

DAVID JOU

MATERIA  
Y MATERIALISMO

PASADO & PRESENTE

PASADO & PRESENTE  
BARCELONA

## ÍNDICE

<i>Prólogo</i> .....	7
----------------------	---

PRIMERA PARTE  
LA MATERIA ELEMENTAL.  
LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

1. Del atomismo filosófico a la disgregación del átomo .....	13
2. Relatividad especial, física cuántica: la materia como energía y como onda .....	27
3. La estructura cuántica de moléculas, átomos y núcleos .....	45
4. Partículas elementales e interacciones básicas .....	59
5. Del átomo inmutable y determinista a la materia ambigua y no local .....	73

SEGUNDA PARTE  
LA MATERIA COSMOLÓGICA.  
EL ORIGEN DE LA MATERIA

6. El vacío cuántico y el inicio del Universo. ....	83
7. Genealogía y contingencia de la materia .....	95
8. Universo y vida: una sintonía sorprendente .....	109
9. Materia oscura y energía oscura .....	123

10. De la materia eterna y necesaria a la materia  
histórica y contingente . . . . . 133

TERCERA PARTE

LA MATERIA TECNOLÓGICA.

EL USO Y LOS LÍMITES DE LA MATERIA

11. Materia, forma, energía, entropía . . . . . 143  
12. Los alimentos. De la madre Tierra a las tecnologías  
de la alimentación . . . . . 157  
13. De las materias primas a la contaminación  
planetaria . . . . . 169  
14. Ciencia de materiales: de los semiconductores a los  
materiales inteligentes . . . . . 187  
15. Del peso de la materia a la sutileza de las formas . . . 205

CUARTA PARTE

LA MATERIA VIVA.

VIDA Y MENTE DE LA MATERIA

16. Moléculas y estrategias de la vida . . . . . 215  
17. Origen de la vida, vida artificial, biología sintética . 235  
18. Evolución y diversidad de la vida . . . . . 247  
19. Cerebro, mente, ordenador . . . . . 263  
20. De la materia inerte a la materia fecunda y pensante 283
- A modo de conclusión: La sinfonía de la materia . . . . . 295*  
*Glosario: Setenta términos y su relación con la materia . . . 305*

## PRIMERA PARTE

### LA MATERIA ELEMENTAL. LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

*La diversidad de la materia que percibimos es tan amplia, tan desbordante, que parece desafiar todo conocimiento profundo. Sin embargo, ya desde la antigüedad, se intuyó un orden subyacente, unos constituyentes básicos, que algunos imaginaron como partículas indestructibles, los átomos, y otros como elementos no necesariamente corpusculares, tal vez continuos, como los famosos cuatro elementos (fuego, aire, agua, tierra). En esta parte esbozamos la historia de la búsqueda de los constituyentes básicos de la materia y de sus interacciones elementales, un viaje que nos lleva hacia lo más microscópico y ultramicroscópico. La búsqueda de unidad, simplicidad y elegancia conceptual ha sido uno de los grandes estímulos para la ciencia. Sin embargo, ¿hasta dónde llega realmente esa unidad, esa simplicidad? Su búsqueda ha conducido a inicios del siglo XXI a teorías de gran complejidad matemática y conceptual, que parecen contradecir la intuición de simplicidad de fondo, a teorías todavía no contrastadas por experimento alguno, y que aún dejan sin respuesta a una buena parte de las preguntas básicas que las motivaron.*

# I

## DEL ATOMISMO FILOSÓFICO A LA DISGREGACIÓN DEL ÁTOMO

Una de las impresiones que más sorprenden al considerar la materia es su diversidad y mutabilidad: generación, pujanza, decadencia, putrefacción, un cambio continuo, una diversidad extrema y, a pesar de ello, una sensación de permanencia y unidad. No fue fácil ni intuitivo intentar poner un cierto orden en esa diversidad. En los siglos VI-V a.C., los filósofos jónicos empezaron a tratar la cuestión del posible principio común subyacente a toda la materia y, a la vez, compatible con su diversidad. La ciudad griega de Mileto, en la costa egea de Asia, fue el escenario de las primeras propuestas: Tales, gran geómetra y pensador, sugirió que el agua era la base de toda la materia, mediante las posibilidades que le conferían la congelación y la evaporación; Anaximandro sugirió que el fondo de todo era el *Apeiron*, lo indeterminado, algo impreciso y abstracto; Anaxímenes defendió que el aire constituía la base de todas las cosas, gracias a rarefacciones y condensaciones.

Heráclito (s. VI-V a.C.) defendió, más que la permanencia, la mutabilidad esencial del mundo, dominado por el combate y el conflicto y sometido, en el mejor de los casos, a una armonía inestable de tensiones opuestas. Identificó la esencia de las cosas con el fuego, destacó los cambios incesantes del mundo, y apuntó la sospecha de que los sentidos pueden dar informaciones engañosas que hay que discernir con la ayuda crítica de la razón. Con esas reflexiones, la materia dejaba de ser patri-

monio exclusivo de la información sensorial y se convertía, también, en objeto intelectual.

La ocupación persa de las costas de Asia Menor en el siglo VI a.C. desplazó multitudes hacia Sicilia y el sur de Italia. Fue allí, en Crotona y Tarento, donde se desarrolló la escuela pitagórica, que vio en los números la esencia de lo real, más allá de las potencialidades utilitarias de la contabilidad y la agrimensura. Las relaciones numéricas entre las longitudes de las cuerdas de la lira y las armonías de sus sonidos la convicción de un decisivo trasfondo matemático de la realidad, la sublimación mística de las formas geométricas y de los números propuesta por esa escuela, marcaron profundamente la cultura occidental y la ciencia que en ella se desarrollaría —otro estímulo decisivo fue la idea judía de creación del mundo por un Dios legislador, que impondría un orden más o menos accesible a los humanos. Quizá la gran tragedia de esa escuela fue, irónicamente, el célebre teorema de Pitágoras, que reveló que los números irracionales también juegan un papel importante en el mundo, como en el cociente entre la diagonal de un cuadrado y su lado, que es la raíz cuadrada de dos.

Parménides de Elea (s. VI-V a.C.) extremó la sospecha sobre las limitaciones de los sentidos; postuló la inmutabilidad, inmovilidad, eternidad y unidad básicas del Ser, y negó el vacío y el movimiento, que atribuyó a apariencias ilusorias de los sentidos. La posición de Parménides ha tenido una influencia profunda en la filosofía, y uno de los estímulos de la ciencia ha sido, precisamente, la búsqueda de elementos de permanencia tras la diversidad y los cambios del mundo.

Esa postulación de unidad no impidió, sin embargo, que las reflexiones sobre la materia se abrieran a una cierta multiplicidad básica. Así fue, por ejemplo, en el siglo V a.C., en la teoría de los cuatro elementos, sistematizada por Empédocles de Agrigento, según la cual todo está compuesto de agua, tierra, aire y fuego, combinados diversamente según las tensiones del amor y el odio, considerados como interacciones bási-

cas entre los elementos. Anaxágoras llevó más allá la idea de la diversidad fundamental de la materia y sugirió la existencia de un número infinito de elementos o «semillas» de la realidad, la cual sería, pues, esencialmente irreductible a simplificación.

### EL ATOMISMO FILOSÓFICO: CONCILIACIÓN DE UNIDAD Y DIVERSIDAD

El intento más genial y perdurable de conciliar permanencia y cambio, unidad y diversidad, fue la teoría atomística, propuesta originalmente en el siglo V a.C. por Leucipo de Mileto y Demócrito de Abdera, que postula que la materia no es continua, sino que está formada por átomos elementales, indivisibles, que se mueven en el vacío. Esos átomos estarían formados por una sustancia única, increada, eterna, representación de la plenitud del ser, que constituiría la unidad, y que formaría átomos indestructibles, de formas y tamaños diversos. Las agregaciones de esos átomos darían lugar a la diversidad y el cambio de la materia observada.

Platón, en el *Timeo*, su diálogo más cósmico y científico, escrito hacia el final de su vida, hizo confluir la matematización pitagórica, el atomismo de Demócrito y la teoría de los cuatro elementos, atribuyendo la forma de un poliedro regular a los átomos de cada uno de ellos. Para acomodar los cinco poliedros regulares atribuyó la forma del que le sobraba al conjunto del universo. Posteriormente, Aristóteles le atribuyó un éter o quinta esencia que llenaría los espacios cósmicos. La matematización poliédrica de la materia se complementaba con la matematización esférica o circular del cielo, que influyó durante muchos siglos la cosmología hasta que, muy a su pesar y forzado por las observaciones astronómicas, Kepler introdujo la elipse como figura geométrica de las órbitas planetarias.

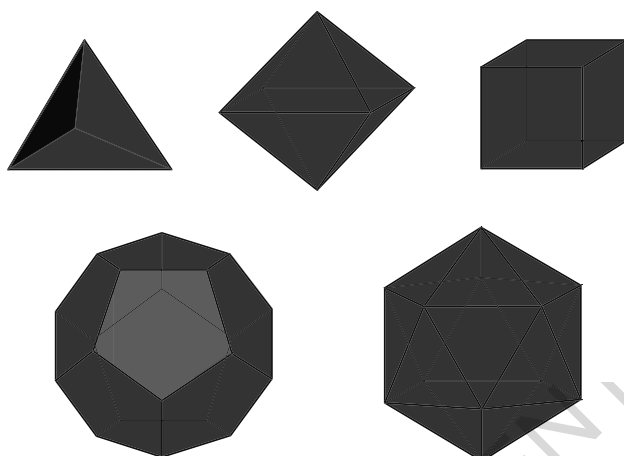


Fig. 1. 1. Platón asignó a los átomos de los cuatro elementos (tierra, agua, aire y fuego) formas poliédricas regulares (cubo, icosaedro, octaedro y tetraedro). Posteriormente, el poliedro restante, el dodecaedro, fue imaginado como la forma atómica de un quinto elemento o quinta esencia.

La tradición atomística de Demócrito pasó a Epicuro (s. IV-III a.C.) y Lucrecio (s. I a.C.), el cual, en su gran poema *De rerum natura*, presenta una de las formulaciones más nítidas, amplias e influyentes de la visión atomística. Esos autores intentaron sacar consecuencias vitales y morales de aquellas hipótesis físicas. Para ellos, el atomismo supuso una opción filosófica radical que no requería ningún tipo de alma. En los escritos de Epicuro o Lucrecio, el atomismo es utilizado para tranquilizar a los humanos, garantizando que, al no haber alma capaz de sobrevivir a la muerte, no hay, después de esta, posibilidad de tormentos a manos de dioses arbitrarios y crueles.

La muerte, pues, era una liberación y no debía ser temida. Tras ella, ningún castigo, ninguna tortura, ningún vagar de sombras tristes y turbias en el Hades. La sabiduría consistía, pues, en un disfrute medido y sereno de la vida, más que en alguna forma de piedad enfocada al más allá. Por ello, el atomismo fue rápidamente asociado al ateísmo, aunque, de hecho, no implicaba nece-



sariamente la ausencia de dioses. Epicuro y Lucrecio creían en la posibilidad de dioses inmortales, compuestos de una materia sutil, pero que no actúan sobre el mundo ni se interesan por nosotros.

Aquel atomismo, de hecho, ya experimentó los problemas sociales y religiosos con que más tarde se encontrarían las doctrinas que otorgan a la materia la exclusiva de la realidad. Algunos autores han sugerido que el motivo de fondo de las disputas de la Iglesia católica con Galileo podría haber sido su defensa del atomismo, más que la del modelo copernicano del sistema solar. Al defender la inmutabilidad de la materia, la transubstanciación real en la consagración podía quedar seriamente puesta en duda. Dado que este dogma es más importante que las consideraciones sobre la estructura del cosmos, la reacción eclesiástica habría sido contundente, pero desviando la atención hacia otro aspecto de la obra galileana. En el Renacimiento y el Barroco, la hipótesis atomista, abandonada durante siglos, recobró vigor y Gassendi, uno de los discípulos de Galileo, retomó las ideas platónicas respecto de los átomos, que influyeron fuertemente en los círculos libertinos, que criticaban los postulados metafísicos y preconizaban el epicureísmo como sabiduría de vivir.

La teoría de los cuatro elementos, en su forma no atomística, tuvo una aceptación mucho más amplia y menos problemática, duró muchos siglos, e inspiró muchos trabajos físicos y químicos, ya que era lo suficientemente flexible para suponer unos pocos principios detrás de la diversidad de la materia, fueran corpusculares o no. Aire y fuego tendían a ascender; agua y tierra tendían hacia el centro de la Tierra, tendencias que daban razón de los movimientos naturales de las cosas en la física de Aristóteles. Su carácter cercano a la experiencia del mundo y su paralelismo con las cuatro estaciones le otorgaron un atractivo estético perdurable.

## LA ALQUIMIA

Durante siglos, la visión de la materia no pasó de esa forma sencilla. La exploración mucho más sistemática, sutil e incisiva por parte de los alquimistas puso de manifiesto la conveniencia de ampliar el esquema de los cuatro elementos, a los cuales sumó tres nuevos principios: mercurio, azufre, y sal.

Uno de los aspectos popularmente más conocidos y mitificados de los alquimistas fue su búsqueda de la transmutación de la materia en oro. La idea no resultaba absurda, ya que para ellos los diversos metales no eran sustancias puras, sino mezclas de los elementos primordiales. Se trataba, pues, de hallar la manera de combinar dichos elementos en la proporción característica del oro. Esas búsquedas, llevadas a cabo en una multitud de penosos y esforzados experimentos, no carecían de aparente fundamento empírico. Por ejemplo, algunas mezclas de cal, mercurio y cobre, mantenidas a temperatura elevada en hornos de cocción, daban en la cerámica vistosos brillos metálicos que, en algunas ocasiones, eran idénticos a los del oro. Sin embargo, al romper la cerámica para extraer el anhelado oro, se perdía toda traza de él. Hasta que no se ha dispuesto de la perspectiva de la nanotecnología no se ha podido entender que los reflejos de oro procedían, en realidad, de nanopartículas de cobre, cuyas propiedades reflectantes quedan modificadas por efectos de confinamiento cuántico, pudiendo llegar a ser indistinguibles de las del oro macizo.

Como en el atomismo antiguo, la exploración de la materia no estaba desligada de la vida moral, sino exigía pureza de intenciones y rectitud de vida, es decir, antes de transformar la materia en oro, uno había de transformar su propio espíritu, purificarlo, abrirlo a la conciencia y al bien. La búsqueda de coherencia entre el individuo y la materia establecía también paralelismos entre las materias terrestres y el cuerpo humano (mercurio, azufre y sal como paralelos de alma, espíritu y

cuerpo) y con los astros, y entre los movimientos celestes y las inclinaciones de los humanos, con un gran desarrollo de la astrología y de la magia. La alquimia atrajo a científicos reconocidos, como Boyle, y al mismo Isaac Newton, que formuló su ley de transporte del calor motivado por sus estudios alquímicos, en concreto sobre las temperaturas de fusión de los materiales, que no resultaban accesibles a ningún termómetro de aquella época. Incidentalmente, en su biblioteca, había más libros de alquimia (varios de ellos atribuidos a Ramon Llull) y de religión (tema sobre el que tuvo opiniones vehementes y particulares) que obras de física o de matemáticas (de las que podía prescindir, porque ya las conocía en profundidad).

Los siglos XVII y XVIII fueron una época de florecimiento del atomismo, pero ya bajo la iniciativa creciente de la ciencia. La teoría del flogisto propuesta por Becher y Stahl para describir los aspectos térmicos de la combustión y la fermentación, fue todavía una derivación sofisticada de la teoría de los cuatro elementos, al considerar el flogisto como una manifestación del fuego. Esa teoría, pese a resultar errónea, alcanzó un gran éxito por toda Europa hasta ser superada por las propuestas de Lavoisier a finales del siglo XVIII.

#### EL ATOMISMO CIENTÍFICO: EL MUNDO MICROSCÓPICO TRAS EL MUNDO VISIBLE

El atomismo científico no tiene los mismos objetivos que el filosófico. Para el primero, bastaba imaginar la posibilidad de una conciliación entre la permanencia y el cambio. El segundo aspira a más detalles: explicar el mundo visible, sensible, en términos de partículas microscópicas, lo cual lleva a establecer nuevos conjuntos de relaciones y de regularidades en el mundo macroscópico; y clasificar en unas pocas partículas básicas la diversidad de lo observable. La transición entre el objetivo

filosófico inicial y las aspiraciones del atomismo científico es un proceso largo, que ya se inicia en la antigüedad.

El camino hacia el átomo científico presenta avances y retrocesos. En el siglo XVII, en Oxford, Boyle, descubridor de la primera ley sobre el comportamiento de los gases, vio una explicación sencilla de esas regularidades en el movimiento de los átomos. Más que los argumentos de tipo físico, sin embargo, fueron los de tipo químico los que impulsaron más vigorosamente, durante unos siglos, las ideas atomistas. La revolución química de Lavoisier, a finales del siglo XVIII, representó un avance muy notable en la ordenación de la materia, en una cincuentena de elementos químicos. Su teoría, presentada en el *Traité élémentaire de Chimie* (1789), fue el punto de partida de la química moderna. En ella se establecía, entre otras novedades, un nuevo marco para la explicación de la oxidación, la combustión y la respiración, y postulaba el oxígeno y el calórico, además de otros nuevos elementos. En esa teoría, la combustión no consistía en una liberación de flogisto, sino en una combinación con el oxígeno y un enriquecimiento del aire en densidad de calórico, que producía el calentamiento. En la base de la teoría había mucho trabajo experimental incluyendo los gases, que hasta entonces no habían sido suficientemente tenidos en cuenta por falta del utillaje adecuado.

La exploración química hizo que el número de elementos fuera creciendo a medida que se iban sucediendo los descubrimientos. John Dalton, hacia 1808, formuló, en el tratado *New System of Chemical Philosophy*, una versión atomística que asociaba un tipo de átomo a cada elemento químico, e insistía en el concepto del peso atómico de cada elemento. Avogadro y Gay-Lussac profundizaron en la idea de que los gases están compuestos de átomos y se esforzaron en refrendar esa hipótesis con datos cuantitativos, referentes al número de átomos contenidos en un cierto volumen de gas, o en una cierta masa —un mol, o molécula-gramo— de sustancia. Con ello, la teoría atomística con-

seguía una interpretación sencilla de observaciones experimentales cuantitativas, referentes a la constancia de proporciones en las masas de las diversas sustancias que intervienen en las reacciones químicas, expresadas en las leyes de las proporciones simples de Proust o de las proporciones múltiples de Dalton. No siempre esas ideas fueron aceptadas: algunos químicos, como Berthelot, pretendieron que el fondo de la realidad se encontraba en los equivalentes químicos —un concepto macroscópico—, fácilmente mensurables, más que en átomos inobservables.

Los elementos químicos no empezaron a ser ordenados de manera satisfactoria hasta 1869, con la tabla periódica de Mendeleiev, basada en los pesos atómicos, que puso en evidencia la correlación periódica entre ciertas propiedades químicas y físicas y esos pesos, y que llevó, incluso, a la predicción de nuevos elementos —el galio, el escandio, el germanio, el tec-

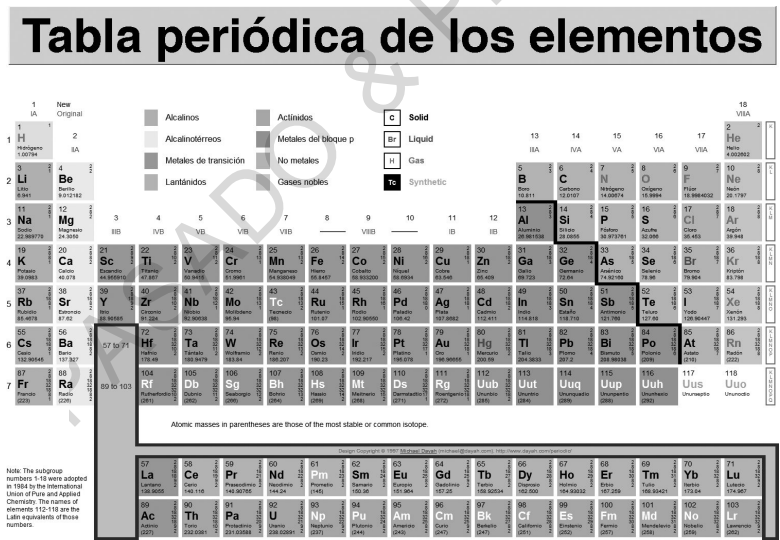


Fig. 1. 2. La tabla periódica de los elementos químicos fue propuesta inicialmente por Mendeleiev. En su tabla original, faltaban una serie de elementos que posteriormente fueron descubiertos, con las masas y propiedades químicas predichas por la tabla.



necio— nunca observados hasta entonces, correspondientes a los huecos que la clasificación dejaba. El atomismo lograba así poder predictivo verificado posteriormente con el descubrimiento de esos elementos y la corroboración de que sus propiedades eran las indicadas por la teoría.