



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### Bohr, o Modelo Atômico, a Experiência de Franck-Hertz e os Princípios da Correspondência e da Complementaridade.

O **Modelo Atômico** proposto pelo físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922), em 1913 e em três artigos (*Philosophical Magazine* **26**, p. 1; 476; 857), é baseado em dois postulados:

*Primeiro* – A energia ( $W$ ) de cada elétron em uma configuração estacionária é dada por  $W = \omega \tau h/2$ , onde  $\omega$  é a frequência de revolução (angular) do elétron,  $\tau$  é um número inteiro, e  $h$  é a **constante de Planck**;

*Segundo* – A passagem dos sistemas entre diferentes estacionários é seguida pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre a sua frequência ( $\nu$ ) e a quantidade de energia emitida ( $W_k - W_s$ ) é dada por:  $W_k - W_s = h \nu$ .

De posse desses dois postulados (vide verbete nesta série) e apresentados em seu primeiro artigo (julho de 1913), Bohr então passou a deduzir a fórmula empírica de **Balmer-Rydberg-Schuster** (1885/1890/1896) [ $1/\lambda = \nu/c = R(1/\tau_2^2 - 1/\tau_1^2)$ , sendo  $\tau_1 = \tau_2 + 1$ ,  $\tau_2 + 2$  – e  $c$  a velocidade da luz no vácuo], com a **constante de Rydberg**  $R$ , usada pelos espectroscopistas, escrita em termos da massa de repouso  $m$  e da carga elétrica  $e$  do elétron, de  $h$  e da carga  $E$  do núcleo (número atômico) Rutherfordiano ( $R = 2\pi^2 m e^2 E^2 / c h^3$ ). Para a energia  $W$  e o raio ( $a$ ) das órbitas dos elétrons, Bohr obteve, respectivamente, os seguintes valores:  $W = (2 \pi^2 m e^2) E^2 / (\tau^2 h^2)$  e  $2 a = [h^2 / (2 \pi^2 m e)] (\tau^2 / E)$ . Registre-se que todas essas expressões estão no sistema CGS.

Usando as expressões acima para o átomo de hidrogênio ( $E = e$ ), Bohr observou que havia um bom acordo entre o seu modelo e alguns resultados experimentais conhecidos. Assim, usando o valor de  $e$  medido pelo físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953; PNF, 1923), em 1912 (*Transactions of the American Electrochemical Society* **21**, p. 185), o valor de  $e/m$  medido pelo físico alemão Alfred Heinrich Bucherer (1863-1927), também em 1912 (*Annalen der Physik* **37**, p. 597), e o valor de  $h$  proposto pelo físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918), em 1900, Bohr obteve os seguintes resultados. 1) raio da primeira órbita ( $\tau = 1$ ) – o **raio de Bohr** –  $a_0 = h^2 / (4 \pi^2 m e^2) = 1,1 \times 10^{-8}$  cm; 2)  $c R_1 = 3,10 \times 10^{15} s^{-1}$ , sendo o valor experimental usado pelos espectroscopistas dado por:  $c R_1 = 3,29 \times 10^{15} s^{-1}$ ; logo depois, usando o valor experimental de  $h$  medido, em 1913 (*Annalen der Physik* **40**, p. 611), pelos físicos alemães Emil Gabriel Warburg (1846-1931), G. Leitnäuser, E. Hupka e C. Müller, Bohr obteve o seguinte valor:  $c R_1 = 3,26 \times 10^{15} s^{-1}$ ; 3) energia da primeira órbita -  $W_0/c = (2 \pi^2 m e^3 / h^2) = 13$  volt.

Além do mais, Bohr observou que se na expressão que deduzira para a frequência  $\nu$  se fizesse  $\tau_2 = 2$ , ela reproduziria a **série de Balmer** (1885); para  $\tau_2 = 3$ , teríamos a **série de**

**Paschen** (1908). Afirmou mais ainda que: Se  $\tau_2 = 1$  e  $\tau_2 = 4,5, \dots$ , obteremos séries situadas, respectivamente, no extremo ultravioleta e no extremo infravermelho, ainda não observadas mas cuja existência deve esperar-se. É oportuno registrar que tais séries foram encontradas, respectivamente: **série de Lyman** (1914), **série de Brackett** (1922) e **série de Pfund** (1924). Além da previsão dessas novas séries espectrais, Bohr resolveu ainda a polêmica que havia sobre a **série de Pickering** (1896)- **Fowler** (1912) ao mostrar, por intermédio da expressão que deduzira para  $1/\lambda$  (ver expressão acima), que tal série era devido ao hélio ionizado ( $\text{He}^+$ ), uma vez que a mesma poderia ser obtida fazendo  $E = 2$  e nessa expressão (vide verbete nesta série).

É interessante notar que, ainda no primeiro artigo de sua trilogia, além das demonstrações indicadas acima, Bohr também demonstrou que, se o momento angular ( $M$ ) de um elétron em movimento circular (de raio  $a$ ) em torno do núcleo de um átomo, tivesse o valor dado por  $M = r M_0$ , com  $M_0 = h/2\pi = 1,04 \times 10^{-27}$  erg.s, a energia desse elétron seria estacionária, isto é, o elétron estaria em um **estado quântico** de energia bem definido. Aliás, registre-se que a “quantização do momento angular” já havia sido sugerida pelo físico inglês John William Nicholson (1881-1955), em 1912 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **72**, pgs. 49; 139; 677; 693; 729), em seus trabalhos nos quais desenvolveu seu modelo atômico “tipo saturniano”, isto é: um caroço central carregado positivamente rodeado de anéis eletrônicos.

Uma das primeiras confirmações experimentais do **modelo atômico de Bohr** foi conseguida por intermédio da experiência realizada pelos físicos alemães James Franck (1882-1964; PNF, 1925) e Gustav Ludwig Hertz (1887-1975; PNF, 1925) [sobrinho do famoso físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), que havia obtido, em 1887, as hoje famosas “ondas Hertzianas” – microondas]. Vejamos como isso aconteceu. Desde 1911, esses físicos realizavam experiências sobre descargas elétricas nos gases, procurando uma relação entre a Teoria Quântica de Planck e o potencial de ionização dos gases utilizados. Esse potencial representava a diferença de potencial ( $V$ ) que devia ser aplicada aos raios catódicos (elétrons) com o objetivo de ionizar, por colisão, os átomos dos gases considerados. Até 1913, eles haviam conseguido medir os potenciais de ionização de diversos gases [hidrogênio (H), hélio (He), neon (Ne), oxigênio (O) etc.], usando aquela técnica. No entanto, em 1914 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft* **16**, pgs. 457; 512), eles encontraram um resultado surpreendente, comunicado por Hertz na reunião da *Sociedade Alemã de Física* realizada no dia 24 de abril de 1914. Tal resultado deveu-se ao seguinte.

A experiência que Franck e Hertz realizaram relacionava-se com o estudo da colisão de elétrons com vapor de mercúrio (Hg) à pressão de cerca de 1 mm de Hg. Por intermédio de um amperímetro, eles mediram a corrente elétrica do anodo [folha cilíndrica de platina (Pt)] em função do potencial acelerador aplicado ao catodo (fio de platina incandescente). Com isso, eles estudaram a velocidade ( $v$ ) dos elétrons (de massa  $m$  e carga  $e$ ) antes e depois da colisão com os átomos de Hg, por intermédio da expressão:  $m v^2 / 2 = e V$ . Observaram, então, que a corrente elétrica aumentava com o potencial ( $V$ ) até quando este atingia o valor aproximado de 4,9 V (Volts), caindo a corrente rapidamente após aquele valor do potencial. No entanto, à medida que o potencial crescia novamente, a corrente voltava também a crescer até quando o potencial atingisse o valor aproximado do dobro do valor anterior (9,8 V), quando de novo a corrente caía de maneira brusca. Esse comportamento corrente *versus* potencial repetia-se sempre que o potencial fosse um múltiplo em torno de 4,9 V, indicando que o elétron poderia sofrer mais de uma colisão inelástica com o vapor de Hg. Esses valores críticos do potencial eram acompanhados pela emissão de luz de comprimento de onda de 2.536 Å. Franck e Hertz encontraram um comportamento similar,

embora menos pronunciado, quando substituíram o vapor de Hg por He, sendo o potencial crítico deste em torno de 21 V.

Para interpretar tais resultados, Franck e Hertz utilizaram as idéias apresentadas pelo físico alemão Johannes Stark (1874-1957; PNF, 1919) sobre a origem das séries espectrais. Em 1908 (*Physikalische Zeitschrift* **9**, p. 85), Stark propôs um modelo segundo o qual as séries espectrais se relacionavam com o processo de ionização de átomos e moléculas, e que sua frequência ( $\nu$ ) era ligada ao potencial de ionização (V) através da expressão:  $h\nu = eV$ . Portanto, para Franck e Hertz, logo que a energia cinética do elétron ( $\frac{1}{2}mv^2 = h\nu$ ) atingia a energia potencial crítica (eV), uma parte dela era usada na ionização e a outra era emitida como luz de frequência  $\nu$ . Com esse procedimento, eles chegaram a obter o valor de  $h = 6,59 \times 10^{-27}$  erg.s, em bom acordo com os valores experimentais até então conhecidos.

Apesar de o físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), em maio de 1914, em carta que escreveu a seu amigo o físico austríaco Paul Ehrenfest (1880-1933), admitir que a **experiência de Franck-Hertz** confirmava o modelo atômico Bohriano, os autores dessa experiência continuavam a acreditar que os potenciais (V) críticos observados referiam-se a potenciais de ionização. Em 1915 (*Philosophical Magazine* **30**, p. 394), Bohr interpretou essa experiência com o seu modelo atômico. Assim, para Bohr, a energia potencial (eV) crítica correspondia à diferença de energia entre os estados estacionários do átomo neutro, e a emissão da luz observada naquela experiência devia-se ao retorno do elétron orbital em estados estacionários mais energéticos, os quais ele atingia devido à colisão com os raios catódicos, a estados menos energéticos. Apesar dessa explicação, novas experiências realizadas por Franck e Hertz, em 1916, ainda foram por eles interpretadas da mesma maneira como a de 1914. Somente em 1919 (*Physikalische Zeitschrift* **20**, p. 132), Franck e Hertz aceitaram a explicação de Bohr.

Vejam, agora, os Princípios da Correspondência e da Complementariedade formulados por Bohr. A primeira idéia sobre o **Princípio da Correspondência** foi apresentada por Bohr em seu primeiro artigo da trilogia de 1913. Com efeito, ao examinar a expressão que ele havia deduzido para a frequência  $\nu$  [ $\nu = cR(1/r_2^2 - 1/r_1^2)$ ], ele escreveu [vide B. L. van der Waerden, **Sources of Quantum Mechanics** (Dover, 1968)]: *A frequência da radiação emitida durante a passagem de um sistema entre estados estacionários sucessivos coincidirá com a frequência de revolução do elétron na região de baixas vibrações*. No entanto, somente em 1918 (*Køngelige Danske Videnskabernes Selskab Skrifter* **4**, p. 1), ele usou novamente o “argumento da correspondência”, segundo o qual o comportamento quântico dos átomos se funde com o comportamento clássico no limite dos números quânticos muito grandes. Note-se que Bohr usou esse “argumento” para demonstrar a **regra de seleção** entre as transições eletrônicas orbitais (em notação atual):  $\Delta m = 0 \text{ ou } \pm 1$ , onde  $m$  é o **número quântico magnético**, e representa a projeção do **número quântico orbital** ( $l$ ) na direção do campo magnético externo. Aliás, essa mesma regra havia sido obtida independentemente pelo físico polonês Adalbert Rubinowicz (1889-1974), também em 1918 (*Physikalische Zeitschrift* **19**, p. 441; 465). Contudo, o nome **Princípio da Correspondência** (“Korrespondenzprinzip”) só foi assumido por Bohr, em 1920 (*Zeitschrift für Physik* **2**, p. 423), em trabalho no qual estudou as séries espectrais dos elementos. Mais tarde, em 1923 (*Proceedings of the Physics Society of London* **35**, p. 275; *Physikalische Zeitschrift* **13**, p. 117), ele voltou a usar esse princípio, em sua discussão sobre os princípios fundamentais da Teoria Quântica.

O **Princípio da Complementariedade** foi apresentado por Bohr, pela primeira vez, no *Congresso Internacional de Física*, realizado em Como, na Itália, em 16 de setembro de 1927 (*Atti del Congresso Internazionale dei Fisici*), por ocasião das comemorações do centenário de morte do grande físico italiano, Alessandro Giuseppe Volta (1745-1827). Entre

1923 e 1924, o físico francês, o Príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987; PNF, 1929) formulou sua hipótese da “dualidade onda-partícula do elétron” (vide verbete nesta série), hipótese essa que era motivo de muita discussão entre os físicos, devido ao caráter dúbio que ela aparentava representar. Para contornar essa dubiedade, Bohr apresentou, naquele Congresso, o seguinte princípio: *Os modelos corpuscular e ondulatório são complementares; se uma medida prova o caráter ondulatório da radiação eletromagnética ou da matéria, então é impossível provar o caráter corpuscular na mesma medida, e vice-versa.*

Note-se que a proposta de Bohr sobre a complementaridade e apresentada em Como, em 1927, conforme registramos acima, foi publicada em 1928 (*Nature* **121**, pgs. 78; 580; *Naturwissenschaften* **16**, p. 245). Logo depois, em 1929 (*Naturwissenschaften* **17**, p. 483, Bohr voltou a tratar desse mesmo tema. Mais tarde, em 1946 (*Mathematik Tidsskrift B*, p. 163), 1948 (*Dialectica* **2**, p. 312; *Proceedings of the 8th Solvay Conference*, p. 9) e 1949 [In: P. Schilpp (Editor), **Albert Einstein: Philosopher-Scientist** (Tudor)], Bohr apresentou uma discussão epistemológica sobre esse princípio, bem como sua possível aplicação em outras ciências, principalmente a Biologia.

É oportuno registrar que o leitor poderá encontrar mais detalhes sobre os temas discutidos neste verbete, assim como sobre a vida de Bohr, nos seguintes textos: Maria Cristina Batoni Abdalla, **Bohr: O Arquiteto do Átomo** (Odysseus, 2002); Niels Bohr, **Física Atômica e Conhecimento Humano** (Contraponto, 1995); Abraham Pais, **Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity** (Clarendon Press, 1991); e Nadia Robotti, **II Primi Modelli dell'Atomo: Dall'Elletrone all'Atomo di Bohr** (Loescher, 1978).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)