

Sobre átomos y moléculas: historia de una polémica (1803-1890)

El 21 de octubre de 1803, un profesor de 37 años de edad leía, en la Literary and Philosophical Society de Manchester y "ante un selecto auditorio de nueve miembros y amigos", un trabajo sobre la absorción de los gases en el agua que incluía la primera tabla de pesos atómicos conocida. Se llamaba John Dalton (1766-1844), y con su trabajo revolucionó el panorama científico del momento al dotar a los átomos -pura entelequia hasta entonces-, de una característica cuantificable: su peso relativo.

Hasta esa fecha, el conocimiento de la constitución íntima de la materia era un tema que había atraído la atención de filósofos y hombres de ciencia de todos los tiempos, en un vano intento de explicar cómo era posible que unas materias se transformaran en otras completamente diferentes. Los primeros postulados de la teoría atómica parecen haber nacido en Grecia, civilización que había conseguido separar en parte la ciencia de la magia y la religión. Sin embargo, sus concepciones sobre los átomos estaban profundamente arraigadas a su filosofía, y desde este punto de vista hay que entender la ausencia de experimentos que corroboraran las distintas suposiciones. Entre todas ellas, las ideas que tuvieron mayor repercusión en la posterior civilización occidental fueron las de Leucipo de Mileto (o de Abdera, o de Elea, porque no está clara ni siquiera su existencia) (??) y Demócrito de Abdera (~460-~360 a.C.), quienes creían que la materia estaba compuesta por vacío y átomos que estaban en continuo movimiento y eran cualitativamente iguales, aunque se diferenciaban entre sí por su forma, posición y tamaño, y que se podían unir unos con otros para formar agregados por medio de ganchos. Estas suposiciones, incorporadas a la doctrina de Epicuro

(341-270 a.C.), fueron expuestas en el año 57 a.C. por el poeta latino Lucrecio (95-55 a.C.) en su poema *De Rerum Natura*, en el que los dos primeros libros constituyen una exposición sistemática de la teoría atómica griega. Su concepción netamente materialista hizo que fuera olvidada durante la Edad Media al ser rechazada por la Iglesia, aunque tuvo una gran influencia en Europa a partir del siglo XVII [Halperin, 1965: 14; Leicester, 1967: 25-26; Partington, vol. I, 1970: 35-37].

Las ideas que los antiguos griegos tenían sobre los átomos presentaban varias características generales: eran conceptos teóricos, susceptibles de comparación con los cuerpos macroscópicos, y junto con el vacío, eran considerados como el origen de todas las cosas. Los átomos griegos eran indivisibles, impenetrables e inalterables, además de poseer ciertas propiedades que los diferenciaban entre sí: forma, tamaño y peso. La forma era la característica más importante de cada átomo, y estaba directamente relacionada con su peso, porque, como estaban todos hechos de la misma materia, su densidad era idéntica. Además, se movían en el vacío al azar, con una velocidad determinada [Cassini, 1992: 663-686].

Pero también existieron pensadores griegos que negaron la existencia de los átomos, como uno de los discípulos más famosos de Platón (427-347 a.C.), llamado Aristóteles de Estagira (384-323 a.C.), cuya filosofía ha sido uno de los pilares de nuestra cultura occidental. Su doctrina postulaba la existencia de cuatro elementos (aire, agua, tierra y fuego) hechos de la misma materia, que se diferenciaban

unos de otros porque poseían distintas "cualidades fundamentales" (caliente, húmedo, frío, y seco) [Leicester, 1967: 32-35 / Wiechowsky, 1972: 25-26]¹.

El tiempo siguió su curso, y a partir del siglo IV la Alquimia dominó el panorama europeo. Sus tratados eran fundamentalmente recetas prácticas, escritas en lenguaje hermético, donde no había cabida para elucubraciones atómicas. De forma paralela, en esta época floreció la cultura árabe, en la que existieron varias teorías que admitían el concepto de átomo, como las doctrinas religiosas que consideraban que éstos eran aniquilados y recreados continuamente por la voluntad del Creador, o la corriente filosófica desarrollada por Averroes (1126-1198), basada en



Inés Pellón González
ETS de Náutica y Máquinas
Navales
Universidad del País Vasco

la existencia de ciertos "mínimos naturales", que eran los límites de división de la materia. Esta filosofía se llamó "averroísmo" a partir del siglo XIV, y continuó con la tradición aristotélica de los cuatro elementos [Leicester, 1967: 37-62, y Pullmann, 1995: 39-50].

Si retomamos la evolución de la civilización occidental, observaremos que en 1473 se imprimió por primera vez el poema *De Rerum Natura* de Lucrecio, y con él se introdujo en el pensamiento europeo el concepto de un vacío en el que flotaban las partículas más pequeñas de las sustancias -los átomos-, caracterizadas por su forma, su tamaño y un movimiento continuo. Un siglo después, en 1575, apareció la primera traducción completa de la *Pneumática* de Herón (~s. I a.C.), filósofo que explicaba el comportamiento de la materia a partir de las propiedades de los gases. En ella no se admitía el vacío total porque se consi-

deraba que la materia estaba compuesta por vacío y átomos que estaban en continuo movimiento y eran cualitativamente iguales, aunque se diferenciaban entre sí por su forma, posición y tamaño, y que se podían unir unos con otros para formar agregados por medio de ganchos. Estas suposiciones, incorporadas a la doctrina de Epicuro

¹ Más datos sobre las diferentes teorías griegas y prebelénicas, en Kargo (1957: 126-141), Montserrat/Navarro (1995: 225-231), Melsen (1957: 126-131), Partington (vol. I, 1970: 3-148), Pullmann (1995: 25-97), Tejada (1984: 18-22), y Virieux-Raymond (1953: 620-624).

deraba que las partículas estaban separadas por poros de diferentes tamaños, que eran los que permitían la expansión y la contracción de los gases. Lo que hubiera podido ser una concepción filosófica más, recibió el apoyo de los experimentos realizados con varios gases por Angelus Sala (1576? -1637), Joan Baptista Van Helmont (1579-1644), y Jean Beguin (principios del siglo XVII), que apuntaron la existencia de una vía experimental para la verificación de las distintas teorías [Leicester, 1967: 43, 130-131].

A partir de entonces fueron numerosos los científicos y los filósofos que abordaron el tema del atomismo, con la esperanza de poder explicar con él ciertos hechos, como las sublimaciones, disoluciones, petrificaciones, así como varias reacciones químicas. Baste citar como ejemplo a Daniel Sennert (1572-1637), a Joachim Jungius (1587-1637), a Galileo Galilei (1546-1642) -creador de la filosofía mecánica, que cambió completamente la interpretación de los hechos científicos en el siglo XVII-, a Francis Bacon (1561-1626), a Nicholas Hill (1570-1610) -autor del primer libro moderno que defendió la teoría atómica griega²-, a Johann Chrysostom Magnenus (?-?), a Pierre Gassendi (1592-1655) -quien asumió el experimento de Torricelli, realizado en 1643, como la prueba evidente de la existencia del vacío-, y al gran pensador René du Perron Descartes (1596-1650), quien influyó notablemente en las ideas de los científicos posteriores como Boyle, Mayow y Lemery [Leicester, 1967: 132, Mckie, 1966: 13-15, y Partington, vol. II, 1961: 271-276; 389-414; 415-422; 455-466].

El objetivo último de Gassendi y de Descartes era establecer un sistema universal completo a la manera de los filósofos griegos. Ellos y otros científicos y pensadores de esta época tomaron las ideas que les parecieron aplicables a las reacciones químicas, y con ellas elaboraron una nueva química "mecánica", a la que hay que agradecer el destierro de toda clase de fuerzas ocultas en las pro-

piedades y reacciones, y con la que se pudo establecer la ciencia sobre bases experimentales. Es en esta época -el siglo XVII-, cuando el atomismo surgió de nuevo en Europa con gran vigor debido a la conjunción de varios factores, como [Leicester, 1967: 130-142]:

a) La desautorización de las teorías aristotélicas al efectuarse un gran número de experiencias que las superaron.

b) Los intentos de explicar la Naturaleza sobre una base mecánica.

c) Los numerosos experimentos que demostraron la existencia del vacío.

d) El desarrollo del microscopio, instrumento que patentizó la discontinuidad de la materia.

Con todos estos hechos, la concepción atómica de la materia perdió su significado filosófico y se integró en la nueva ciencia experimental. El principal pensador que se ocupó del atomismo durante estos años fue Walter Charleton (1619 ó 1620-1707), y a él se le atribuye la gloria de haber publicado el primer libro sobre los átomos escrito en lengua inglesa y no en latín³, idioma utilizado hasta el momento [Mckie, 1966: 13-15].

En esta época brilló con luz propia el inglés Robert Boyle (1627-1691), que es considerado uno de los fundadores de la química moderna porque, al darse cuenta que la química no era sólo una ciencia auxiliar de la medicina, introdujo en ella un riguroso método científico con el que mostró experimentalmente que los cuatro elementos de Aristóteles y los tres principios de los alquimistas (mercurio, azufre y sal) no merecían ser llamados elementos o principios, proporcionando así una definición clara de elemento. Con sus ideas y su trabajo estableció la llamada "filosofía corpuscular", en la que prescindió de toda clase de teorías ocultas. En 1661 escribió *The Sceptical Chemist*, donde, en forma de diálogo entre los partidarios de las antiguas teorías y el químico escéptico Carneades (el propio Boyle), presentó argumentos convincentes para destruir la mayoría de las creencias antiguas, aun-

que no ofrecía una alternativa a las ideas desestimadas. En el apéndice del libro incluyó una definición de elemento químico que se ha citado a menudo como precursora de las ideas de Lavoisier, y se considera que tuvo gran influencia en las ideas de Newton. Boyle conoció la teoría atómica a partir de la obra de Gassendi, y supuso que la combinación química se producía entre partículas elementales, aunque indicaba que era más correcto hablar de una "teoría corpuscular", que desarrolló en los libros: *Specimen of an Attemp to make Chemical Experiments Usefull to Illustrate the Notions of the Corpuscular Philosophy* (1661), uno de sus *Physiological Essays*, y *The Origine of Formes and Qualities, According to the Corpuscular Philosophy* (Oxford, 1666) [Leicester, 1967: 134-138, Partington, vol. II, 1961: 487-549].

Isaac Newton (1642-1727) también contribuyó al desarrollo de la teoría corpuscular al introducir las fuerzas de atracción como explicación de la unión de los corpúsculos, en vez de las suposiciones de átomos mecánicamente enlazados que se remontaban hasta Demócrito. Atomista convencido, sus opiniones sobre temas químicos se encuentran en su libro *Optics* (1704) [Leicester, 1967: 137-138].

En esta época fueron muy numerosos los científicos que pensaban en términos atómicos -aunque no en el sentido actual de la palabra-, como Nicolás Lemery (1644 ó 1645-1715) -quien publicó un famosísimo *Cours de Chimie...* (1675), traducido a numerosos idiomas, incluido el castellano⁴-, Georg Ernst Stahl (1660-1734) -creador de la teoría del flogisto junto con Johann Joachim Becher (1635-1682)- Hermann Boerhaave (1668-1738), Roger Joseph Boscovich (1711-1787), o M.L. Lomonossov (1711-1765) [Leicester, 1967: 145-146, Langevin, 1968: 55-58, Partington, Vol. II, 1961: 652-686; 740-760].

Es en este momento cuando es imprescindible citar a Bryan Higgins (1737 ó 1741-1818), quien, aunque trabajaba como médico en Londres, abrió una escuela de Química Práctica el 5 de julio de 1774 en Greek

2 Se titulaba *Philosophia Epicurea Democritiana, Theophrastica proposita simpliciter, non edocta, y fue publicado en 1601 en latín, en París, por R. Thierry.*

3 Su título era *Physiologia Epicuro-Gassendo-Charletoniana: or A Fabrick of Science Natural, upon the Hypothesis of Atoms, y vio la luz en Londres en 1654.*

4 *Curso Chymico, 4ª, Madrid, 1703, 492 pp.: Saragossa (Zaragoza), 1710.*

Street (Soho), donde impartió clases teóricas y prácticas, asistido durante un tiempo por su sobrino (o primo) William Higgins (1762 ó 1763-1825). Los resúmenes de sus clases muestran que trató la combinación química desde el punto de vista corpuscular, y que creía en átomos homogéneos, de forma globular, impenetrables, inmutables en número, inconvertibles unos en otros y que no podían ser destruidos ni creados. Estuvo muy influido por las ideas sobre la repulsión mutua de los átomos en el aire de Newton, a quien citaba repetidamente. Por otro lado, limitó la combinación química de dos elementos a la unión partícula a partícula, de forma que sus moléculas binarias sólo contenían un átomo de cada uno de dichos elementos [Partington, vol. III, 1962: 727-736].

Como es lógico, sus ideas influyeron notablemente en William, quien trabajaba como químico a pesar de no tener la titulación exigida para ello. En marzo de 1789 publicó *A Comparative View of the Phlogistic and Antiphlogistic Theories*, en el que se enfrentaba abiertamente a Bryan al declararse antiflogista, y hacía interesantes observaciones sobre los átomos y sobre las combinaciones de éstos, utilizando diagramas de aspecto moderno. Hay que reconocer que fue el primero que utilizó las iniciales de los nombres de los elementos como símbolos de sus átomos, y que expresó las estructuras moleculares a través de guiones que ligaban estas letras, como puede verse en la Figura 1 [Wheeler, 1952: 47-52].

No hay que menoscabar la importancia del inicio de esta simbología, ya que con ella se podían expresar fácilmente los mecanismos de las reacciones químicas, como la formación del agua. Para William, el

hidrógeno se representaba por I (aire Inflamable), y el oxígeno, por D (aire Deflogisticado). Supuso, como también lo haría Dalton, que tenía que cumplirse la "norma de la mayor simplicidad", y que una unidad de hidrógeno se unía con otra de oxígeno para formar agua, de fórmula I-D. Incluso extrajo la conclusión de que, "como dos volúmenes de hidrógeno reaccionan con uno de oxígeno, el hidrógeno contiene la mitad de partículas por volumen que el oxígeno", idea que parece precursora de la ley de Gay-Lussac y de la hipótesis de Avogadro. Del mismo modo, al expresar cómo estaban compuestos los óxidos del nitrógeno, apuntó varias ideas que se consideran predecesoras de la ley de las proporciones múltiples. En ellas indicaba los resultados gravimétricos y volumétricos en los que se basó para llegar a sus conclusiones, pero no mostraba cómo llegó hasta ellas. En 1814 publicó *Experiments and Observations on the Atomic Theory and Electrical Phenomena*, en la que afirmaba que en su anterior publicación se había anticipado a John Dalton y lo acusaba de plagio [Wheeler, 1952: 47-52].

Se ha discutido mucho sobre si las ideas atómicas de Bryan y William Higgins se pueden considerar el antecedente directo de la teoría atómica de Dalton, pero en la actualidad no hay ninguna duda de que la originalidad de Dalton es indiscutible, porque William no intentó crear una nueva teoría y no remarcó la importancia de los pesos atómicos. Además, parece que Dalton no conoció las ideas de Higgins hasta que completó su propia teoría [Partington, vol. III, 1962: 749-754].

De este modo nos encontramos finalizando el siglo XVIII, época en la que se produjo un importante desarrollo de la ciencia química, y en la que se podrían destacar los siguientes logros:

a) El reconocimiento de la existencia de diferentes gases, ya avanzada por Van Helmont (1577-1644) pero desarrollada en profundidad por la labor de científicos como Joseph Black (1728-1799), Joseph Priestley (1733-1804), Henry Cavendish (1731-1810) y Karl W. Scheele (1742-1786). Gracias a sus trabajos se comprobó la naturaleza compuesta del aire -y posteriormente del agua-, y se desarrollaron técnicas experimentales cada vez más precisas, que permitieron aclarar paulatinamente el concepto de elemento químico.

Es por ello que a la química de esta época se la denomina "Química Neumática".

b) La derrota de la teoría del flogisto - formulada por Stahl a partir de las ideas de Becher y de antiguas concepciones alquimistas-, gracias al trabajo de Antoine Louis Lavoisier (1743-1794), que supo aunar los últimos conocimientos proporcionados por los gases con un enfoque cuantitativo de los fenómenos químicos y con una teoría general de la combustión que asignaba al oxígeno el papel de comburente.

c) La elaboración de las "tablas de afinidad" por Geoffroy (1718) y Bergmann (1775), que reunían gran cantidad de conocimientos sobre las distintas sustancias que formaban parte de las reacciones químicas, y que fueron muy populares en esta época.

Es, en esencia, la edad de oro de la química cuantitativa, en donde esta ciencia adquiere su propia personalidad y se formulan sus leyes fundamentales, que podemos ver reunidas en la tabla 1.

LA TEORÍA ATÓMICA DE DALTON

La tabla anterior nos recuerda que fue John Dalton quien enunció la hipótesis atómica que relacionó las ideas teóricas con la química cuantitativa. Había nacido en Eaglesfield, aldea de Cumberland (Inglaterra), en el seno de una familia humilde que pertenecía a una secta protestante denominados cuáqueros, o Sociedad de los Amigos. Gracias a ello tuvo acceso a una enseñanza privilegiada, que forjó al que sería el futuro científico. Hasta los once años asistió a la escuela elemental, donde recibió las enseñanzas de John Fletcher, maestro cuáquero muy interesado por la ciencia. También le dio lecciones particulares otro miembro del grupo llamado Elihu Robinson, meteorólogo y fabricante de instrumentos, y Dalton adquirió tales conocimientos que con sólo doce años ya impartía clases en una escuela instalada en su casa, en un granero o en la casa de reunión de los cuáqueros. Cuando contaba 15 años (en 1781) se trasladó a Kendal junto a su hermano Jonathan, para trabajar como ayudante en una escuela cuáquera dirigida por un pariente, que al retirarse en 1785 dejó a los dos hermanos a cargo del centro.

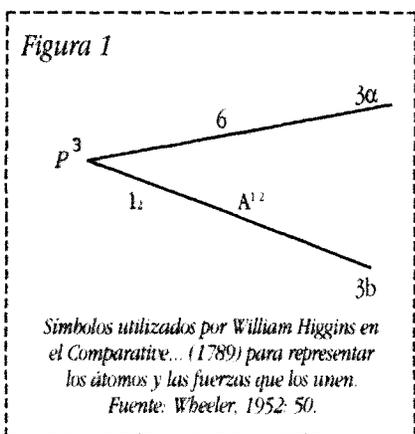


TABLA 1. ENUNCIADOS DE LAS DIFERENTES LEYES DE LAS COMBINACIONES QUÍMICAS QUE SE CONOCIAN HASTA 1808

Año / Publicación	Ley / Autor	Enunciado
1789 Traité de Chimie	Conservación de la masa / Lavoisier	$\Sigma m_{\text{reactivos}} = \Sigma m_{\text{productos}}$
1792-1794 Anfangsgründe der Stöchiometrie	Pesos de Combinación / (Equivalentes) Wenzel; Richter	Las sustancias reaccionan entre sí equivalente a equivalente. Los equivalentes son cantidades intercambiables entre sí. Ácido + base; dobles descomposiciones. Peso equivalente (elemento) = Masa atómica / valencia
1799/1802-1808 CuCO ₃ ; Cu(OH) ₂ ; Journal de Physique	Proporciones Definidas (L.P.D.) / Proust	Todas las muestras de un compuesto dado, sin importar su origen, tienen el mismo % de cada elemento Si 1 = 2 => $(m_a / m_b)_1 = (m_a / m_b)_2$
1803 / 1808 Cuaderno de laboratorio; New System of Chemical Philosophy	Proporciones Múltiples (L.P.M.) / Dalton	Para una masa dada de un elemento, las masas de un segundo elemento en dos compuestos diferentes formados por dicho elemento guardan una proporción de números enteros pequeños Si $m_b = \text{cte.} \Rightarrow (m_a)_1 / (m_a)_2 = n / n'$

Fuente: Elaboración propia.

En esta última ciudad inglesa conoció a John Gough (1757-1825), hombre de ciencia que, aunque había quedado ciego en su infancia, publicó numerosos trabajos científicos y poseía una completísima biblioteca porque era hijo de un rico comerciante. Gough puso a disposición de Dalton, además de sus libros, sus valiosos consejos sobre "investigación filosófica". Después de permanecer en Kendal durante doce años, Dalton fue nombrado (en 1793) profesor de Matemáticas y de Filosofía Natural en el "Manchester College", colegio presbiteriano fundado en 1786 en la ciudad inglesa del mismo nombre. Pero su labor docente en dicho centro le ocupaba demasiado tiempo y no podía dedicarse a la investigación, por lo que en 1799 renunció a su plaza y se ganó la vida dando clases particulares -entre otros, a alumnos que serían tan prestigiosos como James Prescott Joule-, como ya hiciera desde los doce años en su localidad natal.

A partir de este momento su producción científica se disparó, y en 1794 publicó sus "Meteorological Essays", elaborados mientras vivía en Kendal. También en esta fecha fue nombrado socio de la Lite-

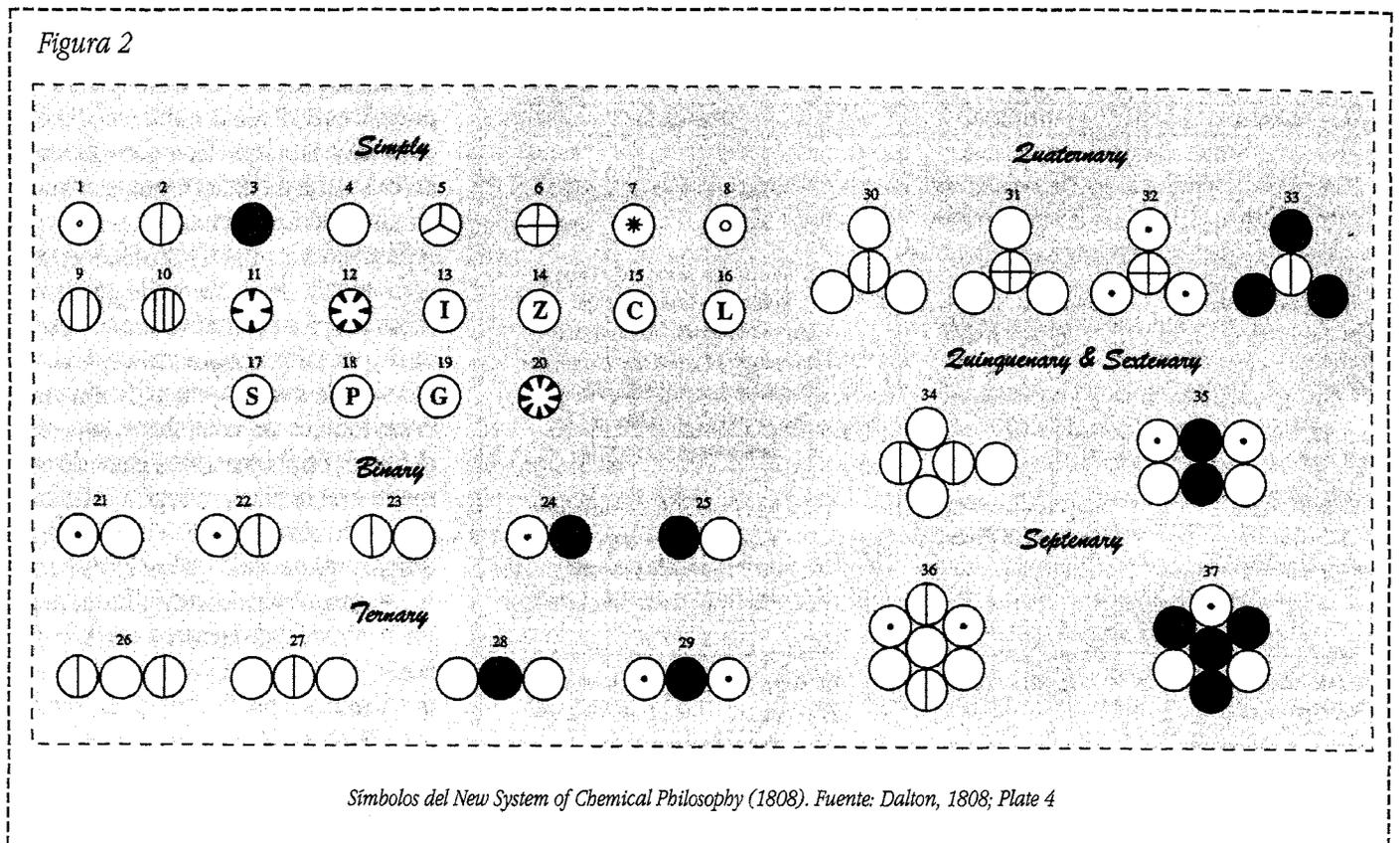
rary and Philosophical Society of Manchester, en cuyas sesiones presentó de forma regular sus trabajos, y en cuya revista, llamada "Manchester Philosophical Society Memoirs", publicó numerosos artículos, como el titulado "Extraordinary facts relative to the vision of colours, with observations", que fue el primero en el que se describió de forma científica la ceguera a ciertos colores que poseían su hermano y él, fenómeno al que, desde entonces y en su honor, se denomina "daltonismo".

Una vez establecido en Manchester, Dalton publicó varios trabajos sobre meteorología en los que, entre otras cosas, analizaba la composición de la atmósfera, en la que consideraba que el vapor de agua se encontraba mezclado con otros gases y no combinado químicamente, idea que en este momento resultó de una modernidad asombrosa. Interesado por la constitución de los gases, se planteó cómo era el mecanismo -y no el proceso químico- por el que los gases se disolvían en el agua. Supuso que las combinaciones químicas se realizaban según la regla de la "mayor simplicidad", es decir, a través de unidades discretas, átomo por átomo, y

que los átomos de cada elemento eran idénticos entre sí. Por ello se cumplía la ley de las proporciones múltiples, a partir de la cual, al tomar como masa atómica de referencia la del hidrógeno, fue capaz de calcular los primeros pesos atómicos relativos de varios elementos, a los que representó con un símbolo diferente para cada uno. Es decir, que pudo pasar de lo macroscópico (composición centesimal de una sustancia) a lo microscópico (peso atómico de sus componentes) sin conocer la fórmula del compuesto, suponiendo que las combinaciones entre dos elementos se realizaban según relaciones numéricas simples. Por ejemplo, el agua, que ya era conocido que se formaba con hidrógeno y oxígeno, estaría formada por un átomo de hidrógeno y otro de oxígeno, y la relación de los pesos de ambos gases que se combinaban para formarla sería la misma que la relación entre los pesos de sus átomos. Dalton tomó como peso unidad el del hidrógeno, y así calculó el peso atómico relativo del oxígeno. Del mismo modo calculó el peso del átomo de nitrógeno a partir del amoníaco, y los pesos de los elementos que se no combinan con el hidrógeno a partir de sus combinaciones oxigenadas, teniendo en cuenta el peso atómico relativo del oxígeno. No hace falta comentar el error evidente que se encuentra detrás de estas suposiciones, pero en su momento fueron realmente innovadoras.

Dalton también se basó en los trabajos de C. F. Wenzel (1740-1793), L.B. Guyton de Morveau (1737-1816), J. B. Richter (1762-1807), y E. G. Fischer (1754-1831), quienes tabularon las masas de varias sustancias que reaccionaban entre sí. A estas cantidades gravimétricas, que eran intercambiables, las llamaron equivalentes, y no tenían en consideración la actual diferencia entre átomo y molécula.

Sin entrar en más profundidades, podemos afirmar que aunque su teoría contenía imprecisiones y errores, ofreció a los químicos del siglo XIX ciertos conceptos nuevos e importantes al cuantificar la vaga idea que se tenía de los átomos y concretar el concepto de elemento, así como al explicar la discontinuidad de las proporciones dentro de los compuestos según las leyes de las proporciones constantes y múltiples. También



sugirió que la disposición de los átomos en un compuesto podía representarse mediante un esquema que indicase su estructura real, con lo que se simplificaba notablemente la formulación de las reacciones químicas.

La propagación de sus ideas se inició en Inglaterra cuando Humphry Davy (1778-1829), el primer químico que reconoció el genio de Dalton, le invitó a impartir varias conferencias en la Royal Institution en diciembre de 1803 y en enero de 1804. En 1807 fue invitado por la Universidad de Edimburgo, y la exposición de su teoría causó gran expectación [Whitt, 1990].

Pero Dalton no había presentado aún una versión escrita de su hipótesis cuando Thomas Thomson (1773-1852) incluyó un resumen de ella en la tercera edición de su *System of Chemistry* de 1807. Thomson la conocía porque en 1804 había viajado a Manchester para visitar a William Henry (1774-1836), y allí mantuvo una breve entrevista con Dalton, en la que éste le explicó los símbolos que utilizaba para representar los elementos y los compuestos, y las suposiciones que había que realizar para deducir los pesos atómicos de los elementos a partir de los

análisis cuantitativos de las sustancias. A pesar de que este hecho pudiera parecer una apropiación indebida de la propiedad intelectual de Dalton, Thomson fue honesto y le citó constantemente en su libro, que fue el que propagó su teoría a otros científicos como Berthollet y Avogadro, antes de que Dalton las publicara en 1808 en el *New System of Chemical Philosophy*. Por cierto, que ese mismo año, Thomson y William Hyde Wollaston (1766-1828) confirmaron la teoría atómica al presentar pruebas experimentales de la ley de las proporciones múltiples.

En el *New System of Chemical Philosophy*, la teoría atómica se encuentra en el apartado "Sobre la síntesis química" (pp. 211-16), y en él Dalton incluyó varias láminas que reflejaban los símbolos asignados a cada elemento químico y a varios compuestos, y en cuya explicación aparece la primera tabla de masas atómicas relativas publicada (Figura 2).

Como es natural, sus ideas despertaron mucho interés, y podría decirse que marcaron un antes y un después en la historia moderna de la teoría atómica. Varios científicos se dedicaron a experimentar partiendo de ellas, y en 1815 y

1816 vieron la luz dos trabajos realizados por el médico inglés William Prout (1785-1850), en los que demostraba que las gravedades específicas de varios cuerpos en estado gaseoso eran múltiplos exactos de la del hidrógeno, al que suponía la "materia primaria" que originaba todas las demás, y al que denominó "protyle". A partir de este momento se definió la Teoría Atómica Química como [Rocke, 1984: 519]:

"la teoría de la composición química que asigna un peso relativo característico a cada uno de los elementos, procurando representar a todas las sustancias como formadas por múltiplos enteros de esos pesos",

sin preocuparse sobre las formas, tamaños y configuraciones de dichas partículas, ideas que constituyeron la Teoría Atómica Física.

Tal y como era previsible, pronto comenzaron a aparecer fisuras en la teoría de Dalton. Así, el 31 de diciembre de 1808 un joven químico francés llamado Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) leía ante la Société Philomatique una memoria en la que mostraba que las sustancias gaseosas se combinaban en proporciones de números enteros sencillos, no necesariamente 1:1,

sino 1:2, 1:3, 2:3, etc. Este hecho suponía que las sustancias gaseosas no estaban formadas por un único átomo como postulaba Dalton, por lo que sus experimentos crearon una gran confusión entre los químicos de la época. Gay-Lussac continuó investigando, y en 1814 insistió en su idea de que los volúmenes eran conceptos diferentes a las masas a la hora de asignar las relaciones entre los compuestos químicos que reaccionaban, aunque no supo encontrar una explicación. A pesar de ser un experimentador de reconocido prestigio, miembro de la importante Société d'Arcueil liderada por Claude Louis Berthollet (1748-1822), sus resultados fueron puestos en duda sobre todo por Dalton, quien nunca los aceptó porque suponían que los átomos eran divisibles. Fue el italiano Amedeo Avogadro (1776-1856) quien resolvió el enigma en 1811⁵, al explicar que:

"la molécula de hidrógeno, al igual que la de cloro, en estado gaseoso está formada por dos átomos. Cuando se combinan cloro e hidrógeno gaseosos, se produce la reacción $H_2 + Cl_2 = 2HCl$, y no $H + Cl = HCl$ ".

Por otro lado, el francés André Marie Ampère (1775-1836) publicó una teoría similar a la de Avogadro en 1814⁶, pero ambas hipótesis, o pasaron desapercibidas, o no fueron tenidas en cuenta por los científicos de la época, como explicaremos más adelante.

En Suecia, Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) fue uno de los químicos que desarrolló con mayor rigor la teoría atómica a partir de 1810. Berzelius aceptó en un principio los resultados de Gay-Lussac para las sustancias simples y pudo utilizar las densidades gaseosas para determinar pesos atómicos, aunque no supo salvar la contradicción planteada entre el átomo indivisible de Dalton y las consecuencias de la generalización de la ley de Gay-Lussac. En 1813 introdujo por primera vez los símbolos que

utilizamos hoy en día para representar a los elementos, aunque fue cambiando las abreviaturas a lo largo del tiempo, como puede observarse en el óxido de cobre (II) (actual "CuO"), al que primero designó "Cu + 2O", más adelante "Cü", y finalmente "Cü", en un intento de simplificar la formulación. Y aunque para Dalton estos símbolos eran "horripilantes" (1837), la influencia de Berzelius sobre los químicos de la época fue enorme hasta 1840, momento en el que irrumpió la química orgánica con gran fuerza y el sistema atómico de Berzelius se desmoronó al no poder explicar la composición de muchas fórmulas orgánicas. Entonces se originó una de las mayores anarquías que ha existido en el mundo científico, porque, por si fuera poca la confusión creada al designar con diferentes símbolos a las mismas sustancias, fueron varios los pesos atómicos que se tomaron como referencia: hidrógeno = 1 (Dalton), oxígeno = 1 (Thomson), oxígeno = 10 (Wollaston y Gay-Lussac), y oxígeno = 100 (Berzelius).

En otros países, la recepción de la teoría atómica de Dalton fue muy temprana; en Rusia apareció por primera vez en 1813; en Estados Unidos, en 1819, en Alemania, en 1814⁷; lo que ocurrió en España será objeto de análisis en un próximo número de esta revista.

LA TEORÍA ATÓMICA QUÍMICA DESDE 1814 A 1860

El cálculo de los pesos atómicos

Durante las cuatro primeras décadas del siglo XIX, muchos químicos europeos se dedicaron a investigar sobre los pesos atómicos, tanto los de sustancias fácilmente vaporizables como los de otras de imposible vaporización para los medios de la época. Así, para obtener los valores de las masas

atómicas de las sustancias sólidas, Pierre Louis Dulong (1785-1838) y Alexis Thérèse Petit (1791-1820) enunciaron en 1819 la ley que lleva su nombre. Ambos trabajaban en la Escuela Politécnica de París, y con sus investigaciones consiguieron obtener el peso atómico de los sólidos (Pat.) a través de su calor específico (Ce(s)) mediante la relación:

$$\text{Pat.} \cdot C_e(s) = \text{Constante}$$

Ese mismo año (1819), Eilhard Mitscherlich (1794-1863) descubrió el isomorfismo mientras se encontraba trabajando en un laboratorio botánico de Berlín, ley que pudo utilizarse heurísticamente para deducir la fórmula de una sustancia isomorfa a otra, de estructura ya conocida. Cuando se publicaron ambos descubrimientos -con poco tiempo de diferencia-, Berzelius, que parecía tener el don de la oportunidad, se encontraba presente en ambas ciudades, quedó completamente convencido de la idoneidad de la teoría atómica y se convirtió en su más importante adalid.

Atomista al igual que Berzelius, Jean Baptiste Dumas (1800-1884), uno de los químicos más influyentes de la época, publicó en 1826 un método original para determinar la densidad de los vapores de los elementos, con el que pudo calcular lo que él creía que era su peso atómico. Pero en 1830 y en 1832 su sistema, muy riguroso y exacto, le mostró que la densidad del vapor del fósforo era cuatro veces el valor de su peso atómico; la del azufre, seis veces y la del mercurio, la mitad. Como aceptaba las hipótesis de Ampère y Avogadro y pensaba que las moléculas de todos los gases elementales estaban formadas por dos átomos, no fue capaz de resolver el rompecabezas planteado, por lo que concluyó en 1837 [Bensaude, 1993: 161-162]:

"si j'en étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience; et jamais en chimie, nous ne devons aller plus loin que l'expé-

5 *Journal de Physique* (1811): "Wssai d'une manière de déterminer les masses relatives de molécules élémentaires des corps et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons" (Pullman, 1995).

6 "Lettre à Berthollet, sur la détermination des proportions dans lesquelles les corps se combinent, d'après le nombre et la disposition respective des molécules dont les parties intégrantes sont composées" (Partington, vol. IV, 1964: 217).

7 Rusia: Gise, F. (1813-7): *General chemistry for teachers and students* (Solov'ev, 1968: 300-308).

Estados Unidos: Macneven, W.J. (1819): *Exposition of the atomic theory of chymistry, and the doctrine of definite proportions, with an appendix of chymical exercises by the pupils at the laboratory*. New York, Printed by Grattan and Banks, 1819. Más información sobre la vida científica en Usa durante el siglo XIX, en Taton (1995: 635-644).

Alemania: Wolff, F., *tradujo al alemán el New System de Dalton, texto que se distribuyó en el país en 1814* (Rocke, 1984: 125-152).

nence".

Pero a pesar de atacar de esta forma tan dura la hipótesis de Avogadro, Dumas no era antiatomista, porque siguió creyendo en la existencia de "moléculas químicas" y "moléculas físicas".

El conflicto atomismo-equivalentismo

Todas estas inconsistencias y anomalías hicieron que, iniciado el segundo tercio del siglo XIX, aún permanecieran sin resolverse dos cuestiones fundamentales: "¿Cuántos átomos hay en una molécula?", y, este número, "¿es el mismo para todos los elementos?" [Rocke, 1984: 115-118].

Los químicos buscaron una vía alternativa que solucionara los problemas abiertos por la teoría atómica y creyeron encontrarla en la teoría de los equivalentes, cuyos valores estaban dados por la experiencia. Fueron adoptados por un gran número de científicos gracias a Leopold Gmelin (1788-1853), que publicó un manual de química teórica de gran difusión, y en cuya cuarta edición⁸ incluyó una tabla de "pesos atómicos" que en realidad era de equivalentes.

A partir de este momento su uso se generalizó, y como consecuencia inmediata, la tabla de pesos atómicos de Berzelius dejó de tener éxito entre sus contemporáneos. Durante bastante tiempo se confundieron los pesos equivalentes y los atómicos porque, entre otras razones, se denominaba a los unos con el nombre de los otros. De este modo, al comenzar la cuarta década del siglo XIX, los químicos se encontraban divididos en varias escuelas teóricas separadas aproximadamente por las fronteras de varios países. Por ejemplo, en Francia predominaba el sistema de los equivalentes a pesar de la oposición de Auguste Laurent (1808-1853) y Charles Frédéric Gerhardt (1816-1856), quien se dio cuenta de que las cantidades obtenidas en las reacciones correspondían siempre al doble de las fórmulas admitidas ("H₂O" y "C₂O"), lo cual com-

plificaba la escritura inútilmente. Entonces propuso doblar los pesos atómicos del carbono (12 en vez de 6) y del oxígeno (16 en vez de 8), y reducir a la mitad el peso atómico de ciertos metales [Bensaude, 1993: 176]. Esta es la llamada "hipótesis de los 2 volúmenes de Gerhardt", enunciada en 1843; si hubiera sido admitida, habría llevado al cálculo de los pesos atómicos correctos. Pero, además de por sus opiniones políticas, sus críticas al trabajo de los químicos más importantes del país les hicieron muy impopulares, por lo que sus sugerencias no tuvieron demasiada aceptación".

El congreso de Karlsruhe y sus consecuencias

Resumida en pocas palabras, la comunidad científica en la década de los cincuenta del siglo pasado era una Torre de Babel. No sólo discrepaban los equivalentistas y los atomistas entre sí, sino que, dentro de cada bando, existían importantes divergencias. La anarquía era tan grande que una misma substancia podía escribirse de muchas maneras; el ejemplo más utilizado es el del ácido acético, para el que Friedrich August Kekulé (1829-1896) llegó a contar 19 fórmulas diferentes [Bensaude, 1993: 177].

Era necesario hacer algo para remediar esta situación, y, convocados por Kekulé y Charles Adolph Würtz (1817-1884), ambos partidarios del atomismo, 140 químicos de varios países se reunieron en el Primer Congreso Internacional de Química, que tuvo lugar del 3 al 5 de septiembre de 1860 en la ciudad alemana de Karlsruhe. Desafortunadamente, no acudió ninguno de los representantes de la antigua química, como Hermann Kolbe (1818-1884) o Marcellin Berthelot (1827-1907) [Rocke, 1984: 292-3]. El único español que asistió fue Ramón Torres Muñoz de Luna (1822-1890), catedrático de Química General en la Universidad de Madrid, y su participación en el congreso será analizada en un próximo capítulo.

Durante esos tres días los químicos dis-

cutieron entre sí sin ponerse de acuerdo. Este resultado es lógico, ya que no parece muy apropiado decidir la naturaleza de los átomos y de las moléculas mediante un voto en una asamblea [Bensaude, 1993]. Pero al finalizar el congreso se repartió entre los asistentes un trabajo escrito por un hasta entonces desconocido profesor italiano llamado Stanislao Cannizzaro (1826-1910), titulado *Sunto di un Corso di Filosofia Chimica* que ya había sido publicado en 1858, en el que mostraba que la química era una única ciencia y que la aplicación rigurosa de la hipótesis de Avogadro podía conducir a un único sistema de pesos atómicos. En el momento de su entrega nadie lo tuvo muy en cuenta, pero Lothar Meyer (1830-1895), profesor en Breslau, lo leyó detenidamente durante el viaje de regreso a su casa después del Congreso, y quedó tan impresionado que expresó sus sentimientos con esta hermosa frase:

"Las escamas se cayeron de mis ojos. Las dudas desaparecieron, y un sentimiento de calma ocupó su lugar".

Meyer pasó los siguientes tres años escribiendo un libro titulado *Die modernen Theorien der Chemie* (1864), en el que desarrolló las teorías de la Química a partir de la hipótesis de Avogadro, y tuvo una gran influencia en el resto de químicos de la época [Ihde, 1984: 229-230]¹¹.

Pero a pesar de este deslumbrante episodio final, no todo el camino resultó fácil para los atomistas químicos después de esta reunión. Quedaron algunos focos de resistencia hasta el final del siglo, siendo uno de los más poderosos el de la escuela de Marcellin Berthelot en Francia, quien no utilizó fórmulas atómicas hasta 1891 y arrastró en su obstinado equivalentismo a la mayoría de los sabios franceses¹². Saber si España -de acuerdo con los hábitos adquiridos durante la Ilustración- se miró o no en el espejo galo será desvelado en un próximo número de esta revista.



8 Más información sobre este aspecto en Gyung (1996: 1-31), Lerere (1993: 160-169), y Rocke (1978: 595-600).

9 *Handbuch der Chemie*, 13 vols. Heidelberg (1843-1870), traducida al inglés por H. Watts: *Handbook of Chemistry*, 19 vols. Londres (1848-1872).

10 Más datos sobre las ideas de estos dos químicos en Blondel (1996), Izquierdo (1995: 365-376) y Knight (1995: 120-133).

11 Para completar la información sobre lo que ocurrió en Karlsruhe, consultar Beck (1991: 997-998), y sobre Cannizzaro, ver Bradley (1992).

12 La figura de Berthelot ha sido ampliamente estudiada por numerosos autores, entre los que destacamos a Dhombres (1992), Ibde (1993: 25-27, 69; 143), Knight (1995: 162-166). Y en general, la evolución de las ideas atómicas en la historia de la humanidad se puede consultar en Pullmann (1995).

FUENTES Y BIBLIOGRAFIA

FUENTES

- Alembic Club (1899a): Alembic Club Reprints nº 2. Foundations of the Atomic Theory: comprising papers and extracts by John Dalton, William Hyde Wollaston, M.D., and Thomas Thomson, M.D., (1802-1808). Edinburgh: Published by the Alembic Club.
- Alembic Club (1899b): Alembic Club Reprints nº 4. Foundations of the Molecular Theory: comprising papers and extracts by John Dalton, Joseph Gay-Lussac, and Amedeo Avogadro, (1808-1811). Edinburgh: Published by the Alembic Club.
- Berzelius, J.J. (1829-1833): *Traité de Chimie*. París, [s.n.], 8 vols.
- Berzelius, J. J. (1832): *Nomenclatura química*. Sacada de la última ed. en alemán y puesta en idioma español por D. M. de los S.G.B y D. J. Barcelona, Imp. José Torner.
- Berzelius, J. J. (1845-1850): *Tratado de Química*. Nueva edición completamente refundida, según la 4ª edición alemana publicada en 1838 por B. Valerius, doctor en ciencias. Traducida del francés al castellano por los doctores Rafael Sáez y Palacios y Carlos Ferrari y Scardini. 12 volúmenes. Tomo I, Madrid, Imp. y Librería de Ignacio Boix, editor.
- Berzelius, J.J. (1972 reimp.): *Essai sur la théorie des proportions chimiques, et sur l'influence chimique de l'électricité*. New York, Johnson Reprint Corporation.
- Dalton, J. (1808): *A New System of Chemical Philosophy*. Part I. Manchester, R. Bickerstaff. [Reproducción facsimil, s.a.].
- Dalton, J. (1810): *A New System of Chemical Philosophy*. Part II. Manchester, R. Bickerstaff. [Reproducción facsimil, s.a.].
- Dalton, J. (1827): *A New System of Chemical Philosophy*. Part First of Vol. II. Manchester, George Wilson. [Reproducción facsimil, s.a.].
- Dumas, J.B. (1828-1843): *Traité de Chimie appliquée aux arts*. París, Béchet-Jeune. 6 vols.
- Dumas, J.B. (1843): *Mémoires de Chimie*. París, Béchet-Jeune / Fortin, Masson et Cie.
- Dumas, J.B. (1845-1848): *Tratado de Química aplicada a las artes, escrito en francés por* -. 9 vols. de texto y 1 de Atlas. Traducida por Luciano Martínez y Enrique Mieg. Madrid, B. Hortelano y Cía.
- Dumas, J.B. (1848): *Resumen de las lecciones de Química pronunciadas en la Escuela Central de Artes y Manufacturas de Francia por* -. Traducidas de la colección litografiada de la citada escuela. Madrid, Imprenta de J. M. Ducazcal. En el prólogo se indica que el traductor ha sido M. Marton.
- Dumas, J.B. (1878): *Leçons sur la Philosophie Chimique*. París, Gauthier-Villars.
- Dumas, J.B. (1972 reimp.): *Leçons sur la Philosophie Chimique professées au collège de France en 1836 par M. -recueillies par M. Bineau, suivies de L'Essai de Statique Chimique des Etres Organisés, leçon profesée par M. Dumas le 20 août 1841, pour la clôture de son cours a l'école de medecine...* Bruxelles, Editions Culture et Civilisation.
- Liebig, J. (1840-1842): *Traité de Chimie Organique*. París, Fortin, Masson y Cie. 3 vols.
- Liebig, J. (1845b): *Cartas sobre la Química y sobre sus aplicaciones a la Industria, a la Fisiología y a la Agricultura, escritas en alemán por* -. Traducidas del francés al castellano por José Villar y Macías. Salamanca, Imp. Juan José Morán.
- Liebig, J. (1847-1848): *Tratado de Química Orgánica*. Traductor: Charles Gerhardt. Traductor al castellano: Rafael Sáez y Palacios y Carlos Ferrari y Scardini. Madrid, 1847. Establecimiento tipográfico-Literario Universal La Ilustración. 4 vols.
- Liebig, J. (1867): *Le developpment des idées dans les Sciences Naturelles: études philosophiques*. París, Libraire Germer Bailliére.
- Wurtz, A. (1867): *Lecciones de Filosofía Química traducidas por el Dr. D. José de Pontes y Rosales*. Madrid, imprenta de M. Ducazcal.
- Wurtz, A. (1869): *Historie des doctrines chimiques depuis Lavoisier jusqu'a nos jours*. París, Librairie Hachette et Cie.
- Wurtz, A. (1873): *Lecciones elementales de Química moderna*. Traductor: Jaime Almera. Barcelona, C. Verdagner y Cía.
- Wurtz, A. (1874a): *Lecciones elementales de Química moderna; vertidos al castellano de la 2ª ed. francesa, por J. Almera. 2ª ed. española corregida, aumentada y expuesta según los programas modernos. Con 132 figuras en el texto*. Barcelona, Imp. Federico Martí Cantó.
- Wurtz, A. (1874b): *Dictionnaire de chimie pure et appliquée*. París, Librairie Hachette et Cie.
- Wurtz, A. (1880a): *La Théorie Atomique*. 3ª ed. París, Bailliére et Cie.
- Wurtz, A. (1880b): *Traité de Chimie Biologique*. París, G. Masson.
- Wurtz, A. (1881): *The Atomic Theory*. 3ª ed. Translated by E. Cleminshaw. London, C. Kegan Paul and Co.
- Wurtz, A. (1904): *La Théorie Atomique*. 9ème ed., précédée d'une introduction sur la vie et les travaux de l'auteur, par Ch. Friedel. París, Félix Alcan, éditeur.

FUENTES Y BIBLIOGRAFIA
BIBLIOGRAFIA

- Auffray, J.P. (1997): L'Atome. Colección "Dominos", dirigida por Michel Serres y Nayla Farouki. France, Ed. Flammarion.
- Beck, C.M. (1991): "Classical Analysis: A look at the past, present and future". *Analytical Chemistry*, 63, nº 20. October 15, 1991: 993-1.003.
- Bensaude-Vincent, B. (1993): *Histoire des Sciences. Histoire de la Chimie*. París, ed. La Découverte.
- Blondel-Mégrelis, M. (1996): *Dire les choses. August Laurent et la méthode chimique*. París, Librairie Philosophique J. Vrin.
- Bradley, J. (1992): *Before and after Cannizaro. A philosophical commentary on the development of the atomic and molecular theories*. Whittles Publishing Services, Caithness (U.K.).
- Carneiro, A. (1993): "Adolphe Wurtz and the atomism controversy". *Ambix*, XL, July, 1993: 75-95.
- Cassini, A. (1992): "El concepto clásico de átomo". *Theoría*, 2ª época, Vol. VII, nº 16, 17, 18, tomo B, 1992: 663-686.
- Coley, N.G. (1992): *Chemical atomic and molecular theory 1800-1900. History of Chemistry Research Group (The Open University)*. Cambridge, The Royal Society of Chemistry.
- Dhombres, J. / Javault, B. (éd.) (1992): "Actes du Colloque 'Marcellin Berthelot: Une vie, une époque, un mythe'". *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, nº 41. París, Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques.
- Grapí Vilumara, P. / Izquierdo Aymerich, M. (1994): "Valoración de la obra de Proust y Berthollet en los textos de Química General". *Llull*, 17 (nº 33), 1994: 325-341.
- Gyung Kim, M. (1996): "Constructing symbolic spaces: Chemical molecules in the Académie des Sciences". *Ambix*, vol. 43, Part, 1, marzo de 1996: 1-31.
- Halperin de Destailats, L. (1965): *Teoría atómico-molecular: Dalton, John/ Avogadro, Amédée/ Ampere, André Marie*. Buenos Aires, Editorial Universitaria.
- Izquierdo Aymerich, M. (1995): "Algunes reflexions sobre el llenguatge simbòlic químic. 'El somni de Lavoisier'". En Puig-Pla (coord.): *III Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica*. Barcelona, Societat Catalana d'Història de la Ciència i de la Tècnica, 1995: 365-376.
- Ihde, A.J. (1984 reimp. 1993): *The development of modern Chemistry*. New York, Dover Publications, inc.
- Kargon, R.H. (1957): En Wiener, Philip P. (ed.): *Dictionary of the history of ideas. Studies of selectes pivotal ideas*. New York, Charles Scribner's Sons. 6 vols., 1957: 132-141.
- Knight, D. (1995): *Ideas in Chemistry. A History of Science*. London, The Athlone Press.
- Langevin, L. (1968): "Apport du Lomonossov (1711-1765) au développement de la théorie corpusculaire". *Actes du XIIe Congrès International d'Histoire des Sciences. Tome XII: Monographies des savants*. París, 1968: 55-58.
- Leicester, H.M. (1967): *Panorama Histórico de la Química. Traducción de Federico Portillo García y Mª de los Angeles Cobo*. Madrid, Ed. Alhambra, S.A.
- Levere, T.H. (1993): *Affinity and Matter. Elements of Chemical Philosophy (1800-1865)*. Great Britain, Oxford University Press. Reimpresión de la edición de 1971.
- Mauskopf, S.H. (ed.) (1993): *Chemical sciences in the modern world*. Philadelphia, University of Pennsylvania Press.
- Mckie, D. (1966): "Los atomistas ingleses anteriores a Dalton". *Endeavour*, 94. Vol. XXV, enero de 1966: 13-15.
- Melsen, A.G.M. van (1957): "Atomism: Antiquity to the seventeenth century". En Wiener, Philip P. (ed.): *Dictionary of the history of ideas. Studies of selectes pivotal ideas*. New York, Charles Scribner's Sons. 6 vols., 1957: 126-131.
- Montserrat Sangra, J.M. / Navarro Veguillas, L. (1995): "La calor en l'atomisme de Lucreci". En Puig-Pla (coord.): *III Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica*. Barcelona, Societat Catalana d'Història de la Ciència i de la Tècnica, 1995: 225-231.
- Nye, M.J. (1993): *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry. Dynamics of matter and dynamics of disciplines 1800-1950. The History of Modern Physics, 1800-1950*. Berkeley - Los Angeles - London, Univ. of California Press.
- Partington, J.R. (1961-1970): *A History of Chemistry*. London, Macmillan & Co. Ltd. 4 vols.: Vol. I, 1970; Vol II, 1961; Vol. III, 1962; Vol. IV: 1964.
- Pellón González, I. (1998): *La recepción de la teoría atómica química en la España del siglo XIX. Memoria de tesis doctoral dirigida por Ramón Gago Bohórquez*. Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
- Pullman, B. (1995): *L'Atome dans l'histoire de la pensée humaine*. París, Librairie Arthème Fayard.
- Rocke, A.J. (1978): "Gay-Lussac and Dumas: Adherents of the Avogadro-Ampère hypothesis?". *Isis*, 69, 1978: 595-600.
- Rocke, A.J. (1984): *Chemical Atomism in the Nineteenth Century. From Dalton to Cannizaro*. Ohio State University Press: Columbus.
- Rocke, A.J. (1993): *The Quiet Revolution. Hermann Kolbe and the Science of Organic Chemistry*. Berkeley, University of California Press.
- Solov'ev, Y.I. / Petrov, L.P. (1968): "Russian Scientists and Dalton's Atomic Theory". En Cardwell, D.S.L. (ed.): *John Dalton & the progress of science*. Manchester, Manchester Univ. Press, 1968: 300-308.
- Taton, R. (1995): *La science contemporaine. 1. Le XIXe siècle*. París, Quadrige / Presses Universitaires de France.
- Tejada, J. et al (1984): *Historia del átomo*. Barcelona, Promociones Publicaciones Universitarias.
- Virieux-Raymond, A. (1953): "Quelques remarques a propos de l'atomisme antique et des atomismes moderne et contemporain". En *Actes du VIIe Congress International d'Histoire des Sciences*. Jerusalem, 1953: 620-624.
- Wheeler, T.S. (1952): "William Higgins, químico (1763-1825)". *Endeavour*, enero de 1952: 47-52.
- Whitt, L. A. (1990): "Atoms or affinities? The ambivalent reception of Daltonian theory". *Stud. Hist. Phil. Sci*, 21, nº 1, 1990: 57-89.
- Wiechowski, S. (1972): *Historia del átomo*. 4ª ed.