

ARTÍCULO

¿Se pueden ‘ver’ los átomos? De la entelequia a la realidad

José Angel Martín Gago

*Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid
28049 Cantoblanco, Madrid*

corr-ele: gago@icmm.csic.es

Asociación para el Avance de la Ciencia y la Tecnología en España (AACTE)

© 2003 AACTE

La idea de átomo como unidad indivisible, o como ladrillo básico con el que se construye la naturaleza, ha ido cambiando desde sus primeras concepciones en el mundo griego hasta la visión cuántica del mismo. En el presente artículo haremos un recorrido por su historia. Concebido inicialmente como una pura entelequia, su concepto ha evolucionado a lo largo de la historia de la humanidad al contrastarse con resultados experimentales. Esta evolución desembocó en el siglo XIX en lo que llamamos la química: el estudio de cómo se combinan los átomos entre sí para formar el mundo que nos rodea. A principios del siglo XX, cuando el modelo atómico parecía completo y el átomo, por tanto, una realidad incuestionable, una serie de experimentos pusieron en tela de juicio su naturaleza. La física cuántica se estaba estableciendo como disciplina y con sus paradojas nos mostraba nuestra incapacidad para conocer. Así, el átomo pasó de ser una certeza, asumida en el pensamiento, que nos permitía explicar la naturaleza y hacer predicciones fiables, a ser un concepto etéreo, de difícil comprensión dentro de nuestra lógica cartesiana. Hoy, la física cuántica se comienza a comprender y por tanto el concepto de átomo vuelve a ser una realidad establecida. Como consecuencia de este proceso se ha desarrollado una nueva tecnología basada en la mecánica cuántica y en las propiedades de los electrones, lo que nos ha llevado a la construcción de microscopios que nos permiten ‘ver’ los átomos.

Introducción

Desde el principio de los tiempos el hombre se ha preguntado qué había más allá de lo que alcanzaban a ver sus ojos: ¿de qué estamos hechos? A esta pregunta fue respondiendo de maneras muy diversas. Sus explicaciones en un principio fueron religiosas, mágicas, y poco a poco, basándose en la observación de la naturaleza, fue llegando al concepto de última entidad indivisible. A esta entidad la llamó átomo, y, desde entonces, pensadores y científicos han intentado comprender el concepto de átomo en una de las aventuras más apasionantes del conocimiento humano. Cuando yo estudiaba bachillerato un viejo profesor de física y química, nos explicaba sentenciosamente que los átomos ni se ven, ni se llegarán a ver nunca. Para ‘ver’ un átomo tienes que iluminarlo -nos explicaba- y al iluminarlo la luz interacciona con él fuertemente, de forma que lo altera y lo más que podrías llegar a ver no sería nunca un átomo, sino un átomo perturbado. Aunque algo de razón tenía, no

contaba con que la física cuántica a principio de este siglo predice una forma de ‘ver’ sin iluminar. Es el llamado efecto túnel. La física cuántica supuso una revolución conceptual muy importante, que ha dado lugar a toda la tecnología que nos rodea. Ha permitido no sólo ver los átomos, sino también moverlos, colocarlos, observar su movimiento o escribir con ellos.

El camino que recorreremos en este artículo, nos conduce hacia la ‘foto’ (representación en forma de imagen) de un átomo a través de un recorrido por la historia del conocimiento. Así veremos cómo pasó de ser una entelequia, es decir un concepto abstracto sin más fundamento que un ‘tiene que ser’, a un concepto comprendido y útil. Este camino se ha recorrido en dos etapas. La primera acabó a finales del siglo XIX con una visión global del átomo. En una segunda etapa, y después de la revolución científica que supuso la mecánica cuántica, se re-escribieron las nociones fundamentales y se modificó la visión que se tenía del mismo. No pretendo en este artículo

explicar todos estos modelos sino dar pinceladas de la historia que nos lleven a entender lo que la palabra átomo significa, y que nos sugieran que tal vez haya una tercera etapa de esta aventura esperándonos en este tercer milenio.

De Demócrito a la química: de la entelequia a la realidad

La primera vez que se utilizó la palabra átomo, para designar a los constituyentes últimos de la materia fue en la antigua Grecia. En el empeño de explicar la naturaleza que nos rodea, Platón y su escuela de Atenas, de forma elegante y bonita, describieron la esencia de las cosas como una combinación de cuatro elementos puros, opuestos e ideales: tierra, aire, fuego y agua. Su combinación en proporciones adecuadas daba lugar a las propiedades tan distintas de la materia, y por tanto, a su diversidad. Así podían explicar el calor, la humedad, el frío y la sequedad de los objetos. Unos años más tarde, Demócrito cuestionó esta interpretación, y postuló que la naturaleza está compuesta por átomos: partículas últimas e indivisibles, de distinta dureza, forma y tamaño. Su combinación da lugar a los cuatro elementos y, por tanto, a la realidad material. Así se acuñó por primera vez la palabra átomo. Estas partículas que forman la naturaleza eran propuestas de manera lógica, sin ningún tipo de argumentación o experimentación. Era simplemente un concepto puro y necesario (entelequia).

Una de las conclusiones importantes de esta primera y elemental teoría atómica era el determinismo de las leyes, que de alguna manera sugiere materialismo, y por tanto ateísmo. Los átomos no necesitan ningún mundo exterior que los sustente. Esta fue una de las razones por las que el concepto de átomo no tuvo una repercusión importante. La idea de los cuatro elementos, había calado profundamente en el pensamiento, y por tanto los átomos de Demócrito no fueron aceptados. Los motivos de esta derrota intelectual son puramente culturales: en pleno siglo III antes de Cristo el Olimpo estaba habitado por una colección de dioses importantes. Aceptar que estamos hechos de unas entidades materiales últimas, de las que no sabemos nada pero que su combinación da lugar a toda la naturaleza, era un concepto difícil de aceptar en esa época. Un mundo formado por cuatro elementos intuitivos, cercanos, poéticos, que se podían

experimentar, estaba más cerca de la divinidad, y por tanto de las ideas sociales del momento.

Así, la concepción de Platón y su escuela se impuso sobre la visión de Demócrito, y durante los siguientes 1500 años de historia perduró la teoría de los cuatro elementos. Basada en estas ideas, la ciencia de lo más pequeño se convirtió en la Alquimia. Las ideas de Demócrito cayeron en el olvido mientras que los alquimistas buscaban la transmutación entre elementos para conseguir oro. Los fracasos de la Alquimia, los estudios de Galileo Galilei sobre mecánica e inercia y los experimentos de Boyle para probar que las ideas esenciales de la teoría de los cuatro elementos no reproducía experimentos sencillos, comenzaron a crear un ambiente de desconfianza en estos conceptos. El término Alquimia se sustituyó por química, y en el siglo XVIII Lavoisier estableció alguna de sus leyes fundamentales. La tecnología de la época consistía en balanzas y hornos con los que Lavoisier pesaba gases y líquidos antes y después de calentarlos. Se dio cuenta de que en estos procesos todos los compuestos tenían algo en común que se combinaba de distinta manera. Fue en el siglo XIX cuando Dalton retomó el viejo concepto de Demócrito y nos presentó a los átomos como los constituyentes últimos de toda la materia. Dalton llegó a ordenarlos desde el más pequeño, que llamó hidrógeno hasta el más grande. Esta clasificación por peso la completó Mendeleiev. De esta manera, se suceden una serie de descubrimientos y nombres, que sobre la pista de experimentos anteriores, dan forma a la entelequia de átomo de Demócrito: el concepto de átomo ya estructurado sirve para predecir y explicar cosas de cada día, como el comportamiento de los gases, las reacciones químicas, combustiones, y otras realidades de nuestro mundo.

Si hiciésemos una 'foto' al átomo de Dalton lo tendríamos que representar como una esfera de un tamaño determinado. Diferentes tamaños corresponderían a diferentes átomos. A finales del siglo XIX comenzaban a conocerse la electricidad y la radioactividad de manera que en algunos laboratorios privilegiados se podían hacer experimentos avanzados que intentaban relacionar ambas propiedades dentro de los átomos. Rutherford, en 1912, ofreció al mundo un primer modelo atómico que incluía, el carácter eléctrico del mismo: el átomo no era ni indivisible ni el constituyente último, sino que estaba formado por electrones, protones y

neutrones. Las dos primeras partículas eran responsables de la electricidad, las dos últimas de la masa del átomo. La 'foto' que nos presentó Rutherford de un átomo nos lo muestra como un pequeño sistema planetario, con sus protones y neutrones en una región pequeñísima del espacio, a la que se le llamo núcleo, y los electrones, como planetas, orbitando alrededor de él.

De la química a la cuántica: de la realidad a la entelequia.

El concepto de átomo bien establecido por la química era claro, funcional, y lograba explicar la naturaleza. Sin embargo, sobre 1920, surgieron experimentos que no podían predecirse con este modelo. Experimentos que apuntaban resultados ilógicos, e inexplicables por las aceptadas leyes fundamentales de la física. Parecía claro que había que revisar todos los conceptos esenciales, particularmente, el del átomo. Así el átomo se convirtió en el banco de pruebas de lo que comenzó a llamarse física cuántica. Debido a su masa y velocidad, el electrón era la partícula donde estos fenómenos se ponían más claramente de manifiesto. Louis de Broglie, en 1929, sorprendió al mundo con su principio de dualidad onda-corpúsculo. Según sus trabajos, toda partícula en determinadas condiciones puede manifestarse como una onda. Las implicaciones de este principio son enormes: la

materia es 'corpúscular' (sólida) y sin embargo puede experimentar procesos de difracción o de interferencia, similares a las figuras que producen dos ondas de agua al cruzarse en un estanque. Así pues, la propia esencia de la materia, de los átomos que la forman, es indeterminada y a veces se comporta como partícula y a veces como onda. Se pudo demostrar que los electrones en los átomos no son partículas que giran en una órbita planetaria, sino que se 'difuminan' disponiéndose en complicadas formas geométricas alrededor del núcleo. Como una consecuencia más de la naturaleza dual de la materia, el famoso principio de conservación de la energía parecía violarse y aparecían electrones donde no debían por su energía. Numerosos experimentos pusieron de manifiesto que la materia, los átomos, debían de ser mucho más complejos, y que la 'foto' que Rutherford nos presentó de los mismos es muy pobre. El átomo se convierte de nuevo en un desconocido. La dualidad onda-corpúsculo, la indeterminación de la energía, la función de onda, la descripción probabilística de los experimentos hicieron que la visión 'realista' y determinista del átomo se perdiera. Que se llegara a cuestionar tanto su existencia como la validez del propio método científico. La visión del átomo pasó de realidad a una nueva entelequia: la idea cuántica del átomo.

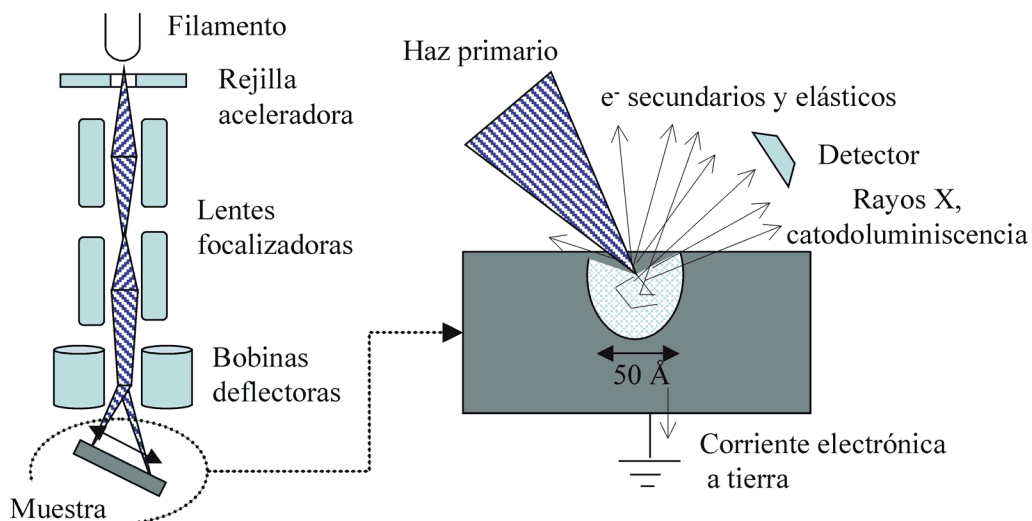


Figura 1: Esquema mostrando el funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido (SEM): Un filamento produce electrones que son acelerados y focalizados sobre la muestra a estudiar. Este haz 'barre' la muestra describiendo líneas. En ese barrido genera electrones secundarios, elásticos, rayos X, etc. que pueden ser utilizados para formar una imagen.

De la cuántica hasta hoy: de la entelequia a la tecnología (microscopios que ‘ven’ átomos)

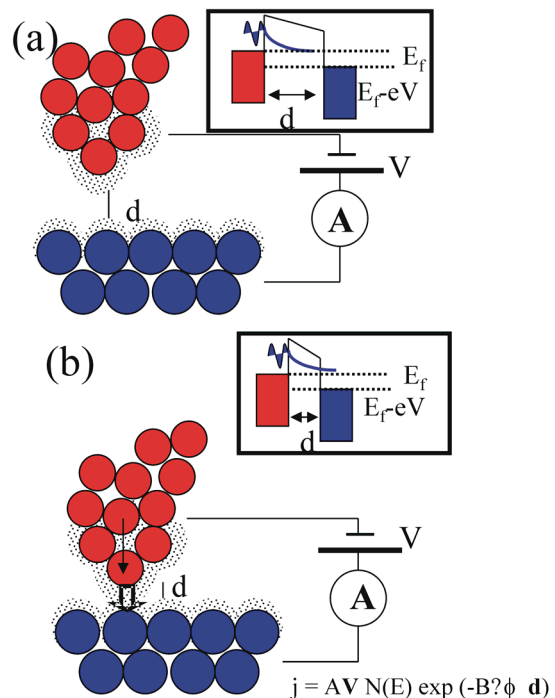
Hoy, 70 años después de estas concepciones tan revolucionarias, la física cuántica se ha ido comprendiendo y asimilando. Hemos entendido el concepto de átomo, y construido dispositivos que aprovechan esta doble naturaleza de la materia. Así, actualmente estamos en disposición de hacer una foto donde ‘veamos’ el átomo sin necesidad de iluminarlo. En esa lucha por llegar a lo más pequeño se fueron inventando diferentes tipos de microscopios basados en distintos conceptos físicos. Cada uno nos muestra una propiedad distinta de la materia. En todos ellos una sonda (luz visible, rayos X, electrones, partículas) interactúa con el material a estudiar (muestra) y genera una señal, que forma la imagen. El tamaño de los átomos es del orden de 1 \AA (10^{-10} m) y por tanto, para llegar hasta ellos necesitaremos un microscopio con ese poder resolutivo.

El primero de los microscopios fue el microscopio óptico. Estos microscopios, operativos desde el siglo XVI, han supuesto un gran avance para la ciencia. Su resolución límite, impuesta por las leyes de la óptica, está determinada por fenómenos de difracción en las lentes. Nos permite resolver, en el mejor de los casos, objetos del tamaño de una micra, como las células. Por este motivo este tipo de microscopios han sido ampliamente usados en biología.

Para ganar un poco más en resolución, y a partir del concepto del átomo, se diseñaron en 1936 los primeros microscopios electrónicos (llamados SEM, del inglés Scanning Electron Microscope). Estos microscopios, basados en la interacción de un haz de electrones con el objeto a analizar, poseen grandes ventajas y grandes inconvenientes. Ventajas son su resolución y sencillez, y algunos de sus inconvenientes la necesidad de que el objeto a estudiar sea metálico, que debe introducirse en vacío y aguantar la radiación del haz de electrones sin deteriorarse. La resolución límite de los mismos depende de la repulsión electrostática entre los electrones del haz y es del orden de unos $50\text{-}100 \text{ \AA}$. Por tanto nunca podremos llegar a ver átomos con ellos. Una variante de estos microscopios son los microscopios electrónicos de transmisión (llamados TEM, del inglés Transmission Electron Microscope) en los que el haz de electrones atraviesa una lámina muy fina del material a estudiar. Debido a la naturaleza ondulatoria de los mismos, estos sufren procesos de difracción. Un estudio de dichas figuras de difracción nos revela las posiciones de los átomos que han atravesado los electrones.

Por fin, hace unos 15 años apareció un nuevo tipo de microscopios basados en una propiedad cuántica de la materia: el llamado efecto túnel. Dicho efecto consiste en que una partícula atrapada en un pozo de potencial

Figura 2: Esquema del funcionamiento de un microscopio de efecto túnel. Acercamos una punta (en rojo) a una superficie (en azul). Cuando ésta está lejos, digamos a $d=8 \text{ \AA}$, no hay ninguna corriente entre la punta y la muestra. Sin embargo, cuando está cerca, (unos 2 \AA) y antes de que haya contacto, las nubes electrónicas de los átomos de la punta y de la muestra solapan. Tras aplicar una pequeña diferencia de potencial entre ambas podemos observar una corriente electrónica neta en una dirección. Esta corriente electrónica no sigue la ley de Ohm sino una expresión matemática derivada de la mecánica cuántica, y que depende exponencialmente de la distancia punta-muestra. Si recogemos esta corriente y la mantenemos constante mientras desplazamos la muestra con la punta, ésta va a subir y bajar (la corriente depende de la distancia) y podremos obtener así un perfil de la muestra con suficiente precisión como para ver diferencias cuando la punta está sobre un átomo o entre dos átomos. La precisión espacial se logra gracias a materiales piezoeléctricos.



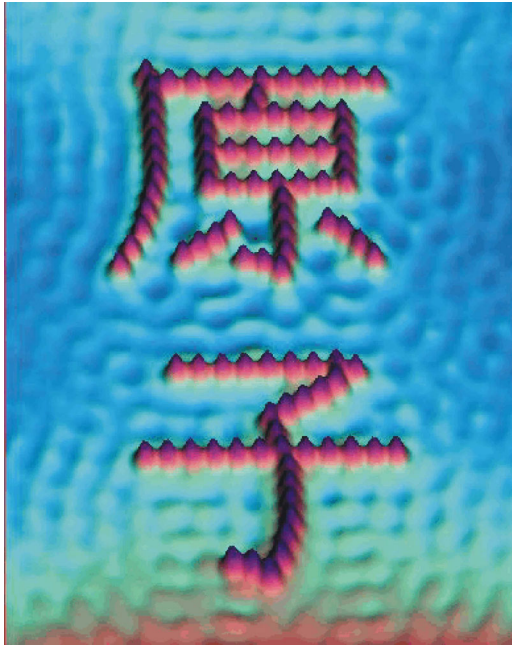


Figura 3: Átomos individuales de hierro (Fe, en naranja) depositados sobre una superficie de Cu (sus átomos se ven en color azul). Mediante esta técnica no solo los vieron, sino que fueron colocando los átomos de Fe de manera que escribieron con ellos unos caracteres Kanji que significan 'átomo'. Su traducción literal es "niño primitivo". Este tipo de experimentos abre las puertas de la tecnología del siglo XXI, llamada nanotecnología.

tiene una probabilidad pequeña, pero no nula de escapar del mismo. Una descripción clásica nos diría que dicho efecto es imposible. Sin embargo, las leyes de la mecánica cuántica permiten calcular la probabilidad de escape. Esto implica, que si tenemos, por ejemplo, muchos electrones (partículas) algunos pueden escapar de los átomos que los contienen, y por tanto generar una corriente eléctrica que puede ser medida. Dicha corriente, captada por una punta afiladísima situada a unos pocos Å, proviene de un solo átomo del espécimen a analizar y un mapa de ella nos permite generar una imagen de los mismos. Así surgieron dos tipos de microscopios que han supuesto una pequeña revolución en la microscopía debido a su alta resolución y a que producen verdaderas imágenes 3D de los objetos a estudiar. Son los llamados microscopios de efecto túnel y de fuerza atómicas, conocidos por sus siglas STM y AFM (del inglés Scanning Tunneling Microscope y Atomic Force Microscope).

Estos microscopios pequeños, baratos y basados en conceptos aparentemente ingenuos, permiten ver átomos con una gran resolución y superan los principales problemas del microscopio electrónico, ya que pueden funcionar en diversos tipos de ambiente (en líquidos, vacío, hornos, al aire, en criostatos...)

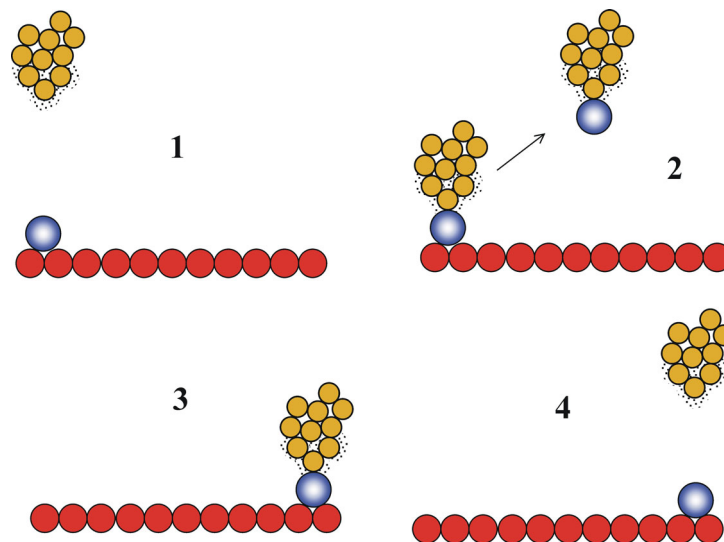


Figura 4: Para formar una estructura como la anterior se siguen los siguientes pasos. Primero se depositan átomos al azar en un sistema de ultra alto vacío y a baja temperatura sobre una superficie monocristalina. Se realiza una imagen para saber las coordenadas de los átomos depositados sobre la superficie. Luego se sitúa la punta sobre un átomo (1). Se baja hasta que 'toque' y se aplica un potencial de manera que el átomo se quede 'pegado' a la punta (2). Posteriormente se desplaza la punta con el átomo pegado hasta la nueva posición. Se desciende con ella (3) y por último se deja de aplicar voltaje para que el átomo quede en la superficie en la nueva posición (4). Este proceso se repite para cada uno de los átomos de la imagen.

y no dañan el material estudiado. Mediante esta técnica hemos visto cómo son y se comportan los átomos en una superficie. Se ha llegado a verlos moverse, manipularlos, reaccionar unos con otros y colocarlos a voluntad de forma que se pueda escribir con ellos. Gracias a estos microscopios los científicos han cumplido un sueño atávico: ver los átomos y jugar a las canicas con ellos.

Y por último, y desafiando a mi profesor de Bachillerato, os propongo una fotografía tomada por un grupo de investigadores de la IBM en Almaden (USA) (ver Fig. 3). Lutz y Eigler consiguieron ver átomos individuales de hierro (Fe, en naranja) depositados sobre una

superficie de Cu (sus átomos se ven en color azul). Mediante esta técnica no solo los vieron, sino que fueron colocando los átomos de Fe de manera que escribieron con ellos unos caracteres Kanji que significan 'átomo'. Su traducción literal es Niño primitivo.

Para los lectores con ganas de dar un 'paseo virtual' por el nanomundo, recomiendo la página web "<http://www.icmm.csic.es/fyt2002/concurso>". Esta página recoge contribuciones de distintos laboratorios de investigación españoles que participaron en el III congreso nacional de fuerzas y efecto túnel que tuvo lugar en Zamora en Septiembre de 2002. Se trata de fotografías estéticas con contenido divulgativo.
