

Em 1937, durante uma reunião em Bolonha, em homenagem a Galvani, chegou a notícia de que Rutherford estava seriamente enfermo, com uma hérnia. Em 19 de outubro de 1937, ele morreu. Sua morte foi anunciada durante a reunião por Bohr com a voz embargada. Embora muitos dos participantes só conhecessem Rutherford através de obras científicas, as pessoas deixavam transparecer no rosto como estavam sentindo aquela perda. Rutherford foi enterrado na Abadia de Westminster, junto ao túmulo de Newton.

## Capítulo VII

### Bohr e os modelos atômicos

Quase todos os jovens físicos ao redor de Rutherford em Manchester eram experimentalistas. O próprio Rutherford tinha sentimentos mistos quanto à teoria: era muito inteligente para ignorar sua importância, mas pensava intuitivamente, usando modelos simples, seguindo a tradição inglesa. O enorme êxito que resultou de seus métodos experimentais e intelectuais simples talvez tenham reforçado excessivamente sua confiança em tal atitude. Aparentemente, Rutherford tinha um interesse muito limitado pelos *quanta* e pelas novas e grandes idéias que estavam revolucionando a física teórica: estava voltado para sua própria revolução. Mal se podia conceber uma troca de idéias entre Rutherford e Einstein relacionada com a física, pelo menos do ponto de vista de Rutherford. Não obstante, foi em seu laboratório em Manchester que teve início a outra revolução teórica, fomentada por um visitante que participava de maneira muito ativa da vida do laboratório: Niels Bohr (1885-1962).

#### O Jovem Bohr e o Átomo de Hidrogênio

Niels Bohr (Figura 7.1) nasceu em 7 de outubro de 1885 em Copenhague, filho do eminente fisiologista Christian Bohr e de Ellen Adler, sua esposa, filha de um rico banqueiro judeu. A família propiciou todas as possibilidades de uma educação plena, no sentido acadêmico e cultural, tanto a Niels quanto a seu irmão Harald, que veio a tornar-se um matemático de renome. Os dois meninos foram mimados pela mãe e pelas tias. Os Bohr eram uma família dinamarquesa de classe média alta e, num país tão pequeno, tinham acesso a todas as pessoas intelectualmente importantes da época, relacionando-se especificamente com filósofos e médicos. Não há indícios de que Niels tivesse sido um prodígio, embora tivesse sido um desenhista notavelmente acurado quando criança. Se o entendi corretamente, Bohr contou-me certa vez a respeito da dificuldade que teve para aprender a escrever.

Tanto Niels quanto seu irmão vieram a ser notáveis atletas ainda jovens. Jogaram futebol quase ao nível profissional e lembro-me de Bohr, já bem entrado nos sessenta, esquiando com habilidade nos declives próximos a Los Alamos. Na escola secundária, os irmãos começaram a sobressair em meio aos colegas e, em 1904, quando Niels tinha dezenove anos de idade e o irmão dezessete, um colega já se referia a ambos como gênios.



Figura 7.1. Niels Bohr (1885-1962) à época em que estava aperfeiçoando seu modelo atômico, o átomo de Bohr. (Instituto Niels Bohr.)

O interesse de Niels pela física foi despertado por seu pai, quando o menino ainda estava na escola primária. No momento em que teve de escolher uma área de estudos na Universidade de Copenhague, Niels decidiu-se pela física e estudou com o Professor C. Christiansen. Trabalhou com jatos líquidos e tensão superficial, a fim de participar de um concurso organizado pela Academia Dinamarquesa de Ciências, em 1905. Ganhou o prêmio com uma pesquisa teórica e experimental, tendo realizado as experiências no laboratório do pai. Escreveu sua tese de doutoramento sobre a teoria eletrônica dos metais e logo depois, em 1911, foi trabalhar com J. J. Thomson no Laboratório Cavendish. Thomson recebeu-o cortesmente e ouviu as explicações a respeito de seu trabalho, mas não teve tempo para ler a tese, o que não é de surpreender, em razão do próprio esquema de trabalho de Thomson e do número de estudantes que tinha sob sua orientação. Em Cambridge, Bohr conheceu Rutherford e ficou tão impressionado com ele que, em novembro de 1911, deslocou-se para Manchester para freqüentar um curso experimental sobre medições radioativas dado no laboratório de Rutherford. Enquanto esperava pela chegada de uma fonte radioativa, trabalhou em um tema que estava na moda em Manchester: a passagem das partículas alfa através da matéria. Conseguiu alguns resultados interessantes e o assunto continuou a ser um de seus preferidos até o fim da vida. Logo, no entanto, transferiu-se para uma área de muito maior importância, que também se relacionava com as atividades de Rutherford.

Conforme já vimos, Rutherford havia aperfeiçoado um modelo atômico que podia explicar os grandes desvios ocasionalmente experimentados por partículas alfa ao passarem através da matéria. Para esclarecer

esse fenômeno, Rutherford tinha analisado um modelo "saturniano" do átomo ou, em linguagem mais moderna, um modelo nuclear. Bohr levou esse modelo muito a sério, a despeito da dificuldade apresentada por sua instabilidade mecânica e elétrica. Essa dificuldade, já salientada por Rutherford, tinha alguns aspectos interessantes. Sabia-se ou supunha-se que todos os átomos de uma substância eram iguais, mas no modelo nada havia que pudesse garantir essa igualdade; especificamente, não havia nada que pudesse determinar o raio atômico. Portanto, para que o modelo sobrevivesse, fazia-se necessário achar uma solução radical que permitisse tanto a estabilidade quanto um raio fixo. A carga e a massa do elétron são elementos que entrariam em qualquer cálculo; qual poderia ser uma outra constante universal (independente da substância) que fornecesse um comprimento?

A resposta não era difícil de ser percebida por uma pessoa familiarizada com as idéias "modernas" de 1911. O *quantum* de ação, a constante de Planck, tinha de desempenhar um papel. Havia várias possibilidades. A opinião de que o volume atômico era a constante fundamental e de que o *quantum* de ação a ela se seguia tinha sido apresentada pelo físico austríaco A. Haas. O astrônomo britânico J. W. Nicholson também já tinha tentado introduzir  $h$  nos modelos atômicos e o químico dinamarquês N. Bjerrum tentara introduzi-lo em modelos moleculares. Mas essas tentativas ou foram inócuas ou seguiram por trilhas erradas.

Bohr ponderou sobre esses problemas e idéias e mencionou-os em uma carta ao irmão, datada de 19 de junho de 1912. Em junho ou julho, preparou um memorando sobre o assunto, para discuti-lo com Rutherford. Era óbvio que estava muito entusiasmado com o modelo, mas ainda não tinha analisado o espectro do hidrogênio. Os espectros se tornaram a chave para grande parte do que veio depois, mas eram considerados muito complicados e um campo aparentemente indecifrável na época. No início de 1913 é que um estudante seu amigo, Hans Marius Hansen, indagou de Bohr o que é que seu modelo tinha a dizer a respeito de espectros. Quando Bohr afirmou que não sabia dizer nada sobre o assunto, Hansen aconselhou-o a dar uma olhada na fórmula de Balmer. "Logo que vi a fórmula de Balmer, tudo se tornou claro para mim" — declarou Bohr muitos anos mais tarde.

O que era a fórmula de Balmer? Em 1885, Johann Jakob Balmer (1825-1898), um professor secundário suíço que se interessava por numeração, tinha observado uma espantosa regularidade nas freqüências das linhas espectrais do hidrogênio. Essas freqüências são fornecidas pela fórmula

$$\nu = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  são números inteiros positivos, e  $n_1 < n_2$ . Estou fazendo uso de anotações mais modernas do que as de Balmer, que recorreu a comprimentos de ondas em vez de freqüências.) A fórmula que se tornou pedra-de-toque para qualquer teoria sobre o átomo de hidrogênio é obedecida com grande precisão pelo espectro de linhas do hidrogênio. Na época de Balmer, a série

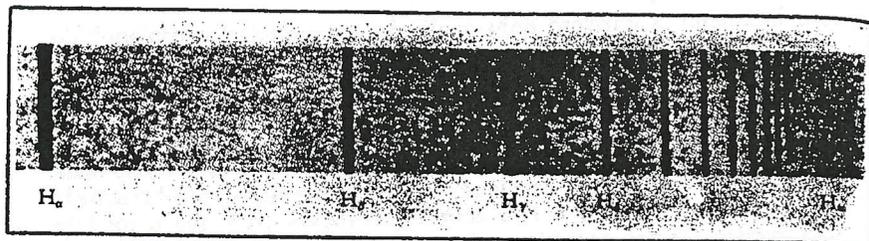


Figura 7.2. Espectro do hidrogênio. A frequência das linhas corresponde à fórmula de Balmer. As linhas se aproximam entre si em frequência tendendo a  $H_\infty$ , após o que o espectro se torna finito.

visível com  $n_1 = 2$  já era conhecida e foi nessa série que ele descobriu a regularidade (Figura 7.2). Mais tarde, a série ultravioleta  $n_1 = 1$  foi descoberta por T. Lyman, seguindo-se a série infravermelha com  $n_1 = 3$  (Paschen)  $n_1 = 4$  (Brackett). As Figuras 7.3 e 7.4 mostram essas regularidades graficamente. A constante  $R$ , chamada de constante de Rydberg em homenagem ao espectroscopista sueco do mesmo nome, fixa a escala do índice.

As órbitas de um ponto atraído pelo inverso do quadrado da força a um centro fixo são, como no caso dos planetas, elipses com o centro fixado em um foco mas, por uma questão de simplicidade, examinaremos apenas o caso específico de órbitas circulares com o centro fixado no centro da órbita. Para tal sistema, qualquer raio é possível, visto que a velocidade na órbita é tal que a força centrífuga compensa exatamente a atração a partir do centro. Tal fato ocorre se o raio e a velocidade satisfizerem a relação

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}$$

Portanto, qualquer raio é possível na medida em que escolhermos uma velocidade adequada. Devemos introduzir algumas outras condições para fixar o raio. Bohr proporcionou critérios que permitissem escolher entre as infinitas órbitas que parecem possíveis (Figura 7.5). Essas órbitas privilegiadas são chamadas de *estados estacionários*. Bohr postulou além disso, nos seguintes termos:

“1. Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários pode ser discutido com o auxílio da mecânica ordinária, ao mesmo tempo em que a passagem do sistema entre estados estacionários diferentes não pode ser tratada da mesma maneira.

2. Que o segundo processo é seguido pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre frequência e o total de energia emitido é aquela dada pela teoria de Planck (isto é,  $E_1 - E_2 = h\nu$ )”.

Essas duas hipóteses contradizem a física clássica e, ao postulá-las simultânea ou isoladamente, entramos em um labirinto do qual parece impossível escapar. Poincaré observou certa vez que, ao postular hipóteses

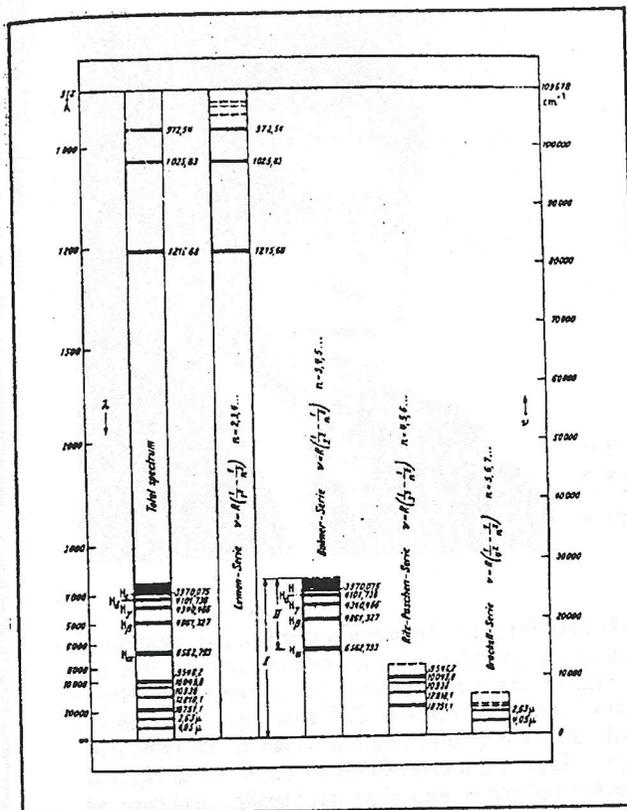


Figura 7.3. Espectro do hidrogênio. As linhas espectrais têm uma frequência  $\nu_{ij} = (E_i - E_j)/h$  onde  $E_i = R/n_i^2$  e  $E_j = R/n_j^2$ , onde  $n_i$  e  $n_j$  são números inteiros positivos e  $n_i < n_j$ . Para  $n_1$  igual a 1, 2, 3, ..., têm-se as séries espectrais de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett, Pfund, etc.  $R$  é igual a  $2\pi^2 Z^2 e^4 m/h^3$ , onde  $m$  é a massa reduzida. [De W. Grotrian, *Graphische Darstellung der Spektren* (Berlín, 1928).]

contraditórias, pode-se provar qualquer coisa: essa assertiva é matematicamente correta. Somente uma rara e misteriosa intuição evitou que Bohr se perdesse no escuro. Einstein, que era um mestre para adivinhar as verdades naturais mais recônditas, declarou muitos anos depois:

“Que esse fundamento inseguro e contraditório foi suficiente para permitir, a um homem dotado do instinto e da capacidade de percepção singulares como os de Bohr, a descoberta das grandes leis das linhas espectrais e das camadas de elétrons do átomo, bem como seu significado para a química, pareceu-me um milagre e ainda hoje me parece um milagre.

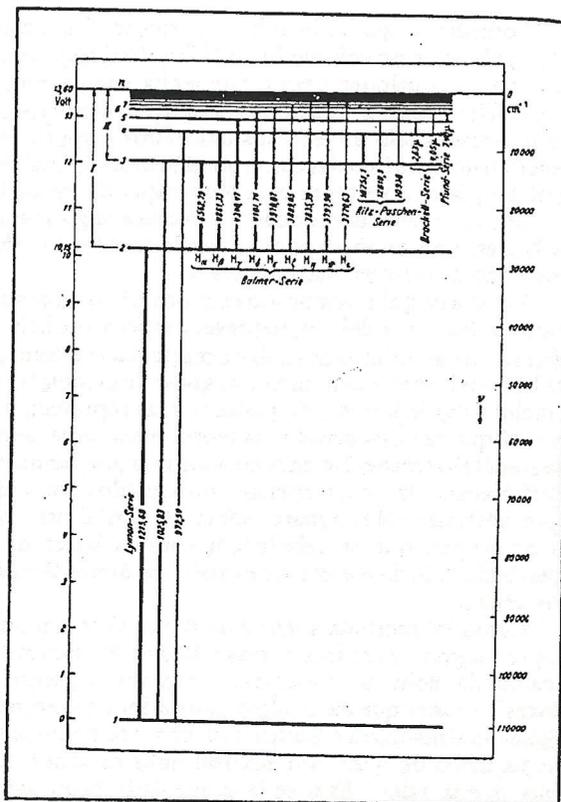


Figura 7.4. Níveis de energia do átomo de hidrogênio segundo o modelo de Bohr. As energias (escala à esquerda) estão em elétron-volts; as frequências estão expressas em números de onda  $1/\lambda$  (escala à direita). A verdadeira frequência é  $c \times$  "frequência" em números de ondas pois  $\nu = c/\lambda$ . [D. W. Crotrian, *Graphische Darstellung der Spektren*. (Berlim, 1928).]

Essa é a mais elevada forma de musicalidade na esfera do pensamento". (Schilpp, *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, p. 46.)

O fio de Ariadne que Bohr usou para sair do labirinto é a exigência de que, para grandes órbitas, a teoria clássica e a hipótese de Bohr dão o mesmo resultado. Segundo as próprias palavras de Bohr:

"Mostraremos que as condições a serem usadas para determinar os valores da energia nos estados estacionários são de tal tipo que as frequências calculadas ( $E_1 - E_2 = h\nu$ ) no limite em que os movimentos em estados estacionários sucessivos diferem comparativamente muito pouco um do outro tenderão a coincidir com as frequências que se esperam da teoria ordinária da radiação do movimento do sistema nos estados estacionários".

Revolução, sim, mas sem destruição irreparável. Trata-se de um caso específico do chamado princípio da correspondência, que mostra como passar de sistemas macroscópicos para sistemas microscópicos. Esse princí-

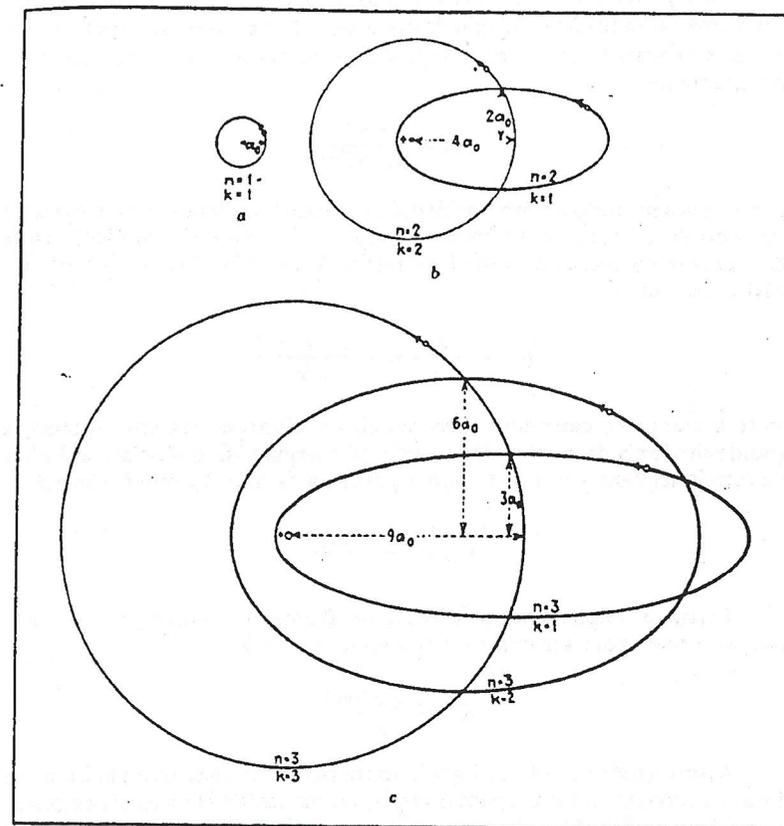


Figura 7.5. As órbitas de elétrons no átomo de hidrogênio segundo a teoria de Bohr e Sommerfeld. A unidade de comprimento  $a_0 = (h/2\pi e)^2(1/m)$  é o primeiro raio de Bohr  $0,54 \times 10^{-8}$  cm e  $n$  é chamado o número quântico total e determina o eixo principal das órbitas e a energia. O número quântico  $k \leq n$  dá a excentricidade da órbita;  $k - 1 = l$  dá o momento angular em unidade de  $h/2\pi$

pio foi formulado de muitos modos e elaborado de todas as maneiras possíveis antes da descoberta da mecânica dos *quanta*. É bastante útil como um guia para a intuição, mas não pode ser formulado rigorosamente como, por exemplo, os princípios da termodinâmica. Pode, isso sim, ser descrito, com algum exagero, como uma forma de dizer que "Bohr teria agido dessa maneira".

Com as hipóteses formuladas segundo (1) e (2) acima, não é difícil obter os raios das órbitas e a energia dos estados estacionários e, assim, o espectro do hidrogênio (vide Figuras 7.4 e 7.5).

No Apêndice 9, apresentamos os principais pontos do cálculo de Bohr conforme baseados no princípio da correspondência. Os resultados finais são os raios orbitais ( $r_n$ ) que crescem como os números 1, 4, 9, etc., ou, mais precisamente,

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m Z e^2}$$

onde  $n$  é um número inteiro positivo,  $h$  a constante de Planck,  $m$  e  $e$  a massa e a carga do elétron, e  $Z$ , um número inteiro positivo (número atômico) tal que  $Ze$  é a carga nuclear com o sinal contrário. As energias dos estados estacionários são então

$$E_n = -\frac{Ze^2}{r_n} = -\frac{2\pi^2 Z^2 m e^4}{h^2 n^2}$$

onde a energia é considerada zero quando o elétron está em repouso, a grande distância do núcleo. Dos níveis de energia as frequências das linhas espectrais seguem a um só tempo a partir da norma (2), que é a relação

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$

Portanto, explicamos a fórmula de Balmer e a constante que nela aparece pode agora ser expressa através de  $e$ ,  $m$ , e  $h$ :

$$R = \frac{2\pi^2 Z^2 m e^3}{h^3}$$

Assim temos um elo de ligação entre partes da física que são bastante distantes uma da outra: a espectroscopia, a radioatividade e a teoria do corpo negro. Essa unificação de áreas aparentemente distantes é sempre um indício de que estamos na trilha certa e é em si mesma um resultado importante. As Figuras 7.3, 7.4 e 7.5 mostram tudo isso graficamente: os níveis de energia, os espectros de linhas e as órbitas.

No início de 1913, Bohr começou a escrever uma trilogia formidável de artigos. No primeiro, esperava ele dar uma explicação geral sobre a constituição de átomos e moléculas. O segundo deveria abranger sistemas com diversos graus de liberdade e o terceiro, sistemas com mais de um núcleo. O projeto nunca foi concluído e apenas parte dele foi publicado por volta de 1918. Em agosto de 1918, Bohr escreveu para um amigo, o físico O. W. Richardson:

“Sei que você compreende como as coisas acontecem e como minha vida, do ponto de vista das ciências, passa por períodos de superfelicidade e de desespero, de sensações de vigor e de excesso de trabalho, de dar início a trabalhos e de não vê-los publicados, porque estou sempre mudando de opinião a respeito desse terrível enigma que é a teoria quântica...” (Bohr, *Collected Works*, vol. 3, p. 14).

O primeiro artigo escrito sobre o átomo por Bohr, datado de 5 de abril de 1913, e publicado no volume 26 do *Philosophical Magazine*, pode ser lido com facilidade por qualquer pessoa que tenha um conhecimento mínimo de física. O leitor sofisticado admirará a destreza com que Bohr navega através de um oceano cheio de escolhos traiçoeiros e aporta em segurança sob a orientação do princípio das correspondências. No final do trabalho, quando já está no porto, acrescenta uma observação da maior importância:

“Para as órbitas permitidas, o *momentum* angular é um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$  e esse fato também pode ser usado como um critério de quantização, fornecendo os estados estacionários”.

A teoria de Bohr demonstra extraordinário vigor ao prever novas séries espectrais além da de Balmer, ao prever o espectro de hélio ionizado, ao prever o efeito sobre as linhas espectrais da massa nuclear finita, e assim por diante. Mas Bohr percebeu inteiramente as graves imperfeições de sua teoria e que, na melhor das hipóteses, ela podia apenas representar um estágio temporário até que se descobrisse uma teoria consistente. Sempre enfatizou essa desagradável verdade. No entanto, iam-se acumulando resultados teóricos e experimentais, às vezes apenas aproximados, mas de qualquer forma impressionantes. Mencionarei somente dois desses resultados, além da espectroscopia, que se relacionam com as bases da física. Trata-se da experiência Franck-Hertz e da experiência Stern-Gerlach, das quais falarei mais adiante.

Como foi recebida a teoria de Bohr? O testemunho *ex post facto* nem sempre é digno de confiança, mas o fato de Rutherford ter encaminhado o trabalho de Bohr ao *Philosophical Magazine*, a despeito de suas “idéias rústicas”, mostra que ele o julgou possuidor de méritos. Bohr enviou-lhe o original da Dinamarca e Rutherford, com seu habitual bom-senso, objetou que, na teoria de Bohr, um elétron tinha de saber de antemão para que órbita queria saltar. Essa séria dificuldade ficou algum tempo sem ser esclarecida. O passo decisivo foi dado por Einstein em 1917, quando, conforme já vimos, introduziu conceitos de probabilidade baseados na analogia com a radioatividade. De qualquer modo, pondo-se de lado essa objeção, Rutherford achou que o artigo era um pouco longo e tentou reduzi-lo. Escreveu para Bohr de maneira um tanto negligente para sugerir-lhe essa redução; a reação foi inesperada. Bohr embarcou para a Inglaterra e seguiu para Manchester, onde defendeu seu documento da crítica de Rutherford linha por linha, durante um dia inteiro. Eu gostaria de ter presenciado a cena. Bohr era uma pessoa de maneiras polidas e foi cortês e respeitoso com Rutherford. Rutherford era mais velho do que Bohr, estava acostumado a dar ordens e no mundo das ciências tinha uma posição estabelecida e muito bem-considerada. Rutherford comentou em uma carta que nunca poderia esperar de Bohr tamanha obstinação.

Para dar uma idéia dos motivos da crítica feita por Rutherford, aqui vai um parágrafo conclusivo de um dos trechos do primeiro artigo de Bohr:

“O caráter preliminar e hipotético das considerações acima não precisa ser enfatizado. A intenção, entretanto, foi mostrar que a generalização esboçada da teoria dos estados estacionários poderá talvez proporcionar uma base simples de representação de um bom número de fatos experi-

mentais, que não podem ser explicados com a ajuda da eletrodinâmica comum, e que as hipóteses usadas não parecem ser inconsistentes com experiências sobre fenômenos para os quais já foi dada uma explicação satisfatória pela dinâmica clássica e pela teoria ondulatória da luz”.

Talvez o estilo seja pomposo, mas cada palavra é cuidadosamente pensada e pesada. Não é preciso dizer que Rutherford e Bohr ficaram amigos íntimos por toda a vida. Embora fossem muito diferentes em termos de estilo e enfoque científicos, tinham o maior respeito e o maior afeto um pelo outro e podiam entender-se cientificamente. Um testemunho eloqüente do relacionamento entre ambos é dado pelo próprio Bohr em suas “Reminiscências do fundador da ciência nuclear e de alguns fatos baseados em sua obra”.

Escrever era para Bohr uma experiência dolorosa, conforme vieram a perceber seus assistentes posteriores. Um documento era iniciado, escrito e reescrito talvez uma dúzia de vezes. Em cada versão ele mudava uma frase aqui ou ali, esclarecia uma afirmação ou melhorava a definição de um conceito. No final, o documento era mandado para publicação, para a Academia Dinamarquesa de Ciências, por exemplo. Quando as provas voltavam ao autor, eram praticamente reescritas ou para aumentar a precisão ou porque lhe tinha ocorrido alguma idéia nova. O editor atormentava-se e as autoridades acadêmicas ficavam embaraçadas, mas toleravam tudo porque Bohr era Bohr. Após vários meses de atraso, o volume das atividades da Academia seria publicado sem o artigo de Bohr e, alguns anos mais tarde o documento ainda estaria sendo reescrito, embora, nesse interim, colaboradores e colegas tivessem visto diversas versões provisórias. Se e quando o documento finalmente fosse publicado, provavelmente não seria um modelo de clareza, mesmo que fosse profundo. Com relação à profundidade e à clareza dos seus trabalhos, Bohr já dispunha de certas citações em alemão, como a da página 174. Isso talvez seja mais característico do velho Bohr do que do Bohr de trinta anos de idade, mas a carta a Richardson citada na página 131 e os arquivos de Bohr testemunham amplamente que na juventude ele já escrevia daquela maneira.

Voltemos à receptividade dada ao importante trabalho de 1913. Em setembro daquele mesmo ano, realizou-se uma reunião da British Association, em Birmingham, com a presença de Rutherford, H. A. Lorentz, O. Lodge, Lorde Rayleigh, Jeans e outros cientistas de renome. Os artigos de Bohr foram trazidos à baila e debatidos. Lorde Rayleigh fez o seguinte comentário:

“Já dei uma olhada, mas vi que não seriam úteis para mim. Não digo que não se possam fazer descobertas dessa forma. Acho até muito provável. Mas não servem para mim”. (Rayleigh, *Life of Lord Rayleigh*, p. 357.)

Rayleigh tinha setenta e um anos de idade, e fazia muito tempo se prometera não dizer uma palavra a respeito de fatos novos na área da física. Manteve a promessa. Mas o êxito da nova teoria não podia ser negado. Em Göttingen, P. Debye estava entusiasmado e, ao que tudo indica, Sommerfeld fez notar a L. Brillouin que se tratava de um documento de importância histórica. Por outro lado, em Zurique, O. Stern e M. V. Laue, que depois iriam fazer tanto pelo aperfeiçoamento das idéias de Bohr, estudaram o

documento e afirmaram que, se por acaso estivesse correto, abandonariam a física. George Hevesy, que se tornara íntimo amigo de Bohr em Manchester, fez uma visita a Einstein e contou-lhe a respeito do trabalho de Bohr. Einstein imediatamente mostrou-se entusiasmado: disse que tinha tido idéias semelhantes certa vez, mas não se atrevera a levá-las adiante. Com evidente satisfação, Hevesy apressou-se em relatar a opinião de Einstein em cartas para Rutherford e Bohr.

O átomo de Bohr precedeu a Primeira Guerra Mundial de apenas alguns meses. A Dinamarca conseguiu permanecer neutra, mas Bohr simpatizava com a causa das Potências Aliadas. Tinha um cargo de segundo escalão e relativamente sem importância em Copenhague e, em 1916, assumira um outro no laboratório de Rutherford em Manchester, onde ficou até 1919, quando foi chamado de volta à Dinamarca, onde lhe ofereceram uma cátedra de física teórica. Bohr sempre mantivera estreito contato com físicos experimentais e esforçou-se por conseguir um laboratório associado à sua cátedra. Após a guerra, conseguiu realizar o que desejava e um novo instituto foi construído em Copenhague. De início, Bohr morou no próprio instituto. Mais tarde, em 1932, os Bohr foram a primeira família convidada a ocupar a “Casa de Honra”, uma mansão construída por J. C. Jacobsen, o fundador da famosa Cervejaria Carlsberg.

A mansão é atualmente a residência semi-oficial das maiores personalidades dinamarquesas da área de artes ou de ciências. Trata-se de uma residência principesca, cuja manutenção é feita graças a recursos deixados por seu fundador. Fica perto da cervejaria, é construída em estilo neoclássico, embora adaptado ao clima dinamarquês, e tem um lindo jardim. A Senhora Bohr era anfitriã de classe e, durante vários anos, os Bohr convidaram muita gente importante, inclusive membros da realeza, alguns primeiros-ministros e muitos cientistas de renome, entre os quais Rutherford. Também recebiam uma série de jovens físicos de valor que estavam trabalhando em Copenhague ou ali se encontravam de visita.

A fama de Bohr espalhou-se rapidamente e logo ele começou a receber convites para fazer conferências em todo o mundo. Em 1920, foi à Alemanha e, pela primeira vez, encontrou-se com Planck, Einstein e outros grandes teóricos alemães. Na Holanda, conheceu H. A. Lorentz e Paul Ehrenfest, com quem estabeleceu amizade imediata e sólida. Einstein também apreciava Bohr e escreveu-lhe o seguinte após a visita de Berlim:

“Não é sempre que uma pessoa, por sua mera presença, me dá tanta alegria quanto você me deu. Agora compreendo por que Ehrenfest o aprecia tanto. Atualmente estou estudando os seus impressionantes trabalhos e, ao fazê-lo — quando interrompo o estudo em algum trecho —, sinto o prazer de ver seu rosto jovem diante de mim, sorrindo e explicando...” (Bohr, *Collected Works*, vol. 3, pp. 22, 634.)

Bohr e seu instituto de Copenhague também desempenharam uma função nobre e necessária que resultou das conseqüências da guerra. O conflito tinha deixado uma herança de ódio e alguns desejos infantis, mas perigosos, de vingança e retaliação. Esses sentimentos também envolveram alguns cientistas. Aqueles que haviam prestado apoio aos aliados queriam excluir os colegas alemães da vida científica internacional; por outro lado, os

alemães agiam, injustificadamente, como vítimas. Tal tipo de comportamento predominava mais no mundo científico oficial, composto de cientistas mais velhos e quase sempre já fora de atividade, do que entre os cientistas mais jovens, que se dedicavam a suas pesquisas. Bohr tentou combater os excessos e restabelecer o bom relacionamento entre as facções. Sua personalidade e o fato de ser cidadão de um país neutro ajudaram-no nessa tarefa.

A atividade científica de Bohr assumiu uma forma peculiar. Seus hábitos de trabalho quase sempre consistiam em pensar em voz alta e levar adiante intermináveis discussões, para as quais precisava de um parceiro. Era uma espécie de método socrático pelo qual desenvolvia suas idéias falando. O primeiro assistente de Bohr foi o holandês H. A. Kramers. A ele seguiram-se muitos outros, que mais tarde se tornaram famosos. Os ingleses P. A. M. Dirac e N. F. Mott; o alemão W. Heisenberg; o austríaco W. Pauli; os russos G. Gamow e L. D. Landau; os norte-americanos J. C. Slater, H. Urey e J. R. Oppenheimer; o japonês Y. Nishina, e os escandinavos O. Klein e S. Rosseland estão entre aqueles que passaram longos períodos em Copenhague. Dirac escreveu o seguinte a respeito de suas conversas com Bohr:

"Com bastante frequência, eu era apenas sua platéia durante o processo de pensar em voz alta. Eu tinha grande admiração por Bohr. A meu ver, foi o mais profundo pensador que já conheci. Seus conceitos eram de um tipo, diria eu, relativamente filosóficos. Nem sempre eu os entendia, embora fizesse o possível. Minha própria linha de raciocínio me levava a dar ênfase a conceitos que pudessem ser expressos em forma de equações e grande parte dos conceitos de Bohr eram de caráter mais genérico e até certo ponto mais afastados da matemática. Mas, mesmo assim, eu me sentia feliz em ter esse estreito relacionamento com ele e, conforme citei em outra ocasião, não tenho certeza quanto e até que ponto o fato de ouvir todos aqueles conceitos não influenciou minha obra". (Dirac, *Proc. of the Intl. School of Physics*, "Enrico Fermi", vol. 57, p. 134.)

Em virtude de sua maneira peculiar de escrever, o próprio Bohr não publicou muita coisa; não obstante, era o centro de toda a atividade da época. Além disso, viajava com frequência e era convidado a expor suas idéias em vários centros científicos da Europa e dos Estados Unidos.

Bohr era muito mais cauteloso e crítico em relação ao tipo de mecânica quântica baseada em modelos que existiam antes de 1924 do que outros físicos de renome, como Arnold Sommerfeld. Sempre salientava a necessidade de colocar-se a teoria sobre bases sólidas e enfatizava as contradições predominantes.

Em Copenhague, Bohr também deu início a uma série anual de pequenas conferências privadas em seu instituto. Convidava cerca de trinta físicos, escolhendo alguns famosos, inclusive Heisenberg, Pauli e Stern, que compareciam praticamente a todos esses encontros. Além disso, convidava um número de jovens cientistas ativos de todos os países. Era uma oportunidade de conhecer jovens físicos promissores, de fazê-los conhecer Copenhague e uns aos outros. As conferências quase sempre serviam para estabelecer amizades duradouras entre físicos das gerações mais novas. Poucos foram os físicos importantes, em atividade entre 1920 e a Segunda



Figura 7.6. Participantes da reunião organizada por Bohr em Copenhague em 1937. Na fileira da frente, da esquerda para a direita, N. Bohr, W. Heisenberg, W. Pauli, O. Stern, L. Meitner, R. Ladenburg, J. C. Jacobsen. Na segunda fileira, sentados a partir da esquerda, V. Weisskopf, C. Moller, H. Euler, R. Peierls, F. Hund, M. Goldhaber, W. Heitler, E. Segrè... Na terceira fileira, sentados a partir da esquerda, G. Placzek, C. von Weizsäcker, H. Kopfermann... De pé, H. D. Jensen, L. Rosenfeld, G. C. Wick. (Cortesia de E. Segrè.)

Guerra Mundial, que não tiveram a inesquecível experiência de participarem de mais de uma dessas conferências (Figura 7.6).

### Os Raios X Ocupam seu Lugar

Mesmo que os temas fundamentais da física tenham sido tocados pouco antes da Primeira Guerra Mundial por Planck, Einstein, Rutherford e Bohr, não devemos esquecer a orquestração que os acompanhou e que deu à música um grande realce.

Por mais de um século, a estrutura cristalina foi atribuída a uma disposição regular dos átomos constituintes. R. J. Haüy (1743-1822) tinha feito lindos desenhos dos arranjos atômicos hipotéticos. As versões modernas desses arranjos são chamadas de malhas espaciais e, como exemplo, devemos imaginar todos os átomos situados em pontos que têm números inteiros como coordenadas. Muitas das leis da cristalografia podiam ser justificadas admitindo-se tais estruturas hipotéticas, mas somente em 1912 é que foram realmente vistas ou demonstradas.

No Instituto de Sommerfeld, em Munique, P. Ewald estava estudando a propagação de ondas eletromagnéticas em uma malha espacial, para sua tese de doutoramento. Nessa época, por volta de 1911, estavam-se desenvol-

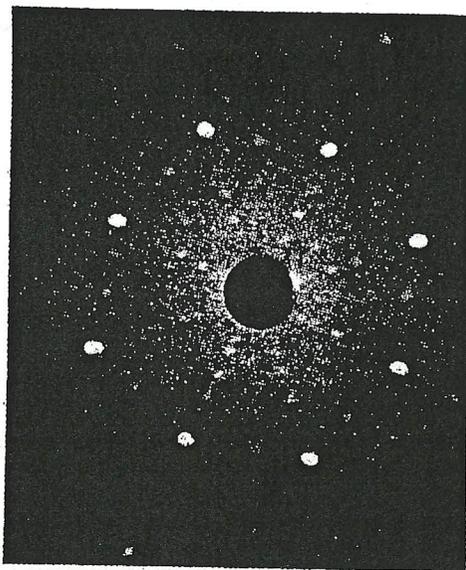


Figura 7.7. Fotografia de difração de um monocristal de tungstênio obtida através do método de von Laue, Friedrich e Knipping. (Cortesia do Laboratório CNR-LAMEL, Bolonha.)

vendo e expandindo idéias a respeito dos raios X. A hipótese de serem vibrações eletromagnéticas de ondas curtas semelhantes à luz parecia plausível, e fazia-se cálculos a respeito de seus comprimentos de ondas. Alguns fenômenos de difração provocados por raios X passando através de uma fenda estreita podiam ser interpretados atribuindo-se a eles um comprimento de onda comparável a distâncias interatômicas em uma malha.

Máx von Laue (1879-1960) fez então um estudo teórico sobre os fenômenos de difração que se poderiam esperar caso se fizesse passar raios X através de um cristal. Os resultados por ele obtidos foram imediatamente testados por W. Friedrich e P. Knipping com uma aparelhagem que existia no laboratório de Röntgen. Logo obtiveram excelentes imagens de difração que confirmaram inteiramente os cálculos de von Laue (Figuras 7.7 e 7.8). O cristal atua como uma grade de difração tridimensional, cuja periodicidade é dada pela regularidade do arranjo atômico. Tais grades naturais são cerca de mil vezes mais finas do que as grades artificiais traçadas, em sua época, por Rowland, Michelson e outros, e elas serviam para os raios X tão bem quanto as grades traçadas artificialmente para a luz visível.

A descoberta de von Laue já teve inúmeras ramificações. Quase que imediatamente, W. H. Bragg e W. L. Bragg, pai e filho, em Leeds, Inglaterra, usaram cristais como malhas para construir um verdadeiro espectrógrafo de raios X, e começaram a ampliar o estudo das linhas espectrais para uma área de comprimentos de ondas cerca de mil vezes mais curtas que a luz visível.



Figura 7.8. Max Planck (à esquerda) e Max von Laue (à direita) durante uma excursão ao lago de Como organizada para os participantes da Conferência Volta de 1927. (Cortesia de F. Rasetti.)

Os espectros visíveis se originam dos movimentos dos elétrons atômicos externos, enquanto que os espectros dos raios X se originam da parte mais interna. Em consequência, os espectros dos raios X mostram regularidades desconhecidas em espectros ópticos. São dominados pelo número atômico, isto é, pela carga nuclear, conforme foi demonstrado por H. G. J. Moseley (1887-1915) logo após a descoberta dos Bragg.

A história de Moseley é trágica e pungente. Descendia de famílias de cientistas tanto pelo lado paterno quanto pelo lado materno: Foi educado em Eton, na melhor tradição escolar inglesa. Na Universidade de Manchester, iniciou seus trabalhos de pesquisa com Rutherford, mas depois transferiu-se para Oxford. Era, portanto, natural que fosse uma estrela ascendente entre os cientistas britânicos e um trabalhador bastante ativo (Figura 7.9). Em sua curta carreira de experimentalista, conseguiu resultados de valor permanente e uma fama que há de durar para sempre. No começo da Primeira Guerra Mundial, alistou-se como voluntário e, a despeito das tentativas de Rutherford e de outros no sentido de protegê-lo do perigo mortal e de salvá-lo para as ciências inglesas, insistiu em cumprir com seus deveres de combatente. Foi morto em ação aos vinte e sete anos de idade na expedição aos Dardanelos concebida por Churchill.

Antes da guerra, Moseley tinha demonstrado que os raios X proporcionam um método simples para medir a carga nuclear  $Z$ , ou seja, o número atômico. Certas linhas de raios X mais salientes nos espectros têm frequências proporcionais a  $Z^2$ . Assim, se lançarmos em gráfico a raiz quadrada do recíproco do comprimento das ondas *versus* o número atômico, obteremos uma linha reta (Figura 7.10). Se estivesse faltando o espectro de raios X de um elemento, poder-se-ia facilmente predizê-lo por interpolação. Dessa maneira, Moseley conseguiu certa tarde solucionar o problema que

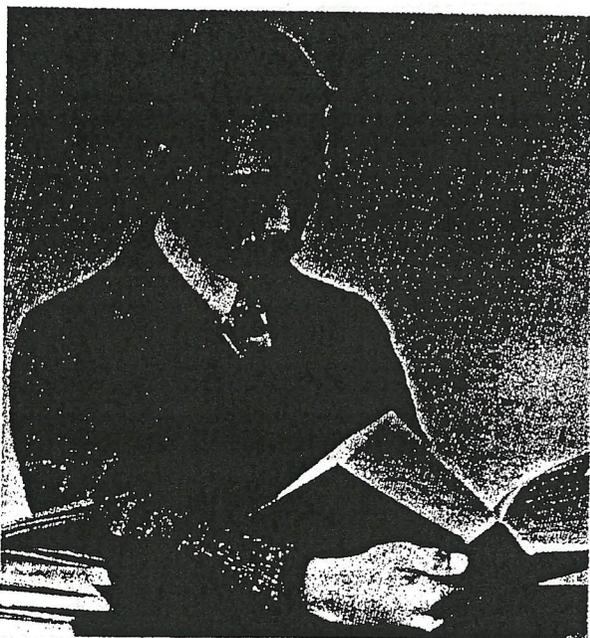


Figura 7.9. H. G. J. Moseley (1887-1915), em uma de suas poucas fotos que existem. Moseley morreu em combate durante a expedição inglesa aos Dardanelos, aos vinte e sete anos de idade. Sua descoberta do número atômico, o número inteiro que mede a carga positiva do núcleo em unidades de carga protônica, proporcionou esclarecimento definitivo sobre o conceito de elemento químico. (Universidade de Manchester.)

desnorteara químicos durante décadas, e estabeleceu o verdadeiro número de terras raras possível. Quando o famoso químico francês Urbain lhe trouxe exemplos de terras raras nos quais tinha trabalhado anos a fio, Moseley analisou-os em poucas horas e imediatamente revelou seu conteúdo, para surpresa do químico. A descoberta de Moseley está diretamente vinculada ao átomo de Bohr, conforme o próprio Bohr logo reconheceu. Basta inseri-la na fórmula geral que dá as linhas espectrais do hidrogênio  $n_1 = 1$  e  $n_2 = 2$  para obter a lei de Moseley, com a constante de proporcionalidade especificada.

A descoberta de Moseley também proporcionou um método para estabelecer com certeza os elementos químicos hipotéticos. Em sua época, eles tinham os números atômicos 43, 61, 72, 75, 85 e 87 e o sistema periódico terminava com  $Z = 92$  (urânio). Nos anos seguintes, foi descoberto o elemento 72 em minérios de zircônio no laboratório de Bohr, por Hevesy e D. Coster, em 1923; eles o denominaram *hafnium*, com base no nome latino da cidade de Copenhague. O elemento 75 foi descoberto em 1925, por Ida e Walter Noddack, em Berlim, em vários minerais e, num arroubo de patriotismo alemão, deram-lhe o nome de *rhenium* (o Reno era uma permanente causa de atrito entre a Alemanha e a França). Nessas descobertas, a análise por meio dos raios X foi de fundamental importância.

O elemento 87, o frâncio, foi descoberto em 1939 por Marguerite Perey como uma ramificação rara de uma família radioativa; e o 91, protoactínio,

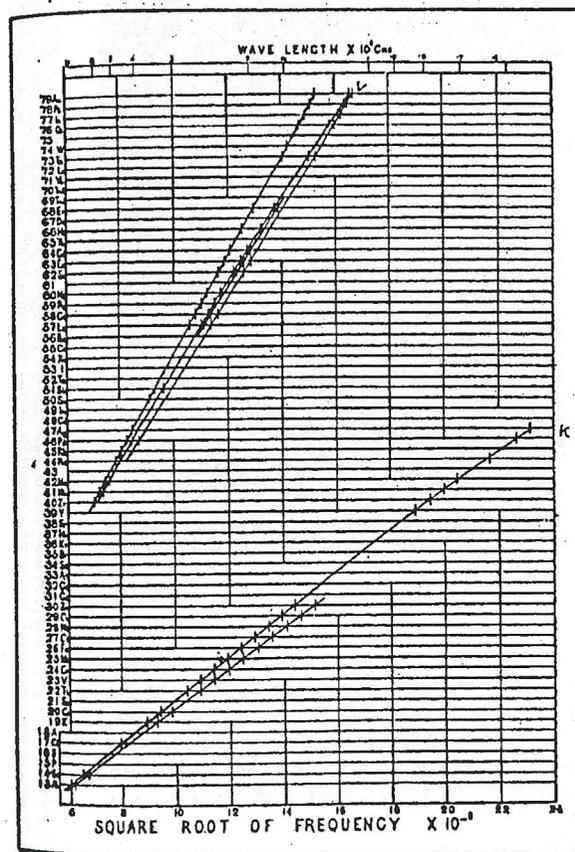


Figura 7.10. Um diagrama de Moseley. A abscissa mostra a raiz quadrada da radiação  $\times$  característica emitida. A ordenada dá o número atômico. Para a linha K a frequência é dada com boa aproximação pela fórmula  $\frac{3}{4} RZ^2$ . [De *Philosophical Magazine* 27, 703 (1914).]

foi descoberto por Otto Hahn e Lise Meitner em 1917 como produto do decaimento do urânio. Nos dois últimos casos, os métodos radioativos foram mais importantes do que as análises por meio dos raios X.

Os elementos restantes não existem na Terra em estado natural, em virtude de serem radioativos e terem meias-vidas relativamente curtas; portanto, decaíram durante eras geológicas, mesmo que tivessem existido anteriormente. Tinham de ser formados artificialmente mediante bombardeamentos nucleares. O primeiro a ser obtido dessa forma foi o elemento 43, tecnécio (que significa "artificial" em grego). Foi descoberto em 1937 por Carlo Perrier e Segrè em molibdeno bombardeado no ciclotron de Berkeley. O elemento 61, promécio, foi preparado artificialmente em 1946, por Charles Coryell e outros, em reatores nucleares. O elemento 85, astatínio, também foi preparado com ciclotron, por Corson, Mackenzie e

Segrè, em 1940. A extensão do sistema periódico além do urânio ocorreu mais tarde, após a descoberta da fissão nuclear por Hahn e Strassmann.

A nova ciência da espectroscopia de raios X não apenas permite o estudo das camadas de elétron interiores e a análise química elementar em um nível inaudito de sensibilidade e certeza; abre também caminho para a pesquisa de malhas cristalinas e, de modo mais geral, para a arquitetura dos sólidos e das moléculas. Essa técnica conduziu à nova e ativa ciência de análise estrutural, que é fundamental a muitas ciências diversas, que vão da mineralogia à biologia molecular.

De fato, a biologia molecular propiciou uma revolução na biologia comparável àquela propiciada pela mecânica quântica na física: abriu horizontes inteiramente novos. Esse novo ramo da ciência já recebeu ajuda indispensável da física moderna através do uso de traçadores radioativos mencionados na página 111 e da análise estrutural por meio de raios X.

Já vimos que o conceito de isotopia foi-se estabelecendo aos poucos para núcleos radioativos e que J. J. Thomson ampliou-o para núcleos estáveis, provando a existência de duas espécies de átomos de neon, idênticos sob todos os aspectos químicos, exceto quanto ao peso atômico. Logo após a guerra, F. W. Aston começou a construir uma série de espectrógrafos de massa de precisão que mediam massas e abundâncias de isótopos. Durante muitos anos Aston reinou soberano nesse tipo de pesquisa que redundou em muitos resultados interessantes. Já citamos a "regra do número inteiro". As medições precisas de massa unidas à fórmula de Einstein  $E = mc^2$  proporcionaram dados sobre a energia liberada ou absorvida em reações nucleares e assim tornaram-se vitais para a física nuclear. Hoje em dia, uma combinação de dados originários da espectrografia de massas e de reações nucleares permite o estabelecimento de massas nucleares com uma precisão de uma parte em  $10^9$  em casos favoráveis. O estudo de isótopos, porém, ampliou-se ainda mais e tem tido inúmeras aplicações que vão da geologia à arqueologia e da tecnologia do vácuo à biologia.

Trata-se de exemplos notáveis da interdependência de diferentes ciências. É quase como observar um organismo vivo, no qual vários órgãos cooperam de maneiras complicadas e às vezes incompreensíveis.

### O Átomo Quantizado é Estabelecido

Após o trabalho fundamental de Bohr, os átomos e as moléculas passaram a ser o centro da atenção tanto dos físicos experimentalistas quanto dos físicos teóricos. Outras áreas da física eram ainda pesquisadas por cientistas eminentes, como Rutherford, que nunca abandonou os estudos nucleares, ou os físicos experimentalistas de Leyden, que se concentraram no estudo de baixas temperaturas, mas os átomos e as moléculas eram o grande foco de atividades. Antes de Bohr, a espectroscopia era um tema quase empírico que não ia muito além da catalogação de muitas linhas espectrais e da observação das condições sob as quais elas eram produzidas. O estudo de descargas elétricas em gases, que remontava a Faraday, também era principalmente empírico. A nova teoria atômica forneceu um guia para o

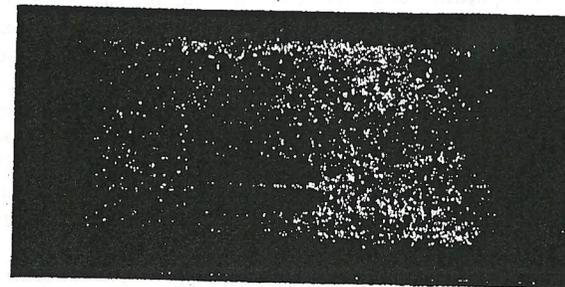


Figura 7.11. O resultado da experiência de Stern e Gerlach em 1921 sobre a quantização espacial. As duas manchas escuras são causadas por átomos (em um feixe de átomos de lítio) com orientação oposta em um campo magnético.

entendimento de muitos fenômenos e para a previsão de novos; a teoria e a prática começaram a caminhar lado a lado e a grande velocidade. O centro de tais atividades estava na Alemanha. Um dos passos mais importantes foi dado antes da Primeira Guerra Mundial por James Franck e Gustav Hertz (sobrinho de Heinrich Hertz, das ondas eletromagnéticas). Com experiências definitivas, demonstraram eles a existência dos estados estacionários postulados por Bohr. Para isso, produziram saltos entre eles, suprimindo a energia de excitação mediante colisões com elétrons acelerados. Observaram a perda de energia dos elétrons que ocorria apenas quando tinham energia suficiente para levar o átomo alvo para um estado excitado. Além do mais, viram o vapor bombardeado emitindo as linhas espectrais correspondentes ao retorno do estado excitado para estados inferiores. As frequências emitidas obedeciam à lei fundamental

$$h\nu = E_1 - E_2$$

postulada por Bohr. Essas experiências provaram inegavelmente algumas das mais sólidas hipóteses de Bohr.

Pouco depois do final da guerra, em 1921, outra experiência, realizada por Otto Stern e Walter Gerlach, demonstrou mais um fato previsto pela teoria de Bohr e que parecia contrário ao bom-senso, ou melhor, à experiência sensorial macroscópica comum. Tal fato é chamado de quantização de espaço (Figura 7.11). Já vimos que a condição quântica de Bohr pode ser formulada dizendo-se que as órbitas devem ter um *momentum* angular que é um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$  que é  $l\hbar/2\pi$ . Refinamentos das condições quânticas descobertas por Bohr, Sommerfeld e outros prevê a quantização não apenas do momento angular, mas também da sua componente em uma direção definida, como, por exemplo, pela presença de um campo magnético. Esse componente pode apenas ter os valores  $mb/2\pi$ , onde  $m$  é um número inteiro positivo ou negativo que é igual a  $l$  ou menor que  $l$  em termos de

magnitude. Segue-se daí que um átomo pode ter apenas determinadas orientações no espaço. Por exemplo, se  $l = 1$ ,  $m$  pode ter os valores  $-1, 0$  ou  $1$ , e o átomo pode orientar-se em apenas três posições com o *momentum* angular paralelo, perpendicular ou antiparalelo ao campo magnético. Esse fato extraordinário pode ser constatado experimentalmente quando se emite um feixe molecular, uma corrente tênue de moléculas ou átomos, através de um campo magnético, e se observa seu desvio. O desvio é produzido pela ação de um campo magnético não-homogêneo sobre o momento magnético do átomo, associado ao *momentum* angular. Os átomos se orientam apenas em posições descontínuas.

Otto Stern (1888-1969), que planejou a experiência sobre quantização espacial, foi o mesmo homem que vimos antes como seguidor de Einstein em Praga e Zurique, onde prometera abandonar a física se as idéias de Bohr comprovassem ser verdadeiras. Considero-o um dos maiores físicos do século (Figuras 7.12, 7.13). Começando em 1920, dedicou-se ele ao aperfeiçoamento do método de feixes moleculares. Com esse método, uma corrente tênue de moléculas é produzida em um alto vácuo e, nesse estado livre, as moléculas são submetidas a campos elétricos ou magnéticos ou a qualquer coisa que se deseje pesquisar. A importância do método deriva do fato de as moléculas estarem livres e de as condições experimentais se aproximarem intimamente daquelas postuladas na maioria dos enfoques teóricos.

O físico francês L. Dunoyer foi o primeiro a produzir um feixe molecular, em 1910. Mas o método foi aperfeiçoado e usado principalmente por Stern, seus alunos e colaboradores, que pesquisaram as hipóteses fundamentais da teoria cinética dos gases e, em particular, a distribuição maxwelliana de velocidades, a quantização de espaço, o momento magnético de muitos átomos e o comprimento de ondas para átomos de hélio, e assim por diante. Stern também foi exilado e seu instituto foi praticamente desmantelado pelos nazistas. Mais tarde, voltou a fixar-se nos Estados Unidos, mas sua obra mais importante foi concluída antes do exílio. A tradição de Stern foi levada adiante e ampliada pela introdução de técnicas avançadas de radiofrequência e vácuo, por I.I. Rabi (n. 1898) e os seguidores de sua escola, principalmente na Universidade de Colúmbia, na cidade de Nova York, que melhoraram enormemente as medições anteriores feitas por Stern e enfrentaram problemas inteiramente novos. Rabi tinha trabalhado no laboratório de Stern em 1930 como bolsista de pós-doutoramento. Ficava impressionado com a força dos métodos de Stern, mas não realizara experiências no laboratório.

O efeito Zeeman, que já era conhecido havia cerca de vinte anos, continuava a ser avidamente estudado, sobretudo na Alemanha, por E. Paschen, E. Back e outros cientistas. Era uma fonte inesgotável de resultados precisos e importantes que ajudaram grandemente a deslindar a estrutura de átomos mais complexos. A explicação do triplice de Zeeman oferecida em termos clássicos por H. A. Lorentz poderia ser transposta para termos quânticos e relacionada à quantização espacial. Mas muitos átomos mostram padrões Zeeman bem mais complicados do que o triplice de Zeeman. São chamados de *efeitos Zeeman anômalos* e representaram um verdadeiro desafio à teoria atômica.

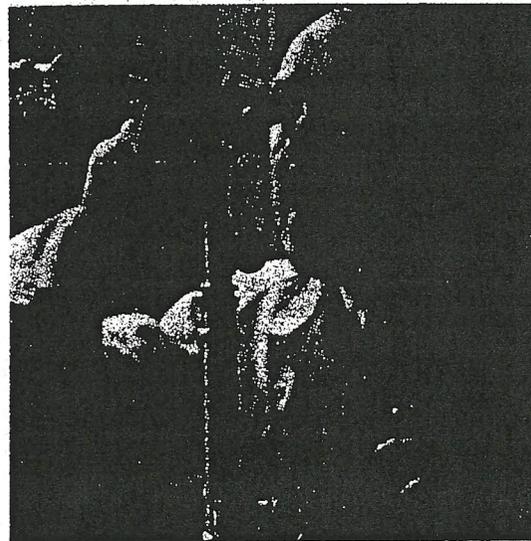


Figura 7.12. Otto Stern, um dos grandes físicos experimentais do período de entreguerra. Foi responsável por experiências clássicas sobre quantização espacial, sobre ondas de de Broglie e sobre o momento magnético do próton. Tais experiências foram realizadas com o método de feixes moleculares. (Universidade de Hamburgo.)



Figura 7.13. Otto Stern conversando com o físico norte-americano L. Langmuir durante uma excursão ao lago de Como, organizada para os participantes da Conferência de Volta de 1927. (Cortesia de F. Rasetti.)

Alfred Landé, primeiramente em Munique e depois em Tübingen, descobriu fórmulas semi-empíricas que descreviam esses efeitos com muita acuidade, mas era muito difícil entender os resultados a que ele chegara em qualquer modelo. Por exemplo, em mecânica atômica, com base no

princípio de correspondências, poderíamos ter certeza de que o quadrado do *momentum* angular em unidades  $h/2\pi$  entraria em certas fórmulas. Já sabemos que o *momentum* angular é um número inteiro  $l$ , mas as fórmulas só se encaixavam em dados experimentais se  $l^2$  fosse substituído por  $l(l+1)$ . Quando  $l$  é grande, as duas expressões coincidem, mas, quando  $l$  é pequeno, diferem radicalmente. Além do mais, frequentemente se descobriam *momentum* angulares múltiplos de  $h/4\pi$ , e não de  $h/2\pi$ . Em outras palavras, parecia surgir meio *quantum*. As fórmulas de Landé encaixavam-se em resultados experimentais, mas sua justificação era um mistério para cientistas como Pauli. Um amigo de Pauli viu-o certa vez sentado em um banco de jardim em Copenhague, com um ar deprimido, e perguntou-lhe o que o estava deixando tão infeliz. Pauli respondeu o seguinte: "Como se pode evitar a frustração pensando no efeito Zeeman anômalo?"

Para explicar  $l(l+1)$ , era necessário usar-se a mecânica quântica; para explicar os meios *quanta*, precisava-se de um *eléctron* em rotação. Ambos os conceitos estavam prestes a ser descobertos. O *eléctron* em rotação, em sua formulação original, é mais simples e mais intuitivo do que a mecânica quântica, da qual trataremos no próximo capítulo.

Em novembro de 1925, George E. Uhlenbeck (n. 1900) e Sam A. Goudsmit (1902-1978), dois físicos holandeses de vinte e poucos anos que estavam trabalhando em Leyden, fizeram uma descoberta muito importante: o *eléctron*, que até então era considerado uma carga puntiforme elétrica ou talvez uma pequena esfera carregada, tinha uma rotação (*spin*), um *momentum* angular intrínseco. Em outros termos, gira em torno de si mesmo, como a Terra. Além disso, o *eléctron* tem um momento magnético intrínseco associado à sua rotação. O *spin*, como poderíamos esperar, está relacionado com a unidade natural de *momentum* angular  $h/2\pi$ , mas há um aspecto novo: não é um múltiplo inteiro de tal unidade, mas sua metade. Ao mesmo tempo, o momento magnético associado ao *spin* é igual ao momento magnético associado a uma unidade de *momentum* angular orbital. Essa unidade é  $eh/4\pi mc$  e é chamada de magnéton de Bohr. O quociente entre *momentum* angular e momento magnético para o *spin* é duas vezes maior do que no caso orbital. Uhlenbeck e Goudsmit concluíram tudo isso a partir de um estudo de espectros atômicos.

Uhlenbeck tinha passado algum tempo na Itália como tutor do filho do embaixador holandês e ali conhecera Fermi, de quem se tornara amigo. Tanto Uhlenbeck quanto Goudsmit estavam estudando com Ehrenfest em Leyden quando lhes ocorreu a idéia do *spin* do *eléctron*. R. de L. Kronig, um norte-americano de origem húngara e também amigo de Fermi, com quem tinha passado algum tempo nas Dolomitas italianas, também teve a mesma idéia – independentemente – mais ou menos na mesma época em que Uhlenbeck e Goudsmit. Infelizmente para ele, pediu a opinião de Pauli a respeito do assunto. Pauli já era famoso por suas realizações e também por sua agudeza crítica, mas dessa vez errou redondamente ao convencer Kronig de que sua hipótese era totalmente desprovida de fundamento. Ao tomarem ciência da crítica feita por Pauli, a primeira impressão que Uhlenbeck e Goudsmit tiveram foi de que nela havia alguma justificativa, e decidiram recolher o artigo, já enviado por Ehrenfest, para uma publicação especiali-

zada. Ehrenfest, no entanto, opôs-se a isso, afirmando que os dois eram tão jovens que podiam enfrentar as conseqüências de publicar um estudo infundado. Assim, o artigo foi publicado em revistas de física especializada. Mais tarde foi comprovado, principalmente por H. L. Thomas, que a crítica de Pauli não tinha razão de ser. Pauli objetara que um certo fator de 2 nas fórmulas aparentemente destruía o que era comprovado pela experiência; Thomas mostrou que um argumento relativista sutil fornecia esse fator que estava faltando. Assim é que Uhlenbeck e Goudsmit podem ser com justiça considerados os descobridores do *spin* do *eléctron*, importante avanço feito na área da física. Infelizmente, não foram laureados com o Prêmio Nobel, embora o merecessem.

### A Física de Weimar e de Copenhague. O Princípio de Exclusão

O êxito inicial de Bohr relacionou-se basicamente ao átomo de hidrogênio, mas desde o começo ele se interessava por átomos com mais de um *eléctron*. Os problemas mecânicos tornam-se muito mais complicados logo que se passa de um sistema de dois corpos para um sistema de muitos corpos. As normas de quantização tinham de ser generalizadas e era preciso calcular as complicadas órbitas hipotéticas que estavam surgindo. A generalização das normas de quantização foi feita por Arnold Sommerfeld (1868-1951), professor de física teórica em Munique. De início, Sommerfeld dedicava-se à matemática pura e trabalhara com Felix Klein em Göttingen. Klein estava convencido de que se precisava reforçar o relacionamento entre a matemática e as disciplinas técnicas, e converteu Sommerfeld a suas idéias. Sommerfeld desviou seu interesse do campo da matemática pura e se tornou um matemático aplicado e de primeiro plano, utilizando técnicas matemáticas bastante eficientes em problemas de engenharia como lubrificação e propagação das ondas eletromagnéticas.

Em 1906, Sommerfeld foi convidado pela Universidade de Munique para ocupar o cargo de professor de física teórica e ali instalou um importante centro para essa disciplina. Atraiu muitos estudantes de alto nível e teve Peter Debye como assistente. Debye ajudou a intensificar o interesse de Sommerfeld pela teoria quântica. Pouco antes, Sommerfeld já se havia convertido à relatividade. Sob sua liderança, grande número de físicos teóricos brilharam em Munique. Seus alunos adquiriam flexibilidade na área de matemática e aprendiam a física da época. A influência de Sommerfeld ampliou-se e, durante mais de quarenta anos, ele teve uma sucessão de alunos de física teórica cujo brilho podia ser comparado ao dos físicos experimentalistas de Rutherford. Em seus próprios estudos, Sommerfeld aplicou a relatividade ao átomo de Bohr, introduzindo a "constante de estrutura fina"  $2\pi e^2/hc$  – um número puro que desempenha importante função na física. Seu valor, atualmente conhecido com grande precisão, é  $1/137.03596$ . Tem-se feito muitas tentativas no sentido de obtê-lo a partir de ousadas teorias abrangentes, mas até agora tais tentativas têm fracassado. Conforme Sommerfeld afirmou em seu famoso texto "Linhas Espectrais e Constituição Atômica", no qual toda uma geração de físicos aprendeu o assunto (vide p. 204): "Na constante de estrutura fina  $e$  é o representante da teoria dos *eléctrons*,  $h$  é o represen-

tante adequado da teoria quântica, e vem da relatividade e caracteriza-a em contraste com a teoria clássica”.

Sob muitos aspectos, Sommerfeld representava o típico professor alemão. Por detrás de seu comportamento um tanto rígido e formal, estava uma calorosa personalidade que, plena de carinho, interessava-se grandemente pelos jovens estudantes. Sommerfeld era excelente esquiador e tinha uma casa nos Alpes da Bavária, onde passava o inverno com os alunos. Nessas ocasiões, deixava de lado a aparência de *Geheimrat* e unia a arte de esqui a discussões sobre física da maneira mais descontraída. Seu interesse por jovens físicos promissores ultrapassou as fronteiras da Alemanha. Quando Hitler assumiu o poder, Sommerfeld, que era muito patriota, não se deixou enganar pelo *Führer*. Lembrou-me de tê-lo conhecido em 1934, na Holanda, onde ele tinha ido para fazer uma conferência. Nessa ocasião, recebeu honorários substanciais pela palestra e comentou comigo com grande satisfação: “Vou mandar esse dinheiro imediatamente a Rutherford, para ajudar estudantes desempregados. Não posso fazer isso na Alemanha, e esta é uma chance que não devo perder”.

Os métodos de Bohr e de Sommerfeld foram aplicados por muitos físicos a fenômenos como a separação elétrica de linhas espectrais, descoberta por Johannes Stark em 1913, fenômeno semelhante ao efeito magnético de Zeeman. Foram também aplicados ao detalhado deslindamento dos espectros de raios X, área em que W. Kossel fez progressos decisivos, e ao cálculo da intensidade das linhas espectrais. Grande parte desse trabalho foi influenciado por Sommerfeld, a partir de Munique, embora não tenha sido realizado naquela cidade. Os resultados sempre foram corretos do ponto de vista qualitativo, mas do ponto de vista quantitativo quase sempre foram apenas aproximados. Mas as fórmulas freqüentemente combinavam com a experiência quando  $l^2$  era substituído por  $l(l+1)$ . Todas essas análises e essas tentativas se orientavam pelo princípio de correspondências. Mas havia problemas que eram comprovadamente refratários a qualquer enfoque teórico mesmo que aparentemente fossem simples. Exemplo flagrante era o átomo do hélio.

A explicação do sistema periódico dos elementos foi um dos importantes êxitos dessa época. Bohr sempre se esforçara para explicar o sistema periódico especificando órbitas para os elétrons atômicos, mas os critérios usados estavam longe de ser simples e não eram dignos de confiança. Desde seus primeiros estudos, ele se preocupou com o problema e tentou várias soluções (Figura 7.14). Em 1922, já tinha intuitivamente especificado órbitas que eram essencialmente corretas, mas usara argumentos que, com certa percepção, não se mostravam muito firmes. Em particular, justificou o número e a posição na tabela periódica das terras raras. Tratava-se de um problema difícil e cujo êxito o deixou bastante orgulhoso. Em sua Conferência Nobel de 1922, afirmou o seguinte: “Na realidade, se não se tivesse estabelecido a existência das terras raras por meio de pesquisas experimentais objetivas, a ocorrência de uma família de elementos dessa natureza no âmbito dos elementos poderia ter sido prevista teoricamente” (*Les Prix Nobel en 1922*). Seguiu-se uma dramática confirmação da exatidão das determinações de órbitas de Bohr. Segundo ele, o elemento 72 não devia ter sido uma

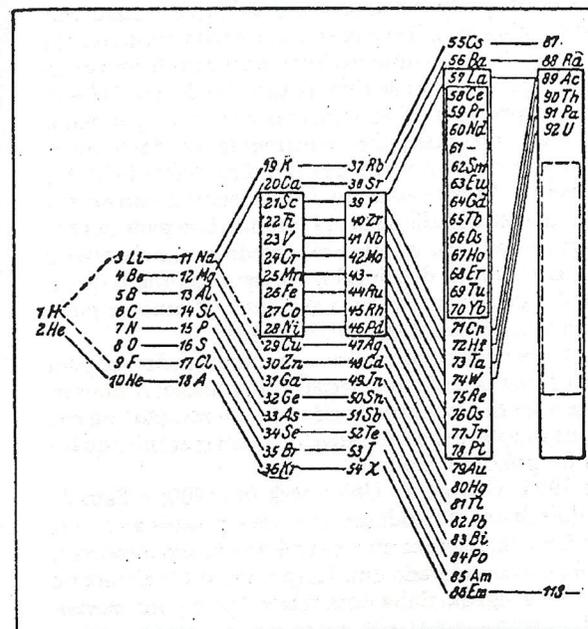


Figura 7.14. O sistema periódico dos elementos, segundo Bohr (1921). Embora esse sistema tenha precedido a descoberta do princípio de Pauli, o esquema é essencialmente correto. [De *Annalen der Physik* 71, 228 (1923).]

terra rara, mas um metal semelhante ao zircônio. Tinham surgido diversos relatórios sobre descobertas de uma terra rara de número atômico 72, que Urbain chamou de *celtium*, embora Moseley não a tivesse encontrado em suas amostras. Ali estava uma oportunidade para confirmar ou rejeitar as idéias de Bohr. Comprovou-se ser surpreendentemente fácil achar o elemento 72 em minérios de zircônio: tinha as propriedades de um homólogo do zircônio e não de uma terra rara. Esse trabalho excepcional foi realizado no instituto de Bohr pelo espectroscopista de raios X Coster e por Hevesy, velho amigo de Bohr. E. C. Stoner, na Inglaterra, aperfeiçoou o trabalho de Bohr, mas, não obstante, a especificação de órbitas não se fez com base em critérios bem nítidos. Neste ponto, Wolfgang Pauli (1900-1958) entrou em cena. Pauli já realizara profundo estudo do efeito Zeeman anômalo e do número quântico conforme classificado por Stoner e, no início de 1925, formulou um novo princípio fundamental da teoria quântica: dois elétrons com números quânticos idênticos não podem coexistir em um átomo. Cada órbita pode ser caracterizada por determinados números quânticos (no caso de átomos, são quatro), e cada órbita pode estar vazia ou conter apenas um elétron. Pauli descobriu esse chamado princípio de exclusão antes da descoberta do spin estudando material espectroscópico. O spin permitia interpretar os quatro números quânticos de uma maneira mais natural do que Pauli imaginara. O princípio de exclusão – ou princípio de Pauli, como é freqüentemente denominado, aliás de uma forma apropriada – vai muito além de suas

aplicações atômicas. Forneceu a chave para a explicação do paramagnetismo, o comportamento dos elétrons em metais, e muitos fenômenos de baixas temperaturas. Mais tarde, foi aplicado também em física nuclear.

Em 1926, Enrico Fermi (1901-1954; Figura 7.15) fez uma das mais profícuas aplicações do princípio de Pauli incorporando-o à mecânica estatística. Obteve assim um novo tipo de estatística, que, como a de Bose e Einstein, aplica-se na natureza. Algumas partículas, como os elétrons, obedecem à estatística de Fermi; outras, como as partículas alfa, obedecem à estatística Bose-Einstein. Muitos anos depois, em 1940, Pauli apresentou a justificativa de um relacionamento empírico que tinha sido estabelecido anteriormente. As partículas com spin inteiro obedecem à estatística Bose-Einstein (e são chamadas *bósons*); enquanto que as partículas com spin semi-inteiro obedecem à estatística Fermi (e são chamadas *férmions*). A prova de Pauli a respeito desse fato mostra que ele tem raízes profundas na relatividade e na causalidade.

Em 1926, Dirac formulou o princípio de Pauli em termos de mecânica quântica e, no mesmo trabalho, pôs a estatística de Fermi em termos da mecânica quântica. Os trabalhos anteriores escritos por Pauli e por Fermi tinham seguido linhas semiclássicas modificadas pelos princípios de Bohr.

Até o momento mencionei apenas algumas das aplicações dos modelos atômicos. A arte vicejante estava refletida nos tratados da época, inicialmente no *Atombau und Spektrallinien* e depois nos diversos livros dele originados.

A vibrante atividade intelectual que acabou por conduzir à mecânica quântica centralizava-se na Alemanha. A principal publicação provavelmente era o *Zeitschrift für Physik*, fundado após a guerra. Na Alemanha, duas escolas de física teórica foram particularmente importantes: uma em Munique, liderada por Sommerfeld, e outra em Göttingen, liderada por Max Born. O tratado *Atombau und Spektrallinien* foi um texto estudado por todos. Seguiu-se uma edição atrás da outra, sempre atualizadas. Tratava-se de obra admiravelmente clara, de leitura fácil e relativamente completa. Naqueles dias um bom estudante, após ter digerido o livro de Sommerfeld, podia recorrer diretamente à bibliografia em voga e dar início a um trabalho de pesquisa.

Um terceiro centro era a Copenhague de Bohr. Os melhores estudantes alemães quase sempre faziam a peregrinação de Munique a Göttingen e, finalmente, a Copenhague. Naturalmente, esses três centros de trabalho teórico não eram os únicos. Existiam outros na Alemanha, Inglaterra, França, Holanda e nos países escandinavos. Depois de 1927, Roma começou a ganhar importância quando Fermi foi convidado para lecionar naquela cidade.

Professores de todas as grandes instituições freqüentemente ali se encontravam e trocavam informações não apenas sobre questões técnicas, mas também sobre jovens cientistas promissores. Nos Estados Unidos, a Fundação Rockefeller financiou muitos cientistas recém-formados, selecionando-os com discernimento fantástico e admirável. Entre estes estavam vários dos fundadores da mecânica quântica, como Heisenberg e Pauli. Em reuniões, em estágios financiados por bolsas de estudo e em curtas visitas, os físicos quase sempre iniciavam amizades duradouras. Entre os professores

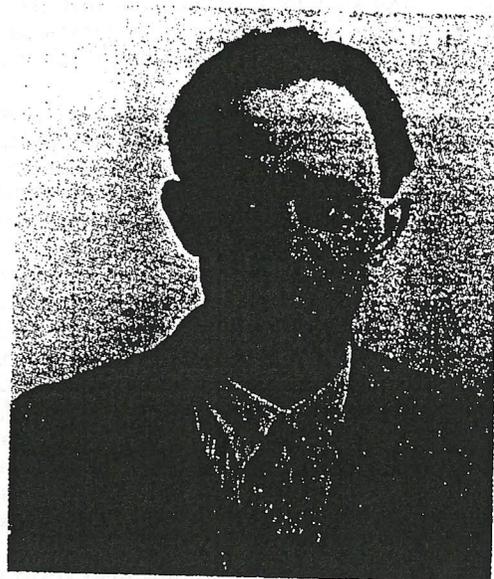


Figura 7.15. Enrico Fermi, por volta de 1928. (Foto de G. C. Trabacchi.)

mais antigos e líderes de escolas, Sommerfeld, Ehrenfest e Bohr distinguiam-se pelo interesse que demonstravam por seus alunos e pelos estudantes talentosos que vinham a conhecer. Não apenas arranjavam bolsas de estudo para eles, mas também os recomendavam a seus colegas e a outras universidades. Ainda me lembro da gentileza com que Zeeman me acolheu, deixando-me usar as instalações de seu laboratório e depois ajudando-me a obter uma bolsa de estudo, e lembro-me do orgulho e da alegria que senti quando uma nova edição do *Atombau* fez referências favoráveis a determinado trabalho de minha autoria. Para um iniciante, era um estímulo incalculável. Rutherford também conseguia facilidades semelhantes em termos de estímulo, mas sua tendência era limitar-se ao Império britânico, que certamente não era um território muito exiguo.

O total de físicos em todo o mundo era relativamente pequeno – cerca de 1/10 do que existe hoje em dia. Os Estados Unidos tinham surgido no horizonte, sobretudo na área experimental. Conforme já foi mencionado, R. A. Millikan e A. H. Compton tinham realizado experiências fundamentais, o primeiro com a medição da carga do elétron e da constante de Planck, o segundo com uma excepcional confirmação da existência dos *quanta* de luz e sua colisão com elétrons livres. Os teóricos norte-americanos eram poucos. Iam estudar em Göttingen, Copenhague e sobretudo em Cambridge, onde não havia barreira de língua. J. R. Oppenheimer, J. C. Slater e E. U. Condon, entre outros, foram para a Europa e mais tarde transplantaram a teoria moderna para os Estados Unidos. Alguns estudantes vinham também do

Japão e entre esses um dos mais importantes foi Y. Nishina, que mais tarde tornou-se bastante influente em seu próprio país. Da União Soviética vieram A. Ioffe, J. Fraenkel e D. Landau, três futuros líderes na área das ciências em seu país.

Os físicos escreviam-se uns aos outros do mesmo modo como hoje em dia se faz uso do telefone. Algumas das cartas foram publicadas e muitas outras estão conservadas em locais diversos, como o Instituto Americano de Física e o Instituto Bohr. As cartas entre Born e Einstein bem como aquelas trocadas por Einstein e Sommerfeld, e já publicadas, oferecem importante testemunho dos acontecimentos.

A atividade de Bohr continuou por muito tempo depois de terem sido superados os primeiros modelos que, à guisa de tentativa, incorporavam a teoria quântica. Bohr teve um papel importante no desenvolvimento da mecânica quântica, não apenas com suas pesquisas pessoais, mas também com o espírito indagador e a atitude crítica que cultivava em seu instituto e a hospitalidade que oferecia a muitos dos mais criativos cientistas jovens de todos os países (Figura 7.16). Além do mais, as visitas que fazia a outros centros representavam grande estímulo a cientistas e contribuíam para a divulgação das novas idéias. Sua primeira viagem aos Estados Unidos, em 1932, é um exemplo de visita que trouxe ao Novo Mundo um representante vivo da teoria quântica.

Com o advento do nazismo, Bohr tornou-se um dos mais ativos e eficientes salvadores de cientistas desalojados pela nova forma de barbarismo. As Conferências de Copenhague também foram usadas como oportunidade para identificar empregos, mesmo que temporários, para "intelectuais deslocados" – em linguagem mais clara, gente demitida, sobretudo (mas não somente) por Hitler. Bohr, com suas vastas ligações internacionais, foi muito ativo no desempenho dessa tarefa, que na maior parte das vezes obteve êxito e era de grande benefício tanto para a vítima quanto para o novo empregador. Rutherford, conforme já dissemos, era presidente de um comitê britânico também dedicado a tal objetivo e sua amizade com Bohr ajudou bastante nesse empreendimento.

Mais tarde, Bohr apresentou idéias originais e profícuas para a teoria nuclear, que, porém, não se comparavam em importância aos trabalhos por ele elaborados, quando mais jovem, e que revolucionaram a física. Não obstante, sua intuição na área de pesquisas nucleares levou a modelos simples, mas prolíficos, como o do núcleo composto e a sua aplicação à fissão nuclear. Suas opiniões exerceram influência sobre a geração de físicos que se seguiu, à qual pertencia também seu filho Aage, que atualmente preside com distinção o Instituto Niels Bohr (o velho Instituto Bohr) e, sob vários aspectos, preserva sua tradição.

Durante a Segunda Guerra Mundial, Bohr enfrentou algumas aventuras dramáticas. Avisado por amigos de que ia ser preso pelos nazistas que ocuparam a Dinamarca, ele fugiu do país, à noite, num barco de pesca aberto, vindo a aportar na Suécia. Logo depois, foi transferido em segredo para a Inglaterra, em um avião militar que voava a grande altitude. Durante o voo, ficou inconsciente em virtude de algum defeito na máscara de oxigênio e em determinado momento a tripulação julgou que ele tivesse morrido. Da



Figura 7.16 Enrico Fermi (à esquerda) e Niels Bohr, conversando durante um passeio ao longo da Via Ápia em 1931. (Foto de S. Goudsmit.)

Inglaterra, Bohr mudou-se para os Estados Unidos e certo dia, para nossa surpresa, vimo-lo chegar ao laboratório de Los Alamos, instituição voltada para a construção da bomba atômica. Diversos cientistas europeus que estavam ali foram convidados secretamente para a casa de J. R. Oppenheimer (diretor do laboratório) para conhecer um tal de Mr. Baker, que nada mais era do que o próprio Bohr, que, junto com o filho Aage, tinha viajado com nome falso. Ali, em uma atmosfera sombria, tivemos em primeira mão informações sobre a Europa ocupada. Foi a primeira vez que recebemos um testemunho tão direto e tão autorizado a respeito dos fatos relacionados à ocupação nazista. Bohr estava profundamente preocupado com as consequências das armas atômicas e procurou influenciar o Presidente Roosevelt e Churchill no sentido de revelar o projeto atômico aos soviéticos logo de início, na esperança de que esse gesto abrisse caminho para alguma forma de consenso com a União Soviética. Desejava ele atenuar a possibilidade de uma

corrida armamentista e de outros riscos que, a seu ver, estavam para surgir. Ao mesmo tempo, tinha esperança de que a energia nuclear pudesse vir a beneficiar a humanidade. Não teve sucesso em suas tentativas. Suas idéias a respeito do assunto foram mais tarde transcritas em uma carta aberta às Nações Unidas, em 1950.

Nos últimos anos de sua vida, os interesses de Bohr ampliaram-se para além da física. Viveu com a esposa em sua esplêndida residência em Copenhague e a hospitalidade, gentileza e amabilidade que todos ali recebiam eram reminiscências da corte de um príncipe renascentista.

Bohr morreu repentinamente, em 18 de novembro de 1962, aos setenta e oito anos de idade.

## Finalmente uma verdadeira mecânica quântica

No capítulo anterior tratamos dos triunfos e das atribulações dos modelos atômicos. Talvez ninguém melhor do que Niels Bohr tivesse consciência da fragilidade dos métodos que tanto contribuíram para deslindar alguns dos mistérios atômicos. Acrescento um "talvez" em tal declaração porque Einstein também tinha idéias originais e profundas a esse respeito, idéias essas que o perseguiram durante vinte anos sem que ele encontrasse uma saída para elas. No início da década de vinte, os métodos antigos já haviam alcançado seus limites e era necessário que surgissem uma nova geração e novas forças para solucionar o problema de uma mecânica quântica consistente, na área da física. Era o maior desafio do século e exigia, para sua solução, novas maneiras de pensar. E aqui, observamos um fato estranho. Num espaço de bem poucos anos o mistério foi atacado por três flancos e, de início, aparentemente havia três – e não apenas uma – formas distintas, embora consistentes, de mecânica quântica. Só um pouco mais tarde é que se reconheceu tratar-se de diferentes formulações matemáticas da mesma teoria que, de fato, eram equivalentes.

Uma vez resolvido o problema matemático formal, abriu-se caminho para um novo problema epistemológico, porque a interpretação das fórmulas matemáticas precisava de uma revisão profunda e global do conceito básico de causalidade e determinismo em física. Precisava ainda de uma nova análise filosófica não menos revolucionária e categórica do que aquela produzida por Einstein em sua análise do espaço e do tempo, em 1905.

### Louis de Broglie: Ondas de Matéria

O primeiro cientista a dar um passo revolucionário foi um aristocrata francês, Príncipe Louis de Broglie (1892 – 1986), que era quase desconhecido entre os físicos da época (Figura 8.1). A família de de Broglie, originária de Chieri, no Piemonte, Itália, tem sido importante na história da França desde o século XVIII, e a ela pertencem vários marechais, embaixadores, ministros e, para não dizer menos, o Duque Maurice de Broglie, o irmão mais velho do Príncipe Louis. Maurice foi um destacado físico e autor dos primeiros estudos clássicos sobre os raios X, levados a cabo em seu palácio em Paris, na rua Byron, parte do qual transformara em laboratório. Nesse ponto, faz-me