

Físicos y químicos frente a la naciente teoría atómica

Physicists and chemists facing the emerging atomic theory

Enrique N. Miranda ^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo, 5500 Mendoza, Argentina

² IANIGLA, CONICET, CCT Mendoza, 5500 Mendoza, Argentina

*E-mail: emiranda@mendoza-conicet.gov.ar

Recibido el 20 de agosto de 2023 | Aceptado el 27 de octubre de 2023

Resumen

La teoría atómica moderna nace en 1808 de la mano de Dalton y luego de algunos ajustes fue ampliamente usada por los químicos para explicar las reacciones químicas. A mediados del siglo XIX era usada para entender la estructura de moléculas orgánicas, mientras que entre los físicos la concepción atomista de la materia recién daba sus primeros pasos con Maxwell y la teoría cinética de los gases. Boltzmann continuó en esa línea y se enfrentó a figuras influyentes de su época que se resistían a la existencia de los átomos. Finalmente, a principios del siglo XX varios experimentos y en particular los de Perrin sobre movimiento browniano convencieron finalmente a los físicos de su existencia. Curiosamente, la comunidad de los químicos se adelantó medio siglo a los físicos en aceptar la teoría atómica. Este artículo discute y analiza esta peculiar historia.

Palabras clave: Teoría atómica; Comunidades científicas; Boltzmann; Mach.

Abstract

The modern atomic theory emerged in 1808 with the work of Dalton, and following subsequent refinements, it found widespread adoption among chemists for elucidating chemical reactions. By the mid-19th century, it was employed to comprehend the structural characteristics of organic molecules within the domain of chemistry. In contrast, within the realm of physics, the atomistic conception of matter was just beginning to take its initial steps, championed by figures such as Maxwell and the kinetic theory of gases. Progressing along this trajectory, Boltzmann engaged with prominent contemporaneous figures who exhibited reluctance toward acknowledging the existence of atoms. Ultimately, at the turn of the 20th century, a series of experiments, notably those conducted by Perrin on Brownian motion, conclusively persuaded physicists of the reality of atoms. Intriguingly, the community of chemists had anticipated physicists by half a century in embracing the atomic theory. This article discusses and analyzes this curious story.

Keywords: Atomic theory, Scientific communities, Boltzmann, Mach.

DESARROLLO

La teoría atómica desempeña un papel fundamental en nuestra concepción actual de mundo material, y aunque podría parecer que la comunidad científica la ha aceptado desde siempre, la realidad es diferente. Al igual que ocurre con todas las ideas científicas, su historia no es tan sencilla ni lineal como a menudo se presenta en los libros de texto. En particular, mientras la comunidad química abrazó rápidamente la teoría atómica, la comunidad física no siguió el mismo camino. El propósito de este breve ensayo es precisamente narrar esa historia ya que es bien sabido que, desde un punto de vista pedagógico, la perspectiva temporal es muy enriquecedora (Campanario, 2016; Menéndez, 2016; Zerpa *et al.*, 2019). Examinaremos cómo, a mediados del siglo XIX, la teoría atómica estaba plenamente integrada en

la práctica química mientras que en el ámbito de la física comenzaba a dar sus primeros pasos, no consolidándose completamente sino hasta la primera década del siglo XX. Finalmente, también especularemos sobre las posibles causas de esta disparidad entre ambas comunidades científicas y su impacto epistemológico.

Al igual que muchas historias dentro del contexto de la cultura occidental, es necesario rastrear el origen de la teoría atómica hasta la antigua Grecia. En algún momento del siglo IV a. C., los griegos comenzaron a preguntarse sobre la naturaleza fundamental de las cosas. Aunque hubo varias respuestas, nos enfocaremos en la propuesta de Leucipo y su discípulo Demócrito, quienes razonaron que, al dividir un trozo de cualquier sustancia, eventualmente se alcanzaría una unidad indivisible, algo que no podría ser dividido aún más. A ese objeto indivisible lo denominaron "átomo". Naturalmente era una propuesta meramente especulativa y no había forma de comprobarla. Por otro lado, la hipótesis alternativa, que postulaba que la materia era un continuo infinitamente divisible era más popular y prevaleció hasta principios del siglo XIX.

Con el advenimiento de la ciencia moderna, resurgió la idea del carácter discreto, discontinuo de la materia. Bernoulli (1738) propuso que los gases estaban formados por diminutas esferas y pudo deducir la ley de Boyle. Sin embargo, este aporte no logró atraer la atención de la comunidad. Fue necesario llegar a fines del siglo XVIII para que se formularan leyes fenomenológicas que prepararan un terreno para las nuevas ideas. Lavoisier descubrió la conservación de la masa en las reacciones químicas, mientras que Proust observó que en cualquier reacción los reactivos y productos se encontraban siempre en la misma proporción, una observación que Dalton más tarde generalizó en la llamada ley de las proporciones múltiples.

Estas leyes empíricas pueden ser explicadas de manera coherente suponiendo la existencia de átomos, y eso fue precisamente lo que Dalton propuso en su obra *Un nuevo sistema de la filosofía química* (1808). Como suele suceder, la teoría propuesta por Dalton explicaba de manera adecuada numerosos experimentos, pero había otros que no se ajustaban a las predicciones teóricas. Esto se debía a que Dalton llamaba "átomos" a lo que nosotros hoy denominamos "moléculas". Esa confusión fue aclarada por Avogadro, y a partir de ese momento, la teoría atómica rápidamente comenzó a ganar rápidamente aceptación entre los químicos, quienes la incorporaron a sus prácticas habituales.

Un comentario epistemológico. Muchas teorías surgen a pesar de experimentos que inicialmente las refutan. Así y todo, la comunidad científica las acoge y, con el tiempo, logra superar esas dificultades. Esta dinámica desafía el enfoque refutacionista propuesto por Popper (1934), al menos en su versión simplista inicial.

Retornando a la historia en de la teoría atómica en el ámbito de los químicos, hay que decir que logró consolidarse en esa comunidad y generó numerosos avances. En la década de 1850, Kekule, un químico orgánico alemán, impulsó el estudio de la estructura molecular y en 1865 propuso que la estructura del benceno era un anillo cerrado formado por seis átomos de carbono. Cuenta la leyenda que tuvo un sueño en el que una serpiente se mordía la cola y eso le sugirió cómo estaban ordenados los átomos en el benceno. Sea verdadera o no esta historia, lo cierto es que en la década de 1860 los químicos no solo aceptaban la existencia de los átomos, sino que habían avanzado aún más al utilizarlos para describir la estructura de moléculas complejas. Por lo tanto, se puede afirmar que, a mediados del siglo XIX, la teoría atómica ya era un componente esencial del conocimiento cualquier químico bien formado. Y por supuesto siguieron usándola y desarrollándola de manera fructífera¹.

Ahora, centrémonos en lo que ocurría entre los físicos en ese mismo periodo

A mediados del siglo XIX la física gozaba de una salud envidiable²: la mecánica newtoniana, la síntesis entre electricidad y magnetismo realizada por Maxwell y la termodinámica podían explicar una enorme cantidad de fenómenos *macroscópicos*. Paralelamente, en el mundo filosófico el pensamiento positivista sostenía que había que hablar solo de entidades observables, si se hacía referencia a objetos que no eran perceptibles con nuestros sentidos se consideraba metafísica, y eso era una herejía para los acólitos de Comte.

En la comunidad de los físicos esas ideas filosóficas fueron introducidas por Ernest Mach (1883) quien gozaba de un enorme prestigio científico y estaba muy interesado en lo que hoy llamaríamos filosofía de la ciencia. Mach sostenía un fenomenismo extremo: la función de la ciencia es vincular los fenómenos sin realizar conjeturas sobre la realidad en sí. El ideal de ese tipo de ciencia es la termodinámica. En base a consideraciones formales se vinculan distintas magnitudes experimentales. Por ejemplo, se puede relacionar el calor específico a volumen constante con el calor específico a presión constante pero no es posible dar el valor de los mismos. Hay que hacer alguna conjetura adicional sobre la estructura de la materia para poder proporcionar un número. Y eso es lo que no quería Mach: evitar realizar suposiciones sobre cosas que no se podían observar, como era el caso de átomos y moléculas en el siglo XIX.

¹ El libro *Breve historia de la química* (Isaac Asimov, 1975, Madrid: Alianza) es una obra de divulgación breve para tener un panorama más completo de la historia de la química. Ahí se ve con claridad que, a principios del siglo XX, temas como la estructura atómica eran estudiados preferentemente por los químicos.

² Una descripción detallada del estado de la física en el siglo XIX se puede encontrar en la cuarta parte del libro *Historia de la Física* de Desiderio Papp (1945, Buenos Aires: Espasa-Calpe).

Esa prédica caló hondo en la comunidad de los físicos y por esa razón muchos rechazaban la teoría atómica. Para complicar aún más el panorama, Wilhem Ostwald, predicaba que el elemento central de la realidad al que se debía prestar atención era la energía, no la materia, pero esa es otra historia y contarla nos distraería de nuestro objetivo.

Es síntesis, a mediados del siglo XIX la física era una disciplina exitosa que lograba explicar muchos fenómenos a nivel macroscópico. Sin embargo, aún no se involucraba con el mundo microscópico, en parte debido a la falta de experimentos en ese nivel y también debido a las corrientes filosóficas predominantes. Pero dos físicos destacados comenzaron a explorar la realidad a escala molecular.

Rudolf Clausius es conocido por haber formulado el segundo principio de la termodinámica; menos conocido es que dio el puntapié inicial de la teoría cinética de los gases. Propuso que los gases estaban formados por partículas microscópicas que se movían todas con la misma velocidad. Alrededor de 1860 James Maxwell (Maxwell, 1860a, 1860b) retomó esta idea, pero suponiendo que las partículas tenían velocidades distintas. Eso lo que llevó a desarrollar su famosa distribución de velocidades y a darle a la teoría cinética un sólido andamiaje matemático.

Ahora entra en escena Ludwig Boltzmann, quien tomó las ideas de la teoría cinética de los gases y puso los cimientos de la mecánica estadística (Boltzmann, 1896, 1898). Y se convirtió en el gran abanderado de la teoría atómica entre los físicos. Una conocida biografía suya lo describe acertadamente como “el hombre que creía en los átomos” (Cercignani, 2006). En los últimos años del siglo XIX y los primeros del siglo XX, Boltzmann se involucró en una ferviente batalla intelectual para persuadir a la comunidad de físicos de la existencia de estas entidades inobservables que hoy conocemos como átomos y moléculas.

Los debates fueron intensos: por un lado, figuras como Mach y Ostwald lideraban a aquellos que se oponían a la teoría atómica, mientras que, en el otro extremo, Boltzmann defendía fervientemente la idea. Aunque resultaría sumamente interesante analizar en detalle esa lucha de gigantes intelectuales, profundizar en ello nos distraería de nuestro objetivo. Lo que se puede afirmar sin lugar a dudas es que, a principios del siglo XX, una parte de la comunidad de físicos aceptaba la teoría atómica, mientras que otra se aferraba a la concepción positivista y se negaba a hablar de objetos inobservables.

Resulta interesante notar que Max Planck, alguien llamado a revolucionar la física, negaba la existencia de los átomos al comienzo de su carrera. Quien introdujo la idea de los “cuantos” y postularía que la energía radiada no era una magnitud continua, sino que posee una naturaleza discreta, cuando joven creía que la materia era continua. Paradojas de la historia.

También es relevante observar lo que ocurría del otro lado del Atlántico. Mientras Boltzmann ponía los fundamentos de la mecánica estadística, Gibbs hacía lo propio desde la Universidad de Yale (Gibbs, 1902). Sin embargo, es importante destacar que Gibbs obtuvo su doctorado en ingeniería y centró su labor en la físico-química por lo que no tuvo que lidiar con las concepciones filosóficas de la comunidad de físicos. Y, por otra parte, había muy pocos físicos en los Estados Unidos a fines del siglo XIX. Así es que su trabajo de desarrollo de la mecánica estadística avanzó sin la oposición que encontró su colega austríaco.

El movimiento browniano fue el fenómeno que finalmente inclinó la balanza a favor de la teoría atómica entre los físicos. Por movimiento browniano se entiende el movimiento incesante de partículas con tamaño en el rango de 10^{-7} - 10^{-6} m suspendidas en un líquido y fue descubierto a principios del siglo XIX por Robert Brown, un botánico que observaba los granos de polen en el microscopio. Es bueno recordar que las moléculas tienen tamaños mucho menores, por ejemplo, la del agua es menor que 10^{-9} m, por lo tanto la observación directa de ellas con los microscopios de la época era imposible³. Inicialmente, este fenómeno no atrajo mayor atención y se lo atribuyó a corrientes en el fluido generadas por pequeñas diferencias de temperatura. Sin embargo, a medida que los experimentos se refinaron, se vio que esa no era la causa.

Por supuesto que la explicación de este fenómeno proviene del mundo microscópico y fue proporcionada por Einstein en 1905 (Einstein, 1905). El número de moléculas que colisionan con la partícula flotante es fluctuante. En una dirección dada, los choques en un sentido no compensan exactamente las colisiones en el otro sentido y el resultado neto es que la partícula que flota en el fluido se mueve. El trabajo de Einstein fue un espaldarazo para la teoría atómica y para la mecánica estadística de Boltzmann. A pesar de ello, aún existía un sector de la comunidad que se mostraba renuente a aceptar la existencia de átomos y moléculas.

Este último grupo finalmente claudicó cuando en 1909 Perrin (1909) llevó a cabo una serie de experimentos exquisitamente precisos que confirmaron las predicciones teóricas de Einstein. Además, Perrin logró realizar la primera estimación confiable del número de Avogadro. Así cayó el último bastión de quienes descreían en los átomos ya que un cálculo teórico que partía del supuesto de su existencia pudo ser corroborado en el laboratorio. O al menos así es como presentaría la historia un manual de epistemología.

³ Hoy se pueden obtener en forma rutinaria imágenes detalladas de moléculas con microscopios electrónicos de barrido o de fuerza atómica. No siempre nos damos cuenta del largo camino recorrido desde los trabajos pioneros de Carl Zeiss y Ernest Abbe cuando construyeron los primeros microscopios basados en la incipiente ciencia de la óptica

Lamentablemente Boltzmann se había suicidado unos años antes y no pudo saborear su triunfo. Mach por su parte siguió negando obstinadamente la existencia de los átomos hasta su muerte en 1916. En cuanto a Ostwald, también cedió finalmente y reconoció la existencia de los átomos como una verdad científica comprobada (Ostwald, 1909)

Una descripción simplificada de la historia pondría a los experimentos de Perrin en el centro de la escena, pero es importante reconocer que había vientos de cambio en la comunidad de los físicos. Con el paso del tiempo, la física, que anteriormente se centraba principalmente en el ámbito macroscópico, comenzaba a sumergirse cada vez más en el mundo microscópico. A finales del siglo XIX se descubrieron fenómenos tales como la radioactividad, los rayos X, y el electrón, la primera partícula subatómica. Los físicos empezaban a explorar otro nivel de la realidad y a formular modelos acordes. J. J. Thomson propuso que el átomo era una esfera positiva que tenía incrustados los electrones; unos años después, Rutherford modificaría radicalmente esa imagen proponiendo el modelo nuclear⁴. Es decir, en la primera década del siglo XX cada vez más experimentos físicos apoyaban la teoría atómica. Y Perrin terminó de confirmarla.

En resumen, se puede decir que a mediados del siglo XIX la comunidad química daba por sentada la existencia de los átomos y usaba ese concepto para explicar reacciones y estructuras moleculares. Mientras tanto la comunidad física recién empezaba a explorar teóricamente la idea que encontró una fuerte resistencia inicial. Finalmente, en la primera década del siglo XX, la existencia de los átomos es aceptada unánimemente por la comunidad científica gracias a la prédica de Boltzmann y a numerosos experimentos que culminan con la confirmación por parte de Perrin de las predicciones teóricas de Einstein sobre el movimiento browniano.

Hasta aquí llega la historia fáctica, los hechos. Ahora podemos especular un poco acerca de los motivos de esta diferencia en el comportamiento de ambas comunidades.

Una primera conjetura podría ser que la comunicación entre químicos y físicos era limitada en aquella época. Las dificultades de la comunicación en el siglo XIX son bien conocidas. Sin embargo, se puede objetar que en las grandes universidades coexistían físicos y químicos en distintos departamentos y alguna interacción existiría entre ellos. Así pues, la hipótesis de la falta de comunicación parece débil.

Otra característica destacada es el efecto de la filosofía dominante en una y otra comunidad. Entre los físicos el positivismo reglaba la conducta de muchos investigadores, mientras que los químicos parecen haber ignorado despreocupadamente los preceptos que se desprendían de esa filosofía. Especulando un poco más, es posible que esta diferencia se deba a que los químicos estaban más centrados en el trabajo de laboratorio, sin una presencia significativa de químicos teóricos en esa época. En contraste, la figura de los físicos teóricos era más prominente, y dado el carácter reflexivo de su tarea, eran más propensos a ser influenciados por la filosofía predominante.

Es crucial destacar una vez más que aquel periodo la física se ocupaba principalmente de fenómenos macroscópicos. Esto es una diferencia muy grande respecto del siglo XXI. Hoy la palabra "física" evoca fundamentalmente un mundo microscópico: mecánica cuántica, física del sólido, nuclear, partículas, supercuerdas. Mientras que algunas áreas de trabajo a una escala más grande, tales como mecánica de los fluidos, termodinámica o mecánica del continuo, son frecuentadas más bien por científicos aplicados e ingenieros. A mediados del siglo XIX no era así; esas áreas atraían la atención de los grandes físicos de aquella época. Se podría argumentar entonces que, en ese momento, los físicos no prestaban demasiada atención a cuestiones "microscópicas" tales como la estructura de la materia.

Seguramente, se podría seguir especulando sobre las causas de un comportamiento tan diferente entre ambas comunidades, pero parece difícil encontrar una respuesta definitiva. El autor de esta nota se inclina por la influencia del positivismo extremo en la física, pero demostrar esa hipótesis demandaría un estudio minucioso de los escritos de la época.

Para concluir, cabe hacer algunos comentarios epistemológicos. La introducción de la teoría atómica en la química marcó una auténtica revolución científica en el sentido kuhniano del término (Kuhn, 1962, Hoyningen-Huene, 2008). A partir de ahí puede decirse que nació la química moderna. En el caso de la física, aceptar esa teoría fue el puntapié inicial de la gran revolución cuántica del siglo XX. Efectivamente, una vez que la existencia de los átomos fue unánimemente aceptada, había que entender su comportamiento. Y es así que en 1913 Bohr propone su modelo de átomo con órbitas cuantizadas (Bohr, 1913). Esto, sumado al trabajo de Planck sobre la radiación de cuerpo negro, iniciaron la profunda revolución que sufrió la física y que llevó al surgimiento de la mecánica cuántica.

Puede afirmarse con seguridad que la aceptación del carácter atomístico de la materia generó cambios de paradigmas tanto en la química como en la física. Sin embargo, es interesante notar que, en el caso de la química, esta revolución tuvo lugar a principios del siglo XIX, mientras que en la física fue necesario esperar hasta los albores del siglo XX para que se materializara. El objetivo de este artículo ha sido narrar y analizar este proceso de cambio y

⁴ Es muy interesante la historia del experimento de Rutherford y su interpretación. Al respecto, el lector puede consultar Rodríguez M. A. y Niaz M. (2016). El experimento de Rutherford en el contexto de Historia y Filosofía de la Ciencia y sus implicancias para los textos de Física. *Revista de Enseñanza de la Física*, 15(1), 5-12.

evolución en la concepción de la materia en ambas disciplinas, resaltando las diferencias y similitudes en sus trayectorias históricas.

REFERENCIAS

- Bernoulli, D. (1738). *Hydrodinamica, sive de viribus et motibus fluidorum comentarii*. Estrasburgo: Argentorati.
- Bohr N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules. Systems containing only a Single Nucleus. *Philosophical Magazine*, 26, 476-502.
- Boltzmann, L. (1896). *Vorlesungen über Gastheorie I Teil*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Boltzmann, L. (1898). *Vorlesungen über Gastheorie II Teil*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Campanario J. M. (2016). Ventajas e inconvenientes de la historia de la ciencia como recurso en la enseñanza de la ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física*, 11(1), 5-14.
- Cercignani, C. (1998). *Ludwig Boltzmann. The man who trusted atoms*. Oxford: Oxford University Press.
- Dalton, J. (1808). *A new system of chemical philosophy*. London: William Dawson & Sons Ltd.
- Einstein, A. (1905). Über die von der molekular kinetischen Theorie der Wärme Geforderte Bewegung von in ruhen den Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, 17(8), 549-560.
- Gibbs, J. W. (1902). *Elementary Principles in Statistical Mechanics*. New York: Dover.
- Hoyningen-Huene, P. (2008). Thomas Kuhn and the Chemical Revolution. *Foundations of Chemistry*, 10, 101-115.
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Mach, E. (1883). *Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt*. Leipzig: F.A. Brockhaus.
- Maxwell, J. C. (1860a). Illustrations of the dynamical theory of gases. Part I. On the motions and collisions of perfectly elastic spheres. *Philosophical Magazine*, 4th series, 19, 19-32.
- Maxwell, J. C. (1860b). Illustrations of the dynamical theory of gases. Part II. On the process of diffusion of two or more kinds of moving particles among one another. *Philosophical Magazine*, 4th series, 20, 21-37.
- Menéndez V. (2016). Una nueva visión para enseñar física: los aportes históricos. *Revista de Enseñanza de la Física*, 28, 7-14.
- Ostwald W. (1909). *Grundriss der allgemeinen Chemie*. Leipzig: W Engelmann.
- Perrin, J. (1909). Mouvement brownien et réalité moléculaire. *Annales de Chimie et de Physique*, 18(5), 1-114.
- Popper, K. (1934). *The logic of scientific discovery*. Londres: Routledge
- Zerpa, H. S., Bugiolachio, N., Suvelza, G., Zerpa, y. & Martín, M. (2019). Pequeñas Historias. Una propuesta para la enseñanza y el aprendizaje de Historia y Epistemología de la Física. *Revista de Enseñanza de la Física*, 31, 757-766.