

Las ideas actuales sobre termodinámica

POR

MANUEL ALMEYDA

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

(Conclusión)

IV

La Termodinámica ha dado lugar a otra discusión mucho más importante y trascendental aún, la cual no sólo ha contribuido a hacerle dar un paso considerable hacia su perfeccionamiento, sino también ha sido el motivo para un ensanche y modificación fundamental en nuestra concepción del Universo.

El descubrimiento del primer principio de la Termodinámica y las brillantes consecuencias que de su aplicación a diversos campos de la ciencia se obtuvieron en seguida, fueron causa de la voga de que disfrutaron hace más de cincuenta años las teorías mecánicas de los fenómenos físicos, de los cuales eran partidarios ardientes los más grandes sabios de mediados del siglo pasado: Sir W. Thomson, Helmholtz, Maxwell, Clausius. En efecto, la ley de la conservación de la Energía se transforma en Mecánica en el teorema de la constancia de la suma de las energías kinética y potencial, válido para todo sistema dinámico conservativo, como son, realmente, los considerados por la hipótesis de la naturaleza mecánica de todos los fenómenos físicos. Pero si esta concepción obtuvo grandes triunfos en la explicación de cierta clase de fenómenos, como por ejemplo, con la teoría kinética de los gases, se demostró, sin embargo, incapaz de reducir a las leyes de la dinámica racional los fenómenos eléctricos y magnéticos, lo que ya introdujo una causal de desconfianza respecto a la validez general de dichas leyes para todos los fenómenos naturales sin excepción.

Posteriormente se hizo notar que la concepción dinámica del Universo estaba en abierta contradicción con el 2.º principio de la Termodinámica, pues mientras éste establece una dirección única y determinada para el desarrollo de los procesos físicos, la teoría dinámica, basada en la naturaleza discontinua de la

materia y en la existencia de fuerzas físicas que derivan de un potencial, está obligada a admitir que todo proceso puede desarrollarse indistintamente en dos sentidos opuestos; en otras palabras, si la Termodinámica afirma que los fenómenos naturales son irreversibles, la teoría dinámica del Universo sólo puede conciliarse con la completa reversibilidad de todos ellos. En efecto, los movimientos más generales de un sistema material sometido a las leyes de la Mecánica clásica son regidos por las ecuaciones generales de la dinámica de Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta q'_a} \right) - \frac{\delta T}{\delta q_a} = Q_a$$

en que q_a son las coordenadas generalizadas del sistema, q'_a las velocidades generalizadas, T la fuerza viva y Q_a las fuerzas generalizadas que obran sobre el sistema. Según la concepción mecánica del Universo, las partículas materiales que constituyen los cuerpos están sometidas a fuerzas centrales, cuya intensidad depende sólo de su distancia mutua; estas fuerzas derivan de un potencial y son función solamente de las coordenadas de posición del sistema. Si se admite, además, que la energía quinética es una forma cuadrática de las velocidades, o sea, que sólo existen en el mundo fenómenos de movimiento, entonces, introduciendo estas condiciones en la ecuación general de Lagrange, se ve inmediatamente cómo queda determinada la reversibilidad esencial de los procesos dinámicos.

Para simplificar y facilitar las operaciones matemáticas, consideraré sólo el caso en que q_a , q'_a y Q_a representan las coordenadas, velocidades y fuerzas en el sentido ordinario de estas expresiones. Tenemos así para la ecuación con respecto al eje de los x :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta \sum C_x v_x^2}{\delta v_x} \right) - \frac{\delta \sum C_x v_x^2}{\delta x} = X$$

$$2 \frac{d}{dt} \sum C_x v_x - \frac{\delta}{\delta x} \sum C_x v_x^2 = X$$

pero C_x es independiente de t y $v_x = \frac{dx}{dt}$, luego, puedo escribir:

$$2 \sum C_x \frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{\delta}{\delta x} \sum C_x \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = X$$

Se comprueba que los términos del primer miembro introducen la variable tiempo a la 2.^a potencia y como X es sólo función de las coordenadas, el cambio de signo del tiempo no modifica en nada la ecuación del movimiento, lo que quiere decir, precisamente, que dentro de la mecánica clásica los fenómenos pueden

transcurrir indistintamente hacia el porvenir como hacia el pasado, o sea, gozan de la propiedad que hemos llamado reversibilidad.

La imposibilidad de deducir los procesos irreversibles de la Física de la dinámica de Lagrange dió lugar al nacimiento de una escuela que rechazaba por completo todo intento de reducción de los fenómenos naturales al movimiento de partículas elementales de la materia o del éter y sentaba como bases inamovibles de la ciencia exclusivamente los dos principios de la Termodinámica, con prescindencia completa de toda hipótesis sobre la existencia de moléculas o de fuerzas moleculares. Campeones de esta tendencia, llamada positivista, han sido tres sabios de primera nota: Ostwald, en Alemania; Mach, en Austria y Duhem, en Francia (1). Su influencia ha sido, hasta los primeros años de este siglo, considerable, a lo cual contribuía no sólo el prestigio de sus nombres, sino también la fecundidad de la Termodinámica como ciencia puramente fenomenológica, es decir, fundada sobre los datos inmediatos de la experiencia y no sobre hipótesis relativas a propiedades de la materia inaccesibles a nuestra observación.

Hemholtz, Clausius y otros habían tratado de poner de acuerdo, introduciendo masas ocultas, ligazones especiales y otros subterfugios, las ecuaciones de la dinámica clásica con las ecuaciones derivadas del 2.º Principio, pero el resultado alcanzado estaba lejos de resolver las exigencias del problema, hasta tal punto que Poincaré se veía obligado a declarar terminantemente en 1892 (2) que los fenómenos irreversibles y el teorema de Clausius no pueden ser explicados por medio de las ecuaciones de Lagrange.

Por los años de 1900 parece que la mayoría de los físicos estaba convencida de que la Teoría mecánica del Universo había pasado completamente a la historia. Ostwald, en 1904, declaraba ante la Sociedad Real de Londres que era posible abandonar aún en la Química las nociones de átomos y moléculas para introducir en su lugar en las ecuaciones sólo elementos directamente observables, y ya se aprontaban muchos sabios para enterrar definitivamente la concepción dinámica del mundo, cuando ésta, en un vuelco repentino, casi podríamos decir fulminante, nunca presenciado en la historia de la ciencia, se levanta casi del borde de su ruina y antes de dos lustros conquista victoriosa todo el campo de la Física y sepulta definitivamente las tendencias opuestas que estuvieron a punto de aniquilarla.

Para explicarse esta trascendental evolución en la Física moderna, es necesario hacer notar que muchos años atrás dos sabios, en términos más o menos análogos, habían indicado ya el camino por donde la teoría dinámica del mundo debía salvarse de ser aplastada por las conclusiones de la Termodinámica.

(1) Podría agregar J. B. Stallo en los países de habla inglesa, pero su influencia ha sido mucho menos importante, a pesar del alto valor de su obra «Concepts and Theories of Modern Physics».

(2) Thermodynamique. Página 449.

Maxwell había hecho notar que, si se admite la constitución molecular de la materia, el principio del aumento de la Entropía pierde su carácter de ley absoluta, para pasar a ser una ley estadística, sujeta, por consiguiente, a fluctuaciones más o menos importantes. Por un ejemplo famoso hizo ver, aún más, que idealmente era posible admitir la inversión del principio de la Entropía y presentar su disminución en un sistema material en el cual se efectúan fenómenos especiales. «Hemos visto, dice (1), que las moléculas en un recipiente lleno de aire a temperatura uniforme se mueven con velocidades en manera alguna uniformes. Ahora supongamos que un tal recipiente está dividido en dos porciones A y B, por una división en la cual existe un pequeño portillo, y que un sér que puede ver las moléculas individualmente abra y cierre este portillo de manera a permitir únicamente el paso de las moléculas más rápidas de A hacia B y las más lentas de B hacia A. Él podrá, de esta manera, sin gasto de trabajo, aumentar la temperatura de B y disminuir la de A, en contradicción a la segunda ley de la Termodinámica».

Un sabio austriaco, Boltzmann, fué aún más lejos y sostuvo que era posible deducir el principio del aumento de la Entropía de la hipótesis de la constitución molecular de la materia, admitiendo solamente que los movimientos de que se hallan poseídas las partículas materiales son completamente desordenados. Un sistema material consiste en un conjunto siempre enormemente considerable de moléculas que se entrecocan y cambian constantemente de velocidad y dirección. Un sistema así constituido tenderá a pasar constantemente de un estado menos probable a un estado de mayor probabilidad y, por consiguiente, dijo Boltzmann, debe existir una estrecha relación entre la Entropía de un sistema, en un estado determinado, y la probabilidad de que se encuentre en ese estado, y dedujo esa relación de la siguiente consideración: Si tenemos dos sistemas físicos A y B y las probabilidades para que A se encuentre en el estado α es p_1 y para que B se encuentre en el estado β es p_2 , entonces la probabilidad p para que los dos sistemas reunidos se encuentren en los estados α y β es el producto de las probabilidades parciales:

$$p = p_1 \times p_2$$

Si la Entropía de A en el estado α es S_1 y la de B en el estado β es S_2 la Entropía S del conjunto de los dos sistemas es igual a la suma de las Entropías parciales.

$$S = S_1 + S_2$$

Luego, se deduce

$$S = K \log p \quad (2)$$

(1) Theory of Heat. Página 238 (ed. de 1907).

(2) Una demostración más general y concluyente de esta proposición se encontrará en Planck: «Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung». Leipzig, 1913, pág. 117.

que expresa el teorema de Boltzmann: *La Entropía de un sistema material en un cierto estado es proporcional al logaritmo de la probabilidad termodinámica de ese estado.*

Admitida esta relación entre la Entropía y la probabilidad, se ve que el problema de explicar la existencia de fenómenos naturales irreversibles se resuelve por la tendencia de la agitación molecular a adquirir progresivamente el carácter de movimientos completamente desorganizados o irregulares, cuya probabilidad, en conjunto, es mayor que la de los movimientos organizados, lo que produce la marcha de los procesos físicos en un sentido determinado. Pero esto mismo nos demuestra que la irreversibilidad de un proceso no es absoluta, sino estadística, pues es sólo el resultado de un enorme número de procesos elementales, de los cuales ninguno individualmente es irreversible; sólo que la reversibilidad del proceso resultante es sumamente improbable.

La consideración de algunos ejemplos facilitará la comprensión de lo que acabo de exponer.

Si dos masas gaseosas, de distinta naturaleza, puestas en contacto tienden a difundirse mutuamente hasta que en un tiempo más o menos largo se establece una mezcla homogénea cuya entropía es mayor que la suma de las entropías de las masas primitivas, esto se debe a que el estado origen, en que las moléculas de distinta naturaleza se encontraban concentradas en regiones diferentes del espacio, es enormemente menos probable que el estado final en que en cada elemento de volumen hay aproximadamente igual número de moléculas de una y otra especie, así como en una caja que contiene un igual número de bolas blancas y rojas, distribuidas al azar, es extremadamente menos probable que en un momento dado la mitad de la caja esté ocupada exclusivamente por bolas blancas y la otra mitad por rojas, que de que se encuentre un promedio de igual número de bolas blancas y rojas en cada porción del volumen de la caja.

Un sistema físico aislado evoluciona hasta adquirir el máximo de entropía, que corresponde al equilibrio del sistema con respecto a cada una de las variables que determinan su estado. Si el 2.º principio es, realmente, una ley estadística, el estado final del sistema no será un estado perfectamente fijo y definido, sino una variedad infinita de estos que se reproducen con tanta mayor frecuencia cuanto más cerca se encuentren del estado propiamente ideal de probabilidad máxima, a cuyo alrededor se distribuyen siguiendo una ley deducida de la teoría de los errores, que se llama la Ley del error.

La teoría enseña que las fluctuaciones de estado que se verifican alrededor del de entropía máxima, disminuyen rápidamente de importancia cuando aumenta el número de elementos cuyas combinaciones determinan la probabilidad. Ahora bien, esos elementos no son otros que las moléculas, luego, se debe razonablemente esperar que esas fluctuaciones sean completamente inapreciables para una cantidad ponderable de materia. Pero un sistema material cualquiera en equilibrio lo podemos considerar como una agrupación de un gran número de sistemas

microscópicos, cada uno de los cuales posee su entropía que ha alcanzado su valor máximo correspondiente. A estos pequeños sistemas se pueden aplicar entonces lo que acabamos de decir, con la única diferencia de que, siendo el número de moléculas incluido en cada sistemita, relativamente reducido, las fluctuaciones de todas sus propiedades físicas alrededor del valor medio correspondiente a la entropía máxima, serán ya observables directamente y podrán alcanzar en un tiempo moderado, valores notablemente diferentes del valor más probable. Se desprende, en consecuencia, de la teoría estadística de la Entropía, que todo sistema material en equilibrio termodinámico se encuentra en realidad en un *régimen permanente de desigualdad variable de todas las propiedades de sus porciones microscópicas* (1).

La comprobación de la exactitud de la teoría de Boltzmann exige necesariamente la realización de dos comprobaciones parciales: 1.º de la naturaleza discontinua de la materia, y 2.º de la existencia efectiva de ese régimen permanente de desigualdad variable que acabo de mencionar.

Pues bien, en los diez años transcurridos entre 1898 en que J. J. Thomson aisló por primera vez el electrón, hasta 1908 en que Perrin determinó el número de moléculas existente en un gramo-masa de un elemento químico por la observación del estado de equilibrio de una disolución coloidal bajo la sola acción de la pesantez, se sucedieron una serie de descubrimientos que todos han convergido a establecer la naturaleza realmente discontinua de la materia, en una forma tan concluyente, que hoy en día se puede hablar con tanta seguridad de la existencia de la molécula, como de que la combinación de 1 parte en peso de hidrógeno y 8 de oxígeno constituyen 9 partes en peso de agua. No haría sino repetir lo que el profesor Rossi dijo en la conferencia inaugural de sus clases de la Universidad hace cuatro años, si quisiera hacer una relación somera de los hechos que han conducido a los físicos actuales a esta convicción; me bastará recordar que ya en 1908 Ostwald se veía obligado a confesar que los nuevos descubrimientos probaban en forma clara la existencia de la molécula (2).

Me voy a referir entonces, sólo a algunos fenómenos de los cuales se ha deducido la segunda comprobación parcial de la teoría estadística de la entropía.

Si se observa, por ejemplo, con el ultra-microscopio una disolución coloidal cualquiera, se ven los corpúsculos que constituyen la substancia disuelta agitadas

(1) Perrin: Les preuves de la réalité moléculaire (en actas del Congreso de Física reunido en Bruselas, París 1912, pág. 216). Les atomes, París 1914, pág. 190.

(2) En este orden de ideas se halla escrito su Grundriss der Allgemeine Chemie, Leipzig 1909. El cambio de frente de Mach también ha sido considerable; compárese su «Erhaltung der Arbeit» con la última edición de su famosa obra «Die Mechanik in ihrer Entwicklung» y especialmente con su artículo «Die Leitgedanken meines Erkenntnislehre, etc.» publicado en Scientia, vol. VII (1910). En cambio, Duhem mantiene aún sus ideas antimecanicistas con todo rigor. Véase la 2.ª edición de su «La théorie physique: son objet, sa structure». París, 1914.

constantemente en una forma desordenada, cuyo fenómeno, llamado como se sabe movimientos brownianos, se ha demostrado que se debe únicamente a la energía calorífica interna del disolvente. Se observa entonces cómo el calor propio de éste se está transformando continuamente en energía de movimiento; pero como la suma de ambas energías debe mantenerse constante, de acuerdo con el primer principio de la Termodinámica, a cada impulso dado a una partícula coloidal debe corresponder una disminución de la energía calorífica del líquido situado a su alrededor, y, por consiguiente, una disminución de temperatura. Se deduce entonces que la temperatura de la disolución debe estar variando con suma rapidez en cada región microscópica de su volumen, y si esta variación no ha podido ser medida experimentalmente, se debe sólo a que se necesitaría construir un termómetro cuya ampollita tuviera como diámetro menos de un milésimo de milímetro.

En cambio se han podido medir las variaciones espontáneas de densidad de una disolución coloidal, contando momento a momento el número de corpúsculos que se encuentran en un volumen microscópico de la disolución y se ha llegado a resultados que concuerdan por completo con las predicciones de la teoría estadística.

Mucha mayor importancia tiene la comprobación del régimen permanente de desigualdad variable de la densidad de un fluido homogéneo; fenómeno que ha podido ser observado en las proximidades del estado crítico de diversas sustancias. Es sabido que el estado crítico es aquel en que un fluido deja insensiblemente de ser líquido para convertirse en gas, y en este estado la sustancia posee una compresibilidad infinita, es decir, que basta un aumento infinitamente pequeño de presión para que su volumen se reduzca considerablemente. En los estados contiguos al estado crítico, que en realidad es un límite prácticamente imposible de observar, la compresibilidad es siempre enorme y, por consiguiente, basta que, por efecto de la agitación molecular, aumente un sí es no es la presión interna en un punto para que se formen núcleos espesos de fluido que gozan por un momento de cierta estabilidad. Se establece entonces un régimen permanente de densidad variable que se traduce en una opalescencia azuleja, peculiar del estado crítico, proveniente de que para la luz un fluido en ese estado se comporta como un medio turbio, que difunde los rayos en diversas direcciones. Este fenómeno, con todas sus consecuencias, ha sido sometido al cálculo estadístico y los resultados obtenidos confirman la exactitud de la teoría kinética de la materia y de la entropía.

Fuera de los mencionados, se han observado otros fenómenos análogos, de todos los cuales se desprende que la entropía de porciones microscópicas de la materia, en vez de crecer hasta alcanzar su valor máximo y permanecer enseguida estacionaria por tiempo indefinido, se presenta en realidad en un estado de fluctuación profundamente rápido y desordenado, reflejo inmediato del estado de agitación de las moléculas. Pero, así como es un resultado estadístico invariable que el número anual de nacimientos varones es un 1 o 2 % mayor que el de na-

cimientos hembras, a pesar de que en cada familia, aisladamente considerada, la relación entre los hombres y las mujeres varía en una forma completamente caprichosa, de la misma manera la entropía de un sistema material aislado en equilibrio físico, adquiere un valor casi estrictamente invariable a pesar de que las entropías parciales de sus porciones microscópicas varían constantemente en forma irregular.

Se ha demostrado, pues, que el 2.º Principio de la Termodinámica no es una ley absoluta, sino una ley estadística, válida solo para la agrupación de un número considerable de elementos concomitantes y dentro de ciertos límites más o menos estrechos de exactitud, que, para las condiciones normales de observación inmediata del hombre, se confunden perfectamente entre sí.

Ultimamente algunos físicos (1) han ensayado de modificar el enunciado del 2.º principio de manera de ponerlo de acuerdo con las nuevas ideas; sin embargo, para la casi totalidad de los fenómenos naturales, un cambio en este sentido no tiene valor apreciable y vendría más bien a complicar innecesariamente el estudio de la Termodinámica. De todos modos, es indiscutible que, dentro de una concepción de la Física como ciencia puramente deductiva, el principio del aumento de la Entropía, como fundamento primario de la construcción racional es insostenible y debe desaparecer para dejar su puesto al principio de Boltzmann de que *los movimientos moleculares son completamente desordenados*, del cual se deduce por la simple aplicación de los principios matemáticos del Cálculo de Probabilidades.

Según Planck (2) existe otra razón más para anteponer el principio de Boltzmann al principio de Clausius y es que suprime todo el carácter antropomórfico que le daban a esta ley física las definiciones de irreversibilidad y de entropía, basadas ambas en la imposibilidad de efectuar ciertos cambios en la naturaleza, lo que querría decir que la exactitud de la ley dependía de la mayor o menor capacidad del hombre para actuar sobre el mundo entero. El principio de Boltzmann representa un avance hacia la objetivación de la experiencia de acuerdo con la marcha evolutiva de las ciencias físicas, que tiende a la eliminación progresiva de los elementos personales o subjetivos de nuestra interpretación de la naturaleza y a la concentración de los elementos objetivos que emanan de la fuente misma de nuestras sensaciones. En otras palabras, el principio de Boltzmann es el resultado lógico del desarrollo ascendente de nuestra concepción del Universo.

El triunfo de las teorías estadísticas en Termodinámica, que implica en gene-

(1) Perrin: *les Atomes*, pág. 126, von Smoluchowski: *Gültigkeits grenzen der Zweites Hauptsatzes der Wärmetheorie* (en *Vorträge über der Kinetische Theorie der Materie un der Elektrizität*, Leipzig 1914, pág. 89 y sigts).

(2) *Die Einheit des physikalischen Weltbildes*. Leipzig 1903. pág. 19. Las mismas ideas se encuentran expuestas en «*Acht Vorlesungen über theoretische Physik*» (Erste Vorlesung) Leipzig 1911.

ral el triunfo de la teoría kinética de la materia y del Universo, hizo renacer la esperanza de que todos los fenómenos naturales encuadraran dentro del marco de sus conclusiones y de que la última muralla que separa nuestro espíritu de las leyes fundamentales de la naturaleza hubiese sido por fin derribada.

Desgraciadamente, no tardó en verse esa eterna esperanza desvanecida. Un grupo de fenómenos importantísimos no se dejó explicar por la teoría estadística de la Termodinámica: estos fenómenos son los que se refieren a la radiación calorífica y especialmente al estado de equilibrio entre la energía radiante y el cuerpo que la emite.

Efectivamente, si encerramos un cuerpo caliente en un recinto impermeable al calor, se observa que el espacio que rodea al cuerpo dentro del recinto, se impregna inmediatamente de radiaciones caloríficas que corresponden a una cierta cantidad de energía contenida en el éter que llena el espacio. El cuerpo trasmite calor al éter hasta que éste, por decirlo así, se satura, lo que pasa en un tiempo excesivamente corto, pues la capacidad calorífica del éter es extremadamente pequeña. Se continúa enseguida ese estado indefinido de equilibrio térmico en que el cuerpo no da más calor ni el espacio adyacente admite más que la cantidad definida que ya posee. Pues bien, este hecho experimental que en términos precisos puede expresarse así: *la energía radiante por unidad de volumen del éter en equilibrio térmico con la materia es una cantidad finita* (1), es incompatible con la idea de que todo equilibrio físico es el resultado estadístico de un número considerable de fenómenos elementales que se verifican en la forma más desordenada correspondiente al máximo de probabilidad que determina el estado de equilibrio del sistema material que se considera.

Supongamos, por ejemplo, una campana encerrada en un recinto impermeable al sonido. Si hacemos sonar la campana, ésta se pone a vibrar y transmite sus vibraciones al aire que llena el recinto. Se observa enseguida que poco a poco la campana va apagando la intensidad de sus sonidos hasta que por fin vuelve al estado de reposo. La teoría estadística explica fácilmente la marcha del fenómeno: las vibraciones de la campana son movimientos ordenados, cuya tendencia será transformarse en movimientos desordenados. Se transforman primero en ondulaciones sonoras regulares, las que paulatinamente se van convirtiendo en el movimiento completamente desorganizado que constituye el calor interno de un cuerpo, hasta que, finalmente, todos los movimientos vibratorios ordenados de la campana y del aire han pasado a ser movimientos caloríficos desordenados; en otros términos: el sistema ha pasado de un estado menos probable a otro estado de mayor probabilidad.

De la misma manera un cuerpo caliente encerrado en un recinto no conductor del calor, debería, según la teoría estadística, abandonar paulatinamente toda su energía al éter que lo rodea, pues los movimientos desordenados de las molécu-

(1) Jeans; Report on Radiation and Quantum Theory. London, 1914. Pág. 3.

las materiales son comparativamente mucho más regulares que las vibraciones infinitamente pequeñas y rápidas que en todas direcciones y con intensidades continuamente variables puede ejecutar el éter. No podría existir entonces un estado permanente de equilibrio térmico entre el cuerpo y el espacio o éter que lo rodea, porque éste tendería a absorber indefinidamente más y más la energía calorífica de aquél, conclusión que se halla completamente en contraposición con la experiencia.

¿Ahora bien, esta discrepancia proviene de un simple defecto de la aplicación de las teorías estadísticas, a esta clase de fenómenos, o de un defecto de los fundamentos mismos sobre que se apoya la mecánica estadística? Todas las tentativas realizadas para explicar la contradicción entre las conclusiones de la mecánica estadística y la experiencia por un defecto de forma, o puramente superficial de la teoría, han sido frustradas y ha habido necesidad de recurrirse a hipótesis que alteran la esencia misma de las ideas actuales sobre los fenómenos dinámicos del Universo. Al profesor Planck, de la Universidad de Berlín, le ha cabido la gloria de resolver este grave problema de la Física moderna, sentando una teoría de tal trascendencia para la ciencia, que su discusión ha agitado, en los últimos años, todos los altos centros intelectuales de Europa y Norte América, y ha dado lugar a la celebración de congresos especiales de sabios para discutirla.

«Uno se pregunta, decía Poincaré, en 1912 (1), si la Mecánica no esta a punto de sufrir un nuevo transtorno; recientemente se ha celebrado en Bruselas un congreso en que estaban reunidos una veintena de físicos de diversas nacionalidades y, a cada instante, se habría podido oírles hablar de la Mecánica nueva que ellos oponían a la Mecánica antigua; ahora bien, ¿cuál era esa Mecánica antigua? ¿Era la de Newton, la que reinaba todavía, sin réplica, al fin del siglo XIX? No, era la Mecánica de Lorentz, la del Principio de Relatividad, la que hace apenas cinco años parecía el colmo de la audacia. ¿Quiere decir ésto que la Mecánica de Lorentz no ha tenido sino una fortuna efímera, que no ha sido sino el capricho de la moda y que se está a punto de volver a los antiguos dioses que se había imprudentemente abandonado? De ninguna manera, las conquistas de ayer no están comprometidas; en todos los puntos en que se apartaba de la de Newton, la Mecánica de Lorentz subsiste. Se continúa a creer que ningún cuerpo móvil podrá jamás sobrepasar la velocidad de la luz, que la masa de un cuerpo no es una constante, pero que depende de su velocidad y del ángulo que hace esa velocidad con la fuerza que obra sobre él; que ninguna experiencia podrá decidir si un cuerpo está en reposo o en movimiento absoluto, sea con respecto al espacio, sea aún con respecto al éter. Solamente a esas audacias se quiere agregar otras, y mucho más desconcertantes. No se trata solamente de si las ecuaciones de la Dinámica deben ser modificadas, sino que si las leyes del movimiento podrán, todavía, seguir siendo expresadas por ecuaciones diferenciales. Y ésta sería la

(1) *Dernières Pensées*, París, 1913: «L'Hypothèse des Quanta», pág. 165.

revolución más profunda que la Filosofía natural haya experimentado después de Newton».

Para formarse un concepto general sobre las ideas de Planck, lo mejor es referirse a un ejemplo concreto. Sea una masa gaseosa que, para mayor simplicidad, supongo en equilibrio, con respecto a todas las variables que fijan su estado, excepto una: la densidad. Las moléculas gaseosas se encontrarán en un momento dado, distribuidas en el espacio que ocupa el fluido, de una manera determinada. Consideremos ese espacio dividido en volúmenes elementales ΔV : en cada uno de ellos quedará incluido cierto número de moléculas, y el número total de combinaciones que es posible formar con todas las moléculas gaseosas y que realizan la distribución fijada, determina la probabilidad termodinámica del estado del sistema (1). Si disminuimos el porte del volumen ΔV aumentará proporcionalmente el valor de la expresión que nos da la referida probabilidad. Pues bien, la Termodinámica estadística clásica deja indeterminado el valor del volumen elemental ΔV , y, por consiguiente, la probabilidad y la entropía del sistema gaseoso en el estado considerado. La teoría de Planck, por el contrario, da a este elemento un valor finito y bien determinado. De aquí resulta que para la caracterización del estado físico de un sistema material, no tienen influencia las velocidades ni la distribución de las moléculas dentro de cada elemento de volumen, siempre que permanezca el mismo el número de moléculas que se halle en cada uno. Los diversos estados del sistema no se podrían discernir entre sí, sino por el paso de una molécula de un volumen elemental a otro y todas las diferentes configuraciones que son imaginables, haciendo variar la velocidad y situación de las moléculas dentro de un mismo elemento, constituirían un solo y mismo estado físico real, observable (2).

Es fácil generalizar este ejemplo al caso de un sistema que evoluciona con respecto a todas las variables que determinan su estado; entonces lo que he llamado volumen elemental se transforma en lo que Planck llama *dominio elemental de probabilidad*, o sea, el elemento de volumen de un espacio ideal de tantas dimensiones como variables independientes tenga el sistema, dentro de cuyo dominio los diversos estados físicos posibles según nuestra mente, son, en realidad, indiscernibles físicamente entre sí y, por consiguiente, constituyen, como acabo de decir, un solo estado.

(1) La probabilidad termodinámica se distingue, como se ve, de la probabilidad matemática; en que es fijada sólo por los casos favorables y no por la razón entre éstos y los casos posibles.

(2) Tal vez sería más lógico deducir, como lo hace Boltzmann, la probabilidad del estado físico de la velocidad V de las moléculas del sistema, agrupándolas en categorías o elementos de magnitud ΔV , pero la exposición de este método es más difícil.

El que se interese en este punto, puede consultar la obra de Boltzmann: «Leçons sur la Théorie Cinétique des Gaz». París, 1905 8. Cap. I; y Planck: «Vorlesungen über die Theorie», etc. Dritter abschnitt, pág. 110 y sig.

En otras palabras, las probabilidades de los diversos estados posibles de un sistema material no variarían continuamente de manera a poderse representar por los puntos sucesivos de una curva, sino que se pasaría de un estado menos probable a otro más probable por saltos bruscos discontinuos. Así, de igual manera, en el juego de dados, la probabilidad mínima de arrojar de un solo tiro cinco cartas iguales no pasa a la probabilidad máxima, que es la de hacer 17 o 18 puntos, por una serie continua de probabilidades intermedias, sino por un número finito de probabilidades distintas unas de otras.

Poincaré ha expresado en forma definitiva este resultado de la Teoría de Planck o de los *Quantums*, o elementos de Energía, como se la llama generalmente, así (1): «Un sistema físico no es susceptible sino de un número finito de estados distintos; él salta de esos estados a otros sin pasar por una serie continua de estados intermediarios».

El mismo sabio ha conseguido demostrar matemáticamente en forma irrefutable que es imposible conciliar los fenómenos de la radiación del calor y las leyes de la mecánica racional, sin introducir una hipótesis, que podrá variar en algún detalle de la que Planck ha planteado, pero que, en todo caso, se resumirá en el enunciado que acabo de copiar.

Hay que darse cuenta del trastorno que la teoría de los *Quantums* introduce en nuestra concepción del Universo. Ha sido siempre una verdad considerada como evidente el viejo aforisma: «*Natura non facit saltus*». Pues bien, la nueva Teoría es la negación terminante de esa supuesta verdad inconcusa.

Es natural pensar, entonces, que esta extraña teoría habrá sido recibida con desconfianza y combatida rudamente por los hombres de ciencia, como lo ha sido la Teoría de la Relatividad, de que en otra ocasión os he hablado. Muy al contrario, su aceptación ha sido casi inmediata y general (2) porque, además de resolver el problema de la radiación del calor, ha dado la clave de tres fenómenos muy diversos que hasta la fecha se encontraban rodeados por el más profundo misterio: 1.º) el origen del espectro discontinuo de los cuerpos al estado gaseoso; 2.º) la ionización de la materia por medio de las radiaciones etéreas, y 3.º) la disminución rápida de la capacidad calorífica de los cuerpos a medida que se acercan al cero absoluto de temperatura.

Pero uno se pregunta, ¿qué significado real, qué existencia objetiva tienen esos dominios elementales de probabilidad, esos elementos de energía que admite Planck en su avanzada doctrina? Algunos físicos, contestando esta interrogación intuitiva, han supuesto la existencia de un átomo de energía, pero esta hipótesis está en oposición con los fenómenos luminosos, que acusan una propagación continua de

(1) *Dernières Pensées*, pág 185.

(2) Salvo algunas dudas puestas por Sir O. Lodge y Sir J. Larmor en el Congreso de Birmingham de la Asociación Británica en 1913. Véase sobre esto: Lodge: «*On Continuity*», an address to the B. A. London 1913, y también el Report de Jeans, citado anteriormente.

la energía radiante. El mismo Planck ha desechado esta idea (1), porque, dice, la energía kinética de un movimiento neto acelerado no nos la podemos imaginar como aumentando a saltos bruscamente.

En realidad, es imposible, por ahora, dar un significado físico, objetivo, a la hipótesis de Planck. Pero, no desmayemos, el hombre ha penetrado ya en el dominio de los fenómenos que se verifican entre los átomos y el éter y aún dentro de los átomos mismos y, a medida que profundice en el conocimiento de las leyes que rigen los movimientos en esos mundos extraordinariamente pequeños y complicados, los misterios que hoy día se nos presentan casi como insolubles, llegarán a ser, sin duda alguna, poco a poco descifrados.

Por mi parte, yo no sabría poner fin mejor a este estudio, que repitiendo las bellas palabras con que Planck terminaba una de sus más hermosas conferencias (2):

«La mayor parte de la labor queda aún por realizar, y más de alguna brillante ilusión caerá desvanecida, como una hoja seca, del árbol del conocimiento.

Pero el principio está hecho: la teoría de los *Quantums* no desaparecerá ya más del Universo; de ello dan garantías las leyes de la radiación del calor. Y yo creo no irme muy lejos si expreso la opinión que esta hipótesis es el fundamento para la construcción de una teoría que será destinada en el futuro a iluminar con nueva luz las particularidades de los finos y rápidos procesos que se desarrollan en el Universo molecular».

(1) *Über neuen thermodynamischen Theorien*. Leipzig, 1912, pág. 32.

(2) *Ibid.* pág. 34.