

RESEÑA BIOGRÁFICA

Ludwig Boltzmann. Pionero de la ciencia del siglo xx

Jorge Gulín González

Grupode Física y Matemáticas Computacionales, Universidad de las Ciencias Informáticas, Universidad de las Ciencias Informáticas, Carretera a San Antonio de los Baños, kilómetro 2½, Torrens, Boyeros, Ciudad de La Habana.

Recibido: 9 de octubre de 2005. Aceptado: 2 de noviembre de 2006.

Palabras clave: Ludwig Boltzmann, física, mecánica, termodinámica, electromagnetismo, atomismo, positivismo, mecanicismo, entropía, teoría de la información.

Key words: Ludwig Boltzmann, physics, mechanics, thermodynamics, electromagnetism, atomism, positivism, mechanicism, entropy, theory of the information.

RESUMEN. La obra científica del físico austriaco Ludwig Boltzmann (1884-1906) ha sido una de las más extensas y ricas de la época moderna. Desarrollada en medio de un entorno de profundas transformaciones en las concepciones científicas con relación a las teorías clásicas, la labor de Boltzmann sirvió de puente entre la Física newtoniana y la nueva Física (cuántica y relativista). Sus aportes a la Mecánica estadística, la Termodinámica y el Electromagnetismo serían suficientes para considerarlo como uno de los más importantes científicos de finales del Siglo XIX e inicios del XX. Paralelamente, su trabajo de investigación fue complementado con importantes aportes a la Filosofía de la Ciencia, al debate en torno a las teorías científicas, el papel de la hipótesis y al análisis de la vigencia de la Mecánica Clásica como método absoluto de la ciencia. Sus polémicas con los principales defensores de las escuelas empiricista y energetista, fueron claves en la destrucción de posiciones pseudo científicas y en la superación de la llamada “Crisis de la Física”. Boltzmann, además, realizó a lo largo de su vida una intensa labor pedagógica en algunas de las principales universidades austriacas, lo que corrobora la amplitud de sus intereses y la profundidad de su intelecto.

ABSTRACT. The scientific legacy of the physicist Ludwig Boltzmann (1884-1906) has been one of the most extensive and complete in the modern period. It was developed in the context of profound transformations in the conceptions of the scientists about the classical theories. His scientific labour was a bridge between the Newtonism and the new Physics (quantistic and relativistic Physics). His research in statistical mechanist, Thermodynamics and Electromagnetism would be enough for considering him one of the most important physicists of the final of the XIX century and the early XX century. Additionally, his scientific work in Physics was complemented with important contributions to the Philosophy of Science, the debate concerning the scientific theories, the role of the hypothesis and the validity of the classical mechanics as an absolute method in Science. His polemics with the main supporters of the Empiricism and Energetism, were key points in the demolition of the pseudo-scientific positions and besides, in the ending of the “Physics Crisis”. Moreover, Boltzmann a long his life performed an intense pedagogical labour in some of the main Austrian universities. The last statement demonstrates the extension and depth of his intellect.

INTRODUCCIÓN

Desde 1933, una modesta inscripción ($S = K \log W$) grabada sobre un busto en el cementerio central de Viena acompaña la última morada de uno de los hombres de ciencias más importantes del final del siglo XIX e inicios del XX. Ese hombre, el físico Ludwig Boltzmann (1844-1906), ha tenido una influencia decisiva en el desarrollo de la física moderna y por extensión, en la química. Sus aportes a la teoría estadística de los gases bastarían solamente para que su nombre fuera imprescindible en la historia de la ciencia. Baste decir que el concepto de *entropía*, tal y como lo conocemos hoy en Física Estadística o en la teoría de información es obra casi exclusiva de Boltzmann. Desde el punto de vista científico-filosófico, él integró sus estudios sobre Mecánica, Física Molecular, Termodinámica y Electromagnetismo con las ideas filosóficas que eran temas candentes en la ciencia de aquella época (el atomismo, el papel de las hipótesis en la formulación de las teorías científicas, la pretensión de construir una metateoría que incluyera toda la ciencia anterior, entre otras). Posiblemente, las condiciones que se dieron en aquel momento son irrepetibles en cuanto a que de manera singular los nuevos descubrimientos (el electrón, la radiactividad o la aparición de la termodinámica moderna), modificaron la visión sobre la posibilidad del hombre de explicar el mundo de manera completa. Esto creó condiciones propicias para que, en medio de las discusiones puramente científicas

co naturalistas, aparecieran profundas reflexiones filosóficas de trascendencia directa en el avance científico. Por vez primera en la historia moderna, defender una posición filosófica particular influiría directamente en la manera científica de explicarse el mundo. Motivado por estas reflexiones, Boltzmann sostuvo agudas polémicas con muchos de los principales hombres de ciencias sobre temas candentes de la filosofía de la ciencia (E. Mach, Avenarius, Ostwald, por ejemplo). De estas polémicas surgieron sus escritos más completos y aguzados.

A las dos dimensiones del pensamiento de L. Boltzmann, la naturalista y la filosófica, se dedicará este trabajo, con la idea de que el análisis contribuya a interpretar las complejidades y contradicciones de uno de los períodos críticos de la ciencia en su joven historia. Es importante destacar por último que paralelamente al trabajo científico, Boltzmann desarrolló una activa labor pedagógica y durante largos años se desempeñó como profesor universitario de prestigiosas universidades austríacas.

El artículo se ha estructurado de la manera siguiente: Inicialmente, se describen algunos de los problemas científico-filosóficos que caracterizaron el panorama en que Boltzmann se desarrolló (*Contexto Científico-Filosófico*), mientras que sus aportes principales en la ciencia son tratados en detalle en el acápite *Los aportes de Boltzmann*. A modo de *Conclusiones* se ofrecen algunas ideas integradoras de los aspectos principales tratados en los dos primeros acápites y que son esenciales para entender la importancia de Boltzmann en la ciencia moderna

CONTEXTO CIENTÍFICO-FILOSÓFICO

La mecánica

Cuando en 1638 Galileo Galilei publicó subrepticamente en Holanda su obra *Discursos y demostraciones matemáticas relativas a dos nuevas ciencias pertenecientes a la Mecánica y al movimiento local* estaba dando comienzo a la física moderna y con ella de alguna manera surgía también la ciencia moderna. Entendiendo aquí como “moderno” tanto la concepción del objeto de estudio de la ciencia como los métodos utilizados para hacerla. El método empírico desarrollado por Galileo terminó por demoler el viejo edificio aristotélico y el sistema de conocimientos creado por los seguidores de Tomás de Aquino. “Sobre los hom-

bros” de Galileo, Isaac Newton (1642-1727) desarrolló un sistema de leyes generales del movimiento mecánico, y estas fueron expresadas matemáticamente de una forma precisa. Así, las tres leyes de Newton del movimiento mecánico y su Ley de Gravitación Universal se convirtieron en el pilar más fuerte e inamovible de la ciencia, y su autoridad casi absoluta no fue cuestionada durante doscientos años. Con posterioridad, los esfuerzos de otros físicos y matemáticos como Lagrange, Euler, Hamilton,... dieron a la Mecánica una solidez teórica y conceptual no alcanzada por ninguna ciencia antes de ella. La Mecánica y sus métodos de investigación comenzaron a extenderse a todos y cada una de las ramas del saber y de la sociedad en su conjunto.

El mundo que conoció Boltzmann fue un mundo profundamente mecanicista, marcado por las ideas y concepciones de Newton y por la ambición de poder describir exacta y deterministamente al mundo. Esta concepción como veremos dejó una profunda huella en Boltzmann y en sus contemporáneos.

La termodinámica y el electromagnetismo

El siglo XIX para la Física puede ser conocido como el siglo del gran desarrollo de la Termodinámica, y del descubrimiento, explicación y generalización de los fenómenos electromagnéticos. A inicios de este siglo un fenómeno tan común y aparentemente simple como la transmisión del calor de un cuerpo a otro era explicado por la transmisión de una sustancia llamada “calórico”, y por tanto, la disminución de la temperatura estaba relacionada directamente con la pérdida de “calórico” experimentada por el cuerpo. El descubrimiento hecho por Benjamin Thompson (Conde Rumford) en 1798 de que el calor no era un tipo de sustancia sino un tipo específico de energía resultado de la transformación del trabajo mecánico, condujo a la reformulación del concepto de calor. Así, el proceso de realizar trabajo mecánico y la aparición de calor dejaron de considerarse como procesos independientes y a partir de este momento, se interpretaron como parte de un proceso simple de transformación de un tipo de energía a otra. No obstante, no es hasta los trabajos de Robert Von Mayer (1814-1878) y Herman Von Helmholtz (1821-1894) que aparece la forma “definitiva” del principio de transfor-

mación y conservación de la energía. Este crucial descubrimiento influyó decisivamente en toda la ciencia posterior por ser un reflejo de la indestructibilidad del movimiento de la materia. Posteriormente los trabajos del ingeniero francés S. Carnot, del físico inglés Lord Kelvin y de otros como Rudolf Clausius, completaron el cuadro termodinámico del mundo. Tal fue el desarrollo de la Termodinámica durante estos cien años del XIX que A. Einstein la consideraba como la más completa de las teorías físicas establecidas.

En la segunda mitad del XIX aparece una división en la Termodinámica de esencial importancia en la evolución del pensamiento físico de la época. A partir de los años sesenta de ese siglo se pueden distinguir “dos tipos” de Termodinámica: aquella que no hacía uso de las hipótesis atomísticas y que podemos llamar general, y la Termodinámica especial o atomística. No obstante, debemos aclarar que estas dos posiciones no eran del todo excluyentes. De hecho, muchos físicos como Gibbs, que desarrollaron la termodinámica general no eran absolutamente anti-atomistas. De estos dos enfoques, Boltzmann desarrollaría sus principales aportes en la termodinámica atomística.

El electromagnetismo es la otra rama de la Física que alcanzó un considerable avance en la época que precedió al trabajo de L. Boltzmann. Hasta inicios del siglo XIX los fenómenos magnéticos no tenían una explicación científica satisfactoria, y eran vistos y estudiados independientemente de los fenómenos eléctricos. En 1820 Oesterd, casualmente, comprobó la relación entre la corriente que pasaba por un conductor y la aparición de un campo magnético que provocaba la desviación de la aguja de una brújula cercana. Este fue el inicio de toda una revolución en la interpretación y comprensión de los fenómenos electromagnéticos. Los trabajos de Faraday sobre inducción electromagnética y electroquímica, de Ampere, Kirchoff y de otros científicos, culminó en la genial obra de James C. Maxwell quien en sus cuatro leyes del electromagnetismo realizó la unificación de todos estos fenómenos en un sistema de belleza y simplicidad únicas. En un cierto sentido la labor de Maxwell puede ser parangonada con la realizada por Newton en la Mecánica. Por otro lado el sistema de ecuaciones de Maxwell condujo a considerar a la

luz no como un tipo especial de sustancia (como los corpúsculos de Newton) sino como una onda, con la peculiaridad de que su velocidad de propagación es 300 000 km/s. Aún sin desembarazarse por completo de la hipótesis del éter mecanicista y partiendo de una concepción primitiva, Maxwell consideró la existencia de otro tipo de ente material: el campo, que tiene propiedades cualitativamente diferentes a la sustancia. En la interacción continua entre campo y sustancia ocurren todos los procesos naturales. La teoría de Maxwell tuvo una feliz confirmación con los experimentos de Hertz sobre la generación de ondas electromagnéticas.

El atomismo

Nacido en la antigüedad griega, a partir de los trabajos de Demócrito de Abdera (460-370 A.C.), el atomismo nos llegó fundamentalmente por medio de la obra *La naturaleza de las cosas*, del poeta latino Tito Lucrecio Caro. La idea central de Demócrito fue que en la base de todo había dos elementos, lo *lleno* y lo *vacío*. Lo lleno lo concebía constituido por partículas pequeñísimas, invisibles e indivisibles llamadas “átomos”, esto es “que no se pueden dividir”. Todo cuanto existía, incluso el alma humana, lo interpretaba como constituido de estos átomos materiales. El concepto de átomo fue utilizado intuitivamente por muchos científicos en épocas posteriores, por ejemplo Newton en su teoría corpuscular de la luz, pero no es hasta los trabajos de Dalton a finales del siglo XVIII, en que recupera su posición en la explicación del cuadro físico del mundo, como la partícula última e indivisible de la materia. En la época de Boltzmann (segunda mitad del XIX) se pueden encontrar tres tipos fundamentales de atomismo. Primero, un tipo de atomismo que puede llamarse *primitivo*. Este tipo de atomismo se empleaba en la explicación de las propiedades de la electricidad, el magnetismo, el calor, la gravedad, en función de dos clases de átomos, *átomos de éter* y *átomos de materia*. Este modelo debe haber sido el estudiado por Boltzmann en sus años de estudiante universitario. El segundo tipo de atomismo lo se puede asociar con las ideas de sus maestros de la Universidad de Viena. Stefan y otros físicos del Instituto de Física de esta universidad eran atomistas y, filosóficamente hablando, eran realistas ingenuos. Boltzmann fue influenciado por estas

concepciones, aunque sus ideas fueron mucho más allá.

El tercer tipo de atomismo provenía del mundo anglosajón y se encuentra en autores como Faraday, Kelvin, Maxwell, etc. La teoría desarrollada por estos autores, el *dinamismo físico*, da una libertad amplia para cambiar de hipótesis atomísticas según los resultados del experimento. Así, se pasaba de las suposiciones primitivas según las cuales los átomos se atraían con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, a la hipótesis de la teoría atómica de los vórtices. Este tipo de atomismo fue, sin dudas, una de las fuentes de inspiración de Boltzmann.

El positivismo

La corriente filosófica predominante en la segunda mitad del XIX es el *positivismo*, desarrollada en los años 30 y 40 por el filósofo francés Augusto Comte. Como filosofía de la ciencia, el positivismo basó su discurso en considerar a la ciencia como filosofía positiva. Usando como modelo la mecánica de Newton, Comte señaló las bases en las cuales debía descansar el desarrollo de la ciencia, estas son:

- Toda ciencia debe tener un basamento matemático.
- Toda ciencia debe tener organicidad lógica.
- Toda ciencia debe tener como confirmación la experimentación y el dato.

El principal aporte del positivismo fue que por primera vez se excluyó de forma consciente la subjetividad en la ciencia. En este sentido los primeros positivistas mostraron un respeto por la ciencia como medio para conocer la Naturaleza. No obstante, el positivismo aceptaba los descubrimientos de las ciencias naturales como algo absolutamente fidedigno, pero los contraponía a los postulados filosóficos especulativos. Esta dogmatización de los descubrimientos científicos de las ciencias naturales fue la causa principal de la crisis que sufrió la primera forma de positivismo.

Históricamente, a esta primera forma de positivismo le sucede el empiriocriticismo de E. Mach (machismo) y R. Avenarius. El empiriocriticismo rechazó las pretensiones de sus predecesores de descubrir las leyes más generales de la Naturaleza y de la sociedad. Mach afirmaba que el conocimiento es una ligazón de sensaciones y representaciones, de sensaciones y representaciones, y de representaciones y representacio-

nes. Estimaba que las sensaciones son la única “realidad” o “elementos” de todo lo existente que se hallan al alcance del hombre. La crisis de esta segunda forma histórica de positivismo sobrevino en la última década del pasado siglo y la primera del XX y fue una consecuencia inevitable del desarrollo de la física de esta época que condujo al descubrimiento de nuevas partículas, por ejemplo el caso de los electrones en 1897 (Thompson), que no podían ser interpretadas como sensaciones: su existencia fue establecida por la investigación teórica basada en la lógica.

La naturaleza de las teorías científicas: el papel de la hipótesis.

El papel que desempeñan las hipótesis en las teorías científicas fue una de las cuestiones tratadas por Boltzmann en su defensa de la cuestión del atomismo. En esta época existieron dos escuelas que se opusieron abiertamente a la utilización de los modelos mecánicos en la física y en particular, contra la hipótesis atomística, la *energetista* y la *fenomenista*. Ambas escuelas eran defensoras de un positivismo extremo, no obstante, tenían algunas diferencias metodológicas frente al problema de en qué consiste una teoría científica.

El energetismo, concepción metateórica que tuvo gran aceptación, sobre todo entre los químicos, deseaba liberar a la ciencia del tributo de la física desarrollando una ciencia superior, la energética, que unificara la diversidad de las ciencias particulares. El enorme desarrollo del tratamiento de la energía en la física y la química en la segunda mitad del siglo XIX y la generalidad del principio de conservación de la energía avalaban la pretensión de los energetistas de considerar la energía como punto de partida del análisis científico.

Los dos energetistas más significativos fueron Ostwald y Duhem. Ambos deseaban acabar con lo que suponían era un dominio de la mecánica racional sobre el resto de las ciencias. Sobre esto decía Duhem: “Vamos a intentar formular las leyes generales a las que deben obedecer todas las propiedades físicas, sin suponer *a priori* que tales propiedades sean reducibles a la figura geométrica y al movimiento local. Por lo tanto, el cuerpo de estas leyes no se reducirá, en principio a la mecánica racional”.¹

Ostwald fue aún más lejos, el ideal energético exigía que la física

quedara sumida en una ciencia más general, la energética. Ostwald expresa de este modo su confianza en el energetismo: “La teoría energética no podrá ser arruinada jamás por el progreso que pueda hacerse en la ciencia, igual que tampoco podrían arruinarse por el progreso los teoremas que se refieren a la semejanza de triángulos”.¹ Ostwald, que quiso combatir la mecánica por ser una ciencia plagada de hipótesis metafísicas, proclive a admitir la existencia de entidades inverificables como los átomos, llega a instalar la energía en el rango de motor inmóvil: “La energía constituye el motor inmóvil de la movilidad de los fenómenos y simultáneamente la fuerza impulsora que hace moverse el mundo de los fenómenos”.

Mientras los energetistas rechazaban el uso de las hipótesis propias del “mecanicismo”, fundamentando su posición en la construcción de una ciencia general para todos los fenómenos de la Naturaleza que pudiera estar exenta de tales suposiciones, los fenomenistas, o partidarios del *fenomenismo matemático*, mantenían una posición menos ambiciosa y más coherente. Su posición se concretaba en rechazar cualquier hipótesis que fuera más allá de la experiencia. Las teorías científicas eran simplemente, según ellos, la traducción en términos matemáticos de lo que permite la observación directa y los instrumentos de medida. Nada justifica, entonces, la utilización de modelos ocultos, de hipótesis inverificables, como la atomística. En este positivismo extremo en ocasiones coincidían con los energetistas, pero a diferencia de estos, que tuvieron una influencia coyuntural en el desarrollo de la filosofía de la ciencia, la posición fenomenista ha sido una constante en la historia de la ciencia.

Según los fenomenistas, los principios, leyes y teoremas físicos quedaban perfectamente expresados en las ecuaciones diferenciales, de tal manera que no era necesaria la elaboración de ninguna imagen auxiliar. Esta tesis, defendida por físicos tan eminentes como E. Mach, puede ser considerada aparentemente errónea pero en esta época no lo era en lo absoluto. La aplicación del cálculo infinitesimal a fenómenos como la conducción del calor por Fourier condujo a un tratamiento ampliado de la aplicación del cálculo infinitesimal a la Física. En el caso del fenómeno de la conducción del calor, la polémica mantenida entre

Fourier y Laplace sobre la legitimidad del uso de las nociones diferenciales a su explicación, llevaron al primero al estudio de los desarrollos en serie y funciones armónicas. Esto parecía una herejía a los físicos que habían desarrollado la mecánica racional y un cálculo diferencial adaptado a ella, pero tenía la enorme ventaja de ceñirse más exactamente a una fenomenología que de otra manera era intraducible en términos diferenciales. Por otro lado, el éxito de los trabajos de Poisson y Duhamel, entre otros, fortaleció la opinión de Fourier y quedó abierto el uso más flexible de las ecuaciones diferenciales en la física. Es conveniente recordar que además de la Mecánica y los fenómenos térmicos, las ecuaciones diferenciales empezaron a ser utilizadas para explicar fenómenos electromagnéticos. Este desarrollo que culminó en la obtención por Maxwell del sistema de ecuaciones electromagnéticas, introdujo definitivamente el cálculo integral diferencial como la herramienta matemática y metodológica más importante en la Física. Esta colaboración entre Física y Matemática (recordar que algunos de los avances del Cálculo y el Álgebra han sido resultado de la resolución de problemas físicos), ha conducido a que las ecuaciones integrales diferenciales que explican la inmensa mayoría de los fenómenos físicos se conozcan como *Ecuaciones de la Física-Matemática*. La profunda razón de la adaptabilidad del Cálculo Diferencial a la Física esta relacionada con el hecho de que en esta rama de la matemática convergen lo finito y lo infinitesimal.

La profunda matematización que tuvo la Física, la idea de eliminar las imágenes en la ciencia y la renuncia explícita a ir más allá de la experiencia, debió resultar a Mach muy tentadora en la formulación de sus tesis filosóficas. En cuanto a la opinión que tenía sobre qué se entendía como teoría científica, Mach concebía a la teoría como una traducción de la experiencia, y consideraba fundamental la cuestión de la “pureza” del conocimiento científico. Esta posición, como más adelante se verá, era irreconciliable con los ideales filosóficos de Boltzmann.

LOS APORTES DE BOLTZMANN La defensa del atomismo

Como se ha tratado en la Introducción, las ideas que se discutían a finales del XIX sobre el atomismo difieren bastante del concepto que te-

nemos hoy de lo que es el átomo y de sus propiedades. El atomismo era en ese momento, y fundamentalmente, un problema gnoseológico, que dividió al mundo científico occidental en dos grandes bandos: los detractores y los defensores de la hipótesis atomística. A estos últimos pertenecía Boltzmann. En su caso, la defensa del atomismo es sustentada por dos tipos de razones, de tipo *heurístico* y de tipo *metodológico*. En su obra, estas dos razones se complementan mutuamente. Por una lado, el atomismo es una fuente de inspiración para la inventiva científica, y por otra parte, aporta hipótesis que son extraordinariamente útiles para la construcción de teorías.

Si se analiza la evolución de las ideas de Boltzmann sobre la mecánica estadística (su campo de mayor aporte en la Física) se puede apreciar su interés en presentar a la energía como una variable discreta en la derivación del teorema fundamental. Este es un ejemplo de lo que se puede llamar función heurística del atomismo. Su planteamiento matemático era finitista; debido a lo cual, concebía las ecuaciones diferenciales como construcciones a partir de elementos. Esto es, lo que para algunos físicos tenía solamente valor en el cálculo, para Boltzmann tenía un significado físico.

Las leyes de la física se expresan en forma de ecuaciones diferenciales, pero la manera de construirlas exige siempre el recurso de “elementos diferenciales”, de tal manera que en un momento dado la suma de sus elementos conduzca a un paso al límite. El encontrar estos elementos depende en gran medida de la habilidad del investigador. En este caso, la Matemática ejerce una cierta función pedagógica sobre la actividad del científico de la Naturaleza. Así, de acuerdo con Boltzmann, la investigación física ha de pasar necesariamente por cierta concepción atomística, que luego de construida la teoría científica puede ser olvidada, pero no negada como camino utilizado en dicha construcción.

El atomismo como teoría está ligado a la concepción mecanicista de la Naturaleza y Boltzmann era un decidido partidario de la Mecánica, consideraba que la visión de aquella era una cuestión en el fondo de gustos personales y de eficacia en la representación de los fenómenos. En esto se basa la función metodológica en la construcción de teorías. A diferencia de sus maestros de la Universidad de Viena que profesaban un

atomismo ingenuo, Boltzmann defendió un “nuevo atomismo”. Este atomismo, tomado a imagen de la realidad, podía proveer de modelos muy sencillos haciendo inteligibles procesos complicados y cuya representación era bastante difícil. Las imágenes atomísticas pueden integrarse fácilmente, ya que no son hipótesis *ad hoc*, sino ideas reguladoras para alcanzar una imagen general, lo más amplia posible, de los procesos naturales.

A pesar de que esta concepción puede parecer mecanicista (de hecho lo es) se debe aclarar que Boltzmann era consciente del proceso de decadencia de los métodos mecánicos, como lo expresó en su memoria *Desarrollo de los métodos de la Física teórica en los tiempos recientes*: “La Mecánica antigua mostró toda su fecundidad y ha sido sustituida por otras concepciones físicas. Pero, y esto es lo importante, hay una concepción metafísica que no está ligada necesariamente a la antigua Mecánica. No se puede pensar que la decadencia y abandono en algunos de los procedimientos antiguos lleve aparejada la eliminación de todos los procedimientos que aquella utilizaba. El atomismo puede seguir siendo útil en la construcción de teorías y adecuado para la explicación de teorías científicas”.³ Por otro lado, no se puede olvidar que, partiendo de la hipótesis atomística Boltzmann arribó, a las conclusiones esenciales de su labor investigativa. La posición de Boltzmann de oponerse a la simple negación metafísica de una teoría por caducar alguno de sus pilares, y de preservación, relectura de los métodos y procedimientos de probada validez en determinado campo, es de una vigencia permanente.

La concepción de las teorías científicas como una imagen de la realidad

En cuanto a la concepción que tenía Boltzmann acerca de la función de las teorías científicas como imagen de la realidad, se debe concentrar primero en qué cosa eran para él conceptos como “existencia” o “tener una imagen de la realidad”. Véase con sus propias palabras: “Para mí está claro que unimos grupos de percepciones para formar ideas de objetos, por ejemplo, de una mesa, de un perro, de un hombre o cosas por el estilo. Por otra parte, tenemos recuerdos gráficos de estos grupos de ideas. Cuando formamos nuevos grupos de ideas que son bastante similares a estos recuerdos grá-

ficos, tiene sentido la pregunta de si los objetos correspondientes tienen existencia o no. Aquí tenemos, en cierto modo, una precisa medida del concepto de existencia. Sabemos exactamente qué significa la pregunta acerca de si existe el grifo, el unicornio o un hermano mío. Sin embargo, cuando formamos ideas nuevas, tales como el espacio, el tiempo, los átomos, el alma, o incluso Dios ¿Sabe uno, y así me lo he preguntado a mí mismo, qué se quiere decir al preguntar si estas cosas existen? Lo único correcto que se puede hacer aquí ¿no es clarificar qué conceptos se enlazan con la cuestión de la existencia de las cosas?”.¹ En relación con esto Boltzmann señala lo errado que puede significar el confundir el concepto de existencia con el sentido común de la realidad cotidiana y del resultado directo de las percepciones. Para Boltzmann, el tiempo, el espacio, incluso “Dios”, tienen existencia propia, son “realidad” a pesar de que el concepto de lo que son no sea “claro”.¹

El criterio que Boltzmann tenía sobre la constitución de las teorías científicas se desarrolló en circunstancias de enfrentamiento a las tesis energetistas y fenomenistas. Sus argumentos sobre este problema son de dos tipos. Primero, defiende la mecánica de su época, presentándola como una ciencia distinta de aquella que creyó poseer el secreto para desentrañar el mundo natural. Las teorías científicas no son algo definitivo y mucho menos la visión del mundo que subyace en ellas. Segundo, su oposición resuelta a las generalizaciones fáciles y poco rigurosas. En relación con esto, el tratamiento probabilístico del segundo principio de la Termodinámica hecho en la Mecánica Estadística y la necesidad de introducir hipótesis auxiliares en un problema sencillo como el movimiento del punto material son ejemplos de hasta que punto resultaban “místicas” y arbitrarias las generalizaciones hechas por los energetistas de diferentes problemas termodinámicos. Para Boltzmann las hipótesis son algo necesario e insustituible en cualquier teoría científica. En su posición con respecto a los fenomenistas y su pretensión de explicar el mundo solo a través de las ecuaciones diferenciales de la Física-Matemática y soslayando la elaboración de imágenes auxiliares, Boltzmann siempre defendió la imposibilidad de construir una ciencia sin imágenes, porque las propias teorías cien-

tíficas son una imagen de la realidad. Imagen incompleta, y resultado de la abstracción y eliminación de incontables agentes externos que interactúan continuamente con el objeto. Por ello hasta en la más abstracta de las teorías físicas (el caos y la dinámica no lineal, la teoría unificada del campo, etc.) hay explícita e implícitamente una imagen preconcebida de la realidad. Esta imagen creada puede, incluso, modificarse durante el proceso de desarrollo y evolución de la teoría científica.

En muchos casos con la superación de una teoría cambia diametralmente la imagen que se tiene del mundo como ocurrió, por ejemplo, con la teoría especial de la relatividad (TER) y el desarrollo de la mecánica ondulatoria en las décadas de los años veinte y treinta del siglo xx, a partir de los trabajos de Schrödinger, Heisenberg, Dirac y otros. Los conceptos sobre entidades como: espacio, tiempo, partícula, posición, *momentum* lineal, etc., cambiaron por completo, y con ello, la visión del mundo que tenían los físicos de esa época.

El fragmento a continuación, escrito por Boltzmann expresa claramente y de una manera certera cuál era su posición sobre las teorías científicas:

“...la teoría no es más que una imagen mental de los fenómenos...”.

“De todo esto se sigue que no puede ser nuestra tarea encontrar una teoría absolutamente correcta, sino una imagen lo más sencilla posible y que represente lo más fielmente que pueda estos fenómenos. Se puede incluso pensar en la posibilidad de que existan dos teorías completamente distintas, que sean las dos igualmente sencillas y que concuerden en igual grado con los fenómenos, es decir dos teorías que, siendo totalmente distintas, sean ambas correctas. La afirmación de que una “teoría es la única correcta” sólo puede ser la expresión de nuestra convicción subjetiva de que no podría haber otra imagen tan precisa y tan simple”.¹

El mecanicismo y la concepción evolutiva de las leyes del pensamiento

Boltzmann no fue ajeno al desarrollo de otras ramas de la ciencia. En particular fue un acucioso lector de las obras de Darwin y de su teoría acerca de la evolución de las especies (“Conseguí progresivamente un conocimiento mayor de la Naturaleza, me embebí de la teoría de

Darwin...¹⁾). Tanto fue así, que siempre consideró esta teoría y a su autor, como el mayor suceso científico del siglo XIX.

La teoría de la evolución influyó poderosamente en su pensamiento. Le ofreció una explicación adecuada del desarrollo de las leyes del pensamiento humano, dió argumentos para atacar a los filósofos que defendían la inmutabilidad de tales leyes y ofreció una explicación de lo que se consideraba *a priori* innato. Boltzmann estaba convencido de que se podía dar una explicación de estos problemas a través de la evolución, del instinto y de la analogía que la teoría de Darwin establecía entre el comportamiento humano y el de los animales. La teoría de la evolución de las especies sirvió también a Boltzmann como una prueba de la vigencia y desarrollo del ideal mecanicista. Ahora no se trataría de un mecanismo general, ya no físico, sino biológico, económico, social, etc. En este sentido, el mecanicismo tendría un sentido nominalista, pero sería un patrón explicativo general. La evolución de los procesos naturales y sociales, los comportamientos personales y sociales, son problemas que pueden tratarse mecánicamente como un resultado de la lucha por la supervivencia y por la adaptación. En esto último, se aprecia por un lado, su capacidad científica para aceptar y comprender los nuevos avances en la ciencia (aunque esta no fuera la física), y por el otro, sus limitaciones al tratar de encontrar confirmaciones de los métodos mecanicistas en otras ciencias particulares. En esto, Boltzmann nunca dejó de ser un físico del siglo XIX.

Sobre el planteamiento estadístico del segundo principio de la termodinámica y el concepto de entropía

¿Por qué nunca se observa que después de roto en pedazos un jarro, este vuelva a componerse y regresar a su estado inicial? ¿Por qué el agua de un vaso, a temperatura y presión normales, no se congela espontáneamente? ¿Por qué no ocurre que todo el aire contenido en un local se concentra en una esquina de este? Detrás de las respuestas a estas interrogantes se encuentra uno de los principios básicos de la ciencia moderna y alguna de sus más interesantes incógnitas. Todos los procesos que se observan en la Naturaleza: la caída de una piedra, la ruptura del vidrio, la combustión de un papel, la muerte, etc., son procesos *irreversibles*. Todos estos fenómenos se rigen

por un principio cardinal de la Física, el segundo principio de la Termodinámica, enunciado por Kelvin y Clausius en los años sesenta del siglo XIX. De acuerdo con el primer principio (o ley) de la Termodinámica nada impediría que se construyera el móvil perfecto, pues este motor no violaría jamás la ley de conservación de la energía si convierte toda la energía calorífica en trabajo mecánico. El primer principio de la Termodinámica establece la condición de conservación de la energía, pero no dice en cuál sentido ocurrirán los procesos físicos. Esto es explicado por el segundo principio.

Para entender qué plantea el segundo principio de la Termodinámica es oportuno introducir el término *entropía* como una función de estado (esto es una función que solo depende de las coordenadas termodinámicas iniciales y finales del sistema, y no del camino recorrido. Las variaciones de entropía pueden ser consideradas como una medida de la capacidad de un sistema físico de realizar trabajo. Se conoce que, en la medida que crece la entropía de un sistema, disminuye su capacidad de realizar trabajo.

Cómo se puede explicar el sentido en que ocurren los fenómenos naturales a partir del concepto de entropía. En teoría en la Naturaleza pueden ocurrir procesos reversibles. En un proceso de este tipo, el sistema pasa por los mismos estados que lo llevaron del estado inicial al final, pero en sentido inverso. En un proceso reversible la entropía se mantiene constante. Por tanto, la capacidad del sistema de realizar trabajo permanecería intacta y, en principio, se podría construir el móvil perpetuo. La dificultad de este planteamiento estriba en que en realidad los fenómenos naturales son irreversibles. Clausius demostró que para un sistema aislado que realiza un proceso irreversible la entropía siempre crece. Si la entropía crece, disminuye la capacidad del sistema de realizar trabajo y por tanto no puede existir "el motor perfecto". Es como si la energía se "degradara".

Resumiendo los dos procesos posibles (reversibles e irreversibles), la entropía de un sistema aislado crece o se mantiene constante. Este es el principio de crecimiento de la entropía, que sirve de fundamento a la formulación del segundo principio de la Termodinámica (*Todo proceso físico ocurre en la dirección en que crece la entropía del sistema aislado*).

El principio de crecimiento de la entropía visto como un proceso de "degradación de la energía" indujo a muchos físicos, entre ellos, Clausius e incluso Boltzmann, a plantear la hipótesis de la muerte térmica del universo. Esto es, un estado en que todos los cuerpos de aquel tendrían igual temperatura. Metodológicamente, la conclusión es correcta. Solo que no se ha demostrado que el universo donde está la tierra sea un sistema aislado, y por otro lado, esta ley tiene como límite superior de aplicación los sistemas cuyo número de elementos tienda a infinito, como es el caso del universo.

El enunciado de Clausius del segundo principio de la Termodinámica, se fundamenta en un enfoque macroscópico (termodinámico) del sistema, o lo que es lo mismo, él define la variación de entropía en función de coordenadas macroscópicas (calor, temperatura). Sin embargo, existe una interpretación microscópica-estadística de este problema. Al desarrollo de esta visión microscópica de la irreversibilidad de los procesos naturales dedicó Boltzmann gran parte de su labor investigativa. En 1866, Boltzmann publica el artículo titulado *Sobre el significado mecánico del segundo principio de la teoría del calor*. Los objetivos de este trabajo fueron: "...dar una prueba puramente analítica y totalmente general de la segunda ley de la termodinámica, así como descubrir el teorema en Mecánica que le corresponde".¹ Entre los resultados más interesantes del artículo aparece una primera forma de la entropía en términos mecánicos y la expresión de la temperatura absoluta del gas en función de la energía cinética media de las moléculas.

Paralelamente al desarrollo de la Termodinámica por los autores mencionados, aparecieron los trabajos de J. Maxwell sobre la teoría dinámica de los gases y sobre su tratamiento estadístico. Estos trabajos influenciaron decisivamente el trabajo posterior de Boltzmann. Este quedó profundamente marcado por el tratamiento estadístico de Maxwell. El planteamiento esencial de este era que para conocer las propiedades de los gases no era necesario conocer la posición y velocidad de cada una de las moléculas del gas, sino que bastaba saber el número medio de las moléculas que tenían una posición y una velocidad determinadas. Maxwell demostró que las velocidades se distribuían de acuerdo con la misma ley que se distribuyen los

errores en las mediciones experimentales (distribución gaussiana). Estos resultados fueron incorporados por Boltzmann y generalizados para el caso de gases complejos en presencia de campos de fuerzas externos. El resultado fue la generalización del principio de equipartición de la energía y el planteamiento del análisis de la naturaleza del equilibrio termodinámico, lo que es esencial para enfrentar el problema de la irreversibilidad de los procesos naturales. Para estipular las condiciones de equilibrio era necesario determinar los valores que podían tomar las magnitudes de las moléculas que constituían el sistema. Boltzmann partió de la hipótesis de que al transcurrir el tiempo, tanto las coordenadas como las velocidades de las moléculas toman todos los valores posibles que son compatibles con la energía total del gas. En esto consiste la hipótesis ergódica.

En 1872, Boltzmann publicó su principal artículo sobre el tema. En él dio la primera derivación del incremento de la entropía en los procesos irreversibles uniendo las leyes de la mecánica y la probabilidad. Demostró que: “sea cual sea el estado inicial que tenga un gas debe aproximarse en el límite a la distribución encontrada por Maxwell”.¹

El planteamiento clave de Boltzmann consistió en que la esencia del segundo principio de la Termodinámica y la irreversibilidad de los procesos naturales están en relación directa con las leyes de la probabilidad. En este planteamiento la entropía mide la probabilidad y aumenta porque los sistemas evolucionan de los estados menos probables a los más probables. La expresión matemática de este planteamiento es la inscripción que aparece en el panteón donde descansan los restos del científico:

$$S = K \log W$$

donde:

S entropía del sistema,

K constante de Boltzmann,

W probabilidad termodinámica.

A diferencia del planteamiento de Clausius del segundo principio de la Termodinámica, que no admite que puedan ocurrir procesos en la Naturaleza en los cuales la entropía del sistema disminuya, el tratamiento estadístico de Boltzmann, por basarse en las leyes de la probabilidad, no niega *absolutamente* este hecho. O sea, en principio, pueden ocurrir procesos en los cuales la entropía del sistema aislado disminuya ¿Por qué

no son observados? La explicación se encuentra justamente en las leyes de la probabilidad, todos los sistemas físicos cuentan con un gran número de partículas, de tal forma que la probabilidad de que, por ejemplo en un gas, las moléculas se distribuyan uniformemente en un recipiente es mucho mayor que la probabilidad que se distribuyan no uniformemente en él. Ese estado, en el cual las moléculas están uniformemente distribuidas corresponde a un estado más desordenado que el caso en que todas las moléculas estuvieran localizadas en una porción del recipiente. Así, la entropía como concepto estadístico está relacionada con el grado de desorden del sistema. Por ello, se dice que todos los sistemas físicos evolucionan hacia el estado de máximo desorden, o sea, hacia el estado de equilibrio termodinámico, que es consiguientemente el de máxima entropía. Haciendo uso del planteamiento estadístico de Boltzmann el segundo principio de la termodinámica podría enunciarse de la forma siguiente: “Todos los sistemas aislados evolucionan *con una gran probabilidad* hacia el estado en el cual la entropía es máxima”.

Este tratamiento estadístico hecho por Boltzmann dio lugar a la apertura de un nuevo capítulo en la Física. La Mecánica a la que se refería no era ya la clásica, sino la Mecánica Estadística. El grado de certeza ya no era el que se derivaba de una ley determinista, sino de una ley probabilística. Por otra parte, este planteamiento incluye la posibilidad que un sistema aislado en equilibrio termodinámico pueda ocasionalmente abandonar este estado y evolucionar hacia uno de menor entropía. A esto se le denomina *fluctuación*. El papel de las fluctuaciones en sistemas muy complejos como el universo conocido es tema de gran interés de los físicos modernos.²

Entropía e información

Una de las aplicaciones principales del concepto de entropía se puede hallar en la teoría de la información, más exactamente en los problemas de estimación de la cantidad de información. Existen muchas definiciones del concepto de información. Serán mencionadas dos de ellas (la filosófica y la que se puede llamar práctica). Desde el punto de vista filosófico, la información es la reflexión del mundo real. Es una característica de la propiedad general de la materia que se denomina va-

riedad. De otra manera, se puede decir que la información es la variedad reflejada. La definición práctica, que es la más estricta expresa que: la información incluye todos los datos que son objeto de almacenamiento, transmisión y transformación. El surgimiento de la teoría de la información está asociada fundamentalmente con la obra del científico norteamericano C. Shannon *Teoría matemática de la comunicación*, aparecida en 1948. No obstante, existieron trabajos que sirvieron de base al de Shannon, como por ejemplo R. Hartley, quien propuso por primera vez, la medida cuantitativa de la información (1928).

A la teoría de la información corresponden los resultados del cálculo de un conjunto de problemas teóricos fundamentales referentes al aumento de la eficacia de funcionamiento de los sistemas de comunicación. Esto es, el análisis de las señales como medio de transmisión de mensajes que incluye los problemas de estimación de la “cantidad de información” transmitida por dichos mensajes, y el análisis de las características de información de las fuentes de mensajes y de los canales de comunicación, así como la argumentación de la principal posibilidad de codificación y decodificación de dichos mensajes, que aseguran la máxima velocidad admisible de transmisión del mensaje por el canal de comunicación. La teoría de la información se ocupa de todos los problemas en cuya definición entra el concepto de información. En tal sentido, estudia diversos problemas de la Física, Cibernética, Biología, Psicología, etc. Los intentos de aplicar esta teoría a las diferentes ramas de la ciencia están relacionados con el hecho de que esta es una teoría fundamentalmente matemática. Sus conceptos principales (entropía, cantidad de información y poder de transmisión) solo se determinan a través de las probabilidades de los acontecimientos, a los cuales se les puede atribuir el contenido físico diferente.

El concepto de entropía, utilizado análogamente a la forma que lo usó Boltzmann para describir el grado de desorden de un sistema físico, ha sido utilizado para estimar la cantidad de información. En la teoría de la información se demuestra que el recibo de información siempre contribuye a reducir la diversidad o indeterminación. En este sentido, se denomina entropía de la fuente discreta de información o entropía del conjunto finito a:

$$H(U) = -C \sum p_i \log p_i$$

donde:

$H(U)$ una funcional de distribución de las probabilidades,

p_i diferentes estados probables de la fuente,

C número positivo arbitrario.

Si la expresión anterior se formula sobre base binaria y $C = 1$, entonces se obtiene:

$$H(U) = -\sum p_i \log_2 p_i$$

La similitud de esta expresión con la obtenida por Boltzmann para el segundo principio de la termodinámica condujo a Shannon a llamar a $H(U)$ entropía. Pero la analogía tiene un significado que va más allá de lo puramente formal, ya que en ambos casos, la magnitud H caracteriza el grado de diversidad de los estados del sistema.

Como medida de la cantidad de información, la entropía tiene propiedades similares al caso estadístico-termodinámico. La entropía caracteriza la indeterminación media de la elección de uno de los estados del conjunto. Para determinarla solo se utilizan las probabilidades de los estados, obviando su contenido sustancial. Por ello, no es posible considerar la entropía como medio para solucionar cualquier problema relacionado con la indeterminación.

Otras derivaciones o extensiones del término entropía y de su ley de crecimiento a ramas de las ciencias sociales como es el caso de interpretación hecha por algunos sociólogos del término "entropía social" como un grado del "desorden social" y a partir de ahí, establecer una ley de crecimiento de la entropía y del desorden de la sociedad humana, no se ha tratado en este trabajo, por considerarlos fuera de su objetivo y por otro lado, por valorar poco serias dichas "extensiones".

CONCLUSIONES

Es difícil separar en Boltzmann su pensamiento físico y filosófico. Ambas vertientes eran indisolubles y complementarias en él. Nunca se consideró un filósofo sino un científico que por las circunstancias en las cuales desarrolló su labor investigativa, plena de nuevos descubrimientos e hipótesis novedosas que ponían en tela de juicio el conocimiento precedente, tuvo necesidad

de estudiar filosofía e interesarse por muchos de los candentes temas de su época. Pudo formarse de esta manera su propia concepción filosófica del mundo y a partir de esto, criticar las demás corrientes del pensamiento científico-filosófico, afirmar sus propias convicciones y desarrollar su trabajo investigativo.

Sus mayores aportes en el plano de la filosofía de la ciencia se pueden hallar en dos de los problemas desarrollados en este trabajo: su posición en defensa del atomismo y sus ideas acerca de la naturaleza de las teorías científicas. En este último, su enfrentamiento al positivismo extremo, representado por las corrientes energetistas y fenomenistas, son un ejemplo de la firmeza y la valentía con las que un científico honesto debe defender sus ideas aún en las condiciones más adversas. Sus aportes desde el punto de vista metodológico en el planteamiento de las hipótesis y en la comprobación de estas son de validez actual.

Es muy destacable también su trabajo en la cátedra de filosofía de las ciencias inductivas en la Universidad de Viena (creada por E. Mach en 1895), la que dirigió desde 1902 hasta 1906.³ Esta cátedra de filosofía empirista (al frente de la cual le sucedieron nombres como Adolf Stöhr y a partir de 1922 Moritz Schlick) desempeñó un papel primordial en la creación y desarrollo de lo que, posteriormente, llegó a convertirse en la escuela de filosofía de la ciencia más influyente del siglo xx: el Círculo de Viena.

Los aportes a la Física de Boltzmann se encuentran fundamentalmente en el desarrollo de la Mecánica Estadística y su aplicación a la teoría de los gases. Boltzmann es el primero que, consecuentemente, aplica un análisis probabilístico a la evolución de un sistema físico, y es por esto, que a pesar de ser un defensor de los métodos y herramientas de la mecánica clásica, es también uno de los precursores de la nueva mecánica. Boltzmann es como físico, un hombre de transición, un puente entre una física que aún no lograba zafarse de las ataduras clásicas, de su pensamiento mecanicista; y una nueva física que, desprovista de estas ataduras, y de lo dogmático y absolutista del pensamiento post-newtoniano, surgiría por diversas vías en los años

que precedieron (1900-1905) a la muerte del científico (1906), imponiendo una nueva mirada al mundo que rodea al hombre. En este sentido, él es también un precursor.

Es precisamente por desenvolverse en esta época convulsa (en términos científicos) que la obra científica-filosófica de Boltzmann es imperecedera. Pensar por un momento que eran tan fuertes y enraizadas las ideas en muchos de los hombres a los cuales tuvo que enfrentarse, que descubrimientos de tanto peso como el electrón y la radiactividad no lograron sacar de las cabezas de muchos físicos las ideas anti-atomísticas. Es claro por otro lado que ninguno de ellos era ni mediocre, ni improvisado. El aporte a la ciencia de nombres como Mach y Ostwald es incuestionable, solo que en su interpretación de esos problemas cardinales estaban equivocados. No obstante, es posible que estos mismos errores y la posición ciega defendiendo su ideal científico filosófico fuera catalizador de la revolución científica cercana. Baste mencionar que tanto A. Einstein en sus inicios como M. Planck fueron admiradores de las tesis filosóficas de Mach.

Para terminar este trabajo, una frase de Boltzmann que muestra claramente su opinión sobre la colaboración y complementación que debía existir entre la filosofía y el pensamiento científico y la importancia de ambas vertientes del conocimiento humano. Decía: "No he evitado aquí cuestiones filosóficas con la firme esperanza de que la colaboración entre filosofía y las ciencias de la Naturaleza dé a ambas nuevas perspectivas. Solo de esta manera podremos expresar verdaderamente nuestras ideas con suficiente consistencia. Schiller dijo a los investigadores y filósofos de su época *La enemistad reine entre vosotros, es demasiado pronto para un pacto*; yo no le llevo la contraria, solamente opino que ya ha llegado el tiempo del pacto".¹

BIBLIOGRAFÍA

1. Ordoñez Rodríguez F.J. Ludwig Boltzmann. Escritos de mecánica y termodinámica, Alianza Editorial, Ed., Madrid, 1986.
2. Castro Díaz-Balart F. Espacio y tiempo en la filosofía y la física, Editorial Ciencias Sociales, La Habana, 1988.
3. Kraft V. El círculo de Viena, Taurus Ediciones, Madrid, 1966.