

AS PARTÍCULAS CONSTITUINTES DO ÁTOMO^(*)

José Maria Filardo Bassalo

A primeira evidência de que o átomo apresentava uma estrutura aparece com a teoria iônica, desenvolvida em 1887, por Svante August Arrhenius (químico e físico sueco, 1859 - 1927; Prêmio Nobel de Química, 1903) para explicar as leis da eletrólise¹ estabelecidas por Michael Faraday (físico e químico inglês, 1791 - 1867) no período 1832 - 1833, depois que o mesmo analisou as experiências realizadas por Humphry Davy (químico inglês, 1778 - 1829) sobre a obtenção dos metais² por intermédio da eletroquímica, ou seja, fazendo passar corrente elétrica através de compostos metálicos. Segundo Arrhenius, os íons que constituíam a corrente elétrica através de uma solução, no fenômeno da eletrólise, nada mais eram do que átomos carregados de eletricidade. Assim, por exemplo, a dissolução do cloreto de sódio na água decorria de seu fracionamento em dois átomos carregados de eletricidade: o íon de Cloro com carga negativa (o cátion Cl^-), e o íon de Sódio com carga positiva (o ânion Na^+).

A descoberta das partículas subatômicas, isto é, as constituintes do átomo, começa com as experiências realizadas em 1897, por Joseph John Thomson (físico inglês, 1856 - 1940; Prêmio Nobel de Física; 1906) (R01) com os raios catódicos³ descobertos por Heinrich Geissler (físico alemão, 1814 - 1879) e Julius Plücker (físico alemão, 1801 - 1868) em 1859.

J.J. Thomson, ao mostrar que os raios catódicos eram defletidos por um campo elétrico e ao determinar a razão entre a carga e a massa deles, chegou à conclusão de que se tratava da unidade de carga elétrica da corrente elétrica - o elétron, que havia sido proposto por George Johnstone Stoney (físico inglês, 1826 - 1911) em 1891, ao calcular a quantidade mínima de carga elétrica, combinando a lei da eletrólise de Faraday e o número de Avogadro. Admitindo Thomson que o elétron era uma das partículas fundamentais da natureza, formulou, em 1904 (R02), uma teoria sobre a estrutura de um átomo e segundo a qual o mesmo era uma esfera carregada positivamente, tendo todos os elétrons, com carga negativa, distribuídos sobre a esfera para torná-la neutra. Seu modelo ficou conhecido como plum-pudding (pudim de ameixas). A carga elétrica e a massa do elétron só seriam definitivamente determinadas por Robert Andrews Millikan (físico norte-

americano, 1863 - 1953; Prêmio Nobel de Física, 1923) em suas célebres experiências realizadas no período 1909 - 1911 (R03).

A existência de partículas carregadas positivamente tinha sido evidenciada na experiência realizada em 1895, por Jean Baptiste Perrin (físico francês, 1870 - 1942; Prêmio Nobel de Física, 1926) ao mostrar que os raios canais⁴ observados por Goldstein em 1886, eram desviados por um campo elétrico em sentido contrário ao dos raios catódicos⁵. Mais tarde, em 1907 (R04), Thomson determinaria a relação entre a carga e a massa dos raios canais, que ele chamaria naquela ocasião de raios positivos. A idéia de que uma partícula positiva era também um constituinte do átomo surgiu com a experiência levada a cabo por Ernest Rutherford (físico inglês, 1871 - 1937); Prêmio Nobel de Química, 1908), em 1911⁶ (R05), por Hans Geiger (físico alemão, 1882 - 1945) em 1910 (R06), por Geiger e Ernest Marsden (físico inglês, 1889 - 1970) em 1909 (R07), e 1913 (R08), a respeito do espalhamento sofrido por partículas alfa em uma lâmina fina de metal. Para explicar o resultado dessas colisões que, às vezes, faziam a partícula alfa voltar para a região de onde tinham partido, Rutherford idealizou um modelo para o átomo segundo o qual esse modelo seria um sistema planetário⁷ em miniatura, tendo um campo de força central carregado positivamente - o núcleo. Os elétrons giravam em torno desse núcleo em órbitas circulares, como primeira aproximação. Estava assim descoberto o núcleo atômico que concentraria, segundo Rutherford, praticamente toda a massa do átomo, ficando os elétrons orbitando em raios da ordem de 10 mil vezes o raio nuclear. Então o átomo ocupa um volume relativamente muito grande quando comparado com o volume nuclear onde se encontra concentrada praticamente toda matéria. Assim, o átomo é praticamente vazio.

As experiências de Thomson sobre os raios positivos provenientes da descarga elétrica em gases ionizados, tais como H^+ , H_2^+ , O^+ , O_2^+ , etc., realizadas no período 1907 - 1913, não só levaram a identificar o próton - o núcleo do Hidrogênio ionizado (H^+) - como uma partícula positiva isolada, bem como evidenciar a existência de isótopos⁸. Em 1913 (R09), Thomson descobriu que íons positivos de Neônio, quando desviados por um campo elétrico, caíam em dois pontos diferentes, como se o gás de Neônio fosse constituído de uma mistura de dois íons, com massas diferentes. O estudo de isótopos prosseguiu com Francis William Aston (químico e físico inglês, 1877 - 1945); Prêmio Nobel de Química, 1922) ao aperfeiçoar a aparelhagem de Thomson, inventando assim, em 1919 (R10), o espectrógrafo de massa.

A produção de prótons foi obtida por Rutherford em 1919 (R11), ao analisar as cintilações que partículas alfa provocavam em um ante

paro de sulfeto de zinco, depois que as mesmas atravessavam um cilindro contendo gases. Observou Rutherford que as cintilações eram provocadas quando no cilindro era colocado Hidrogênio ou Nitrogênio. No caso do cilindro conter Hidrogênio, acreditava Rutherford que as partículas alfa expulsavam o núcleo do Hidrogênio (próton) e este iria, portanto, colidir com o anteparo de sulfeto de zinco. No caso do Nitrogênio, Rutherford acreditava, também, que a partícula alfa arrancava um próton ao núcleo do Nitrogênio, transmutando-o no Oxigênio, segundo a reação: $H_2^+ + N^{14} \rightarrow O^{17} + H^1$, próton esse que provocaria a cintilação no anteparo. Com essa reação, Rutherford começava a concretizar o sonho dos alquimistas - a transmutação dos elementos. Ao repetir a experiência de Rutherford em uma câmara de nuvens⁹, Patrick Maynard Stuart Blackett (físico inglês, 1897 - 1974; Prêmio Nobel de Física, 1948), em 1925 (R12), conseguiu pela primeira vez fotografar a trajetória do próton.

A suspeita da existência de uma partícula neutra como constituinte do núcleo atômico foi sugerida por Rutherford, em 1920, ao apresentar na Sociedade Real de Londres, o resultado de sua experiência realizada no ano anterior. Para Rutherford, o isótopo do Oxigênio por ele obtido - O^{17} -, poderia ser o bem conhecido O^{16} , acrescido de uma partícula neutra com a massa aproximadamente igual a do próton. O próprio modelo atômico de Rutherford proposto em 1911, conforme vimos anteriormente, indicava que deveriam haver outras partículas constituintes do átomo todo, pois tal modelo não poderia ser explicado pela teoria eletrodinâmica clássica sintetizada por James Clerk Maxwell (físico escocês, 1831 - 1879) no período 1867 - 1873. De acordo com essa teoria, cargas elétricas aceleradas irradiavam energia e cargas elétricas de mesmo sinal se repeliam¹⁰. Assim, como os elétrons giravam em torno do núcleo com movimento uniforme e em órbitas circulares, em primeira aproximação, devido à aceleração centrípeta que os mantém em órbita, perderiam energia por irradiação e tenderiam a cair no núcleo. Portanto, a camada de elétrons do átomo - a eletrosfera - era instável. Sendo o núcleo rutherfordiano composto somente de partículas positivas, ele não deveria ser estável, pois haveria entre tais partículas uma força de repulsão eletrostática. A estabilidade da eletrosfera seria conseguida através do modelo atômico de Niels Henrik David Bohr (físico dinamarquês, 1885 - 1962; Prêmio Nobel de Física, 1922) formulado em 1913¹¹ (R13) e segundo o qual o átomo só irradiaria quando o elétron se deslocasse entre órbitas circulares estáveis. A estabilidade do núcleo só seria explicada com a teoria das forças nucleares desenvolvida por Hideki Yukawa (físico japonês, 1907 - ; Prêmio Nobel de Física, 1949),

em 1935 (R14). Antes, na década de 1920, acreditava-se na existência de elétrons no interior do núcleo e que juntavam-se aos prótons como se fossem cola. Assim, os elétrons neutralizariam a carga elétrica dos prótons e impediriam que os mesmos se repelissem. Esse modelo, por exemplo, explicava porque o Hélio tinha uma massa que equivalia a de quatro prótons, enquanto que a carga elétrica equivalia à de dois. No entanto, verificou-se que tal modelo era inconsistente, pois a energia eletrostática de ligação entre o elétron e o próton é insuficiente para manter o elétron confinado em dimensões nucleares¹².

Experimentalmente, a identificação de uma partícula neutra não poderia mais ser feita através de seus desvios provocados por campos elétricos e/ou magnéticos, como ocorrera com o elétron, nas experiências de Thomson, e nem como ocorrera com o próton, nas experiências de Thomson e de Blackett, uma vez que, sendo neutras, não poderiam nem interagir com campos de força elétricos ou magnéticos e nem produzir íons. Portanto, a detecção de partículas neutras deveria ser feita de maneira indireta. As experiências que levaram à identificação de uma partícula neutra foram realizadas por Walther Wilhelm Georg Frank Bothe (físico alemão, 1891 - 1957; Prêmio Nobel de Física, 1954), H. Z. Becker, em 1930 (R15); por Irène Joliot-Curie (física francesa, 1897 - 1956; Prêmio Nobel de Química, 1935) e Frédéric Joliot-Curie (físico francês, 1900 - 1958; Prêmio Nobel de Química, 1935) em 1932 (R16), com bombardeio por partículas alfa de elementos leves tais como o Lítio, o Berílio, o Boro, etc.. Porém, as radiações penetrantes que eram emitidas pelos elementos leves nas experiências referidas acima, não foram corretamente interpretadas, nem por Bothe e Becker que acreditaram ser radiações gama, e nem pelo casal Joliot-Curie, os quais admitiram ser uma nova espécie de radiação, diferente da gama, pois ela era capaz de arrancar prótons das substâncias por onde passavam, como por exemplo, a parafina, substância que contém Hidrogênio.

A interpretação de tal radiação como uma partícula neutra - nêutron -, foi feita por James Chadwick (físico inglês, 1891 - 1974; Prêmio Nobel de Física, 1935) em 1932 (R17), ao afirmar que a melhor maneira de explicar as radiações observadas por Bothe e Becker e pelo casal Joliot-Curie era supor que as partículas alfa expulsavam do núcleo do Berílio, por exemplo, partículas neutras e que estas expulsavam os prótons da parafina. Chadwick, por comparação entre a ionização do Nitrogênio e do Hidrogênio avaliou a massa do nêutron como aproximadamente igual a do próton. Muito embora Chadwick tenha descoberto o nêutron, a hipótese de que este fosse um constituinte do núcleo, juntamente com o próton, foi formulada em 1932 (R18) por Werner

Karl Heisenberg (físico alemão, 1901 - 1976; Prêmio Nobel de Física, 1932) e, independentemente, no mesmo ano (R19), por D. Iwanenko. A estabilidade nuclear decorria de um mecanismo de forças de troca entre os nucleons (próton e nêutron), mecanismo esse que só seria explicado, conforme vimos anteriormente, pelo trabalho de Yukawa. Assim, segundo essa hipótese, o núcleo do Hélio era constituído por dois prótons e por dois nêutrons, e os isótopos de um elemento químico contêm o mesmo número de prótons, que é igual ao número de elétrons periféricos, para manter a neutralidade do elemento, diferindo apenas no número de nêutrons, confirmando assim, teoricamente, a existência de isótopos observados por Thomson, Soddy e Aston.

NOTAS

(1) Faraday observou que, se a mesma quantidade de eletricidade atravessa diversas barras metálicas introduzidas em uma determinada solução, as massas de material depositado naquelas barras são proporcionais aos equivalentes químicos, isto é, quocientes das massas atômicas das substâncias depositadas, pelas respectivas valências. A esse fenômeno, Faraday denominou eletrólise. Por sugestão de William Whewell (erudito inglês, 1794 - 1866), Faraday chamou as barras metálicas referidas acima, de eletrólitos, sendo o anódio polo positivo e o catódio, negativo.

(2) Os metais isolados por Davy foram o Potássio em 1807; o Bário, o Estrôncio, o Cálcio e o Magnésio, todos em 1808.

(3) Raios catódicos são raios originários do eletrodo negativo nos tubos de descarga gasosa, nome esse dado por Eugen Goldstein (físico alemão, 1850 - 1930) em 1876. Dez anos mais tarde, Goldstein tentaria a primeira explicação para a aurora boreal que seria, para ele, consequência de uma descarga elétrica na atmosfera provocada pelos raios catódicos provenientes do Sol. Em 1958 (R20), James Alfred Van Allen (físico norte-americano, 1914 -), e L.J. Cahill, completariam a explicação de Goldstein, ao afirmarem que a luz da aurora era proveniente da interação da radiação emitida por erupção solar, com uma camada de prótons e de elétrons altamente energéticos, envolvendo a Terra, e conhecida por cinturão de van Allen, denominado a partir de 1960, de magnetosfera.

(4) Os raios canais, que tiveram seu nome batizado por Goldstein, são raios que atravessam um catodo perfurado e se deslocam em sentido contrário ao dos raios catódicos.

- (5) Provavelmente também foi Perrin o primeiro a observar que os raios catódicos eram compostos de partículas com carga negativa.
- (6) Essa experiência de Rutherford foi realizada em 1909, porém, somente em 1911, ele apresentou seu trabalho na Sociedade Real de Londres.
- (7) A idéia de um sistema planetário para explicar a estrutura de um átomo já tinha sido conjecturada por vários físicos, entre eles Stoney (1891), Hendrik Antoon Lorentz (físico holandês, 1853 - 1928; Prêmio Nobel de Física, 1902) e Joseph Larmor (físico e matemático inglês, 1857 - 1942) em 1896; Perrin em 1901 (R21) e Hantaro Nagaoka (físico japonês, 1865 - 1950) em 1904 (R22). Lorentz e Larmor idealizaram a estrutura planetária do átomo para poder explicar o fenômeno observado por Pieter Zeeman (físico holandês, 1865 - 1943; Prêmio Nobel de Física, 1902) em 1896 (R23) e no qual as raias espectrais emitidas por átomos excitados eram decompostas quando observadas em regiões de campo magnético forte.
- (8) O nome isótopo (mesmo lugar, em grego) foi sugerido por Frederick Soddy (químico inglês, 1877 - 1956; Prêmio Nobel de Química, 1921) significa que um mesmo elemento químico tem o mesmo número atômico (Z) e o número de massa (A) diferente. Sua proposta ocorreu em 1913 (R24).
- (9) A câmara de nuvens, inventada por Charles Thomson Rees Wilson (físico escocês, 1869 - 1959; Prêmio Nobel de Física, 1927) em 1911 (R25), baseia-se no fato de que um vapor superesfriado se condensa em gotículas de líquido em torno de qualquer íon presente em seu interior. A energia, a massa e a carga de uma partícula podem ser calculadas analisando-se o comprimento, a densidade e o tipo de traço. Por exemplo, quanto maior e quanto mais denso for o traço, mais energética e mais pesada será a partícula. Sua carga será determinada observando-se o desvio sofrido pela partícula na presença de campos elétricos e/ou magnéticos. Em 1952 (R26), Donald Arthur Glaser (físico norte-americano, 1926 - ; Prêmio Nobel de Física, 1960), observando que poderiam ser formadas bolhas em torno do íon, por ebulição de um líquido superaquecido, construiu, então, a primeira câmara de bolhas.
- (10) A descoberta de que cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e que cargas elétricas de sinal contrário se atraem foi feita por Charles François de Cisternay Dufay (físico francês, 1698 - 1739) em 1734. A expressão algébrica para calcular essa força foi obtida por Charles Augustin Coulomb (físico francês, 1736 - 1806), em 1785.

(11) O modelo de Bohr seria ampliado em 1916 (R27), por Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (físico alemão, 1868 - 1951) ao introduzir no mesmo, órbitas elípticas e considerar efeitos relativísticos nas velocidades dos elétrons. Antes, em 1915 (R28), W. Wilson havia considerado as órbitas elípticas, independentemente de Sommerfeld.

(12) A inconsistência é encontrada quando se compara a energia eletrostática coulombiana entre o elétron e o próton, com a energia de uma partícula confinada em uma região de dimensões nucleares ($\sim 10^{-13}$ cm). Essa energia é calculada usando-se a mecânica relativística desenvolvida por Albert Einstein (físico suíço-germano-norte-americano, 1879 - 1955; Prêmio Nobel de Física, 1921) em 1905 (R29), e o Princípio da Incerteza formulado por Heisenberg, em 1927 (R30).

REFERÊNCIAS

- (R01) - Thomson, J.J., Phil. Mag., 44, 293 (1897).
- (R02) - Thomson, J.J., Phil. Mag., 7, 237 (1904).
- (R03) - Millikan, R.A., Phil. Mag., 19, 209 (1910).
- (R04) - Thomson, J.J., Phil. Mag., 13, 561 (1907).
- (R05) - Rutherford, E., Phil. Mag., 5, 576; 21, 669 (1911).
- (R06) - Geiger, H., Proc. Roy. Soc. (London), 83A, 492 (1910).
- (R07) - Geiger, H. and Marsden, E., Proc. Roy. Soc. (London), 82A, 495 (1909).
- (R08) - Geiger, H. and Marsden, E., Phil. Mag., 25, 604 (1913).
- (R09) - Thomson, J.J., Proc. Roy. Soc. (London), 89, 1 (1913).
- (R10) - Aston, F.W., Phil. Mag., 38, 707 (1919).
- (R11) - Rutherford, E., Phil. Mag., 37, 537 (1919).
- (R12) - Blacket, P.M.S., Proc. Roy. Soc. (London), 107, 349 (1925).
- (R13) - Bohr, N.H.D., Phil. Mag., 25, 10; 26, 1, 476, 857 (1913).
- (R14) - Yukawa, H., Proc. Phys. - Math. Soc. Japan, 17, 48 (1935).
- (R15) - Bothe, W.G.F. and Becker, H., Z. Physik, 66, 289 (1930).
- (R16) - Curie, I. and Joliot, F., Comp. Rend., 194, 273 (1932).
- (R17) - Chadwick, J., Proc. Roy. Soc. (London), 136A, 696 (1932).
- (R18) - Heisenberg, W., Z. Physik, 77, 1 (1932).
- (R19) - Iwanenko, D., Nature, 129, 798 (1932).
- (R20) - Van Allen, J.A., and Cahill, L.J., J. Geophys. Res. 63, 270 (1958).
- (R21) - Perrin, J., Revue Scient., 15, 449 (1901).
- (R22) - Nagaoka, H., Phil. Mag., 7, 442 (1904).
- (R23) - Zeeman, P., Ver. Phys. Ges. Zu Berlin, 7, 128 (1896).
- (R24) - Soddy, F., Chem. News, 107, 97 (1913).

- (R25) - Wilson, C.T.R., Proc. Roy. Soc. (London), 85A, 285 (1911).
- (R26) - Glaser, D.A., Phys. Rev., 87, 665 (1952).
- (R27) - Sommerfeld, A.J.W., Ann. Physik, 51, 1 (1916).
- (R28) - Wilson, W., Phil. Mag., 29, 795 (1915).
- (R29) - Einstein, A., Ann. der Phys., 17, 891 (1905).
- (R30) - Heisenberg, W., Zs. f. Physik, 43, 172 (1927).

(*) Este artigo é a segunda parte do trabalho "Crônica das Partículas Elementares". A primeira parte desse trabalho foi publicada no Vol. 2, nº 2 desta revista.