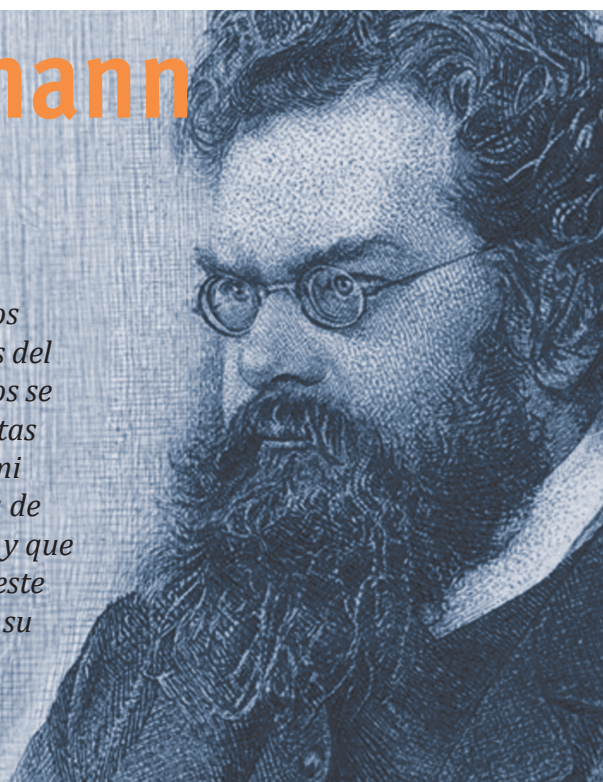


Mi clásico favorito

Ludwig E. Boltzmann por Joaquín Marro¹

Boltzmann fue ariete del movimiento que llevó a ver materia y radiación como conglomerados de elementos de cuya cooperación se seguían propiedades no obvias del conjunto. Conceptos y métodos nacidos en esos estudios se han trasladado luego a otros campos de la Ciencia. Estas dos circunstancias han determinado, sucesivamente, mi actividad académica, y he sentido así la trascendencia de su obra. Esto justifica mi elección de “clásico favorito” y que me acerque a él, si bien informal y subjetivamente en este escrito, para describir circunstancias y fragmentos de su obra sobre los que he tenido que pensar en el pasado



Una primera instantánea

Ludwig Edward Boltzmann, considerado uno de los físicos más sobresalientes en su siglo, nació el 20 de febrero de 1844 en Viena y murió cerca de Trieste a los 62 años, en su segundo intento de suicidio, quizás empujado por el rechazo de sus ideas por científicos que él respetaba. Se dice que era curioso, ambicioso e impaciente, y apasionado hasta el punto de quedar a veces afectado por las discusiones científicas, y que tenía un irreverente sentido del humor. El resultado neto era una personalidad atractiva que transpiraba humanidad, y un carácter profundamente inestable. Ironizaba sobre esto diciendo ser capaz de pasar rápidamente de la alegría al más negro pesimismo por haber nacido al término del baile de Carnaval justo antes de un Miércoles de Ceniza.

“Niño prodigio”, casi siempre el mejor de su clase además de buen pianista, heredó una pequeña fortuna de la familia materna que le permitió concentrarse en sus estudios a pesar de quedar huérfano de padre a los 15 años. Guiado por su madre, ingresó en 1863 en la Universidad de Viena donde, publicados dos trabajos, se doctoró en tres años.

¹ Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional, Universidad de Granada.

Interaccionó intensamente, incluso colaboró a veces con algunos de los científicos más notables de la época, incluyendo Josef Stefan, Robert W. von Bunsen, Gustav Kirchhoff, Leo Königsberger, Josef Loschmidt, Lord Rayleigh, Hendrik A. Lorentz, Wilhelm Ostwald y Hermann L. F. Helmholtz, a pesar de lo cual manifestó haber tenido siempre sensación de estar alejado de los centros de la ciencia moderna y de no haber disfrutado de suficientes contactos y discusiones que le parecían esenciales para el desarrollo de la ciencia. Vencer este sentimiento compitió con una lógica búsqueda de tranquilidad, personal, social y científica, lo que a menudo condicionó que aceptara ofertas profesionales. Conseguida la venia docente en 1868, fue profesor de Matemáticas, Física Teórica, Física Experimental, e Historia y Filosofía de la Ciencia en las Universidades de Graz, Viena (donde fue nombrado catedrático)¹, Heidelberg, Berlín, Múnich y Leipzig, e hizo

¹ La cátedra era de Matemáticas, así que tuvieron que argumentar que, aunque sus estudios se habían originado en Física, eran también “excelentes como trabajos matemáticos, que contienen soluciones de problemas muy difíciles de mecánica analítica y especialmente de cálculo de probabilidades”.

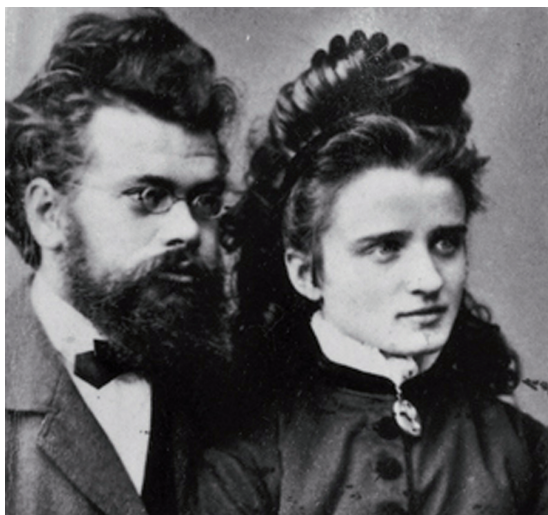
bastantes aunque cortas visitas a varios centros en los Estados Unidos, entonces “colonias revoltosas” según la reina Victoria de Inglaterra.

Algunas de las ideas principales en sus investigaciones, siempre fruto de una enorme intuición, fueron enérgicamente rechazadas por científicos influyentes en la época, como Ernst Mach y Ostwald, pero se hicieron populares, particularmente entre jóvenes talentos como Paul Ehrenfest, Lise Meitner, Svante Arrhenius, Walter Nernst, Felix Klein y Arnold Sommerfeld. A esto contribuyó la reputación de sus clases de filosofía, que tuvieron mucho público y llamaron la atención del emperador Francisco José, a quien se vio obligado a dar lecciones teóricas y prácticas de física. Recibió honores sociales en vida, incluso una oferta de título nobiliario que rechazó justificándose en que “nuestro nombre de clase media ha sido suficientemente bueno para mis antepasados y también lo será para mis hijos y nietos”.

Conoció a Henriette von Aigentler, diez años más joven, con larga cabellera rubia y ojos azules, a la que ayudó en una complicada operación para entrar en la Universidad —entonces vetada a las mujeres— y hasta que consiguió terminar estudios de Matemáticas. El 27 de septiembre de 1875 le hizo una

detallada oferta de matrimonio por escrito. Se casaron en 1876 y tuvieron cinco hijos, y pasaron 14 años felices en Graz, donde Boltzmann desarrolló el grueso de su concepción de la naturaleza. Allí le nombraron decano en 1878, miembro del consejo de gobierno en 1881 y rector en 1887, y fue recibiendo un sinnúmero de reconocimientos académicos, tanto en su país como en el extranjero.

Procuraba pasar la mayor parte de su tiempo en una granja de su propiedad, pues le encantaba la naturaleza, que disfrutaba mediante largos paseos en los que solía hacer gala de buen humor. Tenía afición por las plantas —mantenía un herbario y una colección de mariposas— y aprovechaba los paseos para enseñar botánica a los niños. También practicaba la natación y el patinaje sobre hielo. Con objeto de motivar a sus hijos, y pareciéndole poco frecuente el ejercicio que con estas actividades hacían, instaló un gimnasio doméstico. No puede decirse, sin embargo, que le preocupara su salud, pues siempre la sacrificó a su actividad científica.



Se puede decir que Boltzmann era un hombre de su tiempo, pero también un hombre que se adelantó a su tiempo. Su concepción de la naturaleza, que se basaba en la idea de átomos y moléculas, fue una revolución científica que cambió la forma de ver el mundo. Su trabajo sentó las bases de la física estadística y la termodinámica moderna. Su legado es enorme y su influencia en la ciencia es incalculable.

Transición entre mundos

Siguiendo ideas de antiguos griegos y árabes, Leonardo da Vinci distinguía a principios del siglo xvi entre “microcosmos” y “macrocosmos”, y sacaba provecho científico de ello. Sin embargo, cerca del siglo xx, cuando coexistían la mecánica y la termodinámica y bastantes físicos ya pensaban en átomos, la mayoría todavía menospreciaba o, al menos, desconfiaba o desconocía el alcance de la “hipótesis atomística”. Y es que átomos y moléculas no eran visibles entonces ni se esperaba que pudieran serlo. Podríamos decir que la concepción de la materia como algo discontinuo, aunque es un hecho esencial que condicionaría el futuro de la Ciencia, no fue oficialmente admitida hasta 1926, cuando se otorgó el premio Nobel de Física a Jean Baptiste Perrin “por su trabajo acerca de la estructura discontinua de la materia” —si bien ya se habían reconocido poco antes, terminando la primera década del siglo, importantes evidencias indirectas, incluida la existencia de los cuantos de energía y de la carga del electrón.

En ese difícil contexto, Boltzmann dio un doble salto. Asumió sin dudar la existencia de los átomos pero también notó que era imposible en la práctica seguir y combinar las trayectorias mecánicas de los trillones de átomos que conformarían un cen-

tímetro de aire. Este camino *mecanicista* tampoco era adecuado para extraer información relevante, así que buscó y encontró una alternativa *estadística* que ha supuesto en la práctica la realización y generalización de aquellas viejas ideas. Adoptando un esquema general, fue capaz (si usamos el lenguaje de hoy en día) de escribir leyes para el comportamiento macroscópico observable —esto es, referidas a la conductividad eléctrica, a la susceptibilidad magnética o a la viscosidad— como innovadores promedios de adecuados parámetros físicos —masa, carga eléctrica, espín o potencial de interacción— que describían la conducta global de supuestos átomos individuales. Había formulado así una importante propiedad del universo. Y es que, en la concepción de Boltzmann —seguida por Willard Gibbs y Albert Einstein hasta fundar la *mecánica estadística*, hoy extendida en una *física estadística* que, incluyendo la descripción de fenómenos fuera del equilibrio, prolonga su utilidad a sistemas en biología, sociología y economía— los sistemas naturales mostrarían una interesante peculiaridad. Es como si en el universo hubiera una estructura jerárquica en capas, como las de una cebolla, de modo que los fenómenos en una capa pudieran tener relación causa/efecto con los fenómenos en otra capa. Se sigue hoy de esta concepción boltzmanniana que lo que observamos en los niveles más altos —desde cómo evolucionan las galaxias o nace un quásar, hasta cómo se forma un tornado o se hacen turbulentas las aguas de un río— ha de poder entenderse en términos de las leyes físicas fundamentales que determinan lo que está ocurriendo en ese momento en niveles inferiores —por ejemplo, los movimientos de los átomos y moléculas constituyentes consecuencia de las fuerzas o interacciones entre ellos y con el entorno [1].

Aparte de su carácter de anticipación y búsqueda de nuevos caminos, contrarcorriente y en ocasiones fuertemente contestado, un aspecto principal de la obra científica de Ludwig Boltzmann, incluso de sus aspectos más filosóficos, es que sus resultados básicos, así como han ido siendo descifrados —una tarea a veces difícil por falta de detalles² y por el denso alemán en el que fueron escritos— pueden establecerse como teoremas matemáticos. Y algunos de ellos ya han sido de-

2 Boltzmann, docente excelente y con brillante oratoria, generó escritos de ardua lectura, a veces con las hipótesis oscurecidas, quizá por no ser consciente de su profundidad y carácter innovador. Es ejemplo el modesto y poco explícito título “Más investigaciones sobre el equilibrio térmico de las moléculas de gas” de su artículo de 1872, en las actas de la Academia Imperial de Ciencias de Viena, en el que presenta su celebrada ecuación. De hecho, ha sido menos traducido que autores menos trascendentes, lo que retrasó la valoración adecuada de aspectos de su obra. Joel Lebowitz [2] ha resaltado, sin embargo, la claridad de sus publicaciones más tardías, cuya lectura recomienda con entusiasmo, como *Ann. Phys. Leipzig* 57, 773 (1896) traducida al inglés en [3].



mostrados mientras que otros permanecen como conjeturas probablemente ciertas. Es el caso de la relación entre mecánica y termodinámica que quedó demostrada en ciertas condiciones y sólo adecuadamente formulada en otras.

James Clerk Maxwell, mejor conocido por sus estudios sobre la luz y los campos eléctrico y magnético, había encontrado la distribución de probabilidades para las velocidades de las moléculas en un gas en equilibrio. Partiendo de esa distribución, un sencillo argumento, que puede explicarse en educación secundaria, permite demostrar que la presión P que mide un manómetro acoplado a un tanque de gas es consecuencia precisa del intercambio constante de ímpetu al chocar las moléculas con la pared interior del recipiente. El argumento conduce con facilidad a la *ecuación de estado* del gas, esto es, la relación $P = \rho k T$ entre la presión medida P , la temperatura T del gas y su densidad de moléculas ρ , donde k es una constante universal que lleva el nombre de Boltzmann. Es un primer ejemplo de esa conexión general, sospechada por los antiguos, entre el mundo microscópico de muchas partículas en movimiento y una relación que puede observarse en el laboratorio *si el gas está en equilibrio*. Es cierto que el mundo macroscópico en equilibrio termodinámico es más una importante referencia teórica que una realidad en nuestro entorno, pero Boltzmann fue capaz de adentrarse en un mundo más real. Llegó a escribir una ecuación empírica relativamente complicada para la evolución dinámica de la distribución de Maxwell que describe cambios con el tiempo en un gas no necesariamente en equilibrio³. Es la primera ecuación conocida para la evolución temporal de una probabilidad, algo provocador en la

época, sólo aplaudido por las mentes más jóvenes, y su importancia va más allá de su interés práctico, que es mucho, hasta el punto de que sigue siendo objeto de estudio matemático en nuestros días.

Siguiendo su búsqueda por comprender el macrocosmos en términos de promedios referidos a los elementos del sistema en cuestión, Boltzmann publicó en 1877 “Fundamentos probabilísticos de la teoría del calor”. Extendiendo argumentos de 1872, interpreta la entropía como una medida matemática precisa del “desorden” de los átomos y llega a una relación fundamental que Einstein llamaría luego “principio de Boltzmann”. Esto es, $S = k \log W$, donde k es la misma constante de antes, S es la *entropía*, característica del mundo macroscópico, y W es una medida de la riqueza del mundo microscópico: el número de *microestados* que pueden realizar el *macroestado* determinado por S . Ha resultado tan trascendente que se usó como epitafio en su tumba en Zentralfriedhof, el cementerio central de Viena.

De hecho, la entropía ya era una magnitud muy importante en aquel momento, pues el Segundo Principio de la Termodinámica, refiriéndose a ella, determinaba que algunos procesos no podían ocurrir. Pero tanto esa magnitud física como este principio, que en la nueva imagen no eran sino efectos de los movimientos desordenados de los átomos, habían sido hasta entonces algo misterioso por inexplicable en un contexto en el que no se hacía mención a la estructura atómica de la materia. Boltzmann acababa de mostrar que la entropía mide el nivel de la probabilidad del estado macroscópico y que esta medida se expresa con sencillez en el mundo microscópico de las moléculas. Se había obtenido una herramienta sencilla y utilísima que, al conectar descripciones distintas de un mismo objeto, permitía llegar a concluir acerca de propiedades específicas de éste así como de ciertas condiciones generales del contexto al que pertenece, incluida la naturaleza asimétrica con el tiempo que muestran los fenómenos que observamos en nuestro entorno.

Boltzmann había asociado así una entropía con cada macroestado pero también, en definitiva, con cada microestado que lo realiza. La relación de esta entropía con otras no es, pues, obvia, pero

Evolución del continente de un genio: en 1868 (con 24 años), 1875, 1902 y fecha posterior sin determinar.

³ En [4] y referencias allí citadas se presenta una deducción analítica de *ecuaciones cinéticas* (esto es, descripciones macroscópicas, irreversibles) a partir de la *ecuación de Liouville* (que es descripción microscópica, reversible). Esto se hace para densidades bajas —generalizando la situación límite tratada por Boltzmann, en la que sólo pueden interactuar (chocar) simultáneamente dos partículas— y pone de manifiesto una propiedad, llamada *caos molecular*, de la que Boltzmann resaltó que tendría que satisfacer las interacciones.



es sencilla. Resulta coincidir (salvo términos despreciables para sistemas grandes) con la de Rudolf Clausius si el sistema está en equilibrio, y entonces con la de Gibbs para una *colectividad* (que no es sino una herramienta matemática adecuada en mecánica estadística). Sin embargo, mientras que la de Gibbs no cambia con el tiempo si describe sistemas aislados, aunque no estén en equilibrio, la de Boltzmann crece, explicando de este modo la evolución al equilibrio de estos sistemas. La de Boltzmann hace una distinción de escalas que es característica de los sistemas con muchos grados de libertad, y es capaz por tanto de reflejar una propiedad que, como vemos a continuación, es esencial para comprender la irreversibilidad de la naturaleza⁴.

El mismo Boltzmann intuyó que las aplicaciones de su expresión matemática —y, por tanto, de la potente disciplina que originó— trascendían la física. Por ejemplo, insinuó una relación entre “procesos mentales” y “procesos materiales” que podría decirse que hoy inspira relevantes desarrollos en neurociencia. También es notable que, contrariamente a lo que suele creerse, Boltzmann no se limitó a considerar gases ideales sino que incluyó moléculas con interacciones mutuas en su procedimiento, de modo que se anticipó en esto a Gibbs en su método de las colectividades.

Roger Penrose y otros han resaltado que Boltzmann ha sido un eslabón necesario entre Maxwell y Einstein participando como “involuntaria comandrona” en el nacimiento de la física cuántica a principios del siglo xx⁵. Esto es así porque influyó en el estudio de Max Planck sobre la radiación del cuerpo negro y llevó a Einstein a aplicar la idea de la “hipótesis atomística” a la luz, aparte de inspirar su estudio del movimiento browniano y cuestiones relacionadas. También presentó en 1884 una brillante deducción teórica de la ley de Stefan para la radiación de calor del cuerpo negro, mostrando que la energía radiada es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. La trascen-

4 Se recomienda que el lector complete en [2] estos argumentos que, todavía hoy, son la única base rigurosa en la descripción de sistemas fuera del equilibrio.

5 El legado de Boltzmann a la revolución cuántica y a la comprensión del fenómeno de la irreversibilidad ha sido discutido por Penrose [5]. También son notables a este respecto la biografía [6], que incluye un ensayo sobre la contribución de Boltzmann a la teoría cinética y a los fenómenos del transporte irreversible en gases, y la biografía menos técnica en [7].

dencia de Boltzmann es hoy reconocida con el uso habitual en física, química, biología, informática e ingeniería de un número inusual de conceptos y herramientas que llevan su nombre, como “constante de Boltzmann”, “teorema H de Boltzmann”, “principio de Boltzmann”, “cuenta correcta de Boltzmann”, “ecuación de Poisson-Boltzmann”, “distribución de Maxwell-Boltzmann”, “ley de Stefan-Boltzmann”, “ecuación integro-diferencial de Boltzmann”, “cerebro de Boltzmann”, “factor de Boltzmann”, “máquina de Boltzmann”, “teorema de equipartición de Boltzmann”, “método reticular de Boltzmann” y “límite de Boltzmann-Grad”.

La flecha del tiempo

La ecuación (integro-diferencial) de Boltzmann para la evolución temporal de la probabilidad de que las moléculas de un gas adopten distintas velocidades tiene la particularidad, que la hace especialmente relevante, de ser asimétrica en el tiempo. No nos extraña en principio, pues sabemos que todo proceso natural siempre ocurre en una determinada dirección temporal. No podemos retroceder en el tiempo; sabemos cocer una verdura pero no descocerla. ¿Cómo conciliar esto con el hecho, fácilmente demostrable, de que las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento de cada molécula —las ecuaciones de Newton, Hamilton, Liouville, Schrödinger...— son reversibles? Un espeso gas rojo soltado en una esquina de la habitación acaba disperso por toda ella, quizá dejando el ambiente ligeramente rosado, pero nunca vuelve a concentrarse en esa esquina, ni en ninguna otra. Sin embargo, no violaría ninguna ley fundamental si lo hiciera.

Boltzmann notó que no hay paradoja alguna en esto, sino un asunto de escalas que, tanto intuitiva como analíticamente, aclara su ecuación. Según ésta, una enorme colección de trillones de moléculas están constantemente sufriendo muchísimas interacciones, billones por segundo, en distancias extremadamente cortas, del orden de una millonésima de milímetro o menos, de modo que la difusión del gas ocurre en la práctica según un número extraordinariamente grande de distintas secuencias con diferencias imperceptibles entre sí. El número de secuencias que produce la concentración inversa del gas es, sin embargo, relativamente pequeño y una mínima variación en cualquier momento en cualquier parte en una de estas secuencias conduciría de nuevo a difusión en lugar de concentración. En consecuencia, es imposible observar en la práctica uno de estos rarísimos procesos inversos. No están prohibidos por las leyes fundamentales, pero son extremadamente improbables. Es cualitativamente como cuando un joven empieza a practicar el aparcar un coche para obtener su permiso de conducir. Le resulta fácil salir del macroestado “bien aparcado” —que es compatible con muy pocas posiciones del coche (microestados) si el espacio es justo— pero muy

difícil o imposible llegar a él desde cualquier otro. Al salir se va hacia un gran número de estados posibles, mientras que aparcar requiere pasar de una situación cualquiera, muy probable, a otra muy ordenada, lo cual es muy improbable que ocurra si se sigue una secuencia de movimientos al azar o equivocada. Nótese que el Segundo Principio establece que hay fenómenos que nunca pueden ocurrir, mientras que la nueva ecuación habla de la extrema improbabilidad de que ocurran algunos eventos.

Boltzmann, que pensó mucho en las consecuencias de esta imagen, hizo la siguiente descripción en una reunión formal de la Academia Imperial de Ciencias el 29 de mayo de 1886. Se preguntó retóricamente por lo que intercambiamos con el entorno para mantenernos vivos y aclaró que —aparte de energía, que se traduce en trabajo o sudor— necesitamos entropía negativa. Esto es, hemos de deshacernos de entropía para mantener nuestro estado *ordenado*, de modo que “estar en forma” implica incrementar constantemente la entropía del universo y, por tanto, el desorden de éste a nivel atómico. Esa entropía negativa que consumimos viene de los alimentos, típicamente, animales o plantas, que a su vez obtienen de otros alimentos y, en último término, de las plantas que la toman del sol mediante fotosíntesis. Entonces, si la entropía crece continuamente en el universo, ¿cómo era en el pasado remoto? En términos actuales nos preguntaríamos ¿era la entropía tan pequeña en el *Big Bang* que originó el universo como para que ahora aceptemos compatibilidad con esta imagen de evolución irreversible? La respuesta es alentadora; aquella primigenia bolita de fuego tuvo que tener bajísima entropía y un altísimo grado de orden cuya probabilidad se estima alrededor de $1/10^{123}$ [5]. A pesar de las críticas que en su momento cosechó, hoy se acepta como correcta la intuición de Boltzmann de que el origen de la asimetría de las ecuaciones macroscópicas se remonta a un estado extraordinariamente especial en el pasado más remoto, y eso aunque las consideraciones cosmológicas eran impensables en la época de Boltzmann, de modo que éste no pudo concretar su argumento salvo con ideas especulativas. Es un campo realmente activo hoy en día, cuando ya empieza a comprenderse la estructura espacial y temporal del universo, que puede llevar a descubrirnos aspectos significantes de la naturaleza de nuestro origen y de los principios físicos, todavía desconocidos, que determinaron ese crucial momento.

Dramático desenlace

Imaginar la materia con muchísimos elementos muy pequeños, aunque sólo hubiera sido (que no era el caso) a modo de analogía o abstracción teórica conveniente, era considerado una completa aberración, casi una blasfemia, cuando Boltzmann terminaba su carrera como estudiante. Hubo que

esperar años a que Paul Langevin, Einstein y Perrin, estudiando el movimiento browniano de minúsculas partículas suspendidas en un fluido, demostraran la existencia inequívoca de átomos y moléculas, y Boltzmann no llegó a verlo. Se ha dicho que su falta de atención para explicar a veces sus hipótesis, por no ser consciente del carácter innovador de su pensamiento, quizá también explica que tuviese que luchar tanto por sus ideas. En cualquier caso, sus respuestas a las frecuentes críticas, aparte de que luego han resultado ser siempre esencialmente correctas, eran muy claras desde el punto de vista de la física del momento. En una conferencia en Viena en 1944 que celebraba el centenario del nacimiento de Boltzmann, Sommerfeld recordaba así una reunión en Lübeck en 1895 en la que Boltzmann, secundado por Klein, “luchó” contra Ostwald, Georg F. Helm y otros discípulos del anti-atomista Mach: “La batalla era como el duelo entre un toro [Boltzmann] y un torero flexible. Pero el toro derrotó al torero a pesar de su agilidad. Sus argumentos eran concluyentes. Los matemáticos jóvenes estábamos todos de su lado; fue inmediatamente obvio para nosotros que de una única ecuación de energía no podrían seguirse las ecuaciones de movimiento para [...] sistemas con un número arbitrario de grados de libertad”. Es notable que Ostwald —amigo personal aunque rival científico de Boltzmann— dice de éste en su libro *Grosse Manner* (Leipzig 1909) “a todos nosotros nos ha sobrepasado con su ciencia en perspicacia y claridad”. Y es que Boltzmann, a pesar de sus batallas, y quizá por eso, fue reconocido como un gran científico por sus contemporáneos, y buena parte de su trabajo se difundió rápidamente por todo el mundo científico. Por ejemplo, su teoría cinética de 1872 era ya usada en un libro de Henry W. Watson publicado en 1876 y se le reconocía como uno de los padres de la teoría cinética de los gases en una biografía de Maxwell escrita en 1882.

Comentarios significativos sobre la relación de Boltzmann con sus alumnos por algunos de éstos que le conocieron bien son: “Nunca mostraba superioridad. Cualquiera podía preguntarle,

Boltzmann, en una fotografía de la Universidad de Graz en 1887, con algunos colaboradores: Nerst, Streintz, Arrhenius y Hiecke están de pie, y Aullinger, von Ettingshausen, Klemencic y Hausmaninger están sentados (de izq. a dcha.).





incluso criticarle. La conversación era tranquila y el estudiante era tratado como un igual. Sólo más adelante uno se daba cuenta de lo mucho que había aprendido de él” [Friedrich Hasenöhr]. “Daba consejo en cualquier difícil situación. No se molestaba si un alumno le perturbaba en casa mientras estaba trabajando. El gran científico permanecía disponible para el alumno durante horas, siempre con buen humor” [Heinrich Streintz]. “Nos explicó en cuatro años mecánica clásica, hidrodinámica, teoría de elasticidad, electrodinámica y teoría cinética de los gases. Situaba las ecuaciones principales en una gran pizarra. A sus lados, tenía dos pequeñas donde escribía los pasos intermedios. Todo quedaba claro y bien organizado. Ponía tanto entusiasmo en lo que enseñaba que terminábamos cada clase con la impresión de haber sido introducidos a un mundo nuevo y maravilloso” [Meitner].

Su buena salud, sus buenas relaciones sociales y científicas y su entorno adecuado para el trabajo dieron un dramático giro, o eso es lo que él percibió, en 1888 al aparecerle un síndrome maniaco-depresivo. Se produjo una acumulación de problemas que probablemente se inicia con la muerte de su madre en 1885, a la que estaba íntimamente unido, y a su elección como rector de Graz, que le obligó a tomar difíciles medidas disciplinarias ante revueltas del alumnado en 1888. Titubeó ante importantes ofertas de trabajo en esos años, que originaron tensiones políticas y por ello él quizá lo interpretó como indicio de falta de confianza en sí mismo, y perdió a su primer hijo con 11 años en 1889 por una apendicitis. De hecho, tuvo crisis físicas y psicológicas en el verano de ese año y se vio forzado a una corta estancia en un hospital psiquiátrico en 1900.

Al volver a Viena, supuestamente en una mejora profesional sustancial, comentó (quizá una muestra de debilidad psicológica) que echaba en falta el ambiente de Graz y a los colegas de Múnich, su último destino. Debió de influir en esto la contratación en 1885 en Viena, precedido de gran fama, de Mach —su colega más violentamente hostil a la concep-

ción atomística de la naturaleza, a la que había dedicado toda su vida— como profesor de Historia y Filosofía de la Ciencia. Siendo objetado en 1896 su teorema H por Ernst Zermelo, Boltzmann escribió “el artículo de Zermelo muestra que mis escritos han sido malinterpretados, pero me agrada, pues es la primera indicación de que se leen en Alemania”. No imaginemos, sin embargo, un Boltzmann constantemente hundido, pues en 1887 contestó brillantemente a Zermelo y criticó el tratamiento que Max Planck acababa de hacer a la termodinámica de la radiación electromagnética, crítica que le sería agradecida por Planck que corrigió la teoría al año siguiente. Boltzmann marchó en 1890 a Leipzig, donde no consiguió mejorar sino que se encontró profesional y socialmente peor aún que en Viena, e intentó suicidarse —más tarde fue incapaz de explicar los motivos que le habían llevado a ello—. Luego se retiró Mach y Boltzmann volvió a Viena en 1902. Pero allí tenía muchas clases, sufría asma nocturno y frecuentes dolores de espalda, incluso síntomas de angina de pecho, mientras su visión había ido empeorando hasta el punto de necesitar ayuda para leer y escribir. A principio de 1903 su esposa escribía a una hija que seguía en Leipzig por estudios: “Papá está peor cada día. Ha perdido su fe en nuestro futuro”. En el lado positivo, hizo esos años, hasta su muerte, varios viajes a los Estados Unidos, incluyendo el último en el que dictó 30 lecciones en la Universidad de California en Berkeley y que describió satíricamente en “Reise eines deutschen Professors ins Eldorado” (traducida al inglés en *Physics Today* 45, 44, Enero 1992 y en [CER 1989]). Además, reemplazó a Mach desde 1903 en sus dos horas de clase semanal de filosofía con enorme éxito. De hecho, la expectación fue enorme —empezó llenando hasta los topes el aula más grande, que sus admiradores habían adornado con ramas de abeto para la ocasión— y recibió entusiastas ovaciones, posteriores felicitaciones particulares y oficiales, y una acorde trascendencia en los medios de comunicación. Cuando esa explosión inicial fue amortiguándose, parece ser que Boltzmann interpretó que otra vez había fallado en algo en lo que había puesto gran ilusión.

El caso es que, en un momento en el que el suicidio casi estaba de moda entre los intelectuales vieneses, se colgó mientras su esposa y su hija menor estaban tomando un baño. Era el 5 de septiembre de 1906, un día en el que se le había notado nervioso, al término de unas (cortas) vacaciones que tenía prometidas a su esposa hacía tiempo, en Duino, un romántico lugar sobre el Adriático famoso por inspirar a poetas como Rainer Maria Rilke y a compositores como Franz Liszt, y por acoger a veces al emperador con su esposa Sissi. La escena incrementa su dramatismo al notar que el cadáver fue encontrado por su hija menor Elsa, de quien había dicho que era el “sol de su vida”.

En una versión dramática de los hechos [6], se ha conjeturado que Boltzmann leyó ese día el

artículo de Einstein [*Annalen der Physik* 18, 639 (1905)] sobre la equivalencia entre masa y energía —un hecho que encajaba perfectamente en la visión de Mach, discutida por Boltzmann, de que la masa podía explicarse en términos de energía— que le mostró lo inútil de sus esfuerzos por demostrar la realidad de los átomos. No sería suficiente, suponiendo que lo conociera, saber que el mismo Einstein estaba trabajando [*Annalen der Physik* 17, 549 (1905)] en facilitar mediante el movimiento browniano una demostración experimental de la existencia de los átomos.

Es un hecho que Boltzmann no llegó a ver el triunfo de las ideas por las que tanto había luchado, en solitario y contracorriente, y parece que murió con la impresión, y quizá forzado por ello⁶, de que todo su trabajo había sido en vano y estaba destinado al olvido. Pero la realidad no le ha dado la razón en esta visión pesimista. Basta notar como ejemplo que una de las noticias científicas de alcance en 2010 fue que los matemáticos habían encontrado por fin la solución de la ecuación que él había enunciado intuitivamente hace casi siglo y medio. Podría estar orgulloso de haber sido el centro de una agitación científica muy útil y productiva, y de haber demostrado muchos temas cruciales. Como resalta Penrose, incluso anticipó la teoría de las revoluciones científicas de Thomas S. Kuhn y propuso una teoría del conocimiento basada en Darwin.

Es significativo de su carácter luchador el que, mostrando su optimismo ante la posibilidad de que el hombre llegara a volar, recordaba la hazaña de su admirado héroe Cristóbal Colón en los versos de Friedrich Schiller, su poeta preferido: “Avanza, marinero orgulloso, no prestes atención a las bromas sobre ti. ¡Que sea el marinero perezoso quien abandone el timón! ¡Hacia el Oeste, siempre al Oeste! Es allí donde aparecerá la costa. ¡Mírala, brillando en tu cabeza! La Naturaleza permanece

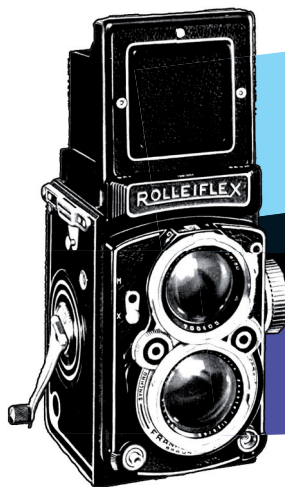
en vínculo eterno con el genio; lo que éste promete, aquélla lo mantiene”.

Finalmente, es un placer agradecer comentarios de Luis Navarro Veguillas a una versión temprana de este escrito que han influido en su forma definitiva. Por ejemplo, me ha resaltado cómo Maxwell y otros físicos británicos eran atomistas, y las fuertes críticas que Boltzmann recibió asociadas con el carácter mecánico y estadístico, más que con el estrictamente atomístico, de su imagen. Por ejemplo, Planck no le atacaba por el aspecto atomístico, que compartía, sino por tratar de justificar una ley tan universal como el Segundo Principio en términos estadísticos.

Referencias

- [1] J. MARRO, *Physics, nature and society. A guide to order and complexity in our world* (Springer Verlag, Berlin 2014).
- [2] JOEL L. LEBOWITZ, “Boltzmann’s Entropy and Time’s Arrow”, *Physics Today* **46**, 32 (1993); estas ideas fueron discutidas como cartas al editor y respuesta en *Physics Today* **47**, 113 (1994); mismo autor, “Microscopic origins of irreversible macroscopic behavior”, *Physica A* **263**, 516 (1999).
- [3] Stephen G. Brush, *Kinetic Theory 2* (Pergamon, New York, 1966); mismo autor, *The kind of motion we call heat: A history of the kinetic theory of gases* (North-Holland, Amsterdam 1986).
- [4] JESÚS BIEL y J. MARRO, “Statistical Approach to the Kinetics of Non-uniform Fluids”, *Physica* **94A**, 297 (1978); mismos autores, “Mecánica Estadística de los Procesos Irreversibles: IV. Ecuación de Boltzmann”, *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Madrid **73**, 191 (1979).
- [5] ROGER PENROSE, *The emperor’s new mind* (Oxford University Press 1989); mismo autor, *The Road to Reality* (Jonathan Cape, Londres 2006).
- [6] CARLO CERCIGNANI, *Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms* (Oxford University Press 1998).
- [7] DAVID LINDLEY, *Boltzmann’s atom: The great debate that launched a revolution in physics* (Simon & Schuster, Nueva York 2001).

⁶ Algunos, véase [2], dudan de la (digamos) “motivación científica” del suicidio.



Abrimos nuestra dirección de correo (revista.de.fisica@rsef.es) a todas aquellas fotos, dibujos e ilustraciones que nos queráis hacer llegar a la redacción.

¿ERES UN AMANTE DE LA FOTOGRAFÍA?

La *Revista de Física* busca contribuciones que puedan ser utilizadas en futuros artículos.
¡Vuestras contribuciones hacen la revista!