

FÍSICA

1.º CENTENÁRIO DA DESCOBERTA DOS RAIOS X



WILHELM CONRAD ROENTGEN (1845-1923)

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

Gazeta de Física

Propriedade da Sociedade Portuguesa de Física

ISSN: 0367/3561

Registo na DGCS n.º 107280 de 13/5/80

Depósito Legal n.º 51419/91

Publicação Trimestral

N.º 3 — 1995

Redacção e Administração

Avenida da República, 37-4.º — 1000 Lisboa

Telefone (01) 7973251

Fax (01) 7952349

Directores

João Bessa Sousa (FCUP)

Filipe Duarte Santos (FCUL)

Carlos Fiolhais (FCTUC)

Comissão de Redacção e Administração

Carlos Matos Ferreira (IST)

Margarida Telo da Gama (FCUL)

Ana Maria Eiró (FCUL)

Maria Margarida Cruz (FCUL)

Preparação e Revisão de Texto

Florbela Martins Teixeira

Execução Gráfica

Imprensa Portuguesa

Rua Formosa, 108-116 — 4000 Porto

Telefone (02) 2002466

Fax (02) 2015105

Tiragem: 2000 exemplares

Preço avulso: 600\$00

Assinatura anual (quatro números):

2000\$00 (Continente, Açores, Madeira e Macau)

35 US dólares (estrangeiro)

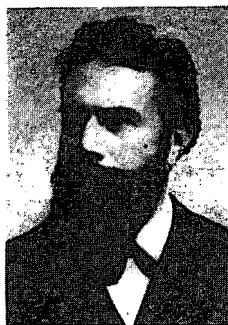
Publicação subsidiada pela Junta Nacional
de Investigação Científica e Tecnológica

A **Gazeta de Física** publica artigos, com índole de divulgação, considerados de interesse para estudantes, professores e investigadores em Física. Deverá constituir também um espaço de informação para as actividades da SPF, nomeadamente as suas Delegações Regionais e Divisões Técnicas. Os artigos podem ter índole teórica, experimental ou aplicada, visando promover o interesse dos jovens pelo estudo da Física, o intercâmbio de ideias e experiências profissionais entre os que ensinam, investigam ou aplicam a Física. As opiniões expressas pelos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Os **manuscritos** devem ser submetidos em duplicado, dactilografados em folhas A4 a dois espaços (máximo *equivalente* a 4000 palavras, incluindo figuras; 1 figura corresponde em média a 140 palavras). Deverão ter sempre um curto resumo, não excedendo 130 palavras. Deve ser indicado o(s) endereço(s) completo(s) das instituições dos autores. Agradece-se o envio do texto em disquete (de preferência «Word» para Macintosh ou PC). Os originais de figuras devem ser apresentados em folhas separadas, prontos para reprodução. Endereço para correspondência: **Gazeta de Física — Sociedade Portuguesa de Física, Av. da República, 37-4.º — 1000 Lisboa.**

Na capa: Wilhelm Conrad Roentgen.

No ano de 1995 decorrem as comemorações do primeiro Centenário da Descoberta dos Raios X, pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen, em 8 de Novembro de 1895. A Roentgen foi atribuído o primeiro Prémio Nobel de Física, no ano de 1901.



SUMÁRIO

2

DESCOBERTA E NATUREZA DOS RAIOS X

Lídia Salgueiro

8

EVOcando A FIGURA DE J. GOMES FERREIRA

José Pinto Peixoto

11

**O ESTUDO DOS RAIOS X E O INÍCIO DAS INVESTIGAÇÕES EM FÍSICA
NAS UNIVERSIDADES PORTUGUESAS**

Fernando Bragança Gil

18

RADIAÇÃO DE SINCROTRÃO — A MELHOR FONTE DE RAIOS X

Maria José B. M. de Almeida

22

HEINRICH HERTZ — VIDA, OBRA E REPERCUSSÕES

M. de Abreu Faro

28

**A CONDENSAÇÃO DE BOSE-EINSTEIN E A SUA RECENTE OBSERVAÇÃO
EXPERIMENTAL**

E. Seabra Lage

DESCOBERTA E NATUREZA DOS RAIOS X

LÍDIA SALGUEIRO

Centro de Física Atómica da Universidade de Lisboa

Neste artigo faz-se uma breve síntese da descoberta dos Raios X, feita por Wilhelm Conrad Roentgen, em 1895, referindo-se ainda factos correspondentes à sua biografia.

Descrevem-se algumas experiências, feitas por físicos notáveis, que levaram à descoberta da natureza da referida radiação e ao conhecimento de algumas das suas propriedades.

São também referidas, a título de informação, algumas das suas mais importantes aplicações actuais.

Primeiro Centenário da Descoberta dos Raios X

Wilhelm Conrad Roentgen nasceu em 1845 em Lenneps, Alemanha.

Formou-se na Politécnica de Zurich em 1866 e foi professor na Universidade de Estrasburgo, no Instituto Giessen e nas Universidades de Würzburg e Munich. Nesta última Universidade dirigiu o Instituto de Física.

O que o imortalizou foi a descoberta dos Raios X, feita quando estava em Würzburg, em 8 de Novembro de 1895, que lhe permitiu ser galardoado com o Prémio Nobel de Física em 1901 (Fig. 1).

Estudos feitos por outros investigadores, designadamente por Lenard e Wiedman sobre raios catódicos poderiam ter levado os referidos cientistas a esta famosa descoberta.

No entanto, os resultados que obtiveram não os conduziram a uma análise, que permitisse mostrar a existência dos referidos raios.

Roentgen aproveitou umas férias para se dedicar ao estudo dos raios catódicos, estudo que o levou à sua famosa descoberta.

Colocou numa câmara escura um tubo de raios catódicos dentro de uma caixa de cartão preta; perto da caixa estava uma folha de papel com platino-cianeto de

bário. Quando o tubo estava a trabalhar o papel tornou-se fortemente fosforescente.

Roentgen verificou ainda que placas fotográficas, protegidas da luz, ficavam impressionadas quando expostas nas condições anteriores.

Fotografou a mão de sua mulher, que ficou horrorizada ao ver os ossos, lembrando-lhe a ideia da morte!

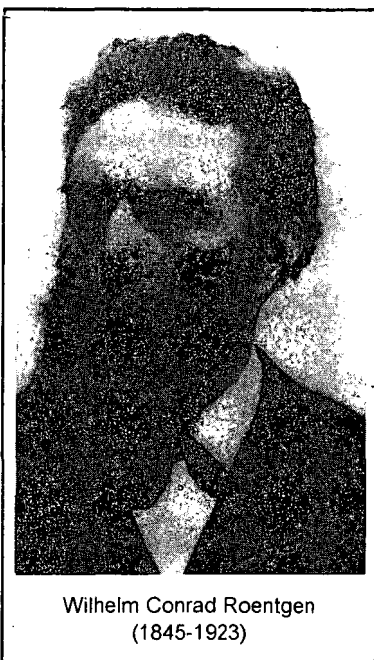
Concluiu que o tubo emitia uma radiação penetrante, ainda não conhecida, e que, por essa razão, denominou Raios X.

Roentgen trabalhou afanosamente para investigar a natureza desta nova radiação.

Verificou que os raios se produziam a partir da região em que embatiam os raios catódicos.

Em 28 de Dezembro de 1895 enviou um manuscrito preliminar da sua descoberta ao Presidente da *Physikalisch-Medicinischen Gesellschaft* de Würzburg. No entanto, a sua primeira comunicação foi feita em 23 de Janeiro de 1896 e, após a publicação do trabalho referente à sua espectacular descoberta, enviou separatas aos seus amigos cientistas.

Roentgen era um homem que não gostava de fazer publicidade e evitava contactos pessoais; no entanto, não pôde



Wilhelm Conrad Roentgen
(1845-1923)



Fig. 1 — Wilhelm Conrad Roentgen no seu laboratório da Universidade de Würzburg, onde teve lugar a descoberta dos Raios X

recusar um convite para apresentar a sua descoberta em Berlim.

Demonstrou o poder penetrante desta radiação, fazendo passar um feixe de Raios X através da mão do anatomista e fisiologista Kölliker.

A fotografia dos ossos fez, desde logo, vislumbrar a importância desta técnica em medicina.

Fez mais duas comunicações, publicadas na revista *Annalen* com as datas de 9 de Março de 1896 e Março de 1897.

Roentgen determinou algumas propriedades desta radiação.

Assim, verificou que não eram desviadas por campos eléctricos ou magnéticos, que se propagam em linha recta, que ionizam os gases, que produzem fluorescência em determinadas substâncias e que atravessam corpos opacos de várias espessuras e de diferentes materiais.

Realizou um conjunto de experiências, que lhe permitiu concluir que a absorção produzida pelos corpos era função da sua massa específica.

Elaborou um quadro respeitante à espessura relativa de vários corpos para produzirem a mesma absorção.

Os resultados a que chegou estão indicados na Tabela I:

Tabela I

Elementos	Espes.(mm)	Espes.relat.	Densidade
Platina	0,018	1	21,5
Chumbo	0,015	3	11,3
Zinco	0,10	6	7,1
Alumínio	3,5	200	2,6

Esta tabela mostra que para o alumínio produzir aproximadamente a mesma absorção do que a platina tem que ter uma espessura cerca de 200 vezes maior do que a platina, enquanto que a massa específica da platina é cerca de 10 vezes superior à do alumínio.

Verificou que uma lâmina de chumbo de 1,5 mm de espessura era praticamente opaca aos Raios X produzidos, o que tornou este metal utilizado posteriormente para protecção das referidas radiações.

Numa das memórias apresentada numa sessão da Sociedade físico-química de Würzburg, termina:

Que são estes raios? Dado que não são raios catódicos poder-se-ia supor, atendendo à sua faculdade de produzir fluorescência e acção química que são devidos a radiação ultravioleta. No entanto, um conjunto de provas está em contradição com essa hipótese.

Com efeito, as suas propriedades mostram que se comportam de modo diferente do das radiações ultravioletas e também do das radiações visíveis e infravermelhas, já conhecidas.

As primeiras ampolas produtoras de Raios X, designadas por ampolas de Crookes, eram tubos de descarga a baixa pressão (Figs. 2 e 3).

A Fig. 2 corresponde à ampola usada por Roentgen.

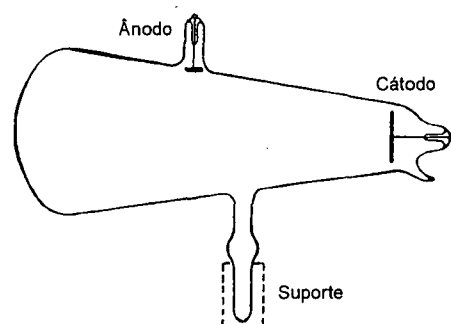


Fig. 2 — Foi com uma ampola deste tipo que Roentgen descobriu os raios X. Os raios originários do cátodo embatem na extremidade arredondada da ampola, atravessando-a para o exterior.

Posteriormente, em 1913, empregaram-se também ampolas de vácuo permanente (tipo Coolidge, Fig. 4), em que os Raios X são produzidos por embate de electrões num anticatódio.

Após a obtenção de radiografias utilizou-se a observação de objectos sobre um alvo tornado fluorescente pela acção dos Raios X.

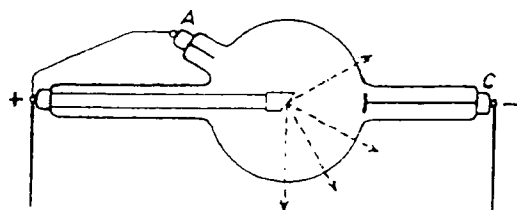


Fig. 3 — Ampola de Crookes, que é um tubo de descarga eléctrica a baixa pressão, possuindo um eléctrodo positivo (A, ânodo) e um eléctrodo negativo (C, cátodo).

Designou-se esta técnica por fluoroscopia.

A Fig. 5 corresponde a um dos primeiros aparelhos utilizados para obter a radiografia da mão de um indivíduo.

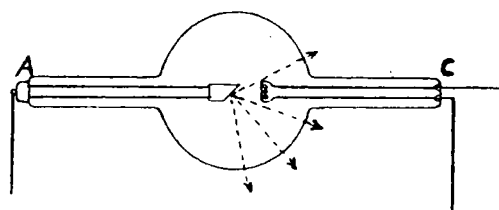


Fig. 4 — Ampola de vácuo permanente, tipo Coolidge, para a produção de Raios X.

Nesta figura *B* é uma bobina de Ruhmkorff e *T* um tubo de raios catódicos.

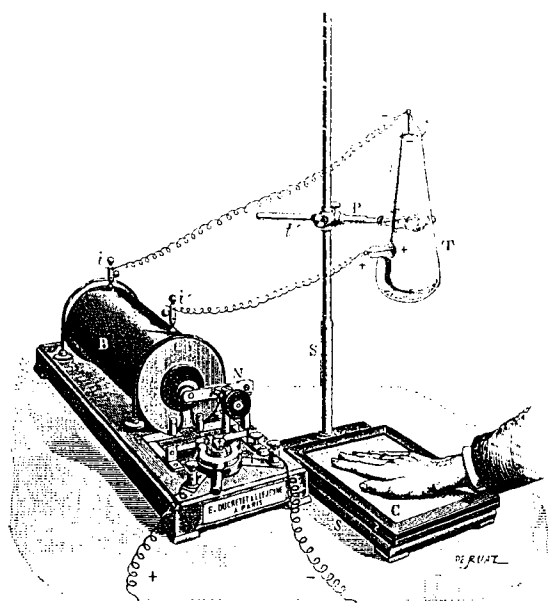


Fig. 5 — A bobina de Ruhmkorff servia para excitar a ampola de Raios X com uma elevada diferença de potencial eléctrico, aplicada entre o ânodo e o cátodo da ampola. A fig. mostra o dispositivo experimental utilizado por Roentgen em 1895.

As primeiras experiências feitas em França sobre os Raios X devem-se a M. Gaston Seguy.

A Fig. 6 representa uma das primeiras radiografias feita com um tempo de exposição de 40 mn. Foi objecto de uma comunicação apresentada por M. Poincaré à Academia das Ciências de Paris e representa um marcador de página e um porta moedas, contendo uma moeda.

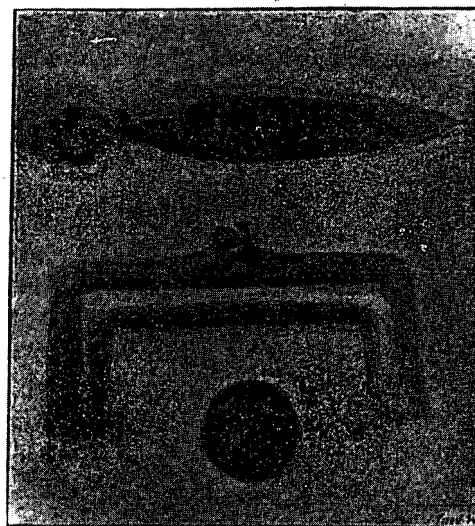


Fig. 6 — Uma das primeiras radiografias, representando um marcador de página e um porta moedas, contendo uma moeda.

A Fig. 7, obtida também por M. G. Seguy representa várias espécies de conchas, umas relativamente permeáveis aos Raios X, apresentando sombras mais ou menos acentuadas, correspondendo à sua estrutura interna e outras mostrando grande opacidade, o que denota a diferença de composição das substâncias que as constituem.



Fig. 7 — Radiografias de várias espécies de conchas, apresentando diferentes graus de absorção dos raios X.

M. M. Imbert e Bertin distinguiram o marfim animal de um marfim vegetal extraído da albumina de uma palmeira da América, empregada muitas vezes em substituição da primeira no fabrico de pequenos objectos. O marfim vegetal, com espessura de 3 cm apresenta a mesma absorção que o marfim animal com espessura de 0,6 mm, isto é, 5 vezes menor.

M. M. Lestenvère e D. Levrat mostraram que utilizando Raios X se pode distinguir o sexo dos bichos de seda. As crisálidas fêmeas contêm ovos no seu interior produzindo-se uma maior absorção da radiação.

Como o rendimento na produção da seda é maior nas fêmeas esta verificação pode ter algum interesse.

Uma aplicação curiosa refere-se ao estudo de conchas de animais, durante o seu desenvolvimento, utilizando Raios X. Na Fig. 8 indica-se uma radiografia da concha de um caracol existente nas Índias Orientais. Este estudo pôs em evidência o facto dos animais vivendo em conchas se moverem dentro da concha, que vai alargando à medida que vão crescendo. Os referidos animais vão fechando o espaço atrás de si com delicadas paredes transversais.

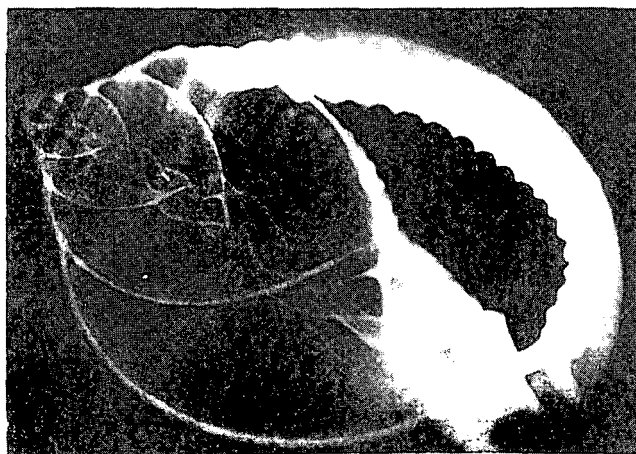


Fig. 8 — Radiografia da concha de um caracol existente nas Índias Orientais; estes estudos revelaram a mobilidade do caracol no interior da sua concha.

M. Ranvez utilizou radiografias para estudar matérias vegetais, pondo em evidência falsificações, mais frequentes, principalmente as que resultam da adição de substâncias minerais.

Com efeito, as matérias orgânicas são, em geral, mais transparentes aos Raios X do que as de origem mineral. Assim, a adição de uma certa quantidade de uma substância de origem mineral torna a substância falsificada mais opaca, o que pode ser verificado por exame radiológico. Este método de análise exige apenas pequenas quantidades de matéria.

A falta de conhecimento sobre a natureza dos Raios X levou a não se atender à sua acção prejudicial e a não se fazer a necessária protecção.

Por exemplo, em Julho de 1896, Mr. Hawks, demonstrador de roentgenografia, sofreu várias queimaduras e teve problemas de visão devido ao emprego de Raios X sem os cuidados necessários.

Roentgen realizou numerosos trabalhos fora do domínio dos Raios X.

Publicou cerca de 58 artigos, sendo apenas três dedicados aos Raios X.

O seu sucesso em vários ramos da Física deve-se em grande parte, à sua enorme cultura e à sua facilidade de passar de uma concepção teórica para a sua realização experimental.

Após a publicação dos artigos referentes a Raios X dedicou-se ao estudo de propriedades de cristais, que já anteriormente o haviam interessado.

É de estranhar que após a sua famosa descoberta voltasse a dedicar-se a outros ramos da Física e não prosseguisse investigações nesse domínio, deixando essa tarefa para outros investigadores.

Roentgen havia reconhecido nos Raios X propriedades semelhantes aos raios luminosos. Diversos investigadores reuniram com grande dificuldade resultados, que reforçaram essa opinião.

Stokes foi o primeiro físico a sugerir a sua natureza electromagnética e previu a sua extensão para além da região visível, no domínio de menores comprimentos de onda.

Barkla mostrou que de facto se tratava de radiação electromagnética, a partir de estudos da sua difusão por elementos.

Demonstrou a polarização dos Raios X.

Descobriu, a partir de experiências de absorção, que os Raios X emitidos por vários elementos são formados por grupos característicos, que designou por K, L, M..., nome também hoje usado para os níveis atômicos. O facto de estar convencido da existência de radiação mais penetrante do que a correspondente ao grupo K levou-o a não empregar as primeiras letras do alfabeto A, B,... e a começar pela letra K.

Mais tarde descobriu-se a radiação gama, de comprimento de onda inferior ao dos Raios X.

Barkla foi galardoado com o Prémio Nobel de Física em 1917.

Nas Tabelas II e III indicam-se, respectivamente, os valores das frequências e dos comprimentos de onda no vácuo das radiações electromagnéticas.

Tabela II

Designação	Frequência (Hertz)
Ondas de rádio	$< 3 \times 10^{12}$
Infravermelho	3×10^{12} a 37×10^{13}
Visível	37×10^{13} a 75×10^{13}
Ultravioleta usual	75×10^{13} a 15×10^{14}
Ultravioleta curto	15×10^{14} a 3×10^{16}
Raios X moles	3×10^{16} a 3×10^{18}
Raios X usuais	3×10^{18} a 6×10^{19}
Raios gama	$> 6 \times 10^{19}$

Tabela III

Designação	Comprimento de onda (vácuo)
Ondas de rádio	$> 0,1$ mm
Infravermelho	100μ a $0,8 \mu$
Visível	$0,8 \mu$ a $0,4 \mu$
Ultravioleta usual	$0,4 \mu$ a $0,2 \mu$
Ultravioleta curto	$0,2 \mu$ a $0,01 \mu$
Raios X moles	100 \AA a 1 \AA
Raios X usuais	1 \AA a $0,05 \text{ \AA}$
Raios gama	$< 0,05 \text{ \AA}$

Para estudar espectros de Raios X as redes de difração, utilizadas na época, não permitiam suficiente separação das radiações constituintes do feixe.

Ocorreu a Laue a ideia de utilizar cristais para esse fim, baseando-se numa hipótese de Bravais, segundo a qual os átomos e moléculas se dispõem regularmente, formando uma rede a três dimensões em que, no caso do cloreto de sódio, os átomos do cloro e de sódio ocupam, alternadamente, os vértices de cubos elementares (Fig. 9).

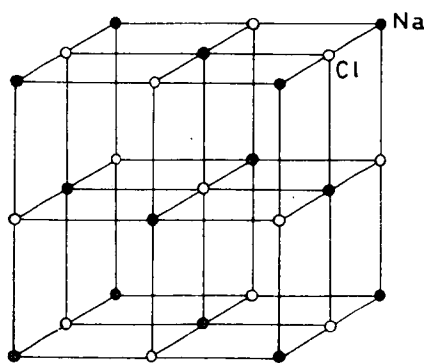


Fig. 9 — Rede cristalina do cloreto de sódio.

Max von Laue, juntamente com Friedrich e Knipping utilizaram a reflexão selectiva dos cristais, empregando um espectro contínuo de Raios X, colimado, um cristal e uma chapa fotográfica.

Obtiveram uma mancha central cercada por pequenas manchas que punham em evidência a simetria do cristal.

Designou-se este conjunto por *lauegrama* ou diagrama de Laue.

Na Fig. 10 representa-se o dispositivo empregado por Friedrich e Knipping; nesta figura *A* corresponde a um alvo de alumínio, *B* a um alvo de chumbo; *D* e *C* são, respectivamente, diafragmas de chumbo e um cristal; *P* e *E* correspondem à placa fotográfica e a um alvo visor.

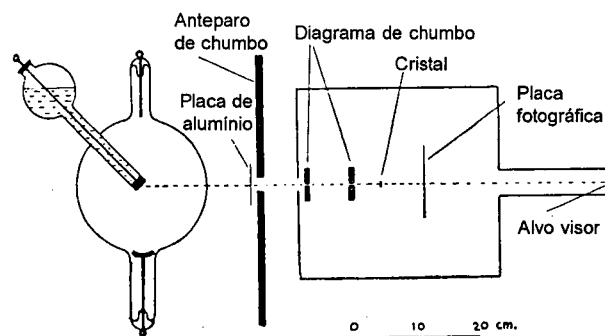


Fig. 10 — Dispositivo experimental utilizado por Friedrich e Knipping para demonstrar a difração de raios X, através da sua passagem através de um cristal.

A Fig. 11 representa um diagrama de Laue.

Laue enviou a Einstein uma das fotografias obtidas. Einstein escreveu em 1912:

Laue enviou-me uma fotografia, mostrando o fenómeno da difracção, utilizando Raios X. É uma das coisas mais maravilhosas que já vi; a difracção, por moléculas simples, cujo arranjo no espaço é assim repetido.

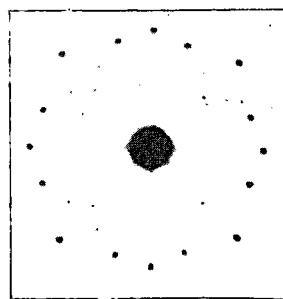


Fig. 11 — Diagrama de Laue.

Laue disse, a propósito do trabalho que lhe mereceu o Prémio Nobel em 1914:

Fui afortunado por me ter lembrado de dirigir um feixe de Raios X para um cristal e de ter tido que aprender cristalografia.

Laue deu um terço do dinheiro correspondente ao Prémio Nobel recebido aos seus colaboradores Friedrich e Knipping.

Em 1913 William Bragg e seu filho W. L. Bragg estudaram a reflexão selectiva dos Raios X pelos cristais e projectaram um espectrómetro para Raios X.

As suas experiências confirmaram que os Raios X são de natureza ondulatória e que actuam como uma espécie de rede de difracção.

Mostraram ainda como calcular os comprimentos de onda dos Raios X e obtiveram resultados sobre a estrutura dos cristais por difracção dos Raios X.

Foram galardoados com o Prémio Nobel de Física em 1915; é o primeiro caso em que pai e filho receberam o referido prémio simultaneamente.

Lawrence Bragg estabeleceu a conhecida lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

sendo n um número inteiro, λ o comprimento de onda da radiação empregada e θ o ângulo de Bragg.

Henry Bragg imaginou um espectrómetro de Raios X com o qual foram determinadas estruturas de cristais.

Maurice de Broglie, um irmão de Louis de Broglie, foi um dos primeiros cristalógrafos de França, trabalhando em difracção de Raios X.

Foram também importantes os trabalhos de Moseley que mostraram que os elementos se devem colocar por ordem crescente do seu número atómico, isto é, atendendo ao número de electrões extranucleares. A sua lei permitiu explicar algumas aparentes contradições da tabela de Mendeleiev.

Em 1924 K. M. Siegbahn obteve o Prémio Nobel de Física por estudos sobre espectroscopia de Raios X e o mesmo Prémio foi concedido a A. H. Compton devido a estudos de dispersão de Raios X por electrões.

O último artigo de Roentgen sobre fotocondutibilidade, de cerca de 195 páginas, foi uma das maiores contribuições para a Física, nesse ramo da ciência.

Reformou-se da cátedra em Munich em 1920.

Faleceu em 1923, estando portanto ainda vivo quando cientistas mencionados estudaram a origem e propriedades da radiação por ele descoberta, tendo alguns sido galardoados com o Prémio Nobel pelos trabalhos referidos.

Em 1923 foi publicado na revista *Physikalische Zeitschrift* um artigo sobre a sua morte. Nesse artigo W. F. Friedrich descreve-o como o primeiro de todos os Físicos Experimentais.

Desde a descoberta dos Raios X por Roentgen até aos nossos dias as aplicações da referida radiação tem-se desenvolvido em muitos ramos da ciência.

A instrumentação médica foi-se aperfeiçoando e passaram também a empregar-se outros modos de produção de Raios X, como o sincrotrão, o PIXE, etc.

Em 1940 criou-se, sob a orientação de Manuel Valadares, o Centro de Estudos de Física, na Faculdade de Ciências de Lisboa, onde foram realizadas investigações de espectrometria de Raios X, em átomos ionizados; razões várias levaram a que a referida investigação prosseguisse no actual Centro de Física Atómica. Até 1990 foram realizados doutoramentos e publicados trabalhos em revistas nacionais e estrangeiras.

Neste Centro prosseguem agora investigações no domínio da biofísica, poluição, etc. utilizando Radiação X.

Actualmente numerosos organismos, empresas e Universidades utilizam esta radiação para aplicações em âmbitos diversos.

Citaremos, a título de exemplo, a análise química por fluorescência de Raios X, estudos de história de arte e arqueologia, química forense, astronomia, biofísica, poluição ambiental, etc.

Apesar do interesse indiscutível de todas estas aplicações parece-nos poder afirmar que o desenvolvimento, do ponto de vista humano, mais beneficiado, foi o referente às aplicações médicas.

BIBLIOGRAFIA

- BRAGG, W. H. and BRAGG, W. L. — *X-Rays and Crystal Structure*, London, George Bell and Sons Ltd, 1925.
- DE BROGLIE, M. e DE BROGLIE, L. — *Introduction à la Physique des Rayons X et Gamma*, Paris, Gauthier-Villars, 1923.
- CLARK, G. L. — *Applied X-Rays*, New York, Mc Graw-Hill Book Company, Inc., 1955.
- COMPTON, A. H. and ALLISON, S. K. — *X-Rays in Theory and Experiment*, New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1935.
- GIBERT, A. — *Origens Históricas da Física Moderna*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1983.
- NICOLLE, J. — *Roentgen et l'ère des Rayons X*, Paris, Seghers, 1965.
- SALGUEIRO, L. e G. FERREIRA, J. — *Introdução À Física Atómica e Nuclear*, vol. I, 1970.
- WEEKS, M. and LEICESTER, H. M. — *Discovery of elements*, Journ. of Chem. Educ., Easton, P. A., 1968.

Lidia Salgueiro é Professora Jubilada da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

EVOcando A FIGURA DE J. GOMES FERREIRA

JOSÉ PINTO PEIXOTO

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

No ano das comemorações do primeiro Centenário da Descoberta dos Raios X, evoca-se neste número a figura do professor José Gomes Ferreira, investigador que muito contribuiu para a consolidação da investigação neste domínio em Portugal, e a quem a Sociedade Portuguesa de Física muito deve, pela contribuição dada às suas actividades e, de um modo muito especial, à publicação da *Gazeta de Física*.

Neste número da *Gazeta de Física*, dedicado ao centenário da descoberta dos Raios X por W. Conrad Roentgen, aprez-nos recordar um investigador dedicadíssimo, neste domínio, o professor J. Gomes Ferreira, falecido em 9 de Agosto de 1992.



*J. Gomes Ferreira
1923-1992*

Uma evocação da sua acção como professor e investigador, e da sua colaboração com a Academia das Ciências, o INIC, a SPF e outras Instituições.

J. Gomes Ferreira foi contratado como assistente de física da Faculdade de Ciências de Lisboa, em Março de 1949.

Após a realização de provas de doutoramento, em 1955, fez concurso para Professor Agregado (1965), tendo sido apro-

vado por unanimidade.

Em Dezembro de 1966, prestou provas para professor Catedrático de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa, tendo sido aprovado em mérito absoluto e em mérito relativo. Tomou posse deste cargo em 1967.

O facto de nos referirmos ao Prof. Gomes Ferreira, neste número da *Gazeta de Física*, resulta da sua forte interligação com esta revista, durante vários anos, con-

tribuindo, notavelmente, para garantir a possibilidade da sua publicação.

Com efeito, a *Gazeta de Física*, fundada em 1946, por A. Gibert, nunca auferiu de qualquer subsídio, vivendo exclusivamente do contributo dos assinantes (com assinaturas frequentemente atrasadas...) e de anúncios, alguns sem qualquer ligação com a física, obtidos à custa do esforço da comissão da redacção, que muitas vezes os tinha que solicitar pessoalmente.

O Prof. J. Gomes Ferreira integrou a comissão de redacção desde 1950 até 1976. A sobrevivência da revista, durante esse período, foi obtida, lutando com dificuldades quase insuperáveis.

Estes factos levaram à integração da revista, em 1976, na Sociedade Portuguesa de Física, o que permitiu o seu desenvolvimento, a sua expansão e uma vida sem preocupações.

O Prof. Gomes Ferreira, apesar de ter dedicado a sua vida inteira ao ensino e à investigação, nos domínios da radioactividade e, mais especialmente, à Espectrometria de Raios X e de ter pertencido à Redacção da revista *Portugaliae Physica*, aceitou várias tarefas, que lhe foram solicitadas e de que destacaremos, apenas, algumas.

Assim, dirigiu o Laboratório de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa,

desde Abril de 1969 a Março de 1974, com uma interrupção por ausência no estrangeiro, por lhe ter sido concedida uma licença sabática. Durante a referida licença realizou um estágio de 4 meses como *Visiting Professor no Transuranium Research Laboratory — Oak Ridge National Laboratory (USA)*, tendo realizado trabalho de investigação com o Doutor M. O. Krause, de que publicou alguns resultados.

Foi director do Instituto Geofísico Infante D. Luís, de 1967 a 1969.

Foi eleito para o Conselho de Gestão do Laboratório de Física em Maio de 1974.

Soube conciliar sempre o ensino e a investigação com outros cargos, tendo sido Vice-Reitor da Universidade de Lisboa, desde 1980 até 1986.

Foi eleito Presidente do Departamento de Física da Universidade de Lisboa, tendo tomado posse em 1986, ano em que pediu a rescisão deste cargo por motivo de doença.

O Prof. Gomes Ferreira regeu vários cursos práticos e teóricos, que não consideramos de interesse enumerar.

De Abril de 1956 a Julho de 1957 estagiou, subsidiado pelo Instituto de Alta Cultura e com a categoria de *visiting scientist*, no Department of Natural Philosophy da Universidade de Edimburgo, sob a direcção do Prof. N. Feather. Ingressou no grupo orientado pela Doutora M. A. S. Ross, tendo realizado trabalhos de investigação em Espectroscopia Nuclear, designadamente, em fenómenos de interacção do núcleo com o cortejo electrónico: rendimentos de níveis atómicos (fluorescência, Auger e Coster-Kronig) de elementos transuranianos e espectrografia de electrões de conversão interna com placas nucleares; destes estudos foram publicados alguns resultados.

Durante a sua estadia na Grã-Bretanha frequentou, ainda, um curso sobre radioisótopos na Escola de Isótopos de Harwell, o que lhe foi proveitoso para a organização de aulas práticas de Física Atómica e Nuclear.

Em 1961, a Academia das Ciências de Lisboa conferiu-lhe *ex-aequo*, o prémio Artur Malheiros de Ciências Físicas e Químicas pelo trabalho *Contribuição para o estudo, com placas nucleares, do esquema de desintegração do ^{229}Th* .

Foi supervisor de Seminários e estágios e interveio em numerosas provas de concursos universitários e do ensino secundário.

Em 1971, a convite da Universidade de Paris Sud (Orsay) foi membro de um júri de doutoramento de Estado (tese em Espectroscopia Experimental), realizado na Faculdade de Ciências da referida Universidade.

A convite da Universidade Pierre et Marie Curie (Paris VI) participou como *rapporteur de thèse* e membro

do júri de um Doutoramento de Estado (tese em Espectrometria de Raios X), realizado na referida Universidade.

Participou em Conferências e Congressos abaixo indicados, onde apresentou comunicações científicas, em colaboração com investigadores do seu grupo de investigação:

Congressos Luso-Espanhóis para o Progresso das Ciências (1951 a 1974).

Conferências Nacionais de Física, realizadas em Portugal.

Congresso Internacional X-Ray Processes in Matter, realizado em Hensinquia, Otaniemi (18/7/74 a 1/8/74)

Second International Conference on Inner Shell Ionization Phenomena, Freiburg (19/3/76 a 2/4/76).

International Conference on X-Ray and XUV Spectroscopy-ICX XUV (1/9/78).

International Conference on X-Ray Processes and Inner Shell Ionization (25-29/8/80), realizada em Stirling, na Escócia (UK).

X-82 International Conference on X-Ray and Atomic Inner Shell Physics (1982), realizada em Eugene — Oregon, USA.

International Conference on X-Ray and Inner Shell Processes in Atoms, Molecules and Solids, realizada em Leipzig (Agosto de 1984).

ISRP3-3rd International Symposium on Radiation Physics, realizado em Ferrara de 30 de Setembro a 4 de Outubro de 1985.

14th International Conference on X-Ray and Inner Shell Processes (X-87) Paris (1987).

Orientou, de colaboração, os trabalhos de investigação científica de alguns assistentes das Universidades de Lisboa e do Porto. Destes estudos resultaram cinco teses de doutoramento, quatro na Universidade de Lisboa e uma na do Porto, em que os candidatos foram aprovados com elevada classificação.

Alguns dos assistentes que com ele trabalharam em Lisboa foram enviados para Universidades estrangeiras para se especializarem, tendo dois obtido o grau de Doutor na Universidade de Paris, outro na Universidade de Eugene (USA) e dois na Grã-Bretanha; um na Universidade de Oxford e outro na Universidade de Strathclyde (Glasgow-UK).

Deslocou-se a Ponta Delgada em Novembro de 1978, onde no Instituto Universitário dos Açores e a convite do respectivo Reitor, inaugurou o curso de Física Atómica.

Foi eleito, por unanimidade, sócio efectivo da Academia das Ciências de Lisboa, em 9 de Abril de 1981, tendo sido, até esta data, sócio correspondente da referida Academia para onde entrou, por eleição, em 6 de Maio de 1976. Foi eleito Secretário da Classe de Ciências em

1985, tendo sido Vice-Secretário da mesma Classe durante 1984. Em 1986, 1987 e 1988, a Academia de Ciências de Lisboa elegeram-o Vice-Presidente da sua Classe de Ciências.

Foi membro de várias Sociedades Científicas e do Conselho Científico da Comissão Nacional do CERN, desde 1986.

Realizou algumas dezenas de Conferências e Seminários de que destacaremos os seguintes:

The L-X rays emitted in the decay $^{242}\text{Cm} - ^{238}\text{Pu}$: seminário realizado na Universidade de Edimburgo em 1957.

Les rendements atomiques du niveau L, dans les éléments lourds ($Z > 73$): conferência realizada em 1976 no Laboratório de Chimie-Physique de l'Université Pierre et Marie Curie — Paris VI.

Lasers: conferência realizada no Instituto Universitário dos Açores em Novembro de 1978.

Elogio de Manuel Valadares: discurso proferido na cerimónia do seu Doutoramento Honoris Causa pela Universidade de Lisboa, realizado em 15 de Fevereiro de 1981, de quem foi padrinho.

A evolução da Física na Faculdade de Ciências de Lisboa: oração de Sapiência pronunciada no Funchal, em 4 de Março de 1983, na inauguração do Centro de Apoio da Faculdade de Ciências de Lisboa, na Região Autónoma da Madeira, a convite do Governo Regional.

A convite do ATOMKI — Instituto de Física Nuclear da Academia de Ciências da Hungria, pronunciou na semana de 4 a 10 de Setembro de 1983, em Debrecen, na Hungria, duas conferências.

A convite do Department of Physics da MONASH UNIVERSITY — Clayton, Austrália, realizou a conferência *Research in Physics in Portugal* (em 1 de Maio de 1985) e, no mesmo ano, pronunciou uma conferência em Hong-Kong, a convite do Departamento de Física da respectiva Universidade.

Em 4 de Junho de 1987, fez o elogio histórico do General Câmara Pina — na Academia das Ciências de Lisboa, durante uma sessão solene, visto ter ido ocupar a cadeira daquele Académico, seu antecessor.

Participou no 1.º Colóquio sobre História e Desenvolvimento da Ciência em Portugal, organizado pela Academia das Ciências de Lisboa e realizado de 15 de Abril a 19 de Abril em Lisboa. Nessa sessão apresentou, juntamente com o Prof. Pinto Peixoto, a comunicação "*As Ciências Geofísicas em Portugal*".

No dia 12 de Maio de 1987, participou num debate sobre a Obra Científica do Prof. José Pinto Peixoto, organizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

Foi o Director do *Nato Advanced Study Institute — NATO ASI* — intitulado *X-Ray Spectroscopy in Atomic*

and Solid State Physics, que se realizou no Hotel Golf-Mar, Vimeiro, Portugal, de 30 de Agosto a 12 de Setembro de 1987.

Escreveu vários trabalhos de divulgação científica e os seguintes livros de texto:

Introdução à Física Atómica e Nuclear, vol. I e II 1980-1975 (de colaboração com Lídia Salgueiro).

Introdução à Biofísica, 1991 (de colaboração com Lídia Salgueiro), subsidiado pela Fundação Calouste Gulbenkian.

Os trabalhos de investigação publicados, referentes a Raios X, estão indicados no livro "*Compilação de trabalhos realizados no domínio dos Raios X (1933-1995)*", sob a coordenação da Prof. Doutora Maria Teresa Ramos.

Não indicamos os títulos das publicações que não se referem a investigação com Raios X, nem as numerosas referências a trabalhos publicados.

Focámos os pontos principais da actividade do Prof. J. Gomes Ferreira.

No entanto, não queremos terminar sem me referir à sua dimensão humana, como um grande mestre e um grande professor, estando sempre pronto a ajudar os seus colaboradores e as pessoas que com ele privavam.

A compilação de documentos de diferentes colegas, colaboradores, antigos condiscípulos e amigos, que foi organizada em livro aquando da sua jubilação em Junho de 1989, é um testemunho vivo da grande admiração e estima que todos por ele nutriam.

É importante ser bom professor, ser bom investigador, mas é muito mais importante ter as qualidades humanas que distinguem o Prof. Gomes Ferreira. Estes atributos são os únicos que não se esbatem na memória nem passam com o tempo...

E julgamos que fica bem transcrever aqui, o que, em tempos, dissemos na sessão da Academia das Ciências de Lisboa, em que foi recebido como sócio efectivo da Classe de Ciências:

"Gomes Ferreira soube criar à sua volta um ambiente intelectual próprio, livre e independente, mas responsável, onde mestre e discípulos convivem em harmonia perfeita, numa atmosfera serena de estudo e de reflexão, indispensável ao progresso da Ciência."

"Foi uma vida de trabalho, persistente e intenso, ao serviço da Física e da Universidade Portuguesa."

José Pinto Peixoto é Professor Jubilado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e Presidente da Academia das Ciências de Lisboa.

O ESTUDO DOS RAIOS X E O INÍCIO DA INVESTIGAÇÃO EM FÍSICA NAS UNIVERSIDADES PORTUGUESAS

FERNANDO BRAGANÇA GIL

Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências e Museu de Ciência

Ao comemorar-se o centenário da descoberta dos raios X, que decorre no corrente ano, julga-se oportuno relembrar o início da actividade de investigação em Física na Universidade Portuguesa — de uma forma sistemática e organizada — que se processou justamente em Física Atómica, através do estudo dos espectros de raios X. Tem-se a intenção de recordar os pioneiros dessa actividade e, sobretudo, mostrar como eles souberam ultrapassar as enormes dificuldades que se lhe depararam ao introduzir na nossa Universidade aquilo que, para a generalidade dos docentes, parecia irrealizável ou mesmo inadequado: a pesquisa experimental em ciências fundamentais.

A descoberta dos raios X e a radioactividade

Nos finais do século XIX parecia evidente — mesmo a sábios eminentes como William Thomson (1824-1907) — que a Física teria atingido a total plenitude na explicação da Natureza. Na realidade, todos os fenómenos à escala daquilo que era então mensurável ou observável tinham um enquadramento teórico que se poderia considerar quase inteiramente satisfatório. Aquele brilhante físico, mais conhecido posteriormente por Lord Kelvin, parecia acreditar no próximo esgotamento da investigação em Física fundamental, existindo, para ele, apenas duas pequenas “nuvens” nesse maravilhoso firmamento que lhe parecia ser a total explicação do Universo em que vivemos:

- o problema do éter, como suporte das ondas electromagnéticas;
- a distribuição espectral da radiação do corpo negro, cujo tratamento teórico através da Termodinâmica e Electromagnetismo clássicos conduz a soluções fisicamente absurdas.

Os factos rapidamente se encarregaram de desmentir as previsões de Lord Kelvin; as suas “nuvens” transformaram-se em colossais “tempestades” que vieram radicalmente modificar a nossa visão sobre a compreensão do Universo: a primeira só foi dissipada com a teoria da Relatividade e a segunda com a revolucionária introdução do descontínuo nos fenómenos físicos, com a hipótese dos quanta. Foi o início da Microfísica, cujo enquadramento teórico tem sido realizado pela Mecânica Quântica.

Do ponto de vista da experimentação e observação da Natureza à escala atómica e subatómica — que permaneceu insuspeitada enquanto a preocupação dos investigadores estava concentrada nos fenómenos macroscópicos — julgo poder afirmar-se que o ano de 1895 e o seguinte foram de crucial importância para iniciar a penetração num mundo totalmente inesperado mesmo para os físicos mais eminentes da época.

De facto, a 8 de Novembro de 1895, Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) realizando experiências, na Universidade de Würzburg, com tubos de raios catódicos, observou a fluorescência de platino-cianeto de bário colocado perto do tubo

A descoberta dos raios X

A descoberta da radioactividade

Marie Curie e a investigação em Física em Portugal

Criação dos primeiros centros de investigação

Síntese da actividade então desenvolvida no domínio dos raios X

em funcionamento. Verificou tratar-se de uma radiação invisível que atravessa corpos opacos, pois a fluorescência persistia cobrindo o tubo com papel negro.

Esta misteriosa radiação, que se admitiu ser electromagnética, resistiu vários anos a que tal fosse provado através dos meios experimentais então usados. Por isso, foi designada por raios X. Em particular, não se conseguiu, de início, obter com eles figuras de difracção usando as redes tecnicamente possíveis nessa altura, usadas nas experiências de difracção com as radiações electromagnéticas já conhecidas.

Coube a Max von Laue (1879-1960) o mérito de admitir a possibilidade dos raios X serem, de facto, radiações electromagnéticas mas com um comprimento de onda demasiado pequeno para aquelas redes sugerindo, em 1911, que eles poderão ser difractados pelos átomos de um cristal se estes se dispuserem regularmente, constituindo uma rede tridimensional.

A hipótese de von Laue foi efectivamente confirmada, um ano depois, pelos seus colaboradores W. Friedrich e P. Knipping. Esta importantíssima descoberta, não só abriu a via para se conhecer as propriedades físicas dos raios X, como forneceu um poderoso instrumento de estudo à Física do Estado Sólido, inaugurando todo um novo ramo: a Cristalografia dos raios X.

Um ano depois dos trabalhos de Röntgen que revelaram a existência daquela misteriosa radiação, invisível mas penetrante, uma outra descoberta viria a ter espantosas consequências — embora disso não se tivessem apercebido os físicos por largos anos — pois está na origem de um dos mais importantes domínios da Física do nosso século: a Física Nuclear. Refiro-me à Radioactividade, descoberta por Henri Becquerel (1852-1908), físico do Museu Nacional de História Natural, de Paris, que se dedicava ao estudo da fluorescência dos minerais.

A pesquisa que conduziu ao conhecimento da Radioactividade foi uma consequência directa da descoberta dos raios X. Na realidade, como se viu, Röntgen observou forte fluorescência do platinocianeto de bário quando sobre ele incide essa radiação invisível, então ainda de natureza desconhecida. Pôs-se então o problema de averiguar se a fluorescência e a emissão de raios X seriam dois fenómenos associados, isto é: uma vez que a emissão de raios X provoca o aparecimento de fluorescência, será que quando se observa este último fenómeno não existirá também emissão de radiação invisível penetrante do tipo dos raios X? Becquerel estava em boa posição para confirmar ou negar a validade desta hipótese — que se revelou ser falsa — proposta pela primeira vez por Henri Poincaré (1854-1912), devido à excelente colecção de minerais fluorescentes de que dispunha no Museu Nacional de História Natural de Paris.

Não constitui objecto deste artigo recordar, mesmo a traços largos, a história da descoberta da Radioactividade. Façamos, contudo, notar de passagem que ela ilustra um excelente exemplo de como o progresso da ciência é frequentemente sinuoso, com numerosas contradições e pistas falsas, num processo eminentemente dialéctico. Na realidade, todas as observações de Becquerel feitas com minerais fluorescentes (que continham urânio na sua composição!...) pareciam confirmar a hipótese de Poincaré. Contudo, deve-se ainda à persistência e atitude de autêntico investigador de Becquerel (que procurava sempre obter a contra-prova do que ia observando) verificar a falsidade daquela hipótese, isto é, da associação do fenómeno da emissão de raios invisíveis — como os raios X — com a fluorescência. Ele revelou assim, um fenómeno novo, mais tarde designado por Marie Curie (1867-1934) com o nome de Radioactividade, associado ao átomo de urânio e não às combinações químicas de que ele fizesse parte. Sem o suspeitar, Becquerel estava, como já se referiu, a abrir um novo capítulo da Física — a Física Nuclear — pois a Radioactividade não está ligada ao átomo como um todo, mas a uma pequena parte dele — o núcleo — só identificado mais tarde, em 1911, por Ernest Rutherford (1871-1937) e seus colaboradores Geiger e Marsden.

Após Becquerel, o estudo da Radioactividade teve um rápido incremento sob o impulso de Pierre Curie (1859-1906) e sua mulher, trabalhando em França, bem como de Rutherford, em Inglaterra.

Marie Curie e a incipiente investigação em Física no nosso país

Tanto Marie Curie como Rutherford não se limitaram a ser brilhantes investigadores: ambos fizeram escola, dando origem a toda uma geração de notáveis investigadores em Física Nuclear. A par da sua actividade de investigação, Marie Curie (seu marido tinha desaparecido prematuramente, vítima de estúpido acidente) procurava, por todos os meios, alargar o âmbito do seu trabalho, tendo conseguido que, em 1912, fosse tomada a decisão de se constituir o *Institut du Radium* na dependência da Universidade de Paris.

Este instituto, cuja plena concretização teve de esperar pelo fim da Grande Guerra, adquiriu notável desenvolvimento a partir de 1920, passando a constituir foco de atracção para numerosíssimos jovens de todo o mundo, desejosos de iniciar uma carreira científica ou técnica nesse novo domínio que era, então, a Radioactividade.

Todos tinham sido atraídos pela celebridade do laboratório e de quem o dirigia: uns pretendiam apenas, através de estágios de alguns meses, adquirir conhecimentos

técnicos nos domínios da medição de actividades ou da Radioquímica; outros porém, procuravam ali obter uma formação científica de fundo que, em geral, conduzia à preparação de teses para provas universitárias. Entre estes, contavam-se os portugueses Manuel Marques Teixeira (1889-1967), e Mário Augusto da Silva (1901-1977), mais tarde professores, respectivamente das Faculdades de Ciências das Universidade do Porto e de Coimbra, bem como Manuel Valadares (1904-1982), Branca Edmée Marques (1899-1986) e Aurélio Marques da Silva (1905-1965), todos eles ligados à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Branca Edmée Marques veio a fundar na sua Faculdade, o primeiro laboratório de Radioquímica existente em Portugal, onde sempre devotadamente trabalhou e ensinou quase até ao seu falecimento. Contava 87 anos!

Manuel Valadares e Aurélio Marques da Silva desenvolveram a sua actividade como docentes e investigadores no Laboratório de Física daquela Faculdade até ao seu afastamento compulsivo da função pública — o mesmo sucedendo a Mário Silva — por decisão do Conselho de Ministros de 14 de Junho de 1947.

Início da criação de centros de investigação em Física na Universidade portuguesa

A utilização de raios X como meio de diagnóstico médico começou, no nosso país, a ser praticado desde 1897 pelo médico Carlos Santos. O mesmo não aconteceu com os estudos em Física fundamental baseados na espectrografia dos raios X, que só se iniciaram muito mais tarde, no segundo quartel deste século.

Não havia, de facto, qualquer tradição de investigação em Física nas nossas Universidades e Escolas Superiores, ao contrário do que se passava com outros domínios das Ciências fundamentais, nomeadamente a Química e as Ciências Naturais. Na realidade, os Gabinetes de Física (nem sequer tinham a designação de laboratórios...) das nossas Escolas Superiores eram meros locais de demonstração e, por vezes, de experimentação apenas como complemento do ensino teórico aí ministrado.

A rara investigação em Física de que há notícia, realizada em Portugal, nomeadamente em Escolas Superiores, processou-se de uma forma perfeitamente accidental, até já bem dentro do século XX. O crónico atraso cultural do nosso país fazia com que estivesse generalizada, até recentemente, a ideia de que as Universidades deveriam ser instituições apenas destinadas a transmissão de conhecimentos adquiridos, de modo a preparar quadros superiores da administração, do ensino, das diversas técnicas necessárias ao normal — e rotineiro... — funcionamento da sociedade. Isto é, a investigação científica, inerente à pró-

pria definição da Universidade — aquilo que a distingue de outras escolas superiores especificamente destinadas à preparação profissional de determinados técnicos — não constituía preocupação da generalidade das autoridades universitárias e organismos de tutela das nossas Universidades (será que hoje já o constitui realmente?). E isto apesar da regulamentação da República (1911), que reforma a Universidade de Coimbra, cria a Universidade do Porto e reconstitui a Universidade de Lisboa, atribuir a primazia à investigação científica entre as funções daquelas instituições. Provavelmente para dar uma aparência de que assim se procedia, estabeleceram-se normas de doutoramento e concursos de acesso à carreira universitária em que estava implícita a apresentação de trabalho original. Só que este, ainda por muito tempo, era realizado fora da Universidade e, em geral, no estrangeiro, pelo menos no que à Física respeita.

Já atrás foi referido que as descobertas de Marie Curie e o trabalho por ela desenvolvido no seu laboratório constituiu uma poderosa atracção para jovens interessados na investigação científica (quanto mais não fosse como forma de progressão na carreira universitária...) que também foi sentida nesta periferia ocidental da Europa.

A meu conhecimento o primeiro físico português admitido no grupo de discípulos de Marie Curie foi Manuel Marques Teixeira, que seguiu o seu curso semestral sobre Radioactividade, professado na *Sorbonne* e estagiou no laboratório de investigação, ainda nas suas primitivas instalações da Rua Cuvier, de Fevereiro a Junho de 1914. O trabalho realizado permitiu a Marques Teixeira elaborar a sua dissertação de concurso para assistente da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, intitulada *Manipulações de Radioactividade*. Não foi o primeiro trabalho referente a este então recente capítulo da Física publicado entre nós, pois João de Almeida Lima (1859-1930), que foi professor da Escola Politécnica e da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, publicara antes dois trabalhos, um em 1908 (*Tecendo o elogio de Henri Becquerel*) e outro em 1913 (*Sobre Radioactividade*). Contudo, eles não foram fruto de trabalho de pesquisa original do seu autor.

Entretanto, nos finais da década de 20, começava a assistir-se a ténues — mas decisivos — indícios de modificação do panorama universitário português no que respeita à investigação em Física. Com efeito, a 16 de Janeiro de 1929 é criada a Junta de Educação Nacional, mais tarde — em 1936 — designada por Instituto de Alta Cultura que, entre outras funções, se propunha promover o desenvolvimento da investigação científica.

Embora restrita, foi extraordinariamente importante a acção daquele organismo pelas condições que proporcionou para o efectivo arranque da investigação em Física na Universidade Portuguesa, por quem quis e soube aproveitar

tar essas condições, ainda que muito modestas e, por vezes, precárias. Houve, na realidade, uma personalidade rara que soube utilizar ao máximo os reduzidos meios postos a sua disposição e rodear-se de um conjunto de colaboradores de modo a criar uma autêntica escola de investigação em Física de importância ímpar no nosso país. Refiro-me a Armando Cyrillo Soares (1883-1950), criador do primeiro núcleo de investigação naquele domínio, com continuidade e programa delineado, existente nas nossas Universidades.

Cyrillo Soares não foi um investigador. Contudo, teve a aguda percepção do que representa para um laboratório universitário uma actividade de pesquisa científica. Dedicou, assim, toda a sua energia à criação de um grupo de investigação no laboratório que dirigia: o Centro de Estudos de Física anexo à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Armando Cyrillo Soares fez a sua formação científica inicial ainda na Escola Politécnica, depois de ter frequentado o liceu em Évora e Lisboa. Dedicou-se ao ensino secundário, a maior parte do tempo como professor do Liceu de Pedro Nunes, onde permaneceu 24 anos. Em 1911, quando da fundação das Faculdades de Ciências, matriculou-se na de Lisboa, onde se licenciou em Físico-Químicas. Logo em 1913 iniciava carreira académica



Armando Cyrillo Soares (1883-1950), professor da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e fundador do Centro de Estudos de Física.

nesta Faculdade, como segundo assistente provisório. Depois de passar pelos sucessivos escalões da docência universitária, ascendeu à cátedra em 1926, tomando a direcção do Laboratório de Física em 1930, após o falecimento de João de Almeida Lima.

Como atrás foi referido, um ano antes tinha-se criado a Junta de Educação Nacional e, nesse mesmo ano, partiam para o estrangeiro os dois primeiros colaboradores de Cyrillo Soares, Herculano de Amorim Ferreira (1895-1974) e Manuel Valadares para que, em centros activos de investigação, pudessem adquirir a formação científica actualizada que as Universidades portuguesas não eram então capazes de fornecer.

O primeiro daqueles assistentes de Cyrillo Soares, que estagiou em Inglaterra, doutorou-se na Universidade de Lisboa em 1930, ascendendo rapidamente à cátedra. Ao contrário do que Cyrillo Soares esperaria, que chegou a providenciar a aquisição de equipamento para que Amorim Ferreira continuasse a sua actividade de investigação em Portugal, tal não conteceu. Entretanto, embora não se tivesse comprometido com uma actividade pessoal de pesquisa, este professor da Universidade de Lisboa, viria mais tarde, a criar e dirigir o Serviço Meteorológico Nacional, cuja necessidade se impunha, entre outras razões, atendendo à posição geoestratégica do nosso país.

Muito diferente foi o percurso científico e universitário de Manuel Valadares. No que respeita a este último aspecto, não chegou a ascender à cátedra nem sequer se lhe permitiu que prestasse provas de concurso para professor extraordinário, embora as tivesse requerido em 1943...

Contudo, a "aposta" de Cyrillo Soares de que, também em Portugal, seria possível realizar trabalho científico válido no domínio da Física foi ganha, devido ao magnífico escol de colaboradores que soube reunir à sua volta, à cabeça dos quais se deve inequivocamente colocar Manuel Valadares.

O Centro de Estudos de Física anexo à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, foi oficialmente criado, pelo Instituto de Alta Cultura, em 1940. Contudo, começou a ser concebido em 1929 — com o envio dos primeiros bolseiros para centros científicos europeus — e entrou efectivamente em funcionamento quando, em 1934, Manuel Valadares regressou ao país, após um longo período no estrangeiro, primeiro no Instituto do Rádio de Genebra (Novembro de 1929 a Julho de 1930) onde realizou trabalhos no domínio da Física aplicada com interesse para a Medicina. Na realidade, antes da sua partida, Manuel Valadares tinha sido, também, assistente do Instituto Português de Oncologia.

Entretanto, a sua formação científica no domínio da Física fundamental iniciou-se em Outubro de 1930, quando foi admitido no Instituto dirigido por Marie Curie. Desenvolveu então intensa actividade de investigação no domí-

nio da Radioactividade, neste Instituto, bem como no laboratório anexo ao electroíman gigante da Academia de Ciências de Paris. Na primeira destas instituições, trabalhando sob a orientação directa de Marie Curie, realizou estudos de espectrografia X e gama por difracção cristalina de núclidos das famílias do tório e do rádio. No laboratório do electroíman colaborou com Solomon Rosenblum em estudos de espectrografia magnética da emissão alfa. Diga-se de passagem que estes trabalhos foram de extraordinária importância como contributo para a compreensão da estrutura nuclear, relacionando as emissões alfa e gama por um mesmo núcleo, evidenciando a existência, no seio deste, de estados quantificados.

Mas ainda não se ficou por aqui a intensa actividade de Manuel Valadares durante a sua primeira estada em França. Homem multifacetado no que respeita à cultura, profundo conhecedor de pintura (ele próprio aguarelista de mérito), resolveu relacionar os seus interesses nestes domínios com a sua actividade científica, aprofundando os conhecimentos de técnicas físicas aplicáveis ao estudo material das obras de arte. Foi assim que ainda conseguiu dispor de tempo para frequentar o *Institut Mainini*, onde se iniciou no estudo dos métodos radiográficos do exame de pinturas, o que foi mais tarde, já em Portugal, aproveitado pelo seu amigo João Couto. Na realidade, este grande museólogo fez instalar em anexo à instituição que dirigia — o Museu Nacional de Arte Antiga — uma oficina de restauro (antecedente do Instituto José de Figueiredo). Aí foi criado um laboratório de exame de pintura por métodos físicos, incluindo a radiografia, dirigido por Manuel Valadares que teve ainda ocasião de iniciar outros nessa técnica, como o excelente e saudoso fotógrafo Abreu Nunes.

Com o trabalho de investigação em Física realizado sob a direcção de Marie Curie, apresentou a sua tese de doutoramento na Universidade de Paris em Dezembro de 1933, reiniciando imediatamente a sua actividade docente e de investigação no Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Algum tempo antes, Celestino da Costa (então Vice-Presidente da Junta de Educação Nacional) tinha dirigido um inquérito aos directores de laboratórios universitários, na tentativa de dinamizar a actividade científica em Portugal. Cyrillo Soares, em resposta declarou: *para mim não peço coisa alguma mas quando os novos, que se estão especializando no estrangeiro regressarem, pedirei que lhes sejam dados os meios de poderem prosseguir no país os estudos que mostraram — lá fora — serem capazes de empreender.*

Como atrás se referiu, Cyrillo Soares não era um investigador. Mas tinha, na realidade, três potencialidades raras para criar — e manter! — um núcleo de investigação científica fundamental num meio tão adverso como era,



Manuel Valadares (1904-1982), iniciador em Portugal da investigação em Física Atómica e Nuclear, no Centro de Estudos anexo ao Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

nessa época, o nosso: 1.º) Perseverança nos seus objectivos; 2.º) Ideias claras sobre o tipo de investigação que seria aconselhável realizar, tendo em conta o seu interesse e actualidade, nunca perdendo de vista a sua possibilidade de realização atendendo aos meios humanos e materiais disponíveis; 3.º) Total disponibilidade no apoio aos seus colaboradores, sem quaisquer vestígios de procura de protagonismo pessoal, possuindo em elevado grau uma das características essenciais de um autêntico Mestre: “dar os ombros” à geração seguinte, trabalhando com determinação para que os seus discípulos o ultrapassem, proporcionando-lhes condições de trabalho que ele próprio não teve. Foram estas qualidades que permitiram a Cyrillo Soares realizar aquilo que, à partida, outros estariam em idênticas condições de o fazer... mas não fizeram: criar e manter vivo um centro de investigação em Física fundamental, a partir do zero!

Manuel Valadares foi o primeiro colaborador de Cyrillo Soares regressado ao país com a firme disposição de continuar aqui uma actividade de investigação científica. Foram longas e profundas as conversas entre os dois

para definir o tema ou temas de investigação a desenvolver no Laboratório de Física da Universidade de Lisboa. Concluíram que eles deveriam ser em número reduzido, não apenas atendendo aos poucos meios de que previsivelmente se iria dispor, mas igualmente para que se criasse uma “escola”, isto é, se formasse um número suficiente de especialistas num dado domínio de modo a possibilitar a interajuda, a discussão científica, a crítica dos resultados obtidos, as previsões para futuros trabalhos...

A escolha do tema central surgiu naturalmente: a Física Nuclear, através da investigação em Radioactividade. Tratava-se de um tema de grande actualidade, ainda em grande parte inexplorado, e era esse o domínio científico em que Manuel Valadares tinha adquirido a sua formação.

Estava, assim, naturalmente indicado que as primeiras instalações a montar se destinassem ao estudo, por espectrografia cristalina, das radiações gama e X, esta última obtida na sequência da desexcitação nuclear por conversão interna. Partia-se do zero; e para realizar trabalho experimental em Radioactividade é obviamente necessário... dispor de fontes radioactivas!

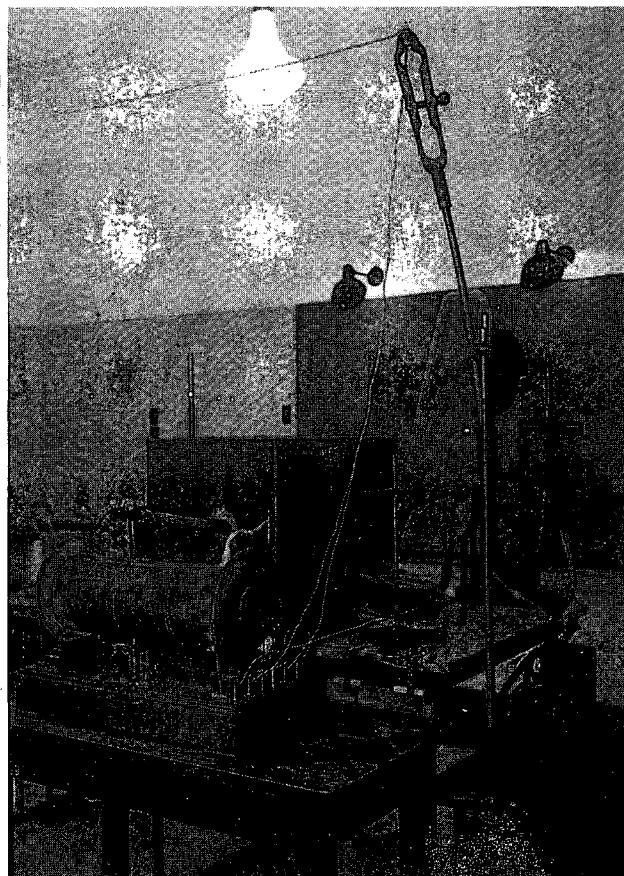
As poucas verbas de que Cyrillo Soares pôde dispor não permitiam a sua aquisição; nem o director do Instituto Português de Oncologia esteve disposto a ceder agulhas de radão já sem préstimo para fins terapêuticos, existentes neste Instituto.

Por outro lado, era necessário dispor de um bom espectrógrafo e de uma instalação produtora de raios X, de modo a poder estudar comparativamente os espectros produzidos com ampolas providas de um anticatódio conveniente e os obtidos a partir do declínio radioactivo.

Também não se dispunha de verbas para estas aquisições! Em vez de desistir ou esperar por melhores dias (que é, frequentemente, uma forma adiada de desistência), Manuel Valadares, sempre apoiado por Cyrillo Soares, procurou os meios de tornar as dificuldades: a primeira instalação produtora de raios X do Centro foi montada com uma ampola e uma bomba de vácuo primária, emprestadas pelo Laboratório de Química da Faculdade, e uma bomba de difusão cedida por um laboratório liceal.

Faltava ainda a fonte de alta tensão necessária: recorre-se a uma velha bobina de Ruhmkorff proveniente do antigo Colégio de Campolide (excelentemente equipado, para a época) que, com a implantação da República, transitou para a Faculdade de Ciências e estava esquecida na sua arrecadação.

Com esta instalação e um espectrógrafo construído localmente de forma artesanal, pôde Manuel Valadares e o seu colaborador Francisco Mendes que então se iniciava na pesquisa científica realizar os primeiros trabalhos preparatórios de espectrografia dos raios X. Eles consistiram na tarefa longa e fastidiosa mas indispensável da escolha de um bom cristal de mica para equipar o espectrógrafo de investigação que pôde ser adquirido mais tarde.



Uma das primeiras instalações montadas por Manuel Valadares, no Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa para estudos de espectrografia de raios X.

Isto é, enquanto se aguardava a possibilidade de dispor de instalações convenientes para investigação, não se cruzaram os braços: realizou-se trabalho útil (que, embora de rotina, era indispensável para prosseguir) e prepararam-se novos colaboradores.

Logo que se pôde dispor de um espectrógrafo capaz de levar a efeito investigação original surgiu o problema: que fazer com ele?

Não era previsível quando se poderia adquirir fontes radioactivas, compradas ou cedidas por outras instituições, de modo a estudar espectros de raios X e gama provenientes de declínio radioactivo. Pois bem: mais uma vez não se ficou à espera de melhores dias e efectuaram-se estudos de espectrografia X, utilizando a instalação produtora destas radiações, entretanto montada. Com ela fez-se importante trabalho original no domínio do esclarecimento do espectro L do chumbo, em particular de bandas satélites, podendo-se confirmar, *pela primeira vez*, previsões teóricas relativas a este espectro, bem como revelar a existência de bandas até então não observadas.

Foi a primeira grande consequência, com repercussão no meio científico internacional, da obra empreendida por Cyrillo Soares e seus colaboradores.

Diversas outras se seguiram que confirmaram a presença do Centro de Física de Lisboa entre os laboratórios europeus de pesquisa em Física dos raios X.

Entretanto o trabalho realizado atraía novos colaboradores ao Centro e outros partiam para o estrangeiro em busca de preparação especializada.

Está por fazer a história pormenorizada do Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e não será aqui o lugar para isso. É contudo forçoso destacar neste artigo, meramente evocativo, que o trabalho do Centro de Estudos no domínio da Radioactividade se pôde iniciar com a aquisição, em 1937, de 50 mg de rádio 226 e pela generosa oferta, quatro anos depois, de uma quantidade importante de um núclido da família do rádio — o chumbo 210 (inicialmente designado por Rádio D) — pelo Instituto de Saúde Pública de Roma. Além da espectrografia das radiações gama e X, provenientes do declínio radioactivo, foi então possível dar início a outras investigações, em particular a espectrografia da emissão beta. Não dispunha o Centro de meios que lhe permitissem adquirir um espectrógrafo magnético para esse objectivo. De novo foi posta à prova a capacidade do grupo criado por Cyrillo Soares para ultrapassar dificuldades e adaptar às suas necessidades o equipamento de que se podia dispor.

Anos atrás antes da existência real do Centro de Estudos de Física — tinha sido adquirido um electroímã para trabalhos de magneto-óptica, nunca concretizados. Foi este instrumento que, convenientemente adaptado, constituiu o primeiro — e, durante mais de vinte anos, o único — espectrómetro magnético para estudos de electrões existente em Portugal. Com ele realizaram-se estudos de espectrografia beta na transmutação chumbo 210 → bismuto 210 (RaD → RaE) que se revelaram de considerável interesse, dados os resultados novos, então obtidos, respeitantes aos espectros gama e X produzidos nessa transmutação. Outros estudos originais foram desenvolvidos no Centro de Estudos de Física. Não sendo possível citá-los todos aqui, dever-se-á, contudo, recordar outros dois colaboradores de Cyrillo Soares que também fizeram a sua formação científica inicial no estrangeiro e vieram posteriormente reforçar o grupo de investigadores do Centro de Estudos de Física: Aurélio Marques da Silva (que inicialmente trabalhou no *Institut du Radium* de Paris e se doutorou na *Sorbonne* em 1938) e Armando Gibert que trabalhou e se doutorou, em 1946, na Escola Politécnica Federal de Zurique. O primeiro orientou, no Centro, trabalhos de espectrografia beta e montou uma câmara de Wilson. Quanto a Armando Gibert (1914-1985), realizou entre nós, sobretudo trabalhos baseados na detecção de radiações por meio de detectores Geiger-Müller e realizou, com a instalação que melhorou, estudos sobre radiação cósmica.

Cyrillo Soares dirigiu o Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa de 1930 a 1947. Dos 18 colaboradores que reuniu à sua volta, dez obtiveram o grau de doutor, 6 dos quais em Universidades Portuguesas (Lisboa e Porto). Penso que isto constitui um valioso indício, sobretudo para aquela época, da actividade científica — ímpar entre nós — desenvolvida então no Laboratório de Física da Universidade de Lisboa.

Foi esta intensa actividade científica brutalmente interrompida em Junho de 1947 por decisão do Conselho de Ministros que afastou da função pública 21 destacados docentes das Universidades Portuguesas, em grande parte também eminentes cientistas. O domínio mais atingido foi o da Medicina, logo seguido pela Física, em que foram excluídos da Universidade Mário Augusto da Silva, de Coimbra, e os três principais colaboradores de Armando Cyrillo Soares: Manuel Valadares, Marques da Silva e Armando Gibert.

Não é possível avaliar hoje quão nefastas foram as consequências de tão iníqua e obscurantista medida governamental, bem na linha da castração a que a cultura portuguesa é periodicamente submetida desde o século XVI. Se tal medida não tivesse existido, é bem provável que Portugal tivesse continuado entre os países pioneiros da Física Nuclear experimental e a *Portugaliae Physica* (a revista fundada por Cyrillo Soares para a publicação de trabalhos científicos originais) tivesse continuado a ser leitura habitual dos investigadores estrangeiros que se dedicavam ao mesmo assunto.

É, contudo, necessário acrescentar que a obra de Cyrillo Soares e seus colaboradores não se extinguiu totalmente. Mesmo à distância, Manuel Valadares — que prosseguiu brilhantemente a sua carreira científica em França — continuou a prestar um valioso apoio à actividade científica do Centro de Estudos de Física, no domínio da espectrografia cristalina das radiações, mantida por uma das suas mais directas colaboradoras, Lídia Salgueiro, que se doutorou na Universidade de Lisboa, sob a sua orientação, em 1945.

Foi contudo, necessário esperar cerca de 20 anos para que o Laboratório de Física da Universidade de Lisboa retomasse uma actividade diversificada e continuada no âmbito da Física Atómica e Nuclear, com um núcleo de colaboradores cada vez mais numerosos integrados em dois centros a que a instituição originariamente criada por Cyrillo Soares deu origem: o Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa e o Centro de Física Atómica da Universidade de Lisboa.

Fernando Bragança Gil é Professor Catedrático da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e Director do Museu de Ciência desta Universidade.

RADIAÇÃO DE SINCRÓTRÃO

— A MELHOR FONTE DE RAIOS X

MARIA JOSÉ B. M. DE ALMEIDA

Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

1. Introdução

Um número da Gazeta de Física dedicado aos 100 anos dos raios X não podia deixar de conter um artigo sobre a radiação de sincrotrão e as suas aplicações, principalmente em estudos que utilizam a radiação electromagnética na gama dos raios X.

A utilização de fontes tradicionais de produção de raios X — as ampolas de raios X — para investigar a estrutura da matéria, foi já descrita num número desta revista [1]. Recentemente foi também publicado nesta revista um outro artigo [2] relacionado com a radiação de sincrotrão e as suas possibilidades como instrumento experimental, dedicado especialmente à nova fonte europeia, o ESRF, em Grenoble, França.

Iremos assim, com a preocupação de uma mera divulgação, tentar preencher o “espaço” entre estes dois artigos. Através da história, tentaremos transmitir a quem nos lê o entusiasmo relativo não só ao passado muito próximo, como ao presente e ao futuro da utilização deste tipo de radiação. Na realidade — e para falar apenas na sua utilização como fonte de raios X para estudos de difracção — com a radiação de sincrotrão abrem-se perspectivas de estudo da matéria condensada impossíveis de concretizar com a radiação emitida pelas ampolas tradicionais, mesmo as que existem nos laboratórios mais bem apetrechados (por exemplo, ampolas de ânodo rotativo).

Faremos um breve resumo da história dos raios X e da sua utilização, comparando as características dos feixes de raios X emitidos pelas ampolas com as características da radiação de sincrotrão.

Para um estudo mais aprofundado das características desta radiação e das suas

possíveis aplicações, tanto na gama dos raios X como na do ultravioleta, do visível ou mesmo do infravermelho, recomenda-se, para além das referências indicadas em [2], por exemplo a referência [3]. Também tem muito interesse o artigo da ref. [4], bem como alguns breves comentários saídos recentemente na “International Union of Crystallography” [5].

2. Estudos de difracção de raios X emitidos por ampolas; suas limitações

Como em qualquer ciência experimental, o estudo da estrutura da matéria condensada tem conhecido grandes avanços à medida que se desenvolvem novas tecnologias.

Descoberta em 1912 a capacidade de um cristal para difractar um feixe de raios X que nele incide, o desenvolvimento de computadores extremamente rápidos e de instrumentos de detecção muito sensíveis permitiu não só o controlo automático da recolha e medição das intensidades dos feixes difractados (nos difractómetros automáticos de cristal simples) como também o seu tratamento a um nível bastante sofisticado. Em certos casos de estruturas razoavelmente simples, é até possível detectar anisotropias nas distribuições electrónicas nas últimas camadas dos átomos, obtendo-se assim informação sobre as características das suas ligações em sólidos diferentes [1].

Como se pode ver em pormenor na ref. [1], os resultados das medições (intensidades dos feixes difractados segundo diferentes direcções, correspondentes a orientações muito específicas dos cristais relativamente ao feixe incidente) têm de sofrer um tratamento matemático (trans-

Raios X produzidos por fontes convencionais

Limitações das ampolas de raios X

Aceleradores de partículas e a radiação de sincrotrão

Características da radiação de sincrotrão

Novos horizontes para a investigação com raios X

formada de Fourier) que nos permite obter como que uma “fotografia da distribuição dos átomos e dos seus electrões na célula unitária” — o mapa de densidades electrónicas. Quanto maior for o número de intensidades medidas, tanto “mais nítida” é a informação obtida da transformada de Fourier. É importante também recordar

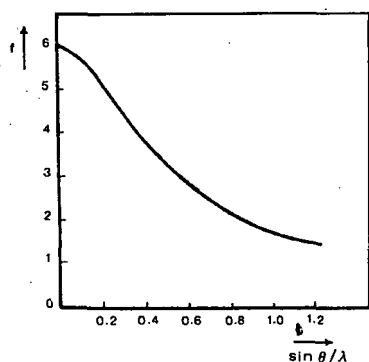


Fig. 1 — Factor atómico de difracção de um átomo de carbono ($Z = 6$)

que quanto maior for o ângulo de difracção (ângulo de Bragg) menor é, para determinados valores do comprimento de onda e da intensidade do feixe incidente, a intensidade do feixe difractado por cada átomo de cristal (lembre-se a forma geral do factor atómico de difracção de um átomo, ilustrada na Fig. 1). Por esta razão, acima de determinado valor do ângulo de Bragg, a intensidade do feixe difractado em estudos com ampolas de raios X é tão ténue que é impossível efectuar medições.

Assim, os mapas de distribuições electrónicas só têm uma boa definição quando os materiais estudados têm estruturas muito simples (relativamente poucos átomos por célula unitária) e/ou contêm átomos com grande poder de difracção dos raios X (elevado número atómico Z).

O estudo de estruturas cristalinas, embora mais simples porque apenas procura o conhecimento das posições atómicas na célula unitária, tem limitações devidas ao reduzido poder de difracção de átomos como o hidrogénio, o carbono e o oxigénio, e à dificuldade de crescimento de monocristais de muitos destes materiais. Tal acontece mesmo depois desse estudo ter beneficiado de um grande desenvolvimento devido à utilização dos métodos directos [6] (extremamente úteis para materiais orgânicos com um número razoável de átomos e estruturas sem centro de simetria).

Relembre-se o processo de produção de feixes de raios X nas ampolas: a emissão de energia é devida não só à desaceleração de electrões muito energéticos que do cátodo são lançados sobre o ânodo da ampola quando nela embatem (*radiação branca* pouco intensa) mas, principalmente, ao decaimento de electrões atómicos de estados excitados em virtude do bombardeamento do ânodo.

Neste decaimento emite-se a chamada *radiação característica* do material que forma o ânodo da ampola (ver Fig. 2-a).

A intensidade da radiação característica (comprimento de onda bem definido) é algumas ordens de grandeza superior à da radiação branca, e, na maioria dos estudos de difracção de raios X utilizando a radiação emitida por ampolas, só a radiação característica é utilizada (o feixe proveniente da ampola, antes de embater na amostra a estudar, passa através de um filtro adequado que lhe retira a radiação branca; pode também ser previamente difractado por uma família de planos de um cristal monocromador que selecciona o comprimento de onda a utilizar nas medições subsequentes).

A radiação característica é emitida pelo ânodo em todas as direcções; destas só interessa a que está contida num ângulo sólido pouco maior que o definido pelo tamanho da amostra a estudar. Assim, cerca de 99% da energia inicial dos electrões emitidos contra o ânodo é convertida em calor [3], o que provoca graves dificuldades experimentais relacionadas com a necessidade de arrefecimento do ânodo; este factor limita o valor máximo da intensidade dos feixes de raios X emitidos por ampolas.

A interacção dos raios X com a matéria é devida ao efeito do campo electromagnético incidente sobre os electrões que pertencem aos átomos constituintes dos materiais. Assim, a intensidade dos feixes de raios X difractados, além de obviamente depender da intensidade do feixe incidente, depende também do tamanho da amostra e do número atómico dos átomos que a constituem.

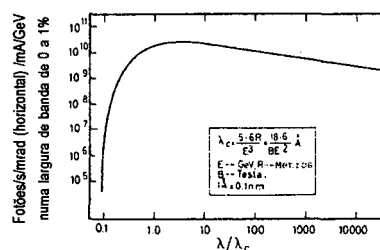
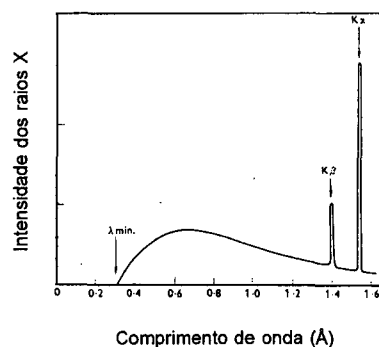


Fig. 2 — a) Espectro dos raios X emitidos por uma ampola com ânodo de cobre; b) Espectro típico da radiação electromagnética emitida por radiação de sincrotrão

Deste modo se pode compreender que a cristalografia de materiais orgânicos — biológicos, por exemplo — com elevado número de átomos a constituir enormes moléculas, tenha tido até há poucos anos limitações intrínsecas. A estas devem ainda ser acrescidas as dificuldades em conseguir monocristais de muitos compostos biológicos, estáveis e com dimensões suficientes para que o seu poder de difracção permita a recolha de um número razoável de intensidades que leve à formação de uma “imagem nítida” da distribuição dos átomos na célula unitária. De facto, para aumentar para o dobro a “nitidez” do mapa de densidades electrónicas, é, num caso geral, necessário multiplicar por oito o número de dados experimentais.

3. Os aceleradores de partículas e a radiação de sincrotrão

Um dos conceitos fundamentais do electromagnetismo é a emissão de ondas electromagnéticas por cargas aceleradas. As características das ondas emitidas dependem da aceleração e do tipo de cargas em movimento.

No início deste século, os resultados experimentais levaram à construção de modelos, sucessivamente aperfeiçoados, da constituição dos átomos. Estes são formados por um núcleo (muito pequeno e com carga positiva) e por electrões, em diferentes níveis de energia, sujeitos fundamentalmente à influência do núcleo.

Sobre a constituição do próprio núcleo, imediatamente se teve a noção de que as forças responsáveis pela sua coesão tinham de ser muito intensas, sendo portanto necessário para o desagregar e poder ter informação experimental sobre a sua constituição, fornecer-lhe uma elevada quantidade de energia; um dos processos para tentar produzir tal efeito consiste em bombardeá-lo com partículas com elevada energia cinética. Essa foi a razão do desenvolvimento dos aceleradores de partículas.

É fácil acelerar partículas carregadas, através de campos eléctricos. Se as partículas descreverem sucessivas vezes uma porção de trajectória na qual são aceleradas, a sua energia cinética aumenta. Um modo razoável de fazer uma partícula descrever várias vezes a mesma porção de trajectória é fazer com que ela se mova numa trajectória fechada.

Uma partícula carregada pode ser forçada a descrever uma trajectória fechada, se for sujeita a campos magnéticos.

As partículas carregadas que se podem mais facilmente acelerar por campos eléctricos e desviar de uma trajectória rectilínea por campos magnéticos são as mais leves: os electrões e os positrões.

Assim, num acelerador de partículas, depois de uma primeira parte linear da trajectória (LINAC), onde as partículas são aceleradas por campos eléctricos, há uma sequência de porções de trajectória rectilínea, em que a velocidade das partículas aumenta devido ao campo eléc-

trico a que ficam sujeitas, e porções de trajectória curvilínea, em que a direcção da trajectória é alterada pelos chamados magnetes deflectores. Esta sequência constitui um anel fechado (BOOSTER).

Poderíamos imaginar que deste modo seria possível atingir valores de velocidade (e consequentemente energias cinéticas) tão elevadas quanto se quisesse. No entanto, *as partículas ao serem aceleradas emitem radiação, e a radiação emitida durante o encurvamento da trajectória é tanto maior quanto maior for a própria velocidade.* Esta emissão de radiação define o valor limite para a energia cinética adquirida pelas partículas aceleradas.

Este efeito, limitativo para os físicos nucleares, foi claramente encarado como uma possível fonte de radiação a ser utilizada com outros fins. *A esta radiação emitida pelos electrões durante a sua deflecção chamou-se radiação de sincrotrão.*

Para utilizar nas melhores condições a radiação de sincrotrão, adaptaram-se aos aceleradores de partículas os chamados anéis de armazenamento, nos quais os electrões ou positrões, depois de acelerados num primeiro anel (“Booster”) são lançados e mantidos com energia aproximadamente constante (ver Fig. 3). Também nos anéis de armazenamento existem porções de trajectória em que as partículas são sujeitas a campos magnéticos deflectores (encurvamento da trajectória) e porções rectilíneas onde a energia perdida durante o encurvamento é recuperada devido à aplicação de campos eléctricos. Existem também, em partes diferentes do percurso, acoplamentos de 4, 6 ou 8 magnetes que servem para focar melhor o feixe de partículas para que ele percorra sempre uma trajectória com dispersão espacial mínima.

Quando os electrões ou positrões atingem velocidades relativísticas, a energia emitida sob a forma de radiação, além de ter uma intensidade muito elevada (que também depende fortemente do raio da trajectória descrita) “estende-se” de modo contínuo com uma intensidade aproximadamente constante [2], numa gama de comprimento de onda que pode ir desde os raios X até ao infravermelho (ver Fig. 2b). Além disso, a radiação é emitida dentro de um ângulo sólido tão estreito que ela se pode considerar unidimensional, permitindo que “todo” o feixe emitido seja utilizado na experiência. Também se verificou, como aliás tinha sido previsto por cálculos teóricos [3], que a radiação de sincrotrão é totalmente polarizada no plano da órbita das partículas carregadas.

Estas características, para além da sua natureza em pulsos, tornaram a radiação de sincrotrão extremamente “apetecível” em variadíssimos campos da Física Experimental, nomeadamente na difracção de raios X pela matéria condensada.

Tendo começado por ser apenas um efeito não desejado nos aceleradores de partículas construídos para estudos de Física Nuclear, passou-se, no início dos anos 70, a adaptar parcialmente os aceleradores de partículas existentes para a utilização programada da radiação de sincrotrão; no início dos anos 80 foram postos a funcionar

aceleradores dedicados apenas à utilização de radiação de sincrotrão.

Verificou-se, durante o desenvolvimento destes, que introduzindo na trajectória das partículas carregadas associações especiais (periódicas) de magnetes, é possível

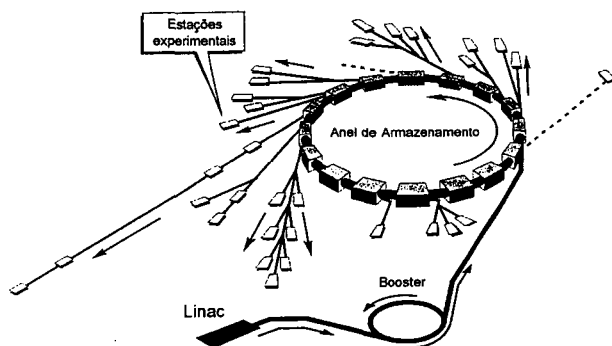


Fig. 3 — Esquema da fonte de radiação de sincrotrão (SRS) em Daresbury, Inglaterra

provocar encurvamentos locais da trajectória dessas partículas que aumentam a intensidade do feixe de raios X emitido. Com os chamados “wiguers” (ver Fig. 4a) obtêm-se comprimentos de onda mais baixos ($\lambda \approx 1 \text{ \AA}$) e com os chamados “onduladores” (ver Fig. 4b) consegue-se uma radiação de elevada intensidade e quase monocromática.

Assim, consoante o tipo de experiência que se deseja realizar, deve escolher-se uma saída adequadamente posicionada numa zona de encurvamento do anel de armazenamento.

As características extraordinárias da radiação de sincrotrão, nomeadamente:

- brilho várias ordens de grandeza superior ao das fontes convencionais de raios X (ampolas);
- espectro contínuo e facilidade de sintonização do comprimento de onda a usar; e
- natureza pulsada

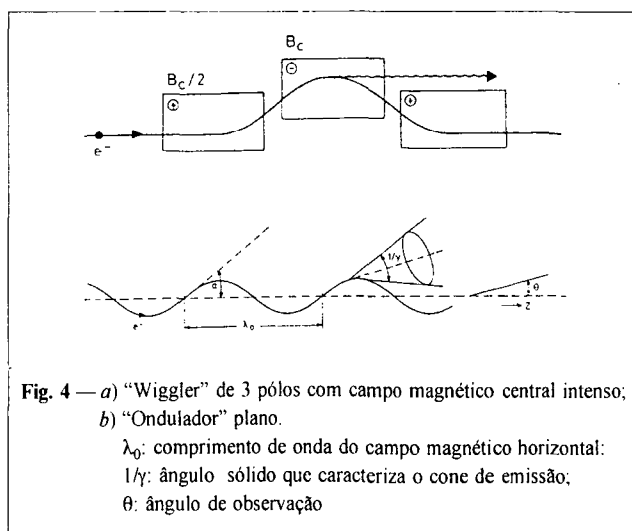


Fig. 4 — a) “Wiggler” de 3 pólos com campo magnético central intenso; b) “Ondulador” plano.
 λ_0 : comprimento de onda do campo magnético horizontal;
 l/γ : ângulo sólido que caracteriza o cone de emissão;
 θ : ângulo de observação

permitem hoje a realização de experiências de difracção de raios X em estudos como

- estrutura de grandes moléculas biológicas com elementos com fraco poder de difracção dos raios X;
- amostras monocristalinas com dimensões muito pequenas, com cerca de 10^{15} átomos ou menos (microcristais, membranas, filmes, camadas superficiais, interfaces);
- amostras policristalinas (pós), com obtenção de espectros de elevada resolução, permitindo determinar estruturas de amostras para as quais é impossível formar monocristais;
- difracção por amostras líquidas e sólidos amorfos;
- difracção magnética de raios X;
- utilização de radiação branca para obter lauegramas com exposições de fracções de segundo;
- amostras que se deterioram com os efeitos da própria radiação;
- utilização da dispersão anómala para determinação de fases e para contraste elementar, devido à possibilidade de escolha de comprimentos de onda perto de arestas de absorção de cada elemento;
- obtenção de dados experimentais que permitem determinar a evolução temporal de uma estrutura ou de uma reacção, com intervalos da ordem das dezenas de picosegundos.

Naturalmente, todos estes estudos dependem de um enorme esforço de desenvolvimento instrumental, não só relacionado com a construção das próprias fontes de radiação de sincrotrão, mas também referente a processos de recolha automática de dados, detecção e leitura das intensidades difractadas, bem como ao tratamento matemático, por vezes muito complicado, para transformar os resultados obtidos em mapas de distribuição de átomos em moléculas [4].

BIBLIOGRAFIA

- [1] COSTA, M. M. R. — “Difracção na Matéria Condensada — Parte I”, *Gazeta de Física*, **8**, 49-53, 1985.
- [2] CARRONDO, M. A., COSTA, M. R., FIGUEIREDO, M. O., RAMOS, M. T. — “Radiação de Sincrotrão — ESRF”, *Gazeta de Física*, **16**, 2-8, 1993.
- [3] “Handbook on Synchrotron Radiation”, vol. **1a**, Ed. Ernest — Eckhard Kock, 1983.
- [4] FOURME, R. et JANIN, J. — “La Cristallographie Biologique”, *La Recherche*, **226**, 1358-1367, 1990.
- [5] COPPENS, P. — “Why Synchrotron Radiation?”, *IUC Newsletter*, **2**, nº 4, 1, 1994.
 HELLIWELL, J. R. — “Perspectives on Synchrotron Radiation and Crystallography”, *IUC Newsletter*, **2**, nº 4, 5-7, 1994.
 HARDING, M. M. — “New Opportunities for Chemical Crystallography”, *IUC Newsletter*, **2**, nº 4, 7-10, 1994.
- [6] HAUPTMAN, H. and KAARLE, J. — *A. C. A. Monograph No 3 Pittsburgh: Polycrystal Book Service (1953)* e desenvolvimentos posteriores, trabalho pelo qual lhes foi atribuído o Prémio Nobel da Química em 1985.

Maria José B. M. de Almeida é Professora Catedrática da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Física.

HEINRICH HERTZ

Vida, obra e repercussões

M. DE ABREU FARO

Instituto Superior Técnico, Lisboa

A Academia das Ciências de Lisboa comemorou a passagem do 1.º centenário da morte de Heinrich Hertz numa sessão expressamente dedicada a esse facto, tendo sido apresentadas duas comunicações, uma de que se publica a primeira parte e a outra de autoria da Prof. Lúdia Salgueiro.

Neste texto apresenta-se a segunda parte da comunicação que incide fundamentalmente sobre a obra de Hertz e as suas repercussões, com ênfase na descoberta experimental das ondas electromagnéticas previstas por Maxwell, e na acção pioneira que Hertz teve na investigação da Electrodinâmica dos corpos em movimento.

Divulga-se, assim, a vida e obra de um físico ilustre que, além do seu trabalho experimental, se revelou também um teórico lógico, consistente e corajoso.

A vida científica de Hertz radica-se na Escola de Berlim, liderada por Helmholtz. Essa escola dedicou, na década de 70, do século passado, especial interesse aos princípios fundamentais da Electrodinâmica.

Confrontavam-se as teorias vigentes no continente europeu com a teoria de Maxwell. Nesse espírito, Helmholtz propôs um prémio no âmbito da Academia Prussiana das Ciências: que se investigasse experimentalmente a existência de uma relação entre forças electromagnéticas e a polarização dieléctrica dos materiais isolantes. Por forças, e na linguagem de hoje, entendam-se campos electromagnéticos. Na teoria de Maxwell admitia-se, de acordo com a definição de corrente total:

$$\mathbf{C} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

que a variação da polarização produzia os mesmos efeitos que a corrente de condução. Note-se que $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$, em que \mathbf{P} é a polarização.

No vácuo (éter celular de Maxwell), $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$, e nessas circunstâncias dever-se-iam produzir efeitos análogos aos da corrente de condução. Esta consequência e

generalização foi profundamente sentida e salientada por Hertz no decurso das suas experiências.

Hertz nunca se limitou a uma atitude de experimentalista puro. Perspectivava os resultados das suas experiências através de prévias considerações teóricas, por estimativa do que se esperava, e calculando com o que a teoria de então permitia.

Assim, quando Helmholtz lhe propôs que, no âmbito de um doutoramento, concorresse ao prémio da Academia, hesitou. Sentiu que era demais para uma dissertação de doutoramento, que a desejava mais rápida e, em conformidade, incidindo sobre um assunto mais concreto.

As conclusões a que tinha chegado não eram as que desejava ter obtido: recorrendo a oscilações associadas a circuitos abertos, não dispunha de meios de medida que lhe permitissem evidenciar qualquer fenómeno nítido.

Declinou o convite, pelo menos para a imediata preparação do seu doutoramento, que acabou por realizar com uma dissertação sobre a "indução electromagnética em esferas em rotação". Mas o problema permaneceu: não o enjeitou, nem o afastou das suas preocupações.

Descoberta das ondas
electromagnéticas

Electrodinâmica dos corpos
em movimento

Teoria da Relatividade

Radiocomunicações

Durante três anos (1880-83) desempenhou as funções de assistente de Helmholtz e mais tarde, durante dois anos (1883-85) foi "Privatdozent" na Universidade de Kiel. Em 1886 obteve uma cadeira na Technische Hochschule de Karlsruhe. Como Hertz mais tarde descreveu, teria sido impossível passar-lhe despercebida qualquer coisa de novo e importante nessas oscilações em que já pensava e se lhe ofereciam insuficientes para investigar o que pretendia. Assim previa e assim aconteceu.

Estávamos na Primavera de 1886. No gabinete de Física de Karlsruhe encontrou o que então se designava por "espirais de Riess" ou "de Knochenhauer". Eram duas bobinas planas, enroladas em dupla espiral. Quando se procedia a uma descarga através do primário, observavam-se descargas fortes no secundário, em aberto.

Hertz visava uma experiência pedagógica. Mas uma coisa o espantou: a sensibilidade do secundário que não exigia grandes garrafas de Leyden para evidenciar faíscas fortes e nítidas. Porquê? A teoria não previa tanto. Uma explicação seria que a descarga das garrafas de Leyden provocava oscilações extremamente rápidas.

Isto foi o começo do que então se seguiu. Guiado por esta convicção, Hertz empenhou-se na obtenção de meios que lhe permitissem estabelecer sistematicamente oscilações de altíssima frequência. Trata-se das frequências mais altas até então conseguidas. Preocupou-se, ainda, como era natural e necessário, em evidenciar, experimentalmente e de modo seguro, a real existência dessas oscilações.

Recorreu Hertz ao fenómeno da ressonância, bem conhecido no domínio do som e em que Helmholtz trabalhara, concebendo, além de outros ressoadores, o célebre ressoador esférico que recebeu o seu nome.

Estávamos nos finais de 1886 e os trabalhos prolongaram-se até aos primeiros meses de 1887. Ruhmkorff tinha inventado a sua "bobina" em 1855 que, em última análise, se baseava nas ideias de Faraday, na lei de indução (Fig. 1). Tratava-se de um transformador (sem núcleo de ferro) em que o secundário tinha um número elevado de espiras.

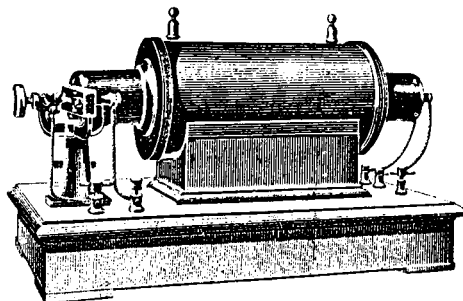


Fig. 1 — Bobina de Ruhmkorff

Disponha-se assim de uma tensão elevada que era aplicada aos terminais de um "faiscador": duas esferas pequenas e próximas onde, por disrupção, se estabelecia uma faísca.

Se a esses terminais se tivesse ligado as armaduras de um condensador, este, antes do início da disrupção, estaria carregado. Era a energia assim acumulada que conduziria a uma eventual descarga oscilante. A auto-indução do sistema não estava materializada em nenhuma bobina. É simplesmente aquela que está indissolúvelmente associada ao sistema. Para frequências muito elevadas, tal basta para sustentar uma oscilação atenuada, embora com um número apreciável de períodos por segundo.

Se na vizinhança existir uma espira aberta, dispendo também de um faiscador, é possível obter tensões que provoquem uma disrupção e, por ressonância, obter correntes induzidas elevadas. Agora, o que é evidente e ressalta é a espira a que se associa uma capacidade equivalente.

Aqui temos na linguagem de hoje o sistema concebido por Hertz. Esse sistema permitia obter frequências muito elevadas e, com uma sensibilidade insuspeitada, detectá-las e sustentar, por ressonância, faíscas no detector, que se passou a designar por ressoador eléctrico de Hertz. Nestas experiências Hertz usou uma bobina de Ruhmkorff de dimensões apreciáveis, com um comprimento de 52 cm e diâmetro de 20 cm.

O oscilador de Hertz que se designou mais tarde por dipolo eléctrico de Hertz era constituído por duas esferas metálicas de 30 cm de diâmetro (as armaduras do condensador) ligadas por uma haste rectilínea de 2,6 m de comprimento, interrompida no centro pelas duas esferas próximas do faiscador.

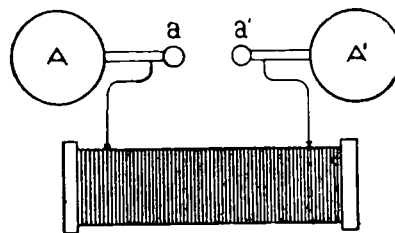


Fig. 2 — Oscilador de Hertz.

A,A': esferas grandes de latão. a,a': esferas do faiscador

Como detector, Hertz utilizou um ressoador quadrado, de lado 75 cm, interrompido no centro de um dos lados por um faiscador com regulação micrométrica. Mais tarde, este ressoador tomou a forma de uma espira circular.

Foi com estes dispositivos que Hertz conseguiu produzir e evidenciar experimentalmente oscilações amortecidas com uma frequência de oscilação da ordem dos 10^8 Hz. Numa linguagem corrente da radiotecnica: frequências da ordem da centena do megahertz.

Estes resultados constam da comunicação de 1887 “Über sehr schnelle elektrische Schwingungen”, publicada nos “Wiedemanns Annalen”, título que em português significa “Sobre oscilações eléctricas muito rápidas”.

Para melhor observar a faísca do ressoador colocou-o numa caixa. Na obscuridade a faísca diminuiu de intensidade. Hertz concluiu que o aumento da faísca quando se retirava da caixa era devido à luz emitida pelo faiscador do oscilador, fundamentalmente e como hoje é bem conhecido devido à radiação ultravioleta associada. A luz solar provocava efeitos idênticos. Estava descoberto o efeito fotoeléctrico: uma das heranças que Einstein recebeu de Hertz e soube frutificar.

Assim, Einstein estabeleceu a célebre fórmula $E = hf$ que traduz, como se sabe, um processo quântico em que a cada fóton de frequência f está associado um quantum de energia hf em que h é a constante de Planck.

Hertz deixou as investigações do efeito fotoeléctrico nas mãos de Hallwachs. Outros se interessaram desde logo pelo assunto, mas só em 1905 surgiu a interpretação genial de Einstein, a qual foi recebida com reservas pela comunidade científica.

Mais tarde, em 1921, foi-lhe atribuído o Prémio Nobel de Física pelas suas contribuições para a Física Teórica e, em particular, pela sua descoberta da lei do efeito fotoeléctrico. Não há uma alusão explícita à Teoria da Relatividade que era ainda objecto de diversas controvérsias. O efeito fotoeléctrico, entretanto, tinha sido verificado experimentalmente por Millikan em 1916 no domínio do ultravioleta e, por Broglie em 1920 para os raios X.

Nos tempos de Hertz e seus contemporâneos, o efeito fotoeléctrico foi tomado como prova de uma estreita ligação entre o Electromagnetismo e a Óptica. Mas voltemos a Hertz e às experiências que o levariam à descoberta experimental das ondas electromagnéticas. Nas tentativas de explicar certos factos imprevisíveis, Hertz refere-se a ondas ao longo de fios. Nomeadamente, salientou que pela primeira vez se conseguiu observar a acção entre correntes rectilíneas abertas.

Interrogou-se sobre se este facto permitiria comparar as teorias de Maxwell com as de outros. *Obtida a certeza da produção de oscilações de alta frequência, Hertz fiel aos objectivos enunciados por Helmholtz, procurou demonstrar experimentalmente que as correntes através de dieléctricos provocavam efeitos magnéticos idênticos aos provocados pelas correntes de condução.*

Hertz desenvolveu um método engenhoso que permitia, por adequada posição do detector, separar os efeitos eléctricos dos efeitos magnéticos que se pretendiam evidenciar. Foi exactamente nesta fase das suas experiências que Hertz notou e se surpreendeu com o facto de obter acções importantes para distâncias relativamente elevadas do detector. A convicção das anteriores teorias era de que essas acções deveriam atenuar-se mais acentuadamente, de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância.

Os objectivos explicitados no tema do prémio da Academia Prussiana tinham sido parcialmente atingidos e experimentalmente demonstrados: a variação da polarização de um dieléctrico acompanhava-se de um campo magnético. Também se desejava averiguar se as linhas de força do campo magnético na sua variação no espaço (e no tempo?) provocariam campos eléctricos. Hertz trabalhou nesse sentido.

Mas, para Hertz, começaram a configurar-se aspectos interessantes, originais e genuinamente característicos das teorias de Maxwell. Um deles era o facto do espaço livre de matéria se comportar como um material dieléctrico: a corrente de deslocamento no vácuo cria um campo magnético.

Era um facto, mas uma dificuldade subsistia. Hertz não conseguia demonstrar separadamente que, no ar, campos eléctricos variáveis criassem campos magnéticos e que, campos magnéticos variáveis criassem, também, campos eléctricos.



HEINRICH
RUDOLF HERTZ
1857 / 1894

A ele se deve a demonstração experimental das ondas electromagnéticas previstas por Maxwell e as acções pioneiras na investigação da electrodinâmica dos corpos em movimento

Mas — e para nós é o pensamento mais fecundo de Hertz — pressentia que podia demonstrar simultaneamente os dois efeitos se conseguisse provar a existência de ondas electromagnéticas propagando-se no ar com velocidade finita.

Reflexões desta natureza conduziram ao problema da efectiva existência de ondas electromagnéticas propagando-se no ar, o que, isso sim, revelaria e confirmaria o que era novo e essencial na teoria de Maxwell.

Note-se que naquela época se aceitava e sabia que a “electricidade” leva tempo a propagar-se ao longo de um cabo. Se o oscilador excitar ondas num cabo e no ar o padrão de interferência era facilmente previsível se as velocidades fossem idênticas.

Mas, se apenas houver ondas no cabo e no ar se verificasse acção à distância, com velocidade infinita, o padrão de interferência seria diferente e facilmente com-

parável com o anterior. Este foi o pensamento fundamental que presidiu às experiências. Veja-se como Hertz, na sua investigação, não punha de parte a hipótese da acção à distância.

Foram experiências difíceis. Arrojadas. Não tomaram em consideração plena as circunstâncias em que decorriam e ainda bem. A minúcia, por vezes, destrói a criatividade.

De tudo isto resultou que o objectivo fundamental foi atingido. *A partir da análise de padrões de interferência (ondas estacionárias) Hertz provou a existência de ondas electromagnéticas no ar e que a sua velocidade de propagação era finita.*

Surge assim a sua comunicação fundamental de 1888 publicada nos "Wiedemanns Annalen" — "Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkungen", o que em português se traduz por "Sobre a velocidade finita de propagação de acções electrodinâmicas". Realizou ainda outras experiências e publicou novos resultados em 1888: "Über elektrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion" ou seja "Sobre as ondas electrodinâmicas no ar e sua reflexão".

Não entramos aqui nas vicissitudes destas experiências. Apenas nos limitamos a referir que tudo estaria certo se não houvesse reflexão das ondas. Quando mais tarde se repetiu estas experiências e se eliminaram as reflexões, as conclusões de Hertz confirmaram-se, a favor das teorias de Maxwell. No entanto, Hertz apercebeu-se da possibilidade de reflexão e, nessa consciência, produziu no laboratório ondas electromagnéticas (dispensou o cabo) e colocou na parede oposta ao oscilador uma lâmina metálica.

Se existissem, de facto, ondas electromagnéticas propagando-se no ar, dever-se-iam reflectir e conduzir a um padrão de interferência típico de ondas estacionárias.

Assim sucedeu e nisso se motivou o segundo artigo de 1888 que referimos. De todas as experiências que realizou, a identificação da luz com um fenómeno electromagnético tornou-se clara e evidente. Era o triunfo da teoria de Maxwell: existiam ondas electromagnéticas e propagavam-se com a velocidade da luz. O que era, em última análise, consequência das equações de Maxwell.

Esta série de trabalhos experimentais culmina com um trabalho teórico notável, o primeiro trabalho teórico sobre uma antena de emissão. Hertz mostrou que é possível representar o campo electromagnético em função de um único vector: o vector de Hertz. A partir desse vector, Hertz determinou o campo electromagnético associado ao que hoje se designa por dipolo eléctrico de Hertz.

Hertz determinou esse campo, traçando as suas linhas de força. É um trabalho extremamente importante e paradigmático. Ai se revela claramente a zona próxima onde o campo eléctrico se filia trivialmente nas cargas do dipolo e o campo magnético se filia no vórtice que é a corrente de condução. Ai se vê claramente, na zona da

radiação, um campo electromagnético autónomo: as linhas de força do campo eléctrico são fechadas, estando encadeadas com linhas de força do campo magnético, que essas são sempre fechadas.

Neste resultado se consubstancia o mecanismo essencial que preside à propagação das ondas electromagnéticas no vácuo e de que o ar é para este caso uma boa aproximação.

Tudo isso consta do trabalho "Die Kräfte elektrischer Schwingungen behandelt nach der Maxwell'schen Theorie" ou seja "As forças das oscilações eléctricas tratadas de acordo com a teoria de Maxwell". Por forças entenda-se o campo eléctrico E e o campo magnético H .

Com este trabalho, Hertz culmina, da melhor maneira, os seus trabalhos sobre ondas electromagnéticas. De facto, aí se contém a implícita aplicação às comunicações o que foi sentido profundamente por Marconi e conduziu a sistemas de radiocomunicações eficientes e de grande alcance.

Neste domínio do espectro diz-se, em homenagem a Hertz, que se têm *ondas hertzianas*. Sem prejuízo de uma natural extensão a frequências mais baixas e também mais altas, o espectro das ondas hertzianas estende-se, convencionalmente, dos 10 kHz até aos 300 GHz ou seja ondas electromagnéticas com um comprimento variando entre 30 km e 1 mm.

Em 1890 Hertz publicou dois trabalhos teóricos notáveis, um "Sobre as equações fundamentais da Electrodinâmica dos corpos em repouso" e o outro "Sobre as equações fundamentais da Electrodinâmica dos corpos em movimento"¹. São trabalhos que, recorrendo à simplicidade do essencial, se desenvolvem com uma lógica impecável, decorrente das hipóteses assumidas.

A escrita das equações de Maxwell assumiu a forma elegante que lhes conferiu Heaviside e Hertz, sucessivamente. Para Hertz, a teoria de Maxwell era o conjunto das equações de Maxwell. Essas equações traduzem leis experimentais que podem ser testadas. As cargas eléctricas e as correntes eléctricas são tomadas como símbolos matemáticos e representam, respectivamente, pontos limite de convergência ou divergência das linhas de força do campo eléctrico e eixos de vórtices das linhas de força do campo magnético.

Na exposição de Hertz não se recorre a qualquer hipótese mecanicista. Hertz entendia e salientava que especulações sobre a natureza da matéria impediam o progresso e eram questões ilegítimas. Coerentemente, Hertz não discutiu a natureza da electricidade nem a essência do éter. Esta atitude havia de conduzir a dificuldades.

Como sabiamente salienta Edmond Bauer, a crise que se motivou na teoria de Maxwell, foi desencadeada por

¹ "Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für ruhende Körper", Wiedemanns Annalen, 40, 577 (1890).

"Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper", Wiedemanns Annalen, 41, 369 (1890).

Hertz e se continuou, noutra atitude, com Lorentz, revela que *a ciência, se quiser progredir e facultar-nos concepções positivas e consistentes do mundo real, terá, quando isso for necessário e convier, de passar do ponto de vista do fenomenológico a hipóteses de estrutura e inversamente.*

Como diz M. Tonnelat, a teoria electromagnética da luz de Maxwell nada informa nem garante sobre o arrastamento parcial do éter da Óptica, teorizado por Fresnel. E conforme salienta Max Born, Hertz foi o primeiro a utilizar a hipótese da completa convecção do éter pelos dieléctricos em movimento. Adoptou, assim, a hipótese formulada por Stokes para os fenómenos da Óptica.

Hertz estava plenamente consciente da arbitrariedade que cometia. A teoria de Fresnel e a experiência de Fizeau, sabia-o Hertz, eram indicação de que assim não era.

A teoria de Hertz, que revelou fenomenologia nova, era talvez qualitativamente aceitável, mas não quantitativamente, como ficou demonstrado pelas experiências de Röntgen (1885) e Eichenwald (1903), relativamente ao deslocamento lento de um isolante num campo eléctrico e pelas experiências de Wilson (1904), relativamente ao deslocamento no seio de um campo magnético.

A teoria de Hertz era simples e explicava correctamente os fenómenos de indução em condutores em movimento. O desacordo surgiu nos resultados experimentais relativamente a dieléctricos em movimento, no seio de um campo eléctrico ou magnético.

Assim, na experiência de Röntgen, o desvio da agulha magnética, reveladora de um campo magnético, era bastante menor do que a teoria de Hertz previa, numa proporção que conduz ao factor

$$\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon} = 1 - \frac{1}{\epsilon_r} = 1 - \frac{1}{n^2} = \alpha$$

que é exactamente o factor de arrastamento de Fresnel. Note-se que ϵ é a constante dieléctrica do meio em causa e ϵ_0 a constante dieléctrica do vácuo. De acordo com a teoria de Maxwell, a constante dieléctrica relativa $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ é igual ao quadrado do índice de refração n .

Hertz não foi bem sucedido, mas foi ele que desencadeou a crise que se estabeleceu na Electrodinâmica dos corpos em movimento. Desde que se aceitasse a plena identificação da Óptica com o Electromagnetismo, desde que, em consequência, se identificasse o éter da Óptica com o éter do Electromagnetismo, a Electrodinâmica dos corpos em movimento teria que passar por duas provas severas: explicar, através das equações de Maxwell, a experiência de Fizeau e, ainda, o resultado nulo da experiência de Michelson.

Nisso se empenhou Lorentz. Em 1892 publicou um artigo intitulado "A teoria electromagnética de Maxwell e

sua aplicação aos corpos em movimento". Lorentz aceitava o éter mas distinguia entre esta substância e a matéria: a matéria é tudo quanto possa ser sede de correntes eléctricas e movimentos electromagnéticos. Éter seria tudo quanto não é matéria ponderomotriz.

Nesse artigo, Lorentz preocupou-se com o problema de exprimir as equações de Maxwell num referencial de inércia que se movesse com velocidade uniforme relativamente ao éter.

Nesse mesmo artigo deduziu o factor de arrastamento de Fresnel, embora este resultado não tenha sido a sua motivação primeira.

Ainda em 1892, num artigo intitulado "O movimento relativo da Terra e do Éter", discutiu as experiências de Michelson e Michelson-Morley e, baseado na lei newtoniana de adição de velocidades, enunciou a sua arrojada hipótese de que o resultado nulo se poderia explicar por uma contracção do braço do interferómetro orientado segundo a direcção do movimento.

Este artigo veio à luz em 26 de Novembro de 1892. A hipótese de contracção foi apresentada independentemente de igual proposta formulada por Fitzgerald em 1892.

Em 1904, Lorentz publicou a sua versão final da Electrodinâmica dos corpos em movimento, o que consta do artigo intitulado "Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light".

Aí aparecem, pela primeira vez e formalmente acabadas, as transformações de Lorentz. Estas transformações tinham sido obtidas em 1900 por Larmor, como consta do seu livro "Aether matter".

Mas seriam estas transformações, em conteúdo e significado, as que foram deduzidas e funcionam na Teoria da Relatividade Restrita?

Não eram. Virtude maior é a da indicação de uma covariância das equações de Maxwell sobre essas transformações.

Permanecia o éter, havia uma referência sistemática e obrigatória ao éter. Quem o dispensou foi Einstein que, a partir dos dois princípios que informam a Teoria da Relatividade Restrita, reduziu a consequências a experiência de Fizeau e as experiências de Michelson e Michelson-Morley.

Assim, e de forma brilhante, terminou a crise que Hertz desencadeou e se estabelecera no seio do Electromagnetismo, mais concretamente, na Electrodinâmica dos corpos em movimento.

Agora tudo se explicava. E mais, a Física enriquecia-se com uma nova teoria, universal, e fonte de harmonia: a Teoria da Relatividade.

Em 1890, Hertz publicara "Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper". Em 1905, quase sob o mesmo título, Einstein fecha a questão com o seu célebre artigo "Zur

Elektrodynamik bewegte Körper” (Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento). Aí se continha uma revisão profunda do espaço e tempo, que passaram a ficar indissoluvelmente ligados, integrando o quadri-vector espaço-tempo. Para tanto bastou que Einstein postulasse dois princípios:

- O princípio de relatividade, restrito a referenciais de inércia,
- A constância da velocidade de propagação de sinais electromagnéticos no vácuo relativamente a qualquer referencial de inércia.

As transformações que Einstein estabeleceu são idênticas, formalmente, às de Lorentz, mas deixa de haver qualquer referencial privilegiado: são transformações intermutáveis entre referenciais equivalentes. Esta é a marca fundamental da Teoria da Relatividade.

Hertz viveria pouco. Ainda se interessou e realizou experiências com raios catódicos. Não conseguiu um vácuo que lhe permitisse evidenciar a deflexão desses raios por um campo eléctrico forte. Podia ter descoberto os electrões. Podia ter gerado e observado os raios X.

O seu último trabalho é de natureza teórica “Die Prinzipien der Mechanik in neuen Zusammenhänge” ou seja, em português, “Os princípios da Mecânica apresentados numa nova forma”. É uma obra póstuma, prefaciada por Helmholtz, que faleceu no mesmo ano de Hertz.

Hertz faleceu no dia 1 de Janeiro de 1894. Nesse seu último trabalho tentou estabelecer uma reformulação da Mecânica em que, além do mais, a acção à distância se explicava por uma rede de massas ocultas que assegurava um processo de acção contígua, idêntica à que se observa na teoria do Electromagnetismo. É uma obra controversa que, no entanto, tem vindo a merecer renovado interesse.

Hertz não deu especial atenção a eventuais aplicações das ondas electromagnéticas. Hertz foi despertado por Helmholtz em 1879, ano da morte de Maxwell; Marconi foi despertado por Righi em 1894, ano da morte de Hertz. Uma notícia necrológica extensa e descritiva da obra de Hertz, escrita por Righi, surpreendeu Marconi, de férias nos Alpes Italianos. Tinha 20 anos, pois nascera em 25 de Abril de 1874. Volta a casa, a Villa Griffone, perto de Bolonha. Aí repete Hertz e vai além. Parte para Inglaterra. *Em 2 de Junho de 1896 requer uma patente para a telegrafia sem fios, o que acontecia pela primeira vez no mundo. Em Dezembro de 1901 consegue uma ligação radiotelegráfica da Europa para a América. Em 1924, após intensas pesquisas experimentais a bordo do seu barco Elettra, telefonou, via rádio, da Inglaterra para a Austrália.*

As ligações hertzianas directas, por difracção ou via ionosfera, foram uma realidade que marcou profundamente o século XX.

Na realidade foi uma triada notável: Maxwell-Hertz-Marconi. Foi desta sequência que resultou a fama maior para Hertz. Mas Hertz não foi só isso. Corajoso, não se submeteu ao preconceito, à majestade do que já era.

Iluminou as suas experiências com o poder da sua observação e crítica científica.

Não experimentava ao acaso: previa, desistia, por vezes, perante a indicação de sinais físicos tão fracos que não poderia detectar. Por isso declinou em 1879 o convite de Helmholtz. Buscava e filiava-se nos princípios primeiros, ansiava por uma simplicidade suficiente. Conseguiu experimentalmente o que Faraday já intuira e tentara. Confirmou e contribuiu poderosamente para difundir a teoria de Maxwell.

Consciente de que esta teoria não esclarecia nem tinha conseguido ainda aquilo que, de facto, a completaria, preocupou-se com a Electrodinâmica dos corpos em movimento. Aí definiu uma linha de investigação onde avultou Lorentz e culminaria com Einstein, “desinventor” do éter e criador da Teoria da Relatividade.

Merece a nossa profunda admiração e respeito o fisico ilustre, lógico, consistente e corajoso que foi e soube ser Heinrich Rudolf Hertz. Erros que teve, foram, quem sabe, virtudes de inteligência, lógica e carácter.

REFERÊNCIAS

1. SALGUEIRO, Lúcia — “Por ocasião do 1.º Centenário da morte de Heinrich Hertz”, Memórias da Academia das Ciências, Classe das Ciências, Vol. XXXIV, 1994.
2. ADAWI, I. — “Centennial of Hertz Radio Waves”, Am. J. Phys. 57 (2), 1989.
3. PHILIP and MORRISON, Emily — “Heinrich Hertz”, Scientific American, 1957.
4. MULLINGAN, Joseph F. — “Hermann von Helmholtz and His Students”, Am. J. Phys. 57 (1), 1989.
5. O’HARA, J. G. and PRICHA, W. — “Hertz and the Maxwellians”, A Study and Documentation of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, Peter Peregrinus Ltd. London, 1987.
6. BAUER, Edmond — “L’Electromagnétisme — Hier et Aujourd’Hui”, Albin Michel, Paris 1949
7. ABREU FARO, M. J. de — “Da Modernidade do Campo Electromagnético: Dos Fundamentos às Actuais Aplicações”, Departamento de Física, Universidade de Évora, 1990.
8. BERKSON, William — “Las Teorias de Los Campos de Fuerza — Desde Faraday hasta Einstein”, Alianza Universidad, Alianza Editorial, Madrid, 1985.
9. ALIANZA, J. M. Sanchez Ron — “El Origen Desarrollo y Desarrollo de la Relatividad”, Universidad, Alianza Editorial, Madrid, 1985.
10. BORN, Max — “Einstein’s Theory of Relativity”, Dover Publications, New York, 1962.
11. TONNELAT, M. A. — “Histoire du Principe de Relativité”, Flammarion, Paris, 1971.
12. MILLER, Arthur F. — “Albert Einstein’s — Special Theory of Relativity — Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)” Addison — Wesley, Reading, Massachusetts, 1981.
13. BAKER, W. J. — “A History of the Marconi Company”, Methuen and Co, London, 1970.

M. de Abreu Faro é Professor Jubilado do Instituto Superior Técnico e fundador do Centro de Electrodinâmica desta instituição.

O que há de novo?

A condensação de Bose-Einstein e a sua recente observação experimental *

por E. Seabra Lage

Em finais de Junho passado, os meios de comunicação social (dos jornais diários e semanários, às rádios e televisões) e as revistas da especialidade (por exemplo, Phys. World, vol. 8., Agosto 1995, p. 21) anunciaram, com grande relevo, que cientistas americanos haviam confirmado uma previsão de Einstein com mais de 70 anos. Tratava-se, diziam (acompanhando a informação de bonitas imagens coloridas), da condensação de Bose-Einstein, como se esta designação tornasse evidente, para todos, o que havia sido observado pela primeira vez. Que é, então, a condensação de Bose-Einstein e em que consistiram as experiências que a vieram confirmar?

1. Um pouco de História

Em Junho de 1924, o jovem indiano S. N. Bose escrevia a Einstein, pedindo-lhe que analisasse um manuscrito (em inglês) e que, se estivesse de acordo, o recomendasse para publicação, pois já havia sido rejeitado pelo Philosophical Magazine. Einstein considerou o trabalho de tal valor que, ele próprio, o traduziu para alemão, propôs a sua publicação (Z. Phys. 26 (1924) 178) e acrescentou, como comentário: "Trata-se de um avanço importante e o método utilizado gera a teoria quântica do gás ideal, como discutirei com mais pormenor noutro sítio". Note-se que, na ocasião, Einstein já se debatia com o problema (que nunca resolveria) de formular uma teoria do campo unificado, tendo classificado, mais tarde, como um acidente de percurso esta sua última incursão na Física Estatística! Vejamos em que consistiu a contribuição de Bose.

Em 1900, Planck funda a teoria quântica ao adivinhar, por métodos heurísticos, a célebre fórmula que correctamente descreve a energia da radiação térmica:

$$\delta U_\nu = 2 \left[V \frac{4\pi\nu^2}{c^3} \delta\nu \right] \left[\frac{h\nu}{e^{h\nu} - 1} \right]$$

Nesta expressão, o 1.º membro representa a energia média da radiação electromagnética contida num volume V , em equilíbrio térmico (à temperatura $T = 1/k_B\beta$) com paredes totalmente absorventes (*corpo negro*) e correspondendo a radiações (ondas electromagnéticas) com frequências em $(\nu, \nu + d\nu)$. No 2.º membro, c é a velocidade da luz no vazio e h é a célebre constante de Planck. Realçamos, neste 2.º membro, as diferentes origens de vários factores que contribuem para a energia média; assim o 1.º parêntesis, é o número de ondas electromagnéticas estacionárias que cabem no volume V . A sua contagem é um problema simplesmente geométrico, hoje

familiar a qualquer aluno de Física, e consiste em encontrar o número de vectores de onda que satisfazem às condições impostas pelas paredes. O factor 2 tem origem no facto de cada onda electromagnética admitir, num meio isotrópico como o vazio, duas orientações arbitrárias para o campo eléctrico (ou magnético) associado com a onda (são as duas polarizações possíveis, ortogonais entre si e ao vector de onda). Deste modo, os dois primeiros factores da fórmula indicam o número de modos de vibração do campo electromagnético no interior da cavidade e com frequências no intervalo indicado. O último parêntesis representa a contribuição genial de Planck: a energia de cada modo é igual à de um oscilador harmónico, mas só pode tomar valores que são múltiplos de $h\nu$, pelo que a energia média do oscilador, usando as regras da estatística de Boltzmann, é:

$$\frac{\sum_{n=0}^{\infty} nh\nu e^{-\beta nh\nu}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta nh\nu}} = \frac{h\nu}{e^{\beta h\nu} - 1}$$

Ora, em 1905, Einstein, nos seus estudos sobre o efeito fotoeléctrico (que lhe valeriam o Prémio Nobel de 1921) havia introduzido o conceito de fóton, partícula associada à radiação electromagnética, trocada, de forma indivisível, na absorção ou emissão pela matéria. Deste modo, os inteiros que Planck postulava para caracterizar o estado de excitação de cada modo do campo electromagnético, foram reinterpretados como o número de fótons nesse modo. Assim, cada fóton tem energia $h\nu$ e, invocando a electrodinâmica de Maxwell ou a teoria da relatividade, momento $p = h\nu/c$, como confirmaram as experiências de Compton em 1923. Levanta-se, agora, um problema interessante: será possível reobter a fórmula de Planck considerando o campo da radiação electromagnética como um sistema de fótons, de maneira análoga à que permitira à Estatística de Boltzmann obter a equação de estado dos gases perfeitos? Curiosamente, este problema não parece ter ocorrido a Einstein, embora a sua solução pudesse lançar alguma luz sobre a relação dual onda-corpúsculo que a radiação apresentava, complementaridade que apormentaria Einstein para o resto dos seus dias.

É precisamente este problema que Bose considera no seu artigo de 1924, onde introduz dois conceitos fundamentais em Física: fótons não se conservam (embora lá aparecia) e cada fóton tem dois estados de polarização, como é sugerido pelo tratamento electrodinâmico mas cuja interpretação física é misteriosa, como Einstein se apercebe (numa carta de Julho 1924 a Ehrenfest comenta que a dedução de Bose é elegante, mas a essência permanece obscura), dificuldade que a Bose escapa! Vejamos, em linhas gerais, o argumento de Bose, libertando-o de incorrecções que o desenvolvimento pos-

* Ver *Science* 269 198 (1995).

terior da teoria quântica (1925-26) se encarregaria de clarificar.

Bose começa por considerar o gás de fótons como um sistema de partículas livres (sem interacção) e atribui, na esteira da estatística de Boltzmann, um espaço de fase a cada partícula cuja medida é dada por:

$$\omega_v = 2V \frac{d\vec{p}}{h^3} = 2V \frac{4\pi p^2 dp}{h^3} = 2V \frac{4\pi v^2 \delta v}{c^3}$$

O factor 2 leva em conta os dois estados de polarização do fóton; a integração sobre a posição da partícula já foi efectuada, dada a homogeneidade do sistema. A simetria esférica, consequência da isotropia, origina a 2.^a igualdade. O resultado final obtém-se pela relação entre momento e frequência atrás referida. E o resultado final não é mais que o peso estatístico que, na fórmula de Planck, era obtido por contagem de ondas! A simplicidade do argumento terá convencido Einstein a propor a publicação do artigo, apesar de, como referimos, ter visto dificuldades de interpretação que ao próprio Bose escaparam. Mas o mais interessante está por aparecer.

A medida ω_v é adimensional e deve ser considerada um número grande, dada a presença do volume macroscópico do recipiente. Ela representa o número de estados (com frequências no intervalo dado) acessíveis a cada fóton. Mas quantos fótons lá vamos colocar? Designando esse número por N_v , ele irá ser determinado pelo grande principio variacional da termodinamica estatística - a distribuição de equilíbrio maximiza a entropia do sistema, para uma energia total U dada. Ora a entropia, segundo Boltzmann não é mais que o logaritmo do número total de estados microscópicos acessíveis ao sistema (W), isto é, o número de maneiras de distribuir os fótons pelos seus estados, mantendo a energia total com o mesmo valor. Como os diferentes intervalos de frequência (que determinam os diferentes estados para os fótons) são independentes, aquele número W é o produto dos números W_v , definidos para cada um destes intervalos. Assim:

$$W = \prod_v W_v \Rightarrow S = k_B \log W = \sum_v k_B \log W_v$$

Até aqui o raciocínio foi idêntico ao seguido no tratamento estatístico clássico do gás perfeito. Mas à pergunta sobre quantas maneiras (W_v) há para distribuir N_v fótons por ω_v estados, Bose responde ¹:

$$W_v = \frac{(N_v + \omega_v - 1)!}{(\omega_v - 1)! N_v!}$$

E Bose diz que este resultado é evidente! Enganava-se no raciocínio, mas acertava no resultado, o que não é motivo para menor admiração do seu talento. Realmente, a solução encontrada por Bose justifica-se, em 1924, *a posteriori* por originar a expressão de Planck, como veremos. Mas seria Einstein a perceber que Bose devia ter atingido algo muito profundo, e não apenas uma simples coincidência numérica. Dessa intuição de Einstein temos conhecimento pela sua carta a Ehrenfest. Mas seria necessário esperar por 1926 para que Dirac apresentasse a explicação baseada nos princípios da Mecânica Quântica, e que consideraremos a seguir.

2. Um pouco de Física Estatística Quântica

Para que o leitor se aperceba do que intrigava Einstein, considere o seguinte problema: de quantas maneiras podemos distribuir N_v bolas por ω_v caixas? Rapidamente conclui que não obtém W_v . Obtém um número bem maior, porque contabiliza como distintas duas ordenações que diferem na troca de duas bolas em caixas diferentes. Mas suponha que as bolas são indistinguíveis — nesse caso, trocar duas bolas em caixas diferentes conduz à mesma ordenação. Nestas circunstâncias, o número de ordenações distintas pode ser encontrado (como mostrou Ehrenfest) com o seguinte raciocínio simples: suponha que alinha as ω_v caixas em fila, com uma parede separando cada par contíguo de caixas (excepto as duas dos extremos). Então, o número de ordenações distintas obtém-se a partir das permutações dos $N_v + \omega_v - 1$ objectos (N_v bolas e $\omega_v - 1$ paredes internas), desde que não conte como distintas as permutações das N_v bolas ou das $\omega_v - 1$ paredes. É o resultado de Bose. Mas porque temos de considerar as bolas indistinguíveis? Ninguém tem dúvidas que bolas reais são distinguíveis, por muito parecidas que sejam entre si. Contudo o mesmo não se passa no mundo atómico, o que nos obriga a uma pequena explicação, antes de retomarmos o raciocínio de Bose.

Foi postulado por Pauli (1925) que todas as partículas elementares e suas associações (em núcleos, átomos ou moléculas) se dividem em duas grandes famílias que passaram a ser designadas por *fermiões* e *bosões*. À primeira família pertencem todas as partículas com spin semi-inteiro (1/2, 3/2, etc), tal como os quarks, electrões e neutrinos, ou associações com número ímpar de fermiões (como neutrões, prótons, diversos núcleos e átomos, como ³He). À segunda família pertencem todas as partículas com spin inteiro (0, 1, 2, etc), tal como os glúons (que mantêm os quarks juntos), fótons, diversas excitações em sólidos (fonões, plasmões, etc.), quaisquer associações de bosões ou com número par de fermiões (como diversos núcleos e átomos, como ⁴He). Ora, a função de onda que descreve um sistema de fermiões idênticos tem de trocar de sinal, quando dois quaisquer desses fermiões são trocados — assim, nunca poderíamos colocar dois fermiões idênticos na mesma caixa e se nos ocupássemos da sua distribuição por todas as caixas acessíveis, seríamos conduzidos à estatística de Fermi-Dirac. Pelo contrário, a função de onda que descreve um sistema de bosões idênticos é invariante para uma permuta de dois quaisquer bosões. Assim, trocar dois fótons não origina um novo estado — o que justifica o procedimento inconsciente de Bose (e justamente, imortaliza o seu nome associando-o à família de tais partículas) e nos faz espantar com a extraordinária intuição de Einstein, que o terá levado a recomendar a publicação do trabalho de Bose, apesar da aparente arbitrariedade das suas hipóteses. Foram, *a posteriori*, completamente justificadas.

Retomemos, agora, o raciocínio de Bose. Uma vez encontrada a entropia, o método é bem conhecido de qualquer estudante de Física. A distribuição N_v dos fótons

¹ Na realidade, esta expressão foi obtida, pela 1.^a vez, por Einstein, na sua procura de elucidar os resultados de Bose. Quanto à expressão de Bose, embora parecida, baseava-se numa outra filosofia: fixar o número de fótons e variar o número de estados acessíveis.

no equilíbrio deve maximizar a entropia para uma energia U dada:

$$S = \sum_{\nu} k_B \log \frac{(N_{\nu} + \omega_{\nu} - 1)!}{(\omega_{\nu} - 1)! N_{\nu}!} \quad \text{máximo para } U = \sum_{\nu} N_{\nu} h\nu \text{ dado}$$

A técnica consiste em reconhecer que os números N_{ν} e ω_{ν} são grandes (podemos ignorar o factor 1 nas expressões) e usar a fórmula de Stirling $\log N! = N \log N - N$ (que já dá uma excelente aproximação para $N > 20$). Libertamo-nos do máximo condicionado introduzindo um multiplicador de Lagrange β ; somos assim levados a procurar o máximo (sem condições) de:

$$S - \beta U = \sum_{\nu} k_B [(N_{\nu} + \omega_{\nu}) \log(N_{\nu} + \omega_{\nu}) - \omega_{\nu} \log \omega_{\nu} - N_{\nu} \log N_{\nu}] - \beta \sum_{\nu} N_{\nu} h\nu$$

Facilmente encontramos:

$$N_{\nu} = \frac{\omega_{\nu}}{e^{\beta h\nu} - 1}$$

O parâmetro de Lagrange é determinado pela energia:

$$U = \sum_{\nu} N_{\nu} h\nu = \sum_{\nu} \frac{h\nu \omega_{\nu}}{e^{\beta h\nu} - 1} = \sum_{\nu} 2V \frac{4\pi\nu^2 \delta\nu}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\beta h\nu} - 1}$$

É a fórmula de Planck! (O leitor mais atento objectará que não identificamos β com o inverso da temperatura absoluta; mas com os resultados já obtidos, pode mostrar sem dificuldades que $dS = k_B \beta dU$, o que mostra ser $k_B \beta = 1/T$, como o exige o 2.º princípio da Termodinâmica). Fica, assim, completa a exposição sobre o contributo extraordinário de Bose, embora ele próprio tenha afirmado não ter tido consciência da extensão do desafio que o seu artigo colocava à lógica clássica!

3. A condensação de Bose-Einstein

Vejamos, agora, qual a contribuição que Einstein prometera no seu comentário ao artigo de Bose. O seu trabalho apareceria na Preuss. Akad. Wiss. (1924), p. 261 e, para a estatura científica do seu autor, pode ser considerado uma trivialidade. Einstein considerou um gás de partículas independentes, com massa (o fóton tem massa nula), em número fixo (os fótons não se conservam) e sujeito à estatística de Bose. Duas condições têm, então, que ser introduzidas:

a) A relação de dispersão passa a ser a bem conhecida relação clássica entre energia e momento, pelo que também é modificada a medida no espaço de fase:

$$\varepsilon = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow \omega_{\varepsilon} = V \frac{d^3p}{h^3} = V \frac{4\pi p^2}{h^3} \delta p = V 2\pi \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{\varepsilon} \delta \varepsilon$$

O leitor notará a ausência do factor 2 - não há qualquer razão para o introduzir, pois não há nenhum factor correspondente aos dois estados de polarização do fóton.

b) A conservação do número de partículas traduz-se na condição:

$$N = \sum_{\varepsilon} N_{\varepsilon}$$

Temos, então que maximizar a entropia sujeita a duas condições, energia e número de partículas dados. Há, pois, necessidade de dois parâmetros de Lagrange: usaremos β , como antes, e introduzimos $\beta\mu$ (assim definido, por conveniência) associado com a condição anterior. O máximo não condicionado da expressão:

$$S - \beta U + \beta\mu N = \sum_{\varepsilon} k_B [(N_{\varepsilon} + \omega_{\varepsilon}) \log(N_{\varepsilon} + \omega_{\varepsilon}) - \omega_{\varepsilon} \log \omega_{\varepsilon} - N_{\varepsilon} \log N_{\varepsilon}] - \beta \sum_{\varepsilon} N_{\varepsilon} h\nu + \beta\mu \sum_{\varepsilon} N_{\varepsilon}$$

fornece:

$$N_{\varepsilon} = \frac{\omega_{\varepsilon}}{e^{\beta(\varepsilon - \mu)} - 1} = V 2\pi \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} \frac{\sqrt{\varepsilon} \delta \varepsilon}{e^{\beta(\varepsilon - \mu)} - 1}$$

O factor que multiplica a medida no espaço de fase (número de estados acessíveis a cada partícula) é a *distribuição de Bose-Einstein*. Quanto aos dois parâmetros de Legendre, a identificação de β com o inverso da temperatura absoluta é feita como antes; por outro lado, μ facilmente se prova que é o potencial químico do sistema, embora isso não seja, neste contexto, relevante, sendo determinado pela equação relativa à conservação do número de partículas:

$$N = \sum_{\varepsilon} N_{\varepsilon} = V 2\pi \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{\varepsilon}}{e^{\beta(\varepsilon - \mu)} - 1} d\varepsilon$$

É conveniente estudar esta equação com cuidado. Para isso, mudamos a variável de integração para $x = \beta\varepsilon$ e definimos $\zeta = e^{-\beta\mu}$ (é a *actividade química*), encontrando-se a equação de estado do gás

$$n\lambda_T^3 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dx \frac{\sqrt{x}}{\zeta e^x - 1} \equiv F_{3/2}(\zeta)$$

onde $n = N/V$ é a densidade e:

$$\lambda_T = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$

é uma forma abreviada de dar a temperatura (o leitor mais experiente identificará λ_T com o comprimento de onda de de Broglie para uma partícula com a energia térmica $k_B T$). Os resultados já obtidos permitem-nos deduzir, sem grande dificuldade, a pressão exercida pelo gás, bem como o seu calor específico. Não iremos entrar nestes detalhes mais técnicos, mas de menor importância para o que se segue.

A equação de estado relaciona a densidade e temperatura (1.º membro) com a actividade química (2.º membro), definida através de um integral complicado. É fácil encontrar o limite das altas temperaturas: neste limite, o 1.º membro é pequeno, pelo que z deve ser grande. Cálculos elementares mostram que, neste limite, se reobtem a equação de estado do gás perfeito clássico. E até podemos calcular as primeiras correcções quânticas, como fez Einstein. Mais interessante é, porém, vermos que, à medida que a temperatura decresce, o 1.º membro da equação aumenta, pelo que z deve diminuir. Mas ζ não pode ser menor que a unidade — do ponto de vista matemático, tal resulta de o integral que define a função $F_{3/2}(\zeta)$ deixar de ficar definido. Mas compreende-se a

razão física de tal restrição: a distribuição de Bose-Einstein, indicando quantas partículas há em cada estado permitido, torna-se ilimitada para o estado fundamental, isto é, para energia nula. Existe, assim, uma temperatura mínima T_0 , abaixo da qual os resultados anteriores deixam de ter sentido. Para essa temperatura, é $\zeta = 1$, encontrando-se:

$$n\lambda_1^3(T_0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{x}}{e^x - 1} dx = 2.612 \Rightarrow T_0 = \frac{h^2}{2\pi m k_B} \left(\frac{n}{2.612} \right)^{2/3}$$

Todos estes resultados foram obtidos por Einstein na publicação citada. Ficou para o artigo seguinte (Preuss. Akad. Wiss. (1925), p.3) a resposta à pergunta inevitável: que acontece quando $T < T_0$? Escreveu Einstein: "Mantenho que, neste caso, um número de moléculas aumentando com a densidade vai ocupar o 1.º estado quântico (que tem energia cinética nula) enquanto as restantes moléculas se distribuem pelos outros estados com o valor $\zeta = 1$... É efectuada uma separação: uma parte "condensa", a outra permanece como um "gás ideal saturado". O que Einstein quer dizer é o seguinte: para $T < T_0$, somos forçados a regressar à equação que determina ζ , nela separando a contribuição de um único estado quântico (o fundamental) dos restantes que são tratados, como antes, na aproximação do contínuo (somadas substituídas por integrais) com $\zeta = 1$. Assim, fica:

$$N = N_0 + 2\pi \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} \int_0^\infty \frac{\sqrt{\epsilon}}{e^{\beta\epsilon} - 1} d\epsilon \Rightarrow \frac{N_0}{V} = n \left[1 - \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \right]$$

Este resultado é espantoso — abaixo de T_0 , há uma fracção finita (tendendo para a unidade, quando T tende para 0) de partículas que ocupa um único estado (o de menor energia). Como as partículas são indistinguíveis, esta fracção não é sempre constituída pelas mesmas partículas, como acontece, por exemplo, na condensação líquido-vapor onde algumas moléculas estão na fase de vapor e as outras na fase líquida. Pelo contrário, na *condensação de Bose-Einstein* qualquer partícula tem a mesma probabilidade que qualquer outra de se encontrar no estado condensado. Este é definido pelo comportamento cooperativo de todas as partículas e a condensação ocorre, realmente, não no espaço real, mas no espaço de momentos — o condensado tem momento nulo. Deve-se, pois, a Einstein o primeiro exemplo de uma transição de fase tratada pela Física Estatística, mostrando claramente que esta ciência é capaz de gerar os comportamentos analíticos singulares que as funções termodinâmicas exibem junto a mudanças de fase. Mas seria observável esta condensação de origem puramente quântica? Como Einstein se interroga noutra carta a Ehrenfest: "A teoria é bonita, mas haverá alguma verdade nela?" O próprio Einstein sugere que o fenómeno pode ocorrer com o hidrogénio, hélio e o gás electrónico (estamos no início de 1925, e ninguém então sabia que os electrões são fermiões!). O hidrogénio não é um bom candidato, pois as partículas não são independentes, apresentando fortes interacções moleculares. Já o hélio (He_4 , um bosão; não o He_3 , um fermião) era um bom candidato. Mas teria de se esperar por 1928 para que Keesom observasse, pela primeira vez, que o hélio líquido apresentava uma anomalia (conhecida por transição Hel/Hell)

a $T = 2.19K$. Ora, para a densidade do hélio líquido ($n = 2.14 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) a temperatura para a condensação de Bose-Einstein é $T_0 = 3.1 K$. Hoje, admite-se que, abaixo de 2.19K, o hélio apresenta fenómenos que, na base, correspondem à condensação de Bose-Einstein, mas modificada para incluir os efeitos da interacção interatómica. Não se trata, portanto, de uma manifestação "pura" da condensação que Einstein havia previsto.

4. As experiências de Junho 1995

Ao longo de décadas, vários grupos experimentais procuraram observar a condensação de Bose-Einstein. Mas as condições experimentais são muito exigentes: os átomos têm, evidentemente, de ser bosões e com fraca interacção, o que obriga a densidades muito pequenas e, portanto, temperaturas extremamente baixas. Percebe-se, assim, a imensa dificuldade das experiências e como estas só se tornaram possíveis graças aos enormes progressos registados na óptica, electrónica e física atómica. Analisemos, em linhas gerais, as experiências realizadas por um grupo de investigação da Universidade do Colorado (USA), constituído por M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Mathews, C. E. Wieman e E. A. Cornell. Os aspectos técnicos estão, evidentemente, relatados com minúcia no artigo referido no título.

a) Os investigadores usaram átomos de rubídio-37 na forma de vapor bastante diluído. Embora não o refiram, julgo que se trata de átomos do isótopo mais estável, com número de massa 87. Cada átomo tem, pois, um núcleo com 37 prótons e 50 neutrões, envolvido numa nuvem (raio atómico 2.46 Å) de 37 electrões. No total, um número par de fermiões, como convém para se comportar como um bosão. O artigo refere as vantagens que recomendam o uso do rubídio — para além de fraca interacção atómica, como se trata de um elemento do grupo IA (a que pertence o hidrogénio), tem, pois, um único electrão fora de uma camada fechada. Esse electrão é, assim, muito sensível a orientar o seu spin em campos magnéticos, propriedade que, como se verá, é crucial para o bom resultado da experiência.

b) Os átomos de rubídio são armazenados e pré-arrefecidos por métodos ópticos. Os princípios da técnica são bem conhecidos — potentes lasers são apontados para uma pequeníssima região do espaço. A pressão da radiação confina os átomos; a frequência da radiação é ajustada para que qualquer átomo que se mova acima de uma velocidade limite e em direcção a um feixe laser, sofra colisões inelásticas com os fótons incidentes (aproveitando-se o efeito Doppler), reduzindo, assim, a sua velocidade o que, para o conjunto dos átomos se traduz num arrefecimento. Desta forma, conseguem-se "prender" cerca de 10^7 átomos e atingir temperaturas de 20 μK . Mas esta temperatura é ainda muito elevada!

c) Aplica-se um pequeno campo magnético estático e submete-se a amostra a um curto impulso de luz que força todos os momentos magnéticos atómicos (resultan-

² Realmente, $\zeta = 1$ apenas no *limite termodinâmico*, isto é, deixamos tender para infinito as grandezas extensivas (número de partículas, energia, entropia, etc.) mantendo fixas as densidades.

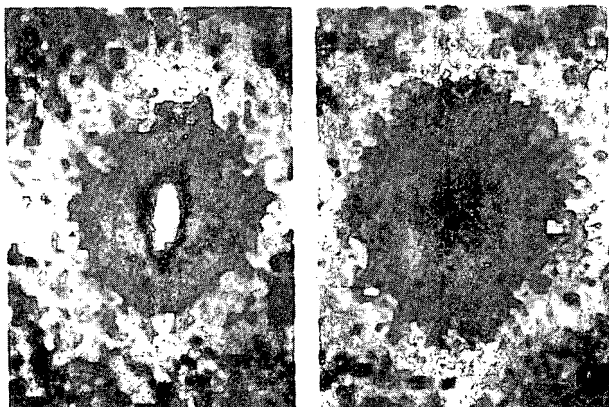
tes do electrão não emparelhado) a alinhar com o campo magnético aplicado.

d) A seguir, desligam-se os lasers e constrói-se uma "ratoeira" especial, obtida pela sobreposição de um grande campo magnético quadrupolar esférico, com um pequeno campo magnético transverso, oscilando a 7.5 Khz. O resultado é a formação de um potencial harmónico tridimensional, com simetria cilíndrica, onde ficam capturados cerca de 4×10^6 átomos, mas num espaço tão reduzido que a densidade é de $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

e) Agora o ponto-chave: arrefecimento por evaporação. Como é feito? Os átomos mais energéticos, penetram em regiões mais intensas do campo magnético quadrupolar. Assim, se aplicarmos um campo de radio-frequência (rf), por acção do efeito Zeeman, podemos inverter o spin desses átomos, daí resultando que as forças magnéticas que, antes, os confinavam, agora os repelem, expulsando-os da amostra. O resultado é uma amostra mais fria! Conseguiu-se, desta forma, atingir 170 nK (isso mesmo, $170 \times 10^{-9}\text{K}$) e densidades de $2.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, no limiar da transição de Bose-Einstein. Toma-se evidente que quanto menor for a frequência do campo rf, menor é a energia Zeeman excitada, menor é o campo magnético assim "sondado", mais central e menos energético é o átomo expulso. O campo de rf é bem um escalpelo da energia (e, portanto, da velocidade) dos átomos da amostra.

f) Como sabemos que foi conseguida a condensação de Bose-Einstein? Literalmente, por fotografia! Uma vez atingidas as densidades e temperaturas convenientes, todos os campos são removidos, permitindo-se a expansão balística da amostra (nesta altura, com cerca de 10^4 átomos!). Isso produz maior arrefecimento ($T = 20\text{nK}$), embora menor densidade (10^{11} cm^{-3}). Se se aplicar, agora, um impulso laser que é absorvido pela amostra (e que, ao aquecê-la, a vai destruir, mas todo o processo é repetível rapidamente), basta medir a intensidade da luz que atravessou a amostra para obter informação da sua densidade. Assim, a "sombra" desta amostra iluminada mostra-nos não só a distribuição espacial dos átomos como, porque a amostra está em expansão livre, a sua distribuição de velocidades imediatamente antes da medição.

Os resultados não podiam ser mais evidentes, embora de momento sejam ainda bastante qualitativos. Acima da transição, a "sombra" é circular (imagem da esquerda) e o grau de absorção permite reconstruir uma distribuição isotrópica e gaussiana das velocidades, consistente com um comportamento praticamente clássico.



Mas abaixo da transição (imagem da direita), para além desta distribuição, surge um pico não térmico, o qual mede a distribuição de velocidades do condensado, a qual é, não uma distribuição térmica, mas quântica, correspondente a uma fracção apreciável dos átomos se encontrarem no estado fundamental. Ora este é o estado para partículas que estiveram situadas, como vimos, num poço de potencial com simetria cilíndrica. As imagens mostram claramente que a distribuição de velocidades do condensado não tem simetria esférica, antes apresentando preferência por um eixo!

5. Conclusão

É bonito ver confirmada uma das teorias mais básicas da Física Estatística. Einstein e Bose teriam ficado felizes, embora ninguém duvidasse do resultado. Para quê, então, fazer tais experiências? Por um lado, porque, enquanto não se fizerem, quem pode garantir que o inesperado não possa surgir, revelando algum princípio fundamental novo (isso aconteceu, por exemplo, na medição do efeito Hall, há cerca de 15 anos)? Mesmo que o inesperado não surja, como parece ser o caso, o grau de conhecimento que se obtém é enorme — por um lado, podem-se medir constantes fundamentais (como a constante de Planck ou massas atómicas) com grande precisão, permitindo calibrar muitas outras experiências em domínios científicos bem longínquos, e aferir do grau de precisão das nossas teorias sobre o comportamento da Natureza. Por outro lado, mentes mais pragmáticas ficarão reconfortadas, porque técnicas experimentais com tais graus de exigência geram progressos tecnológicos inesperados, como aconteceu, por exemplo, com as aplicações médicas da ressonância magnética nuclear ou, mais recentemente, a tomografia por emissão de positrões. São de esperar avanços significativos em litografia sub-microscópica e nas técnicas de nanofabricação.

Não posso terminar sem colocar ao leitor mais experiente um desafio: se analisar as flutuações dos números de ocupação dos estados bosónicos, será possível obter a relação de Victor Louis De Broglie? Ainda hoje, com todas as vantagens dos nossos conhecimentos de Física do final do séc. XX, não podemos deixar de nos admirarmos que Einstein (no 2.º artigo citado) tenha obtido a resposta correcta. O artigo é de Janeiro de 1925, a tese De de Broglie só foi defendida em Outubro de 1924. Teria Einstein obtido, independentemente de De Broglie, a relação chave da mecânica ondulatória?

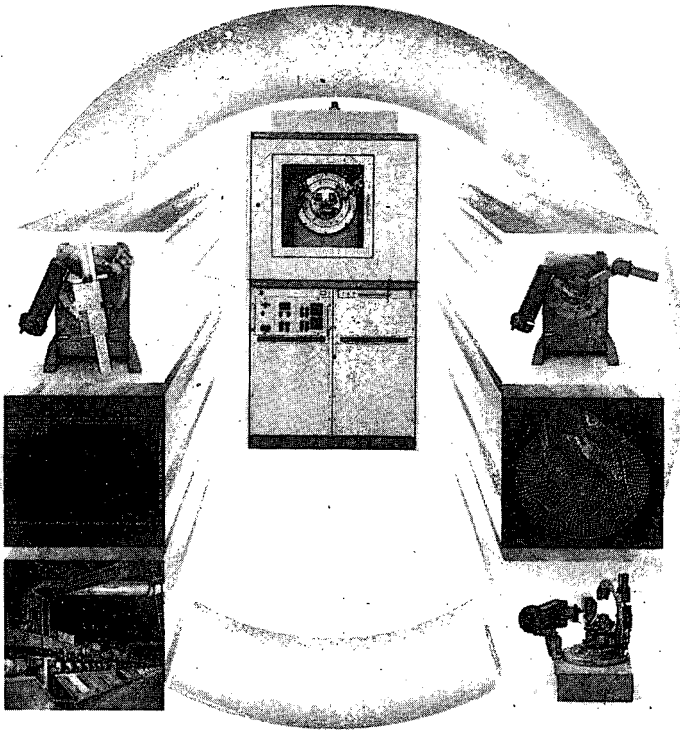
SUGESTÕES DE LEITURA

- Subtle is the Lord... — The Science and the Life of Albert Einstein, por A. Pais, Oxford University Press (1982)
- Superfluids, vol. II, por F. London, Dover Publications (1954)
- Statistical Mechanics, por K. Huang, 2.ª edição, Wiley N.Y. (1987)

Eduardo Seabra Lage é Professor Catedrático da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Física.

SIEMENS

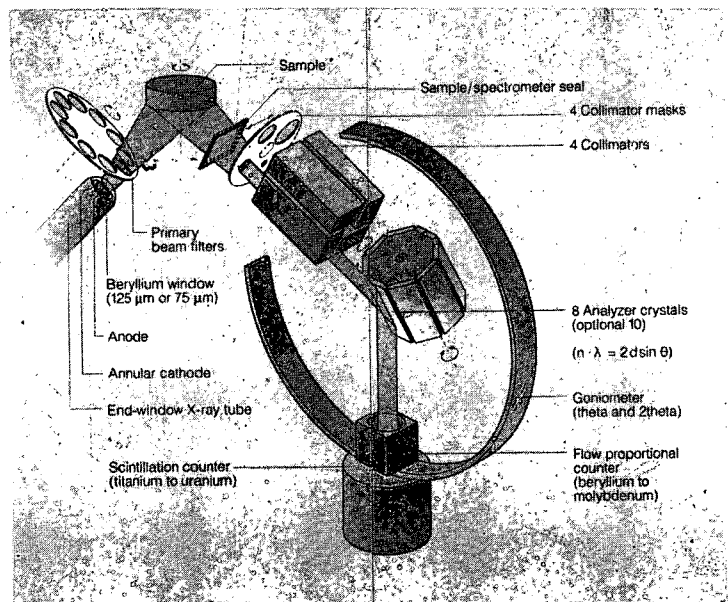
DIFRACTÓMETROS DE RAIOS X



- Espectroscopia de baixos e altos ângulos
- Análise de texturas, filmes finos
- Reflectometria
- Altas e baixas temperaturas
- Aquisição rápida (PSD)
- Fontes convencionais e de ânodo rotativo
- Software dedicado

ESPECTRÓMETROS DE FLUORESCÊNCIA

- Sistemas Sequenciais
- Sistemas Multicanais
- Manipulação automática de amostras
- Alta resolução (WDS)
- Medidas em tempo real



A Alta Qualidade e Precisão Siemens ao Serviço da Investigação e da Indústria

Assistência Técnica Permanente

MTB

M. T. Brandão, Lda.

RUA DO QUANZA, 150 — 4200 PORTO

Tel: (02) 8302709

Fax: (02) 8302710

EM PRÓXIMO NÚMERO

G A Z E T A D E
FÍSICA

MICROSCOPIAS DE BARRIMENTO POR SONDA

REDES BIODIMENSIONAIS NO ENSINO SECUNDÁRIO

OLIMPÍADAS DE FÍSICA