



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



O Modelo Atômico de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld.

Os grandes êxitos do modelo quântico do átomo formulado pelo físico dinamarquês Niels Hendrik Bohr (1885-1962; PNF, 1922), em 1913 (*Philosophical Magazine* 26, p. 1; 476; 857), foram: a estabilização da eletrosfera do modelo "planetário" atômico proposto pelo físico neozelandês Barão Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908), de 1911 (*Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* 55, p. 18; *Philosophical Magazine* 5; 21, p. 576; 669); a dedução da fórmula empírica de **Balmer-Rydberg** (1885/1890) [$\nu = cR(1/n^2 - 1/m^2)$, com $m=n+1, n+2, \dots$], com a **constante de Rydberg** R , usada pelos espectroscopistas, escrita em termos da massa de repouso m e da carga elétrica e do elétron, da **constante de Planck** h e da carga Z do núcleo (número atômico) Rutherfordiano ($R = 2\pi^2 me^4 Z^2 / c h^3$); e a obtenção da expressão para a energia E [em elétronvolts (eV): $E = -13.6 / n^2$, com $n = 1, 2, \dots$] dos elétrons em suas órbitas circulares.

Apesar dos êxitos descritos acima, o modelo Bohriano não foi capaz de explicar alguns resultados experimentais então conhecidos. Dentre eles, encontravam-se: as **séries de Pickering**, registradas no trabalho escrito em 1896 (*Astrophysical Journal* 4, p. 369), pelo físico e astrônomo norte-americano Edward Charles Pickering (1846-1919), no qual descreveu as experiências que realizou com o espectro de raios de algumas estrelas, entre elas a ϕ - Puppis, raios essas que apresentavam um aspecto curioso: elas praticamente coincidiam com as **séries de Balmer**, apenas de maneira alternada, isto é, a primeira série de Balmer (H_α) praticamente coincidia com a primeira série de Pickering, no entanto a segunda de Balmer (H_β) só correspondia à terceira de Pickering, e assim sucessivamente [registre-se que essas séries foram redescobertas pelo físico inglês Alfred Fowler (1868-1940), em 1912 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 73, p. 62), usando uma mistura de hidrogênio (H) com hélio (He)]; a separação ("split") das linhas espectrais ópticas do hidrogênio (H), quer pelo uso de espectroscópios de alta resolução - a chamada **estrutura fina** -, como observado pelo físico germano-norte-americano Albert Abraham Michelson (1852-1931; PNF, 1907) e pelo químico e físico norte-americano Edward Williams Morley (1838-1923), em 1887 (*Philosophical Magazine* 24, p. 463); quer pela ação de um campo magnético, como foi percebido pelo físico holandês Pieter Zeeman (1865-1943; PNF, 1902) em 1896 (*Verhandlungen der Physikalische Gesellschaft zu Berlin* 7, p. 128) - o conhecido **efeito Zeeman** -, ou então pela ação de um campo elétrico, observação essa realizada pelo físico alemão Johannes Stark (1874-1957; PNF, 1919) em 1913 (*Sitzungsberichte Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin* 40, p. 932) - o denominado **efeito Stark**. Acrescido a isso tudo, existia a limitação das órbitas circulares do modelo Bohriano.

Em vista das dificuldades do modelo Bohriano apontadas acima, algumas modificações foram então consideradas para contorná-las. Assim, em 1915 (*Philosophical Magazine* 29; 30, p. 332; 394), o próprio Bohr introduziu correções relativísticas à massa do elétron para poder explicar a "estrutura fina" do H. Nesse mesmo ano de 1915, os físicos, o alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) (*Sitzungsberichte Bayerischen Akademie Wissenschaften zu München*, p. 425), o japonês Jun Ishiwara (1881-1947) (*Tokyo Sugaku Buturi-gakkakiwi Kizi* 8, p. 106), e o inglês William Wilson (1875-1965) (*Philosophical Magazine* 29, p. 795), apresentaram uma extensão do modelo Bohriano a mais um grau de liberdade dos elétrons em suas órbitas. Essa extensão, que ficou conhecida como o **modelo de Bohr-Ishiwara-Wilson-**

Sommerfeld é traduzida pela **regra de quantização**: $\oint p_i dq_i = n_i h$, onde q_i e p_i são, respectivamente, as coordenadas e os momentos canonicamente conjugados dos elétrons, n_i são números inteiros positivos, i são os graus de liberdade dos movimentos elípticos eletrônicos, e a integral se estende aos períodos correspondentes às coordenadas.

Ainda em 1915 (*Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München*, p. 459), Sommerfeld formulou uma teoria relativista de átomos de um-elétron, obtendo a seguinte expressão para a energia (W) do elétron em sua órbita:

$$W = -\frac{Z^2 R h}{n^2} \left[1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{n} \left(\frac{1}{4} + \frac{n_\phi}{n_r} \right) + \dots \right],$$

onde $n = n_r + n_\phi$, sendo n_r e n_ϕ , respectivamente, os números quânticos **radial** e **azimutal**, $n_r / n = b / a$, sendo a e b , respectivamente, os eixos maior e menor da órbita elíptica do elétron. Aliás, foi a partir desse artigo que α recebeu a denominação de constante de estrutura fina porque a expressão acima permitia explicar alguns resultados experimentais relacionados com a estrutura fina das linhas espectrais do hidrogênio, observada por Michelson e Morley, e do hélio (**série de Pickering-Fowler**), conforme já registramos. Note-se que Bohr já havia demonstrado, em seu famoso trabalho de 1913, que essa série era devida ao hélio ionizado, pois bastaria fazer $Z=2$ na expressão que deduziu para R, para explicar a alternância dessa série com a de Balmer.

Em 1916, o físico russo-norte-americano Paul Sophus Epstein (1883-1966) (*Physikalische Zeitschrift* 17, p. 148; 313; *Annalen der Physik* 50, p. 489) e o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) (*Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, p. 548), em trabalhos independentes, apresentaram uma explicação do efeito Stark usando os resultados do **modelo de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld**. Ainda em 1916 e usando esses mesmos resultados, o físico e químico holandês Petrus Joseph Wilhelm Debye (1884-1966; PNQ, 1936) (*Physikalische Zeitschrift* 17, p. 507; *Nachrichten Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, p. 142) e Sommerfeld (*Physikalische Zeitschrift* 17, p. 491; *Annales de Physique Leipzig* 51, p. 1; 125), em trabalhos independentes, explicaram o efeito Zeeman. É interessante registrar que, nesses trabalhos, Sommerfeld propôs um terceiro número quântico m , posteriormente conhecido como **número quântico espacial**, ao lado dos números quânticos n_r e n_ϕ que havia proposto em 1915. Esse novo número quântico determinava a posição das órbitas do elétron em relação à direção do campo magnético \mathbf{H} , e de tal modo que o co-seno do ângulo θ entre a direção desse campo e a normal do plano da órbita era dado por: $\cos \theta = m / n_\phi$. Ora, como m e n_ϕ são números inteiros, os valores discretos assumidos por θ indicavam que os planos das órbitas eram quantizados, fato esse que ficou conhecido como **princípio da quantização do espaço**.