

Centenario de la física atómica

Daniel R. Bes

Cómo aprendimos a interpretar los resultados de experimentos con átomos y a compatibilizar esos resultados con la aceptada teoría electromagnética de James C Maxwell.

A principios del siglo XVII comenzó la construcción de lo que hoy llamamos 'física clásica', con propuestas revolucionarias para aquel entonces. Por ejemplo, la física de Aristóteles postulaba que todo movimiento necesitaba de un agente motor, con las consiguientes implicaciones filosóficas, religiosas, etcétera, en contradicción con la nueva idea de que un cuerpo conserva su movimiento en ausencia de fuerzas exteriores. El edificio clásico aparecía terminado a fines del siglo XIX, e incluía la mecánica del italiano Galileo Galilei (1564-1642) y del inglés Isaac Newton (1642-1727), el electromagnetismo de Michael Faraday (inglés, 1791-1867) y James C Maxwell (escocés, 1831-1879), y la termodinámica del austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) y del alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894). Este edificio fue completado definitivamente en el siglo XX con las teorías especial y general de la relatividad de Albert Einstein (alemán, 1879-1955) y con el estudio del caos iniciado por el francés Henri Poincaré (1854-1912). Su construcción requirió dos cosas: por un lado, de tratamientos precisos para predecir la evolución de los sistemas mediante ecuaciones matemáticas, lo cual implicó el abandono de la intuición a favor del formalismo; por el otro, la verificación experimental de las predicciones.

La física clásica tiene un carácter determinista y supone la existencia de una realidad física independiente del observador. Su mayor triunfo conceptual fue la descripción del movimiento de los astros, incluyendo la predicción de la existencia de nuevos planetas, para lo cual se implantó el concepto de partícula independiente (un planeta era un punto que se movía alrededor del Sol). También se unificó el tratamiento de campos eléctricos y magnéticos, dando lugar a la representación de rayos de luz y de las otras radiaciones electromagnéticas en términos de ondas caracterizadas por su frecuencia. Siguiendo la correspondencia histórica entre los cambios conceptuales de la física y de las otras ciencias –incluso las sociales–, aparecieron los trabajos del escocés Adam Smith (1723-1790), del inglés Thomas Hobbes (1588-1679) y de otros, basados en comportamientos individuales independientes. Estos nuevos paradigmas estuvieron en la base de la industrialización de Europa y de los Estados Unidos. Produjeron también una sensación de omnipotencia de la razón: *Si concibiéramos una inteligencia que, en un instante dado, pudiera comprender todas las relaciones entre las entidades del universo, esta podría conocer todas las posiciones y movimientos de estas entidades por todos los tiempos pasados y futuros* (Pierre-Simon Laplace [1749-1827], 1843, matemático y astrónomo francés).



Niels Bohr en 1922, cuando recibió el premio Nobel de física por sus investigaciones sobre 'la estructura de los átomos y la radiación que emana de ellos'. Foto AB Lagrelius & Westphal, Wikimedia Commons.

Alrededor de 1900 aparecieron problemas con las 'verdades eternas' de la física clásica y se necesitaron pioneros con mucho coraje y mucha capacidad para cuestionarlas y reemplazarlas. Los más relevantes durante el primer cuarto de siglo fueron los alemanes Max Planck (1858-1947) y Albert Einstein y el danés Niels Bohr (1885-1962). Los dos primeros trataron radiaciones electromagnéticas; el tercero, la materia. Al cumplirse los cien años de las contribuciones fundamentales de cada uno, no conozco en la Argentina conmemoraciones del primero (2000) pero sí (muy buenas) del segundo (2005). Es la intención de este trabajo recordar la contribución del tercero (2013).

En octubre de 1900 Planck inventó una expresión matemática que, hasta el día de hoy, da cuenta de la distribución de la radiación emitida por un cuerpo negro – un cuerpo que no refleja la luz– en función de la frecuencia y de la temperatura. Dotado de un temperamento conservador, dedicó muchos esfuerzos a derivar esta expresión. Lo logró, pero a costa de postulados no clásicos, uno de los cuales requiere que la radiación

electromagnética sea emitida en paquetes de energía proporcional a la frecuencia ν . La constante de proporcionalidad se representa con el símbolo h , la constante de Planck. Clásicamente, cualquier intensidad era posible para una radiación de frecuencia ν .

La propuesta revolucionaria de Einstein (1905) consistió en suponer que la radiación electromagnética libre, y no solamente la emitida por un cuerpo negro, está compuesta por fotones, paquetes de energía similares a los de Planck. Esto contradecía la naturaleza ondulatoria de la luz, uno de los aspectos de la teoría de Maxwell mejor comprendidos y verificados hasta entonces. Una consecuencia de esta hipótesis fue que en el efecto fotoeléctrico se absorbe un fotón. Si bien la expresión resultante para la energía del electrón emitido fue citada en el otorgamiento del premio Nobel de 1921, la hipótesis de Einstein fue aceptada recién cuando el norteamericano Arthur Compton (1892-1962) verificó experimentalmente en 1923 las leyes del choque entre partículas para el caso del fotón. Esta fue la primera partícula predicha teóricamente.

La tesis de Bohr (Universidad de Copenhague, 1911) continuó la teoría clásica del movimiento de electrones en metales del holandés Hendrik Lorentz (1853-1928). Mediante la aplicación de la mecánica estadística, Bohr dedujo resultados muy generales, entre ellos, la existencia de fenómenos no explicables en el marco de la teoría clásica. A partir de septiembre de ese año, Bohr realizó una estadía posdoctoral en la Universidad de Cambridge donde trabajaba Joseph J Thompson (1856-1940), el científico inglés que descubrió el electrón y responsable de importantes avances en la teoría de esa partícula. Bohr había corregido resultados de Thompson en su tesis y fue un gran desaliento darse cuenta de que Thompson jamás se había sentado a leerla. En marzo de 1912 Bohr pasó a Manchester, donde el neocelandés Ernest Rutherford (1871-1937) había realizado trabajos

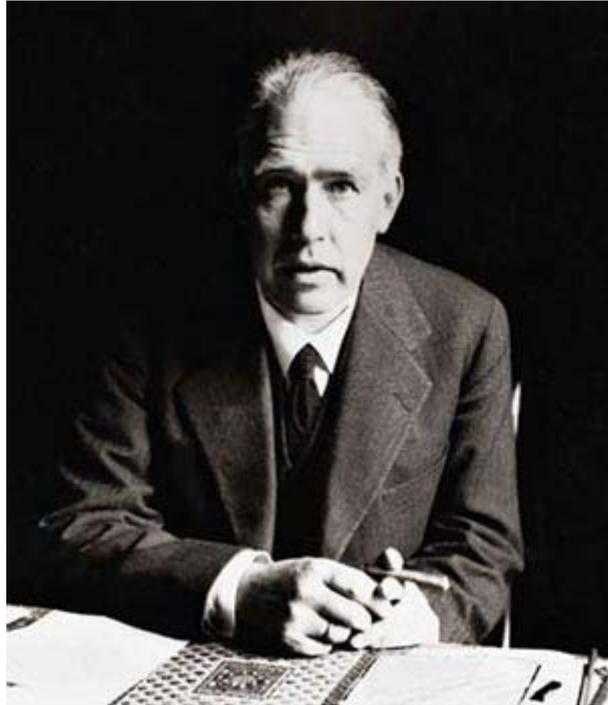
fundamentales en radiactividad, que culminaron en 1911 con el descubrimiento de que la masa atómica está concentrada en un núcleo de extensión muy pequeña, del orden de 100.000 veces menor que la del átomo. Fue el nacimiento de la física nuclear. El modelo atómico de Rutherford consistía en electrones girando alrededor del núcleo, a semejanza de los planetas en torno del Sol, pero no decía nada de la estabilidad ni del tamaño del átomo. Para la física clásica los electrones debían perder rápidamente energía por emisión de radiación y precipitarse hacia el núcleo. Tampoco se cumplía la relación que Maxwell había deducido entre la frecuencia de la radiación emitida y la de la órbita del electrón, algo que sí se había verificado experimentalmente en antenas para ondas de radiofrecuencia y las corrientes que las producen.

Otro dato que se sumaba a las consideraciones de la estructura atómica era el aportado, en 1885, por el matemático suizo Johann Balmer (1825-1898). Este había encontrado que las cuatro frecuencias que emitían los átomos de hidrógeno, y que habían sido medidas por el sueco Anders Ångström (1814-1874), seguían una relación proporcional a la diferencia de los inversos cuadrados de dos números naturales. Como alguna vez dijo el mismo Bohr, estas regularidades del espectro del hidrógeno eran consideradas como los dibujos en las alas de las mariposas: su belleza podía ser admirada, pero no se suponía que podían revelar ninguna ley biológica fundamental.

Al concluir su estadía de tres meses en Manchester, Bohr volvió a Dinamarca. Durante el otoño del 1912 desarrolló ideas acerca de la estructura de los átomos en su estado fundamental y en febrero de 1913, casi treinta años después de su publicación, tomó conocimiento de la expresión de Balmer. Era lo que le faltaba para completar su modelo. El aporte de Bohr fue considerar al electrón en el átomo moviéndose a distancias fijas del núcleo sin perder energía mediante radiación. Se mantiene en 'estados estacionarios' determinados por la condición de que la energía cinética del electrón esté cuantificada, como lo habían hecho Planck y Einstein para la radiación. Combinando esta condición con reglas simples derivadas de la mecánica de Newton, Bohr obtuvo energías inversamente proporcionales al cuadrado de un número natural, $-R/n^2$ donde 'R' es una constante que se denomina de Rydberg. Declaró estable el estado con $n = 1$, en flagrante contradicción con el electromagnetismo clásico, e inestables los estados excitados con números mayores. El electrón podía caer de un estado con un número alto a otro con un número bajo emitiendo radiación de frecuencia dada por la fórmula de Balmer. Derivó teóricamente un valor para la constante 'R' que concordaba con el valor empírico hallado por Balmer, dentro de la incertidumbre de los valores de la carga del electrón y de la constante de Planck conocidos entonces. También aparecía por primera vez en física la idea de un número cuántico.

El trabajo de Bohr sirvió también para reconciliar la discrepancia entre la fórmula de Balmer y la frecuencia clásica de la radiación emitida. Cuando el número cuántico se hace muy grande, los períodos de dos órbitas consecutivas tienden a un valor común que está de acuerdo con la frecuencia asociada a la transición de una órbita a la otra. Aunque los mecanismos fuesen distintos, los resultados de la teoría de Bohr tienden a los de la física clásica; se dice que *se corresponden* con los de la física clásica. El principio de correspondencia constituyó para Bohr la esencia de la cuántica y él dedicó muchas horas de su vida para reformularlo y perfeccionarlo.

Este fue el primer triunfo de la mecánica cuántica. En menos de un mes Bohr desarrolló la primera parte de su obra fundamental, que envió a Rutherford para su publicación. En la respuesta, Rutherford criticó la longitud del trabajo y se ofreció para reducirla a la mitad. Asustado, Bohr tomó el primer barco para Inglaterra y consiguió, después de horas de discusión, salvar todos sus argumentos, excepto por los cambios lingüísticos. El trabajo apareció en la revista especializada *Philosophical Magazine* en 1913. Bohr desarrolló la segunda y la tercera parte de su trabajo durante la primavera y el verano de 1913. Aplicó su teoría a átomos más complicados y a moléculas, con éxitos y fracasos.



Niels Bohr en la década de 1930.

A diferencia de lo sucedido con la hipótesis fundamental de Einstein, ya a partir de 1913 hubo importantes verificaciones experimentales del modelo:

1) Para el caso de un solo electrón moviéndose alrededor de un núcleo de carga Z , la energía debe multiplicarse por Z^2 . Bohr sugirió que muchas líneas atribuidas al hidrógeno, con $Z = 1$, correspondían en realidad al helio ionizado que tiene $Z = 2$. El astrónomo inglés Alfred Fowler (1868-1940) había medido esas líneas en su laboratorio de Londres y señaló que, experimentalmente, el cociente entre helio e hidrógeno era de 4,0016 y no de 4, como la teoría predecía. Bohr contestó que si se toma en cuenta que la masa del núcleo no es infinita respecto de la del electrón, es decir, si se usa la masa reducida del electrón, el cociente de las líneas correspondientes toma el valor 4,00163. Se predecía así por primera vez en espectroscopia atómica un resultado con cinco cifras significativas.

2) En el otoño de 1913, el inglés Henry GJ Moseley (1887-1915) midió sistemáticamente frecuencias de rayos X secundarios asociados a las primeras frecuencias de la fórmula de Balmer. Multiplicó la energía por el factor $(Z-1)^2$, que se justifica porque la órbita con $n = 1$ admite 2 electrones. No solo pudo reordenar los elementos conocidos de la tabla periódica, sino que también predijo los que faltaba descubrir (por ejemplo, el hafnio, Hf).

3) En 1914 los alemanes J Franck (1882-1964) y GL Hertz (1887-1975) proporcionaron otra confirmación del modelo al bombardear átomos de mercurio con electrones. Estos pierden en la colisión una energía de 4,9 eV (eV es una unidad de energía denominada electrón-Volt) y el sistema emite radiación ultravioleta de exactamente la misma energía. Bohr interpretó que el electrón incidente promueve al electrón exterior del átomo de mercurio a la órbita siguiente, y este vuelve a la inicial emitiendo radiación de acuerdo con el modelo. La explicación recién fue aceptada por los dos experimentalistas en 1919.

Bohr se refería con humor a estas verificaciones contando que un visitante, al ver una herradura colgada encima de la puerta, preguntó si él (Bohr) realmente creía que traía buena suerte. La respuesta fue: *Por supuesto que no, pero me dijeron que funciona, incluso si uno no cree en ello.* El modelo partía de una inconsistencia

al suponer la validez simultánea de la física clásica y de la cuantificación de la energía cinética; ambas se contradecían entre sí. Bohr siempre fue consciente de esta contradicción. En su conferencia ante la Sociedad Científica Danesa de diciembre de 1913, reconoció *el conflicto entre estas consideraciones y el admirablemente coherente grupo de conceptos correctamente llamados teoría clásica de la electrodinámica*.

En 1914 el físico alemán Arnold Sommerfeld (1868-1951) incluyó efectos relativísticos y órbitas elípticas en el modelo. Bohr recibió con entusiasmo los trabajos de Sommerfeld, que predecían el desdoblamiento de las líneas, medido poco tiempo antes por el alemán Friedrich Paschen (1865-1947) en el helio ionizado. También un coterráneo de este, Johannes Stark (1874-1957), había descubierto en 1913 el desdoblamiento de las líneas emitidas por un átomo de hidrógeno sometido a un campo eléctrico.

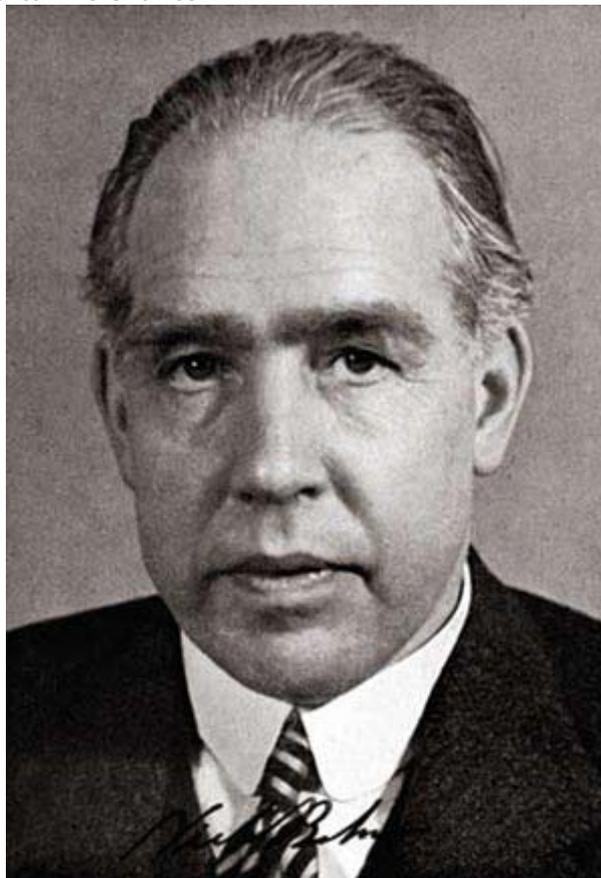


Copenhague, 1957, en los jardines de la casa de Niels Bohr, de izquierda a derecha: Lev Abramovich Sliv, físico soviético (1911-1983); Niels Bohr, el protagonista de esta nota; Åge Bohr (1922-2009), hijo de Niels y premio Nobel de física 1975; Ben Mottelson (1926), físico norteamericano nacionalizado danés y premio Nobel de física 1975 compartido con Åge Bohr; el doctor Kumar y su esposa, ambos de la India; la esposa de VM Strutinsky, físico soviético (1926-1993); L Picman, físico matemático yugoslavo; Spartak Belyaev (1923), físico soviético y premio Feenberg 2004; el autor de este artículo y Susumu Kamefuchi, físico japonés (1928).

Durante la década siguiente a 1913 se fueron acumulando éxitos y dificultades con el modelo. Por ejemplo, el espectro del helio resultó intratable, a pesar de los heroicos esfuerzos para entenderlo realizados por científicos como el holandés Hans Kramers (1894-1952), el alemán Werner Heisenberg (1901-1976) y otros. Hubo que introducir además conceptos nuevos e importantes que fueron apareciendo, como el número de electrones con un mismo número cuántico 'n', más números cuánticos, el 'spin' que definía el tipo de partícula (si se trataba de un fermión o un bosón), el principio de exclusión de Pauli y las estadísticas asociadas. Todo esto

llevó a la etapa siguiente de la cuántica, la que va de 1925 a 1928, con las formulaciones de Heisenberg, de Erwin Schrödinger (austríaco, 1887-1961) y del inglés Paul Dirac (1902-1984). Curiosamente, estas formulaciones también predijeron la validez del espectro $-R/n^2$ anticipado por Bohr sobre la base de un solo número cuántico principal 'n', pero solamente para campos potenciales que fuesen inversamente proporcionales con la distancia. Probablemente no hubiera existido fórmula de Balmer ni modelo de Bohr si el potencial del núcleo hubiese tenido otra dependencia radial.

En 1920 se creó el Instituto que hoy lleva el nombre de Niels Bohr, dependiente de la Universidad de Copenhague. Allí trabajaron muchos físicos cuyos nombres están asociados a publicaciones fundamentales de la mecánica cuántica. El nombre de Bohr no figura en la lista. Pero es testimonio unánime de los que participaron de esta *gran aventura del pensamiento* que fue Bohr quien guió y profundizó rumbos (a veces, equivocándose). Para ello no necesitó escribir fórmulas mucho más complicadas que las sencillas a las que nos hemos referido. Insistió en comprender las implicaciones filosóficas de la nueva física, usando como herramientas fundamentales las palabras, que constantemente luchaba para definir en forma precisa. Este legado es necesario para comprender la mecánica cuántica, pero no para calcular con ella. Debido a esto muchos físicos ignoran hoy que Bohr constituyó una figura tan relevante.



Fotografía firmada de Niels Bohr tomada hacia 1950

Durante la década de 1950 Bohr abrió su Instituto (todavía entonces centro mundial de la física teórica) para que allí se conocieran y trabajaran juntos físicos de uno y otro lado de la cortina de hierro. Posiblemente quiso incluir a algunos representantes del sur, y a eso se debió que yo fuese admitido en 1956. Allí trabajé junto a Åge Bohr y a Ben Mottelson. Para Bohr padre, esta fue la época de la serenidad y de la pipa. Conservo el recuerdo de las reuniones en su casa de Carlsberg en las cuales los visitantes terminábamos sentados en un círculo

alrededor de él. Recuerdo su conversación a la vez profunda y llena de humor, durante la cual se apagaba –y volvía a prender– innumerables veces la misma pipa.

Termino haciendo mío un párrafo del celebrado físico e historiador holandés-norteamericano de la ciencia Abraham Pais (1918-2000), autor de las biografías más profundas, tanto sobre Einstein como sobre Bohr: *Bohr, completamente consciente de que estos conceptos posiblemente no podrían ser descriptos en términos de la física clásica pero que, sin embargo, era esencial establecer una conexión entre la física clásica y la cuántica, dio la primera orientación firme y duradera hacia un entendimiento de la estructura atómica y de la dinámica atómica. En este sentido puede ser considerado el padre del átomo.*

Lecturas Sugeridas

MOORE R, 1966, Niels Bohr. The Man, His Science & the World They Changed, Alfred A Knopf, Nueva York

PAIS A 1991, 'Niels Bohr's Times In Physics, Philosophy and Polity, Clarendon Press, Oxford

ROZENTAL S(ed.), 1967, Niels Bohr. His life and work as seen by his friends and colleagues, North-Holland, Amsterdam.



Daniel R. Bes

Doctor en ciencias físicas, UBA. Doctor honoris causa, UNSAM y Universidad Favaloro. Investigador emérito, CNEA.
bes@tandar.cnea.gov.ar

**Artículo publicado en la revista Ciencia Hoy,
vol 23, nº 134-agosto-sept 2013
Asociación Civil Ciencia Hoy
<http://rch.retina.ar>**