

## Sobre a estrutura do núcleo atômico antes da descoberta do nêutron

Mario Tolentino e Romeu C. Rocha-Filho\*

### On the structure of the atomic nucleus before the discovery of the neutron

Although the nuclear atom was postulated by Rutherford in 1911, the neutron was discovered only in 1934. Once the notion of a nuclear atom was accepted, there was the need to explain the values of the atomic weight and the nuclear charge of the different atoms. This paper has the objective of reporting how scientists viewed the nuclear structure of the atom so as to provide these explanations, before the discovery of the neutron.

O átomo nuclear foi postulado por Rutherford em 1911. Na época já se conhecia a existência de partículas positivas e negativas, em decorrência dos experimentos com tubos de descarga contendo gases rarefeitos realizados nas últimas décadas do século 19. Entretanto, não se sabia da existência do nêutron, que só seria descoberto em 1934. Uma vez postulado o átomo nuclear, imediatamente surgiu a necessidade de se explicar os valores de massa atômica e de carga nuclear dos diferentes átomos. Este artigo tem como objetivo relatar como os cientistas, antes da descoberta do nêutron, vislumbravam a estrutura nuclear do átomo de modo a prover estas explicações.

### As primeiras idéias sobre átomos

A idéia de átomo como componente básico de todas as coisas materiais esteve sempre ligada à de massa, de conteúdo material. Quando os primeiros filósofos gregos, pré-socráticos, da chamada “escola atomista”, afirmavam que os átomos tinham uma “natureza corpórea” (Amnorex, 1969; Pessanha, 1972), era essa a idéia subjacente.

No início do século 19, quando John Dalton (1766-1844) propôs —com bases experimentais— a existência do átomo como partícula formadora de todas as substâncias, enumerou uma série de características, uma das quais era que cada tipo de átomo possuía massa característica. Nesta ocasião, Dalton publicou a primeira tabela de pesos atômicos.<sup>#</sup> Desde

então o peso atômico passou a ser uma grandeza de caracterização dos átomos dos elementos químicos (Tolentino e Rocha-Filho, 1994).

Diversas décadas mais tarde, Dmitri Ivanovich Mendeleiev (1834-1907), Lothar Meyer (1830-1895) e outros estabeleceram uma relação entre os pesos atômicos e certas propriedades das substâncias elementares, dando início a um ciclo de estudos das propriedades periódicas dos elementos e à elaboração das tabelas periódicas (Spronsen, 1969; Tolentino *et al.*, 1997).

Os fenômenos eletromagnéticos e luminosos observados durante as descargas elétricas em gases rarefeitos trouxeram uma grande soma de conhecimentos relativos à estrutura da matéria. Em 1886, Eugene Goldstein (1850-1930), usando catodos perfurados, caracterizou a presença dos chamados raios canais, que, como posteriormente demonstrado, possuíam carga positiva e massa variável diretamente relacionada com o gás rarefeito que existisse na ampola. Em 1897, Joseph John Thomson (1856-1940) caracterizou os raios catódicos como um feixe de elétrons, cuja natureza independia do tipo de gás usado.

Como resultado dessas descobertas, cientistas da época passaram a levantar hipóteses sobre a disposição desses componentes positivos e negativos nos átomos. Já em 1903 Philipp Lenard (1862-1947), observando que os raios catódicos atravessavam janelas de finas lâminas de alumínio, concluiu pela presença de grandes espaços vazios na estrutura dos átomos (Ihde, 1984; Andrade, 1978). Assim, o seu “modelo atômico” postulava o átomo como uma esfera em grande parte vazia tendo ao centro um aglomerado de partículas que ele denominou de “dinâmides”: uma simples carga positiva ligada a outra simples carga negativa (um elétron), de modo que o átomo era neutro. O peso atômico seria proporcional ao número de dinâmides.

### O modelo atômico nuclear e algumas dúvidas

A descoberta da radioatividade por Becquerel, em 1896, abriu um novo e amplo campo de pesquisas, intensamente explorado por inúmeros cientistas, entre os quais assumiu um vulto especial Ernest Rutherford (1871-1937), primeiro *Barão Rutherford (de Nelson)*. Rutherford, durante sua estadia (1898-1907) como professor da Universidade McGill, em Montreal (Canadá), contribuiu grandemente para o entendimento da radioatividade, tendo recebido o Prêmio Nobel de

\* Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos, Caixa Postal 676, 13560-970 São Carlos - SP, Brasil.

e-mail: romeu@dq.ufscar.br

<sup>#</sup> Neste artigo, a expressão “peso atômico” é utilizada como sinônimo de “massa atômica relativa” (para maiores detalhes, vide Tolentino e Rocha-Filho, 1994).

Química de 1908 por “suas investigações sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas” (Keas, 1993). Em 1907, Rutherford resolveu retornar à Inglaterra, aos Laboratórios Cavendish da Universidade de Manchester, onde anteriormente já trabalhara sob o comando de Thomson. Aí, auxiliado por Wilhelm Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1945), iniciou uma série de pesquisas sobre o espalhamento de um feixe de partículas alfa ou beta incidente sobre finas lâminas de metais, principalmente ouro. Os resultados foram imediatamente comunicados por Rutherford à Sociedade Literária e Filosófica de Manchester em fevereiro de 1911, sendo em seguida publicados (Rutherford, 1911).

A medida dos desvios sofridos pelas partículas alfa, alguns deles menores que  $90^\circ$  (isto é, as partículas voltavam como uma bola sendo rebatida por uma parede), indicava a presença nos átomos metálicos de grandes espaços vazios e de uma concentração de cargas em uma região central de tamanho diminuto. Surgiu, assim, um novo modelo atômico que seria depois complementado —na parte relativa aos elétrons— por Niels Bohr (1885-1962). Em sua primeira versão, o modelo de Rutherford era o seguinte (Andrade, 1978): um centro carregado (posteriormente denominado de núcleo), com uma carga de magnitude  $Ne$ , onde  $e$  é a unidade de carga eletrônica e  $N$  um número inteiro, rodeado por uma esfera de eletricidade do tipo oposto. É interessante ressaltar que, neste estágio inicial, Rutherford supôs, só por conveniência, que a carga central era positiva, pois, por mais estranho que pareça, a deflexão de uma partícula alfa seria a mesma se essa carga fosse negativa.

A etapa seguinte seria a determinação do número de cargas positivas nesse núcleo. Esta foi feita com base nos resultados dos experimentos de espalhamento de partículas alfa pelas finas lâminas de metais: a fração de partículas alfa defletidas em função do ângulo de deflexão. Com base nisso e sabendo a energia cinética e a carga das partículas alfa, bem como o número de átomos metálicos por unidade de área da lâmina, Rutherford e seus colaboradores calcularam o número de cargas positivas no núcleo dos átomos metálicos. Encontraram que para cada metal estudado o número de partículas positivas nos seus átomos era igual à metade do peso atômico do dado metal (Millikan, 1947).

Em 1913, Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915), trabalhando nos laboratórios de Rutherford, estabeleceu uma relação entre a frequência dos raios X emitidos por diferentes metais (agindo como anticatodos das ampolas de Röntgen) e um número —que Moseley designou por  $A$ — que estava ligado à ordem deste metal na classificação periódica dos elementos de Mendeleiev. Esse número foi chamado de *número atômico* do elemento e relacionado à carga positiva do núcleo atômico (Leicester, 1971).

A ciência avançava no conhecimento do átomo e de seu núcleo, mas ainda existiam dúvidas e contradições: qual era a natureza das cargas nucleares positivas —e responsáveis pela sua massa— e porque as observações indicavam que o peso atômico era maior que a carga do núcleo correspondente? Isso era observado em todos os elementos químicos então conhecidos. Nos elementos mais leves, o peso atômico era o dobro do número atômico. Nos mais pesados, a diferença era ainda mais acentuada.

### As hipóteses levantadas

Quanto à natureza das cargas positivas nucleares, as primeiras hipóteses atribuíam a sua existência à presença, no núcleo, de elétrons positivos. Note-se que esta idéia predominava muito antes da descoberta, em 1932, dos *pósitrons* por Carl David Anderson (1905-1991) através de fotografias de traços deixados pela radiação cósmica nas câmaras de Wilson. Convém ressaltar que, em 1920, Rutherford deu o nome de próton ao núcleo do hidrogênio, isto é, à carga positiva nuclear unitária (Andrade, 1978).

Para justificar a discrepância entre os pesos atômicos e os números atômicos, passou-se a admitir que no núcleo também existiam elétrons positivos ligados a elétrons negativos. Assim, na prática, o peso atômico de um dado átomo era decorrente da presença no núcleo dos elétrons positivos responsáveis pela carga nuclear e dos elétrons positivos associados a elétrons negativos.

Por alguns anos, predominou entre os cientistas preocupados com a estrutura do núcleo atômico essa suposição de que as partículas responsáveis pela carga elétrica nuclear seriam elétrons positivos. É exemplo típico desta linha de pensamento o que escrevem Harkins e Wilson (1915); depois de discutir o problema da relação entre os pesos atômicos e a composição dos átomos segundo as idéias de Prout, Stas e outros, os autores afirmam “...a formação do núcleo carregado positivamente de um átomo pela combinação de elétrons positivos e negativos sob certa forma de estrutura...” (p. 1373). Mais adiante, no mesmo artigo, os autores afirmam “Se, como Rutherford parece pensar ser provável, o núcleo positivo de hidrogênio é o elétron positivo, então a composição mais provável do núcleo de hélio deve ser quatro elétrons positivos e dois que são negativos” (p. 1377).

Cinco anos depois, William Harkins (1920), citando várias publicações anteriores, apresenta-se como autor da teoria segundo a qual os átomos dos elementos químicos teriam seu núcleo formado por elétrons positivos e negativos, acrescentando que os núcleos de hidrogênio eram formados por elétrons positivos. Mais adiante (p. 1958), Harkins, referindo-se às séries de elementos —algumas das quais encabeçadas por átomos radioativos— afirma que os núcleos de seus átomos eram formados ou por partículas alfa ou por partícu-

las alfa mais elétrons negativos, estes funcionando como “cimento” das partículas alfa. Átomos como, por exemplo, os de oxigênio, magnésio, silício, cálcio ... conteriam em seu núcleo apenas partículas alfa, ao passo que outros, como os de ferro, possuiriam elétrons negativos como cimento (p. 1958). Portanto, as partículas alfa eram vistas como uma unidade secundária da qual os átomos eram feitos.

Com a introdução da teoria quântica no modelo de Bohr-Sommerfeld (Arthur Sommerfeld, 1868-1951), a suposta presença de elétrons no núcleo atômico levou a um problema chamado de “paradoxo do nitrogênio”. Em 1925, o conceito de “spin” dos elétrons foi introduzido para explicar certos problemas da espectroscopia relativos às estruturas finas dos espectros (Brown, 1997). O efeito de desdobramento de certas raias quando o átomo excitado está sob a ação de um campo magnético —efeito Zeeman— foi explicado como sendo decorrente do fato dos elétrons possuírem um *momento angular* ou *spin*. Este parâmetro quântico —designado pela letra  $s$ — só poderia apresentar dois valores: paralelo ou anti-paralelo ao campo magnético, sendo a eles atribuídos os valores  $+1/2$  ou  $-1/2$ . Os fundamentos teórico-matemáticos dessa característica foram estabelecidos em 1926 por Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984). A aceitação do spin do elétron trouxe certa confusão quando ele se encontrava no núcleo. Na época admitia-se que o núcleo de nitrogênio conteria 14 cargas positivas —então já chamados de prótons— e 7 elétrons negativos, o que correspondia a um peso atômico igual a 14 e um número atômico igual a 7. Como cada elétron tinha um spin igual à metade de um número inteiro, para o nitrogênio o spin deveria ter um valor igual à metade de um número inteiro. Mas isto contrariava os valores experimentais que davam ao núcleo do nitrogênio um spin total de valor igual a um número inteiro, sugerindo um número par de elétrons no núcleo.

Isto passou a ser um forte argumento contra a existência de elétrons (negativos) no núcleo. Por outro lado, as leis de deslocamento de posição na tabela periódica por emissão de partículas alfa ou beta —que representavam a perda de dois prótons ou o ganho de um— indicavam claramente que as características dos elementos químicos estavam intimamente ligadas às estruturas nucleares e, mais especificamente, às cargas positivas desse núcleo (Millikan, 1947, p. 202-203). Entre essas características ressalta o peso atômico que dependeria, essencialmente, dos componentes nucleares, já que a massa dos elétrons —orbitando o núcleo— seria desprezível. Portanto, havia necessidade de justificar a massa concentrada no núcleo, já que a hipótese dominante era a de que esta estrutura seria formada por elétrons positivos e negativos. A solução foi invocar as teorias de Albert Einstein (1879-1955) e concluir que a massa dessas partículas e, conseqüentemente, do núcleo seria de natureza eletromagnética, isto

é, relativística.

De qualquer modo, dada a denominação de próton à carga nuclear unitária positiva —núcleo de hidrogênio— estava resolvida uma das questões fundamentais para o estabelecimento da estrutura nuclear dos átomos mais complexos: a natureza das partículas responsáveis pela carga positiva do núcleo e a massa que seria a do núcleo de hidrogênio. Mas restava outro problema: a massa total do núcleo, já que o peso atômico era maior que o número atômico.

### Descoberta do nêutron

Harkins, em artigo publicado em 1921, faz referência ao nêutron, informando “... que o número isotópico pode ser considerado como o número de nêutrons (o nêutron sendo um termo que designa um elétron negativo ligado a um núcleo de hidrogênio...)”. O nêutron de Harkins era, portanto, uma partícula composta resultante da união de duas cargas elétricas contrárias.

Segundo Andrade (1978) e Brown (1997, p. 53), o termo nêutron foi usado anteriormente por Rutherford, o qual, de certo modo, previu a existência dessa partícula. Andrade e Brown referem-se a uma conferência realizada por Rutherford em 1920, na Royal Society, durante a qual ele teria previsto a existência de um átomo com carga zero: “Sob certas condições, entretanto, pode ser possível para um elétron se combinar mais intimamente com o núcleo de H, formando uma espécie de dublete neutro. Um tal átomo teria propriedades muito inéditas. Seu campo externo seria praticamente zero, exceto muito próximo ao núcleo, e conseqüentemente ele deveria ser capaz de se movimentar livremente através da matéria. Sua presença provavelmente seria difícil de detectar por espectroscópio e pode ser impossível contê-lo em um recipiente selado” (Brown, 1997, p. 53).

Porém, o nêutron que hoje conhecemos e definimos não é um átomo e sim uma partícula elementar de natureza neutra e de massa ligeiramente superior à da próton. A história da sua descoberta é bastante interessante e ela veio explicar de forma conveniente a discrepância entre peso atômico e número atômico. A descoberta do nêutron por *sir* James Chadwick (1891-1974) foi um fato que não só marcou a história da Física como também abalou a história do próprio mundo.

Os fatos que levaram a esta descoberta estão intimamente ligados aos estudos que seguiram-se à descoberta da radioatividade, sendo que duas linhas de pesquisa destacavam-se nesse momento histórico: uma era o bombardeio de substâncias por partículas alfa e beta, estudando-se as interações observadas, outra era a linha de transmutações sofridas pelos elementos radioativos a que se dedicaram Frederick Soddy (1877-1956), Kasimir Fajans (1887-1975) e Alexander

Smith Russell (1888-1972). Estas pesquisas tiveram início em 1911, quando Soddy observou que a emissão espontânea de uma partícula alfa transformava o átomo emissor em um novo elemento químico com propriedades semelhantes às daquele que estivesse em posição duas “casas” antes na classificação periódica. Essa transmutação tornava realidade um sonho dos antigos alquimistas, seguindo-se a busca de uma transmutação provocada em laboratório, por bombardeio com partículas alfa ou beta. Em 1919, Rutherford obteve a primeira transmutação artificial como resultado do bombardeio de nitrogênio por partículas alfa de baixa energia, do que resultava a produção de oxigênio e de prótons, isto é, núcleos de hidrogênio (Millikan, 1947, p. 360; Tolentino e Rocha-Filho, 1995).

Em 1930, Walther Wilhelm Bothe (1891-1957) e seu aluno Herbert Becker (1894-?) descobriram uma nova e penetrante radiação que resultava do bombardeio de átomos de berílio por partículas alfa provenientes do polônio (Bothe e Becker, 1930). Numa etapa seguinte, o casal Irène Joliot-Curie (1897-1956) e Frederic Joliot (1900-1958), em Paris, estudando a ionização provocada por esses raios verificaram que a interposição, no seu percurso, de lâminas de parafina, celofane, água ou outras substâncias ricas em hidrogênio provocava um aumento na corrente de ionização (Curie-Joliot e Joliot, 1932). O efeito foi atribuído ao fato dessa radiação, ao atravessar materiais desse tipo, provocar a expulsão de núcleos de hidrogênio, isto é, prótons.

Cogitações teóricas criaram uma série de problemas relacionados à natureza dos raios de Bothe. A solução desses problemas foi devida a estudos de James Chadwick (1891-1974) que emitiu a hipótese de que a colisão das partículas alfa com os núcleos de berílio provocaria a formação do isótopo 12 do carbono, com subsequente expulsão de partículas com a massa dos prótons, mas não tendo carga elétrica (Brown, 1997, p. 92-110; Chadwick, 1965). Elas seriam os *nêutrons*, cuja existência já havia sido prevista por Rutherford em 1920. O mundo científico tomou conhecimento do fato através de comunicação feita por Chadwick (1934) à revista *Nature*.

A descoberta do nêutron pôs fim à contradição existente entre os pesos atômicos e os números atômicos, assim como a caracterização do próton havia trazido a explicação científica para a natureza das cargas positivas do núcleo. Não havia mais qualquer necessidade de supor a existência de elétrons nos núcleos atômicos, formando pares neutros com prótons. Em 1935, isto já é muito claramente explicitado na conferência feita por Chadwick, em 12 de dezembro, ao receber o Prêmio Nobel de Física pela descoberta do nêutron: “Antes da descoberta do nêutron nós tivemos que supor que as partículas fundamentais das quais um núcleo atômico era feito eram o próton e o elétron, com as partículas  $\alpha$  como

uma unidade secundária. O comportamento do elétron em um espaço de dimensões nucleares não pode ser descrito de acordo com a teoria atual; e outras dificuldades, como por exemplo a estatística do núcleo de nitrogênio, as peculiaridades da curva de defeito de massa na região dos elementos pesados, também surgiram. Estas dificuldades são removidas se nós supormos que os núcleos são constituídos de prótons e nêutrons” (Chadwick, 1965, p. 347). A seguir, Chadwick também define número de massa (soma do número de prótons e de nêutrons). ■

### Referências Bibliográficas

- Amnored, C.R., Les pres-socratiques, IN: *Histoire de la Philosophie*, Encyclopedie de la Pleiade, Ed. Gallinard, Paris, 1969, p. 437.
- Andrade, E.N. da C., *Rutherford and the Nature of the Atoms*, Peter Smith, Gloucester (MA, EUA), 1978, p. 115 & 168.
- Bothe, W. e Becker, H., *Zeit fur Physik*, **66**, 289, 1930.
- Brown, A., *The Neutron and the Bomb*, Oxford University Press, Oxford, 1997, p. 92-93.
- Chadwick, J., The neutron and his properties, IN: *Nobel Lectures: 1922-1941*, Elsevier, Ansterdã, 1965, p. 331-349.
- Chadwick, J., Possible existence of a neutron, *Nature*, **129**, 312, 1934.
- Harkins, W.D., Natural systems for the classification of isotopes and atomic weights of pure atomic species as related to nuclear stability, *J. Amer. Chem. Soc.*, **43**, 1038, 1921.
- Harkins, W.D., The stability of atoms as related to the positive and negative electrons in their nuclei and the hydrogen, helium, H<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> theory of atomic structure, *J. Amer. Chem. Soc.*, **42**, 1956, 1920.
- Harkins, W.D. e Wilson, E.D., The changes of mass and weight involved in the formation of complex atoms, *J. Amer. Chem. Soc.*, **27**, 1367, 1915.
- Ihde, A.J., *The Development of Modern Chemistry*, Dover, Nova Iorque, 1984, p. 485.
- Joliot-Curie, I. e Joliot, F. *Comptes-rendus de l'Academie des Sciences*, **194**, 273, 1932.
- Keas, M.N., Ernest Rutherford, IN: James, L. K. *Nobel Laureates in Chemistry. 1901-1992*, American Chemical Society and Chemical Heritage Foundation, Washington, 1993, p. 49-60.
- Leicester, H.M., *The Historical Background of Chemistry*, Dover, Nova Iorque, 1971, p. 224-225.
- Millikan, R., *Electrons (+ and -), Protons, Photons, Neutrons, Mesotrons and Cosmic Rays*, University of Chicago Press, Chicago, 1947, p. 195, 620-624.
- Pessanha, J.A.M., Os Pré-Socráticos, In: *História das Grandes Idéias do Mundo Ocidental*, Ed. Abril, S. Paulo, 1972, vol. 1, p. 5.
- Romer, A.A., Proton or prouton: Rutherford and the depths of the atom, *Amer. J. Phys.* **65**(8), 707-716, 1997.
- Rutherford, E., The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles by matter and the structure of the atom, *Philosophical Mag.*, series 6, **21**, 669-688, 1911.
- Spronsen, J.W. van, *The Periodic System of Chemical Elements (History of the First Hundred Years)*, Elsevier, Nova Iorque, 1969, p. 97-142.
- Tolentino, M. e Rocha-Filho, R.C., Evolução histórica dos pesos atômicos, *Quim. Nova*, **17**(2), 182-187, 1994.
- Tolentino, M. e Rocha-Filho, R.C., A nucleo-síntese dos metais transurânicos, *Quim. Nova*, **18**(4), 384-395, 1995.
- Tolentino, M., Rocha-Filho, R.C. e Chagas, A.P., Alguns aspectos históricos da classificação periódica dos elementos químicos, *Quim. Nova*, **20**(1): 103-117 (1997).