

# LA EXPLICACIÓN MECÁNICA Y ESTADÍSTICA DE LA TERMODINÁMICA: INTRODUCCIÓN A LA OBRA CIENTÍFICA DE LUDWIG BOLTZMANN

THE MECHANICAL AND STATISTICAL EXPLANATION OF  
THERMODYNAMICS: AN INTRODUCTION TO LUDWIG  
BOLTZMANN'S SCIENTIFIC WORK

Moisés Pérez Marcos

*Facultad de Teología San Vicente Ferrer (Valencia)*

**Resumen:** *El artículo ofrece una introducción a la obra científica de Ludwig Boltzmann. Se exponen las más importantes aportaciones del científico vienés, en especial su explicación mecánica y estadística de la nueva ciencia de la termodinámica. Sus ideas lo convierten en un pionero de la física teórica y muestran que el siglo XIX no fue una época en la que la física era mera extensión del paradigma newtoniano, sino que fue un tiempo en el que comenzaron a surgir muchas de las ideas que permitieron el paso a la física cuántica y a la relativista. Boltzmann fue también pionero en el campo de la cosmología, en un momento en el que incluso la propia existencia de esta disciplina estaba en cuestión.*

**Palabras clave:** *Boltzmann, termodinámica, física estadística, física del siglo XIX, mecánica.*

**Abstract:** *The article provides an introduction to the scientific work of Ludwig Boltzmann. The most important contributions of the Viennese scientist are presented, especially his mechanical and statistical explanation of the new science of thermodynamics. His ideas make him a pioneer of theoretical physics and show that the 19th century physics was not merely an extension of the Newtonian paradigm, but a time where began to emerge many of the ideas that finally will led to quantum and relativistic physics. Boltzmann was also a pioneer in the*

*field of cosmology, at a time when even the very existence of this discipline was in question.*

**Keywords:** *Boltzmann, thermodynamics, statistical physics, 19th century physics, mechanics.*

## 1. INTRODUCCIÓN

A veces se ha dicho que los físicos del siglo XIX creían que la ciencia estaba prácticamente terminada. Se suele atribuir a Lord Kelvin la frase, al parecer apócrifa, según la cual «no queda nada por descubrir en física». Quizá esta idea de que los físicos considerasen su disciplina prácticamente concluida ha sido exagerada por los autores y narradores de la revolución que vino con el cambio de siglo. Einstein, por ejemplo, dice que cuando él se formó, «en cuestiones de principio reinaba una rigidez dogmática: en origen (si es que hubo tal cosa) creó Dios las leyes del movimiento de Newton, junto con las necesarias masas y fuerzas»<sup>1</sup>. Cuando se narra un logro siempre es más visible si, por razones pedagógicas, se realza el contraste entre lo nuevo y lo viejo. Sea como fuere, lo cierto es que, aunque en el siglo XIX es innegable la situación hegemónica de la mecánica clásica, este es también el siglo de los avances que llevaron a la revolución cuántica y relativista. Es en el siglo XIX, especialmente en su segunda mitad, cuando la todopoderosa mecánica comienza a sufrir sus primeros envites. Por un lado, desde los propios desarrollos de la física: ámbitos como el del estudio del calor o los fenómenos eléctricos condujeron a teorías como la termodinámica o a los grandes trabajos de Faraday, Maxwell y Hertz, que ponían en cuestión algunos aspectos básicos de la mecánica clásica. Por otro lado, desde una perspectiva más filosófica, con los intentos de refundar la física (e incluso la ciencia natural en su conjunto) sobre bases nuevas. Son ejemplos de ello el intento de una nueva fundamentación para la mecánica de Hertz, el energetismo de Ostwald y Helm y, cómo no, el fenomenismo de Mach. Resulta, pues, que el siglo XIX vio surgir una serie de nuevos fenómenos y teorías para explicarlos, que ya ponían en cuestión o contradecían frontalmente algunos pilares de la vieja mecánica, y que despertaron una gran cantidad de debates, no solo sobre si la mecánica podía seguir siendo el fundamento seguro de la física, sino también sobre cuál es el modo en el que funciona la propia ciencia natural.

Este es el contexto en el que se desarrolla la obra de Boltzmann. Y podemos decir que él fue un hombre de equilibrio entre lo nuevo y lo viejo. Boltzmann asume, por un lado, que la mecánica no es un sistema inmutable, y reconoce la necesidad de modificar nuestras teorías y modos de ver la realidad ante los nuevos fenómenos. Esto le distancia de los defensores dogmáticos de la física

---

<sup>1</sup> A. EINSTEIN, *Notas autobiográficas*, Madrid, Alianza, 2016, p. 23.

clásica. Pero, por otro lado, Boltzmann no se resigna a prescindir completamente de los métodos y logros de la mecánica, como pretendían por ejemplo los que buscaban un nuevo fundamento para la física (e incluso para la ciencia). Como ese padre de familia que sabe sacar del baúl lo nuevo y lo viejo, Boltzmann supo enfrentarse a los nuevos fenómenos de la termodinámica sin prescindir del planteamiento mecánico, que consideraba aún útil, aunque también supo darle una nueva perspectiva (la estadística). Por eso algunos han visto en él al último defensor de la mecánica clásica, al mismo tiempo que puede llamársele con razón «abuelo de la mecánica cuántica». Sus aportaciones científicas se cuentan entre las más valiosas del siglo XIX, y ayudaron a preparar la revolución de la física que aconteció hacia el cambio de siglo. Sus reflexiones filosóficas inspiraron a buen número de científicos y filósofos (Schrödinger, Einstein, Wittgenstein, Planck, Kuhn, Feyerabend...) y siguen mereciendo atención<sup>2</sup>. Espero que en este breve recorrido por las mismas se vea porqué.

## 2. LOS INICIOS DE LA TERMODINÁMICA

Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) nace en un momento en el que muchos historiadores sitúan el final de la denominada Primera Revolución Industrial, que transformó la vida de las personas de un modo y con una rapidez nunca vistos antes. Es la época en la que las máquinas transforman la producción, la economía, los viajes, la agricultura, la arquitectura, la guerra... La utilización de las máquinas, en especial la de vapor, suscitó a los científicos multitud de preguntas cuyas respuestas sirvieron, a su vez, para refinar los nuevos artefactos. El intento de comprender la relación entre el calor y el trabajo hizo surgir la disciplina de la termodinámica, a la que durante el siglo XIX hicieron importantes aportaciones Sadi Carnot, Joule, Lord Kelvin o Clausius. El esfuerzo por comprender los fenómenos relacionados con el calor no solamente condujo a mejoras técnicas, sino que reveló algunos de los hechos y leyes más sorprendentes sobre la naturaleza. Las ideas que han reservado a Boltzmann un lugar en la historia de la ciencia se sitúan en continuidad con esas investigaciones.

Sadi Carnot (1796-1832) fue el primero en constatar la intercambiabilidad del calor y el trabajo, y calculó por primera vez cuánto trabajo podía desarrollar una determinada cantidad de calor. Además, llegó a la formulación

<sup>2</sup> Boltzmann defendió la colaboración entre ciencia y filosofía, que no concibió como empresas enteramente diferentes. Aquí nos ocuparemos de los aspectos más netamente científicos de su obra. Para una introducción a sus reflexiones de carácter más filosófico puede verse M. PÉREZ MARCOS, "Ludwig Boltzmann. El pacto entre ciencia y filosofía", en J. ARANA, (ed.), *La cosmovisión de los grandes científicos del siglo XIX*, Madrid, Tecnos, 2021, pp. 143-160; A. VIDEIRA, «A filosofia da ciência de Ludwig Boltzmann: atomismo, mecânica clássica, darwinismo e pluralismo teórico», en *Ciência & Filosofia*, 6 (2000) 199-225.

del segundo principio de la termodinámica diciendo que toda máquina posee un límite de eficiencia que no se puede alcanzar, es decir, en todo proceso de transformación del calor en trabajo hay «pérdidas» que hacen que no todo el calor pueda aprovecharse. Esto conduce a la idea de la irreversibilidad: al quemar una sustancia para conseguir un movimiento se pierde algo que no se puede recuperar. Esta idea es la que permite hablar de la «flecha del tiempo»: los procesos en la naturaleza ocurren según una dirección, que viene marcada por esos procesos que no se pueden revertir. James Prescott Joule (1818-1889), además de asentar los principios que permitieron la formulación del principio de conservación, llegó a la conclusión de que el calor y el trabajo eran dos aspectos de un mismo fenómeno, y realizó varias medidas de la equivalencia entre estas dos magnitudes. El amigo de Joule, William Thomson, más conocido como Lord Kelvin (1824-1907), definió en 1848 la escala de temperatura que lleva su nombre, de la que se seguía la existencia de una temperatura mínima que marca el límite al enfriamiento de cualquier cuerpo.

Rudolf Clausius (1822-1888), avanzando sobre las ideas de Joule y Thomson publicó en 1850 el artículo «Sobre la fuerza motriz del calor y las leyes del calor que pueden ser deducidas», que lo haría famoso, en el que clarificaba algunas de las ideas aún oscuras de Carnot (este aún utilizaba, por ejemplo, el calórico). En dicho artículo formulaba las que hoy se conocen como primera y segunda leyes de la termodinámica. Según la primera ley, el calor se puede transformar en trabajo, pero de manera que la energía total permanece constante. La segunda ley era formulada por Clausius como un hecho casi obvio: el calor no fluye, por sí mismo, de un objeto más frío a uno más caliente (la aparente obviedad de este hecho no debe engañarnos: estamos ante lo que algunos han visto como la ley más importante de la naturaleza). Clausius realizó varias formulaciones de este principio en años sucesivos, hasta que en 1865 acuñó el término «entropía» y formuló el principio de la siguiente manera: en cualquier proceso, la entropía de un sistema cerrado (sin intercambio de materia o energía con el entorno) nunca disminuye. Clausius concluía de aquí que la entropía en el universo tiende a un máximo.

### 3. EL ARTÍCULO DE 1866: LA INTERPRETACIÓN MECÁNICA DEL CALOR

Tras un breve recorrido por los hitos fundamentales de la termodinámica estamos en condiciones de comprender las aportaciones de Boltzmann. Su primer artículo de cierta relevancia científica, publicado en 1866, llevaba por título «El significado mecánico del segundo principio de la termodinámica». En él Boltzmann argumentaba basándose en las ideas de la teoría cinética, que había sido desarrollada unos años antes por Daniel Bernoulli (1700-1782). Partiendo del supuesto de que los gases eran agregados de moléculas en constante movimiento, Bernoulli explicó la temperatura como una medida de la

energía de las partículas, y la presión como el efecto de las colisiones entre las moléculas del gas y las paredes del contenedor. Boltzmann identificó la temperatura de un gas con la energía cinética media de sus moléculas, lo que le permitía explicar mecánicamente el calor (que no es, desde esta perspectiva, sino el movimiento de las moléculas del gas). Esta idea servía también para interpretar mecánicamente el primer principio de la termodinámica: el calor y el trabajo son intercambiables porque en el fondo no son sino dos formas de movimiento, uno microscópico (el de las partículas que componen el gas) y otro macroscópico. Unos años después, en 1871, Clausius publicó un artículo en el que exponía esencialmente los mismos resultados y defendía también una teoría mecánica del calor. Boltzmann, que había publicado su trabajo con solo 22 años escribió a la Academia Vienesa de las Ciencias reclamando su prioridad. Clausius, que ya era un científico de reconocido prestigio, no debió sentirse muy cómodo, pero no dudó en dar la razón al joven y aún desconocido Boltzmann<sup>3</sup>.

#### 4. EL ARTÍCULO DE 1868: LA DISTRIBUCIÓN DE MAXWELL-BOLTZMANN

Boltzmann también intentaba, en su artículo de 1866, dar una explicación mecánica del segundo principio, pero lo hizo con unos argumentos que carecían de la profundidad que se encontrará en sus trabajos posteriores sobre el asunto. En su bagaje faltaba aún el encuentro con la obra de uno de los más grandes científicos del siglo XIX, y seguramente también de todos los tiempos. Me refiero a James Clerk Maxwell (1831-1879), quien además de su espectacular unificación de las leyes del electromagnetismo hizo contribuciones a la teoría cinética, de la cual fue defensor. Se puede decir que «por lo que respecta a la teoría cinética de los gases, Maxwell puso los fundamentos que Boltzmann se encargó de convertir en una teoría acabada»<sup>4</sup>. Una de las principales aportaciones de Maxwell a la teoría cinética fue la introducción de la noción de «función de distribución». La idea es sencilla: cuando nos enfrentamos al estudio de un gas, resulta imposible hacerlo fijándose en todas y cada una de sus partículas, pues son demasiadas. Esta dificultad se puede superar preguntándose cuántas moléculas se hallan en determinados rangos de velocidades. Así, podemos intentar encontrar la función de distribución de un gas, es decir, una función que nos indique cómo se distribuyen las velocidades entre las moléculas. Esta función permitirá calcular las propiedades fundamentales relevantes del gas. Maxwell se propuso encontrar una función de distribución adecuada para un gas a una determinada temperatura, y demostrar que esa era la única posible. Tuvo éxito en lo primero, mostrando que la función de

<sup>3</sup> Cf. D. LINDLEY, *Boltzmann's Atom: The Great Debate That Launched a Revolution in Physics*, Free Press, 2001, pp. 74-75.

<sup>4</sup> E. ARROYO, *Boltzmann. La termodinámica y la entropía*, Villatuerta, RBA Coleccionables, 2012, p. 48.

distribución que representa adecuadamente la distribución de las velocidades es la denominada «curva gaussiana», pero fracasó en lo segundo, pues solo pudo argumentar de un modo muy informal que esa debía ser la única función de probabilidad.

Boltzmann quedó entusiasmado con las ideas de Maxwell y en 1868 publicó un artículo, titulado «Estudios sobre el balance de energía entre puntos materiales móviles», en el que justificó de manera mucho más clara de lo que lo había hecho Maxwell la distribución gaussiana para la descripción de un gas, y demostró que debía cumplirse para un número muy grande de casos, por lo que debía tener validez general. La manera en la que ambos científicos se enfrentaron al mismo problema pone de manifiesto la diversidad de sus estilos: mientras que Maxwell utilizó un razonamiento de índole fundamentalmente matemática para obtener una fórmula que podría ser buena para explicar el comportamiento físico de los gases, Boltzmann partió de las observaciones directas e intuitivas sobre el comportamiento físico de los gases para mostrar por qué la fórmula matemática debía ser la correcta<sup>5</sup>. Maxwell reconoció que Boltzmann había mejorado y ampliado sus resultados. A esta aportación de ambos científicos se la conoce hoy día como *distribución de Maxwell-Boltzmann*.

##### 5. EL GRAN ARTÍCULO DE 1872: LA ECUACIÓN DE BOLTZMANN, EL TEOREMA H, LA ESTADÍSTICA Y LA DISCRETIZACIÓN DE LA ENERGÍA

En 1872 aparecía uno de sus grandes trabajos, «Nuevos estudios sobre el equilibrio térmico de las moléculas de los gases», que contiene algunas de sus aportaciones más importantes. En él lograba, por fin, dar cuenta de la segunda ley de la termodinámica desde principios mecánicos, lo que suponía el desarrollo de la teoría cinética y al mismo tiempo un gran apoyo a la misma. Este trabajo llevó al inmediato reconocimiento internacional de Boltzmann, que fue considerado desde entonces uno de los grandes científicos del momento. Son varias las innovaciones que merecen ser reseñadas. Primero, Boltzmann es capaz de encontrar la ecuación que lleva su nombre, la *ecuación de Boltzmann*, que es la que describe el comportamiento de un estado termodinámico fuera del equilibrio<sup>6</sup>. Esta es, en palabras de Kuhn, «acaso su mayor contribución a

<sup>5</sup> Cf. D. LINDLEY, *op. cit.*, pp. 41, 51-52 y 81.

<sup>6</sup> La *ecuación de Boltzmann*, que rige el comportamiento de un gas en una gran variedad de situaciones. En una forma simplificada (que no es la que aparece en el artículo de Boltzmann) la ecuación se puede escribir así:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{fuerza}} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{difusión}} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{colisiones}}$$

donde  $f$  representa la función de distribución. La ecuación da una descripción de la función de distribución a partir de los diferentes factores que pueden afectarla. Dicho de forma poco rigurosa, el cambio en la función de distribución es debido a las fuerzas externas, las colisiones entre moléculas y la *difusión* (término con el que se significa la tendencia estadística

la ciencia»<sup>7</sup>. Se trata, desde el punto de vista histórico, de «la primera ecuación que gobierna la evolución en el tiempo de una probabilidad»<sup>8</sup>.

Segundo, Boltzmann lograba mostrar que la segunda ley de la termodinámica no es sino una consecuencia de la teoría cinética y la probabilidad. Este hallazgo se conoce como *Teorema H*. Boltzmann observó que una determinada cantidad relacionada con el valor medio del logaritmo de la función de distribución permanecía igual o disminuía para cualquier proceso físico. En el artículo original llamó a esa cantidad E, aunque luego se denominó H, que es como se conoce hoy en día. H poseía un doble significado. Por un lado, cuando los átomos se encontraban en la distribución de Maxwell-Boltzmann, H asumía su mínimo valor posible. Por otro lado, una colección de átomos para los que el valor de H era más grande que el mínimo, debían, mediante el efecto de las colisiones, transformar su distribución de velocidades de tal modo que H decreciese, acercándose cada vez más hacia el valor mínimo asociado con la distribución de Maxwell-Boltzmann. Con ello se ponía de manifiesto no solo que la distribución de Maxwell-Boltzmann era la única descripción correcta de una colección de átomos en equilibrio, sino además que cualquier otra distribución, a causa de las colisiones de sus átomos, inevitablemente evolucionaría hacia la distribución de Maxwell-Boltzmann. La cantidad H, por decirlo de otro modo, se comportaba de manera opuesta a como lo hacía la entropía de la que había hablado Clausius. Todo lo que Boltzmann tuvo que hacer fue añadir un signo menos a H para tener una expresión matemática de la entropía. Clausius había ya manejado un concepto matematizado de la entropía, pero las ventajas de la formulación de Boltzmann eran al menos dos. Primero, que su explicación se seguía de manera sencilla de la ecuación que describe el estado termodinámico (la ecuación de Boltzmann). Y segundo, que la definición de Boltzmann era aplicable a todos los estados, ya estuviesen en equilibrio o no, mientras que la de Clausius solo servía para sistemas en equilibrio. En definitiva, Boltzmann había conseguido una interpretación física, y en concreto mecánica, de la entropía. En sus propias palabras, había encontrado «una interpretación microscópica de la segunda ley de la termodinámica»<sup>9</sup>. Como ha dicho Lindley, «H era precisamente la definición cinética de la entropía»<sup>10</sup>.

de las partículas localizadas en una cierta región a expandirse hasta ocupar todo el espacio permitido).

<sup>7</sup> Th. S. KUHN, *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*, Madrid, Alianza, 1987, p. 61.

<sup>8</sup> C. CERCIGNANI, *Ludwig Boltzmann. The Man Who Trusted Atoms*, Oxford, Oxford university Press, 1998, p. 97.

<sup>9</sup> E. ARROYO, *op. cit.*, p. 61.

<sup>10</sup> D. LINDLEY, *op. cit.*, p. 76.



La tercera de las cosas dignas de mención sobre el artículo de 1872 es el uso que en él se realiza de la probabilidad. De hecho, algunos han visto en este texto el acta de nacimiento de la física estadística. Como él mismo declaraba al comienzo del texto, «los problemas de la teoría mecánica del calor son en realidad problemas de cálculo de probabilidades». Hoy día nos parece lógico y normal este modo de proceder, pero en su momento supuso una gran innovación, porque los resultados que manejaban probabilidades se consideraban poco fiables y de alguna manera defectuosos. El fantasma de Laplace planeaba aún sobre las mentes de muchos científicos. La justificación de Boltzmann para utilizar la estadística es sencilla: dado el enorme número de partículas que contiene un gas, es imposible acceder al estado de cada una de ellas, por lo que hay que conformarse con los valores medios; pero esta manera de proceder es tan fiable y exacta como cualquier otra. En este artículo parece que ni siquiera el propio Boltzmann se había llegado a dar cuenta del verdadero significado físico del uso de la estadística. Si somos rigurosos, según la descripción estadística el hecho de que la entropía de un sistema aumente es lo más probable, pero no es imposible que ocurra lo contrario. Las implicaciones que esto tiene serán reconocidas por Boltzmann, como veremos luego, tras enfrentarse a la paradoja de Loschmidt. En 1872 parece que Boltzmann está convencido aún de la validez, sin excepción posible, del segundo principio.

Algo análogo ocurre con la cuarta de las aportaciones reseñables del artículo de 1872. Me refiero a la estrategia matemática de discretizar la energía. Aunque no podemos entrar en los detalles<sup>11</sup>, la idea de Boltzmann era sencilla. Si tenemos en cuenta que la energía de las moléculas cambia de un modo continuo, los posibles estados en los que se encuentra un sistema termodinámico son infinitos, lo cual dificulta enormemente el manejo matemático del sistema, además de hacer difícilmente aceptable la idea de que el sistema pase, tras cierto tiempo, por todos los estados posibles de energía (esta es conocida como hipótesis ergódica). Estos problemas desaparecen si asumimos que las energías, en vez de presentar cualquier valor, adoptan solo ciertos valores predeterminados. Esos valores pueden ser todo lo pequeños que se desee, lo cual hace que el resultado sea muy generalizable, y permite además que podamos calcular como una suma el valor de la energía total del sistema. Planck y Einstein utilizaron estas ideas de Boltzmann, uno para explicar la radiación del cuerpo negro, y el otro para explicar el efecto fotoeléctrico (por eso Lindley ha dicho que Boltzmann es el «abuelo de la teoría cuántica»<sup>12</sup>). No obstante, hay

---

<sup>11</sup> En T. S. KUHN, *op. cit.* (especialmente el capítulo segundo, titulado «La herencia estadística de Planck: Boltzmann sobre la irreversibilidad») puede encontrarse una explicación más técnica y precisa del uso que Boltzmann hizo de la discretización de la energía. Kuhn muestra la relevancia capital que este recurso tuvo para el análisis que Planck realizó del problema del cuerpo negro. También el uso de la estadística, tal y como vemos ya en Boltzmann, desempeña un papel fundamental en el surgimiento de la mecánica cuántica.

<sup>12</sup> D. LINDLEY, *op. cit.*, p. 176.



que aclarar que Boltzmann no está defendiendo aún una concepción discreta de la energía, sino que ha diseñado un artefacto conceptual para hacer tratable matemáticamente, simplificándolo, un problema físico en principio muy complejo.

## 6. EL DEMONIO DE MAXWELL Y LA PARADOJA DE LA REVERSIBILIDAD

Los resultados del trabajo de 1872 catapultaron a Boltzmann a la fama, y desde entonces fue considerado uno de los grandes científicos de la época. Pero su programa de intentar explicar mecánicamente los principios de la termodinámica pronto encontró obstáculos. Ya en 1869 Maxwell había formulado la que será la principal objeción al proyecto de Boltzmann: la idea del *demonio de Maxwell*. En una carta a su amigo Tait, Maxwell imaginaba dos habitaciones adyacentes, separadas por una pequeña abertura, cada una de ellas llena con gas, el de una de las habitaciones caliente, el de la otra frío. Si la abertura que une las habitaciones permite el libre tránsito, lo normal es que con el tiempo las partículas de una habitación y las de la otra se vayan mezclando y las temperaturas de cada una de ellas terminen siendo iguales. Maxwell imaginaba una minúscula criatura, posteriormente bautizada por Thomson como «el demonio de Maxwell», capaz de ver cada una de las partículas del gas y de operar una compuerta en el lugar en el que ambas habitaciones se unen. Este ser imaginario podría permitir entre las habitaciones solo el tránsito de partículas que hiciese que, en la que tiene la temperatura baja, esta decreciese aún más y que en la que tiene la temperatura alta esta creciese aún más. Es decir, las temperaturas de las dos habitaciones no tenderían a igualarse, como cabría esperar, sino que serían cada vez más dispares. O dicho de otra manera: la entropía de este peculiar sistema no se incrementaría sino que, de hecho, sería cada vez menor. En 1871 aparecía publicada una explicación más detallada y extensa de este experimento mental en la gran obra de Maxwell *Theory of Heat*, que fue traducida al alemán en 1877.

Maxwell no quería desprestigiar con esto la teoría cinética, de la cual era defensor, ni quería sugerir, por supuesto, que existiese una criatura semejante a la del demonio del experimento que demostrase que la segunda ley es falsa. Pero, ¿se había demostrado realmente que la entropía de un sistema siempre crece? ¿Se podía deducir sin problema de los planteamientos mecánicos la segunda ley de la termodinámica? Maxwell se mostró siempre cauto con respecto a lo planteado por Boltzmann en su artículo de 1872. El problema de fondo es que según las leyes de la mecánica de Newton lo que hace el demonio de Maxwell podría ocurrir, también, por casualidad, sin intervención de demonio alguno. Tal y como confesó Maxwell a su amigo Tait, el propósito del experimento mental del demonio era «mostrar que la segunda ley posee solo una certeza estadística»<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> D. LINDLEY, *op. cit.*, p. 77.

Josef Loschmidt (1821-1895), amigo y mentor de Boltzmann, tampoco era un enemigo de la teoría cinética. De hecho, desempeñó un papel fundamental en la aceptación de la teoría atómica, entre otras cosas, calculando por primera vez el número de Avogadro (antes que Avogadro) y prediciendo la forma circular del benceno (antes que Kekulé). Loschmidt publicó una serie de cuatro artículos entre 1876 y 1877 en los que, entre otras cosas, ponía de manifiesto una dificultad semejante a la señalada por Maxwell. Su preocupación no era desmontar a Boltzmann o la teoría cinética (era partidario y defensor de ambos), sino abordar algunas consecuencias indeseables de la segunda ley. El problema era lo que Helmholtz y Rankine habían llamado la «muerte térmica del universo». La idea, propuesta en 1851 por lord Kelvin es sencilla: si como dice el segundo principio, el calor siempre pasa de los objetos más calientes a los más fríos, con el tiempo suficiente llegará un momento en el que el universo entero se encuentre a la misma temperatura. Cuando el universo llegue a esa situación de equilibrio, sin intercambio de energía, nada evolucionará y el universo será semejante a una gran sopa estática y yerma. Y esto por toda la eternidad. Tanto desde un punto de vista filosófico como emocional esta idea repugnaba a Loschmidt, y uno de sus propósitos expresos era, según sus propias palabras, «destruir el terrorífico nimbo de la segunda ley, el cual ha aparecido como un principio de destrucción para todas las criaturas vivientes del universo; y al mismo tiempo, abrir la perspectiva reconfortante de que la raza humana no depende del carbón o del sol para transformar el calor en trabajo, sino que puede tener un suministro inagotable de calor transformable»<sup>14</sup>.

Conocido como «paradoja de la reversibilidad», el argumento de Loschmidt venía a decir que no se pueden deducir consecuencias irreversibles, como el segundo principio de la termodinámica, de leyes perfectamente reversibles, como las de la mecánica newtoniana. Loschmidt pensaba que la irreversibilidad del segundo principio debía explicarse por las condiciones iniciales, pero que no podía justificarse apelando a las leyes de la mecánica. Es decir, la afirmación de que la entropía crece siempre no se puede extraer solo del análisis mecánico, sino que hace falta la mecánica y algo más<sup>15</sup>. De nuevo, esto tenía consecuencias para la manera en la que Boltzmann había entendido sus descubrimientos de 1872. Si Loschmidt tenía razón, no era cierto que dado un sistema termodinámico cualquiera la entropía *siempre* creciese en él. Nada impedía que ocurriese justo lo contrario, salvo quizá ciertas condiciones

---

<sup>14</sup> C. CERCIGNANI, *op. cit.*, p. 98.

<sup>15</sup> Loschmidt tenía razón en que Boltzmann estaba suponiendo algo más que las leyes de la mecánica. Como explica Arroyo, ese «algo más» era la *hipótesis del caos molecular*: «al asumir que las moléculas interactuaban sin que sus velocidades estuviesen correlacionadas, Boltzmann estaba incluyendo una condición temporalmente asimétrica, es decir, que distinguía entre pasado y futuro. Este supuesto era el responsable de que su resultado también fuera temporalmente asimétrico. Hasta la fecha, ningún científico ha logrado rebatir el argumento de Loschmidt sin incluir alguna premisa con un problema similar». E. ARROYO, *op. cit.*, p. 76.

iniciales, pero no hay nada en las leyes que rigen el proceso que impida una disminución espontánea de la entropía.

#### 7. LOS TRABAJOS DE 1876 Y 1878: LA NATURALEZA ESTADÍSTICA DEL SEGUNDO PRINCIPIO

La respuesta de Boltzmann a Loschmidt se encuentra en una serie de trabajos, publicados entre 1876 y 1878. En ellos Boltzmann da muestra de captar perfectamente la esencia del argumento de su amigo (es muy probable que antes lo hubiesen discutido ya alguna vez) y le dedica palabras muy duras, llegando a denominarlo «sofisma interesante» y «falacia» (al parecer la relación entre ambos quedó dañada durante años a causa de estas formas tan rudas de Boltzmann). Lo cierto es que la crítica de Loschmidt obligó a Boltzmann a replantear algunos aspectos de su propuesta de 1872, llegando gracias a ello a una formulación del segundo principio en términos mecánicos con un método diferente (el de la mecánica estadística) y al reconocimiento explícito de la naturaleza estadística del segundo principio de la termodinámica.

En el primero de esos artículos de 1877, titulado «Sobre la relación entre un teorema mecánico general y la segunda ley de la termodinámica», Boltzmann responde a Loschmidt que para dar una prueba mecánica de la segunda ley no es necesario asumir ninguna condición inicial especial, «siempre que estemos dispuestos a aceptar una perspectiva estadística»<sup>16</sup>. Supongamos que, en un contenedor cerrado, cuyos muros son completamente rígidos y totalmente elásticos, hay cierto número no infinito de partículas esféricas totalmente elásticas. En un tiempo cero la distribución de esas partículas en el espacio es no uniforme: las partículas, por ejemplo, están amontonadas en la parte superior izquierda del contenedor y las que están más arriba se mueven más rápido que las que están más abajo. El sofisma de Loschmidt consiste en afirmar que, sin referencia a las condiciones iniciales, no podemos probar que las partículas asumirán un estado prácticamente uniforme después de cierto tiempo. Boltzmann está de acuerdo en que no se puede probar, sean cuales sean las condiciones iniciales, que tras cierto tiempo las moléculas deben necesariamente mezclarse de modo uniforme, pero la probabilidad muestra que lo van a hacer casi con total seguridad. ¿Por qué? Es decir, ¿cómo explica Boltzmann que lo más probable sea que el gas adopte un estado de equilibrio en vez de uno alejado de él? La respuesta parte de la distinción entre lo que hoy se conoce como *estados macroscópicos* (que son los que vienen dados por las propiedades del gas a gran escala) y los *estados microscópicos* (que son los que vienen dados por la posición y la velocidad de las partículas individuales). Distintas

<sup>16</sup> L. BOLTZMANN, "On the Relation of a General Mechanical Theorem to the Second Law of Thermodynamics (1877)", en S. G. BRUSH, *The Kinetic Theory of Gases. An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary*, London, Imperial College Press, 2003, p. 362.

configuraciones microscópicas del gas pueden dar lugar al mismo estado macroscópico. Pues bien, hay un número mucho mayor de microestados que se corresponden con macroestados no uniformes de aquellos que se corresponden con macroestados uniformes. O, dicho de otra manera: hay muchas más maneras microscópicas de conseguir un macroestado desordenado que las que hay de conseguir uno ordenado. Esto hace que sea mucho más probable que un gas termine adoptando un estado desordenado y, por lo tanto, con alta entropía. Y dice Boltzmann: «Uno puede, incluso, calcular a partir de las diferentes distribuciones de los estados sus probabilidades, lo que podría conducir a un método interesante para el cálculo del equilibrio térmico»<sup>17</sup>. Esto es justo lo que hará en el siguiente artículo, desarrollar ese «método interesante». Pero sigamos aún en este. La conclusión de Boltzmann, entonces, es que un gas puede adoptar espontáneamente una disposición más ordenada o menos uniforme, pero que tal cosa ocurra es algo tan improbable que puede ser considerado en la práctica imposible. Y pone un ejemplo ilustrativo: si en un contenedor tenemos mezclados oxígeno y nitrógeno consideramos imposible que pasado un mes vayamos a encontrar oxígeno químicamente puro en la parte inferior y nitrógeno en la mitad superior, «aunque de acuerdo con la teoría de la probabilidad esto es meramente improbable pero no imposible»<sup>18</sup>. Gracias a la paradoja planteada por Loschmidt hemos llegado a ver «cómo están de íntimamente relacionados la segunda ley y la teoría de la probabilidad, mientras que la primera ley es independiente de ella»<sup>19</sup>. De hecho, estamos, por decirlo con las palabras del propio Boltzmann, ante una «reducción de la segunda ley al reino de la probabilidad»<sup>20</sup>.

Boltzmann concluía su artículo extrayendo una consecuencia del planteamiento de Loschmidt: lo más probable es que el futuro lejano del mundo sea tal que en él hayan desaparecido todas las diferencias de temperatura; pero de la misma manera, es igualmente probable que en el pasado lejano las diferencias de temperatura tampoco hayan existido. Es decir, el cambio del estado térmico, en el caso que indica Boltzmann del mundo entero, tiende a un estado de equilibrio térmico, y esto es igual si miramos «hacia delante» que si miramos «hacia atrás». El estado más probable en el pasado es también el estado más probable en el futuro. La segunda ley se aplica tanto al pasado como al futuro.

Aunque Boltzmann había tratado con cierto aire de superioridad y un tanto despectivamente a Loschmidt en su primera respuesta, resulta muy evidente que las críticas de su mentor le obligaron a aclarar algunas de sus

---

<sup>17</sup> *Ibid.*, p. 366.

<sup>18</sup> *Ibid.*, p. 367.

<sup>19</sup> *Id.*

<sup>20</sup> *Id.*

ideas y le permitieron alcanzar algunos de sus logros más notables<sup>21</sup>. Unos meses después publicaba una extensa memoria, el segundo de los artículos en respuesta a Loschmidt, también de 1877, titulada «Sobre la relación entre la segunda ley de la teoría mecánica del calor y el cálculo de probabilidades con respecto a los teoremas sobre el equilibrio térmico», que es otra de las grandes contribuciones de Boltzmann a la física. Además de ser un verdadero tratado de probabilidad (algunos han visto en ella el nacimiento de la física estadística), «es de hecho el primer artículo en el que declara explícitamente que la entropía es una medida de la probabilidad de un estado y que la Segunda Ley se reduce a la afirmación de que la evolución natural ocurre de estados improbables a más probables»<sup>22</sup>.

La estrategia argumentativa de este trabajo era preguntarse por la probabilidad de que un gas se encontrase en un determinado estado<sup>23</sup>. Para ello era necesario conocer todos los estados posibles de un gas, todas las configuraciones que el gas podía adoptar. A la hora de hacer el inventario de estados que permitiese calcular la probabilidad, Boltzmann volvió a echar mano de un recurso que ya había utilizado en 1872, la discretización de la energía (o «fuerza viva», como la llamaba aún). A partir de aquí, calculaba las combinaciones que un gas podía adoptar suponiendo que la energía total se mantenía constante y que, por lo tanto, la energía debía repartirse entre las moléculas de diferentes formas. Una vez conocidas las posibles configuraciones para una energía dada había que averiguar qué configuraciones darían lugar a las mismas propiedades macroscópicas. Llamó a cada estado microscópico (y por lo tanto inobservable) posible «complexión», que es lo que hoy se conoce como «microestado». Los «macroestados» son, por el contrario, observables macroscópicamente. Un macroestado puede lograrse con diferentes microestados, porque lo relevante de un macroestado es saber cuántas moléculas del mismo se encuentran en un determinado estado energético. Boltzmann llamó «permutabilidad» a la cantidad de complexiones o microestados que tendría cada estado (las permutaciones son combinaciones de elementos que dan lugar a la misma configuración). A partir de ahí, podía calcular la probabilidad de cada estado dividiendo el número de complexiones compatibles con ese estado entre el número de complexiones totales del sistema. Boltzmann observó que la permutabilidad era notablemente mayor en distribuciones intermedias, es

<sup>21</sup> Para Lindley no cabe duda de que, aunque Boltzmann había empleado las técnicas de la mecánica estadística para establecer el famoso *Teorema H*, no fue consciente en ese momento de cuán profundas eran las consecuencias de ese hecho para la física. Corresponde a Maxwell el mérito de ser el primero en entender que la segunda ley de la termodinámica es inherentemente una cuestión de probabilidad; cf. D. LINDLEY, *op. cit.*, p. 88.

<sup>22</sup> C. CERCIGNANI, *op. cit.*, p. 121.

<sup>23</sup> Para el contenido de este trabajo de Boltzmann sigo fundamentalmente a E. ARROYO, *op. cit.*, pp. 81-94. Allí se puede encontrar una explicación bastante clara de lo que aquí presento como un resumen.

decir, aquellas en las que la energía estaba distribuida de forma más o menos homogénea entre las partículas (y no que unas pocas tuviesen toda la energía y una gran cantidad de ellas prácticamente ninguna). Las distribuciones más probables de la energía adoptaban, de hecho, una forma muy similar a la de la distribución Maxwell-Boltzmann. Luego definía el concepto de «grado de permutabilidad» como el logaritmo de la permutabilidad. Boltzmann comprobaba entonces que la expresión para el grado de permutabilidad era igual a la cantidad  $H$  de su famoso teorema de 1872, pero con un signo menos delante. Es decir:  $H$  era igual a la entropía, pero con un signo menos. El grado de permutabilidad se podía utilizar, entonces, como una medida de la entropía de un sistema.

Boltzmann definía la entropía como los dos tercios de la medida de la permutabilidad. En la actualidad el factor de dos tercios está incorporado en la llamada «constante de Boltzmann», aunque en realidad él nunca la utilizó. Por eso contemporáneamente decimos que «la entropía es directamente proporcional al logaritmo del número de microestados compatibles con el macroestado», lo que se expresa en la famosa fórmula  $S=k \log W$ , donde  $S$  representa la entropía,  $k$  la constante de Boltzmann (que vale  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K) y  $W$  el número de microestados (configuraciones microscópicas invisibles) compatibles con el macroestado (configuración macroscópica observable). A partir de esta ecuación se observa claramente que la entropía aumenta a medida que  $W$  lo hace también. Para un solo microestado posible la entropía es igual a cero. Einstein bautizó esta relación como «principio de Boltzmann», y la fórmula en su forma contemporánea es la que aparece en la tumba de Boltzmann en Viena.

Una de las ventajas de la definición que Boltzmann hacía de la entropía en este trabajo es que permite explicar su relación con la noción de «desorden». El concepto de desorden es un poco confuso y arbitrario, pero se suele considerar que un gas está ordenado cuando sus partículas presentan una distribución de energías o posiciones que se alejan de lo que cabría esperar que ocurriese aleatoriamente, lo que equivale a decir que un gas está tanto más ordenado cuanto sus partículas más se alejan de la distribución de Maxwell-Boltzmann. La cuestión es que existe un número mucho mayor de configuraciones desordenadas que de ordenadas, razón por la cual en la naturaleza los estados tienen a adoptar las primeras. Por eso decimos que el desorden en el universo tiende a aumentar. El ejemplo de la baraja es ilustrativo. Supongamos que tenemos una baraja de 5 cartas ordenadas del 1 al 5. Las combinaciones posibles, se puede calcular fácilmente, son 120. Pero de 120 solo una combinación corresponde al estado ordenado. En el caso de una baraja de 48 cartas el número total de combinaciones es de  $1,24 \times 10^{61}$ , es decir, un 1 seguido de 61 ceros. Si uno probase una configuración diferente cada segundo, barajando llegaría a obtener una baraja ordenada después de  $4 \times 10^{47}$  millones de años, lo que representa unas veces la edad del universo. Si ahora pensamos en que las moléculas que componen un gas son inmensamente más

numerosas que las 48 cartas de una baraja, podemos hacernos a la idea de lo improbable que es obtener espontáneamente un estado ordenado, es decir, la extrema improbabilidad de que la entropía disminuya espontáneamente en cualquier situación.

Según Lindley este segundo artículo de Boltzmann era profundo, trascendental y desconcertante<sup>24</sup>. Profundo, porque ofrecía una definición de entropía basada únicamente en un argumento simple sobre azar y probabilidad. Trascendental, porque tal definición permitía calcular la entropía de cualquier sistema donde hubiese cualquier medida del orden o del desorden. Y desconcertante, porque descansa en una asunción que parece difícil de establecer, y mucho menos probar. Esa asunción es la suposición de que el gas sigue una especie de «ley de igual oportunidad», es decir, la suposición de que cualquier estado es igualmente probable. La situación de un estado posterior a cualquier estado dado es, sin embargo, una cuestión de pura mecánica, no de aleatoriedad. Pero Boltzmann estaba ignorando este hecho (de lo contrario no habría podido aplicar la estadística) a favor de una situación en la que los estados atómicos podían visitar todos los estados posibles sin preferencia por alguno. Este supuesto será motivo de innumerables debates, algunos de los cuales siguen aun hoy, y tiene consecuencias para nuestro modo de comprender la segunda ley de la termodinámica.

De 1876 a 1890 Boltzmann publicó unos 30 trabajos ahondando en sus resultados y tratando también otras cuestiones. Cabe destacar entre los logros de estos años, la demostración en 1884 de la ley de la dependencia cuártica con la temperatura de la radiación del cuerpo negro, conocida también como *ley de Stefan-Boltzmann*. Lorentz dijo de este trabajo que era la «perla de la física teórica».

## 8. ETERNO RETORNO, RECURRENCIA, REVERSIBILIDAD Y LOS CEREBROS DE BOLTZMANN

En 1896 aparecía un texto de un joven ayudante de Max Planck, Ernst Zermelo (1871-1951), en el que se presentaba de nuevo, esta vez con una forma más matemática, la gran objeción al planteamiento de Boltzmann<sup>25</sup>. Zermelo se basaba en el *teorema de la recurrencia* que Poincaré había publicado en 1890,

<sup>24</sup> Cf. D. LINDLEY, *op. cit.*, p. 93.

<sup>25</sup> Los dos artículos de Zermelo (de 1896) y las dos respuestas de Boltzmann (una de 1896 y otra de 1897) que forman la controversia entre los dos autores pueden encontrarse en E. ZERMELO, *Collected Works / Gesammelte Werke*, vol. 2, Berlin, Springer, 2013, con muy buenas notas introductorias que explican el contexto y el trasfondo de la discusión, así como el papel que desempeñó Planck en ella. También en S. G. BRUSH, *The Kind of Motion we call Heat. A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19<sup>th</sup> Century*, 2 vols., Amsterdam, New York, Oxford, North-Holland Publishing Company, 1976. La ventaja de la edición de Zermelo es que es bilingüe: alemán-inglés.



según el cual ciertos sistemas vuelven, después de un cierto tiempo (denominado «tiempo de recurrencia»), a su estado inicial (o a uno muy parecido). El teorema de la recurrencia ofrece un fundamento matemático para la idea que Nietzsche, unos diez años antes, había llamado «eterno retorno». Nietzsche argumentaba así: si hay una cantidad limitada de materia (o energía) en el universo y si este es finito en el espacio, entonces por fuerza el número de combinaciones de la materia es finito. Si el tiempo, por el contrario, es infinito, las combinaciones están condenadas a repetirse un número infinito de veces. Zermelo hacía una sencilla aplicación del teorema de la recurrencia para concluir que cualquier combinación de átomos debía, tras cierto tiempo, volver a su configuración inicial, por lo que la entropía, con el paso del tiempo, no solo podía disminuir, sino que de hecho debía hacerlo. Dicho de otra manera: si el teorema de la recurrencia de Poincaré es cierto, los procesos irreversibles no pueden darse.

La respuesta de Boltzmann fue bastante virulenta, pues prácticamente al comienzo del artículo dice: «Aunque el ensayo de Zermelo [...] muestra que mis trabajos sobre estos temas aún no se entienden, no puedo dejar de deleitarme porque este ensayo constituye la primera prueba de que estos trabajos míos reciben alguna atención en Alemania»<sup>26</sup>. Boltzmann reconoce que el teorema de la recurrencia de Poincaré es correcto, pero se defiende diciendo que su aplicación a la teoría del calor no lo es. La recurrencia no invalida la teoría de Boltzmann; es más, la propia teoría predice que esa recurrencia tendrá lugar. Pero insiste: la probabilidad de que semejante cosa ocurra es tan baja que se puede considerar, de hecho, inexistente. Por eso en la práctica nunca se va a observar una disminución de la entropía. Boltzmann ofrecía en un apéndice el cálculo del tiempo de recurrencia para cierto volumen de un gas y obtenía un número elevadísimo, con trillones de dígitos. Y para hacerlo más comprensible cualitativamente decía: «Para tener una idea de cuán grande es el número [...] solo considere que tiene muchos quintillones de dígitos. Por otro lado, si suponemos que alrededor de cada estrella visible con el mejor telescopio orbitan tantos planetas como los que tiene el sol, y que hay tanta gente en cada uno de estos planetas como en la tierra, y que cada uno de ellos tiene una vida de un quintillón de años, entonces el número de segundos de todas sus vidas sumados están lejos de alcanzar los 50 dígitos»<sup>27</sup>. O sea, un número muy pero que muy grande. En conclusión, el punto de vista mecánico defendido por Boltzmann es correcto. Solo habría que prescindir de él si condujese a algún resultado que estuviese en contradicción con la experiencia. Pero tal cosa no ocurre. Según Arroyo, se ve aquí la diferencia de estilo en el pensamiento de un físico y un matemático: el matemático busca la validez de un teorema

<sup>26</sup> L. BOLTZMANN, "Rejoinder to the heat-theoretic considerations of Mr. E. Zermelo (1896)", en E. ZERMELO, *op. cit.*, p. 231.

<sup>27</sup> *Ibid.* p. 245.

siempre (no solo un cierto número de veces, aunque sea elevado), mientras que el físico busca explicar lo más adecuadamente posible lo observado<sup>28</sup>.

Naturalmente la cosa no quedó ahí: Zermelo volvió al ataque y Boltzmann se defendió de nuevo. Lo que nos interesa rescatar de la segunda respuesta de Boltzmann a Zermelo, de 1897, es que en ella reconoce explícitamente, por primera vez, la existencia de un supuesto hasta ahora oculto en su deducción mecánica de la segunda ley. Esto prueba que las críticas recibidas no eran tan inocuas como pretendía el propio Boltzmann, y que iban poniendo de manifiesto, de hecho, cuáles eran los fundamentos de su propuesta. El escrito comenzaba así: «La segunda ley recibe una explicación mecánica en virtud de la suposición, que, por supuesto no es demostrable, de que el universo, o al menos una parte muy extensa del entorno que nos rodea, considerado como un sistema mecánico, comenzó en un estado altamente improbable, y que aún se encuentra en un estado de alta improbabilidad»<sup>29</sup>. Es decir, el razonamiento de Boltzmann funciona siempre que se asuma que el universo estaba en un estado muy improbable al comienzo y que, de hecho, sigue estando en un estado muy improbable. El problema es que esto es tanto como desplazar la dificultad: si antes la cuestión era explicar por qué la entropía siempre aumenta, ahora la pregunta es por qué el estado del universo era y es tan improbable.

Consciente de esta dificultad, y reconociendo que no era amigo de llevar las especulaciones teóricas demasiado lejos de la experiencia, Boltzmann intentaba buscar una manera de responder. Podemos suponer que el universo en su conjunto se encuentra en un estado de equilibrio, de muerte térmica (que es el estado más probable), y que en algunas regiones del mismo surgen de vez en cuando desviaciones locales del equilibrio, provocando durante espacios de tiempo relativamente cortos que esas regiones adopten estados improbables. Esto tiene consecuencias en la concepción del tiempo, si pretendemos identificar este con el aumento de la entropía: el universo como un todo sería un lugar en el que no hay manera posible de diferenciar una dirección del tiempo, un «adelante» o un «atrás». Solo en las regiones donde la entropía ha disminuido de repente, que son las regiones en las que pueden existir seres vivos, la dirección del tiempo estará determinada por el crecimiento de la entropía, es decir, por el paso de los estados menos probables a los más probables. Esta forma de plantear las cosas explicaría por qué las leyes de la física, aplicables al universo entero, no contienen nada semejante a una dirección temporal. Y al mismo tiempo explicaría por qué en algunas regiones parece (a los seres que viven en ellas) que hay procesos irreversibles: en dichas regiones se da un aumento de la entropía. ¿Hay aquí un reconocimiento de la

<sup>28</sup> E. ARROYO, *op. cit.*, p. 112.

<sup>29</sup> L. BOLTZMANN, "On Mr. Zermelo's paper 'On the Mechanical explanation of irreversible processes' (1897)", en E. ZERMELO, *op. cit.*, p. 259.

diferencia entre el tiempo real y el tiempo subjetivo? ¿O es un reconocimiento de que el tiempo es relativo a las regiones del universo en las que las fluctuaciones estadísticas han generado una menor entropía?

No es extraño que las ideas de Boltzmann hayan resultado estimulantes, en un momento además en el que la cosmología tal y como hoy la conocemos se encontraba en pañales. Su propuesta no solo tiene repercusiones a la hora de analizar el problema de la flecha del tiempo, sino que ha dado lugar a la denominada «paradoja de los cerebros de Boltzmann». Boltzmann intenta acudir a la estadística para explicar su *Teorema H*, pero es la estadística la que se vuelve en contra de su «solución cosmológica». Si las regiones del universo con menor entropía son el resultado de fluctuaciones estadísticas, la pregunta es ¿por qué entonces ha surgido un universo tan complejo y ordenado como el que observamos? Es mucho más probable que haya surgido solo nuestra galaxia que no el universo en su conjunto. De hecho, es mucho más probable que en vez de la galaxia haya surgido, mediante una de esas fluctuaciones, solo el sistema solar. Más aún, si nos ponemos rigurosos lo más probable es que mediante las fluctuaciones estadísticas surja solamente la Tierra, o más probable aún, un solo ser vivo. O incluso aún más probable, lo que Arthur Eddington llamo en la década de 1930 un «cerebro de Boltzmann», es decir, el menor ser consciente que surge por una fluctuación térmica en un universo muerto. Como dice Arroyo, «según el modelo propuesto por Boltzmann, lo más probable es que uno no sea más que un cerebro surgido por una fluctuación estadística dentro de un universo en muerte térmica y que todos sus recuerdos y percepciones sean falsos. Lo contrario es casi imposible»<sup>30</sup>. Pero por supuesto, antes de asumir esta consecuencia tan contraria a la intuición y el más elemental sentido común, uno puede preguntarse si no será el planteamiento de Boltzmann el equivocado. La cuestión entonces continúa: si lo más probable es que haya surgido un cerebro de Boltzmann, ¿por qué entonces ha surgido un universo tan complejo y ordenado como el que observamos?, ¿por qué hay un universo tan poco probable desde el punto de vista termodinámico?

## 9. CONCLUSIONES

El recorrido, necesariamente breve e incompleto, por las ideas científicas de Boltzmann muestra cómo la pregunta aparentemente inocente sobre el calor tiene, finalmente, repercusiones cosmológicas. Como hemos visto, Boltzmann es capaz de elaborar una interpretación mecánica del calor que hace comprensibles no solo el primer principio de la termodinámica (el calor y el trabajo no son sino dos formas de movimiento, uno macroscópico y otro microscópico), sino también, lo que es más complicado, el segundo principio y,

---

<sup>30</sup> E. ARROYO, *op. cit.*, p. 139.

de manera más concreta, proporciona una traducción física y mecánica del antes confuso concepto de entropía. La interpretación estadística de su *Teorema H*, alcanzada en parte gracias a las críticas recibidas (se echa de menos que Boltzmann no haya reconocido este extremo; antes bien, sus respuestas eran altivas y un tanto petulantes) han dado a Boltzmann un puesto en el selecto grupo de los fundadores de la física estadística, junto a Maxwell, Gibbs y Einstein. Sus planteamientos fueron decisivos para que, en un momento en el que la teoría atómica de la materia era fuertemente cuestionada, esta permaneciese sin embargo en pie, hasta que (utilizando entre otras cosas algunos recursos aprendidos en Boltzmann) Einstein le dio definitiva carta de naturaleza en el mundo de la física en 1905. Sus ideas, como hemos visto, fueron utilizadas también por Planck para analizar el problema de la radiación del cuerpo negro, lo que daría lugar a la revolución cuántica. Y, por último, algunas de sus aplicaciones de los principios termodinámicos al universo en su conjunto fueron fuente de inspiración para muchos jóvenes físicos y, aún hoy, se siguen discutiendo. Hemos de tener en cuenta que la propia cosmología como disciplina científica estaba en ese momento fuertemente cuestionada. Las aportaciones de Boltzmann muestran que la física del siglo XIX no era un desarrollo anodino del paradigma newtoniano, sino que estuvo jalonado por algunos científicos innovadores que, de hecho, asentaron las bases de los cambios posteriores (con la física cuántica y la relativista). No es extraño que en un ambiente socialmente decadente pero culturalmente efervescente como era el del Imperio Austrohúngaro de finales del XIX, algunos jóvenes, como Wittgenstein o Schrödinger estuviesen interesados en estudiar con Boltzmann. Lamentablemente no llegaron a tiempo (Boltzmann se suicidó antes de que pudiesen realizar sus planes de estudiar con él). Pero las ideas de Boltzmann no dejarían, por eso, de ejercer su influjo. El propio Schrödinger reconoce: «Para mí la amplitud de sus ideas desempeñó el papel de un joven amor científico, y desde entonces ningún otro me ha mantenido tan fascinado»<sup>31</sup>.

Moisés Pérez Marcos  
Facultad de Teología San Vicente Ferrer  
C/ La Sénia, 10  
46001 Valencia  
mosesper@hotmail.com

<sup>31</sup> Citado por W. MOORE, *Erwin Schrödinger: una vida*, Londres, Cambridge University Press, 1994, p. 39.

