

DISCURSO DE INGRESO

De afinidades y enemistades: los átomos vivos de la química* On affinities and animosities: the living atoms of chemistry

Jesús María Arsuaga Ferreras

Académico Correspondiente de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España.

jesusmaria.arsuaga@urjc.es

RESUMEN

En esta presentación se revisa la revolucionaria propuesta de John Dalton según la cual existe una diferencia esencial entre los elementos químicos: la existencia de unos componentes últimos inmutables que caracterizan a cada uno de ellos, los átomos. Las oportunidades de esta hipótesis fueron ventajosamente explotadas por los químicos del siglo XIX; pero al mismo tiempo se originó un considerable rechazo entre gran parte de los físicos de la época.

La discontinuidad de la materia, minúsculas partículas indivisibles que se agitan en el vacío infinito, fue desde Leucipo y Demócrito origen de profundas disputas filosóficas. A partir del Renacimiento, muchos pensadores defendieron la estructura corpuscular de la materia; pero la aceptación de los aparentemente ridículos átomos de los químicos del siglo XIX que se entrelazan entre sí como si tuvieran ganchos y se disponen en el espacio según extrañas conformaciones fue mucho más problemática.

Fueron los resonantes descubrimientos de finales del siglo XIX (rayos X, radiactividad, electrones) y el surgimiento de la teoría cuántica los que pusieron a los átomos y la energía atómica en la vanguardia de la ciencia. Finalmente, el esfuerzo conjunto de físicos y químicos permitió desvelar el secreto mejor guardado de la constitución de la materia: el enlace químico.

PALABRAS CLAVE: Atomismo, vacío, infinito, enlace químico.

ABSTRACT

This presentation reviews Dalton's revolutionary proposal according to which there is an essential difference between chemical elements, the existence of immutable distinctive ultimate components: the atoms. The advantages of this theory were skillfully exploited by 19th century chemists; but at the same time there was considerable rejection by a large part of physicists.

The existence of indivisible particles that move in the infinite void was, since Leucippus and Democritus, the source of deep disputes. Starting with the Renaissance, many thinkers were defenders of the corpuscular structure of matter, but not of the acceptance of the apparently ridiculous atoms of 19th century chemists that intertwined as if they had hooks and were arranged in space according to strange conformations.

It was the resounding discoveries of the late 19th century (X-rays, radioactivity, electrons) and the emergence of quantum theory that put atoms and atomic energy at the forefront of science. Finally, the joint effort of physicists and chemists allowed us to reveal the best hidden secret of matter constitution: the chemical bond.

KEYWORDS: Atomism, vacuum, infinity, chemical bond.

* * Discurso pronunciado por el Dr. D. Jesús María Arsuaga Ferreras en su Toma de Posesión como Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España el día 20 de marzo de 2024.

1. EL ATOMISMO ANTIGUO

Flavio Claudio Juliano (331 – 363 d.C.) fue un personaje de notable y muy controvertida fama en su tiempo. Emperador romano del siglo IV, la posteridad le conoció como “*Juliano el Apóstata*” (Figura 1). Pese a la brevedad de su reinado ha pasado a la historia por ser el único emperador posterior a Constantino I que abrazó abiertamente el paganismo. En efecto, desde que en su lecho de muerte Constantino “el Grande” aceptase el bautismo hasta el último emperador romano Constantino XI, ya en el Imperio Romano de Oriente o Bizantino, Juliano fue el único emperador en once siglos que no favoreció el cristianismo.

Sobrino de Constantino I, había sido educado como el resto de la familia en la fe cristiana, aunque dada su remota posibilidad de acceso al trono se le había permitido también el estudio de la filosofía griega, siendo especialmente aficionado a la corriente neoplatónica (Plotino, Porfirio, Jámblico). Habiendo sobrevivido milagrosamente a la extinción de su rama dentro de la familia imperial, que fue exterminada a la muerte de Constantino I, diversas circunstancias favorables le auparon primero a la categoría de César (355 – 360 d.C.) y finalmente a la de emperador (361 – 363 d.C.).

Fue en el culmen de su poder cuando renunció explícitamente al cristianismo, se entregó a sus meditaciones filosóficas, mezcla de neoplatonismo y neopitagorismo, e intentó retornar al pasado cívico, religioso y cultural del mundo pagano. Se le atribuye una muy famosa locución que resume su actitud: “*leí, comprendí, rechacé*”. En su caso, está aplicada a la religión cristiana y es una forma de manifestar que su voluntaria defección para retornar al pasado grecolatino no era accidental, instrumental o política, sino que actuaba con perfecto conocimiento de causa y profundo convencimiento. De aquí le viene su sobrenombre de “apóstata”.¹

¿Qué tiene que ver todo esto con la teoría atómica? ¿Acaso Juliano era seguidor de Demócrito o Epicuro? Ciertamente, no, todo lo contrario. Sin embargo, esas mismas palabras (leí, comprendí, rechacé), pudieran también atribuírsele al que para muchos es el más insigne científico, no digo ya filósofo, de todos los tiempos, Aristóteles (Figura 1). En efecto, Aristóteles (384 – 322 a.C.) también leyó, comprendió y rechazó; pero no la religión cristiana, que obviamente no conoció, sino el atomismo griego, versión primigenia de las modernas teorías atómicas. Nadie como él entendió las virtudes y los peligros que las ideas atomísticas conllevaban.

El primer atomismo surge a caballo entre los siglos quinto y cuarto antes de Cristo y está vinculado a dos personajes, Leucipo y Demócrito, que en la historia de la filosofía van siempre como cogidos de la mano. De Leucipo no sabemos prácticamente nada, hasta el punto de que algunos estudiosos ponen en tela de juicio su existencia; pero esta posición no es aceptable para nosotros: si Aristóteles lo cita, no podemos dudar de su palabra. Por el

contrario, de las ideas y el pensamiento de Demócrito sabemos bastante, aunque no de su biografía personal (Figura 1).

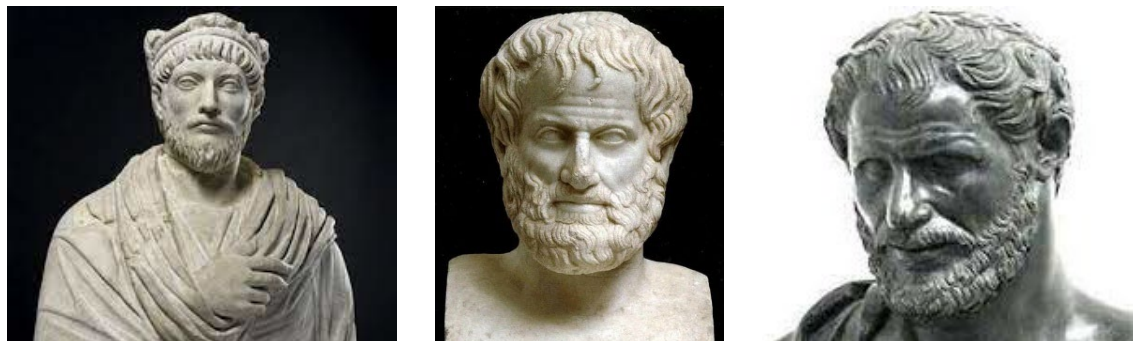


Figura 1. A la izquierda, Juliano el Apóstata, emperador romano (361 – 363 d.C.) al que se atribuye la frase “*leí, comprendí, rechacé*” en relación con la fe cristiana. En el centro, el famoso filósofo griego Aristóteles (384 – 322 a.C.) que 700 años antes había adoptado una posición similar en relación con las ideas atomísticas. A la derecha Demócrito (¿460 – 370? a.C.), padre del atomismo antiguo.

Las fechas de su nacimiento (460 a.C.) y muerte (370 a.C.) son totalmente hipotéticas, aunque es seguro que vivió mucho. No sabemos dónde nació (Abdera o Mileto) y tampoco dónde murió. Y eso que murió ya bien entrado el siglo cuarto antes de Cristo. Fue un gran viajero, se interesó por todo, escribió y enseñó muchísimo. En su vida cotidiana era austero y frugal. Todas las fuentes posteriores, incluido Cicerón, insisten en que era un excelente escritor y orador y reiteran la calidad de su redacción y la excelencia de su retórica. Según una vieja tradición, tenía la costumbre de sonreírse o hacer una mueca de risa, hasta el punto de que algunos pensaban que estaba loco. Y con esa media sonrisa se le suele representar artísticamente. Pero en realidad su carácter era más bien adusto y cuando le preguntaban por la causa de su sonrisa, respondía que era por la necedad y estupidez humana y por la insistencia en tropezar en los mismos errores.

Nos han llegado múltiples referencias antiguas de los escritos de Demócrito sobre principios morales, física, cosmología, fisiología animal, música, arte y agricultura. También escribió sobre el alma, como después haría Aristóteles, y tuvo fama de buen matemático; por ejemplo, se le atribuye ser el primero entre los griegos en mostrar que el volumen del cono y la pirámide deben ser la tercera parte del cilindro y el prisma de igual base. Sobreviven muchos comentarios y aforismos que parecen ser de su autoría, como los siguientes:²

“Tres son las consecuencias de la sabiduría: razonar bien, hablar bien y obrar como se debe”.

“Muchos son los que actuando de la manera más despreciable hacen gala de los más bellos discursos.”

Desgraciadamente, no se ha conservado ninguno de sus textos originales y debemos contentarnos con referencias indirectas de otros autores. Para mayor confusión, 150 años

después de su muerte, las teorías atómicas de Leucipo y Demócrito fueron retomadas, pero también alteradas, por el ilustre filósofo Epicuro de Samos. De este modo, los autores posteriores a Epicuro no siempre distinguieron las enseñanzas de Demócrito y Epicuro; por eso, la vinculación del atomismo a otras cuestiones de índole religiosa y ética (inmortalidad del alma, negación de la existencia de los dioses y un largo etcétera) son, en realidad, críticas más bien al epicureísmo y no necesariamente a la teoría atómica original de Demócrito.

En este contexto, cabe preguntarse cuáles eran las verdaderas ideas de Demócrito sobre el atomismo y si sabemos algo de ellas a ciencia cierta. La respuesta es afirmativa. Sabemos bastante, no todo se ha perdido, porque viene en nuestra ayuda Aristóteles, que es anterior a Epicuro y que menciona muchísimas veces a Demócrito, siempre con el máximo respeto. Sirvan como ejemplo estas citas suyas en las que reflexiona sobre filósofos que le antecedieron, incluidos Sócrates, Platón, Empédocles o Anaxágoras:³

“En general, ninguno trató tema alguno sino superficialmente, a excepción de Demócrito. Este, en efecto, parece haberse preocupado por todo y se distingue, entonces, de los demás ya en su forma de proceder.”

“Leucipo y Demócrito, por su parte, explican todos los fenómenos con rigor metódico y con una misma teoría, tomando el punto de partida que es el natural.”

“Demócrito, a diferencia de los otros, fue el único en hablar con propiedad ...”

“En lo referente a la existencia de magnitudes atómicas ... Demócrito parece haber sido convencido por argumentos de carácter físico y más apropiados al asunto.”

Por eso, en contra de lo que se suele pensar, la doctrina más poderosa que Aristóteles se esforzaba por refutar era el atomismo, pues consideraba que era la más completa, seria, razonable, rigurosa. Al releer los escritos de Aristóteles en relación con los pensadores que le precedieron, parece que se orientan sobre todo a rebatir a su maestro Platón, con el que estuvo veinte años en la Academia de Atenas. Pero si se profundiza se comprueba que lo que de verdad supone un reto contra sus teorías no es el pitagorismo ni el platonismo sino las ideas de Demócrito.

De este modo, como en una repetitiva sesión de espiritismo filosófico, Aristóteles conjura continuamente el espíritu de Demócrito para citarlo y refutarlo en casi todos sus escritos: la metafísica, la física, el tratado sobre el cielo, la meteorología, sobre el alma, de la generación y corrupción y algunos cuantos más. Es cierto que todo nos lo refiere el *médium*, tanto las preguntas como las respuestas, pero depositamos una amplia confianza en la intermediación de Aristóteles. Evidentemente lo que nos dice ha pasado por su cerebro y ha sido interiorizado y asimilado; pero, con todo, podemos hacernos una idea razonablemente válida de cuáles eran las ideas atómicas de Demócrito que se resumen en la Tabla I.

Tabla I. Ideas atómicas de Demócrito extraídas de textos de Aristóteles.

1	Existen dos elementos o principios: los átomos/indivisibles (lo que es) y el vacío (lo que no es).
2	Los dos principios existen por igual. El vacío, lo que no es, es extenso, infinito, inmutable, eterno y tan real como lo que es.
3	Son propiedades de los átomos las siguientes: - Infinitos en número y figuras/formas - Todos de la misma naturaleza o sustrato - Eternos, inalterables, indestructibles - Sólidos (macizos, impenetrables, sin poros) - Contiguos, nunca continuos - De diversa magnitud (extensión, ¿tal vez peso?) - En movimiento intrínseco perpetuo

Un aspecto fascinante de las enseñanzas de Demócrito, especialmente original, es la concepción del vacío, que en física hoy llamaríamos espacio, cuya existencia es independiente de la de los átomos. También las nociones de infinito y continuidad que están en los fundamentos de las matemáticas antiguas y modernas. Por otra parte, no está claro en qué consistía la diferencia en magnitud de los átomos; algunos la interpretan solo como de tamaño (átomos grandes y pequeños), pero otros lo atribuyen a diferencia de peso. Sin embargo, parece que la atribución de peso a los átomos es posterior, posiblemente de Epicuro, ya que es este autor quién afirma que existe “arriba” y “abajo”. En todo caso, si los átomos tienen igual naturaleza o sustrato, según Demócrito, cabría inferir que los átomos más grandes tendrían un peso superior.

Las consecuencias conceptuales de la visión atómica de la naturaleza son muy profundas y no son objeto detallado de esta comunicación. Se puede mencionar de pasada que afectan a aspectos de la filosofía (ontología, epistemología, determinismo, materialismo), de la física (espacio, tiempo, movimiento, cambio, elementos, cosmología) y de las matemáticas (infinito, continuidad). A todo lo cual se añaden otras reflexiones religiosas y éticas: si el universo y el tiempo son infinitos y los átomos son eternos, no han sido creados ni pueden ser destruidos, entonces ¿existen los dioses? ¿existe la creación?

Son muchas las discrepancias de Aristóteles respecto del sistema Demócrito. Una importantísima se refiere al origen del movimiento. Como es bien sabido, para Aristóteles cuanto carece de ánima se mueve porque es movido por algún otro agente externo, excepto el “primer motor”, que es inmóvil y origen de todos los demás movimientos. Pero en la visión de Leucipo y Demócrito, los átomos se mueven sin causa externa, el movimiento es intrínseco en ellos, ya lo hacían en el pasado y lo seguirán haciendo en el futuro, eternamente. Aristóteles consideraba esta posición una manera de esquivar la búsqueda de la causa real del movimiento, una trivialidad: se mueven ... porque es inherente a ellos moverse.

Otra cuestión esencial relacionada con la anterior se refiere al vacío, que ya hemos mencionado. Demócrito consideraba que el vacío es imprescindible para que pueda existir movimiento; pero su existencia es rechazada rotundamente por Aristóteles al que repugnaba la idea de que la materia ocupe un lugar en el espacio, de modo que si desapareciera la materia, los átomos, subsistiría el espacio vacío. Si el público abandona un auditorio, obviamente quedarán los asientos vacíos; pero si estamos pensando en el universo, en el Cosmos en su conjunto, si pudiéramos quitar todo lo que es, ¿quedaría algo, quedaría el espacio que ocupaba? ¿ese sitio es una realidad física o es una pura entelequia? Aristóteles lo negaba y razonaba que si todo lo que es tiene un lugar y ese lugar existe, el lugar también estará en un lugar y así hasta el infinito, lo cual carece de sentido.

Una consecuencia muy importante de lo anterior tiene que ver con la estructura del Cosmos. Pensemos en el mundo que vemos y conocemos, la Tierra, la Luna, el Sol, los planetas, las estrellas; pero ¿qué hay más allá? Aristóteles nos responde que el universo es autosuficiente, se autocontiene. Existe lo que existe y desde la esfera exterior, la de las estrellas fijas, hacia dentro, todo está lleno ¿Y qué hay fuera? La pregunta carece de sentido, fuera del Cosmos no hay nada. Pero la nada entendida como la inexistencia, no como algo vacío mayor que el propio Cosmos. Por eso, la esfera del mundo no tiene que sostenerse ni apoyarse en ningún sitio. No existe dentro y fuera del Cosmos, todo está dentro, porque si existiera fuera, resultaría que estaríamos estudiando solo una porción del universo, no el universo completo. Sin embargo, para Demócrito, nuestro mundo, el que vemos y conocemos y del que formamos parte solo es un remolino, uno más de los torbellinos del espacio infinito ¿Qué hay fuera de nuestro mundo? La respuesta es un sin número de otros mundos en continua evolución. Más aún, nuestro mundo tuvo un comienzo y tendrá un final. En su continua agitación, los átomos que accidentalmente se juntaron dando lugar a nuestro vórtice, volverán a disgregarse algún día.

¿Qué dirección ha seguido la física en la ciencia posterior? ¿Estamos hoy más cerca de la visión de Aristóteles o de la Demócrito? La respuesta no es unánime. Giordano Bruno pensaba que el universo es infinito⁴ y si recitamos el famoso escolio de Newton en los Principia, evidentemente resuena en nuestros oídos Demócrito:⁵

“El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación a nada externo, permanece siempre igual a sí mismo, inmóvil; el relativo es la medida de este espacio ... definida por nuestros sentidos según su relación a los cuerpos, y que el vulgo toma por espacio inmóvil...”

Pero esta no es en general la visión de la física moderna. Desde Einstein, el espacio, el tiempo y el movimiento son relativos, se niegan los absolutos; más aún, espacio y tiempo ni siquiera son independientes, están íntimamente entrelazados en el continuo espacio-tiempo que, vinculado al campo gravitatorio, es corpóreo, sustancial, tiene propiedades físicas, posee

energía. Conceptos estos más cercanos a las ideas de Aristóteles. El vacío en la física moderna puede que no contenga materia, pero está lleno de otras cosas.

Otra crítica profunda que hace Aristóteles se dirige a la noción de infinito, ¿qué es eso del infinito? ¿cuántos infinitos hay? Ya sabían los antiguos griegos y por supuesto Aristóteles que podemos distinguir dos clases de infinitos. El más obvio es hacia lo grande, por acumulación sucesiva; pero a base de dividir, dividir y dividir, nos dirigiremos hacia otro infinito, el de lo infinitamente pequeño. Son dos conceptos diferentes, pero a Aristóteles y a los antiguos griegos ambos les parecían muy peligrosos, pues nos pueden conducir a conclusiones absurdas, especialmente si pretendemos manipularlos como si fueran números o cantidades finitas. La opción preferida por los antiguos griegos fue esquivarlos, evitar meterse en complicaciones. Aristóteles nos dice que el infinito es concebible, tiene sentido, pero su existencia solo es potencial, un puede ser, pero que jamás se realiza. Por ello, el universo infinito de Demócrito no es aceptable.

Antes de seguir avanzando, hagamos una pequeña incursión en el mundo de los infinitos que tanto interesaron a Galileo.⁶ ¿Son todos los infinitos igual de grandes? ¿Puede un infinito ser parte de otro infinito mayor? Con los infinitos pasan cosas raras. Si pensamos, por ejemplo, en el conjunto de los números naturales (1, 2, 3, 4, 5, ...), ¿cuántos números naturales hay? Obviamente, infinitos. Pero ahora pensemos en los cuadrados de los números naturales (1, 4, 9, 16, 25, ...). También son infinitos, pero parece que el número de los cuadrados es menor que el de los números naturales. Por ejemplo, entre el 1 y el 4, primeros cuadrados, están el 2 y el 3; o sea, que los dos conjuntos contienen infinitos elementos, pero el sentido común nos sugiere que uno de los conjuntos parece más nutrido, más completo que el otro, los cuadrados deberían ser un subconjunto del otro. Los matemáticos nos enseñan que no es así. Existe una relación biunívoca entre los dos conjuntos, por cada número natural hay un cuadrado y por cada cuadrado hay un número natural; por tanto, hablando en términos coloquiales ambos conjuntos son igual de numerosos. El lector pensará que esto es un galimatías; probablemente es cierto, pero tenemos que asumirlo, no todos somos matemáticos.

Otra interesante paradoja se refiere a las cantidades infinitamente pequeñas ¿Es posible que adicionando infinitas cantidades minúsculas, pero no nulas, resulte una cantidad finita? Parece que no, si sumamos sin límite avanzaremos siempre hacia el infinito, salvo que sumemos ceros:

$$0 + 0 + 0 + 0 + \dots = 0$$

Pero si agregamos sucesivamente cantidades muy pequeñas, pongamos que una milmillonésima, la suma crecerá tanto como queramos. Ahora bien, ¿sucede así siempre? ¿seguro? De nuevo, la respuesta es ¡Precaución, no siempre la suma sea hace infinita! Es fácil comprobarlo:

$$1 + 1/10 + 1/100 + 1/1000 + 1/10000 + \dots = 1,11111 \dots \rightarrow 10/9$$

No importa cuántos términos se añadan, la suma crecerá y crecerá acercándose cuanto queramos a $10/9$, pero nunca lo alcanzará y menos aún sobrepasará. A la vista de lo anterior, no parece tan desatinada la estrategia de evitar involucrarse en el manejo de los infinitos de filósofos y matemáticos de la Grecia clásica.

El último asunto que merece la pena comentar en la controversia entre Demócrito y Aristóteles, muy relacionada con las cuestiones geométricas que tanto interesaban a los antiguos sabios griegos, es el referente a la continuidad. El mundo de Aristóteles es estrictamente continuo, mientras que en la visión de Demócrito, los átomos pueden estar contiguos, pero la materia es intrínsecamente discontinua. Aristóteles reiteradamente lo refuta considerándolo incompatible con los principios de las matemáticas, es decir, de la geometría:

“... la existencia de cuerpos atómicos entra necesariamente en conflicto con las ciencias matemáticas.”

“... al introducir ese mínimo estaría cuestionando los postulados de las matemáticas”

“... las matemáticas afirman que lo inteligible es divisible ...”

Por su parte, los atomistas usaban el razonamiento opuesto, la llamada paradoja de la divisibilidad infinita: si se divide, divide y se sigue dividiendo reiteradamente un cuerpo, o se llega a un mínimo o al final no quedará absolutamente nada y el cuerpo se disolverá en algo inmaterial. Esta es una cuestión importante en la fundamentación de la geometría: ¿está formada una línea por infinitos puntos? ¿consta un plano de infinitas líneas? ¿un sólido se compone de infinitos planos? Cuidado con la respuesta, porque si los puntos geométricos no tienen extensión, no importa cuántos se agreguen, pues nunca compondrán un segmento; pero si tienen extensión, entonces no son puntos.

Las cuestiones matemáticas jugaron un importante papel en el desarrollo de la filosofía griega. Por ejemplo, cuando los pitagóricos descubrieron que el lado y la diagonal de un cuadrado son inconmensurables entre sí (no existe una relación entre números enteros que los relacione) optaron por las matemáticas del continuo, o sea, la geometría pura. Por su parte, una antigua tradición refiere que en el pórtico de la Academia de Platón en Atenas, una inscripción advertía: *no entre aquí quien no sepa geometría* (matemáticas). Eudoxo, compañero de Aristóteles en la Academia, fue un reputado matemático autor de algunos de los más importantes teoremas sobre la continuidad que luego se recopilaron en el famoso libro de geometría de Euclides, *Los Elementos*, escrito 100 años después. No sé si es procedente preguntarse qué pasaría hoy en día en las instituciones académicas si se vetase la admisión a quienes no sabemos las suficientes matemáticas.

Así que Aristóteles, aunque no nos ha legado ningún tratado de matemáticas, les atribuye tanta importancia que asevera que la existencia de cuerpos atómicos entra necesariamente en conflicto con ellas. En todo caso, espero que haya quedado claro que gracias a Aristóteles sabemos mucho del atomismo de Demócrito y conocemos también las razones por las cuales lo combatía con razón o sin ella: leyó, comprendió y rechazó.

Es el caso que, tras un primer aislamiento intelectual, el atomismo tuvo un enorme resurgimiento en los siglos tercero y segundo antes de Cristo gracias al prestigio de Epicuro. Sin embargo, en los siglos posteriores el epicureísmo fue muy combatido por razones éticas, morales y religiosas que inevitablemente arrastraron al atomismo nuevamente al descrédito. Escritores como Cicerón o el hispano Séneca, ambos estoicos, fueron muy críticos con las ideas de Epicuro al que acusaban de hedonista, aunque el epicureísmo era defensor de un placer no desmedido y del disfrute prudente en la vida. Naturalmente, los grandes escritores cristianos como San Agustín también maltrataron a Epicuro e incluso Juliano el Apóstata, con el que ha comenzado esta disertación, repudiaba sus enseñanzas.



Figura 2. En la Divina comedia de Dante Alighieri, Epicuro y sus seguidores son presentados en el infierno, acusados de negar la inmortalidad del alma. En la Edad Media, el atomismo fue rechazado al vincularse con las enseñanzas de los epicúreos.

Por todo ello, el atomismo prácticamente desapareció en la Edad Media europea, con alguna supervivencia en la cultura islámica. De hecho, Dante en la Divina Comedia se acuerda de Epicuro en el Canto X para mandarlo al infierno, en el Sexto círculo, como corresponde a los que no creen en la inmortalidad de alma (Figura 2)⁷:

*Suo cimitero da questa parte hanno
con Epicuro tutti suoi seguaci
che l'anima col corpo morta fanno.*

Dante (*Inferno*, X, 13-15)

*Su cimiterio en esta parte tienen
con Epicuro todos sus secuaces
que dicen que el alma junto al cuerpo muere.*

Dante (*El infierno*, X, 13-15)

2. RESURGIMIENTO DEL ATOMISMO MATEMÁTICO Y FÍSICO

El interés por las ideas atómicas se reavivó en Europa al comienzo del primer Renacimiento, especialmente con el descubrimiento en un monasterio en 1417 de la copia, al parecer sin corromper, de un famoso texto latino del siglo I a.C., la célebre obra de Tito Lucrecio Caro titulada *De Rerum Natura*, hermoso poema filosófico epicúreo en el que se propugnan las ideas atómicas. Curiosamente, fue el propio Papa quien se interesó por el texto, no para defenderlo, sino para combatir más eficazmente desde un enfoque cristiano las enseñanzas epicúreas. Otros factores que igualmente contribuyeron a la difusión del atomismo en este periodo fueron el desarrollo de la imprenta y la aportación ocasional de algunos personajes que defendieron nociones que pueden vincularse al atomismo como Nicolás de Cusa, Fracastoro, Giordano Bruno o Basson. En realidad, el atomismo, como el neoplatonismo, se convirtieron en arietes contra la posición preponderante en las universidades de las ideas, auténticas o atribuidas, de Aristóteles y sus seguidores. Este movimiento antiaristotélico daría lugar ciento cincuenta años más tarde al desarrollo de diversos atomismos científicos, no puramente filosóficos, que podríamos dividir en físicos y matemáticos.

En relación con el atomismo matemático, íntimamente relacionado con las cuestiones geométricas sobre la naturaleza del continuo, el más destacado personaje fue un italiano, Bonaventura Cavalieri (1598 – 1647), religioso jesuata. No se debe confundir su orden (Clérigos Apostólicos de San Jerónimo) con los jesuitas, que eran rivales y enemigos en ciertas cuestiones.⁸ De hecho, los jesuitas, que contribuyeron a la disolución de la orden de Cavalieri en 1668, también retrasaron su acceso personal como profesor de matemáticas a la universidad de Bolonia hasta 1629. Fue alumno de Castelli, cercano colaborador de Galileo, y un gran admirador del genio de Pisa al que escribió más de cien cartas, no siempre bien acogidas ni respondidas. Es también conocido por ser precursor de Torricelli, igualmente alumno de Castelli, que llegó a trabajar unos pocos meses con el anciano Galileo en Arcetri justo al final de su vida.

Cavalieri desarrolló una nueva estrategia de cálculo geométrico, el método de los indivisibles, que es un antecedente del cálculo infinitesimal de Newton y Leibniz. Con su método, determinaba el área de una superficie haciéndola “comparable a todas las líneas” que contiene y el volumen de un cuerpo por “comparación con todos los planos” que hay dentro de él, aunque nunca dio el paso de afirmar que fueran lo mismo, solo comparables. El método de los indivisibles, luego ensanchado por Torricelli y otros, que podríamos calificar de atomismo geométrico, no terminó de convencer a Galileo. No estaba rigurosamente fundamentado y era una herramienta peligrosa. Utilizada con prudencia suministraba valiosos resultados, pero aplicada descuidadamente podía inducir a graves errores. Una famosa paradoja vinculada al método parecía demostrar que los dos triángulos idénticos procedentes de la división de un rectángulo según su diagonal no tenían igual superficie.

Pero, sin duda, es mucho más interesante para el tema que nos ocupa, no el atomismo matemático, sino el incipiente atomismo físico vinculado a dos personalidades descollantes: Galileo y Gassendi. Galileo (1564 – 1642) no presentó una única teoría atómica coherente, sino que a partir de 1611 utilizaba el atomismo cuando le convenía (Figura 3). Así, especulaba ocasionalmente con la existencia de los átomos para explicar algunos fenómenos como, por ejemplo, la causa de la flotación de los cuerpos, la facilidad con que se separan las partes de un líquido o qué pasa cuando una sustancia se funde o disuelve. Por ejemplo, si disolvemos sal en agua, el volumen final de la disolución es menor que el que tenían por separado la sal y el agua. Una explicación razonable sería suponer que, aunque ambas sustancias parezcan continuas, en realidad hay espacios vacíos o huecos en su interior que se rellenan en el proceso de mezcla. De este modo, va saltando de un fenómeno a otro utilizando cuando le parece conveniente las ideas atómicas.

En el caso de la luz, Galileo comparte a veces la idea de los atomistas antiguos que proponían una naturaleza corpuscular, similar a la del fuego, con minúsculos átomos esféricos menores que los de cualquier otra sustancia. Suponía que se movían con una velocidad enorme, pero finita, e incluso intentó medirla. Sin embargo, en otras ocasiones parecía preferir velocidad infinita, lo que implicaría que los átomos luminosos no tuvieran tamaño o que la naturaleza de la luz no fuera corpuscular. Algunos autores sugieren que los diversos flirteos con la teoría atómica son la verdadera causa de la condena de Galileo por la Inquisición romana en 1633 y no la defensa del sistema de Copérnico: si la naturaleza última de las sustancias es atómica y los átomos son inmutables y eternos, cómo dar una justificación a la transustanciación, el dogma según el cual en la consagración eucarística el pan y el vino se convierten físicamente, no simbólica o espiritualmente, en el cuerpo y la sangre de Cristo.



Figura 3. Galileo Galilei (izda.), especuló con las ideas atómicas para explicar diversos fenómenos físicos, incluida la luz. En su último libro (centro) sugiere un atomismo matemático (átomos infinitamente pequeños) para explicar la cohesión de las sustancias. Posiblemente, lo que pretende es defender su teoría del movimiento de caída con demostraciones geométricas (dcha).

En su último libro, *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze*, publicado en 1638 en Holanda para evitar nuevos problemas con la Inquisición, Galileo propone un atomismo matemático que justifique las fuerzas de cohesión y coquetea con la existencia de infinitos átomos infinitamente pequeños separados por infinitos espacios vacíos. Se trata de una ingeniosa especulación, pero totalmente ineficaz en física, ¿para qué sirven los átomos si no tienen tamaño, si son infinitamente pequeños? No están claros los motivos de esta elección de Galileo, pero lo más probable es que lo hiciera para salvaguardar sus demostraciones geométricas, y por tanto continuas, de las variables físicas implicadas en el movimiento y muy especialmente en el movimiento de caída, acelerado pero natural, para el cual la velocidad aumenta linealmente con el tiempo mientras que la altura descendida lo hace de forma cuadrática.

La fama de Galileo ha obscurecido en parte la figura del personaje más distinguido en el redescubrimiento del atomismo físico que fue Pierre Gassendi (1598 – 1655). Francés, pese a su apellido italianizado, es uno de esos personajes del siglo XVII que debatían y se interesaban por todo: astronomía, astrología, física, filosofía, matemáticas, teología y ciencias naturales (Figura 4). Profesor y sacerdote católico, escribió mucho, incluyendo un abundantísimo registro epistolar, ya que se carteaba con todos los grandes personajes de su tiempo. Como reconocimiento, uno de los cráteres de la Luna lleva su nombre (Figura 4). Aquí nos interesa por su intento de rehabilitar la filosofía de Epicuro, incluyendo las ideas atómicas. De la misma manera que los escolásticos habían tratado de fusionar Aristóteles con el cristianismo en las universidades medievales, él intentó algo parecido entre Epicuro y el cristianismo. Debe tenerse en cuenta que Gassendi era contrario a las ideas de Aristóteles y nada mejor para arremeter contra su visión del mundo que la teoría atómica. Gassendi expuso su teoría sobre los átomos principalmente en el libro III de *Syntagma philosophiae* donde atribuye a los átomos tamaño, figura y gravedad. Fue además el primero en emplear el término “molécula” para referirse a una agrupación de átomos.⁹

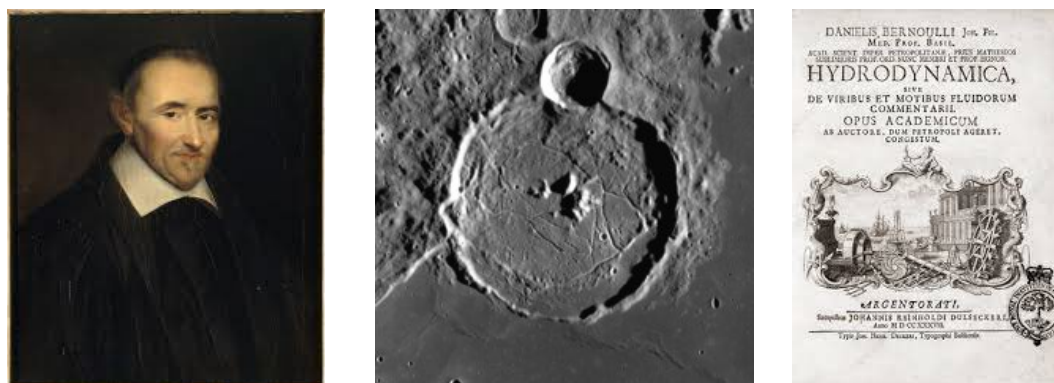


Figura 4. Pierre Gassendi (izda.) retomó en la Francia del siglo XVII el epicureísmo y las ideas atómicas tratando de conciliarlas con el cristianismo y la existencia de Dios. Clérigo polímata y prolífico, uno de los cráteres de la Luna lleva su nombre (centro). Daniel Bernoulli describe cien años después de Gassendi las propiedades del aire en términos corpusculares en su libro *Hydrodynamica*. (dcha).

Dentro del enfoque corpuscular de la materia, pero un siglo posterior a Gassendi, destaca Daniel Bernoulli (1700 – 1782), miembro de una ilustre familia de matemáticos y físicos suizos. En su tratado *Hydrodynamica*, donde aparece el famoso principio por el que todos reconocemos el apellido familiar, se incluye un breve apartado que describe las propiedades elásticas del aire (Figura 4).¹⁰ Sobre la base de lo que ahora llamamos teoría cinético-molecular de los gases, se muestra cómo la ley de Boyle (presión y volumen son inversamente proporcionales) puede justificarse suponiendo que el aire está formando por diminutas esferas agitándose caóticamente en el espacio vacío.

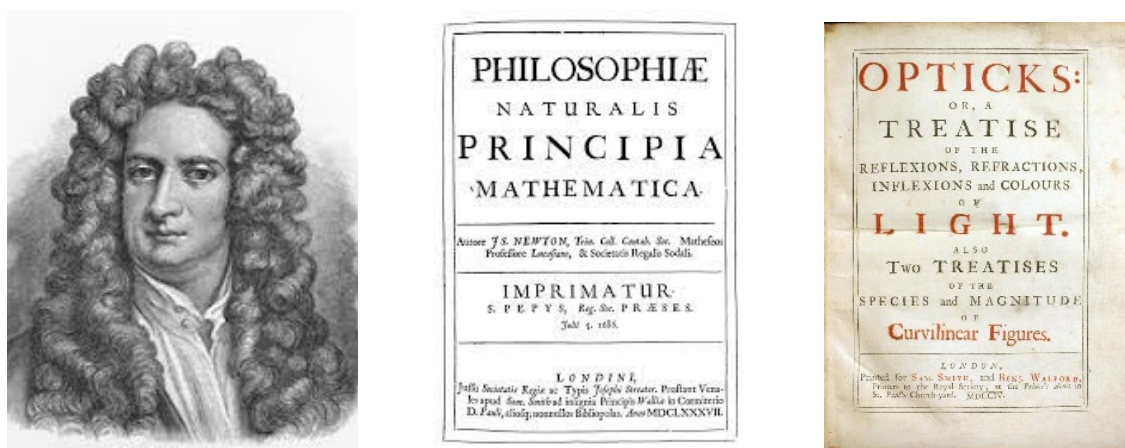


Figura 5. De Isaac Newton (izda.) interesan dos libros que contribuyeron al triunfo del atomismo, los *Principia* (centro) y la *Óptica* (dcha).

El último personaje imprescindible del atomismo físico, previo a la irrupción del atomismo en química, es naturalmente Isaac Newton (1643 – 1727). Más joven que Robert Boyle, su colega y compañero de la Royal Society con quien compartía pasión por la alquimia, fue continuador en parte de sus ideas corpusculares de la materia. En este trabajo nos interesan dos obras suyas. La primera es la más famosa, los *Principia*, considerada por muchos como el libro más importante de la historia de la ciencia, excepto por los biólogos que se decantan por *El origen de las especies* de Charles Darwin. Entre otras cuestiones, se introduce aquí el concepto de atracción a distancia, la posibilidad de que dos cuerpos que no se tocan ejerzan una interacción mutua. La segunda obra fundamental es la *Óptica* (Figura 5).

Como es bien sabido, Newton no terminó de afirmar rotundamente su preferencia por la naturaleza corpuscular de la luz (micropartículas que se mueven en línea recta a enorme velocidad), aunque lo insinuó reiteradamente. Es el caso que en la parte tercera de su *Óptica*, en la última edición que Newton ampliara y corrigiera, se plantean una serie de cuestiones abiertas para que el lector elija lo que mejor le parezca. La última de las cuestiones dice:

Cuestión 31

¿No poseen las pequeñas partículas de los cuerpos ciertos poderes, virtudes o fuerzas con los que actúan a distancia... para producir una gran parte de los fenómenos de la naturaleza? ... los cuerpos actúan unos sobre otros por la acción de la gravedad, magnetismo y electricidad ... ¿puede haber otras que alcancen distancias lo suficientemente pequeñas como para haber escapado hasta ahora a la observación?

Sin duda es una premonición atinada que nos permite dar el siguiente paso para introducir una nueva ciencia de la que aún no hemos dicho nada, la química

3. QUÍMICA: LA NUEVA CIENCIA DEL SIGLO XVIII

Hasta el siglo XVIII no fue posible conectar las teorías atómicas con la química por la sencilla razón de que su base científica y conceptual no se había desarrollado aún. No es lo mismo un conjunto de saberes, por extensos y profundos que sean, que una ciencia tal como prescribe el método científico, estrategia de aproximación al conocimiento de la naturaleza que solo puede aplicarse en unas pocas y concretas disciplinas. Hasta entonces, la química y sus antecedentes eran una enorme amalgama heterogénea de saberes, procedimientos, técnicas y recetas. Por supuesto que se sabía preparar cal, vidrio, porcelana, pólvora, jabón, tintes o pinturas, se extraían aceites, esencias y gomas y se conocían muchos métodos metalúrgicos; pero faltaba coherencia conceptual, rigor metodológico y una explicación global. No era aún una ciencia, sino un amasijo donde confluían disciplinas dispares: alquimia, medicina, farmacia, botánica, metalurgia o minería. Pero de la misma forma que en los siglos XVI y XVII, la física (filosofía de la naturaleza) se emancipó de la filosofía y adquirió categoría superlativa de ciencia, algo parecido sucedió con la química a lo largo del siglo XVIII.

Un primer descubrimiento que jugó un papel decisivo fue el de la existencia de gases diferentes. No hay un aire, sino muchos aires. Para determinar su naturaleza y propiedades particulares fue necesario gran ingenio y el desarrollo de equipos de laboratorio específicos, destacando en la tarea los británicos Black (1728 - 1799), Priestley (1733 – 1804) y Cavendish (1731 – 1810). La segunda gran novedad fue la propuesta de la teoría de la afinidad electiva, desarrollada entre otros por Geoffroy (1672–1731) y Bergmann (1735 – 1784), que permitió establecer tablas y relaciones para predecir y justificar el comportamiento químico de las sustancias en sus combinaciones.

A partir de múltiples nociones previas y a base de un trabajo minucioso en el laboratorio, sobre todo en el manejo de los gases y con el uso sistemático de la balanza analítica, Antoine-Laurent Lavoisier (1743 – 1794) convirtió a la química en una ciencia independiente y tan respetable que él mismo no solo fue elegido miembro de la Academia de Ciencias de Francia, sino también su presidente durante algún tiempo (Figura 6).



Figura 6. Lavoisier, retratado por J. L. David con su mujer (izda.), es la figura clave en el siglo XVIII para la transformación de la química en una ciencia rigurosa y respetable. Su libro *Tratado Elemental de Química* (centro) fue la referencia en la materia durante años. Contiene excelentes láminas de material de laboratorio que, por una parte, reflejan la perfección y complejidad de sus técnicas y por otra muestran el talento artístico de su esposa, Marie-Anne Paulze, que preparó las láminas (dcha).

Las contribuciones de Lavoisier al desarrollo de la química son múltiples y bien conocidas, desde el estudio de las propiedades químicas de un nuevo elemento, al que puso el nombre de oxígeno, recién descubierto y su papel en la combustión, respiración y fotosíntesis, hasta su participación en el diseño de la nueva nomenclatura química. La ley de conservación del peso en las reacciones químicas recibe hoy el nombre de ley de Lavoisier.

Una de sus mayores aportaciones es la precisa definición de elemento químico (sustancia simple) dejando de lado especulaciones filosóficas sobre la naturaleza de la materia: un elemento químico es aquella sustancia que no puede descomponerse en otras más simples. Es interesante observar que sus completas tablas de elementos químicos contienen dos que hoy nos desconciertan: luz y calórico (Figura 7).¹¹

Tras reflexionar sobre la naturaleza de la luz y el calor, Lavoisier consideró aceptable, aunque discutible, admitir la existencia del calórico, un fluido hipotético formado por partículas muy pequeñas que se repelen entre sí, extremadamente sutiles, las de menor tamaño, capaces de penetrar e impregnar las demás sustancias. Estaba equivocado, pero la idea no era descabellada, pues calor y luz están presentes en muchas reacciones químicas que el mismo estudió (combustión, fotosíntesis) y el concepto de energía era desconocido en su época.

PARTIE II, DES SUBSTANCES SIMPLES. 135	
TABLEAU DES SUBSTANCES SIMPLES.	
NOMS NOUVEAUX.	NOMS ANCIENS CORRESPONDANTS.
Lumière.	Lumière.
	Chaleur.
	Principe de la chaleur.
Calorique.	Fluide igné.
	Feu.
	Matière du feu et de la chaleur.

Figura 7. En sus tablas de sustancias simples (elementos químicos), Lavoisier incluía la luz y el calórico, idea errónea, pero no descabellada dado que luz y calor están asociados a muchas reacciones químicas.

En relación con la teoría de la afinidad, necesaria para que las partículas de las sustancias se unan y combinen, cuestión central en química, propone un antagonismo con la repulsión debida a la presencia de la conveniente cantidad de calórico que conduce finalmente al equilibrio y la estabilidad. En sus escritos no hace especulaciones sobre los átomos, pero sí habla reiteradamente de partículas.

Lamentablemente, no llegó a conocer el surgimiento de la moderna teoría atómica de la química ni el aislamiento de nuevos elementos químicos gracias a la electrolisis, porque fue guillotinado en París en 1794 durante “*El Terror*”. El motivo no fue científico, sino político, la participación como socio junto a su suegro en una poderosa empresa de recaudación de impuestos durante el reinado de Luis XVI. En todo caso, uno de sus más tenaces acusadores, el famoso agitador Jean-Paul Marat, no le tenía ninguna simpatía pues consideraba que Lavoisier le había menospreciado y perjudicado desde su puesto en la Academia de Ciencias, institución que la Convención Nacional de Francia suprimió en 1793. Ante las voces de ilustres científicos que se alzaron en contra de su ejecución, especialmente desde Inglaterra y Holanda, es famosa la respuesta que se atribuye al último tribunal de apelación: “*La República no necesita ni científicos ni químicos, el curso de la justicia no puede ser detenido*”.

4. LOS ÁTOMOS IRRUMPEN EN LA QUÍMICA

La introducción de la teoría atómica en la nueva ciencia química surgida en el siglo XVIII es obra del inglés John Dalton (1766 – 1844) que la propuso entre 1803 y 1808.¹² Para entonces se estaban asentando diversas leyes ponderales (relativas al peso) aplicables a todas las reacciones químicas como la ley de Lavoisier. También se investigaban leyes volumétricas específicas para las reacciones químicas entre gases. Dalton trabajó en ambas direcciones con aportaciones notables, como la ley ponderal de las “proporciones múltiples” que suele denominarse ley de Dalton.

En la Tabla II se recuerda esta ley con un ejemplo imaginario. Muchos elementos químicos forman cuando se combinan entre sí más de un compuesto. En la tabla se comparan tres compuestos reales de nitrógeno y oxígeno cuyas fórmulas sabemos hoy que son N_2O , NO y NO_2 , algo totalmente desconocido a principios del siglo XVIII. Los hemos llamado nitroso, nítrico y supernítrico para identificar la menor o mayor proporción de oxígeno en cada uno. En las últimas columnas, la tabla recoge la cantidad de oxígeno (en peso o masa) que cada compuesto contiene por cada gramo de nitrógeno. Sorprendentemente, las tres cantidades de oxígeno guardan entre sí una proporción justa entre números enteros, en este caso $1/2/4$. No es algo accidental o casual, sino sistemático, y esto es lo que recoge la ley de las proporciones múltiples.

Tabla II. Ejemplo imaginario de la ley de las proporciones múltiples de Dalton.

Compuesto	Nombre ficticio	Peso de nitrógeno (g)	Peso de oxígeno (g)	
N ₂ O	Óxido nitroso (menos oxígeno)	1,0000	0,57	1
NO	Óxido nítrico (oxígeno intermedio)	1,0000	1,14	2
NO ₂	Óxido supernítrico (más oxígeno)	1,0000	2,28	4

Para explicar la ley de las proporciones múltiples y otros aspectos de la estequiometría química, Dalton supuso que cada elemento químico está vinculado a unos últimos componentes indivisibles e indestructibles, los átomos, que no se alteran en las reacciones químicas, solo se reagrupan de otro modo. Fue así como la discontinuidad de la materia se incorporó para siempre al cuerpo doctrinal de la química. Dalton llegó a la conclusión de que una propiedad fundamental de los átomos de cada elemento químico era su peso, siendo el átomo de hidrógeno el más ligero y dando a conocer una primera tabla de pesos atómicos relativos al mismo. También propuso un nuevo sistema de formulación química donde los átomos se representaban mediante círculos en cuyo interior un símbolo o una letra los identificaba (Figura 8). Naturalmente, cometió múltiples errores tanto en la estimación de los pesos atómicos relativos como en la formulación de algunos compuestos tan simples como el agua, donde suponía equivocadamente que la proporción atómica hidrógeno/oxígeno era 1 a 1. Pero su radical hipótesis atómica fue pronto aceptada por la mayoría de los químicos que a lo largo del siglo XIX exploraron y explotaron sus innegables ventajas y oportunidades.

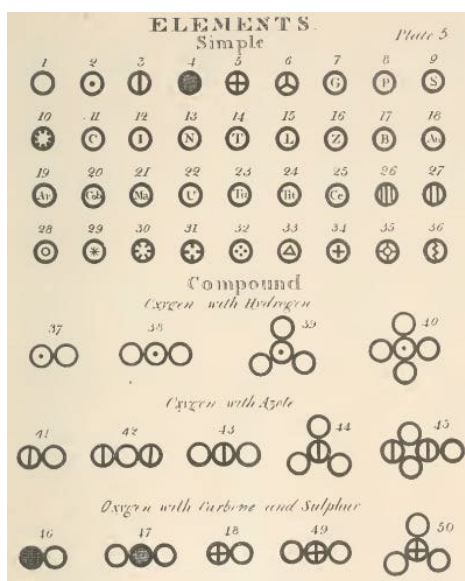


Figura 8. Tabla de John Dalton con la representación atómica de 36 elementos químicos y algunos compuestos simples.

Es importante advertir desde el principio que existen notables diferencias entre los nuevos átomos de Dalton y los considerados tradicionalmente en filosofía y física desde Demócrito y Epicuro. Para empezar, todos los átomos de un mismo elemento químico son idénticos entre sí. Además, son capaces de mantenerse fuertemente unidos unos con otros formando estructuras estables, no efímeras agrupaciones accidentales. Los átomos de la Dalton heredan todo lo que ya sabían los químicos desde hacía más de cien años, incluyendo la afinidad electiva. Por eso, estos nuevos átomos no son ciegos, ni se juntan y separan accidentalmente. Podríamos decir que tienen sentimientos, preferencias, se gustan unos más que otros. Algunos están siempre solos, otros no lo están nunca. La nueva teoría requiere diferentes grados de afecto; así un átomo de hidrógeno podría decirle a otro de carbono, nos queremos, pero ambos queremos aún más a los átomos de oxígeno.

El desarrollo de la teoría atómica puso de manifiesto que el auténtico lenguaje de la química no es la nomenclatura, que había renovado Lavoisier, sino la formulación que tanto interesaba a Dalton para mostrar explícitamente las relaciones entre átomos. Sin embargo, la formulación química no ha seguido después el sistema de Dalton que vemos en la Fig. 8, sino el método que introdujo Berzelius en 1813 empleando letras latinas para simbolizar los elementos y superíndices numéricos (actualmente subíndices), para las proporciones atómicas, como por ejemplo en H_2SO_4 .

El desarrollo teórico, práctico, económico y social de la química a lo largo del siglo XIX fue espectacular a todos los niveles, incluyendo el nacimiento de la pujante industria química. A escala de laboratorio, fue sin duda la química orgánica la que más avanzó. No es de extrañar, teniendo en cuenta su retraso previo debido a su complejidad y diversidad. Solo en el grupo aparentemente simple de los hidrocarburos hay miles de compuestos distintos, muchos de los cuales tienen la misma fórmula. Así, acetileno, benceno y otros muchos hidrocarburos, muestran idéntica proporción atómica 1:1 de carbono e hidrógeno, pero son muy diferentes unos de otros.

Las investigaciones con que los químicos profundizaron en la teoría atómica se llevaron a cabo en al menos tres direcciones diferentes que solo empezaron a dar resultados significativos a partir de 1860. La primera fue la determinación precisa de los pesos atómicos relativos y la búsqueda de otras propiedades físicas que pudieran atribuirse a los átomos como el volumen, el espectro de las luces que absorben y emiten o su comportamiento magnético. Un éxito notable de esta línea fue la creación y consolidación de la Tabla Periódica, que Mendeleev empezó a difundir en 1869, donde las propiedades físicas y químicas del elemento se articulaban en torno a su peso atómico.

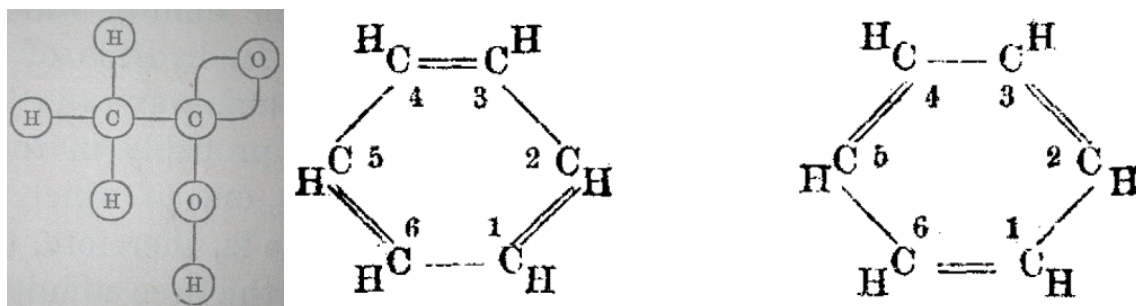


Figura 9. Estructura de Alexander Crum Brown para el ácido acético (izda.). Pareja de estructuras hexagonales propuesta por Kekulé para el benceno con enlaces simples y dobles alternados (dcha.).

La segunda línea, que podemos llamar química estructural, tenía por objeto determinar cuántos átomos contiene cada molécula, de qué modo están unidos entre sí y cómo se distribuyen tridimensionalmente. Para hacernos una idea de la complejidad del problema baste decir que en 1861 se proponían al menos 19 estructuras diferentes para un compuesto tan simple como el ácido del vinagre (ácido acético o etanoico). En la Fig. 9 se ve la propuesta de Crum Brown que es básicamente correcta. Dos hitos en esta línea fueron la propuesta de Kekulé hacia 1865 para la estructura del benceno (Figura 9) y el desarrollo de la estereoisomería con la noción de carbono tetraédrico de J. H. Van't Hoff que fue el primer Premio Nobel de Química en 1901.

La tercera línea, la que menos avanzó, fue la justificación teórica de las propiedades de los átomos y la naturaleza física de sus uniones ¿Por qué el átomo de hidrógeno forma una única unión simple y el de carbono hasta cuatro? ¿Qué representan físicamente los cortos segmentos con los que los químicos estructurales unen los átomos? ¿Por qué a veces son dobles o triples? ¿Cómo se justifica su orientación espacial?

Parecía claro que la gravedad no jugaba un papel relevante en esta escala, a diferencia del electromagnetismo que estaba presente en numerosos fenómenos atómicos y químicos (pila eléctrica, electrolisis, conductividad eléctrica, emisión y absorción de luz, magnetismo); pero dado que las fuerzas eléctricas no tienen orientación espacial preferente, cómo justificar la direccionalidad de las uniones atómicas en las moléculas ¿Existirían otras fuerzas desconocidas que solo actúan a escala atómica tal como sugería Newton? Realmente este era el verdadero agujero negro de la teoría. Los químicos habían aprendido a manipular los átomos, pero no tenían una explicación física aceptable para su comportamiento.

5. LOS ÁTOMOS DE DALTON NO SEDUCEN A LOS FÍSICOS

Escepticismo, cuando no desdén, fue la actitud mayoritaria de la comunidad científica del campo de la física en relación con la teoría atómica de Dalton y su desarrollo posterior.

Cuando se recuerda esta evidencia a los físicos de hoy, suelen rechazarla, tal vez con un cierto sentimiento de culpabilidad, ensalzando las importantes aportaciones que realizaron a la visión corpuscular de la materia en el marco de la teoría cinético-molecular figuras como Bernoulli, el Conde Rumford, Herapath, Joule, Krönig, Clausius, Maxwell, Boltzmann o van der Waals. Pero es evidente que no son conceptos equivalentes. Las afinidades de los átomos de Dalton y las uniones de la química estructural son totalmente ajenas a los corpúsculos de la teoría cinético-molecular que básicamente se rigen por el movimiento caótico y la repulsión mutua. Además, muchos físicos relevantes del siglo XIX ni siquiera tenían simpatía por la visión corpuscular o molecular de la materia. En las notas para su discurso de recepción del Premio Nobel de Física de 1910, J. D. van der Waals, padre de las fuerzas intermoleculares y de las ecuaciones de estado, recordaba sus inicios científicos hacia 1870:

"... convencido de la existencia real de las moléculas, que nunca las consideré como un producto de mi imaginación, ni siquiera como meros centros de efectos de fuerza. Las consideré como cuerpos reales ...

Cuando empecé mis estudios, tenía la sensación de estar casi solo en esa opinión ... y ahora no me parece exagerado afirmar que la existencia real de las moléculas es universalmente asumida por los físicos. Muchos de los que más se oponían a ella han acabado por convencerse ...

Es un gran placer para mí que un número cada vez mayor de físicos jóvenes encuentren la inspiración para su trabajo en los estudios de la teoría molecular..."

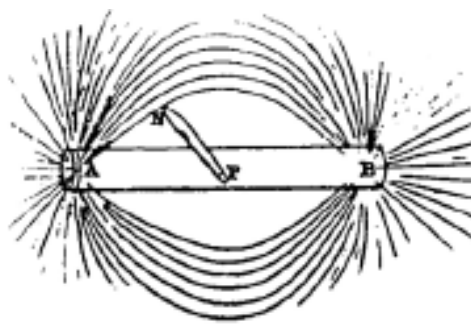
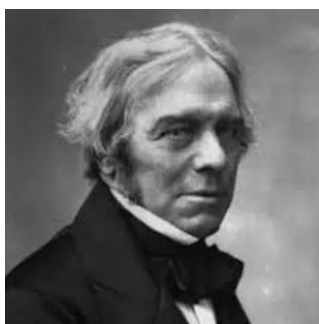


Figura 10. J. D. van der Waals, Premio Nobel de Física en 1910, recordaba el rechazo que hacia 1870 mostraban sus colegas hacia la visión molecular de la materia (izda.). M. Faraday (1791 – 1867), padre de la teoría de los campos de fuerza, fue actor principal de la gran unificación de la electricidad, el magnetismo y la óptica, marco conceptual hostil para los átomos de la química (centro y dcha.).

Había motivos fundados para el repudio tanto de los átomos de Dalton como de los ingenuos modelos de la química estructural con sus bolitas y varillas carentes de toda base física. Además, a lo largo del siglo XIX se estaba consolidando la visión ondulatoria de la luz y el rechazo de las fuerzas instantáneas a distancia, dando preeminencia a la teoría de campos de fuerza que se inicia con Michael Faraday y culmina con la gran síntesis que unificó en el plano teórico los fenómenos eléctricos, magnéticos y luminosos al tiempo que un sinnúmero de aplicaciones prácticas cambiaba la sociedad (generadores de inducción, motores eléctricos, telegrafía, iluminación, telefonía). En el marco de las teorías clásicas de campo, las discontinuidades no tenían buen encaje y las partículas lo son, así que los extravagantes átomos de los químicos iban frontalmente en contra de la tendencia científica predominante en el campo de la física decimonónica.

Pero la situación cambió repentinamente en la última década del siglo tras una sucesión de impactantes descubrimientos experimentales realizados por físicos. En 1895 W. Roentgen generó y detectó unos rayos altamente penetrantes de naturaleza desconocida que recibieron el nombre de rayos X. Casi inmediatamente después, en 1896, H. Becquerel descubrió la radiactividad en minerales de uranio y en 1897 J. J. Thomson demostró que los rayos catódicos consistían en veloces partículas materiales con carga negativa cuya masa estimó unas mil veces inferior a la de los átomos. El descubrimiento de Thomson parecía confirmar una novedosa versión de la teoría electromagnética desarrollada por H. A. Lorentz que contemplaba la existencia de partículas elementales cargadas. En 1902 se comprobó que también los rayos beta, uno de los tipos de emisión radiactiva, eran de naturaleza física similar a los rayos catódicos y se afianzó la idea de que estas partículas, pronto conocidas como electrones, eran los portadores mínimos de la electricidad.

La enorme atención científica que recibieron estos descubrimientos en el cambio de siglo hizo que en un muy breve lapso de tiempo la mayoría de los físicos de vanguardia, especialmente los más jóvenes, se convencieran tanto de la existencia de los átomos como de la necesidad urgente de esclarecer su compleja estructura en la que sin duda los electrones formaban parte. Acababa de nacer la física atómica.

6. FÍSICA ATÓMICA

Por un camino muy diferente al que transitaban los químicos (estequiometría, peso atómico, propiedades periódicas, termoquímica), los físicos habían abierto una nueva ruta para desentrañar la estructura de la materia y la siguieron con empeño. Expresiones como “energía atómica” y “física atómica” se hicieron rápidamente populares. La investigación experimental y teórica avanzó en diversas líneas de las que dos fueron las más relevantes. Por una parte, se trabajó intensamente en el campo de la radiactividad donde era necesario identificar la naturaleza de las emisiones y cuáles eran los elementos implicados, así como averiguar la fuente de la inagotable energía que emitían los átomos. Esta línea se topó muy pronto con la química al descubrirse nuevos elementos (radio, polonio, radón, actinio) y comprobarse un fenómeno nunca antes observado, la transmutación (conversión de un elemento químico en otro diferente). En esta línea intervinieron desde el principio químicos como M. Curie y F. Soddy, ambos Premio Nobel.

La segunda línea fundamental en la investigación de los átomos fue la espectroscopía atómica, desarrollada a partir de 1860 por Bunsen y Kirchhoff, que se convirtió en una eficazísima técnica de análisis químico. Pero quedaba fuera del alcance de los químicos la explicación del patrón característico que cada elemento exhibe como si fuera su huella dactilar. Fue a través de esta línea donde principalmente se construyó el marco teórico de la nueva física atómica que debía reemplazar a la física clásica y que se cimentó sobre la

física cuántica inaugurada por M. Planck en 1900 y las contribuciones del joven Albert Einstein (naturaleza corpuscular de la luz, calor específico de los sólidos).

El primer modelo con el que se intentó describir la estructura interna de los átomos en el marco de la física clásica fue sugerido en 1904 por el propio J. J. Thomson. Se le llamó *“plum pudding”*, porque la masa esponjosa de carga positiva donde estaban embebidos los electrones recordaba ese postre inglés. Tuvo que ser desechado a partir de 1911, cuando E. Rutherford anunció el crucial descubrimiento del núcleo atómico. Desde entonces se impusieron los modelos atómicos “planetarios” donde los electrones orbitan en torno al núcleo (Figura 11). Curiosamente, E. Rutherford recibió el Premio Nobel de Química en 1908, mientras que el primer Premio Nobel de M. Curie (1903) lo fue en física. Como el propio Rutherford comentaba jocosamente, esa sí que fue una *“transmutación rápida”*.

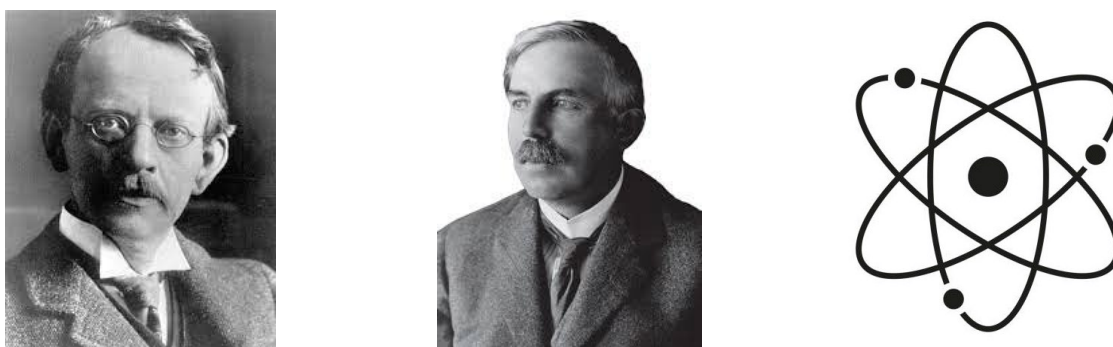


Figura 11. J. J. Thomson (izda.), descubridor del electrón y Premio Nobel de Física en 1906, propuso un modelo atómico en el que los electrones estaban embutidos en una masa uniforme positiva. El modelo resultó inviable después de que E. Rutherford (centro) descubriera el núcleo atómico en 1911. Desde entonces se impusieron los modelos planetarios que han quedado como símbolo de la era atómica (dcha.).

Niels Bohr (1885 – 1962) constituye tal vez el caso más emblemático del interés de los jóvenes físicos cuánticos por los átomos y la química. Físico danés, en 1913 propuso el primer modelo que combinaba principios cuánticos y órbitas electrónicas circulares para el átomo de hidrógeno. Su modelo, el primero capaz de explicar los espectros atómicos mediante el concepto de órbitas estacionarias y niveles de energía, le dio fama universal. Hacia 1921, el modelo de capas electrónicas superpuestas en torno al núcleo era lo suficientemente preciso como para poder justificar las propiedades periódicas de los elementos observando los electrones de la última capa ocupada, los electrones de valencia. Para entonces, el número atómico (carga nuclear), concepto que propusiera Moseley, había sustituido al peso atómico de Dalton y Bohr reelaboró la Tabla Periódica bajo estos nuevos supuestos (Figura 12).¹³ Los físicos no solo se habían apoderado de la ciencia atómica, sino que asaltaban los recintos más sagrados de la química.

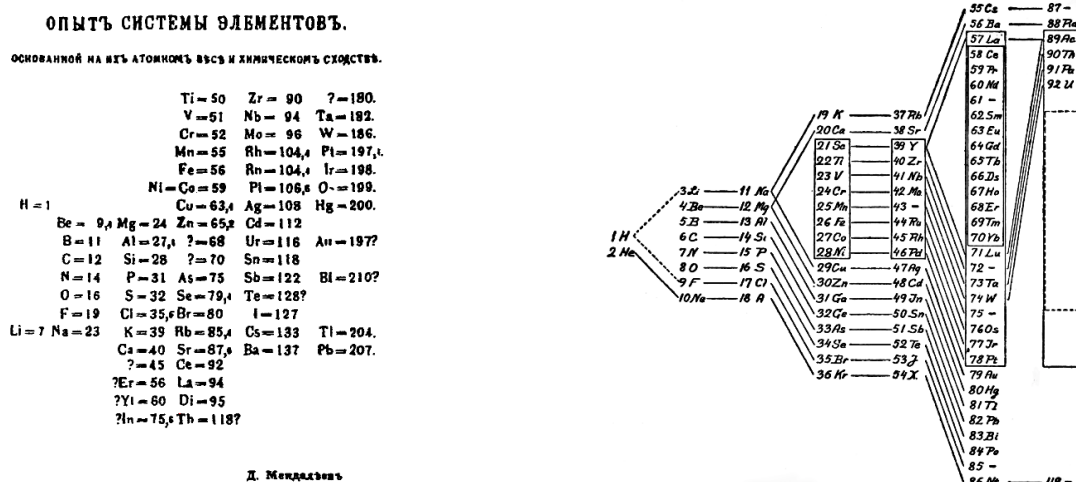


Figura 12. El ruso Mendeleyev difundió a partir de 1869 diversas versiones de la Tabla Periódica (izda.). Hacia 1921 Niels Bohr propuso una nueva configuración de la misma sobre la base del número atómico y las configuraciones electrónicas (dcha.).

7. EL ENLACE QUÍMICO Y LA QUÍMICA CUÁNTICA

No fueron los químicos, sino los físicos quienes, tras un prolongado y contumaz rechazo, demostraron al fin la existencia de los átomos con evidencias directas. También descifraron su estructura dando a conocer las partículas que hay en su interior y cómo se articulan: electrones (1897), protones (1918) y neutrones (1932). El peso atómico, la gran aportación que había introducido Dalton un siglo antes y había sido guía de los químicos para la clasificación de los elementos, tuvo que ceder su puesto preeminente como parámetro identificativo al nuevo concepto de número atómico (carga nuclear). Incluso la Tabla Periódica, el Santo Grial de la química, fue modificada y adaptada por los físicos transformándose en el ordenamiento moderno que ahora utilizamos. En el colmo de la apropiación, los físicos habían conseguido explicar la causa de la periodicidad de las propiedades atómicas como una consecuencia lógica de las configuraciones electrónicas.

Las contribuciones de la física atómica en la comprensión del papel de los átomos en los procesos químicos fueron enormes. Solo quedaba un problema sin resolver, asunto al que se habían dedicado los químicos durante mucho tiempo y que ahora era un reto para los físicos de la vanguardia cuántica. Pero este problema no era secundario, sino crucial, decisivo para comprender la constitución de la materia y la reactividad química: el enlace químico ¿Por qué y cómo se unen los átomos si son estructuras estables eléctricamente neutras? ¿Por qué en nuestro mundo unos átomos están siempre enlazados, como los de oxígeno, y otros nunca, como los de helio? ¿Qué tipo de fuerza los mantiene ligados? ¿Por qué unos enlaces son direccionales y otros no?

En contra de lo que a veces se enseña en las clases de química, la naturaleza del enlace químico no es ni puede ser puramente eléctrica. Los átomos son neutros y aunque estuvieran polarizados de alguna manera, las uniones serían muy endebles, como las débiles fuerzas intermoleculares de van der Waals, nada que ver con los enlaces químicos. Este tipo de unión solo permite la condensación de los gases nobles a muy bajas temperaturas y poco más (el argón líquido hierve a $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$). Todos los intentos realizados desde 1913 por Bohr y sus continuadores para extender el esquema híbrido clásico-cuántico de órbitas estacionarias a las moléculas, que son átomos enlazados, fracasaron estrepitosamente, incluso para la más simple de las moléculas (H_2).

Sin embargo, desde el descubrimiento del electrón, había al menos un químico que buscaba la clave para entender el enlace por otros derroteros. Era G. N. Lewis (1875 – 1946) poseedor del indeseado récord de 41 nominaciones fallidas al Premio Nobel entre 1922 y 1946 (Figura 13). Apuntes de sus clases muestran que en 1902 ya trabajaba en la hipótesis del “átomo cúbico” donde los electrones se disponen en los vértices de cubos superpuestos, siendo los electrones del cubo más exterior los responsables de la valencia. Así podían explicarse los ocho grupos de la tabla periódica de entonces. La primera publicación del modelo la realizó Lewis en 1916 en un famoso artículo donde exponía su idea de que el enlace químico se forma por compartición de pares de electrones para completar el conjunto de ocho electrones más externos (regla del octeto).¹⁴ Irving Langmuir, que introdujo el término “enlace covalente”, popularizó las ideas de Lewis hasta tal punto que muchos creyeron que eran suyas propias para gran frustración de su verdadero autor.¹⁵

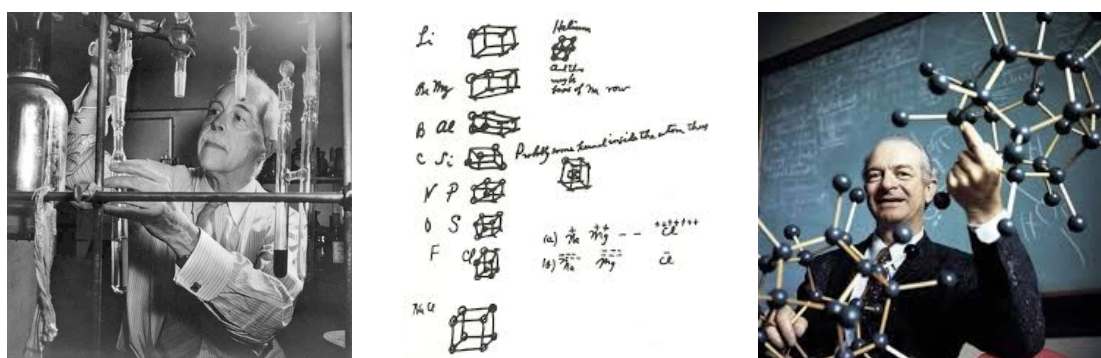


Figura 13. G. N. Lewis (izda.) es el padre del enlace químico por compartición de pares de electrones. Hacia 1902 ya enseñaba a sus alumnos de química la idea del átomo cúbico que conduce a la regla del octeto (centro). Linus Pauling, dos veces Premio Nobel, desarrolló la Teoría del Enlace de Valencia que explica el enlace covalente con el lenguaje de la mecánica cuántica (dcha.).

Cuando en 1925 irrumpió la mecánica cuántica y las órbitas estacionarias de la física cuántica quedaron obsoletas, entre los científicos que primero trataron de aplicar las nuevas y complejas ecuaciones a las moléculas y al enlace, como la ecuación de Schrödinger, figuraban los químicos ilustres R. S. Mulliken (1896 – 1986) y Linus Pauling (1901 - 1994) que atacaron el problema con enfoques diferentes. De este modo se originó la química

cuántica, que se integró en la química física o química teórica, incorporando de este modo a la disciplina científica de la química los modelos fisicomatemáticos de la mecánica cuántica y restituyendo a los químicos en su propia autoestima para volver a ser protagonistas en el estudio de los átomos que Dalton había inaugurado a principios del siglo XIX.

De las dos teorías más populares para enseñar y explicar el enlace químico, la Teoría de Orbitales Moleculares (TOM) de Mulliken y la Teoría del Enlace de Valencia (TEV) de Pauling, es esta última la más intuitiva y cercana a los métodos tradicionales de los químicos.¹⁶ L. Pauling, dos veces Premio Nobel como M. Curie, expresamente se refirió a las intuiciones de Lewis y a la visión del enlace covalente como compartición cuántica de electrones. El enlace químico no es eléctrico, es electrónico y solo puede entenderse mediante las propiedades cuánticas de estas partículas, espín incluido. Expresiones como *“solapamiento de orbitales atómicos”*, *“orbitales híbridos”* o *“resonancia”* que todos los estudiantes de química siguen utilizando casi cien años después de su acuñación son propios del método TEV.

En conclusión, físicos y químicos se observan con recelo, que frecuentemente oculta ignorancia mutua, desde que la química se consagró e independizó como ciencia hace 250 años (dentro de la química, también hay sus resquemores entre los químicos teóricos y los experimentales). Los matemáticos contemplan con condescendencia estas riñas desde la altura de su mundo abstracto y sus espacios de infinitas dimensiones, como adultos en la ventana viendo pelearse a los chiquillos en el patio. Aunque es cierto que cuando bajan al barro, también tienen sus querellas con los físicos, intrusos que creen saber matemáticas y les disputan las plazas de profesor en colegios e institutos, actividad profesional a la que a veces no queda más remedio que acudir.

Con todo, las desavenencias entre físicos y químicos son más profundas y, por ejemplo, en España ha sido imposible mantener unida la Real Sociedad Española de Física y Química, no quedando más remedio que crear dos sociedades separadas, pese a que la especialidad docente preuniversitaria oficial en España es Física y Química. Pero de la unión nace la fuerza. Con un poco de sorna podríamos decir que los químicos están muy agradecidos a los físicos por haberles enseñado qué importantes son los átomos y la Tabla Periódica ... cosa que ya sabían desde mucho antes. Al mismo tiempo, los físicos son deudores de la química y la teoría atómica donde brillan las ecuaciones y métodos cuánticos, porque si no ¿qué otra aplicación práctica tendrían? ¿para qué se estudiaría el oscilador armónico con la ecuación de Schrödinger? ¿qué utilidad tendría el Principio de Exclusión de Pauli?

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bringmann, Klaus. *Juliano*. Editorial Herder (2006).
2. Leucipo y Demócrito (preparado por Santa Cruz de Prunes, María Isabel y Luis Cordero, Néstor). *Los filósofos presocráticos*. Editorial Planeta-De Agostini (1996).
3. Aristóteles. *Física*. Editorial Planeta-De Agostini (1996).
4. Granada, Miguel Ángel, *Giordano Bruno. Universo infinito, unión con Dios, perfección del hombre*. Editorial Herder (2002).
5. Newton, Isaac. *Principios matemáticos de la Filosofía Natural*. Editorial Tecnos (2011).
6. Galilei, Galileo. *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*. Editora Nacional (1976).
7. Alighieri, Dante. *Divina comedia*. Editorial Austral (2010).
8. Alexander, Amir. *Infinitesimal. How a dangerous mathematical theory shaped the modern world*. Oneworld Publications (2015).
9. Herrera, S., Toledo, L. y Leal, R. *Atomismo, teleología y causalidad: los principios del materialismo crítico de Pierre Gassendi*. Anales del Seminario de Historia de la Filosofía, **31**-2 (2014).
10. Bernoulli, Daniel and Johann. *Hydrodynamics and Hydraulics*. Editorial Dover (2004).
11. Lavoisier, Antoine-Laurent. *Tratado elemental de química*. Editorial Alfaguara (1982).
12. Dalton, John. *A New System of Chemical Philosophy*. Biblioteca virtual Miguel de Cervantes (2020).
13. Bohr, Niels. *Theory of Spectra and Atomic Constitution*. Cambridge University Press (1922).
14. Lewis, G. N. *The Atom and the Molecule*. J. Am. Chem. Soc. **38**, 762-785 (1916).
15. Langmuir, I. *The Arrangement of Electrons in Atoms and Molecules*. J. Am. Chem. Soc. **41**, 864-934 (1919).
16. Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals: An Introduction to Modern Structural Chemistry*. Cornell University Press (1960).