



SEARA DA CIÊNCIA

CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



Os Primeiros Modelos Atômicos Clássicos.

Em verbete desta série, falamos do **modelo atômico quântico de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld**. Neste verbete, falaremos dos modelos clássicos atômicos que foram desenvolvidos antes do modelo quântico referido acima. Registre-se que, para maiores informações sobre esses modelos clássicos, ver: Sir Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951); **The Modern Theories (1900-1926)** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1953); Jadish Mehra e Helmut Rechenberg, **The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1** (Springer Verlag, 1982); Abraham Pais, **Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World** (Oxford University Press, 1995); José Maria Filardo Bassalo, **Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais** [F. Caruso & A. Santoro (Editores), CBPF, 2000]; Francisco Caruso e Vítor Oguri, **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos** (Campus, 2006), e Marcos Roberto Alves Nogueira, **De Átomos a Cordas** (TTC/DFUFPA, 2007).

Muito embora os filósofos gregos, Leucipo de Mileto (c.460-c.370) e seu discípulo Demócrito de Abdera (c.470-c.380), hajam proposto a idéia de **átomo** como componente último da matéria, por volta de 400 a. C., a primeira tentativa de apresentar um modelo para explicar esse “elemento eterno, indivisível e imperecível” dos gregos antigos, foi apresentada pelo físico francês André Marie Ampère (1775-1836), em 1814 (*Annales de Chimie* **90**, p. 43), ao supor que os átomos eram constituídos de partículas menores (subatômicas), que giravam em torno de um centro, constituindo as famosas “correntes Amperianas”. Com essa idéia, Ampère pretendia explicar o elemento químico proposto pelo físico e químico inglês Robert Boyle (1627-1691), em 1661. Mais tarde, em 1828, o físico e filósofo alemão Gustav Theodor Fechner (1801-1887) propôs que o “átomo” consistia de uma parte central massiva que atraía gravitacionalmente uma nuvem de partículas quase imponderáveis.

Um primeiro modelo eletrodinâmico para o átomo foi proposto pelo físico alemão Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) como consequência de suas pesquisas sobre o eletromagnetismo. Com efeito, em 1862 (*Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathematische Klasse* **10**, p.3) e 1871 (*Gesellschaft der Wissenschaften, mathematische-physische Klasse* **10**, p.1), ele apresentou uma modificação do “átomo” Fechneriano ao supor que a parte central desse “átomo” era eletrizada com um determinado sinal e que cargas elétricas de sinais opostos orbitavam em torno dessa parte central de acordo com a lei da força que propusera em 1846, na primeira de suas famosas publicações denominadas **Elektrodynamische Maassbestimmungen** (“Medidas Eletrodinâmicas”), lei essa dada pela expressão: $F = (e_1 e_2 / r^2) \{1 - (1/c^2) [(dr/dt)^2 - 2r(d^2r/dt^2)]\}$, onde dr/dt e d^2r/dt^2 representam, respectivamente, a velocidade e a aceleração radiais relativas entre as cargas elétricas e_1 e e_2 , e c é uma constante que expressa a relação entre as unidades eletrostática e eletrodinâmica daquelas cargas. Nessa expressão, o termo dominante $(e_1 e_2 / r^2)$ representa a **força eletrostática Coulombiana**, e os

demais termos modificam essa força na medida em que as cargas elétricas apresentam um movimento relativo.

Usando seu modelo atômico, segundo me informou o físico brasileiro André Koch Torres de Assis (n.1962) (e-mail de 26 de julho de 2007, a quem agradeço nesta oportunidade), Weber chegou a um resultado muito importante, assim descrito por Assis: *Duas cargas de mesmo sinal nem sempre se repelem. Caso estejam muito próximas uma da outra elas podem se atrair! Com isto era possível em seu modelo prever e explicar a estabilidade de um núcleo composto apenas de cargas positivas, com as cargas negativas orbitando ao redor deste núcleo. Ou seja, a força de Weber dá uma explicação natural para as forças nucleares, explicando a estabilidade dos núcleos utilizando apenas uma força eletromagnética clássica!* [Para maiores detalhes sobre a eletrodinâmica de Weber e seu modelo planetário, ver: K. H. Wiederkehr, **Wilhelm Eduard Weber: Erforscher der Wellenbewegung und der Elektrizität** (Stuttgart, 1967); A. K. T. Assis, **Weber's Electrodynamics** (Kluwer, 1994; EDUNICAMP, 1995); A. K. T. Assis and Júlio Akashi Hernandez, **The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges Resistive Conductors Carrying Steady Currents** (Apeiron, 2007).]

A partir de 1880, o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) começou a elaborar um novo modelo atômico eletrodinâmico para a matéria, segundo o qual os “elétrons” (que para ele significava qualquer partícula carregada, positivamente ou negativamente, com ou sem massa) eram distribuídos no interior da matéria e livres de oscilarem com uma certa frequência própria em torno de posições fixas. Esse modelo foi por ele usado para o desenvolvimento de sua Teoria do Elétron, a partir de 1892, e que lhe permitiu explicar a dispersão da luz, bem como prever o **efeito Zeeman** (vide verbete nesta série). No entanto, esse modelo atômico Lorentziano apresentava dificuldade para estudar o espalhamento dos **raios-X** [que haviam sido descobertos em 1895 (vide verbete nesta série)], pela matéria. Para contornar essa dificuldade, o físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), em 1899 (*Philosophical Magazine* **48**, p. 547), começou a desenvolver um modelo para o átomo, considerando-o como composto de um grande número de “corpúsculos” carregados negativamente [“corpúsculos” (mais tarde reconhecidos como elétrons) para os quais que ele havia determinado a relação entre a carga e a massa, em 1897 (vide verbete nesta série)] e “alguma” carga positiva que contrabalançasse a carga negativa total. Logo depois, em 1904 (*Philosophical Magazine* **7**, p. 237), Thomson elaborou um novo modelo atômico para poder explicar aquele espalhamento. Vejamos qual.

Para Thomson, o átomo era considerado como sendo constituído por uma carga elétrica positiva, homoganeamente distribuída na forma de uma esfera de raio da ordem de 1 \AA (10^{-8} cm), e movendo-se no seu interior, em anéis concêntricos, um certo número de elétrons de modo a manter o átomo neutro. Além disso, cada elétron de carga e e massa m era considerado ligado ao centro do átomo e oscilando amortecidamente com frequência angular própria (ω_0), configuração essa que lhe valeu a denominação de “pudim de ameixas”, nome esse que, sendo Caruso e Oguri (op. cit.), é inadequado pois, no “pudim”, o número de ameixas é distribuído aleatoriamente, enquanto no modelo Thomsiano “os elétrons são distribuídos uniformemente em anéis concêntricos para que fossem satisfeitas as condições de estabilidade que assegurassem o equilíbrio, postulando ainda que o número desses anéis fosse mínimo”.

Com esse modelo, Thomson conseguiu explicar o **espalhamento Rayleigh** [apresentado pelo físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904), em 1871 (*Philosophical Magazine* **41**, p. 107) (vide verbete nesta série)], o espalhamento dos **raios-X** pela matéria – logo conhecido como **espalhamento Thomson** -, e o **espalhamento ressonante** que se relaciona com a **luminescência** (vide verbete nesta série). É oportuno registrar que a **seção de choque de espalhamento** (σ_s), que define esses tipos de espalhamento, é calculada relacionando-se a potência média da radiação devida à oscilação amortecida do elétron [obtida

pelo físico inglês Joseph J. Larmor (1857-1942), em 1897 (*Philosophical Magazine* **44**, p. 503)] à intensidade média da radiação incidente de frequência ω [demonstrada pelo físico inglês John Henry Poynting (1852-1914), em 1884 (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **175**, p. 343)]. Sua expressão é dada por:

$$\sigma_s = \frac{32 \pi r_0^2}{3} \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (g \omega)^2}, \quad r_0 = \frac{e^2}{8 \pi \epsilon_0 m c^2},$$

onde r_0 é o **raio clássico do elétron**, ϵ_0 é a **permissividade elétrica do vácuo**, g é o **coeficiente de amortecimento**, e c é a **velocidade da luz no vácuo**. É interessante ressaltar que, segundo a expressão acima, as **seções de choque de espalhamento** para os três tipos de espalhamento referidos acima são dadas por:

$$\sigma_R \cong \frac{32 \pi r_0^2}{3} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^4 \quad (\text{Espalhamento Rayleigh: } \omega \ll \omega_0),$$

$$\sigma_T \cong \frac{32 \pi r_0^2}{3} \quad (\text{Espalhamento Thomson: } \omega \gg \omega_0),$$

$$\sigma_{MR} \cong \frac{\omega_0 r_0}{g} \quad (\text{Espalhamento Ressonante: } \omega \cong \omega_0).$$

Ainda em 1904 (*Nature* **69**, p. 392; *Philosophical Magazine* **7**, p. 445), o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) propôs um modelo atômico, segundo o qual o átomo era formado por uma parte central carregada positivamente e rodeada de anéis de elétrons deslocando-se com a mesma velocidade angular, um sistema semelhante ao planeta Saturno, com seus anéis, razão pela qual esse modelo de Nagaoka ficou conhecido como **modelo saturniano**. Com esse modelo, Nagaoka procurava explicar as raias espectrais, bem como as emissões radioativas: alfa (α) e beta (β). Com efeito, para ele, as oscilações perpendiculares ao plano do movimento dos anéis resultavam no espectro “tipo banda” (contínuo), enquanto as oscilações paralelas àquele plano resultavam num espectro “tipo raia” (discreto). Por outro lado, a quebra de um desses anéis provocava a **emissão (decaimento) beta**. É oportuno notar que a **emissão β** [junto com a **emissão alfa (α)**] havia sido observada pelo físico inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNF, 1908), em 1898, e que em 1899 em trabalhos independentes, os físicos, o francês Antoine Henri Becquerel (1852-1908; PNF, 1903), os austríacos Stefan Meyer (1872-1949) e Egon Ritter von Schweidler (1873-1948), e o alemão Frederick Otto Giesel (1852-1927), observaram a deflexão magnética sofrida por essas partículas. Em 1900, Becquerel mostrou que os raios β eram raios catódicos, isto é, elétrons (sobre essas emissões, vide verbetes nesta série).

É interessante ressaltar que uma primeira idéia de um modelo tipo “saturniano” já havia sido apresentada, em 1901 (*Revue Scientifique* **15**, p. 449), pelo físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926), ao considerar a hipótese de que os elétrons nos átomos se deslocavam

em órbitas em torno de um caroço central com velocidade da ordem das velocidades com que os elétrons são arrancados do alumínio (Al) devido ao **efeito fotoelétrico** (sobre esse efeito, ver verbete nesta série). Se tal ocorresse, observou Perrin, a frequência de revolução dos elétrons era da ordem das frequências ópticas das raias espectrais. Ainda para Perrin, as instabilidades das órbitas eletrônicas de seu modelo eram as responsáveis pelos fenômenos da **radioatividade** e, principalmente, pela **emissão β** .

Uma das grandes dificuldades enfrentadas pelos modelos de Thomson e de Langevin-Nagaoka era o de saber o número de elétrons em cada anel, além, é claro, de explicar a sua estabilidade em virtude da **radiação Larmoniana** (vide verbete nesta série). Antes de esses modelos serem formalmente apresentados, já existia uma dificuldade em conhecer o número de elétrons e de sua correspondente distribuição no interior de um átomo. Por exemplo, em 1902 (*Transactions of the Royal Society of Canada* **8**, p. 79), Rutherford escreveu: *O átomo de hidrogênio (H) é uma estrutura muito complicada constituída, possivelmente, de mil ou mais elétrons*. Ora, como esse elemento é o primeiro da Tabela Periódica, podemos imaginar que a dificuldade aumentava para os demais elementos dessa Tabela. Essa mesma dificuldade foi enfrentada por Thomson ao usar o seu modelo. Apesar de conhecer a radiação Larmoniana e, portanto, que ela levaria ao colapso o seu modelo, Thomson discutiu a estabilidade de seu sistema apenas do ponto de vista dinâmico. Contudo, o número de elétrons do H ainda permanecia um problema para Thomson, conforme se pode ver em seu livro intitulado **Electricity and Matter** (Scribner, 1904), no qual escreveu: *O átomo de hidrogênio contém cerca de mil elétrons*. Entretanto, na segunda edição de seu livro **Conduction of Electricity through Gases** (Cambridge University Press, 1906), Thomson mudou de opinião ao afirmar o seguinte: *O número de elétrons em um átomo situa-se entre 0,2 e 2 vezes o peso atômico de uma substância. Para o hidrogênio esse número não pode diferir muito da unidade*. Aliás, ainda nesse livro, Thomson escreveu: *As linhas espectrais não são devidas às vibrações de corpúsculos (isto é, elétrons) no interior do átomo, mas sim devido às vibrações de corpúsculos em consequência de um campo de forças exterior ao átomo*. É oportuno esclarecer que na distribuição eletrônica de seu modelo, Thomson usou uma analogia com os resultados da experiência realizada pelo físico norte-americano Alfred Marshall Mayer (1836-1897), em 1878 (*American Journal of Science* **15**, p. 276; *Nature* **17**; **18**, pgs. 487; 258), na qual mostrou como pequenos pólos magnéticos se orientam na presença de um campo magnético intenso (Caruso e Oguri, op. cit.).

Contudo, a grande dificuldade do modelo Thomsiano apareceu quando Rutherford e seus colaboradores, os físicos, o alemão Hans (Joahannes) Wilhelm Geiger (1882-1945) e o inglês Ernst Marsden (1889-1970), começaram a estudar o espalhamento de partículas α pela matéria. Com efeito, em 1906 (*Philosophical Magazine* **11**; **12**, pgs. 166; 134), Rutherford apresentou os resultados de experiências nas quais observou um pequeno espalhamento (desvio de aproximadamente 2^0) de partículas α ao passarem através de uma lâmina de mica de 0,003 cm de espessura. Em 1908 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A81**, p. 174), Geiger estudou o espalhamento de um feixe de partículas α , oriundo de um composto de rádio, o brometo de rádio ($RaBr_2$), através de uma lâmina fina de metal [alumínio (Al) e ouro (Au)]. As partículas α espalhadas eram detectadas em contadores de cintilações. Usando essa técnica de contagem, Geiger e Marsden, em 1909 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A82**, p. 495), estudaram o espalhamento de um feixe de partículas α [oriundas do radônio (Rn)], através de uma lâmina fina de metal. Nesse estudo, eles observaram que do feixe, não muito bem colimado e contendo cerca de 8.000 daquelas partículas, apenas uma delas era refletida, ou seja, era espalhada num ângulo $> 90^0$. Este tipo de espalhamento foi também comentado por Geiger, em 1910 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A83**, p. 492). Ainda em 1910 (*Cambridge Literary and Philosophical Society* **15**, part 5, p.456), o próprio Thomson mostrou que seu modelo não explicava os resultados obtidos por Geiger e Marsden.

Em verbete desta série, vimos que, em 1911 (*Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* **55**, p. 18; *Philosophical Magazine* **5**; **21**, p. 576; 669), Rutherford interpretou os resultados das experiências de Geiger e Marsden, propondo seu célebre **modelo planetário do átomo**, decorrente da fórmula que deduziu para o espalhamento de partículas (α ou β) pela matéria – **fórmula do espalhamento de Rutherford** (em notação atual):

$$y = \frac{1}{2} n t \frac{Z^2 (eE)^2 Q}{m^2 u^4 r^2} \operatorname{cosec}^4\left(\frac{\varphi}{2}\right),$$

onde y expressa o número de partículas espalhadas sobre a unidade de área de um anteparo (“screen”) colocado a uma distância r da fonte espalhadora e num ângulo φ medido a partir da direção das partículas incidentes; n e t denotam, respectivamente, o número de átomos na unidade de volume da lâmina alvo e sua espessura; m , u e Q representam, respectivamente, a massa, a velocidade e o número total de partículas incidentes; Z a carga elétrica do núcleo do átomo que compõe a lâmina alvo; E a carga elétrica das partículas incidentes ($E = 2e$, para a α e $E = e$, para a β); sendo e a carga elétrica do elétron. É interessante observar que, para a dedução dessa célebre fórmula, Rutherford contou com a colaboração de seu genro, o matemático inglês Ralph Howard Fowler (1889-1944).

Apesar da formulação desse **modelo planetário Rutherfordiano**, o **modelo saturniano de Langevin-Nagaoka** ainda foi utilizado pelo físico inglês John William Nicholson (1881-1955) em suas pesquisas sobre as raias espectrais cósmicas. Com efeito, em 1911 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **72**, pgs. 49; 139) e em 1912 (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **72**, pgs. 677; 693; 729), ele desenvolveu um novo modelo atômico saturniano. Contudo, para deter a radiação Lamorniana decorrente do movimento dos elétrons em seus anéis, Nicholson considerou nula a soma vetorial das acelerações desses elétrons, e que seus momentos angulares deveria variar discretamente e em quantidades proporcionais à **constante de Planck**. Registre-se que essa hipótese foi demonstrada pelo físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922), em 1913 (vide verbete nesta série).

Com esse novo modelo saturniano, Nicholson explicou que as raias espectrais eram devidas às pequenas vibrações dos anéis eletrônicos dos átomos primários que, em seu entendimento, eram de três tipos: **coronium**, contendo dois elétrons; **hidrogênio**, com três elétrons; e **nebulium**, com quatro elétrons. Para Nicholson, o **hélio** era considerado um elemento composto. Mais tarde, mostrou-se que o **nebulium** nada mais era do que uma mistura metaestável de oxigênio (O) e nitrogênio (N), e que o **coronium** é o ferro (Fe) altamente ionizado.

As dificuldades dos modelos atômicos clássicos analisados neste verbete foram contornadas pelo modelo atômico quântico, desenvolvido a partir dos trabalhos de Bohr, iniciados, em 1913, conforme vimos em verbete desta série, modelo hoje conhecido como **modelo atômico quântico de Bohr-Ishiwara-Wilson-Sommerfeld** ou a **velha Mecânica Quântica**.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)