencia nos da el punto de partida para una concepción de la energía distinta de la que se desprende de la definición de Sir W. Thomson. Esta hace depender la energía de un sistema de las acciones exteriores a él; en cambio, el hecho de que en un sistema aislado la energía permanezca constante, nos hace concebir que dentro del sistema exista una cierta entidad que goce, a semejanza de la materia, de la propiedad de ser indestructible. A esta entidad es a la que damos el nombre de Energía y nos la imaginamos como la provisión de una cierta substancia acumulada en el sistema material: la que, naturalmente, no puede aumentar ni disminuir cuando un sistema se encuentra aislado de los demás cuerpos del Universo. Analíticamente se expresa esta idea diciendo que la Energía es una función de estado de los sistemas materiales.

Dentro de esta nueva concepción de la Energía, el Primer principio se enunciaría como sigue: *La Energía de un sistema material aislado se conserva.* Es fácil demostrar que este enunciado es equivalente al anterior. En efecto, sean A y B dos estados de un sistema material S, y E_1 , E_2 , las energías correspondientes referidas a un estado origen $X=0$. Cambiemos el origen a A; tendremos $E_1 = 0$ y la energía de B pasa a ser $E_2 - E_1 = E$. Consideremos diversos caminos c, c', c'' para pasar de A a B y sean α, β, γ , los equivalentes mecánicos de las acciones externas en estas transformaciones diversas. Debo demostrar que $\alpha = \beta = \gamma$. Para esto considero como un sistema aislado en cada transformación el conjunto formado por el sistema S y por todos los cuerpos que lo rodean que experimenten alguna acción. La energía de este sistema aislado permanecerá invariable, de acuerdo con el último enunciado del Principio, luego la cantidad de energía de que ha aumentado S al pasar de A a B debe ser igual a la que han perdido simultáneamente los cuerpos exteriores a S. Ahora bien, el aumento de energía de S es el mismo para todas las transformaciones e igual a E, puesto que, por definición, la Energía es una función de estado y no puede alcanzar sino un solo valor para cada estado determinado, como el B (3). Por consiguiente, deben ser asimismo iguales las variaciones de energía de los cuerpos exteriores al sistema S, es decir $\alpha = \beta = \gamma$, que era lo que deseaba demostrar.

Se puede resumir todo lo dicho anteriormente en el siguiente cuadro.

(3) Estrictamente hablando debería decirse una función de estado uniforme.

II

Definición: Energía = monto en unidades mecánicas de las acciones externas en el paso del estado considerado al estado origen

Corolario: La Energía de un sistema aislado se conserva.

Principio experimental: La Energía de un sistema en un cierto estado es un valor bien determinado.

Definición: Energía es una función uniforme de estado de un sistema.

Corolario: La Energía de un sistema en cierto estado es un valor bien determinado.

Principio experimental: La Energía de un sistema aislado se conserva.

El último enunciado del Principio es el que se da a conocer generalmente y es en el que se han apoyado casi todos los comentadores. Sin embargo, debo hacer notar, que no debe presentarse separadamente del primer enunciado por fundarse en una definición de la Energía que no admite una medida precisa, y resulta, en consecuencia, una fórmula vaga e insegura que explica los errores en que han caído los que la han usado sin darse cuenta de su valor muy limitado.

Es un hecho que ha llamado muchas veces la atención el que todo el mundo esté seguro de que el primer principio no será jamás vulnerado por la experiencia. ¿De dónde proviene esta confianza tan general y uniforme? Sabios y críticos se han hecho al respecto diversas conjeturas: para Descartes la conservación de la cantidad de movimiento era una propiedad con que el Creador había dotado a la materia y la manifestación más evidente de su poder infinito. Uno de los fundadores del Principio, en su forma actual, atribuía la indestructibilidad de las fuerzas a que eran seres espirituales dotados de todas las cualidades inherentes a las esencias superhumanas, y el propio descubridor de la equivalencia del calor y el trabajo, Robert Mayer, creía que el fundamento de la ley por él establecida, era el principio de causalidad, expresado en la forma antigua: *causa aequat effectum*; la causa es igual al efecto. Mach (4) piensa, asimismo, que existe estrecha conexión entre el principio de causalidad expresado: la causa determina el efecto, y el postulado de la imposibilidad del movimiento perpetuo. Por su parte, Helmholtz, deriva el Principio de la concepción mecanística del Universo, y Planck (5) se inclina a creer que la confianza en la conservación de la energía se

4. Die Geschichte und die Wurzel der Satz von der Erhaltung der Arbeit. Prag, 1872. Reimp., facsimilar, Leipzig 1909. Pág. 44.

5. Loc cit., págs. 147 y siguientes.

hasa en que es una consecuencia inmediata del axioma, establecido por la experiencia de todo el género humano, de que es imposible construir un mecanismo capaz de producir trabajo de nada.

Si se recuerda lo que he dicho más atrás, respecto a la evolución de la ciencia, la gestación de los principios y la construcción racional de la experiencia, se admitirá, sin esfuerzo, que es vano todo intento de derivar la conservación de la energía de otra ley más general. Si ese principio está, como parece, definitivamente establecido, constituye ya el dato puro, la quinta esencia de la experiencia científica.

La ley de la conservación de la energía ha tenido su origen en las observación continuada de los fenómenos naturales y, como dijo Hertz, lo que ha sido demostrado por la experiencia puede ser invalidado por ella. No obstante, no se puede negar que el principio de la conservación se nutre de un concepto más vasto aún que él mismo, concepto que la intuición nos indica como absolutamente indestructible y el cual le imprime un carácter especial de firmeza y validez universales: este concepto es el axioma causal.

Clausius ha expresado el alcance del primer principio, diciendo que la energía del Universo es constante. Pero, es la creencia general que el Universo es infinito y, por consiguiente, su energía infinita, indeterminada. La aplicación del principio al Universo resulta entonces una proposición sin sentido. Planck (6), sin embargo, ha conseguido dar una interpretación científica al aforisma de Clausius. La variación de energía de un sistema material es proporcional a las acciones externas que ejecuta, o sea, a su superficie; en cambio, su energía interna es proporcional a su volumen, por consiguiente, mientras más grande es un sistema, menor importancia tendrán las variaciones de energía que experimente, en relación a su valor total. Si suponemos ahora un sistema material de las dimensiones del Universo accesible a nuestros sentidos, las variaciones de energía debidas a las acciones externas serán completamente despreciables, en relación al monto total de energía acumulado en los astros, y se puede decir entonces, cometiendo un error prácticamente nulo, que la energía del Universo es constante.

III

Si apesar de las discrepancias de opinión sobre el alcance y significado del Primer Principio, éste no ha dejado de gozar nunca de una popularidad universal, el Segundo Principio de la Termodinámica, por el contrario, ha tenido la desgracia de quedar ignorado para la mayoría de las personas de una ilustración general, por culpa casi exclusiva de los encargados de difundir los conocimientos científicos. El 2.º Principio ha tenido que luchar desde su nacimiento con una repugnancia arraigada en casi todos los hombres de ciencia respecto a él, repugnancia

6). *Treatise on Thermodynamics*, London 1903. Trad. del alemán, pág. 101.

fundada en una aparente contradicción entre sus conclusiones más inmediatas y la concepción mecanística del Universo, que tan profunda simpatía despierta en nuestro espíritu. Pero, además, ha tenido que luchar con una vaguedad e inconsistencia en su exposición que se ha hecho crónica y general. Algunos lo llaman el principio de Carnot y lo confunden más o menos con el teorema que lleva comúnmente ese nombre; otros lo llaman postulado de Clausius y lo enuncian como sigue: es imposible convertir íntegramente el calor en trabajo mecánico; en fin, otros partidarios de la concepción energética del mundo, lo han identificado con una proposición de carácter general que llaman La Ley del Suceso, Der Satz des Geschehens, que dice que los factores de intensidad o potenciales generalizados de las diversas formas de Energía constitutivas del Universo tienden constantemente a igualarse. Pocos, relativamente, han sido los que, ante todo, han procurado llegar a una exposición clara y precisa de este Principio fundamental de la Física, y sus esfuerzos, afortunadamente, no han sido infructuosos porque actualmente se nota, en este asunto, una corriente de ideas definida.

Desde luego, es natural preguntarse si no será posible ir a buscar la raíz, el fundamento mediato del 2.º Principio, en un concepto arraigado profundamente en nuestro espíritu y en nuestra concepción intuitiva del mundo externo, así como constatamos la relación que existía entre el principio de la conservación y el axioma causal. Efectivamente, ese concepto superior existe y es el del flujo continuo del tiempo. Tenemos la idea clara de que, por la naturaleza de las cosas, el mundo marcha y marchará siempre en un sentido fijo y determinado. Que el tiempo se detenga, que vuelva hacia atrás, son conceptos contradictorios y esto lo expresamos diciendo que el tiempo es esencialmente irreversible.

Sabemos que la idea de tiempo es una consecuencia de la observación invertebrada de los fenómenos, de los cambios que se verifican a nuestro alrededor. En consecuencia, es lógico suponer que la irreversibilidad del tiempo se debe traducir en una propiedad intrínseca de los fenómenos mismos individualmente considerados. Se ha comprobado, en efecto, que, en general, los fenómenos se verifican con preferencia en un sentido y no en el sentido opuesto; y que un sistema material abandonado a sí mismo recorre una serie de estados sucesivos que lo alejan cada vez más del estado primitivo y siempre en el mismo sentido. Se puede decir, entonces, que un sistema material evoluciona y es la evolución conjunta de todos los sistemas físicos que forman el mundo sensible la que ha impreso en nosotros la idea intuitiva del tiempo.

Un sistema aislado, no puede pasar, evidentemente, dos veces por el mismo estado; y si queremos hacerle recorrer un ciclo cerrado de transformaciones debemos introducir acciones externas al sistema, valiéndonos de otros cuerpos o sistemas aportados al efecto. Se dice que una transformación o proceso físico es reversible, cuando se puede, de alguna manera, restablecer a su estado primitivo todos los cuerpos que han tomado parte en el proceso sin dejar ninguna acción residual en el resto del Universo. Procesos irreversibles son aquellos en que la vuelta al

estado de partida, sin dejar huellas, es imposible y, por eso, marcan un paso fatal hacia adelante en la evolución del Universo.

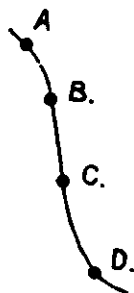


Fig. 3.

Supongamos un sistema aislado en el estado A; éste, espontáneamente, comenzará a evolucionar y pasará por los estados sucesivos B, C, D, etc. Se ve que todo estado accesible desde B, por ejemplo, es accesible desde A; pero nó, viceversa, todo estado accesible desde A puede ser accesible desde B; por consiguiente, el sistema en el estado A es más transformable que en los estados sucesivos. Ahora, como el sistema está aislado, su energía es constante, luego ésta sólo puede cambiar de forma dentro del sistema; podemos decir entonces que la evolución de un sistema material acarrea una pérdida de la capacidad de transformación, o *transformabilidad*, de su energía interna (7)

Si la observación nos enseña que los fenómenos físicos son *en general* irreversibles, nos presenta al mismo tiempo ejemplos de procesos naturales reversibles, como el movimiento de los astros alrededor del Sol, los cuales recorren sus trayectorias cerradas y pasan por los mismos puntos periódicamente, sin necesidad de apelar a la ayuda del mundo externo. Se presenta entonces la duda de si los fenómenos terrestres, son en realidad, todos intrínsecamente irreversibles o si la irreversibilidad que en ellos observamos es debida a la presencia de un número reducido de fenómenos que gozan de esa propiedad y se encuentran mezclados íntimamente con la masa general de procesos físicos que se verifican sobre la faz de la tierra. Una comparación hará más clara esta duda: un alimento puede tener el sabor dulce y este sabor puede provenir, o de que todos los alimentos son de por sí dulces, o de que se ha agregado una substancia endulzadora que impregna toda la materia alimenticia, como sucede, efectivamente, en la práctica.

Un estudio atento de los hechos nos conduce a considerar que en la naturaleza es también el 2.º caso del ejemplo anterior el que produce la irreversibilidad de todos los fenómenos: la enorme mayoría de los procesos físicos es, en realidad, reversible; pero se encuentran siempre tan íntimamente entrelazados con un número reducido de procesos intrínsecamente irreversibles, que a primera vista parecen ellos mismos irreversibles.

Son procesos intrínsecamente irreversibles, es decir, procesos que una vez realizados dejan una marca indeleble en la historia del Universo, los siguientes:

1.º La producción de calor por medio del rozamiento, comprendiéndose en éste, no sólo la fricción de masas visibles, sino también la de masas invisibles como en el caso de la producción de calor por el paso de una corriente eléctrica

(7) Bryan, que en forma tan eficiente ha contribuido al establecimiento de una Termodinámica Racional, llama a esa propiedad de la energía, "Utilizabilidad o Aprovechabilidad, expresión que me parece menos conveniente que la que doy en el texto. Véase su *Termodinámica*, Leipzig, 1907, pág. 41.

por un conductor metálico, cuyo origen es el frotamiento del flujo de electrones contra las moléculas del metal;

2.º La conducción de calor de un cuerpo más caliente a otro más frío;

3.º Los fenómenos de difusión sin efectuar trabajo externo, como, por ejemplo, la irrupción de una masa gaseosa en un espacio vacío, la difusión de una sustancia disuelta a consecuencia de la dilución brusca de una disolución, etc.; y

4.º La ruptura de un equilibrio físico inestable, como, por ejemplo, la cristalización de una sustancia sobre-fundida.

Esta enumeración comprueba que no puede verificarse un solo fenómeno en la naturaleza en el cual no se introduzcan por lo menos dos de estos procesos: la producción de calor por rozamiento y el paso de calor de un cuerpo más caliente a otro más frío.

En cambio, son procesos reversibles:

1.º Todos los fenómenos de movimiento, tanto los movimientos de los cuerpos terrestres, como de los cuerpos celestes;

2.º Todos los fenómenos periódicos, como las ondulaciones luminosas y eléctricas, el sonido, las vibraciones de los cuerpos elásticos, etc.; y

3.º Todos los procesos que se desarrollan con una extraordinaria lentitud y que pueden ser considerados como una sucesión continua de estados de equilibrio, como, por ejemplo, las transformaciones isoternas y adiabáticas de un ciclo de Carnot.

Un carácter general muy importante de los fenómenos reversibles es que son transformaciones ideales, no reales, porque es prácticamente imposible desligarlos de todo fenómeno irreversible accidental, como, por ejemplo, el frotamiento. Sin embargo, para el espíritu existen y forman la trama sobre la cual se desarrollan los raciocinios matemáticos de la Termodinámica como ciencia racional.

Ahora bien, la esencia del 2.º principio está contenida en una proposición de esta especie: *En la naturaleza existen fenómenos intrínsecamente irreversibles*. Pero este enunciado es inconsistente, pues adolece del defecto de no permitirnos una medida concreta de la Irreversibilidad.

Experimentalmente se podría medir la Irreversibilidad de una transformación de la manera siguiente: Sean AB, CD, EF, una serie de procesos irreversibles realizados por distintos sistemas materiales. Liguemos dos de estos procesos de tal manera que no se pueda verificar uno de los procesos sin que ésto arrastre

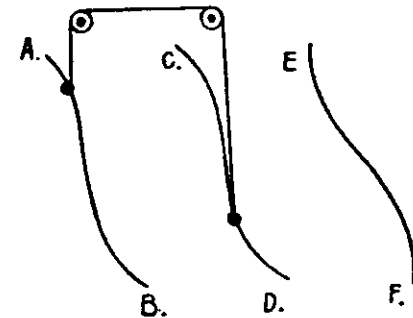


Fig. 4.

la verificación del otro proceso en sentido contrario. Para verlo claro, supongamos que los sistemas en consideración son dos móviles que recorren las pendientes AB

y CD y unámoslos por una cuerda con interposición de unas poleas, como indica la figura. Los fenómenos naturales, en este caso, son el paso de los móviles de A hacia B y de C hacia D; pero, ligados como están, la caída de uno determina necesariamente la subida del otro y vice versa. Hecho el enlace en estas condiciones, se define como proceso más irreversible aquel que arrastra al otro en sentido inverso a su desarrollo natural y son procesos igualmente irreversibles aquellos que, ligados, quedan en equilibrio. Ahora, si entre los diversos procesos considerados, se escoge uno como patrón de irreversibilidad, bastará ligar a éste sucesivamente todos los demás procesos cuya irreversibilidad se quiere medir y establecer en cada caso la condición de equilibrio entre ambos, variando con este objeto la cantidad de materia que evoluciona en el proceso patrón, para obtener una serie de medidas comparables de la irreversibilidad de diversos fenómenos. Sería un procedimiento bajo todo punto de vista análogo al que se sigue en la pesada de los cuerpos, pero, desgraciadamente, no es practicable con comodidad sino en casos sumamente excepcionales.

Analíticamente el problema consiste en encontrar una cantidad que varíe proporcionalmente a la capacidad de transformación, o, como la he llamado, a la transformabilidad de la energía de un sistema en un estado determinado. Esta cantidad existe y fué descubierta por Clausius, quien le dió el nombre de Entropía. Como la Energía, es la Entropía una función de estado y su valor es dado por el que toma la integral $\int \frac{dQ}{T}$, en que Q denota el calor recibido y T la temperatura absoluta correspondiente, a lo largo de un proceso reversible que lleva al sistema desde su estado actual a otro estado elegido arbitrariamente como estado origen o de cero Entropía.

El valor de la Entropía aumenta con cada proceso irreversible que se verifica dentro de un sistema material y permanece constante en los procesos reversibles. El 2.º Principio de la termodinámica se enuncia entonces, en su forma más general y consistente, como sigue:

Todo proceso natural se verifica de manera a aumentar las sumas de las Entropías de todos los cuerpos que han tomado parte en el proceso. En el límite, cuando se trata de procesos reversibles, la Entropía permanece constante.

Un sistema material evoluciona hasta que alcanza el equilibrio con respecto a todas las variables de que depende el estado del sistema; entonces la Entropía ha adquirido su valor máximo. Si consideramos que a todo aumento de la Entropía corresponde una disminución de la transformabilidad de la energía, es decir, una disminución de su capacidad de acción dentro del universo, se comprende que al 2.º Principio se le llame también con frecuencia Principio de la Degradación de la Energía.

Clausius expresó el alcance del 2.º Principio, diciendo: La entropía del Universo tiende a un máximo. Se ha observado con justicia que esta proposición no tiene sentido preciso, puesto que hace intervenir la Entropía del Universo que es

una cantidad indeterminada. Empero, podemos asignarle un alcance real, aplicando el razonamiento de Planck y decir que las influencias de las acciones externas, sobre la marcha de la Entropía del mundo sensible, hacia un máximo, completamente despreciable en comparación con la influencia de los fenómenos internos del Universo.

Pero, lo que ha movido principalmente a los sabios a mirar con instinto repugnancia este aforisma de Clausius, es que condena al Universo a una muerte inevitable e indefinida, resultado que se contrapone abiertamente a nuestra creencia arraigada de que la existencia del Universo, más o menos semejante a la actual, ha sido eterna en el pasado y será eterna en el porvenir.

Muy populares han sido en el siglo pasado y son todavía en el actual, teorías de Kant, Laplace y otros, sobre el origen y fin de los sistemas planetarios; teorías que admiten que la evolución de los mundos es una serie indefinidamente repetida de ciclos completos de la cuna a la muerte. Toda esta concepción quedaría destrozada por el Principio del aumento de la Entropía, en la forma indicada por Clausius para el Universo entero.

Muchos sabios, guiados por la convicción de la evolución indefinida del Mundo, han tratado de poner de acuerdo esta idea con el 2.º Principio; pero sus esfuerzos en este sentido han sido completamente infructuosos. Algunos, como todos, han considerado esta contradicción como un enigma de la naturaleza que al hombre no le es dado descifrar en el estado actual de los conocimientos científicos; pero no han faltado algunos sabios que han llegado hasta el extremo de afirmar que esta contradicción acusa un error patente de la Teoría termodinámica; afirmación que hace 20 años hubiera pasado por el colmo de la audacia, pero que actualmente encuentra, como veremos enseguida, motivos de justificación.

(Concluirá)
