

# O MODELO ATÓMICO SATURNIANO DE NAGAOKA

MANUEL FIOLHAIS e MARIA DA CONCEIÇÃO RUIVO

Departamento de Física da Universidade de Coimbra, 3000 Coimbra

O objectivo deste trabalho é divulgar aspectos de um modelo atómico pouco conhecido, proposto pelo físico japonês Hantaro Nagaoka, situando-o no contexto mais geral da evolução histórica dos modelos atómicos do princípio deste século. Faz-se também referência à personalidade científica de Nagaoka e ao seu papel no desenvolvimento da ciência no Japão.

Em 1904, era dado à estampa, no prestigioso *Philosophical Magazine*, um artigo intitulado "Kinetics of a System of Particles Illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity". Nele era apresentado o "modelo atómico de Saturno", segundo o qual o átomo teria uma estrutura semelhante a este planeta, isto é, haveria um núcleo central rodeado de electrões, fazendo lembrar os anéis de Saturno. O seu autor, Hantaro Nagaoka (1865-1950), reputado físico japonês da Universidade Imperial de Tóquio, era ainda um ilustre desconhecido no mundo ocidental, embora, à época, tivesse já dado contribuições importantes no domínio da propagação da radiação electromagnética na atmosfera.

No início do século, a construção de modelos atómicos que permitissem compreender a estrutura da matéria estava na ordem do dia. Paradoxalmente, a crença na realidade dos átomos era ainda objecto de polémica. Embora a

"hipótese atómica" fosse familiar aos químicos desde há cerca de cem anos e tanto os químicos como os físicos tirassem partido dela, a relutância em aceitar uma estrutura corpuscular da matéria era manifesta em alguns cientistas. Refira-se,



a propósito, o químico Wilhelm Ostwald, um dos primeiros laureados com o prémio Nobel, e também o físico Ernst Mach. O próprio Max Planck confessou ter sido um adversário do atomismo que, de facto, só viria a aceitar quando tal se mostrou indispensável ao estabelecimento da sua teoria da radiação. Há, no entanto, um curto intervalo de tempo no virar do século, onde todo um conjunto de

descobertas cruciais põe definitivamente em causa estes pontos de vista e abre novos horizontes ao conhecimento. Os modelos atómicos, formulados como resposta aos desafios lançados pelas novas experiências, representaram um grande passo no sentido de consagrar a ideia de uma matéria descontínua por natureza.

Os grandes modelos então nascidos — o de Thomson, o de Rutherford e o de

Bohr — constituíram marcos assinaláveis no conhecimento da estrutura da matéria. Mas, por detrás destas etapas do percurso dos modelos atômicos, vale a pena ouvirmos o que nos diz a história sobre o mundo real dos cientistas da época, sobre os elegantes resultados obtidos frequentemente por um processo de tentativa e erro. E também sobre os contributos de figuras menos conhecidas, que tiveram a virtude de fecundar o terreno das ideias, para outros, mais hábeis ou dispostos de melhores meios, o virem a cultivar com sucesso.

A história das grandes invenções e descobertas é sempre rica e complexa e o papel desempenhado pelos diferentes actores nem sempre é fácil de destringer. Quando grandes problemas desafiam o engenho e o saber da comunidade científica, gera-se uma atmosfera propícia à criatividade, acontecendo frequentemente que ideias e descobertas idênticas ou complementares surgem, num mesmo período, oriundas de indivíduos ou de equipas, trabalhando, por vezes, independentemente.

Se reflectirmos sobre estas situações, impõe-se-nos a visão de um saber que se constrói dinamicamente, desempenhando o confronto de ideias e a sua circulação um papel fundamental. É interessante, por conseguinte, espreitar para lá da face mais divulgada da história e observar episódios que nos revelam essa mesma faceta da criação do saber científico.

Vêm estas reflexões a propósito do modelo atômico de Nagaoka, arredado dos manuais escolares e mesmo raramente referido em livros mais especializados. No entanto, ele pode ter tido alguma importância na construção de modelos mais realistas, talvez até pela acção positiva que a crítica a uma ideia incipiente tem no desabrochar de uma outra mais sólida. Vale pois a pena fazer um "close-up" deste pequeno episódio da história da Física e é este o objectivo principal do artigo.

Quando o nosso século começou, Joseph John Thomson, já bem conhecido no Ocidente e coberto de enorme prestígio, desenvolvia a sua actividade como director do Cavendish Laboratory. A ele se atribuía, de resto com toda a justeza, a descoberta do electrão, muito embora, e em rigor, essa glória devesse também ser partilhada por outras personalidades da época.

Thomson concebeu aquele que é tido como o primeiro modelo de estrutura atômica — o celebrado modelo de pudim de passas — onde o átomo era visto como um substracto contínuo de matéria carregada positivamente (o pudim propriamente dito), estando incrustados nele os electrões (as passas), corpúsculos de carga oposta. O átomo era esférico e globalmente neutro. Esta "imagem" do átomo foi sugerida em 1903, nas "Silliman Lectures" na Universidade de Yale, nos Estados Unidos da América, onde Thomson se deslocava frequentemente.

A necessidade de construção de um modelo de estrutura do átomo era evidente. Os raios catódicos, constituídos pela mesma (e nova!) variedade de matéria, qualquer que fosse o cátodo, emanavam dos próprios átomos — estes deveriam, pois, ter uma estrutura interna.

Nas palavras do próprio Thomson:

"... temos nos raios catódicos matéria num novo estado, um estado em que a divisibilidade da matéria é levada muito mais longe do que no estado gasoso ordinário; um estado em que toda a matéria — isto é, matéria proveniente de diferentes fontes, tais como o oxigénio, o hidrogénio, etc. — é de uma e mesma espécie; esta é a matéria de que são feitos os elementos químicos." [in *Philosophical Magazine* 44 (1897) 295]

Em 1897, coroando uma série de experiências, Thomson, anunciou o valor medido para a razão entre a carga e a massa dos constituintes dos raios catódicos, conjecturando, apesar de isso não ser evidente a partir dos seus resultados, que esses objectos teriam uma dimensão ínfima comparada com a dos átomos. O electrão, que foi a primeira *partícula elementar* a ser identificada, detém, ainda hoje, essa qualidade!

No ano em que Thomson discorria em Yale sobre a sua visão do átomo, mais precisamente a 5 de Dezembro de 1903, Hantaro Nagaoka apresentava em Tóquio um "átomo saturniano", perante a Sociedade de Física-Matemática. O Japão, hoje um país na vanguarda do desenvolvimento científico e tecnológico, estava, no início do século, muito longe da posição que agora ocupa. O país apresentava um razoável desenvolvimento tecnológico mas tinha um atraso abismal no campo da ciência. Com Nagaoka a situação começou a inverter-se. De facto, para além de ter sido um físico de primeira linha, Nagaoka preocupou-se com o desenvolvimento científico do seu país que, no seu entender, deveria conseguir-se à custa da internacionalização da investigação. Numa carta enviada, em 1888, a Tanakadate, seu antigo professor, que estava de visita à Europa, e curiosamente redigida em inglês, Nagaoka aponta a grande necessidade de um papel preponderante por parte dos físicos japoneses no seio da comunidade científica internacional, o que tinha como pressuposto a obrigação de "aprenderem a escrever e a falar clara e fluentemente" línguas estrangeiras, designadamente o inglês, o francês e o alemão. Nagaoka fez estudos na Europa no início da última década do século passado, em Berlim, Munique e Viena. Posteriormente, veio ao Ocidente por diversas vezes, merecendo uma referência especial a sua deslocação em 1910, quando se encontrou com Rutherford. Desempenhou também cargos administrativos de grande relevo, nas Universidades de Tóquio e de Osaka, tendo assim levado à prática muitas das suas ideias. Isso, decerto, contribuiu para que o Japão desse um salto

qualitativo em matéria de investigação e alcançasse os países da vanguarda. O grande físico Heideki Yukawa que, em 1935, formulou a primeira teoria das forças nucleares (trabalho que lhe valeu o prémio Nobel de física de 1949) é, de alguma forma, o herdeiro deste "renascimento" com origem em Nagaoka.

Mas em que consistia, mais detalhadamente, o modelo de Nagaoka?

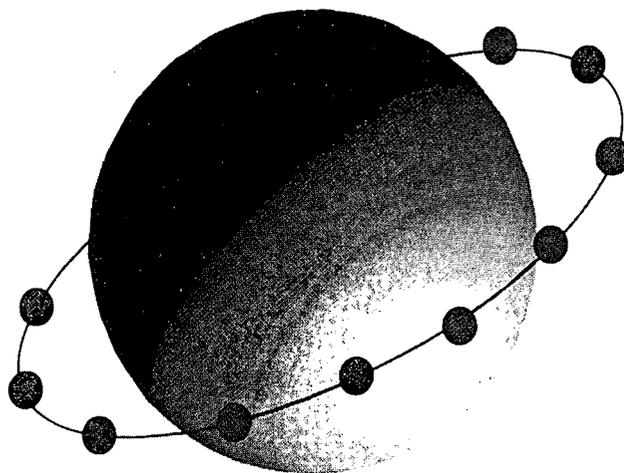
Tratava-se de um modelo para o átomo concebido com o propósito de procurar explicar os espectros de linhas e de bandas que, após os trabalhos pioneiros de Balmer em 1885, eram obtidos cada vez com mais rigor e analisados com maior pormenor (cabe aqui destacar o trabalho de Zeeman). Nagaoka, tal como Thomson, procurou explicar a ocorrência das linhas espectrais e a sua regularidade em função das oscilações de um sistema que representava, afinal, o átomo. São de Nagaoka as seguintes palavras, retiradas do seu artigo de 1904:

"O sistema que vou discutir consiste num elevado número de partículas de massa igual, dispostas num círculo a intervalos angulares regulares, repelindo-se com forças inversamente proporcionais ao quadrado das distâncias; no centro do círculo coloca-se uma partícula de massa elevada, atraindo as outras de acordo com a mesma lei da força. Se as partículas orbitarem aproximadamente com a mesma velocidade em torno do centro de atracção, o sistema permanecerá estável, em geral, se a força atractiva for suficientemente grande. Este sistema difere do sistema saturniano considerado por Maxwell pois as partículas repelem-se em vez de se atraírem. (...) Nas suas lições sobre electrões, Sir Oliver Lodge chama a atenção para um sistema saturniano que provavelmente será do tipo do acima referido. A objecção a um tal sistema de electrões é que ele acabará por atingir o repouso em consequência da perda de energia por radiação, se esta perda não puder ser compensada." [in *Philosophical Magazine* 7 (1904) 445]

Nagaoka estava consciente das limitações do modelo por este não garantir a estabilidade do átomo. Este ponto fraco, que também seria encontrado no modelo de Rutherford, só viria a ser resolvido pela Mecânica Quântica. Não obstante, o físico japonês chegou a explorar o seu modelo, e o acordo qualitativo entre previsões e dados experimentais encorajou-o mesmo a tecer algumas considerações sobre trabalhos futuros a realizar no quadro do modelo de Saturno. São dele as seguintes palavras, com que termina o artigo citado:

"Há vários problemas que possivelmente poderão ser estudados na hipótese do sistema de Saturno, tais como a afinidade química e a valência, a electrólise e muitas outras matérias ligadas com átomos e moléculas. O cálculo grosseiro e a exposição pouco aprofundada que fiz de muitos fenómenos pode servir de sugestão para uma solução mais completa da estrutura atómica."

O modelo de Thomson viria a ser publicado no mesmo volume do *Philosophical Magazine*. Mas não foi a inevitável exaustão da energia no modelo saturniano que levou Thomson a rejeitá-lo. Foi algo mais subtil e que tinha a ver com a existência de pelo menos um modo de oscilação instável dos electrões em torno das suas posições de equilíbrio. Essa instabilidade reflectia-se na ocorrência de amplitudes de oscilação irremediavelmente crescentes, que conduziam ao desmembramento do átomo.



O átomo segundo Nagaoka

No modelo atômico de J. J. Thomson, ao contrário do de Nagaoka, a carga positiva ocupa todo o volume do átomo e os electrões circulam em anel no interior desta carga positiva. Estas partículas passam a ficar sob a acção de uma força restauradora, proporcional à distância ao centro do átomo, em vez de estarem sujeitas à força atractiva inversamente proporcional ao quadrado da distância. Nestas circunstâncias já não ocorre qualquer tipo de instabilidade mecânica como a anteriormente referida.

O modelo de Thomson podia explicar fenómenos como a emissão de radiação, a dispersão de raios X e de luz visível, a absorção da luz, etc. a partir do movimento oscilatório dos electrões no interior do átomo, de acordo com a *electrodinâmica clássica*. Era, pois, um modelo dinâmico que, ainda hoje, pode ser visto como a teoria clássica do átomo<sup>1</sup> (aliás, se as cargas no átomo não estivessem em movimento acelerado não poderia haver emissão de radiação electromagnética).

<sup>1</sup> Refira-se que a descrição de agregados atômicos e metálicos — assunto da máxima actualidade, por onde passa hoje uma das fronteiras do conhecimento em física da matéria condensada — considera habitualmente, como ponto de partida, o chamado "modelo de geleia". Segundo este modelo, os iões são descritos classicamente de forma aproximadamente igual ao átomo de Thomson, i.e. são porções esféricas de matéria homogênea com carga positiva.

O seu autor e muitos outros cientistas da época encararam o modelo bastante a sério ao ponto de se terem realizado numerosos estudos quantitativos baseados nele. Viria, contudo, a ser questionado, por força dos resultados das experiências levadas a cabo por Marsden e Geiger e orientadas por Ernest Rutherford, de dispersão de partículas  $\alpha$  e  $\beta$  por finíssimas folhas metálicas. Estas experiências foram realizadas por volta de 1909, e conduziram, como é bem conhecido, ao estabelecimento do "átomo nuclear".

Como se disse, Nagaoka deslocou-se por esta altura (mais precisamente no último trimestre de 1910) à Europa, a fim de participar em duas conferências e visitar vários centros de investigação no Velho Continente, para melhor se inteirar dos progressos registados desde os seus tempos de estudante, cerca de quinze anos antes. O percurso de Nagaoka na Europa é conhecido com pormenor pois é descrito minuciosamente numa extensa carta que escreveu a Rutherford, em Fevereiro de 1911. Nessa missiva, Nagaoka agradece cordialmente a hospitalidade de Rutherford durante a sua visita a Manchester e relata assim a impressão que lhe deixou o equipamento experimental que estava a ser utilizado nas experiências de dispersão de partículas  $\alpha$ :

"... todos mostraram grande admiração pelos resultados esplêndidos obtidos com um equipamento tão simples. Parece-me que só um génio pode lidar com sistemas tão simples e obter resultados tão importantes que ultrapassam os que são obtidos com equipamentos mais complexos e delicados."

É de crer que Nagaoka tenha aproveitado o seu encontro com Rutherford para lhe referir as suas velhas ideias sobre a estrutura do átomo. Na ocasião dessa visita a hipótese de um modelo nuclear estava já experimentalmente confirmada. O artigo "The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom", onde Rutherford desenvolve o seu modelo atómico, seria publicado em Maio de 1911 no *Philosophical Magazine* e aí Nagaoka aparece citado a propósito do modelo atómico de Saturno. Refira-se, entretanto, que já em Março desse mesmo ano Rutherford publicara a nota "The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Rays and the Structure of the Atom", nos *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*. Neste artigo, as ideias sobre a estrutura do átomo estavam já expostas claramente:

"...[considere-se] um tipo de átomo que consiste numa carga eléctrica central concentrada num ponto, rodeada por uma distribuição esférica e uniforme de carga eléctrica em quantidade igual mas de sinal contrário."

Note-se que o modelo de Rutherford já não era um simples modelo intuitivo, como foram os de Thomson ou Nagaoka. Havia uma experiência crucial que fundamentava o modelo de átomo nuclear. Saliente-se também

que, ao longo deste século, a célebre experiência de Rutherford acabaria por ser "repetida" inúmeras vezes, agora noutros contextos, no estudo da estrutura da matéria. Na verdade, fazendo incidir matéria contra matéria, e analisando os efeitos de tais colisões, vão-se conhecendo cada vez melhor os constituintes dessa matéria. Para dar um exemplo, refiram-se as experiências realizadas em finais na década de 60 no Stanford Linear Accelerator Center, nos E.U.A., de dispersão inelástica profunda de electrões por protões, em estreita analogia com a dispersão de partículas alfa em finíssimas folhas de ouro, e que revelaram, pela primeira vez, a existência de quarks e a sua distribuição no interior dos bariões alvo. E refiram-se também as experiências, já mais sofisticadas, de colisões em "voo", que diariamente se realizam nos aceleradores de partículas.

São conhecidos de todos os desenvolvimentos posteriores do modelo de Rutherford, levados a cabo por Bohr, e que culminaram no estabelecimento do "modelo planetário". Em Outubro de 1911, Niels Bohr, que concluíra o seu doutoramento em Copenhaga, rumara a Inglaterra a fim de trabalhar com J.J. Thomson. Cedo, porém, acabaria por se mudar para Manchester para trabalhar no florescente laboratório de Rutherford na questão da estrutura do átomo, onde encontraria um ambiente muito mais aberto às suas "estranhas" ideias.

Os resultados do labor de Bohr seriam publicados no *Philosophical Magazine* numa série de três artigos, todos intitulados "On the Constitution of Atoms and Molecules", que apareceram em Julho, Setembro e Novembro de 1913 e a que alguém já chamou "Grande Trilogia". As ideias de Thomson sobre a constituição do átomo estavam tão implantadas que perduraram durante algum tempo. Atente-se, por exemplo, no facto de o modelo de Rutherford, apesar de ter uma base experimental sólida, quase não ter sido mencionado no famoso Congresso Solvay de 1911, que reuniu as maiores sumidades da época e onde, aliás, Rutherford participou.

Bohr teve a amabilidade de enviar a Nagaoka os seus trabalhos sobre a constituição de átomos e moléculas. Em resposta, o físico japonês enviou-lhe um postal, datado de 27 de Dezembro de 1913, com o seguinte texto:

"Meu caro Senhor

Do coração lhe agradeço a amabilidade de me ter enviado vários trabalhos sobre a estrutura atómica; parece estar intimamente ligada com o átomo saturniano de que me ocupei há cerca de 10 anos.

Seu

Nagaoka"

A física estava a transpor um novo limiar e a geração seguinte havia de tomar o modelo de Bohr como ponto de partida para novas aventuras.

Sendo a ciência um grande empreendimento colectivo, o papel dos indivíduos é, por vezes, difícil de julgar.

Saber qual o impacto efectivo do modelo de Nagaoka exigiria uma investigação mais aprofundada. No entanto, fica este breve registo de um episódio pouco divulgado da história dos modelos atómicos que, de alguma forma, ilustra os mecanismos através dos quais se vai construindo o saber.

#### BIBLIOGRAFIA

- BADASH, Lawrence — "Nagaoka to Rutherford, 22 February 1911", *Physics Today*, Abril (1967)
- BOHR, Niels — "Sobre a constituição de átomos e moléculas", tradução para português dos artigos originais publicados no "Philosophical Magazine" in "Textos fundamentais de Física Moderna — II volume, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (1969). Precedendo os artigos de Bohr o volume contém uma "Introdução", escrita por Léon Rosenfeld, que começa justamente com uma referência relativamente extensa aos sistemas saturnianos.
- CHADWICK, James (dir. científica) — "The collected papers of Lord Rutherford of Nelson", Vol. 2, George Allen & Unwin Ltd., Londres (1963)

- HEILBRON, John L. — "J. J. Thomson and the Bohr atom", *Physics Today*, Abril 1977
- HOLTON, Gerald — "The thematic origins of scientific thought", Harvard Uni. Press, Cambridge (Ma) (1988)
- NAGAOKA, H. — "Kinetics of a System of Particles Illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity", *Philosophical Magazine* 7 (1904) 445
- ROSENFELD, Léon (Ed.), "Niels Bohr collected works", Vol. 1 e 2, North Holland, Amesterdão (1981)
- SEGRÉ, E. — "Les physiciens modernes et leurs découvertes", Fayard, Paris (1983)
- WEINBERG, Steven — "The discovery of subatomic particles", Freeman, Nova Iorque (1990)
- TATON, René (dir. científico) — "Histoire Général des Sciences", Tomo III, Vol. 2, Presses Univ. de France (1964)

**Manuel Fiolhais é Professor Auxiliar do Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra; Maria da Conceição Ruivo é Professora Associada na mesma Instituição.**

## O COMETA HYAKUTAKE

O sistema solar interior está actualmente a ser visitado por um cometa descoberto com um par de poderosos binóculos pelo astrónomo amador japonês Yuji Hyakutake a 30 de Janeiro de 1996 quando este ainda apresentava uma grandeza 10 e se localizava para além da órbita de Marte.

A imagem da capa foi obtida com o telescópio reflector f/10 do Centro de Astrofísica da Universidade do Porto que tem um espelho de 28 cm de diâmetro e está equipado com uma câmara CCD. Esta imagem foi obtida com um filtro-V na banda do visível (4800-7200 Angstroms) usando uma exposição de 10 segundos.

Apesar das condições atmosféricas adversas da noite e das dificuldades acrescentadas pela própria cidade devido ao excesso de poluição luminosa em especial das lâmpadas de iluminação pública ainda foi possível observar este cometa com algum detalhe. A cauda que é claramente visível nesta imagem resulta da passagem do cometa na vizinhança do Sol resultante do efeito conjugado do vento solar e pressão de radiação que alinham as partículas numa direcção radial e oposta à do Sol. Nesta imagem a cauda estende-se por cerca de 11 segundos de arco (1000 Km) para sudoeste até se confundir com o brilho do céu, enquanto se desloca para Norte (topo da imagem).

Os cometas apresentam uma região central muito brilhante (coma) que é composta por poeiras e gases e que resulta da sublimação das camadas superficiais do núcleo sólido composto maioritariamente por gelo, material rochoso e hidrocarbonetos. Este efeito será mais pronunciado na altura da passagem pelo Sol (periélio), tornando o cometa mais brilhante. Observações recentes indicam a presença de água pesada (H<sub>2</sub>O) numa taxa de 1:3600 relativamente à água normal (H<sub>2</sub>O), de acordo com o valor encontrado nos oceanos. No caso do cometa Halley esta taxa era do dobro. O diâmetro deste cometa foi estimado em

cerca de 1-3 Km usando ecos de radar e apresenta um período de rotação muito curto de 6.1 horas.

O diagrama mostra a posição do cometa nas várias datas assinaladas. A maior aproximação do cometa à Terra teve lugar no dia 25 de Março e a distância foi de 0.102 U.A. (15300000 Km), ou seja, cerca de um décimo da distância da Terra ao Sol. Ao aproximar-se do Sol, o cometa Hyakutake irá aumentar de brilho, atingindo uma grandeza 0 ou -1 aquando da passagem no periélio em 1 de maio. No entanto, o brilho do Sol irá dificultar a sua visibilidade ofuscando-o. Continuando a sua viagem interplanetária, o cometa deixará de ser visível do hemisfério Norte e passará ao hemisfério Sul, onde poderá ser acompanhado na sua provavelmente derradeira passagem pelo Sistema Solar ... É que o regresso do Hyakutake só terá lugar daqui a 18 mil anos!

Sendo o cometa mais brilhante dos últimos 20 anos serve como de anunciador da chegada do cometa Hale-Bopp que ao que se espera será um dos grandes acontecimentos astronómicos do próximo ano e que nesta altura se encontra para além da órbita de Júpiter a cerca de 6 U.A. (900 milhões de Km).

*Amadeu Fernandes  
António Pedrosa*

