

atomTIC Modelos atómicos con TIC

Contexto Histórico (I) Historia Social de la Ciencia de John D. Bernal

A continuación se reproduce íntegro el artículo 10.1 EL ELECTRÓN Y EL ÁTOMO del libro Historia Social de la Ciencia de John D. Bernal (Ediciones Península, sexta edición)

10.1 EL ELECTRÓN Y EL ÁTOMO

La física en 1896

Los grandes movimientos del siglo XX y la revolución en la ciencia física que los ha acompañado han convertido a la física, en el transcurso de unos cincuenta años, en algo casi irreconocible. Para comprender esta revolución es necesario considerar la actitud y el estatuto de la ciencia a principios de siglo. En la atmósfera de la física, a finales del XIX, se combinaba una teoría coherente e intelectualmente satisfactoria, con una creciente y llena de éxitos de aplicación práctica. El electromagnetismo de Faraday y Maxwell estaba encontrando aplicación en la iluminación eléctrica y en las nuevas redes de distribución de energía. La termodinámica de Clausius y Gibbs empezaba a afectar al diseño de las máquinas térmicas y de las plantas químicas. Y además estaban en el aire nuevos inventos. La teoría electromagnética hacía surgir la telegrafía sin hilos, la termodinámica había conducido ya al motor de combustión interna, que convirtió el transporte en algo muy barato y que poco después permitiría al hombre volar. Todo esto, sin embargo, no era sino una ampliación del saber establecido que no prometía concluir en nada radicalmente nuevo.

La descarga eléctrica

El cambio tendría que llegar de algunas descuidadas ramas de la física cuyos efectos no entraban fácilmente en la imagen clásica, pero que al parecer eran tan poco importantes que nadie podía dudar seriamente de su incorporación definitiva. Lo primero que turbó la complacencia física del siglo XIX fue el estudio de la descarga eléctrica. Los fenómenos de las chispas, los arcos eléctricos y las descargas por fricción se habían considerado siempre como vagos e inmanejables, si bien constituían una rama menor de la física. A mediados del siglo XIX habían atraído alguna atención en relación con la moda del arco voltaico, pero éste, a finales de siglo, parecía destinado a dejar paso al filamento incandescente. Con todo, la descarga eléctrica también se manifestaba brillantemente en el vacío y, debido a las necesidades de la nueva industria de la bombilla eléctrica, se impulsó el mejoramiento de las técnicas de vaciado. Como consecuencia del renovado interés y de las nuevas técnicas se hicieron diversas observaciones significativas a finales del XIX. Muchas de ellas no parecían explicables en términos de la física clásica: Sir William Crookes (1832-1919), en 1876, siguiendo las observaciones de Faraday en 1838, observó la formación de una luminosidad alargada en el extremo negativo, el cátodo, de un tubo de descarga altamente vaciado. Le pareció que consistía en algún tipo de partículas situadas en el cátodo, llamándolas rayos catódicos, una nueva forma radiante de

la materia. En ello fue profético, pues precisamente fue lo que permitió la edificación de la nueva física.

Röntgen y los rayos X

Johnstone Stoney (1826-1911) aventuró la posibilidad citada llamando electrones a los rayos catódicos en 1894; Jean Perrin (1870-1942) mostró que llevaban carga negativa (1895); J. J. Thomson (1856-1940) midió su velocidad (1897). En noviembre de 1895 cambió bruscamente el curso de la investigación a causa de un descubrimiento accidental y completamente imprevisto. Konrad von Röntgen (1845-1923), entonces un oscuro profesor de física de Würzburg, adquirió uno de los nuevos tubos de descarga de rayos catódicos al objeto de poner en claro su funcionamiento interno. Al cabo de una semana descubrió que ocurría algo en el exterior del tubo, algo que superaba todas las propiedades atribuidas a la Naturaleza, algo que hacía brillar a las pantallas fluorescentes en la oscuridad y que podía impresionar las placas fotográficas atravesando su cubierta de papel negro. Pero, sobre todo, se trataba de fotografías sorprendentes, pues mostraban las monedas que se llevaban en los bolsillos y los huesos de la mano. Como no sabía de qué se trataba denominó al fenómeno "rayos X". Era un descubrimiento científico asombroso: todos podían verlo, y no fue sorprendente que en unos cuantos días los periódicos llevaran a todo el mundo la noticia del descubrimiento. Éste fue objeto de innumerables canciones satíricas y al cabo de pocos meses casi todos los científicos de fama repetían para sí el experimento y lo mostraban a maravillados auditorios.

El electrón

Por grande que fuera el valor inmediato de los rayos X, especialmente para la medicina, su importancia última para el conjunto de la física y la ciencia natural fue todavía mayor, pues su descubrimiento proporcionó una clave no sólo para una sino para muchas ramas de la física. En primer lugar, permitió a J. J. Thomson completar sus ideas acerca de los generadores de rayos X -los rayos catódicos o electrones- al advertir no solamente que los electrones, al incidir sobre la materia, hacen que ésta despidan rayos X, sino que mediante los rayos X se consigue que cualquier tipo de sustancia genere electrones. Podían producirse iones o partículas cargadas en los gases y explicar en gran parte las misteriosas propiedades de las descargas eléctricas, incluida la mayor de todas: el rayo. El descubrimiento de que los electrones, aparentemente idénticos, podían suscitarse en las más variadas sustancias parecía indicar que eran como una especie de materia prima de la electricidad. Pero esta materia prima estaba compuesta de partículas individuales -era atómica. En consideración a este hecho, J. J. Thomson dio el primer paso decisivo para el descubrimiento de la estructura interna del átomo.

El revivir del atomismo

La física del siglo XX difiere de la del XIX por su insistencia en considerar a los átomos como entidades concretas. El siglo XIX se abrió con la teoría atómica de Dalton en la química, y el atomismo obtuvo grandes triunfos en las fórmulas estructurales de la química orgánica; pero, como ya se ha indicado en la Parte V, la corriente de ideas de la última parte del siglo, principalmente por influencia de Mach y Ostwald, fue antiatomista, explicando las propiedades atribuidas a los átomos en función de las relaciones entre sustancias más generales. El propio

Newton fue atomista, pero su mecánica se prestó, al ser generalizada por Lagrange y Hamilton, a una imagen del espacio en la que las propiedades apenas variaban de un lugar a otro. La teoría del campo adquirió un prestigio inmenso por la intuición de Faraday y su transformación por Maxwell en la teoría electromagnética de la luz, que era esencialmente una teoría de campos de fuerza. Como veremos, todavía sería mucho más generalizada por Einstein en sus teorías de la relatividad.

La continuidad, principio supremo en la física de los campos, no podía incluir fácilmente la discontinuidad de los átomos y mucho menos la discontinuidad mayor que se apreciaría con la teoría cuántica. Desde los mismos comienzos de la reflexión consciente sobre los fenómenos físicos, la idea de átomo ha parecido revolucionaria y siempre ha estado vinculada con el pensamiento ateo y revolucionario en general. Los campos, como perfectas formas geométricas, son conservadores y continuos. La física de la continuidad parecía de mucho mejor tono, pero los intentos de restablecerla no fueron sino escaramuzas incapaces de vencer la poderosa corriente de conocimientos nuevos, interpretables solamente en términos atómicos.

Becquerel y la radioactividad

Hacia 1897, los átomos estaban ya definitivamente asegurados, pero, paradójicamente, no se trataba ya de átomos en el sentido etimológico (es decir, indivisibles), sino que exhibían la desconcertante posibilidad de ser susceptibles de división. Ello no era tan sencillo como lo que había mostrado J. J. Thomson. Simultáneamente se consiguió otro descubrimiento de importancia todavía superior. Al cabo de cuatro meses del descubrimiento de los rayos X, Becquerel (1852-1909), en Francia, considerando que los rayos X debían tener alguna relación con la luminosidad que aparecía en los tubos de descarga, trató de hallar otros cuerpos que mostraran una luminosidad parecida; en sus investigaciones con minerales y sales, en particular sales de uranio, halló, de modo bastante sorprendente, las luminosidades que buscaba. Se trata en este caso de un verdadero accidente en la historia de la ciencia. Henri Poincaré (1854-1912) había aconsejado a Becquerel que investigara una posible relación entre los rayos X y la fosforescencia. Su padre tenía una magnífica colección de sustancias fosforescentes. Si en vez de investigar con el nitrato de uranio hubiera cogido sulfuro de zinc, es probable que el descubrimiento del fenómeno de la radioactividad, con todo lo que significa para la física atómica, se hubiera retrasado otros cincuenta años por lo menos. En torno nuestro se esconde una multitud de fenómenos sencillos, pero capaces de provocar una revolución en la física.

Los nuevos y misteriosos rayos del uranio también eran capaces de atravesar la materia, haciéndolo espontáneamente sin necesidad de aparato alguno, a partir de sustancias químicas aparentemente inertes y estables.

Los Curie y el radio: transmutación de los átomos

El descubrimiento de la radioactividad fue un golpe todavía mayor para las doctrinas físicas y químicas del siglo XIX. La obra de los mayores químicos, del propio Lavoisier, había impuesto la ley de la inmutabilidad de los elementos. Y se había implantado como una refutación directa de las pretensiones de los antiguos químicos, que querían alterar los elementos o crear materia. Y de pronto he aquí que la materia cambia realmente por sí misma sin necesidad de ningún estímulo

externo. También fue un duro golpe la doctrina de la conservación de la energía: ¿de dónde procede la emitida por las sustancias radioactivas? Sólo del átomo mismo, pero una cantidad pequeñísima de material radioactivo emitía cantidades apreciables de energía: Ello implicaba que el átomo contiene energía en cantidades insospechadas para el hombre, que hasta entonces utilizaba solamente la liberada por combustión, en la que se basaba la industria del siglo XIX.

Una vez descubierta la radioactividad el progreso científico fue extraordinariamente rápido, mucho más que en cualquier período anterior de la historia de la ciencia. En el corto intervalo de seis años se pusieron al descubierto las características principales del cambio atómico espontáneo. Pierre Curie (1859-1906) y su esposa Marie (1867-1934), polaca de nacimiento y la primera mujer investigadora científica importante, descubrieron fuentes de energía mucho más poderosas que el uranio original. Consiguieron aislar nuevos elementos como el polonium y el radium; este último tiene tal poder radioactivo que brilla en la oscuridad y puede causar lesiones mortales en las personas que lo manipulan o se aproximan a él excesivamente.

Rutherford y Soddy: las transformaciones radioactivas

Rutherford había estudiado la naturaleza de las radiaciones mismas, y había mostrado que las de cierto tipo, los rayos alfa, eran algo completamente nuevo en la ciencia. Estos rayos consisten en partículas materiales proyectadas a velocidades inconcebibles. Demostró también que el átomo del radio produce otros átomos, los del gas de helio, elemento raro y romántico advertido primero en el Sol por medio del estudio de la luz que emite, y los del elemento llamado entonces emanación del radio. Esto era alquimia, pero alquimia natural, pues en esta época no había nada que pudiera modificar el ritmo de desintegración de los átomos y convertirlos en otros según las reglas de la desintegración radioactiva. Los creyentes aceptaron el hecho como si fuera otro inescrutable misterio de la Naturaleza, y sostuvieron que nunca sería posible modificarla. Mediante una magnífica combinación de técnicas físicas y químicas, Rutherford, ahora en Montreal trabajando con el brillante químico Soddy, siguieron esos cambios, y entre 1899 y 1907 revelaron familias enteras de transformaciones naturales, una para el uranio, otra para el torio y otra para el actinio. Cada elemento radioactivo emitía rayos alfa, beta o gamma, transformándose en otros elementos hasta terminar en plomo inerte. Al estudiar estos procesos pareció claro que los elementos no eran simples y homogéneos, que cada uno contenía cierto número de átomos químicamente iguales pero de comportamiento físico distinto. Se trataba de los isótopos, de los cuales se hablaría tanto en los años siguientes.

Planck y la teoría cuántica

Al principio esta multitud de fenómenos quedó fuera de las teorías existentes, siendo considerados simplemente como hechos brutos, pero ya de otra parte de la física llegaba una clave que ayudaría a descifrar su significado. El descubrimiento del electrón había suscitado dificultades en la teoría de la radiación de la luz. Si la luz se produce por rotación o vibración de electrones entonces debe cambiar continuamente de color, ya que los electrones pierden energía con la radiación, pero la clara evidencia de la constancia de la longitud de onda en el espectro óptico mostraba que no era así. En la teoría del calor aparecía otra contradicción. Según la teoría electromagnética clásica, toda la

energía de un cuerpo caliente estaría concentrada en la longitud de onda corta, pero en vez de observarse luz azul se veía luz roja. Estas discrepancias no podían ser ignoradas permanentemente, pero los esfuerzos afortunados por explicarlas de Max Planck (1858-1947) en 1900 no hicieron más que resolver una dificultad experimental para suscitar otra teórica. De hecho, Planck sugería que los átomos no liberan energía continuamente, sino por partes, o, en otras palabras, que la energía, como la materia, es atómica, pero que la atomicidad no reside en la energía misma, sino en la curiosa magnitud que es la acción (energía multiplicada por tiempo). Existe, consiguientemente, un quantum o cantidad suficiente de acción, la constante de Planck ($h = 6.6 \times 10^{-27}$ erg/seg), que gobierna la magnitud de todos los intercambios de energía de los sistemas atómicos.

Einstein y el fotón

Albert Einstein fue el primero en extraer de ello la primera aplicación práctica en el nuevo campo de la física. De este modo explicó por qué los electrones emitidos por un metal cuando llega a él un haz de luz viajan siempre a la misma velocidad, independientemente de que la luz sea débil o intensa. Lo que ocurre es que sólo absorben el cuanto de energía poseído por la luz; más luz implica mayor número de cuantos, pero no cuantos más grandes. La velocidad, en cambio, depende directamente del color, es decir, de la frecuencia de la luz. La imagen de Einstein era la siguiente: los electrones producidos por la luz al incidir en un metal son una especie de partícula, un fotón o átomo de luz de frecuencia ν , que transfiere su energía a otra especie de partícula, un electrón de velocidad v o de energía E , según la ecuación $E = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu$. De hecho, había vuelto del revés la imagen ondulatoria de la luz y regresado a la antigua idea de Newton, para el que la luz se componía de partículas.

El núcleo atómico

Sin embargo la aplicación plena de la teoría cuántica a la estructura del átomo todavía tenía que esperar otros dos descubrimientos capitales. En 1910 dos de los colaboradores de Rutherford, Geiger y Marsden, habían demostrado que aquellos proyectiles naturales, las partículas alfa, en vez de seguir una trayectoria rectilínea al atravesar láminas delgadas, a veces salían disparadas en sentido contrario. Rutherford concluyó de este sorprendente resultado -que comparaba a una granada de artillería que rebotara en una hoja de papel- simplemente que las partículas chocaban con algo muy duro. De hecho, había advertido que los átomos tienen un núcleo. Descubrió así al compañero del electrón, y como los electrones tienen carga negativa, el núcleo debía tener una carga positiva exactamente igual a la carga total de los electrones que giran en torno a él. ¿Cómo están dispuestos los electrones? El problema tenía muchas curiosas analogías con el de la disposición de los planetas en el sistema solar, problema que había dejado perplejos a los científicos del Renacimiento, de modo que señaló una solución parecida, en realidad ideada por Perrin en 1901, pero que no pudo probarse hasta que se conocieron ciertos hechos en otro sector: los del descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los rayos X.

Von Laue y los Bragg: Rayos X y cristales

En 1912 Von Laue descubrió que los rayos X podían ser difractados por medio de cristales, tal como ocurre con la luz ordinaria cuando atraviesa una estructura

estriada, como una pluma, un tejido fino o un disco de gramófono, cuyas estrías tienen dimensiones aproximadamente iguales a las longitudes de onda de la luz. Los rayos X son difractados por objetos de la misma magnitud que los átomos mismos, y por tanto de longitudes de onda más cortas que la luz. Por sus efectos, el descubrimiento de Von Laue fue tan importante como el de los propios rayos X. Inmediatamente lo examinaron Sir William y Sir Lawrence Bragg (padre e hijo), mostrando que era posible medir la longitud de onda de los rayos X y al propio tiempo determinar la estructura de los cristales en términos de la disposición de los átomos que los componen.

El átomo de Rutherford-Bohr

Poco después, en 1913, en el laboratorio de Rutherford en Manchester, Moseley (1887-1915), un joven físico muy brillante, muerto en la batalla de Gallipoli, midió la longitud de onda de los rayos X emitidos por diferentes elementos, mostrando que seguían una ley muy sencilla, dependiendo exactamente del número atómico y del número de electrones en cada clase de átomo. El laboratorio de Rutherford, gracias al carácter de éste, había atraído a algunas de las mentes más brillantes que nunca hayan trabajado juntas en la física. Entre ellos había un joven danés, Niels Bohr (1885-1962), capaz de unir los cuatro cabos que entonces estaban sueltos: el núcleo duro del experimento de la dispersión, las sencillas leyes descubiertas mucho antes por Balmer (1825-1898) en relación con las frecuencias en el espectro de hidrógeno, la regularidad de las longitudes de onda de los rayos X de diferentes elementos y la teoría de los cuantos de Planck. Como un nuevo Kepler, mostró que el átomo podía dibujarse como un sistema solar en que cada electrón tenía su propia órbita particular, y que la luz o los rayos X eran producidos solamente cuando los electrones pasaban de una órbita de energía elevada a otra de energía inferior.

El átomo de Rutherford-Bohr -el átomo del siglo XX- enseguida quedó establecido, en el sentido de que, como la astronomía newtoniana, podía ser utilizado para predecir las propiedades de los átomos simplemente a partir del conocimiento del número de electrones que tenían. Y explicaba la razón de que solamente la luz de determinadas frecuencias fuera emitida o absorbida por los átomos. Se podían interpretar los espectros complejos y hallarse los niveles de energía del electrón en los diferentes átomos. El mismo concepto de nivel de energía es de tipo cuántico. Implica que toda molécula o estructura molecular puede existir en gran número de estados con diferentes caracteres de vibración como los tonos de un instrumento musical y que las diferencias de energía entre dichos estados pueden hallarse midiendo las frecuencias de la luz emitida o absorbida.

El nuevo átomo en la química

Pero el concepto atómico de Rutherford-Bohr excede en mucho lo anterior. Se podía utilizar inmediatamente para interpretar las hasta entonces misteriosas y enormemente arbitrarias leyes de la química. En primer lugar explicaba por qué los diferentes átomos tienen las propiedades que tienen, por qué unos forman metales y otros no, por qué otros son gases inertes. Las disposiciones con determinado número de electrones -2, 8, 18, 32- parecían perfectamente estables. Si se les agrega uno o más electrones nuevos éstos quedan unidos en forma mucho más débil. En los materiales compuestos por tales átomos, la luz llega fácilmente a los electrones en vibración y es reflejada poderosamente por

éstos, propiedad característica de los metales. Si hay unos pocos electrones que necesitan compensarse, los electrones de átomos diferentes se combinan de modo que produzcan el mejor efecto: el resultado es una molécula neutral, no metálica, como las de los gases o las moléculas orgánicas. Si se colocan juntos átomos metálicos y no metálicos, el átomo metálico da sus electrones excedentes al átomo no metálico, convirtiéndose en un ión cargado positivamente, y el ión no metálico, cargado ahora negativamente, se combina con él por, simple atracción eléctrica formando una sal. Así es como toda la imagen de la tabla periódica de los elementos, dispuesta en familias y series, a la que había llegado cincuenta años antes lógicamente el gran químico ruso Mendeléiev, recibió una explicación física y cuantitativa. Hay 92 elementos naturales, del hidrógeno al uranio, debido a que hay elementos que tienen 1, 2, 3, 4... hasta 92 cargas positivas en sus núcleos, y cada uno tiene el propio número atómico correspondiente.

La estructura de los cristales

Los descubrimientos de Von Laue y los Bragg iban a tener, con todo, consecuencias de mayor alcance. Los Bragg, al analizar las disposiciones relativas de los átomos en los cristales, hallaron una nueva cristalografía fundamental que a su vez transformaría las ideas de los químicos acerca de la naturaleza de los cristales y moléculas. Fue como si se hubiese inventado un nuevo microscopio que permitiera ver la posición de los átomos químicos. Por una parte se pudo demostrar que en las sales simples como el cloruro sódico no existen moléculas, sino sólo conjugaciones regulares de iones positivos de sodio y iones negativos de cloro; por otra parte, en sustancias como la naftalina existen moléculas como las consideradas en el siglo XIX, pues los grupos de átomos están separados entre sí por grandes espacios. En realidad, el análisis con rayos X confirmó primero y luego permitió refinar la idea sobre la estructura de las moléculas a la que los químicos habían llegado mediante una lógica matemática muy ingeniosa basada en sus transformaciones en otras moléculas. Donde no podían aplicarse los métodos químicos, como en los metales y los silicatos, los rayos X se emplearon inmediatamente para descifrar la estructura atómica y explicar al propio tiempo las propiedades específicas y útiles de tales sustancias.