

LA TEORÍA CINÉTICA ANTES DE MAXWELL

JOSÉ MANUEL CASADO VÁZQUEZ

Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear
Universidad de Sevilla

Resumen: Son escasos los estudios sobre las teorías cinéticas formuladas antes de que las contribuciones de Maxwell y Boltzmann a finales del siglo XIX, establecieran el marco teórico actual de dicha disciplina. El propósito de este trabajo es llevar a cabo un análisis del desarrollo de las dos ideas esenciales que subyacen en las formulaciones primitivas de la teoría cinética de los gases, a saber: las hipótesis sobre el carácter molecular de los fluidos y las especulaciones sobre la naturaleza del calor. La teoría cinética moderna está cimentada sobre la articulación de un modelo mecánico con argumentaciones de tipo probabilístico. En el presente trabajo se pretende rastrear también el origen de estos dos componentes, al mismo tiempo que se esboza su evolución a lo largo de la historia de las ideas atomísticas durante los últimos cuatro siglos.

Abstract: Detailed studies aiming to explore the main ideas lying behind early kinetic theories are rather scarce. The purpose of this paper is to analyze the development of two basic issues present in the early formulations of the kinetic theory of gases, namely, the hypothesis of the molecular character of gases and the speculations about the nature of heat. Modern kinetic theory articulates a mechanical model of a given physical system with probabilistic arguments. A brief sketch of the origin and the historical evolution of those very different components of the theory is carried out.

Los libros de texto tienden a exponer las diferentes disciplinas científicas en una forma que podríamos denominar ahistórica. Este modo de proceder es probablemente correcto pero aleja al estudiante del conocimiento del contexto en el que se produjeron las teorías y tiende a dar la impresión de que la ciencia es algo que surge ya estructurada en la mente de los que la desarrollan.

Thomas S. Kuhn, en su libro *La estructura de las revoluciones científicas* describe la historia de cada ciencia como un conjunto de *paradigmas* que han ido sucediéndose a lo largo del tiempo. La noción de paradigma es compleja pero podemos hacernos una primera idea si pensamos en una teoría o conjunto de teorías a la que todos o casi todos los que en un cierto momento histórico practican un campo particular de la ciencia toman como referencia para su trabajo.

La historia de las ideas que culminaron en la actual teoría cinética de los gases constituye un ejemplo notable de la formación de un paradigma; desde las primeras ideas de Bernouilli sobre la naturaleza de los fluidos elásticos hasta el triunfo de la visión atomística de la naturaleza en el último tercio del siglo XIX, podemos ver cómo las ideas cinético-moleculares son planteadas una y otra vez y luego cómo, incapaces de ser incorporadas al paradigma dominante, son relegadas al olvido, sólo para volver a aparecer de nuevo tras décadas de silencio.

LAS PRIMERAS HIPÓTESIS ATOMÍSTICAS

La idea de que los cuerpos materiales son agregados de partículas en movimiento tiene un origen considerablemente remoto: cuando el escritor latino Lucrecio (99-55 a.C.), dedica su poema *De rerum natura*¹ a la exposición de la física de Epicuro (341-270 a.C.), no hace sino recoger los comentarios de éste a las opiniones de los filósofos griegos Leucipo y Demócrito, para quienes el mundo está compuesto por átomos, es decir, por partículas indivisibles que siendo infinitas en número e invisibles, son además indestructibles, absolutamente simples y todas iguales en cualidad, pero difieren en la forma, el orden y la posición. Estos átomos no pueden llenar completamente el mundo porque, de hacerlo, no podría tener lugar ningún movimiento; debe existir, por lo tanto, un vacío en el que a las partículas le sea permitido moverse. Para los atomistas, toda sustancia, todo cuerpo material estará constituido por alguna de las infinitas combinaciones posibles de estos átomos y cada objeto particular existirá mientras los átomos que lo constituyen se mantengan unidos y dejará de existir cuando se separen. Por otro lado, los cambios que observamos en los cuerpos materiales se deben al continuo proceso de agregación y separación de dichas partículas. Para Demócrito, los átomos se encuentran some-

¹ T. Lucrecio Caro. *La Naturaleza*, Madrid, Akal (1990).

tidos a rápidos movimientos aún en el caso de que los cuerpos estén aparentemente en reposo, pero dichos movimientos se deben exclusivamente al peso de los propios átomos y tienen lugar siempre en sentido descendente. Esta última suposición está asociada probablemente, con la suposición de una tierra plana y, por tanto, a la idea de que es posible establecer una dirección absoluta en el espacio. Lucrecio describe en su poema a todas esas invisibles partículas cayendo hacia abajo en el vacío con velocidades paralelas e introduce la hipótesis del *clinamen* (deflexión), que en ciertos momentos y en ciertos lugares, trastorna imperceptible pero arbitrariamente dichos movimientos regulares y produce las ocasionales colisiones que, por un lado, dan lugar a los cuerpos materiales y, por otro, permiten el desarrollo del libre albedrío en el hombre.

Hoy día estamos convencidos de que la teoría de Demócrito no tiene nada que ver con nuestra comprensión actual de la naturaleza. Sin embargo, no debiéramos ser demasiado exigentes con el atomismo antiguo porque, como el historiador de la ciencia George Sarton nos advierte:

Al juzgar la teoría atomística griega debemos precavernos contra dos tentaciones: la primera consiste en igualarla a la moderna teoría inventada por Dalton a comienzos del siglo XIX²; la otra en no incluirla en la historia de la ciencia en virtud de su vaguedad. Existe, por supuesto, una diferencia enorme entre la idea griega y la de Dalton: es la gran diferencia que existe entre una concepción filosófica que no puede comprobarse y una hipótesis científica que invita a una larga serie de verificaciones experimentales. Por otra parte, no cabe duda de que la teoría de Demócrito, resucitada por Epicuro y popularizada por Lucrecio, constituyó un estímulo intelectual a través de los siglos. Los maestros judíos y cristianos trataron de hundirla pero no murió jamás. El relato de sus vicisitudes es uno de los más notables en la historia del conocimiento³.

² Se refiere a la teoría atómica desarrollada por el químico John Dalton (1766-1844), quien utilizó la idea de los átomos a fin de explicar de forma sencilla las leyes de combinación de las sustancias químicas. A pesar del éxito de su enfoque, Dalton no parece que concibiese a los átomos como constituyentes reales de la materia, por lo que su teoría ejerció poca influencia en la consolidación de la teoría cinético-molecular.

³ George Sarton. *Historia de la Ciencia*, Editorial Universitaria de Buenos Aires. Vol. 1, p. 314 (1965).

Mientras que, con el paso del tiempo, los detalles de la teoría expuesta por Lucrecio quedaron reducidos a meras curiosidades eruditas, no puede decirse que ocurriera lo mismo con las ideas básicas de Leucipo y Demócrito porque, de hecho, el atomismo nunca llegó a desaparecer por completo y sus ideas, transmitidas por los comentaristas y filósofos árabes de la época medieval, volverán a florecer de nuevo tanto en los intentos de refutarlas por parte de los filósofos escolásticos, quienes las consideraban contrarias al dogma de la transubstanciación, como en los escritos de Giordano Bruno (1548-1600), Francis Bacon (1561-1626) o Petrus Gassendi (1592-1655). Poco después, el rastro vuelve a aparecer, nítido, cuando Isaac Newton (1642-1727), tras explicar las leyes del movimiento planetario mediante el recurso a fuerzas entre partículas puntuales dotadas de inercia, nos confiesa, a finales del siglo XVII, que:

Me parece probable que, en el comienzo, Dios formase la materia como partículas sólidas, masivas, duras, impenetrables y móviles, de tales formas y tamaños y otras propiedades, y en tales proporciones como fuera más conveniente para los fines para los que las formó; y que esas partículas primitivas, siendo sólidas, son más duras que cualquiera de los cuerpos porosos por ellas constituidos; tan duras de hecho que no pueden ser rotas en pedazos; no pudiendo ninguna potencia ordinaria dividir lo que el mismo Dios hizo único en la primera creación⁴.

En el siglo XVII, el trabajo de Galileo Galilei (1564-1642) y el del propio Newton acabó por generar una nueva visión del mundo según la cual los elementos primarios de la materia que constituye el universo físico siguen leyes inteligibles, cuya verdadera formulación exige expresiones matemáticas. En esta concepción escuchamos el eco de los antiguos "fisiólogos" jónicos, pero ahora el contexto ha cambiado, porque la ciencia tiene a su disposición el cálculo diferencial; el lenguaje que permite ir más allá de las descripciones cualitativas.

La nueva interpretación mecánica del universo alentó, como no podía ser de otra forma, la aparición de diversos modelos atomísticos de la materia pero de ninguno de ellos puede decirse que constituyese lo que hoy entendemos por una verdadera teoría cinética. Las especulaciones sobre una explicación molecular de las leyes de los gases, llevadas a cabo por Jakob Bernouilli (1654-1705) y por su hermano Jo-

⁴ Isaac Newton. *Opticks*, London (1704), p. 221.

hann (1667-1748) son significativas a este respecto. Sin embargo, los avances en este periodo no proceden de dicho enfoque especulativo sino del propio trabajo experimental que condujo a la formulación de las leyes de los gases: Torricelli, Pascal, Boyle y otros muchos establecerán más allá de toda duda que el aire es un fluido, lo que permitirá la identificación de su peso como el causante de la presión atmosférica y el desplazamiento definitivo del *horror vacui* como explicación racional de muchos fenómenos *pneumáticos*. El establecimiento de las leyes de los gases y, en especial de la llamada ley de Boyle⁵, una relación de proporcionalidad entre la presión de un gas y su densidad, fue una consecuencia directa de la explotación de las nuevas posibilidades experimentales que brindaba la tecnología del vacío.

En lo que se refiere al problema de la naturaleza del calor, la primera teoría que alcanzó un cierto predicamento general fue aquella según la cual el calor es una substancia o fluido, al que Lavoisier dio el nombre de calórico, compuesta por partículas que se repelen entre sí pero que se ven atraídas por los átomos de la materia ordinaria. El calórico tiende entonces a difundirse y pasar de un objeto a otro, introduciéndose por los intersticios de los cuerpos materiales. Cada partícula de materia estaría entonces rodeada de una atmósfera de calórico que introduciría una cierta repulsión entre las partículas, contrarrestando de esa forma la fuerza gravitatoria entre ellas. Admitiendo que la densidad de esa atmósfera calórica es proporcional a la temperatura del cuerpo es muy fácil explicar, por ejemplo, que el responsable de la dilatación de un cuerpo es el aumento en la repulsión entre las partículas materiales, efecto que se sigue del aumento de densidad del fluido calórico al aumentar la temperatura. Por otra parte, la fricción produciría simplemente la liberación de una parte de ese, aparentemente inagotable, calor latente almacenado en los cuerpos.

La teoría del calórico, por lo tanto, no se oponía a la concepción atomística de la materia; de hecho estaba dentro de esa misma tradición. Tenemos ocasión de comprobar aquí cuán profundamente se habían incorporado ya las imágenes de los antiguos atomistas al acervo de los científicos naturales: la idea de que el calor es una substancia llevaba inmediatamente a considerarlo compuesto por un cierto tipo de partículas. Es tentador establecer una comparación entre este mo-

⁵ En los textos anglosajones se suele hablar de la *ley de Power-Towneley-Boyle*, mientras que en los españoles se sigue empleando, debido a la influencia francesa, la expresión *ley de Boyle-Mariotte*, aunque parece probado que al abate Edme Mariotte (1620-1684) no se le puede atribuir una formulación independiente de dicha ley.

delo corpuscular del fluido calórico y el modelo similar del fluido gaseoso que está implícito en las ideas de Newton, entre otras razones porque éste tuvo que superar la visión alternativa de los partidarios del continuo.

En la actualidad es difícil sustraerse a la tentación de considerar la teoría del calórico como una mera especulación primitiva; sin embargo, esta idea del calor como una sustancia permitió a Pierre Simon de Laplace (1749-1827) tanto reobtener las leyes de los gases sin hacer referencia a ningún modelo atomístico de la materia como formular la mejor explicación de los fenómenos de capilaridad hasta el trabajo de van der Waals de 1873. Igualmente habría que notar que los trabajos de Rumford y Davy, reconocidos actualmente como las primeras objeciones serias a dicha teoría, no fueron considerados por entonces como tales. Se ha insistido en que esto se debió a la falta de una teoría alternativa, pero esta hipótesis, aunque probablemente correcta, parece insuficiente porque, como veremos más adelante, aún en los siglos en que la idea de una sustancia calórica era dominante, una cierta corriente de pensamiento no dejó de insistir en la idea del calor como movimiento. Esto será particularmente evidente, en primer lugar, en la obra de Daniel Bernouilli y después, en el ataque a las ideas de Laplace llevado a cabo por John Herapath a comienzo del siglo XIX.

Las primeras teorías cinéticas, esto es, los primeros intentos de abordar el estudio cuantitativo de las leyes macroscópicas mediante el empleo de modelos mecánicos basados en la supuesta existencia de constituyentes microscópicos en movimiento (corpúsculos o partículas materiales), tienen que ver con el estudio de los gases perfectos. El inglés Robert Boyle enunció en 1660 una teoría según la cual, la *elasticidad* del aire, esto es, su capacidad para resistir el peso de la columna de mercurio en los experimentos de Torricelli, se debe a su constitución microscópica. Para Boyle, el aire está compuesto de una multitud de pequeños cuerpos que, descansando unos sobre otros, actúan como muelles, y cuya capacidad para resistir la compresión es la que le proporciona su elasticidad. El modelo elástico, aunque esté lejos de constituir una verdadera teoría cinética, ya nos presenta la línea maestra del razonamiento atomístico moderno, según el cual se pueden explicar cuantitativamente los fenómenos macroscópicos sobre la base de la constitución microscópica de los cuerpos. También Newton en sus *Principia* (1687) dedicó un breve espacio a discutir las consecuencias de algunas hipótesis sobre las fuerzas de interacción inter-

moleculares. La suposición de que los átomos interactúan entre sí mediante fuerzas inversamente proporcionales a las distancias entre ellos le permitió reobtener la ley de Boyle. Sin embargo, el modelo según el cual un gas está compuesto por partículas interactivas era tan avanzado en la época de Newton como en la posterior de Boscovich y ambos fueron incapaces de sacar consecuencias concretas de ella. Los físicos tardarían más de dos siglos en redescubrir y volver operativa dicha idea: hasta los trabajos de Clausius, el explicar las propiedades de los gases no exigía otra cosa que un modelo de partículas independientes.

DANIEL BERNOUILLI

Probablemente, la primera estimación cuantitativa de las propiedades de un cuerpo basada en su constitución molecular es la que aparece en la *Phoronomia* de J. Hermann (1716). Este autor afirma en la proposición LXXXV de su libro que *el calor en cuerpos de análoga composición está en la razón compuesta de la densidad del cuerpo caliente y el cuadrado de la agitación de sus partículas (Calor, caeteris paribus, est in composita ratione ex densitate corporis calidi, & duplicata ratione agitationis particularum ejusdem)*⁶. Lo que Hermann llama calor es lo que nosotros llamamos presión y la agitación de las partículas es la *celeritas media inter celeritates particulares*, es decir la velocidad (escalar) media de las moléculas del cuerpo. La proposición anterior establece, entonces, la proporcionalidad directa entre la presión, la densidad y el cuadrado de la velocidad media de las partículas del gas. No queda claro, sin embargo, a qué se refiere cuando habla de esta última magnitud ya que, aunque podamos suponer que Hermann admitía una cierta distribución de velocidades para las partículas, no hace mención explícita de ello. Aún así, puede afirmarse que él fue el primero en crear una teoría cinética que a la vez contenía ciertos rasgos estadísticos. Este doble fundamento, que es la característica de la teoría cinética moderna, no será corriente hasta casi un siglo más tarde.

La temprana formulación de Hermann es especialmente notable pero ha sido poco valorada desde un punto de vista histórico, ya que generalmente se suele afirmar que los primeros que formularon una verdadera teoría cinética fueron Leonhard Euler en 1729 y Daniel Ber-

⁶ J. Hermann. *Phoronomia*, Amsterdam (1716), p. 376.

nouilli en 1738. El primero de ellos intentó explicar diversas propiedades del aire a partir del análisis de la teoría de los torbellinos de Descartes que había llevado a cabo Johann Bernouilli. Para ello, supuso que las partículas que forman el aire son esferas en rotación compuestas por un alma de éter alrededor de la cual hay una capa de la verdadera sustancia del aire, capa que se encuentra a su vez rodeada por otra capa de agua. Mientras que la presión es una manifestación de la fuerza centrífuga asociada con el movimiento de rotación, la humedad para Euler está ligada a la proporción entre el agua de la capa externa y la verdadera sustancia del aire de la capa intermedia. Euler también supuso que la velocidad lineal asociada con el movimiento de rotación es la misma para todas las moléculas y empleando esta hipótesis derivó una relación entre dicha velocidad y la densidad, presión y humedad del aire. Para el aire seco, dicha relación es esencialmente la de proporcionalidad entre presión y densidad.

Aunque haya sido muy valorada por historiadores como Triesdell, no cabe decir que el modelo euleriano de la constitución molecular del aire constituya un antecedente válido de las ideas modernas. De hecho, la línea de trabajo del gran matemático suizo en cuestiones de física proporciona uno de los ejemplos característicos del punto de vista opuesto a las concepciones atomistas, ya que tiende a descartar la estructura molecular de los cuerpos en favor de una descripción en términos de un continuo. En cualquier caso, no parece que el modelo de Euler tuviese influencia en la física posterior.

El caso de Daniel Bernouilli (1700-1782) es totalmente diferente porque la influencia de sus ideas acerca de la constitución molecular de los fluidos resultará evidente, todavía, en el trabajo del propio Maxwell a finales del siglo XIX. Bernouilli, hijo de Johann y sobrino de Jakob, pertenecía a una distinguida familia oriunda de Amberes que había emigrado a Ginebra en 1583 huyendo de las persecuciones religiosas contra los hugonotes. Como Euler, estuvo empleado algún tiempo como profesor de matemáticas en la corte de San Petersburgo y, más tarde, ya en Basilea, se dedicó a la anatomía, la botánica y la física. Se le considera, junto al propio Euler, como el fundador de la Física Matemática. En el año 1738, publicó un tratado sobre mecánica de fluidos, denominado *Hydrodynamica*⁷, en el que dedicaba cuatro

⁷ D. Bernouilli. *Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum comentarii*. Argentorati, Strasburg (1738).

páginas a tratar las propiedades y movimientos del aire mediante un modelo corpuscular.

Tras definir lo que denomina fluidos elásticos como aquellos que poseen peso, se expanden en todas direcciones a menos que se les confine y se les puede comprimir, imagina que tal fluido no es otra cosa que un conjunto infinito de *corpúsculos* esféricos diminutos que se mantienen en movimiento de traslación incesante y muy rápido. Este es, esencialmente, el modelo de Newton o Hermann: lo característico de la aportación de Bernouilli consiste en haber establecido de forma explícita el origen cinético de la presión. En efecto, para Bernouilli, cuando se confina a un fluido en un recipiente cerrado por un pistón sobre el que actúa un peso, son los choques de dichas partículas contra la pared del émbolo los que mantienen a éste en su lugar, de forma que si se retirase el peso, el fluido se expandiría y si se aumentase, se comprimiría volviéndose más denso. No hay en el razonamiento, por tanto, ninguna referencia a supuestas fuerzas interparticulares. A continuación, Bernouilli razona que si se aumenta el peso del pistón, el fluido se comprime hasta que la altura del émbolo sobre el fondo del recipiente se vuelve una fracción de su altura original. Tras la compresión, atribuye el aumento de presión en el interior del recipiente tanto al hecho de que el número de partículas se haya vuelto mayor en proporción al menor volumen en que se ven confinadas como a que las partículas del gas llevan a cabo impactos más frecuentes contra las paredes del émbolo. Partiendo de ese modelo, Bernouilli es capaz de elaborar un tratamiento cuantitativo que le lleva a la ley de proporcionalidad entre presión, la densidad y el cuadrado de la velocidad de las partículas del gas.

A continuación analiza el hecho experimental de que la presión del gas pueda aumentarse mediante un aumento de temperatura. Comienza afirmando que el calor está relacionado con el movimiento de las partículas, pero lo hace de pasada, como si dicha idea fuese ya del dominio común:

*Como es bien conocido que el calor se intensifica cuando el movimiento interno de las partículas aumenta, se sigue que cualquier aumento en la presión de aire que no haya cambiado de volumen indica un más intenso movimiento de sus partículas*⁸.

⁸ *Ibidem*, p. 202

Sacando las consecuencias lógicas de esta idea, Bernouilli razona que cuanto mayor sea la temperatura del gas, mayor peso habremos de ponerle al pistón para contrarrestar el más violento movimiento de las partículas. Nada hay en su línea de razonamiento, sin embargo, que haga pensar en una posible distribución de velocidades moleculares, lo que ha sido interpretado frecuentemente en el sentido de que suponía que las velocidades de todas las partículas eran iguales.

Concretando, afirma que no es difícil ver que el peso que deberemos ponerle al émbolo debe variar como el cuadrado de la velocidad de las partículas, pues al aumentar la velocidad, aumentan igualmente el número de impactos y la intensidad de cada uno de ellos. El razonamiento le permite concluir que el aumento de la presión con la temperatura es proporcional a la densidad (la llamada ley de Amontons).

Las ideas de Hermann, Euler y Bernouilli concernientes a la naturaleza microscópica de los fluidos elásticos, no suscitaron más que un interés puramente marginal, aunque no faltasen intentos inmediatamente posteriores de elaborar una imagen cinético-molecular de los gases. Así, en la década de 1750, el ruso Lomonosov (1711-1765) escribió sobre las energías de traslación, rotación y vibración de las moléculas y especuló sobre el efecto que tendrían las colisiones entre ellas. En 1758, el influyente jesuita dalmata Roger Joseph Boscovich (1711-1787), en el que puede considerarse como el intento más ambicioso de sistematizar el conocimiento científico del siglo XVIII, consideraba a las moléculas como puntos matemáticos y conjeturaba la existencia de complejas fuerzas intermoleculares que eran repulsivas o atractivas dependiendo de la distancia entre las partículas. El problema con las ideas de Boscovich es que aparecían en el contexto de especulaciones confusas y, por tanto, sus posibilidades como modelos moleculares capaces de producir resultados cuantitativos eran inexistentes; a pesar de la influencia que tuvieron en su siglo, debiera considerarse las simplemente como brillantes intuiciones. Algo parecido puede decirse de la teoría del ginebrino George Louis Le Sage (1724-1803) sobre las partículas *ultramundanas*. Aún así, muchas de estas teorías que hoy parecen meras especulaciones sin sentido jugaron un papel determinante en el rumbo posterior de las investigaciones. El caso de Boscovich es especialmente significativo, en primer lugar porque él fue el primero en afirmar, en contra de sus contemporáneos, que la naturaleza de los átomos que forman los sólidos y los líquidos es la misma que la de los que forman los gases y, en segundo lugar, porque su intento de establecer una teoría unificada de los fenómenos físicos ha-

sada en la *Naturphilosophie* kantiana, influenciará a grandes científicos del siglo XIX como Faraday, Oersted o Lord Kelvin, sin que por ello dejara de olvidarse a comienzos del siglo siguiente.

JOHN HERAPATH

En 1816, un oscuro maestro inglés llamado John Herapath (1790-1869) publicó en los *Annals of Philosophy*, una pequeña revista privada, un trabajo titulado *Acerca de las propiedades físicas de los gases*⁹, en el que obtenía las leyes de los gases ideales mediante un modelo esencialmente igual al de Bernoulli. Herapath identificaba el calor con el movimiento interno pero cometió el error de definir la temperatura como proporcional a la velocidad de las partículas en vez de a su energía cinética. A pesar de ello, puede decirse que fue el primero en demostrar que una teoría cinética es capaz de proporcionar explicaciones sencillas a fenómenos tales como los cambios de estado, la difusión o la propagación del sonido en el aire. En 1820, Herapath presentó a la Royal Society su trabajo. Una investigación matemática sobre las causas, leyes, y principales fenómenos del calor, gases, gravitación, etc., con la intención de que se publicase en las *Philosophical Transactions*. Aunque el trabajo fue presentado ante la Sociedad por Davies Gilbert, uno de sus miembros, se lo juzgó impropio de ser publicado en las *Transactions* por su carácter excesivamente teórico, o como dijo el propio Gilbert en su carta de contestación a Herapath, por ser algo tan abstruso y metafísico.

Cuando algún tiempo después, el famoso científico sir Humphry Davy fue elegido presidente de la Royal Society, Herapath volvió a presentar una versión revisada del trabajo junto con los resultados de algunos experimentos que avalaban su teoría. Aparentemente la situación era favorable porque Davy era un atomista convencido, pero el trabajo se vio de nuevo rechazado, entre otras razones, por la opinión contraria del propio Davy, quien lo creía demasiado especulativo. Herapath retiró el trabajo después de un largo forcejeo epistolar con Davy y lo publicó de nuevo en los *Annals of Philosophy*¹⁰.

⁹ J. Herapath. "On the physical properties of gases", *Annals of Philos.* Vol.1(8), pp. 56-60 (1816).

¹⁰ J. Herapath. "A mathematical investigation into the causes, laws, and principal phenomena of heat, gases, gravitation, etc." *Annals of Philos.* Vol. 2(1), pp. 273-293, 340-351, 401-416. (1821).

Tiempo después, en 1826, Herapath comenzó a escribir largas cartas al *Times* explicando su posición y, en su afán por polemizar, acabó poniendo en evidencia a Davy al citar extractos de correspondencia privada en los que éste no quedaba en buen lugar. Los intentos infructuosos de conseguir eco oficial para sus investigaciones duraron hasta el año 1828, cuando en su última carta al periódico manifestó que *esperaba no volver a aparecer en público para tratar de este asunto*. Condenado al ostracismo por la opinión oficial y habiéndosele cerrado incluso las puertas de las pequeñas revistas no oficiales, Herapath no alcanzó a ejercer influencia entre sus contemporáneos si exceptuamos a Joule, quién habiendo comenzado en 1848 a publicar trabajos sobre el tema, confesaba haber sido influido por las ideas contenidas en el libro *Mathematical Physics*, publicado por Herapath en 1847.

Aunque aceptemos de entrada que los problemas de naturaleza personal obstaculizaron la publicación de las ideas de Herapath, está claro que fue otro tipo de dificultades de carácter más profundo las que impidieron su difusión. ¿Cómo es posible que ideas que, en el fondo, eran las que había desarrollado Bernouilli un siglo antes sin encontrar oposición, ahora fuesen consideradas altamente especulativas incluso por científicos de clara adscripción al atomismo?

Una aproximación a este problema ha de tener necesariamente en cuenta que las teorías de Bernouilli o Euler, por ejemplo, se propusieron a la consideración pública en el contexto de trabajos en los que se empleaba una perspectiva mucho más amplia. Como hemos visto, las concepciones cinético-moleculares del primero aparecen como una simple disgresión en un tratado de naturaleza completamente aplicada, en el que, entre otras ideas fundamentales, Bernouilli enuncia la ecuación que hoy día lleva su nombre, una de las primeras formulaciones del principio de conservación de la energía y, al tiempo, una de las ecuaciones fundamentales de la Hidráulica. Sin duda, la concepción de que el calor no es otra cosa que movimiento era inaceptable en su época, un tiempo dominado por la idea substancialista, sin embargo, el contexto en que Bernouilli formulaba y divulgaba sus ideas ocultó completamente la fuerte carga revolucionaria que éstas poseían. En otras palabras, a Bernouilli se le podía permitir que especulase un poco. De hecho, sus resultados sobre mecánica de fluidos fueron incorporados inmediatamente al saber científico y pasaron al dominio común de la tecnología de la época mientras que sus ideas sobre la naturaleza corpuscular de los gases y sobre el origen mecánico del ca-

lor fueron simplemente olvidadas hasta que el paradigma dominante no comenzó a ser puesto bajo escrutinio.

El drama de Herapath consiste en haber redescubierto esas ideas un poco demasiado pronto; cuando estaba llegando su tiempo pero todavía no había llegado. Era virtualmente imposible que los hombres de ciencia adoptaran las ideas de Herapath sobre la constitución molecular mientras la teoría del calórico estuviese vigente. Sin embargo, a principios del siglo XIX el panorama había cambiado respecto a la época de Bernouilli y la hipótesis de que el calor no es otra cosa que movimiento *microscópico* ya no era una especulación más o menos imaginativa; ahora se trataba de la teoría alternativa que luchaba por imponerse y desbancar a las ideas establecidas y como tal fue tratada, analizada y sometida a escrutinio, incluso por aquellos que, desde otras posiciones o disciplinas, estaban contribuyendo a derribar el antiguo paradigma. Ese momento es crucial para una nueva teoría y en él juegan usualmente un papel más relevante aquellos que consiguen imponer las nuevas ideas que quienes las habían formulado originalmente. En este caso, como en tantos otros, el abandono de las viejas ideas y el triunfo de las nuevas fue casi repentino, una vez que se consiguió vencer la inercia que tienen las ideas antiguas; incluso antes de la muerte de Herapath en 1869, la nueva teoría cinético-molecular por la que éste tanto había luchado estaba relativamente asentada y era respetada en el seno de la comunidad científica de la época.

Hay otra razón que ayuda a explicar el rechazo a las ideas de Herapath. Algo que tiene que ver con el ejercicio de la actividad científica como profesión. En el siglo XIX, las sociedades científicas se encuentran ya firmemente establecidas como guardianas de la ciencia ortodoxa, existe la profesión de físico y los resultados de la investigación ya no se publican mediante largos tratados, sino a través de artículos en revistas que, en cierto modo, se juegan el prestigio al publicarlos. La actividad científica ha cambiado su *status* en la sociedad; ya no corresponde a una extensión de la actividad filosófica tradicional, e incluso el nombre de Filosofía Natural ha dejado de estar asociado con la física, como ocurría en tiempos de Newton. No cabe duda que Herapath se enfrentó abiertamente a la ciencia oficial y no sólo desde el punto de vista de las ideas sino también porque puso en cuestión su organización y su estructura jerárquica.

En este último sentido, el caso del escocés James Prescott Joule podía haber sido similar al de su contemporáneo Herapath. Joule era como éste un completo *outsider* en el *establishment* científico de su

época pero encontró un valedor enérgico y constante en William Thompson (Lord Kelvin) y las cosas le rodaron mucho mejor. Había publicado trabajos sobre la naturaleza del calor desde 1844, empleando un modelo microscópico que recordaba al de Euler. Sin embargo, la lectura de un libro de Herapath le indujo a adoptar la hipótesis de que es el movimiento de translación y no el de rotación el responsable de las propiedades de los gases. Concluyó que la temperatura del gas es proporcional al cuadrado de la velocidad y por tanto a la *vis viva* de las partículas, esto es a su energía cinética. Como era de esperar, los trabajos de Joule sobre teoría cinética tampoco ejercieron influencia en los círculos científicos de su época.

JAMES WATERSTON

Si el caso de Herapath es dramático, cabría calificar de trágico el destino de John James Waterston (1811-1883), porque, él sí que se quedó literalmente en el umbral de la nueva época. Ya en 1843, Waterston había publicado en Edimburgo, de forma privada, un pequeño libro titulado *Pensamientos sobre las funciones mentales*, en el cual, sorprendentemente en un libro con ese título, incluía unas breves notas resumiendo su teoría sobre la constitución física de los sistemas gaseosos. En uno de ellas se introducía por primera vez el *camino libre medio*, una de los conceptos capitales de la teoría cinética y una idea que aún se sigue asociando con el nombre de Clausius. Como era previsible, dada la forma en que habían visto la luz, las ideas de Waterston no tuvieron ninguna repercusión entre las personas que se ocupaban de estos temas. El 11 de diciembre de 1845, es decir, seis años antes de que se publicara el trabajo de Joule, Waterston envió a la Royal Society un trabajo titulado *Acerca de la física de los medios compuestos por moléculas libres y perfectamente elásticas en movimiento*. En un resumen de dicho trabajo que la Royal Society publicó en 1846, podemos leer que Waterston se ocupa, mediante un modelo parecido al de Bernouilli, de problemas tales como las leyes de los gases, la condensación y dilatación de los mismos y también de otras cuestiones como el equilibrio de la atmósfera y la velocidad del sonido. Más descriptivo aún es un segundo resumen, publicado por 1851 con ocasión de una reunión de la *British Association for the Advancement of Science* y en el que bajo el título *Acerca de una teoría general de los gases*, se afirma que

*El autor deduce las propiedades de los gases, en lo que respecta al calor y la elasticidad, a partir de una forma peculiar de la teoría que afirma que el calor consiste en pequeños pero rápidos movimientos de las partículas de materia. Concibe que los átomos de un gas, siendo perfectamente elásticos, están en continuo movimiento en todas direcciones, estando limitados a permanecer en el interior de un espacio limitado por las colisiones entre ellos y con las partículas de los cuerpos que lo rodean. La vis viva de dichos movimientos en una porción dada de gas constituye la cantidad de calor contenida en ella*¹¹.

El autor muestra que el resultado de este estado de movimiento debe proporcionar al gas una elasticidad proporcional a la media del cuadrado de la velocidad de los movimientos moleculares, y a la masa total contenida en la unidad de volumen; es decir, a la densidad del medio. Esta elasticidad, en un gas dado, es la medida de la temperatura. El equilibrio de presión y de calor entre dos gases tiene lugar cuando el número de átomos en la unidad de volumen es igual, y la *vis viva* de cada átomo es igual. La temperatura, por lo tanto, en todos los gases, es proporcional a la masa de un átomo multiplicada por la media del cuadrado de la velocidad de los movimientos moleculares, siendo medida a partir de un *cero absoluto* situado 491° por debajo del cero de la escala Fahrenheit. Si se comprime un gas, la potencia mecánica gastada en esta compresión es transferida a las moléculas del gas aumentando su *vis viva*; y correspondientemente, cuando el gas se expande, la potencia mecánica suministrada durante la expansión se obtiene a expensas de la *vis viva* de los átomos. Este principio explica las variaciones de temperatura producidas por la expansión y condensación de los gases, las leyes de su calor específico bajo diferentes circunstancias, y la velocidad del sonido en ellos. El descenso de temperatura encontrado al ascender en la atmósfera, en ausencia de perturbaciones debidas a radiación o a otras causas, debiera coincidir con la *vis viva* necesaria para elevar a los átomos a través de una altura dada.

*El autor muestra que la velocidad con la que los átomos se difunden es proporcional a la poseída por dichos átomos según sus hipótesis*¹².

¹¹ J. J. Waterston. "On a General Theory of Gases". *Rep. Brit. Assn. Adv. Sci.*, p.6, (1851).

¹² *Ibidem*.

En este breve resumen –que no fue escrito por el propio Waterston–, puede apreciarse que, aunque el enfoque es fundamentalmente el de Bernouilli y Herapath, se introduce de nuevo un planteamiento estadístico, ya que aparece de nuevo la velocidad media de las partículas del gas. Waterston obtiene la proporcionalidad correcta entre la temperatura del gas y la media del cuadrado de la velocidad de las partículas que lo forman; de hecho este texto es el primero en que aparece la moderna definición de temperatura basada en la estructura molecular de la materia¹³, aunque ya Herapath había apuntado esa posibilidad. Waterston es también el primero en vislumbrar el llamado *teorema de equipartición de la energía* porque su afirmación de que la temperatura es, en todos los gases, proporcional a la masa de un átomo multiplicada por la media del cuadrado de la velocidad es el caso más sencillo de aplicación de dicho principio. Según las reglas de la época, los trabajos sometidos a consideración de la Royal Society por personas que no fueran miembros de ella podían ser *leídos*, esto es, presentados oficialmente, siempre que estuviesen avalados por un miembro, pero pasaban a ser propiedad de la Sociedad ya fuera que se publicasen o que se vieran rechazados. El caso es que el de Waterston fue informado desfavorablemente por los dos expertos que lo analizaron y, aunque se leyó en una sesión de la Royal Society en marzo de 1846, no apareció en forma impresa, permaneciendo en los archivos hasta el año 1893, en que Lord Rayleigh lo publicó, con anotaciones suyas, en las *Philosophical Transactions*¹⁴.

Es sorprendente que Waterston no hiciese patente ninguna pretensión de prioridad cuando algunos años más tarde, la teoría cinética se convirtió en un campo respetable y reconocido del quehacer científico y las ideas que había desarrollado comenzaron a ser reobtenidas por otras personas. Quizá fue por razón de su fe religiosa fundamentalista (al igual que Faraday, era sandemaniano), o por el compromiso moral al que se consideraba atado por el mero hecho de haber presentado el trabajo. Pero esta renuncia a hacer valer su derecho moral no significa que no se sintiese agraviado por el *establishment* científico: hasta su muerte, Waterston mantuvo una actitud

¹³ En el resumen, el cero absoluto aparece situado 491° por debajo del cero de la escala Fahrenheit, lo cual es equivocado. Debe tratarse de una errata porque, en otros trabajos de Waterston se da 461°, que es la cifra correcta.

¹⁴ J. J. Waterston. "On the physics of media that are composed of free and perfectly elastic molecules in a state of motion". *Phil. Trans. Roy. Soc. London*. Vol. 183A, pp. 1-79. (1893).

extraordinariamente crítica contra los científicos reconocidos de su tiempo y especialmente contra Lord Kelvin aunque, por lo que sabemos, éste nada tuvo que ver con la negativa de la Royal Society a publicar el trabajo de Waterston.

Es cierto que las ideas de Waterston fueron acogidas con total incompreensión por los representantes de la ciencia oficial de su país, como se refleja claramente en los informes de los *expertos* que revisaron su artículo de 1846. Sin embargo, este hecho no puede deberse a que esas ideas fuesen excesivamente especulativas para su tiempo, como demuestra la acogida al artículo publicado por Krönig sólo unos años más tarde. Tampoco parece que los científicos que rechazaron la publicación encontrasen errores en el trabajo de Waterston, puesto que sus argumentos no entran en esos detalles. Nos encontramos aquí, de nuevo, con un obstáculo de origen sociológico: la incapacidad académica para acoger las nuevas ideas si éstas vienen de fuera de los círculos reconocidos. Esta explicación gana peso cuando tenemos en cuenta que en la década de 1850 era ya patente un cambio en la actitud de rechazo a las ideas cinético-moleculares, hecho que no podía ser ignorado por los miembros del *establishment* científico británico. De forma no tan sorprendente como pudiera parecer en un principio, el trabajo que dotó de credibilidad a las ideas de la teoría cinética no fue publicado en Gran Bretaña, el país donde habían tenido su desarrollo final las ideas básicas, sino en Alemania.

KARL KRÖNIG Y RUDOLF CLAUSIUS

Karl Krönig es, probablemente, la contrafigura de Waterston: mientras que éste era un oficial del servicio civil británico en la India, un *amateur* en el campo de la ciencia, aquél era un químico de prestigio, profesor en la *Realschule* de Berlín y con cierta influencia en la *Physikalische Gesellschaft* de la capital alemana. En 1856, Krönig publicó un pequeño trabajo en los *Annalen der Physik* en el que elaboraba una teoría cinética reintroduciendo, aparentemente de manera independiente, las ideas de Bernouilli y Herapath pero sin ir realmente más lejos que ellos, salvo en lo que se refiere al carácter estadístico de la descripción. Su estrategia para obtener expresiones de las magnitudes macroscópicas del gas mediante un modelo microscópico consistía en reemplazar el desconocido movimiento real de las moléculas por un modelo que permitiera el cálculo cuantitativo, ya que, aunque el camino de cada molécula debía ser tan irregular como para desafiar

todo cálculo, siguiendo las leyes de la teoría de la probabilidad, se podría sustituir dicho movimiento irregular por uno dotado de una regularidad completa.

Por lo demás, el modelo mecánico de gas empleado por Krönig se basaba en admitir que un gas químicamente homogéneo puede describirse como un conjunto de esferas perfectamente elásticas que se mueven aleatoriamente, de modo que en cada instante de tiempo, el número de las que se mueven en la dirección de un eje coordinado es, por término medio, igual al de las que se mueven según cualquiera de los otros ejes. Dado que el volumen ocupado por las moléculas es despreciable con respecto al volumen del recipiente, aquéllas se pueden considerar como masas puntuales que se comportan en los choques como esferas duras, de manera que las fuerzas intermoleculares entre ellas sólo se ponen de manifiesto en el instante en que entran en contacto. Tras cada colisión, la molécula se moverá con velocidad uniforme hasta que vuelva a chocar o golpee la pared del recipiente. Por otra parte, dado que un gas aislado en un recipiente no muestra ninguna tendencia a perder su presión, Krönig razonaba que los choques entre las moléculas y los de éstas con las paredes debían ser perfectamente elásticos.

Empleando su modelo, Krönig calculó la cantidad de movimiento media transferida por las moléculas a la pared y eso le permitió obtener la presión que ejerce el gas. Sin embargo, su resultado resultó equivocado, entre otras cosas porque calculó mal la transferencia elemental de cantidad de movimiento que se produce cuando una molécula rebota contra la pared. A pesar de éste y otros errores y de que ninguna de sus ideas era realmente nueva, Krönig triunfó allí donde Herapath, Joule y Waterston habían fracasado sólo unos años antes: su trabajo rompería por fin la barrera de la indiferencia y de los prejuicios y sería leído y respetado, siendo considerado durante mucho tiempo como el punto de partida de la teoría cinética moderna.

La publicación del trabajo de Krönig tuvo la consecuencia adicional de proporcionar el estímulo para que el profesor Rudolf Clausius, ya por entonces un científico muy respetado por sus contribuciones a la Termodinámica, se decidiese a dar a la imprenta sus propias investigaciones sobre el tema. En el artículo del profesor berlinés, Clausius encontró algunas de las ideas que él mismo había estado madurando pero que no había publicado, probablemente, porque le parecían demasiado especulativas. En 1857, se decidió a elaborarlas y publicó un trabajo cuyo mero título: *Sobre la naturaleza del movimiento al que*

*llamamos calor*¹⁵, explicitaba de forma condensada el nuevo paradigma cinético-molecular. En dicho trabajo, Clausius generalizaba los modelos anteriores estableciendo que las partículas del gas podían tener sus velocidades dirigidas según direcciones arbitrarias en vez de moverse sólo según los ejes coordenados. Clausius supuso también de forma explícita que (para un gas en equilibrio térmico) la distribución espacial de las moléculas es homogénea y por lo tanto su densidad es la misma en todo el recipiente. También admitió que la distribución de velocidades de las partículas del gas es homogénea e isotrópica, de modo que si en cualquier lugar del recipiente tomásemos un elemento de volumen que contuviese un número suficiente de moléculas, encontraríamos que todas las direcciones de la velocidad estarían representadas con igual frecuencia.

Clausius, sin embargo, no llegará a establecer una hipótesis sobre la forma funcional de la distribución de las velocidades moleculares en el gas y, obviamente, no será capaz de calcularla explícitamente. Se limitará a afirmar que las moléculas de un gas tienen una distribución de velocidades bien definida (aunque él la desconozca). Más adelante necesitará suponer además que dicha distribución es estrecha, es decir, que debe tener poca dispersión respecto del valor más probable. Por lo demás, Clausius nunca empleará un razonamiento de *tipo probabilístico*, razonando que a efectos del cálculo, puede sustituirse la desconocida distribución de velocidades por una velocidad promedio que se asigna a todas las moléculas por igual, y que debe ser escogida de tal forma que la energía cinética total del sistema sea igual a la que correspondería a la verdadera distribución de velocidades. Otro gran avance respecto a sus predecesores consistió en suponer que las partículas del gas podían tener energía asociada a la rotación y vibración además de la asociada al movimiento de traslación. Clausius fue, por lo tanto, el primero en enunciar una teoría cinética de los gases ideales poliatómicos.

Las contribuciones de Clausius a la teoría cinética son relevantes aunque se quedase casi siempre en un nivel semi-cuantitativo. Sus hipótesis le permitieron rederivar la ecuación de estado de los gases ideales y obtener la primera evaluación cuantitativa de la velocidad de difusión.

¹⁵ R. Clausius. "Über die Art der Bewegung welche wir Wärme nennen". *Annalen der Physik*, Vol. 100, pp. 353-380 (1857).

Este último aspecto es importante porque implica un nuevo avance en el refinamiento del modelo cinético de un gas. El meteorólogo holandés C. H. D. Buys-Ballot (1817-1890) afirmaba que las velocidades de varios cientos de metros por segundo que la teoría cinética asignaba a las partículas de un gas en las condiciones usuales de laboratorio eran incompatibles con el lento proceso de difusión de un gas en el seno de otro¹⁶. En efecto, tras abrir una botella de perfume en un rincón de una habitación, pasan varios minutos antes de que en la otra esquina se tenga constancia del olor. Pero durante este tiempo, las moléculas de perfume, estando animadas con las velocidades calculadas por la teoría cinética, tendrían que haber recorrido la distancia entre dichos lugares cientos de veces. Esta objeción no tenía en cuenta obviamente, el hecho de que las partículas de un gas se ven sometidas continuamente a procesos de colisión, cuyo efecto global es limitar su movimiento, convirtiéndolo en un proceso mucho más lento al que se da el nombre de difusión. La contribución más importante de Clausius a la teoría molecular del calor consiste en haber reconocido el papel fundamental que tienen las colisiones en la dinámica del gas. Él fue el primero en establecer una condición de caos molecular, esto es, una hipótesis sobre el número de colisiones que tienen lugar durante un intervalo de tiempo dado entre las partículas pertenecientes a dos grupos de velocidades diferentes que se encuentran en un determinado elemento de volumen. Esta idea, esencialmente idéntica a la famosa *hipótesis del caos molecular* (*Stosszahlansatz*) de Boltzmann, se convertiría en manos de éste en la noción esencial del tratamiento de la irreversibilidad en el marco de la teoría cinética. Al estudiar el efecto crucial de las colisiones en el proceso difusivo, Clausius reintrodujo y popularizó el concepto de *camino libre medio*, una magnitud asociada con la distancia que cabe esperar que recorra una partícula entre dos colisiones sucesivas. Este concepto llegaría a convertirse en una noción esencial en la teoría de los *fenómenos de transporte* en gases (difusión, conductividad térmica, viscosidad, etc.).

Las aparentemente ingenuas objeciones de Buys-Ballot ponen en primer plano otro aspecto importante de la resistencia al cambio de paradigma. Es evidente que la teoría de que los gases tienen una naturaleza corpuscular lleva implícita la idea de las colisiones interparticulares. Sin embargo, hasta el trabajo de Clausius, las colisiones de las

¹⁶ Herapath fue el primero en publicar una estimación del valor de estas velocidades.

partículas entre sí habían sido obviadas, incluso por aquellos que desarrollaron los modelos atomísticos; sólo las colisiones de las partículas con las paredes eran tenidas en cuenta como forma de explicar la presión del gas. Este hecho tiene sentido si pensamos que las primeras teorías cinéticas intentaban simplemente la fundamentación microscópica de las leyes de los llamados gases perfectos y, en este contexto, la introducción de las colisiones entre partículas no hacía sino oscurecer la argumentación. Por otra parte, está claro que para los primeros proponentes de teorías cinético-moleculares, el problema mecánico implícito en el tratamiento de las colisiones era inabordable. Los argumentos de Buys-Ballot deben ser entendidos en el contexto de un modelo en el que no se han trabajado todavía los aspectos de detalle que se encuentran implícitos en las hipótesis de partida. Son precisamente estas objeciones las que hacen que el trabajo llevado a cabo para contestarlas termine por asentar la teoría y establezca sus límites de validez.

Los trabajos de Clausius añadieron un prestigio considerable a las ideas cinético-moleculares y prepararon el camino para que James Clerk Maxwell (1831-1879) utilizara su formidable capacidad para el tratamiento matemático y, tras citar a Bernouilli como el antecedente más antiguo de sus ideas, calculase explícitamente la forma funcional que tiene la distribución de velocidades de un gas monoatómico en equilibrio. Hay que decir, sin embargo, que antes de abordar su trabajo, Maxwell no estaba convencido de que las ideas cinético-moleculares tuvieran futuro. En una carta enviada a sir George Stokes el 30 de mayo de 1859, Maxwell le resumía el resultado de sus investigaciones sobre las ideas recién publicadas de Clausius:

He visto en el Philosophical Magazine de febrero de 1859, un artículo de Clausius sobre "el camino libre medio de una partícula de aire o gas entre colisiones sucesivas", bajo la hipótesis de que la elasticidad del gas se debe a la velocidad de sus partículas y de que la trayectoria de cada una de ellas es rectilínea excepto cuando llega a las proximidades de otra, sucesos a los que se denomina colisiones... Creo que sería conveniente examinar la hipótesis de partículas actuando unas sobre otras mediante impactos y compararla con los fenómenos que parecen depender de este "camino medio". Por lo tanto, he comenzado por el principio y he desarrollado la teoría de los movimientos y colisiones de partículas libres actuando sólo por impacto, aplicándola al problema de la fricción interna de los gases, de la difusión de los gases y de la conducción del calor a través de un gas (sin radiación)... No sé hasta donde se ajustarán

*estas especulaciones a los hechos, pero si no lo hacen es bueno saber que la teoría de Clausius (o más bien la de Herapath) es equivocada y como, en cualquier caso, me he encontrado capaz de deducir las leyes de movimiento de un sistema de partículas que interactúan entre ellas mediante impactos, lo he hecho como un simple ejercicio de mecánica*¹⁷.

Los primeros trabajos de Maxwell sobre teoría cinética, presentados por él intencionadamente en una forma que fuese independiente de las especulaciones sobre los gases, se publicaron en 1860 en el *Philosophical Magazine*¹⁸. Paradójicamente, con ellos se cerró definitivamente la etapa de especulación más o menos semi-cuantitativa sobre la constitución molecular de los gases porque, lo que para Maxwell era un *mero ejercicio de mecánica*, cuya probable consecuencia sería la refutación de las ideas y especulaciones de la teoría cinética, no sólo fundamentó dichas ideas sobre una base más firme, sino que estableció los fundamentos de la mecánica estadística actual. Puede decirse que aún hoy día cualquier libro de texto que explique los fundamentos de la teoría cinética de los gases comienza reproduciendo esencialmente el razonamiento maxwelliano.

Sin embargo, el aumento del crédito concedido a la teoría cinética tras los trabajos de Maxwell no se debió sólo a la elegancia y profundidad de los argumentos teóricos empleados por éste. Uno de los resultados de la teoría indicaba que la viscosidad y la densidad de un gas deben ser independientes y ello le sugirió a Maxwell un experimento crucial, porque la teoría alternativa afirmaba que la viscosidad debía de crecer cuando lo hiciera la densidad. El experimento en el que el propio Maxwell probó la constancia de la viscosidad de un gas cuando, manteniéndolo a temperatura constante, se varía la presión a la que está sometido, fue decisivo en la conversión de los científicos de la época a las ideas cinético-moleculares. A pesar de este resultado positivo, el propio Maxwell creyó haber encontrado argumentos cuantitativos que probaban que la teoría cinética no era correcta, por ejemplo, para explicar los calores específicos de los gases. No fue hasta 1875 que las medidas experimentales de Kundt y Warburg probaron la completa validez de las expresiones teóricas dadas por Clausius y Maxwell.

¹⁷ Memoir and Scientific Correspondence of the late Sir George Gabriel Stokes, Bart. Vol. II, pp. 8-11. Cambridge University Press, (1909).

¹⁸ J. C. Maxwell. *Phil. Mag.* Vol. 19, pp. 19-32; Vol. 20, pp. 21-37 (1860).

Es significativo que, a pesar del indudable reconocimiento que recibió el trabajo de Maxwell por parte de sus contemporáneos, la idea de que los cuerpos condensados estén formados realmente por átomos discretos no acabara de aceptarse de forma general hasta bien entrado el siglo XX. De hecho, las resistencias a la aceptación de esta imagen corpuscular jugaron un papel muy importante en los argumentos en contra de la idea de Ludwig Boltzmann (1844-1906) de fundamentar la irreversibilidad sobre bases puramente mecánicas. Las objeciones de adversarios de la talla de P. Duhem y E. Mach al trabajo de Boltzmann fueron, de hecho, los últimos intentos de minar el fundamento de las ideas cinético-moleculares. Lawrence Sklar¹⁹ ha puesto de manifiesto el hecho de que las objeciones de Duhem y Mach forman parte de una trama subyacente en la que se entremezcla lo que este autor llama la postura *fenomenalista-instrumentalista* con el rechazo a una teoría mecánica como última explicación de los fenómenos térmicos. Para los fenomenalistas-instrumentalistas, el propósito de la ciencia es la producción de generalizaciones que resuman en forma compacta y simple las regularidades fundamentales que existen entre los objetos de la experiencia observable. Claramente, esta postura es incompatible con el uso de unas entidades como las partículas microscópicas para explicar las regularidades del comportamiento termodinámico. El otro hilo de la trama es el razonamiento según el cual la mera existencia de los fenómenos ópticos, magnéticos o eléctricos habría probado de forma concluyente que el recurso a modelos mecánicos era posible sólo para una cierta porción del mundo físico. Hasta el trabajo de Einstein de 1905 sobre el movimiento browniano y la aplicación posterior de esas ideas a la determinación experimental del tamaño de las moléculas por Perrin, no tuvo lugar la definitiva formación del nuevo paradigma corpuscular. Hay que decir, sin embargo, que la polémica de Boltzmann con los energicistas a propósito del origen de la irreversibilidad, aunque no pusiera en tela de juicio directamente el modelo corpuscular sí llevó a un nuevo planteamiento del contexto en el que tienen sentido las viejas imágenes cinético-moleculares, y lo mismo puede decirse del desarrollo de las ideas cuánticas. El largo camino recorrido por las ideas atomísticas tras pasar desde las brillantes intuiciones de Hermann y Bernouilli hasta los sofisticados razonamientos boltzmanianos aún no ha llegado a su fin, como lo prueba la polémica revisión de estas ideas llevada a cabo por Prigogine y la Escuela de Bruselas en los últimos años.

¹⁹ L. Sklar. *Physics and Chance*. Cambridge University Press, (1993).

BIBLIOGRAFÍA

1. S. G. Brush, *The kind of motion we call heat*, North Holland, Amsterdam, (1976).
2. S. G. Brush, *Kinetic Theory*, 2 vols. Pergamon Press, Oxford, (1965).
3. C. Cercignani, *Ludwig Boltzmann. The Man Who Trusted Atoms*. Oxford University Press. (1998).
4. S. G. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, México (1971).
5. G. Sarton, *Historia de la ciencia*, Ed. Universitaria, Buenos Aires, (1965).
6. L. Sklar, *Physics and Chance. Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*, Cambridge University Press (1993).
7. C. Truesdell, *Ensayos de Historia de la Mecánica*, Tecnos, Madrid, (1975).