

## EL MODELO ATÓMICO DE BOHR EN SU PUNTO JUSTO

La mayoría de los textos de Química enfocan el modelo del átomo de Bohr, sin que sus autores vayan a la fuente original, esto es los trabajos que Bohr publicó en junio, septiembre y noviembre de 1913, sobre la constitución de átomos y moléculas, en el Philosophical Magazine. Si los hubieran leído, estoy plenamente seguro que no pondrían en boca de Bohr, cosas que él jamás estableció. Lo que ocurre es que cada autor toma como base lo escrito por otro y así sucesivamente sin ir a las fuentes.

Vamos a intentar reducir y comentar el artículo que Niels Bohr envió a la revista citada el 5 de abril de 1913, base de toda su teoría. Consta de cinco partes. Una introducción. Consideraciones generales: Unión de electrones por núcleos positivos. Emisión de espectros de rayas. Continuación de consideraciones generales y Estado permanente de un sistema atómico.

En el enfoque que hace parte del modelo de Rutherford, su maestro en Mánchester, al que anticipó el borrador del trabajo el año anterior.

Sitúa al electrón de carga  $-e$ , y masa  $m$ , describiendo órbitas elípticas cuyo eje mayor es  $2a$  con una frecuencia de revolución  $\omega$ , alrededor de un núcleo con carga  $E$ , y con masa mucho mayor que la del electrón, cuya velocidad a su vez es muy pequeña comparada con la de la luz. Supone que en principio no hay radiación de energía y que el electrón describirá órbitas elípticas estacionarias. La frecuencia de revolución  $\omega$ , y el eje mayor de la órbita  $2a$  dependerán de la cantidad de energía  $W$  que debe suministrarse al sistema para alejar al electrón una distancia infinitamente grande del núcleo.

Al aplicar el equilibrio de fuerzas llega a la conclusión (tomada de trabajos de Rutherford y colaboradores) que:

$$\omega = \left( \frac{\sqrt{2}}{\pi} \right) \frac{W^{3/2}}{eE\sqrt{m}} \quad \text{y} \quad 2a = \frac{eE}{W}$$

Ahora es cuando empieza el trabajo más o menos original de Bohr<sup>1</sup>.

Dice Bohr:

*“Tomemos ahora el efecto de la radiación de la energía calculado de la forma habitual a partir de la aceleración del electrón. En este caso el electrón ya no describirá órbitas estacionarias.  $W$  aumentará continuamente y el electrón se aproximará al núcleo describiendo órbitas de dimensiones cada vez más pequeñas y con frecuencia cada vez mayor; por término medio el electrón gana energía cinética al mismo tiempo que todo el sistema pierde energía. El proceso continuará hasta que las dimensiones de la órbita sean de la misma magnitud que las dimensiones del electrón o del núcleo.*

*Un cálculo sencillo muestra que la energía radiada durante el proceso será muy grande comparada con la que se desprende en los procesos moleculares normales. Parece obvio que este comportamiento es muy distinto del de un sistema atómico natural. En primer lugar los átomos reales en su estado permanente parecen tener dimensiones y frecuencias fijas. Además si consideramos cualquier proceso molecular, el resultado parece ser que después de desprender cierta energía, característica de cada sistema, este alcanza un nuevo estado de equilibrio, en el cual las distancias tienen el mismo orden de magnitud que antes del proceso”.*

Ahora expondrá la clave de toda su teoría, basado en la teoría de Planck.

*“Según la teoría de la radiación de Planck, la radiación de energía por un sistema atómico no tiene lugar de forma continua admitida en la electrodinámica usual, sino por el contrario se produce en emisiones discontinuas, siendo la cantidad de energía emitida en una sola emisión por un vibrador atómico de frecuencia  $\nu$  igual a  $\tau h \nu$ , siendo  $\tau$  un número entero y  $h$  una constante universal.*

*Volviendo al caso simple de un electrón y un núcleo positivo. Inicialmente aquél estaba muy separado y no tenía velocidad apreciable respecto al núcleo. Supongamos que después de producirse la interacción, entró en una órbita estacionaria respecto al núcleo. Admitiremos por motivos a los que nos referiremos más tarde que la órbita en cuestión es circular. Supongamos que durante la interacción se emite una radiación de frecuencia  $\nu$  igual a la mitad de la frecuencia de revolución  $\omega$  en su órbita final, entonces de acuerdo con la teoría de Planck cabría esperar que la cantidad de energía emitida en el proceso fuera  $\tau h \nu$ .*

*Admitiendo que la radiación emitida sea homogénea, la segunda hipótesis respecto a la frecuencia de radiación, es consecuente, ya que la frecuencia de revolución al inicio de la emisión es 0.*

Por lo tanto:

$$W = \tau h \frac{\omega}{2}$$

que al aplicarlas a las expresiones anteriores darán

$$\omega = \frac{\sqrt{2}W^{3/2}}{\pi\sqrt{meE}},$$

elevando al cuadrado  $\omega^2 = \frac{2W^3}{\pi^2 m (eE)^2}$ , como  $\omega = \frac{2W}{\tau h}$ ,

sustituyendo en la expresión:

$$\frac{4W^2}{\tau^2 h^2} = \frac{2W^3}{\pi^2 m (eE)^2}$$

simplificando y despejando  $W = \left( \frac{2\pi^2 m e^2 E^2}{h^2} \right) \left( \frac{1}{\tau^2} \right)$

y como  $2a = \frac{eE}{W}$ , llevando a esta expresión el valor obtenido de W, quedaría:  $2a = \left( \frac{h^2}{2\pi^2 m E e} \right) \tau^2$

haciendo en las expresiones anteriores  $e/E = 4,7 \cdot 10^{-10}$ ;  $e/m = 5,31 \cdot 10^{17}$  y  $h = 6,5 \cdot 10^{-27}$ , se obtiene:

$2a = 1,1 \cdot 10^{-8}$  cm;  $\omega = 6,2 \cdot 10^{15}$  (1/s) y  $W/e = 13$  volt<sup>2</sup>

Valores que son del orden de magnitud de las dimensiones lineales de los átomos, las frecuencias ópticas y los potenciales de ionización.

La parte segunda del artículo hace referencia al espectro del hidrógeno, y la explicación de las series de Balmer y Paschen.

“Si hacemos  $E = e$ , la expresión de la energía emitida al formarse un estado estacionario es

$W_\tau = \left( \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \right) \left( \frac{1}{\tau^2} \right)$  y la cantidad de energía emitida por el paso del sistema de un estado correspondiente a  $\tau = \tau_1$ , a otro

correspondiente a  $\tau_2$ , será:  $W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = \left( \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \right) \left( \frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$

Si suponemos que la radiación es homogénea y que la cantidad de energía emitida es  $h\nu$ , siendo  $\nu$  la frecuencia de la radiación, obtendremos:

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = h\nu$$

de lo que  $\nu = \left( \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \right) \left( \frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$  expresión que constituye la ley que relaciona las rayas del espectro del hidrógeno.

Si hacemos  $\tau_2 = 2$ , obtenemos la serie de Balmer. Si  $\tau_2 = 3$ , obtendremos la serie observada por Paschen en la región infrarroja. Escribiendo  $\tau_2 = 1$  y  $\tau_2 = 4, 5$ , obtendremos series situadas en el extremo ultravioleta e infrarrojo, no observadas pero cuya existencia debe esperarse.

La concordancia no es solo cualitativa sino también cuantitativa.

Haciendo  $e = 4,7 \cdot 10^{-10}$ ;  $e/m = 5,31 \cdot 10^{17}$  y  $h = 6,5 \cdot 10^{-27}$ , obtendremos  $\left( \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \right) = 3,1 \cdot 10^{15}$

El valor experimental observado para este factor es  $3,290 \cdot 10^{15}$ ”

La tercera parte del artículo, hace referencia a las consideraciones generales y enuncia de otra forma sus ideas

“...Representando por  $M$  el momento angular del electrón en torno al núcleo, y para una órbita circular,

$\pi M = \frac{T}{\omega}$  siendo  $\omega$  la frecuencia de revolución y  $T$  la energía cinética del electrón. Además  $T = W$ , como

$W = \tau h \frac{\omega}{2}$ , por lo que se obtiene que  $\pi M = \frac{\tau h \frac{\omega}{2}}{\omega} = \tau \frac{h}{2}$ . Si hacemos  $M_0 = \frac{h}{2\pi}$ , se tendrá que  $M = \tau M_0$

Por consiguiente si postulamos que la órbita del electrón es circular en los estados estacionarios, se puede expresar que el momento angular del electrón en torno al núcleo en un estado estacionario del sistema, es un múltiplo entero de un valor universal

*independiente de la carga del núcleo. La posible importancia del momento angular en la discusión de los sistemas atómicos en relación con la teoría de Planck, es destacada por Nicholson”.*

El capítulo cuarto hace referencia a la absorción de radiación, y no vamos a entrar en él.

El capítulo quinto y último hace referencia al estado permanente de un sistema atómico

En él se generalizan al final las hipótesis mencionadas con el siguiente texto:

*“En cualquier sistema molecular formado por núcleos positivos y electrones, en el cual los núcleos están en reposo unos relativamente a los otros y en el cual los electrones se mueven en órbitas circulares, el momento angular de cada electrón en torno del centro de su órbita será en el estado permanente del sistema igual a  $h/2\pi$ , siendo  $h$  la constante de Planck”<sup>3</sup>.*

---

<sup>1</sup> El primero al que se le ocurrió aplicar la teoría de Planck al átomo, fue a Arthur Eric Haas, estudiante de doctorado de la universidad de Viena, en 1910, refiriéndolo al modelo de Thomson y generando la expresión  $h\nu = e^2/a$ . Lo llevó a la conferencia Solvay de 1911, donde lo leyó Nicholson, astrónomo de Oxford que andaba buscando una forma de explicar los espectros de la luz procedentes de la corona solar, donde había identificado a dos nuevos elementos el protoflour y el nebulio. Nicholson cuantificó en 1912, el momento angular del electrón  $L = n(h/2\pi)$ . Bohr se inspiró en los trabajos de Nicholson, como así lo reconoce en este artículo.

<sup>2</sup> Thomson en 1911, había calculado experimentalmente el potencial de ionización del hidrógeno, dando un valor de 11 voltios.

<sup>3</sup> El trabajo de Bohr consta de 36 páginas, y en el resumen que se reseña se ha destacado lo más importante, referido a lo que se enseña sobre la teoría de Bohr en la Química de Enseñanza Secundaria y Bachillerato, en ninguno de los cuales se hace referencia a la hipótesis fundamental o sea que la frecuencia de radiación es la mitad de la frecuencia de revolución.