

PAUL STRATHERN

BOHR

E A TEORIA QUÂNTICA

.....

em 90 minutos



 ZAHAR

BOHR
E A TEORIA QUÂNTICA
em 90 minutos

Paul Strathern

Tradução:

Maria Helena Geordane

Consultoria:

Carla Fonseca-Barbatti

Mestranda em física, CBPF/CNPq



CIENTISTAS

em 90 minutos

.....

por Paul Strathern

Arquimedes e a alavanca em 90 minutos

Bohr e a teoria quântica em 90 minutos

Crick, Watson e o DNA em 90 minutos

Curie e a radioatividade em 90 minutos

Darwin e a evolução em 90 minutos

Einstein e a relatividade em 90 minutos

Galileu e o sistema solar em 90 minutos

Hawking e os buracos negros em 90 minutos

Newton e a gravidade em 90 minutos

Oppenheimer e a bomba atômica em 90 minutos

Pitágoras e seu teorema em 90 minutos

Turing e o computador em 90 minutos

SUMÁRIO

.....

Sobre o autor

Introdução

Vida e obra

Algumas particularidades e partículas do mundo quântico

Cronologia

Leitura sugerida

SOBRE O AUTOR

.....

PAUL STRATHERN foi professor universitário de filosofia e matemática na Kingston University e é autor das séries “Cientistas em 90 minutos” e “Filósofos em 90 minutos”, esta traduzida em mais de oito países. Escreveu cinco romances (entre eles *A Season in Abyssinia*, ganhador do Prêmio Somerset Maugham), além de biografias e livros de história e de viagens. Foi também jornalista *free-lance*, colaborando para o *Observer*, o *Daily Telegraph* e o *Irish Times*. Tem uma filha e mora em Londres.

INTRODUÇÃO

.....

Segundo o grande físico teórico alemão Werner Heisenberg, “a influência de Bohr sobre a física e os físicos de nosso século foi mais forte que a de qualquer outra pessoa, inclusive Einstein”. E Heisenberg devia saber – ele passou boa parte de sua vida discutindo (e argumentando ferozmente) com ambos.

A maior conquista de Bohr foi a solução do enigma da estrutura atômica mediante a aplicação da teoria quântica, o que resultou em grande progresso científico – e grande perplexidade científica. Como? Ninguém sabe ao certo até hoje o que é a teoria quântica.

O grande pianista Vladimir Horowitz observou certa vez a respeito de Mozart que ele era “fácil demais para principiantes, difícil demais para especialistas”. O mesmo se aplica à física quântica, segundo o colega e biógrafo de Bohr, Abraham Pais. Assim, mesmo que a versão simplificada contida neste livro comece a deixá-lo confuso, pelo menos você poderá se consolar por estar chegando a algum lugar. Simplificando (para aqueles de nós que achamos até mesmo Mozart difícil), a teoria quântica afirma que *partículas no nível subatômico não obedecem às leis da física clássica. Na verdade, entidades como os elétrons podem existir como duas coisas diferentes ao mesmo tempo – matéria ou energia, dependendo de como são medidas.*

O principal problema da teoria quântica é o fato de ser totalmente inverossímil, de não ter nada a ver com o senso comum. Mas a ciência do século XX é muito mais estimulante do que o senso comum (que Einstein

simplesmente descartou chamando-o “a soma de preconceitos adquiridos por volta dos 18 anos”).

Bohr tornou-se diretor do Instituto de Física Teórica de Copenhague, de onde dominou com maestria a época áurea da física quântica. Isso ocorreu na década de 1920, num processo que teve a participação de vários dos melhores cientistas da geração pós-Einstein. Juntos e isoladamente, mediante discussão e brilho individual, esses pioneiros desbravaram um campo de cuja existência ninguém sequer suspeitava um quarto de século antes. Os efeitos dessa era de descobertas demonstraram ser uma bênção paradoxal. Sabemos hoje como o mundo funciona – das mais ínfimas partículas subnucleares aos buracos negros. Sabemos também como destruí-lo por meio de um holocausto nuclear. Bohr viveu o suficiente para colaborar na confecção da primeira bomba atômica. Quando se deu conta do que fizera, passou o resto da vida fazendo campanha contra ela.

VIDA E OBRA

.....

Niels Bohr nasceu em 7 de outubro de 1885 em Copenhague. Descendia de uma ilustre família dinamarquesa. Seu pai, Christian Bohr, era professor de fisiologia da Universidade de Copenhague e quase recebeu o Prêmio Nobel por seu trabalho pioneiro sobre a química do sistema respiratório. No entanto, sua maior influência sobre a sociedade dinamarquesa deveu-se a seu amor pela Inglaterra e por tudo que fosse inglês. Christian era um grande adepto do futebol e desempenhou papel missionário na adoção dessa religião popular na Dinamarca. A mãe de Niels, Ellen, era de ascendência judaica e sua família sobressaía nas atividades bancárias e nos círculos políticos.

A despeito de seu nome cristão, Christian, o velho Bohr não acreditava em religião e a atmosfera familiar era progressista-liberal-intelectual. De qualquer ponto de vista, os Bohr eram uma família agradável, compreensiva e tolerante. Sem exceção, os amigos se recordaram mais tarde de todas essas qualidades. Tudo parece bom demais para ser verdadeiro – ou totalmente sufocante. É difícil julgar.

Uma das únicas anedotas que conhecemos da infância de Niels é tipicamente pouco reveladora. Um dia Christian Bohr apontou uma árvore para o filho, ressaltando a maneira bela de o tronco se ramificar em galhos, que por sua vez se repartiam em ramos mais finos, que finalmente produziam folhas. Relata-se que o menino Niels respondeu: “Sim, mas se não fosse desse modo não haveria árvore.” Psicológica e simbolicamente, bem como

literalmente, isso não diz quase nada. Ou, de outra forma, pode ser visto como prenhe de todos os significados. Faça sua escolha: é tudo que temos.

Passando de uma infância monótona a uma mocidade insossa, Niels se transformou num jovem calado e muito pouco agressivo. Fotografias desse período retratam um adolescente alto e bem-vestido, mas de certo modo desprovido de graciosidade, com seu colarinho engomado e expressão decididamente derrotada. Suas bochechas rechonchudas pendiam, tinha lábios grandes e grossos e um ar culpado e sem brilho nos olhos quase fechados. Sua fala era pausada e em seus modos pouco havia que denunciasse um cérebro de primeira categoria. Era diferente na escola, onde se mostrava inteligente (mas não brilhante), sempre pronto a usar o corpanzil quando se tratava de brigar. Logo se tornou conhecido por sua força poderosa e passou a se destacar nos esportes. Para grande orgulho do pai, foi logo selecionado para o time de futebol do colégio e, seguindo-lhe os passos, viu-se tomado de profundo interesse pela ciência. Era particularmente atraído pelo trabalho experimental em laboratório, onde conseguia combinar a excepcional capacidade e a natural inabilidade. Seu forte era quebrar tubos e frascos de vidro. Em determinada ocasião, quando uma série de explosões partiu dos laboratórios, ouviu-se seu sofrido professor exclamar: “Ah, deve ser o Bohr.”

O elemento mais importante na vida de Niels Bohr foi, no entanto, seu irmão mais moço, Harald, que frequentou com ele o prestigioso Ginásio Gammelholm, em Copenhague. Um colega fez a seguinte observação a respeito desse relacionamento: “Jamais conheci pessoas tão próximas quanto eles.” Os irmãos eram inseparáveis. Harald era um ano e meio mais jovem que Niels, mas rapidamente começou a rivalizar com o irmão desportista. Niels não demonstrou qualquer sinal de ressentimento. Ao deixar a escola, Harald já superava o irmão em todas as frentes. Não era apenas um brilhante matemático, mas também um craque jogando bola. Um estilista no meio-campo, Harald logo ofuscou os gols acrobáticos e

fortuitos do irmão. Desde o início, Harald se mostrava espirituoso e cheio de vida, enquanto Niels tinha hábitos mais tranquilos, mais prosaicos. Apesar dessa rivalidade, e das diferenças de temperamento, a relação profunda entre os irmãos permaneceu intocada. Nada jamais se interpôs entre eles.

Ou assim somos levados a crer. Bohr tornou-se um monumento nacional na Dinamarca, e o ser humano de carne e sangue foi esmagado por esse sólido rochedo. É difícil acreditar que não houvesse pelo menos alguma tensão oculta nessa relação fraterna tão íntima e fora do comum. Poucos irmãos mais velhos abrem mão de seu papel de protagonista sem algum ressentimento. No entanto, os irmãos parecem ter-se adaptado um ao outro com notável sensibilidade e entendimento psicológico, dividindo entre si o mundo do conhecimento científico. Harald apropriou-se da matemática, enquanto Niels se dedicou à física. Podiam, assim, consultar um ao outro, e mesmo se ajudar, sem qualquer rivalidade – assim como a posição de goleiro do time é única, não disputada por qualquer outro jogador (independentemente de seu brilhantismo).

Até mesmo a relação dos irmãos Bohr em casa parece ter sido imune aos maus humores e agressões da afeição fraterna normal. E esse quadro idílico se completa com Jenny, a irmã mais velha, igualmente brilhante. Ela estudou na Universidade de Copenhague e em Oxford, antes de retornar à Dinamarca para se transformar em professora “inspirada”, conhecida por seu “calor humano”. Apesar desse calor humano, jamais se casou e, infelizmente, há informações de que “seus nervos trouxeram-lhe problemas mais tarde”. A verdade não chega a ser tão agradável. A irmã querida e primogênita do lar dos Bohr logo se tornaria uma ruína psicológica incurável, que acabou internada num hospício do interior. Segundo o atestado de óbito, ela morreu de “psicose maníaco-depressiva, na fase maníaca”, fórmula clínica que, no entanto, evoca um quadro deprimente. Como Harald foi obrigado a admitir em seu enterro: “Desde a

adolescência, ela foi prejudicada pela doença, que com frequência a tornava impotente e consumia toda a sua energia.” A presença dessa figura assustadora na família Bohr lança uma luz algo diferente sobre a relação profunda e pouco natural entre Niels e Harald.

Essa insistência numa dimensão psicológica da relação de Niels com o irmão não é gratuita. Certamente não foi por acaso que a obra tardia de Niels se caracterizou por uma *ambiguidade* intrínseca. A teoria quântica é sobre a compatibilidade de dois opostos aparentemente irreconciliáveis. E duas das mais importantes concepções teóricas de Niels foram o Princípio da Correspondência e o Princípio da Complementaridade, sendo que ambas salientam a similaridade, a despeito da diferença implícita. Niels Bohr entendeu a noção de ambiguidade em seu nível mais profundo, e sua grande obra científica procurou solucioná-la harmoniosamente.

Em 1903, os dois irmãos matricularam-se na Universidade de Copenhague. Eram tempos agitados. Um novo século se iniciava e o mundo estava a um passo de se tornar irreconhecível. No mesmo ano, os primeiros táxis motorizados surgiram nas ruas de Copenhague. Na América, os irmãos Wright realizaram seu primeiro voo e Marie Curie recebeu o Prêmio Nobel pela descoberta da radioatividade.

Os dois Bohr logo começaram a jogar no time de futebol da universidade, o Akademisk Boldklub, um dos mais fortes do país. (Mais tarde conhecido como AB, ainda tem cotação alta na liga dinamarquesa.) Niels esporadicamente se destacava no gol – muito embora, sempre que a ação se desenrolava na outra extremidade do campo, passasse o tempo fazendo cálculos a lápis na trave. Na realidade, foi sua concentração nessa busca matemática, aliada à pontaria dos chutes dos oponentes, que o levou a algumas de suas mais espetaculares defesas. Harald, por sua vez, sobressaiu um pouco mais tarde, e chegou a jogar pela Dinamarca nas Olimpíadas (quando venceram a França por 17 a 1 na semifinal, perdendo em seguida para a Inglaterra por 2 a 0).

Por essa época, os irmãos, em sua ligação simbiótica, se inspiravam (ou se estimulavam) na plenitude de seu potencial intelectual. O temperamento sofisticado de Niels parecia completamente afinado com complexidades da física, e suas conquistas nesse domínio logo se equiparavam às de Harald na matemática. Os próprios colegas começaram a usar a palavra “gênio” ao se referir a qualquer dos irmãos Bohr. Niels sempre foi um leitor ávido e fazia o possível para se manter a par dos últimos progressos da ciência. Rapidamente ganhou fama entre os colegas de classe por corrigir livros didáticos de física. O que diziam estava simplesmente errado – e ele era capaz de demonstrá-lo utilizando provas de descobertas recentes.

Durante os anos de estudante, os Bohr continuaram a morar na casa da família, frequentada por alguns dos maiores talentos da Dinamarca, convidados pelo pai para jantar. Copenhague deixara de ser um lugarejo provinciano: a geração anterior de intelectuais incluía o filósofo Søren Kierkegaard, fundador do existencialismo, e o crítico George Brandes, o homem que descobriu Nietzsche. Após o jantar, o velho Bohr e seus amigos intelectuais participavam de discussões filosóficas – que Niels e Harald tinham permissão para assistir como “ouvintes silenciosos”. (A casa pode ter sido progressista, mas aparentemente ainda se esperava que mesmo as crianças crescidas fossem vistas e não ouvidas.)

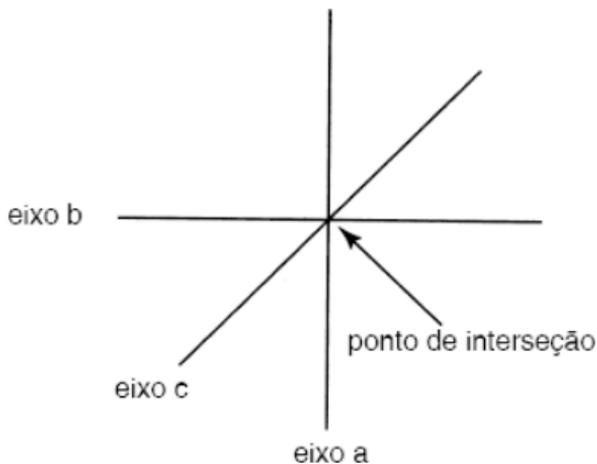
Em 1907, no último ano da universidade, Niels Bohr recebeu a Medalha de Ouro da Real Academia Dinamarquesa de Ciências e Letras por um ensaio sobre a tensão da água na superfície. Era um feito admirável para um estudante de graduação e marca seu efetivo despontar como superintelecto científico. Bohr concluiu o trabalho experimental para esse ensaio em meio aos estudos para os exames finais e quase perdeu o prazo estabelecido pela Academia. (O manuscrito conservado mostra que partes dele foram apressadamente copiadas por Harald, supostamente de notas de Niels.) O trabalho experimental de Niels compreendia a análise precisa das vibrações num jato de água. Cada um desses

experimentos foi montado e executado pelo próprio Bohr, e exigiu um jato de água de raio médio de menos de um milímetro. Para produzir esse jato, ele precisou de longos tubos de vidro, de proporção semelhante, com corte transversal em elipse, que ele mesmo construiu. A velocidade da água no jato era medida por um corte repetido duas vezes no mesmo ponto, a um certo intervalo, calculando-se em seguida o comprimento do segmento do corte por meios fotográficos. As vibrações (as ondas formadas na superfície da água) também eram medidas por fotografia. A maior parte de seu experimento teve de ser realizada de madrugada, quando as ruas estavam vazias, de modo a evitar até mesmo as vibrações mínimas do tráfego, capazes de causar qualquer perturbação.

Esse seria o único trabalho experimental original que Niels Bohr executou inteiramente só e traz todas as marcas de seu método preciso e sua brilhante análise – junto com uma quase miraculosa ausência de erro. O próprio Bohr reconheceu que era único. A tensão por trabalhar com material tão frágil como o vidro obviamente teve um preço, e ele passou a utilizar sempre colaboradores fisicamente competentes em seus experimentos.

Ser obrigado a ouvir, sem permissão para responder, há muito é reconhecido como estimulante do pensamento radical. O silêncio forçado de Bohr nas discussões filosóficas após o jantar na casa do pai não seria exceção. Ele começou a pensar por si mesmo. E, ao contrário das discussões eruditas que tolerava em silêncio, seu pensamento filosófico mostrou-se extraordinariamente original desde o início. Na verdade, chega a antecipar alguns aspectos do pensamento de Wittgenstein. Bohr se via perplexo ao constatar que uma palavra pode ser usada para descrever um estado de consciência (por exemplo, embriaguez) e ao mesmo tempo o comportamento externo que acompanha esse estado interior. Verificou que quando uma palavra se referia a atividades mentais, era essencialmente ambígua. (Nesse ponto, pela primeira vez, o conceito de ambiguidade apareceu no pensamento de Bohr: reveladoramente, ele é ao mesmo tempo profundo e

insolúvel.) Na tentativa de resolver essa ambiguidade, Bohr traçou uma analogia com a matemática. Ele comparou essas palavras ambíguas (como embriaguez, raiva, alegria etc.) a funções de valores múltiplos. Colocando de modo simples, essas funções podem ter valores diferentes no mesmo ponto – mas essa ambiguidade pode ser superada especificando-se a que “plano” o valor se refere. Imaginemos um conjunto tridimensional de eixos:



Caso o ponto de interseção possa ter três valores diferentes, podemos superar essa dificuldade atribuindo cada valor a um eixo diferente: a, b ou c. Bohr sugeriu que esse método podia ser usado também no problema filosófico das palavras ambíguas. Quando uma palavra apresentava significados conflitantes, era possível resolver a questão indicando a que “eixo de objetividade” ela se referia. Por exemplo, “embriaguez” podia se referir a confusão mental ou falta de coordenação física – duas coisas isoladas. Mediante a especificação do “eixo de objetividade” a que a palavra se

referia (ou seja, nesse caso, “subjetivo” ou “objetivo”), podíamos eliminar essa ambiguidade.

Infelizmente, a história está povoada de grandes talentos científicos (e filosóficos) que tentam em vão reduzir a linguagem a uma estrutura lógica precisa. Mas, como sabemos todos por experiência própria, a conversação raramente é um procedimento lógico. (Leibniz, grande filósofo-cientista alemão do século XVII, desenhou um esquema que reduzia todos os argumentos morais à matemática: no final da discussão os pontos eram somados e o vencedor era o que tivesse a pontuação mais alta. Se a vida fosse tão simples quanto os gênios gostariam...) A sugestão de Bohr era ao mesmo tempo engenhosa e maldita. Ele se viu obrigado a aceitar que tais ambiguidades são inerentes à linguagem. Começava a entender como interpretações conflitantes podem existir simultaneamente. (Essa noção estranhamente antecipa a teoria quântica, como se pode ver reportando-se à definição simplificada em *itálico* na página 8.)

Essas incursões na filosofia são geralmente desastrosas para os cientistas. A filosofia diz respeito a como as coisas são, a ciência se aplica a como as coisas funcionam. Em outras palavras, a ciência ignora a filosofia e apenas lhe dá continuidade. Mas há ocasiões em que mesmo a ciência tem de colocar um ponto final em suas ações e se perguntar o que afinal está fazendo. A virada do século XX foi uma dessas raras ocasiões. Outra, anterior a essa, se deu durante o século XVII, quando Galileu sugeriu que a ciência tinha de se conformar à realidade, e não apenas às ideias. Chegou-se à verdade por meio da experimentação, não apenas pensando nela. Esse método culminaria nas grandes descobertas científicas do século XIX. Com a chegada do século XX, porém, de algum modo ele parecia não ser suficiente; as inadequações estavam sendo expostas nesse enfoque empírico. A mais óbvia delas ocorreu em 1905, quando Einstein formulou sua Teoria Especial da Relatividade. Ao contrário da antiga

visão de ciência, a relatividade *tinha* sido descoberta apenas pelo pensamento. (Einstein usava a matemática, não a experimentação.)

Havia algo absolutamente novo no ar. A ciência começava a se questionar e a seus métodos. O que era? O que fazia? O interesse de Bohr pela filosofia repetia-se em muitos líderes da ciência da época. (Einstein leu Hume, filósofo escocês do século XVIII que questionou as noções de causa e efeito; outros estudaram Kant, filósofo alemão do século XIX cuja epistemologia buscava explicar a natureza do espaço e do tempo.) A ciência estava sendo testada pela filosofia – e o que emergia iria propiciar os fundamentos da mais formidável de todas as eras científicas: o século XX.

O espetáculo da ciência voltando-se para si mesma era extremamente instigante. Tudo estava ao alcance de todos. O cientista-filósofo vienense Ernst Mach (que deu nome à velocidade supersônica) chegou a questionar a existência do átomo. Quase meio século antes, o russo Mendeleiev revolucionara a ciência com sua Tabela Periódica de elementos atômicos – mas seria tudo isso baseado em uma hipótese falsa? O que era exatamente um átomo? Quem de fato o vira alguma vez? Segundo Mach, o átomo não era mais que um conceito ultrapassado, algum resquício do pensamento não científico precedente. A ciência se impregnara de uma ideia abstrata sem sentido, que ninguém jamais observara de fato. Nada mais era sagrado: mesmo as noções mais fundamentais podiam ser questionadas.

E era isso o que Bohr faria em seguida. Em 1909, ele iniciou sua tese de doutorado, que se tornou um trabalho puramente teórico sem qualquer contribuição experimental do autor, e que chegou a uma conclusão aterradoradora. (Bohr, evidentemente, decidiu que o trabalho experimental aterrador estaria melhor em mãos mais habilidosas.) O título da tese era “Um estudo da teoria dos elétrons dos metais” (*Studier over metallernes elektrontheori*). Bohr rejeitou a posição radical de Mach. Não apenas o átomo existia, mas estávamos finalmente começando a entender um pouco do assunto. Nos últimos anos do século XIX, a maioria dos cientistas (mas

não Mach!) considerava o átomo a forma fundamental da matéria. De fato, o termo tem sua origem no vocábulo grego *atomos*, que significa “indivisível”. Em 1897 o físico britânico J.J. Thomson descobriu o elétron – a primeira partícula subatômica conhecida. O elétron tinha uma carga elétrica negativa. Tudo indicava que o átomo tinha uma estrutura interna. Thomson sugeriu que o átomo era como um bolo esférico, de carga elétrica positiva, coberto com elétrons parecidos com passas em quantidade suficiente para neutralizar essa carga.

Esse quadro foi de certo modo alterado quando chegou o momento de explicar fenômenos como o magnetismo nos metais. De acordo com a teoria dos elétrons dos metais, um metal podia ser descrito como um gás de elétrons no meio de uma treliça de íons de carga positiva.

Nessa fase inicial, quando ninguém sabia exatamente o que estava dizendo, descrevia-se um íon, no estilo circular de Alice no País das Maravilhas, como “um átomo que perdeu seus elétrons”. A teoria experimental se erguia sobre a teoria experimental, e Mach insistia num ponto: qual era a base de toda essa teoria, quando até então ninguém jamais vira um átomo?

Ignorando essas críticas, Bohr continuava a teorizar em direção ao desconhecido. Em sua tese, ele argumentava, em análise precisa e esmerada, que o magnetismo revelava inadequações à teoria dos elétrons dos metais. A resposta óbvia era questionar a teoria dos elétrons – mas Bohr tomou uma direção totalmente diversa. Aqui, pela primeira vez, vislumbramos a extraordinária originalidade e ousadia de seu pensamento. Ele sustentava que a teoria dos elétrons dos metais dava conta brilhantemente de quase todas as qualidades dos metais – o único problema era que começara a deixar de ser confiável ao tentar dar conta das *quantidades* envolvidas no comportamento metálico. Por exemplo, quando alguns metais eram colocados num campo elétrico, a força de seu magnetismo (que dependia dos elétrons) não se conformava às leis da física clássica. O que

significava isso, afinal? Bohr formulou uma conjectura espantosa. Tudo indicava que no nível subatômico as velhas hipóteses da física clássica simplesmente não funcionavam. A fim de descrever o que acontecia dentro do átomo, parecia ser necessário um tipo inteiramente novo de física.

Mas isso era impossível. Era como se Bohr estivesse sugerindo que no nível subatômico as quedas d'água corriam para cima e que fadas existiam. Era de fato um mundo de Alice no País das Maravilhas, onde $2 + 2$ não necessariamente somavam 4. O próprio Bohr não tinha certeza do que isso queria dizer.

Ele decidiu então partir em busca da fonte. Após terminar sua tese em 1911, viajou para Cambridge para estudar com J.J. Thomson. Se havia alguém que conhecesse o comportamento dos elétrons, esse alguém seria com certeza seu descobridor. Em Cambridge, porém, Bohr deparou-se com uma muralha, o que era em parte obra sua – mas não inteiramente. Thomson simplesmente não estava interessado nesse dinamarquês arrogante e cheio de entusiasmo, que nem sequer conseguia expressar-se adequadamente em inglês, muito menos suas complicadas teorias. Bohr não colaborava muito com seu uso precário da terminologia. Por exemplo, quando falava de eletricidade, referia-se a “carregamento” quando na realidade queria dizer “carga”. (Bohr era fluente em dinamarquês e alemão; afora isso, sempre fora um linguista, embora mais entusiasta do que competente. Na velhice, insistia em cumprimentar o embaixador francês com um cordial *Aujourd'hui!*) A parte ruim da experiência de Bohr em Cambridge aconteceu durante uma discussão informal com Thomson e seus colegas. Ao se esforçar ao máximo para explicar uma questão que dizia respeito à teoria dos elétrons dos metais, Thomson o interrompeu, classificando suas ideias como lixo – prosseguindo em seguida para dizer exatamente a mesma coisa com palavras diferentes. As coisas não melhoraram quando Bohr insistiu que alguns dos cálculos do grande homem a respeito dos elétrons continham falhas. “Todos perderam a confiança em mim”,

escreveu para casa, aflito. Apesar de tudo, tinha a obstinação dos gênios. Parecia definitivamente haver outra forma de física, que contradizia as leis da física. Ele não tinha ideia em que direção caminhavam suas ideias ilógicas, mas estava determinado a persistir nelas.

Bohr entendeu que tinha de aprender inglês adequadamente e, com a perseverança característica, sentou-se com as obras de Charles Dickens e um enorme Engelsk-Dansk Ordbog. Procurando cada palavra que não conhecia, começou a desbravar descrições de comportamentos ainda mais estranhos que os dos elétrons – as excentricidades da Inglaterra vitoriana descritas em *As aventuras de Pickwick*, *Oliver Twist* e *Martin Chuzzlewit*.

Iniciou-se então um período de bonança para Bohr. Em outubro de 1911, compareceu ao jantar anual de Cavendish, realizado em homenagem ao extravagante físico inglês do século XVIII que primeiro calculou o peso de nosso planeta (importante e eclético trabalho que estabeleceu o valor de G, a constante gravitacional). Ernest Rutherford, cujo trabalho sobre radioatividade já havia levado a especulações revolucionárias sobre a natureza dos átomos e sua estrutura, fez uso da palavra durante o jantar. Bohr ficou encantado com aquele rude neozelandês de meia-idade, que um de seus colegas descreveu como “mistura charmosa de menino, homem e gênio”. (Talvez não tenha sido um acaso a morte prematura do pai de Bohr alguns meses antes.) Rutherford também ficou impressionado com Bohr. Gostava de homens empreendedores e ficou surpreso ao saber que Bohr era jogador de futebol de nível profissional. (Ao típico estilo neozelandês, Rutherford tinha sido um vigoroso jogador de *rugby* de sua faculdade em Cambridge.) O mais importante foi que Rutherford entendeu o que Bohr tinha a dizer – apesar de seu inglês, que continuava hesitante e tortuoso quando expressava ideias científicas complexas, além do alcance de Pickwick. (“Engelsklisch”, conforme dizia um amigo.) Na opinião de Rutherford, “esse jovem dinamarquês é o rapaz mais inteligente que já conheci”. Um imenso elogio, em se tratando do maior físico da época – o

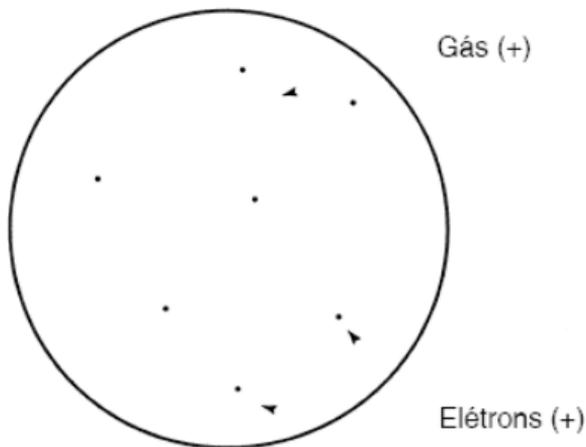
valor de Bohr começava finalmente a ser reconhecido. Rutherford convidou-o para fazer parte de sua equipe de pesquisadores na Universidade de Manchester. Bohr aceitou com entusiasmo e escreveu para casa: “Terei excelentes condições em Manchester.”

Embora tivessem estabelecido de imediato um vínculo, Bohr e Rutherford eram de fato o oposto um do outro. Rutherford era o físico prático supremo e, apesar de seus métodos rudes, era capaz de elaborar experimentos de extrema sutileza. Exigia provas evidentes e desprezava os teóricos arrogantes que não admitiam sujar as mãos nos equipamentos de laboratório. Bohr, por sua vez, fora criado mais na tradição francesa e na alemã. Preferia submeter hipóteses a análises lógicas rígidas a fim de descobrir suas implicações, nunca temendo formular teoria sobre teoria. Nesse ponto, a razão do continente europeu prevaleceu sobre o empirismo inglês na abordagem de Bohr. E, dessa vez, Rutherford não pareceu se importar. “Bohr é diferente. Ele é jogador de futebol”, disse aos colegas.

As pesquisas de Rutherford em radioatividade o haviam levado a algumas conclusões bizarras. Ele descobrira que os átomos eram capazes de se desintegrar: átomos de um elemento podiam se separar para se transformar em átomos de um elemento completamente diferente. Essas conclusões provocavam risos dissimulados por parte dos físicos clássicos da velha escola, sob a alegação de que não passavam de uma regressão à alquimia medieval, com sua crença em que os metais básicos podiam ser transformados em ouro.

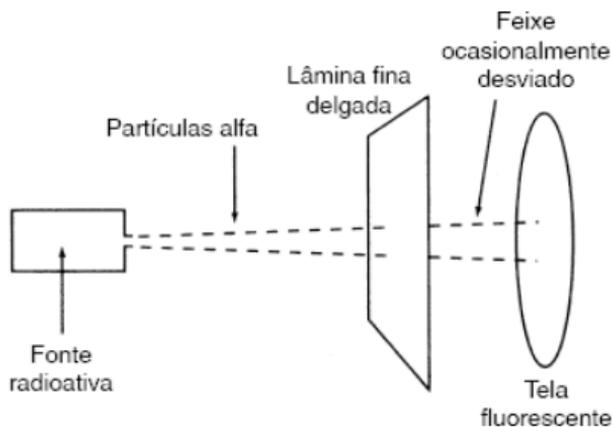
Rutherford decidiu pesquisar a estrutura interna do átomo e projetou uma série de experimentos com seu assistente alemão Hans Geiger (inventor do contador Geiger, usado para medir níveis de radioatividade). Rutherford basicamente concordava com a definição de estrutura atômica de Thomson: um bolo uniformemente positivo e esférico coberto de passas negativas de elétrons. Mas seu trabalho experimental sobre o

decaimento radioativo dos átomos o havia levado a visualizar o bolo positivo mais como uma esfera de gás positiva, crivado de minúsculos elétrons.



Modelo inicial de estrutura atômica de Rutherford

Rutherford compreendeu que a única maneira de pesquisar algo tão minúsculo como um átomo era bombardeando-o com alguma coisa ainda menor, ou seja, uma partícula subatômica. Felizmente, ele sabia que, ao se desintegrarem em átomos menores, os átomos radioativos emitiam um jato de partículas subatômicas. Ele escolheu utilizar um tipo dessas partículas, chamadas alfa, muito maiores que os elétrons e com carga positiva.



Rutherford montou um experimento no qual um feixe de partículas alfa de uma fonte radioativa era lançado sobre uma fina lâmina de ouro. Quando as partículas alfa passavam através da lâmina de ouro, colidiam com uma tela fluorescente, produzindo pequenos clarões.

Rutherford não se surpreendeu quando a maioria das partículas alfa passou diretamente através da fina lâmina de ouro, já que sua hipótese era de que os átomos eram em sua maior parte gás. Algumas partículas alfa eram desviadas, o que obviamente se devia ao fato de que batiam em algum dos pequenos elétrons na esfera atômica de gás. Os elétrons eram tão pequenos que só desviavam as grandes e rápidas partículas alfa em mais ou menos 1° . Mas, à medida que os experimentos continuaram, ficou surpreso ao descobrir que algumas das partículas alfa estavam sendo desviadas em aproximadamente 10° . No entanto, como isso podia acontecer – se as partículas alfa que bombardeavam eram comparativamente enormes, deslocando-se em alta velocidade, e os elétrons eram tão pequenos?

Dias mais tarde deu-se um incidente ainda mais extraordinário. Descobriu-se que uma quantidade pequena das partículas alfa na realidade

ricocheteava ao colidir com a lâmina de ouro. “Foi realmente o fato mais incrível que me aconteceu na vida”, comentou Rutherford. “Foi quase tão incrível como se disparasse um projétil de 40 centímetros contra um pedaço de papel e ele voltasse e me atingisse.”

Afinal, o que estava acontecendo? O que poderia deter, e fazer ricochetear, uma partícula subatômica de tamanho *momentum*? Não demorou muito para que um cérebro como o de Rutherford chegasse a uma conclusão. O átomo obviamente consistia em um centro mínimo, mas extremamente concentrado, que possuía uma carga positiva, que resistiria ao *momentum* da partícula alfa positiva e também a repeliria (como duas extremidades positivas de ímãs colocadas juntas). Rutherford agora era capaz de sugerir um modelo do átomo. Segundo o esquema por ele traçado, o átomo era quase inteiramente vazio. Consistia, no centro, em um núcleo minúsculo, porém extremamente denso, que ocupava um bilionésimo de seu espaço. (Imagine uma ervilha numa catedral.) Esse núcleo positivo era rodeado de vários elétrons negativos, que giravam ao seu redor em órbitas fixas, atraídos por ele.

O átomo nuclear nascia (e a ele se seguiriam a física nuclear e a era nuclear). Tratava-se de uma das ideias mais agradáveis do ponto de vista estético jamais concebidas na ciência. Era como se a menor unidade do mundo funcionasse da mesma forma que o sistema solar. Os mundos micro e macro refletiam um ao outro!

A concepção de Rutherford era inspirada. Tinha apenas uma desvantagem – não funcionava. Segundo as leis da física clássica, os elétrons em órbita irradiariam toda a sua energia em um milésimo de segundo e colapsariam no interior do núcleo. Da mesma forma, o que impedia as partículas positivas que constituíam o núcleo de se repelirem (uma vez mais, como ímãs)? Um núcleo central formado de partículas positivas simplesmente se desintegraria. Essas perguntas eram irrespondíveis. A estrutura atômica de Rutherford era instável.

Mas Bohr pensava de forma diferente. Sem jamais se deixar perturbar pelas leis da ciência, passou a buscar uma solução que apoiasse a estrutura atômica “impossível” de Rutherford. Bohr estava convencido de que a imagem do átomo como um sistema solar era boa demais para não ser verdadeira. Explicava boa parte do que antes fora inexplicável – e ele foi um dos primeiros a ver isso.

Cada um dos elementos da Tabela Periódica tinha um número atômico, que indicava sua posição na tabela e, dessa forma, suas propriedades. Esse número (intimamente relacionado a seu peso) obviamente refletia o número de unidades positivas de carga elétrica no núcleo. Em geral, estas seriam iguais ao número de elétrons negativos na órbita do núcleo. As propriedades físicas e químicas de qualquer átomo eram claramente dependentes das órbitas desses elétrons. A facilidade com que ele podia se apropriar de elétrons ou se desprender deles dependia da posição da órbita. Tipos diferentes de órbita podiam explicar até mesmo como havia classes diferentes de elementos e como suas propriedades se repetiam tal qual ocorria na Tabela Periódica. Razão pela qual o modelo de Rutherford podia explicar *tudo*. Ele *tinha* de estar certo – ainda que isso significasse negar as leis da física! (Afinal, Bohr já se vira questionando isso antes, em sua tese sobre a teoria dos elétrons dos metais.)

Para explicar como Bohr conseguiu resolver esse problema aparentemente insolúvel, é preciso primeiro entender com clareza o que eram as leis da física. Nessa época (em torno da virada do século XX), as leis da física se baseavam nas hipóteses fundamentais da física clássica. Essa era a visão científica do mundo desenvolvida basicamente por Galileu, Newton e, mais tarde, Maxwell. Ela concebia o Universo como uma máquina vasta e complexa, operando em bases estritamente mecânicas. Todo movimento dentro desse Universo tinha uma causa. A sequência causa e efeito era rígida e imutável. Tudo era determinado (e portanto fácil de ser explicado). Havia duas formas de energia – a inerente às partículas em

movimento e a que se propagava em ondas (como a luz, as ondas de rádio etc.). A primeira se comportava como bolas de bilhar em colisão, a última como ondas se movendo sobre a superfície do mar. Essas duas formas de energia se excluíam mutuamente. Conforme explica a teoria da gravitação de Newton, os corpos se atraíam de acordo com a massa e a distância guardada entre eles. E, de acordo com a teoria da onda eletromagnética de Maxwell, a luz viajava em ondas, com diferentes frequências produzindo diferentes tipos de radiação (exemplo: cores diferentes). Essas leis e hipóteses básicas da física clássica eram absolutamente corretas e inquestionáveis. Era simplesmente assim que o mundo funcionava.

E quem podia negar? Desde que os fundamentos da física clássica tinham sido estabelecidos por Galileu no século XVII, haviam instigado uma era de progresso científico sem paralelo na história. De um mundo onde feiticeiras eram queimadas na fogueira, e a Terra era o centro do Universo, aos primeiros arranha-céus de Chicago, ao primeiro voo de Santos Dumont, à gravidade, à eletricidade, ao motor de combustão, à velocidade da luz – a física clássica explicava tudo.

Ou assim parecia. Entretanto, no final do século XIX, algumas fissuras começaram a aparecer nesse edifício de certeza. Em geral pensava-se tratar de anomalias – provocadas pelo progresso do conhecimento científico, incessante e veloz, porém acidentado. Essas pequenas dificuldades seriam logo resolvidas pelas descobertas futuras.

Em 1900, o alemão Max Planck, professor de física da Universidade de Berlim, fez uma descoberta extraordinária. Conforme explicou a seu filho, numa fria manhã de dezembro, enquanto caminhavam no bosque perto de Berlim: “Hoje fiz uma descoberta tão importante quanto a de Newton ... Dei o primeiro passo além da física clássica.” Mas o que exatamente ele tinha descoberto?

Uma das anomalias que haviam confundido os físicos clássicos fora a chamada “catástrofe ultravioleta”. A coisa se passou da seguinte maneira:

um corpo negro absorve todas as frequências de luz, de modo que, quando aquecido, deveria irradiar todas as frequências de luz. Mas não o faz: ele emite frequências de menor alcance, que apenas aumentam gradualmente com a intensidade do calor. Como sabemos, um corpo aquecido emite luz vermelha de baixa frequência. Em seguida, à medida que sua temperatura sobe, emite luz laranja de frequência mais alta. E depois amarela. Segundo as leis da física clássica, deveria emitir quantidade igual de *todas* as frequências de luz. No entanto, se isso *de fato* acontecesse, todos sofreríamos queimaduras graves de ultravioleta todas as vezes que nos sentássemos diante de uma fogueira. A “catástrofe ultravioleta” simplesmente não acontecia!

Planck conseguiu descobrir o que *de fato* ocorria. Mas, para isso, fora forçado a contradizer as leis da física clássica. Observou que a radiação eletromagnética (luz) se comportava como ondas *e* como partículas, chamando essas ondas-partículas de *quanta* (que em latim significa “quanto”).

Radiação de baixa frequência



Radiação de alta frequência



Segundo Planck, a radiação eletromagnética de baixa frequência (luz) consistia em pequenos *quanta* e a radiação de frequência mais alta consistia em *quanta* maiores. Quando um corpo era aquecido, consumia comparativamente pouca energia (calor) para formar os *quanta* menores, que eram a base da luz vermelha de baixa frequência. Os *quanta* maiores necessitavam uma quantidade maior de energia para se formar e, assim, só

eram irradiados quando o calor aumentava. E, mesmo assim, apenas alguns para começar.

Resumindo: por que os *quanta* devem ser ondas e partículas? A luz tem uma frequência, por isso deve se propagar em ondas. No entanto, como explicar a ausência da “catástrofe ultravioleta”? Planck sugeriu que as ondas não eram contínuas (como deveriam ser, segundo a física clássica). Em lugar disso, eram *quanta*, ou seja, um conjunto de ondas ou objetos, emitidos como partículas discretas. E os *quanta*, para diferentes frequências de luz, tinham, cada um, um tamanho físico diferente (qualidade da matéria), que explicava por que o ultravioleta não era inicialmente emitido de forma tão intensa. Os *quanta* eram, assim, ondas que se moviam sob a forma de partículas e partículas que consistiam em ondas. Impossível, segundo a física clássica, para a qual as ondas são contínuas e as partículas consistem em matéria, não em ondas. (Uma vez que as ondas são meramente oscilações a uma determinada frequência que passam *através* de um meio ou substância – como ondas passando *através* da água.)

Planck deduziu que o tamanho dos *quanta* variava em proporção à frequência da radiação e expressou sua descoberta em sua famosa fórmula:

$$E=hf$$

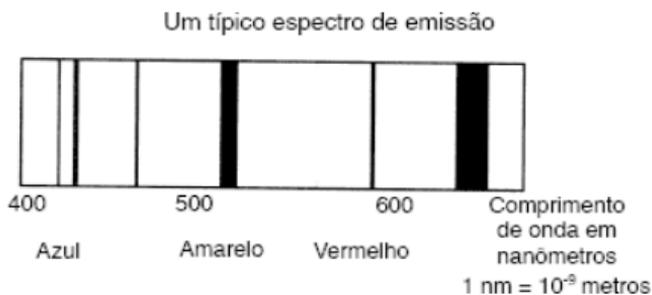
onde E é o valor da energia do *quantum* e f a frequência da radiação. O h é uma constante fundamental, hoje conhecida como a constante de Planck. (Uma constante fundamental é uma quantidade física que pode ser expressa como um número e é sempre a mesma, independentemente das circunstâncias, em qualquer lugar do Universo. Outro exemplo de uma constante fundamental é a velocidade da luz. Calculou-se que a constante de Planck tinha o valor de $6,626176 \times 10^{-34}$ joules x seg. Uma soma minúscula, quase zero na realidade. Mas o simples fato de ser *mais de zero* significa que os *quanta* de alta frequência exigem mais energia, o que então nos resgata da “catástrofe ultravioleta”.)

A ideia de Planck era tão revolucionária que de início foi impossível aceitá-la. Ele mesmo achou difícil acreditar. Cinco anos mais tarde, porém, Einstein confirmou a “teoria quântica” de Planck, como ela se tornou conhecida, ao usá-la para explicar o efeito fotoelétrico, outra anomalia na física clássica. Esse efeito acontecia quando a luz ultravioleta atingia certos metais, provocando uma emissão de elétrons. Esses elétrons não se comportavam segundo as leis da física clássica. Seu coeficiente de emissão dependia da frequência da luz que bombardeava, em vez de depender de sua intensidade. Quanto mais alta a frequência, maior a energia disponibilizada, e assim mais elétrons eram desalojados. Isso podia ser explicado se a luz fosse considerada *quanta* (com a luz de frequência mais alta consistindo em *quanta* maiores). De novo tudo indicava que a luz se propagava como onda e como partícula.

No entanto, a maior parte do mundo científico se recusava a aceitar tamanho disparate. Essa teoria quântica era apenas uma engenhosa “invenção alemã”, que preenchia uma lacuna onde nosso conhecimento temporariamente excedia qualquer teoria ampla capaz de explicá-lo. A teoria quântica era simplesmente ilógica – não duraria. Dentro de poucos anos uma teoria mais abrangente daria conta adequadamente das anomalias explicadas de forma tão complexa pela teoria quântica. E, sem dúvida, essa teoria estaria de acordo com a física clássica. Mesmo Planck e Einstein estavam convencidos de que era isso que aconteceria.

A explicação de Einstein para a luz ultravioleta colidir com certos metais situava-se em grande parte no mesmo território científico que a tese de Bohr sobre a teoria dos elétrons dos metais. Bohr também concluíra que as partículas subatômicas não obedeciam às leis da física clássica. Mas nem ele, nem ninguém mais, percebia como tudo isso se ligava ao problema da estrutura atômica. E era esse o problema que Bohr enfrentava agora ao defender o modelo de “sistema solar” de Rutherford.

Uma chave para a estrutura de diferentes elementos foi descoberta como resultado de um novo tipo de espectroscópio inventado em 1814, obra do óptico bávaro Joseph von Fraunhofer, que escapara de ser soterrado quando o edifício em que trabalhava se incendiou e ruiu sobre ele. Todos os demais morreram e o príncipe Maximilian Joseph marcou sua milagrosa sobrevivência outorgando-lhe a principesca soma de 18 ducados, que afinal permitiu-lhe desenvolver a pesquisa independente que o levou à invenção do espectroscópio. Ao ser aquecido intensamente, qualquer elemento em estado gasoso brilha, e, quando essa luz emitida é examinada com um espectroscópio, é decomposta nas cores que a compõem. Estas se mostram como faixas de linhas coloridas no espectro global das cores, e descobriu-se que cada elemento tinha seu “espectro de emissão” característico.



A cada linha no espectro de emissão podia ser atribuído um valor numérico preciso, de acordo com seu comprimento de onda. Essas pareciam se repetir, em processo muito semelhante ao de uma sequência harmônica.

Todavia uma fórmula para essa sequência continuou a frustrar todos os interessados até 1885, quando o suíço Johann Balmer, professor de uma escola secundária feminina na Basileia, a descobriu. Balmer criou a seguinte fórmula: “Eleve 3 ao quadrado. Divida 1 pelo resultado e subtraia

essa fração de $\frac{1}{4}$. Multiplique a resposta pelo número 32.903.640.000.000.000.” Isso dava a frequência (e consequentemente o comprimento de onda) da linha vermelha no espectro do hidrogênio.

Exatamente o que se esperaria de um professor de província (e talvez a razão pela qual iludira cérebros mais brilhantes). Mas essa fórmula não era tão grosseira quanto parecia. Caso, em lugar do 3 de abertura, começássemos pelo número 4, seria possível obter a linha verde do espectro, e com o 5, o espectro da linha violeta. E quando outras linhas do espectro de emissão do hidrogênio foram descobertas mais tarde, verificou-se que os números seguintes (ou seja, 6, 7, 8 etc.) produziam Algarismos que também misteriosamente correspondiam a sua frequência. A fórmula de Balmer funcionava, mas ninguém sabia por quê. E o mais intrigante era que ninguém fazia a menor ideia do significado desses espectros de linha. Aceitava-se simplesmente que cada elemento tinha sua própria “assinatura”.

Surpreendentemente, Niels Bohr desconhecia quase por completo a espectroscopia quando começou a se dedicar ao modelo de sistema solar do átomo de Rutherford. Segundo a lenda, um dia Bohr estava folheando um livro de física de um estudante e, por acaso, deu com a fórmula de Balmer. Perplexo diante de sua inusitada singularidade, começou a brincar com os números na cabeça. Aconteceu então o momento de “Heureka!”. Ele percebeu que a fórmula de Balmer podia ser escrita de outra maneira, usando a constante h que Planck aplicara em sua fórmula para estabelecer o tamanho dos *quanta* em sua teoria da luz. *Isso queria dizer que o espectro de um elemento estava ligado à teoria quântica!*

Mas como, precisamente? Bohr se concentrou no mais simples de todos os elementos – o hidrogênio. De acordo com a descrição do átomo de Rutherford, o hidrogênio tinha apenas um elétron girando em torno de seu núcleo central. Pelas leis da física clássica, este deveria ter irradiado apenas uma banda de cor. E no entanto ele irradiou várias em separado,

conectadas num padrão fixo regular (de acordo com o 3, 4, 5 etc., na fórmula de Balmer).

O elétron único do átomo de hidrogênio teoricamente podia circular o núcleo formando várias órbitas diferentes. Quanto maior o raio, maior a velocidade do elétron em órbita e, portanto, maior sua energia. Órbitas menores teriam menos energia. Assim, se o elétron se deslocasse para uma órbita menor, teria de emitir energia. Essa energia era emitida sob a forma de luz. A energia emitida por um átomo formava seu espectro. Bohr viu de imediato o que isso significava. As precisas bandas de energia que constituíam o espectro estavam de algum modo ligadas às diferentes órbitas do elétron. Bohr compreendeu que para emitir a energia fixa necessária, o elétron teria de se mover entre certas órbitas fixas. Quando o elétron tinha uma órbita fixa, o átomo se encontraria no que Bohr chamava seu “estado estacionário”. Somente quando ele se movia entre essas órbitas fixas emitia a energia exata necessária para produzir uma banda específica no espectro. Graças a isso, compreendeu que as órbitas fixas desses estados estacionários teriam de estar ligadas à fórmula de Balmer (porque esta fornecia os dados para as bandas no espectro de emissão).

Conforme vimos, num momento inspirado Bohr compreendera que a fórmula de Balmer podia ser reescrita com a constante de Planck, que dizia respeito ao comportamento dos *quanta*. *Isso significava que as diferentes órbitas do elétron no átomo de hidrogênio eram fixadas segundo a teoria quântica!* A estrutura do átomo era determinada pela teoria quântica.

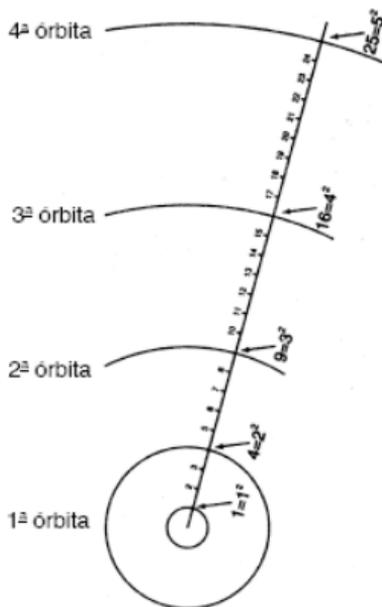
Resumindo: em cada estado estacionário o elétron tinha um raio fixo diferente. Bohr já entendera que esses estados deviam estar relacionados à fórmula de Balmer relativa às bandas espectrais. Desse modo, cada raio fixo do elétron estava relacionado às diferentes aplicações da fórmula de Balmer!

Em outras palavras, Bohr compreendera que a fórmula de Balmer para as bandas espectrais e a teoria quântica estavam ligadas à estrutura do átomo.

A fórmula de Balmer para a posição das bandas começa: “Eleve o número 3 ao quadrado...” (ou 4 para verde, 5 para violeta, ou mesmo 1 ou 2 etc.). Isso significava que os raios fixos do elétron se relacionavam exatamente da mesma forma. Assim, era relativamente fácil para Bohr calcular os raios dessas órbitas.

O diagrama abaixo mostra o modelo de Bohr para as primeiras quatro órbitas do elétron nos estados estacionários do átomo de hidrogênio.

O raio de cada órbita se relacionava com o número exigido pela fórmula de Balmer. A diferença entre os raios determinava a diferença entre os estados de energia, os quais, por sua vez, se igualavam às bandas de energia do espectro.



A diferença entre essas órbitas pode ter produzido as cifras corretas para o espectro de hidrogênio, mas como a energia era de fato liberada? Fácil, segundo Bohr. O elétron simplesmente “saltava” de uma órbita para outra.

Imagine um trem viajando em trilhos fixos (o elétron em sua órbita fixa). Contrariamente a todas as leis da física, o trem de repente salta de um trilho para o trilho paralelo mais interno. Ao fazê-lo, emite um feixe de luz (uma banda de cor é liberada para o espectro de hidrogênio).

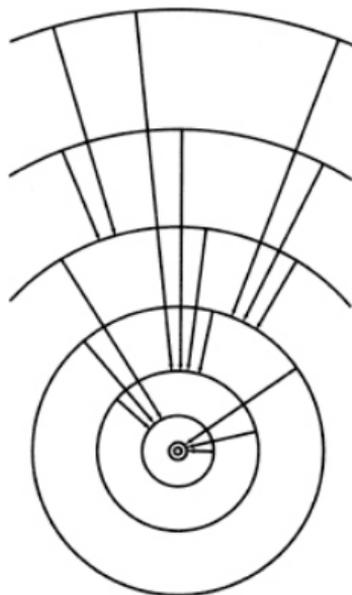
Segundo as leis da física clássica, isso era totalmente impossível. Como dissemos, o elétron deveria ter irradiado energia continuamente à medida que executava sua órbita, e essa energia estaria apenas em uma banda do espectro. Da mesma forma, com o elétron irradiando energia desse modo,

ele teria simplesmente colapsado no interior do núcleo em menos de um bilionésimo de segundo (10^{-9} s). Estava óbvio que a física clássica não era capaz de explicar o que estava acontecendo; em contrapartida, o modelo de Bohr era – ainda que contrariando todas as regras. Segundo esse modelo, no estado estacionário o elétron *não* emitia energia. A energia só era emitida quando o elétron saltava de uma órbita mais alta para outra mais baixa. (E a energia seria *absorvida* quando saltasse de uma órbita mais baixa para outra mais alta.) Assim, não apenas a estrutura do átomo, mas também o comportamento de suas partículas subatômicas, parecia se conformar à teoria quântica.

O esquema de Bohr era uma mistura curiosa. Obedecia a muitas das leis da física clássica (por exemplo, certos elementos da dinâmica dos corpos em órbita), contradizendo outras ao mesmo tempo (como as leis da causalidade). Com um detalhe, porém, sensacional: *ela concordava exatamente com a teoria quântica original da luz de Planck*. A luz emitida por um elétron saltando de uma órbita para outra não seria contínua. Seria, em vez disso, emitida por pulsos, exatamente como os *quanta* de Planck.

O diagrama da página seguinte mostra a imagem do átomo de hidrogênio de Bohr com os diferentes raios do elétron. As setas indicam os vários saltos entre as órbitas, os quais produzem frequências diferentes no espectro de hidrogênio.

A teoria quântica era capaz de explicar como o espectro do átomo de hidrogênio era emitido. Assim, juntamente com a explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico, parecia confirmar a noção original de Planck da teoria quântica. Mas, mais que isso, ampliava consideravelmente a ideia de Planck. Bohr demonstrou como a teoria quântica era essencial ao entendimento dos fenômenos subatômicos. E, ao fazê-lo, trouxe à luz o primeiro e amplo esquema de uma estrutura subatômica estável. Era a nova física, que explicava o comportamento anômalo das partículas subatômicas.



Bohr iniciou seu trabalho sobre a estrutura atômica em 1912, após mudar-se de Cambridge para a Universidade de Manchester, a fim de trabalhar com Rutherford. (Por um capricho do destino, outro grande pensador do século XX tomava o trem na direção oposta. Em 1912, o filósofo Wittgenstein trocou a Universidade de Manchester por Cambridge.)

Rutherford logo estabeleceu uma relação estreita com seu jovem pesquisador, embora não tivesse grande entusiasmo pela linha de pesquisa por ele escolhida: a tentativa de formular algo sólido para apoiar seu (ou seja, de Rutherford) instável esquema do sistema solar do átomo. Rutherford considerava seu esquema “provisório”. Era por demais teórico e sem comprovação para que se confiasse nele; em sua opinião, não se podia construir sobre essa noção. Mas construir sobre teorias era a especialidade de Bohr – e ele parecia ter um faro infalível para as teorias duradouras. A

despeito das reservas de Rutherford, logo começou a encorajar Bohr com o mesmo entusiasmo rude (e questionamento agudamente perspicaz) a que submetia toda a sua equipe. Pelas manhãs Rutherford tinha o hábito de andar pelos laboratórios cantando *Avante, soldados cristãos*. Eram tempos estimulantes para a ciência – e os envolvidos sentiam-se numa cruzada. A defasagem entre o jovem novo mundo e o monólito de certezas reverenciadas pelo tempo se alargava por toda a cultura europeia. Era a época em que a Europa dominava o mundo, os últimos grandes dias do Império Austro-Húngaro – mas era também o tempo do cubismo, da relatividade e do cinema mudo.

No final do período de verão, Bohr deixou Manchester, indo para a Dinamarca. Dois anos antes seu querido irmão Harald partira para assumir um cargo na Universidade de Göttingen, cuja reputação na área de matemática não tinha rival. Foi durante esse período, de uma solidão com a qual não estava familiarizado, que Niels conheceu uma estudante de cabelos louros e macios chamada Margarethe Norlund. Niels e Margarethe se encantaram um pelo outro desde o início. Imediatamente ela começou a ajudar no preparo da cópia final de sua tese de doutorado e ficaram noivos antes que Niels partisse para a Inglaterra. Pareciam ter conseguido estabelecer uma relação totalmente banal, tão tediosa (para os estranhos) quanto profunda. O conceito de “verdadeiro amor” há muito se extinguiu nas sociedades progressistas – considerado nauseante por sua sentimentalidade adocicada, detonado pela psiquiatria, sabotado pelo divórcio. Mas nos primeiros anos do século XX o verdadeiro amor ainda se encontrava vivo e expressivo, e esperava-se que durasse a vida inteira.

Quando Niels retornou a Copenhague, no verão de 1912, casou-se com Margarethe. Nas fotos do casal, sua aparência é surpreendentemente jovem, seus pesados traços sensuais suavizados por um sorriso. A seu lado, a jovem esposa visivelmente feliz, o braço enlaçado

confortavelmente ao dele. Pareciam completamente à vontade um com o outro – uma relação que duraria cinquenta anos.

Depois do casamento, Bohr foi nomeado professor auxiliar da Universidade de Copenhague, mas manteve laços estreitos com Manchester. Escrevia regularmente para Rutherford e os colegas informando sobre seus progressos. Seu trabalho final sobre a estrutura atômica passou por várias revisões, algumas delas para verificação de questões técnicas levantadas por seus correspondentes de Manchester, mas muitas em decorrência de seu método de elaboração. Ele era um escritor exigente e lento, sempre à cata de um significado mais preciso. Gostava de mergulhar nas palavras, em vez de simplesmente usá-las. Era como se seu processo criativo acontecesse na linguagem, em lugar de utilizar a linguagem para se expressar. (Apesar do estruturalismo, existe uma diferença – como entre sintaxe e metáfora.) Tudo isso, no entanto, tornava a leitura difícil. E quando a técnica de Bohr foi estendida à sala de aula demonstrou ser um enorme problema – tanto para quem falava quanto para quem ouvia. Felizmente esse defeito era contrabalançado pelo entusiasmo evidente de Bohr e o total brilhantismo de suas ideias. Entender uma aula de Bohr transformou-se em façanha intelectual, um teste que desafiava ao máximo os atletas mentais. Somente os que possuíam a concentração do maratonista e a intensidade do *sprinter* conseguiam suportar o ritmo.

Em março de 1913, Rutherford recebeu a versão final do trabalho de Bohr. Depois de lê-lo, escreveu-lhe de volta: “Suponho que não fará objeção a que utilize meu juízo para cortar qualquer tópico que considere desnecessário em sua dissertação.” Bohr pegou o primeiro barco, atravessou o mar do Norte e entrou no escritório de Rutherford antes que ele pudesse terminar o primeiro verso de *Avante, soldados cristãos*. Durante todo o dia e noite adentro Bohr defendeu seu trabalho, linha a linha. Finalmente o experiente Rutherford deu o braço a torcer ante a insistência persistente do jovem e sério dinamarquês. O trabalho foi afinal publicado sem

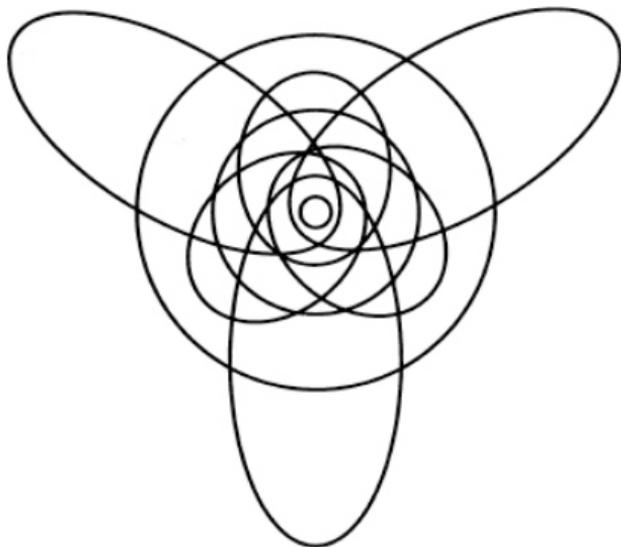
cortes no *Philosophical Magazine*, causando sensação. Da noite para o dia Bohr tornou-se o *enfant terrible* do átomo.

Bohr havia sugerido que a teoria quântica estudava a forma como os átomos se comportavam. Suas ideias eram descartadas como absurdas. Como era possível que a base fundamental da matéria repousasse em algo tão completamente instável? Para muitos, o *quantum* ainda era apenas aquela “invenção alemã” muito engenhosa, destinada a não durar. Surpreendentemente, a ideia chegou a ser ridicularizada em Göttingen. Harald Bohr apoiou o irmão com coragem: “Se Niels diz que algo é verdadeiro, deve ser verdadeiro.” Mas Max von Laue, o mais importante físico teórico alemão, ficou tão enfurecido com as ideias de Bohr que anunciou: “Se essa teoria estiver correta, abandonarei a física.” (Felizmente, foi dissuadido dessa atitude drástica e mais tarde chegou a se tornar amigo íntimo de Bohr.)

Esta e outras reações apopléticas semelhantes não eram tão somente resultado de obstinação ou preconceito. Muitos sentiam que a ciência não podia prosseguir desse modo sem se autodestruir. A explicação de Bohr era *não científica* demais. Ela não apenas desafiava as leis da física clássica, como também era ilógica. Descrever a estrutura do átomo com uma combinação da física clássica e da teoria quântica era absurdo. Os princípios da física clássica e os princípios da teoria quântica eram *contraditórios*.

Tudo piorou ainda mais para Bohr quando logo ficou claro que seu modelo do átomo de hidrogênio não era complexo o bastante para dar conta de alguns detalhes mais sutis no espectro de hidrogênio. Esse problema seria finalmente solucionado pelo professor de física de Munique Arnold Sommerfeld, o primeiro adepto importante da teoria quântica depois de Einstein. Sommerfeld aplicou a teoria da relatividade de Einstein aos movimentos dos elétrons em torno do núcleo central e compreendeu que essas órbitas deviam ser elípticas. (Na realidade, mais próximas do

verdadeiro sistema solar.) Isso afinal conduziu ao seguinte esquema do núcleo e das diferentes órbitas fixas do elétron.



O modelo de Sommerfeld dava conta de todas as linhas extraordinariamente delicadas do espectro de hidrogênio. Mas os problemas mais sérios permaneceram. A contradição fundamental entre a teoria quântica e a física clássica mostrava-se irreduzível. Do mesmo modo, o esquema de Bohr pode ter se adequado ao átomo de hidrogênio, que tinha apenas um elétron – mas logo surgiram dificuldades quando foi aplicado a estruturas atômicas mais complexas. Seria esse átomo quântico de hidrogênio apenas uma exceção extravagante? Bohr enfrentou o trabalho teórico terrivelmente complexo presente na tentativa de estender seu plano de uma estrutura atômica específica ao esquema geral de *todas* as estruturas atômicas.

Esse trabalho exigiu muito tempo e energia da parte de Bohr. Quando em 1914 Rutherford ofereceu-lhe um cargo em Manchester, que não

implicava aulas cansativas, Bohr prontamente aceitou. Porém, antes que pudesse assumir suas funções, eclodiu a Primeira Guerra Mundial. A Dinamarca permaneceu neutra, mas ocorriam escaramuças navais ao longo da costa dinamarquesa entre navios ingleses e alemães. Os ingleses logo assumiram o controle do mar do Norte e garantiram a segurança das embarcações neutras. Mesmo assim, o *ferry-boat* em que Bohr e sua mulher se encontravam rumo à Inglaterra foi forçado a um longo desvio, em meio a tempestades e nevoeiro, contornando a costa da Escócia.

Bohr sempre acreditara no internacionalismo da ciência: o conhecimento era para o bem da humanidade, não para nações isoladas. Seu ponto de vista era partilhado por vários cientistas da geração que surgia na Alemanha. A despeito das barreiras impostas pela guerra, Bohr começou a receber, em Manchester, notícias da Alemanha. Tomou conhecimento de que previsões teóricas feitas a partir de sua estrutura atômica do *quantum* já começavam a promover avanços extraordinários na nova ciência da física subatômica. Embora permanecessem sem resposta as questões relativas à estrutura de Bohr, começava a ficar claro que ela explicava muito para ser descartada. Bohr estava entusiasmado com os progressos. Tanto que tomou a iniciativa, pouco usual, de tentar confirmar uma das previsões alemãs por meio de um experimento prático.

O complexo aparato necessário a essa experiência exigia complicados equipamentos de vidro, e Rutherford tomou providências para que Bohr tivesse a colaboração do melhor auxiliar disponível, um alemão chamado Otto Baumbach. Somente o imenso prestígio de Rutherford era capaz de garantir a livre circulação de um inimigo estrangeiro em seu laboratório durante uma guerra. Infelizmente, Otto, o especialista em vidros, logo sentiu-se pouco à vontade trabalhando sozinho entre inimigos. Nos períodos de tensão, desenvolveu o hábito de vociferar diatribes de propaganda antibritânica, comunicando aos perplexos cientistas o que lhes aconteceria quando os alemães ganhassem a guerra e se apossassem do

laboratório. Ao contrário dos outros, Bohr mantinha-se despreocupado: “Todos os bons vidreiros são temperamentais”, observava. “Ele está apenas revelando seus sentimentos com esses disparates superpatrióticos.”

A situação acabou ficando insustentável para todos os envolvidos e, após uma série de incidentes explosivos, Otto foi afinal internado. Infelizmente, seguiu-se outro incidente, ainda mais explosivo, quando o aparato de Bohr pegou fogo, reduzindo os insubstituíveis utensílios de vidro de Otto a um monte de estilhaços. Uma vez mais, as incursões de Bohr em laboratório foram frustradas.

À medida que a imensa importância da obra de Bohr foi sendo reconhecida, as autoridades dinamarquesas começaram a entender o que haviam perdido. Em atitude sem precedentes, a Universidade de Copenhague ofereceu a Bohr, então com 30 anos, o cargo de professor. Havia também a promessa de que, caso ele retornasse, receberia recursos para a criação de um instituto especial onde poderia prosseguir com suas pesquisas.

Em 1916, quando as frotas inglesa e alemã se preparavam para o confronto ao longo do litoral da Jutlândia, os Bohr empreenderam a arriscada viagem de volta através do mar do Norte. Margarethe encontrava-se grávida e, alguns meses mais tarde, o primeiro filho do casal nascia em Copenhague. O ateu Bohr deu à criança o nome de Christian, em homenagem ao ateísmo do pai. “Esta será sempre uma lembrança de sua temporada em Manchester”, escreveu Rutherford ao receber a notícia. Mas a lembrança que Bohr tinha de Manchester seria na realidade mais profunda. Rutherford preencheria o vazio deixado na vida de Bohr pela morte do pai. O jovem Bohr, ao mesmo tempo ingênuo e sincero, passou a ver naquele grande homem, franco e bondoso, uma figura de pai e modelo a ser seguido. Bohr jamais esqueceria o laboratório de Rutherford em Manchester. Assim deveria ser feita a ciência: em atmosfera de camaradagem e discussão frutífera, com a participação de todos. Se o jovem Bohr falava, o grande Rutherford ouvia, e, quando conseguiu montar o seu

próprio instituto, Bohr não se esqueceu disso. E o efeito de tudo isso sobre a ciência seria incalculável. Não é exagero dizer que o estímulo de Bohr ao estabelecimento dessa atmosfera em seu próprio laboratório revolucionaria a ciência do século XX.

A informalidade de Bohr, porém, não era apreciada por todos que o conheciam. Ao tomar posse como professor de física da Universidade de Copenhague, esperava-se que se apresentasse em trajes formais, fraque e luvas brancas, para uma audiência com o rei. Bohr apareceu no dia marcado e foi cerimoniosamente apresentado ao rei Cristiano X, um militar algo ríspido e defensor radical da etiqueta da corte. O rei apertou-lhe cordialmente a mão, dizendo quanto se sentia satisfeito em conhecer o grande jogador de futebol. Bohr viu-se obrigado à ressalva de que não era *ele* o famoso Bohr jogador de futebol, e sim seu irmão. O rei ficou perplexo. Uma das principais regras de etiqueta da corte dispunha que *nunca* se podia contradizer o rei, independentemente do que este dissesse. Cristiano X decidiu relevar essa grave quebra de decoro e dar outra chance a Bohr. Começou então tudo de novo, dizendo quanto se sentia feliz em conhecer o grande jogador de futebol. Bohr decidiu tentar outra coisa. Estava acostumado a dar explicações a poderosos: afinal, sempre conseguia fazer Rutherford entender. Sim, era jogador de futebol, concordou – mas seu irmão era *famoso*. Insultado, o rei declarou: *Audiesen er forbi!* (A audiência está encerrada!) E imediatamente acenaram a Bohr que saísse, da forma habitual – recuando em direção à porta.

Apesar dessa gafe, as autoridades dinamarquesas mantiveram sua promessa. Em 1918, iniciaram-se as obras do novo Institut for Teoretisk Fysik, com Bohr nomeado seu futuro diretor. A despeito de seu nome, o Instituto abrigava também vários laboratórios sofisticadamente equipados, onde eram realizados experimentos práticos. Os recursos iniciais foram proporcionados pela Carlsberg, fabricante de uma das melhores cervejas dinamarquesas. (Na Dinamarca, a caridade começa na cervejaria: a

Carlsberg apoia as ciências; a Tuborg, as artes.) Mas, como sabemos todos, a cerveja sozinha não proporciona apoio completo. O próprio Bohr viu-se forçado a buscar recursos para seu novo instituto, até que ele fosse finalmente inaugurado em 1921.

O Instituto logo começou a atrair jovens e ambiciosos cientistas da Europa inteira, todos ansiosos por aprender e trabalhar com Bohr. Em decorrência disso, progressos animadores logo começaram a surgir em Copenhague. Tomando por base o modelo atômico de Bohr, tinha sido possível prever a existência de um novo elemento até então desconhecido – o elemento nº72. Por meio de análise espectral, o elemento nº72 foi finalmente identificado pela primeira vez no Instituto em Copenhague. Esse novo elemento, cuja descoberta contribuiu consideravelmente para a confirmação da obra de Bohr, recebeu o nome de háfnio (inspirado na versão latina de København).

Essa descoberta, no entanto, logo começou a enfrentar dificuldades. Com a mesma rapidez com que foi feita, passou a ser disputada. Foi apresentada uma reivindicação pelo experimentalista irlandês Arthur Scott, de 76 anos, que declarou ter descoberto esse elemento nove anos antes, em 1913. Chegara a denominá-lo celtium, em homenagem à sua terra natal. A imprensa popular se ocupou rapidamente da disputa, que se tornou questão de orgulho nacional para os dois países. Mal haviam Bohr e seu Instituto alcançado reputação internacional, e parecia que ambos seriam arruinados por uma acusação de trapaça. Scott apareceu em público brandindo um tubo de ensaio contendo uma amostra de celtium. As coisas chegaram a tal ponto que Rutherford foi chamado a depor, conseguindo finalmente convencer Scott a enviar uma amostra de celtium para análise espectral em Copenhague. Infelizmente, descobriu-se que não continha qualquer traço do elemento nº72. Alguns elementos têm meia-vida, outros, existência ainda mais breve. O celtium dissipou-se nas brumas da lenda química e desde então não foi mais visto (mesmo na Irlanda).

Mais tarde, em 1922, Bohr iria receber a honraria máxima – o Prêmio Nobel de Física. Esses foram anos fecundos do Nobel de Física. Nos sete anos que se seguiram a 1918, ele foi ganho por Planck, Einstein, Bohr, Millikan e Hertz. Mas nem todos foram gigantes. Em 1919, foi atribuído a Johannes Stark, que mais tarde tentou purificar a Alemanha nazista da “ciência judaica”, ou seja, a relatividade, a teoria quântica, a física nuclear e outros tipos de lixo racialmente inferior.

Apesar desse reconhecimento público, a teoria quântica ainda se encontrava de certo modo embrionária. Achava-se na posição singular de fazer grandes progressos e, no entanto, ainda incapaz de construir algum alicerce para si mesma. Eram tempos estimulantes. Eventualmente algum dos brilhantes jovens colegas de Bohr lhe perguntava que direção ele achava que a ciência tomaria. Bohr adquiriu o hábito de citar o *Fausto*, de Goethe: “Qual é o caminho? Não há caminho. É prosseguir no desconhecido.”

Consideremos, por exemplo, a frequência de linhas emitidas no espectro de um átomo. Segundo o esquema quântico, elas eram produzidas quando o elétron “saltava” de uma órbita para outra e nenhuma radiação era emitida quando o elétron orbitava o núcleo em seu “estado estacionário”. No entanto, a mecânica clássica dizia exatamente o oposto. A radiação era produzida pelo elétron por ele orbitar o núcleo, podendo ser calculada de acordo com isso. É evidente que ambos os esquemas não podiam ser verdadeiros. Bohr, porém, descobriu que qualquer esquema do “salto” quântico também podia ser “coordenado” com uma órbita correspondente da mecânica clássica. O átomo podia ser clássico ou quântico. Na realidade, para frequências mais baixas a teoria quântica e a mecânica clássica tinham *exatamente a mesma resposta*, o que levou Bohr a formular seu famoso princípio de correspondência, segundo o qual em frequências suficientemente baixas as leis da teoria quântica e as da mecânica clássica *tornavam-se idênticas*.

Era obviamente um absurdo. Era ilógico, impossível, impensável etc. Mas foi o que aconteceu – e o que funcionou! Não era de admirar que um cientista da estatura de Von Laue ameaçasse abandonar a física caso ficasse provado que a teoria quântica estava correta! Até Einstein entrou em choque com Bohr. Foi a física quântica que levou Einstein a fazer a famosa observação: “Deus não joga dados com o Universo.” Bohr e seus colegas do Instituto em Copenhague estavam igualmente confusos, mas permaneciam otimistas – estavam decididos a continuar desbravando essa trilha cada vez mais instável. (“Não há caminho.”) O próprio Bohr estava consciente de que seu princípio de correspondência estava de fato apenas juntando os pedaços.

Esses “pedaços”, no entanto, logo começaram a provocar progressos sem precedentes no conhecimento científico. Nos primeiros anos da década de 1920, a teoria quântica atraía os cérebros mais capazes da ciência. Tudo estava pronto para ser conquistado. Brilhantes teorias eram formuladas até mesmo por físicos ainda não nascidos na época em que Planck propôs a teoria quântica. Era verdadeiramente uma ciência do século XX. E seu maior centro era o recém-criado Instituto de Bohr. (Na realidade, durante algum tempo apenas Göttingen e Cambridge, para onde Rutherford tinha então se mudado, permaneciam na disputa.) A lista de colaboradores do Instituto de Bohr soa como uma lista internacional da geração seguinte de gigantes da física do século XX. O suíço Pauli, Heisenberg da Alemanha, Dirac da Inglaterra, Landau da Rússia e outros gênios menos conhecidos – todos em algum momento trabalharam no Instituto de Bohr. E a teoria quântica evoluía em direção à mecânica quântica à medida que a mecânica interna do esquema quântico do átomo era elaborada. Como *funcionava* de fato o átomo de Bohr?

A teoria quântica caminhava com as próprias pernas. Na tradição dos Bohr, construía teoria sobre teoria em velocidade desconcertante. Pouco a pouco um esquema desse mundo subatômico de imensa complexidade, em

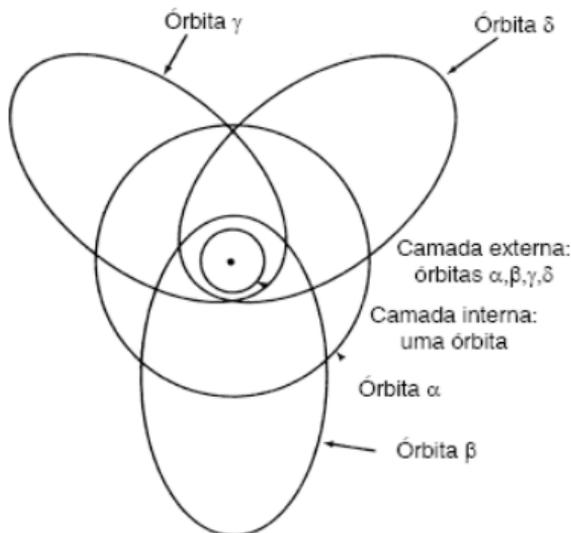
que nem a lógica nem a causalidade predominavam, estava sendo construído. Mas havia determinados avanços que transformavam todo o esquema. Um deles foi produzido pelo atarracado prodígio suíço de 23 anos, Wolfgang Pauli, que era propenso a crises de melancolia profunda sempre que se deparava com um problema que não conseguia entender. Um deles era um efeito anômalo nos espectros da emissão atômica que não podia ser explicado pelo modelo da estrutura atômica de Bohr.

Esse modelo (às vezes citado como modelo Bohr-Sommerfeld) tinha sido então consideravelmente aprimorado. Já conseguia mostrar a distribuição geral dos elétrons em torno do núcleo em átomos mais complexos (ou seja, os que tinham mais que o elétron único do hidrogênio). Os elétrons eram dispostos nas diferentes órbitas fixas em torno do núcleo. Descobriu-se também que essas órbitas fixas se decompunham em grupos separados, cada um deles denominado “camada” (ou nível). Por exemplo, constatou-se que em cada átomo a camada interna consistia em apenas uma órbita (representada no diagrama da página seguinte pela órbita circular mais interna). A camada seguinte continha quatro órbitas (conforme representado no diagrama por uma órbita circular e três elípticas).

Mas, segundo o esquema de Bohr, as órbitas internas deveriam ter se tornado cada vez mais ocupadas por elétrons. (Para que a energia fosse emitida, um elétron tinha de “saltar” para uma órbita interna.) Por alguma razão, porém, as órbitas internas não ficaram ocupadas pelos elétrons. Esse problema seria solucionado em 1924 por Pauli.

Pauli estava então muito irritado com sua incapacidade de explicar a anomalia nos espectros atômicos que não se adequavam ao modelo de Bohr – a tal ponto que adquirira o hábito de vagar sem rumo pelas ruas de Copenhague horas a fio, mergulhado em profunda depressão. Mas havia salvação. Recentemente havia sido proposto que os elétrons provavelmente *giravam* ao orbitarem o núcleo (uma vez mais, como os planetas ao orbitarem o Sol). Aproveitando essa ideia, Pauli não apenas explicou a

anomalia nos espectros atômicos, mas também por que os elétrons não congestionam as órbitas internas dos átomos.



Em linguagem simples, Pauli mostrou que cada órbita fixa não podia conter mais de dois elétrons. Quando se completava, o próximo elétron era *excluído* e tinha de passar a uma das outras órbitas na camada. E se não houvesse órbitas com espaço livre nessa camada, o elétron seria mais uma vez excluído, tendo de ocupar uma órbita vazia na camada externa seguinte. Foi o que Pauli denominou princípio de exclusão. Não apenas ele mostrava como os elétrons evitavam se congestionar todos nas órbitas internas, mas também explicava a estrutura dos elementos na Tabela Periódica.

Por exemplo, o átomo de hidrogênio tinha apenas um elétron na camada interna. O elemento seguinte, o hélio, tinha dois – preenchendo assim a camada. Isso significava que ele era de certo modo mais

“completo”: tinha pouca propensão a acrescentar ou perder um elétron mais. Era assim pouco provável que reagisse com outro elemento, o que explicava por que o hélio fora sempre um dos famosos Elementos Inertes.

O terceiro elemento, o lítio, tinha dois elétrons na camada interna e um na camada seguinte. Conforme vimos no diagrama anterior, a segunda camada tem quatro órbitas e, dessa forma, espaço para até oito elétrons. Quando essas se completam, temos um átomo com dez elétrons ao todo (dois na camada interna, oito na camada externa). Esse décimo elemento é chamado neônio. Assim como o hélio anteriormente mencionado, possui camadas completamente cheias. E ambos têm propriedades similares: pertencem aos Elementos Inertes. A similaridade periodicamente repetida entre os elementos da Tabela Periódica de Mendeleiev tornava-se agora um pouco mais clara. As propriedades de cada elemento eram ditadas não apenas pelo número de elétrons que continha, mas também por sua disposição nas camadas das órbitas e pelo grau de preenchimento da órbita externa.

Embora Bohr não tivesse colaborado com Pauli na formulação do princípio de exclusão, ele desempenhou um papel nessa concepção – assim como em muitos outros progressos ocorridos nessa época de ouro, que viu o nascimento da mecânica quântica (aproximadamente 1924-28). Durante todo o tempo em que Pauli tentava a formulação desse princípio, ele manteve constante “discussão” com Bohr a respeito – por meio de cartas e discussões em suas estadas no Instituto em Copenhague. Desse modo, Bohr tornou-se uma espécie de figura de pai para os novos avanços da mecânica quântica. Nem sempre estava de acordo com seus colegas mais jovens, mas a atmosfera de discussão produtiva e democrática por ele implantada no Instituto representou papel fundamental nessas revolucionárias descobertas.

Outro progresso sensacional ocorreu em 1925, vindo do menino-prodígio alemão de 23 anos, Werner Heisenberg, que, além de brilhante físico,

também encontrou tempo para ser um ás do montanhismo, excelente pianista, sem falar em sua memória, capaz de reter trechos assombrosamente longos de Goethe, e em seu hábito de raras vezes dormir mais que algumas horas. Apesar desses obstáculos, também era capaz de agir como um ser humano – e logo estabeleceu uma relação estreita com Bohr. Foi Heisenberg quem descobriu como superar a ilogicidade do princípio de correspondência de Bohr. Tanto o esquema quântico da estrutura atômica (o modelo Bohr-Sommerfeld) quanto o esquema segundo a mecânica clássica (o sistema solar de Rutherford) estavam de acordo em que um átomo emitia energia (luz), que produzia o espectro de emissão do átomo. De acordo com a teoria quântica, no entanto, essa luz se propagava nos *quanta* (feixes de energia ou partículas de onda). Em outras palavras, de forma descontínua. A teoria quântica chegava a explicar por que a luz se propagava desse modo: porque cada vez que os elétrons “saltavam” de uma órbita fixa para outra, liberavam *quanta* de energia. No entanto, conforme a mecânica clássica, a luz era transmitida em ondas contínuas. Ou seja, de forma contínua. Agora, de acordo com o princípio de correspondência de Bohr, a mecânica clássica e a teoria quântica convergiam em baixas frequências – a ponto de darem as mesmas respostas e se tornarem *idênticas*. Mas simplesmente não podia ser assim. Ou algo é contínuo ou é intermitente – não é possível ser os dois ao mesmo tempo! (Se meu copo está continuamente vazio, significa que jamais há cerveja nele. Se está intermitentemente vazio, significa que alguém está enchendo e eu esvaziando.)

Heisenberg encontrou uma maneira brilhante de contornar essa ilogicidade. Problemas tais como a radiação contínua/intermitente de energia eram superados concentrando-se simplesmente na observação – *e somente na observação*. Apenas as propriedades mensuráveis de um átomo deveriam ser consideradas algo “real”. O conceito de átomo como um minúsculo sistema solar – estivesse ele de acordo com o modelo Bohr-Sommerfeld

ou o clássico – foi simplesmente abandonado. Como Heisenberg observou: “Por que falar de um elétron invisível orbitando dentro de um átomo invisível? Se eles não podem ser vistos, não são significativos.” Não importava se você representava algo como onda contínua ou partícula descontínua. Isso era irrelevante, se o que interessava era a *medida*. Todas as medidas dependiam de como eram tomadas, mas os resultados não podiam discordar uns dos outros. Eram simplesmente resultados.

Era um achado brilhante, mas como expressar essas *medidas* de forma significativa sem um “esquema” a que vinculá-las (ou seja, um modelo, como o átomo do “sistema solar”)? Isso era superado pela disposição das diferentes medidas em linhas e colunas de números sob a forma de matriz. Aplicando então a teoria matricial seria possível predizer valores adicionais para variáveis físicas (como as que se tinham aplicado a partículas) e probabilidades matemáticas (como as que se tinham aplicado a ondas). Essas linhas e colunas retangulares de algarismos demonstraram ser muito mais úteis do que o “esquema” de um átomo. Elas proporcionaram a primeira forma corrente da mecânica quântica, permitindo-lhe fazer previsões de uma forma que lembrava a mecânica clássica.

O que estava por acontecer então? Deveria toda a imensa engenhosidade da estrutura atômica do sistema solar simplesmente ser jogada pela janela? Como poderia o princípio de exclusão de Pauli, que ajudara a explicar parte tão substancial do comportamento de todos os elementos, simplesmente estar errado? A resposta, claro, era que ele não estava errado. Ao superar uma ambiguidade, a mecânica quântica nada mais fizera do que provocar outra.

Dois anos depois, Heisenberg formulou seu famoso princípio da incerteza – que jogou a última pá de cal na física clássica. Partindo de sua ideia de que somente a medida podia produzir certeza, Heisenberg compreendeu que, no que dizia respeito à mecânica quântica, nem mesmo a medida podia assegurar certeza *total*. Por exemplo, os elétrons eram tão

minúsculos que, independentemente de como se tentava aferir seu comportamento, a forma de efetuar a medição afetava esse comportamento. Caso se lançasse luz sobre um elétron, de modo a se poder “vê-lo”, isso inevitavelmente o colocava fora de curso, afetando sua velocidade ou sua posição. Conforme advertiu Bohr: “Qualquer observação a respeito do comportamento do elétron no átomo será acompanhada por uma mudança no estado do átomo.” No entanto, sem algo que possa medir o elétron, simplesmente não se pode “vê-lo” – ou seja, nada podemos saber sobre ele!

Em um experimento seria possível medir o *momentum* de uma partícula subatômica, mas não seria possível medir ao mesmo tempo sua posição. E embora fosse possível montar um experimento para medir sua posição, não se podia simultaneamente medir seu *momentum*. Essa era a incerteza básica do princípio de incerteza de Heisenberg.

Mas não era apenas a brilhante geração de cientistas europeus a responsável pelos extraordinários progressos da mecânica quântica ocorridos em meados da década de 1920. Bohr ainda produzia com grande criatividade. Em 1927, deu a conhecer seu “princípio da complementaridade”, que explicava a dualidade posição/*momentum* salientada por Heisenberg. Segundo a teoria de Bohr, “as provas obtidas em condições experimentais distintas não podem ser contidas num esquema único, mas devem ser consideradas complementares no sentido de que apenas a totalidade dos fenômenos exaure a informação possível sobre o objeto”. Em outras palavras, não pode existir um esquema geral único, mas podemos utilizar um conjunto de esquemas complementares para cobrir o mesmo campo. Esses esquemas não são logicamente contraditórios, uma vez que seus domínios de validade não se sobrepõem.

Tudo isso tinha efetivamente a ver com a dualidade partícula/onda. Segundo o princípio de complementaridade de Bohr, uma entidade se

comportar como onda ou partícula dependia exclusivamente do tipo de instrumento que se escolhia para aferir seu comportamento.

Questões sérias permaneciam, no entanto, sem resposta. Mesmo após toda a informação possível ter sido coletada, de todos os experimentos possíveis, isso ainda não era o bastante para fazer previsões precisas. No nível quântico, nunca se podia saber *exatamente* o que estava por acontecer – como era possível na física clássica. Era possível medir com extrema precisão o *momentum* de uma partícula subatômica. Também era possível verificar sua posição com precisão similar. Mas não era possível fazer as duas coisas *ao mesmo tempo*. No entanto, apenas se fossem feitas simultaneamente seria possível prever com exatidão o que ela faria em seguida. No nível quântico, o rigor era impossível. A mecânica quântica trabalhava sobre a probabilidade. Só se podia prever a probabilidade de algo no instante em que acontecia.

Bohr enfrentou essas objeções da seguinte maneira. Se no nível quântico era impossível fazer previsões precisas, como se faz com fenômenos em larga escala, a mecânica quântica ainda era capaz de fazer previsões surpreendentemente exatas por meio da probabilidade. Tomando vastas amostras de elétrons era possível prever o curso geral de seu comportamento futuro. Podia ser impossível dizer onde um elétron isolado estaria no futuro. Mas era possível prever, com considerável exatidão, o comportamento padrão de um grande grupo de elétrons. Essas probabilidades eram simplesmente estatísticas, e não individuais. As previsões no nível quântico tinham de se apoiar nas estatísticas e na probabilidade, que podiam não ser tão simples e precisas quanto a mecânica clássica, mas na maioria das vezes tinham a mesma eficácia.

Isso se aplicava a todos os tipos de fenômenos subatômicos, das linhas espectrais à radioatividade. Por exemplo, na radioatividade o núcleo atômico se desintegra e emite uma partícula alfa. A teoria quântica continuava incapaz de prever rigorosamente *quando* um núcleo simples se

desintegraria e emitiria uma partícula alfa. No entanto, por meio da probabilidade, era possível mostrar que um grupo de átomos radioativos emitiria partículas alfa *numa certa taxa*.

Em 1929, Bohr iniciou uma série de conferências anuais no Instituto, às quais compareciam os maiores cientistas da Europa, muitos dos quais já haviam passado períodos trabalhando ali. As dificuldades da mecânica quântica eram então dissipadas. Essas dificuldades eram de imensa complexidade, na vanguarda da ciência. E, ao final de cada conferência, estava-se longe de uma unanimidade.

No entanto, o espírito que movia essas conferências fazia o máximo para conciliar as coisas. Bohr, fleumático, fumando seu cachimbo, era capaz de triturar seu oponente com a pura persistência de seus argumentos, quando tinha certeza de que estava com a razão. Isso não funcionava com o distraído Pauli, que simplesmente se refugiava dentro de si mesmo e dava livre curso a seus pensamentos, independentemente de quanto Bohr teimasse em insistir. Com outros era diferente. Heisenberg, que não era nenhum tímido e podia estar igualmente certo de que a razão estava do seu lado, em determinada ocasião foi reduzido a lágrimas de frustração. (Mais tarde, a paz voltou mediante um acordo segundo o qual o princípio de incerteza e o princípio de complementaridade eram basicamente a mesma coisa expressa de maneiras distintas.) Quando a situação passava dos limites mesmo para Bohr, ele se levantava e se precipitava para o jardim. Viam-no acender um enorme charuto e começar a “semear” os canteiros meticulosamente cultivados do Instituto – que algumas vezes ficavam reduzidos a terra revolta e estéril ao final de uma conferência.

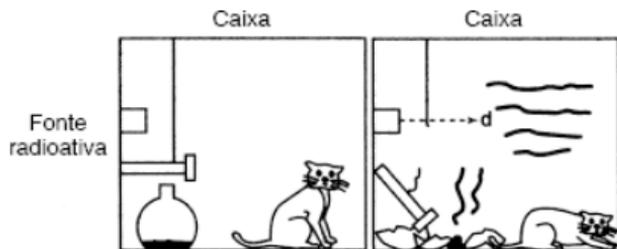
Os argumentos eram calorosos e não raro profundamente intransigentes, mas conduzidos num espírito de cooperação internacional. Todos os presentes sentiam que estavam buscando a verdade. Era a isso que se dedicava a ciência e era isso que cientistas faziam. As conferências no Instituto de Bohr estavam longe de ser as únicas. A época era de

grandes conferências científicas internacionais, quando grupos de cérebros privilegiados se reuniam para discutir temas científicos específicos. Dessas talvez as mais conhecidas fossem as célebres Conferências Solvay, realizadas no Hotel Metrópole em Bruxelas e financiadas pelo industrial químico belga Ernest Solvay, que fizera fortuna com o processo amônia/hidróxido de sódio (usado na fabricação de vidro e sabonete). Nesses encontros, Bohr era obrigado a defender sua posição contra os pares de Einstein (que na realidade tinha recebido o Prêmio Nobel por seu trabalho sobre a teoria quântica), Madame Curie (pioneira na pesquisa em estrutura atômica com sua descoberta da radioatividade) e o combativo físico austríaco Erwin Schrödinger. Einstein e Curie ainda estavam convencidos de que o *quantum* era essencialmente um fenômeno passageiro, uma tentativa teórica de abarcar as anomalias que um dia seriam resolvidas. Schrödinger nem tanto – ele parecia ter a intenção de destruir o *quantum*, mas de dentro.

Apesar disso, Schrödinger tinha sorte em ser admitido nessas conferências. Seu hábito extravagante de viajar com roupas de montanhista, calçado com pesadas botas e carregando mochila, mostrava que às vezes tinha dificuldade em ser admitido no elegante Hotel Metrópole. Mas Schrödinger era capaz de dissuadir mais que porteiros. Quando Heisenberg formulou sua mecânica matricial em 1925, Schrödinger a descartou de pronto e colocou em seu lugar sua própria “mecânica ondulatória” alternativa. (O que só serviu para criar polêmica, exatamente como ele queria, até que mais tarde ficasse provado que era matematicamente equivalente à mecânica matricial de Heisenberg.) Mais difícil de ser superada foi a investida de Schrödinger contra o enfoque quântico da previsão através da probabilidade.

Tudo aquilo era um disparate odioso, declarou à sua maneira característica. E prosseguiu na tentativa de dar o golpe de misericórdia na predição através da probabilidade – o que conseguiu com seu abominável exemplo

conhecido como “o gato de Schrödinger”. Schrödinger imaginou um gato trancado numa caixa (ver diagrama abaixo). Dentro da caixa havia também uma fonte radioativa, um martelo e um frasco de vidro fechado com gás venenoso. Quando um núcleo atômico de uma fonte radioativa se desintegrava, liberava uma partícula alfa, que liberava o martelo, que quebrava o frasco, que liberava os gases venenosos, que matavam o gato.



A teoria quântica já não podia dizer o que aconteceria a qualquer átomo radioativo específico, mas tão somente prever a que taxa os átomos se decomporiam. Ou seja, a que taxa os átomos da fonte radioativa emitiriam partículas alfa. Digamos que a previsão fosse de 50% de probabilidade de uma partícula alfa ser liberada por minuto. Aplicando à caixa a teoria quântica, conclui-se que ao cabo de um minuto o gato nem está completamente vivo nem completamente morto. O que é, evidentemente, um disparate.

O gato de Schrödinger também atacou a noção central da teoria quântica – a de que um fenômeno não tinha valor até que fosse medido (o que claramente dependia de *como* ele era medido, o que em última instância determinaria *o que* ele era, ou seja, uma onda ou uma partícula). Examinado a partir desse ponto de vista, após um minuto na caixa, o gato de Schrödinger permanecia em estado intermitente, nem morto nem vivo – *até que alguém abra a caixa e olhasse dentro*. Só *então* (ou seja, quando era medido) ele absorvia algum conceito de valor (por exemplo,

vida ou morte). Isso evidentemente não era verdadeiro. Ou o gato ainda estava vivo ou já estava morto. A medida nada tinha a ver com isso.

Schrödinger estava convencido de que seu monstro do além era uma história de terror exagerada para a previsão quântica e sua máxima “sem medida: sem conhecimento do valor”. Mas não era. Apesar do absurdo do gato de Schrödinger, a mecânica quântica ainda se apoia na previsibilidade e insiste que um fenômeno não tem valor até que seja medido. Da mesma forma, o princípio de complementaridade de Bohr (também objeto do deboche de Schrödinger) ainda permanece em grande parte a posição básica da mecânica quântica.

No entanto, outras formulações desse princípio não resistiram ao teste do tempo. O princípio de complementaridade de Bohr subiu-lhe à cabeça e ele começou a se ver como o grande homem do conhecimento (não apenas da ciência). Ele acertadamente percebeu que o princípio de complementaridade era aplicável a outras áreas além da mecânica quântica simplesmente. Em biologia, por exemplo, existem dois enfoques. Os fenômenos biológicos podem ser classificados de um ponto de vista funcional (por exemplo: o *Homo sapiens* é um zooide colonial). Mas também podem ser estudados em termos de análise física e química (por exemplo: a vitamina C é essencial à manutenção da vida no organismo humano). Em vez de considerar esses dois enfoques como opostos, Bohr argumentava que seria melhor se tratássemos os dois como complementares. Ele estendeu depois esse enfoque ao delicado campo da sociologia, onde sugeriu que deveríamos considerar o estudo do comportamento humano e a (aparentemente oposta) análise da transmissão hereditária como complementares ao determinar os principais elementos de uma cultura. Como quase tudo relacionado a essa assim dita ciência, a sugestão de Bohr estava aberta a questionamentos. (A incursão de Bohr nesse campo também o levou a perigosas especulações raciais – mas deve ser salientado que não têm qualquer

semelhança com as perigosas teorias que começavam a vir à tona do outro lado da fronteira, na Alemanha, durante esse período.)

Não foi senão quando Bohr estendeu esse princípio à filosofia que ele realmente fez a si mesmo de bobo. O princípio de complementaridade suscita uma séria questão para a epistemologia (a teoria do conhecimento ou qualquer fundamento filosófico que tenhamos para afirmar que conhecemos algo). Mas afirmar, como Bohr o fazia, que os filósofos antigos estavam na realidade às apalpadelas tentando expressar seu princípio é pura loucura. A física quântica é um problema genuíno para a filosofia. Com efeito, qualquer filosofia que não a leve em consideração (e muitas ainda não o fazem) se equipara às obras dos filósofos antigos – fascinantes antiguidades, mas inadequadas à experiência dos tempos modernos. No entanto, a física quântica (e com ela o princípio de complementaridade) não pode *ser* filosofia. É ciência – que é conhecimento humano. A filosofia (nesse caso, a epistemologia) estuda os *fundamentos* do conhecimento humano.

A filosofia pode não ter quase nada a dizer hoje em dia (ao passo que a ciência tem tudo a dizer); mas nesse sentido ela será sempre “mais profunda” que a ciência. Mesmo quando guiada pelos pares de Bohr. Por uma vez esse brilhante pensador conceitual (um dos mais sofisticados do século XX) não estava sendo profundo. Segundo o comentário de um de seus colegas (em *off*), Bohr se adaptava tanto à filosofia quanto à estrada: “Sentar num carro dirigido por Bohr era um ato de fé.” Quando sentia calor, simplesmente largava o volante e tirava o casaco como se estivesse sentado numa cadeira estável. Muitas vidas foram salvas graças à sua mulher, que sempre insistia em sentar atrás dele e regularmente fazia “correções” rápidas no volante. (Apesar da força da argumentação filosófica contra Bohr, os progressos mais recentes da física quântica tendem a apoiar sua causa. Os cientistas argumentam hoje, com certa razão, que a física quântica nada mais fez que sequestrar a epistemologia, saqueando assim a

filosofia. O ponto inevitável, no entanto, permanece: ciência e filosofia não são o mesmo.)

Felizmente, Bohr só se estabeleceu como guru em tempo parcial, continuando a fazer grandes contribuições à ciência. Em associação com muitos de seus colegas, passou a dirigir sua atenção para o núcleo do átomo. No final da década de 1930, concebeu um modelo que descrevia a composição do núcleo atômico e seu funcionamento. Seu esquema teórico ajudou a esclarecer muitas das ideias conflitantes que então emergiam em decorrência das técnicas experimentais que avançavam rapidamente. Nesse ponto, uma vez mais, ele considerou o comportamento nuclear em termos de mecânica quântica.

Para Bohr, o núcleo consistia num grupo de partículas mantidas juntas por forças de alcance limitado, de forma muito semelhante às moléculas em uma gotícula de líquido. Quando uma partícula atinge esse núcleo/gotícula, sua energia pode ser rapidamente absorvida entre as partículas em colisão e ela se torna parte da gotícula, que conseqüentemente é aquecida. Esse estado irá perdurar por um período longo (em termos nucleares), com a energia contida continuando a flutuar aleatoriamente. O núcleo somente se deteriorará quando a energia flutuante aumentada provocar uma concentração de energia numa partícula, permitindo-lhe escapar – em processo muito semelhante ao da evaporação que ocorre na gotícula aquecida. Contudo, no caso de um núcleo grande e pesado (como o do urânio), a saída da partícula fará com que a gotícula se divida em duas outras de tamanho semelhante. (Esse processo é chamado fissão nuclear.)

Bohr foi o primeiro a descrever o que efetivamente acontecia durante a fissão nuclear. E o fez em 1939, imediatamente após ela ter sido descoberta, como resultado de um programa experimental realizado pelo físico alemão Otto Hahn e sua colega judia alemã Lise Meitner – obrigada a fugir da Alemanha nazista em meio ao trabalho que desenvolviam. Hahn

secretamente enviou os resultados desse trabalho experimental à Suécia, onde Meitner os analisou, concluindo que ocorrera a fissão nuclear.

As notícias foram passadas a Bohr, que de imediato percebeu suas terríveis implicações. Em visita aos Estados Unidos naquele mesmo ano, advertiu Einstein de que a Alemanha nazista tinha conhecimento teórico para iniciar pesquisas visando à fabricação de uma bomba atômica. Em consequência, Einstein escreveu ao presidente Roosevelt, que rapidamente criou o Projeto Manhattan, com o objetivo de produzir uma bomba atômica americana antes da alemã.

Em 1940, a Dinamarca foi invadida pela Alemanha nazista, mas Bohr fez o possível para manter a integridade de seu Instituto. A época da livre cooperação científica internacional há muito se encerrara, porém a cooperação científica camuflada prosseguia. Bohr permanecia em contato secreto com cientistas ingleses e, em 1941, foi visitado pelo ex-colega Heisenberg, cuja relação com Bohr esfriara em consequência dos fatos históricos. Heisenberg foi um dos primeiros cientistas importantes a permanecer na Alemanha nazista. O fato de trabalhar com a “ciência judia” (ou seja, a física teórica) significava que era vilipendiado nos círculos científicos nazistas e que se referiam a ele como um “judeu branco”. Apesar disso, tinham-lhe oferecido (e ele aceitara) um cargo influente no programa da bomba atômica alemã. Em seu encontro com Bohr na Copenhague ocupada pelos nazistas, Heisenberg passou-lhe um diagrama criptografado revelando os progressos do programa atômico nazista. (O diagrama não era da bomba em si, mas de um protótipo de reator que não funcionou muito bem.) Por que Heisenberg tomou essa atitude é ainda motivo de acalorados debates. Ele mais tarde declarou que pretendia influenciar cientistas de ambos os lados no sentido de abandonar o trabalho com a bomba. Bohr pensava de forma diferente e ficou profundamente irritado com o encontro (mais uma vez, as opiniões destoam a respeito do motivo

real de sua irritação). Bohr e seu ex-aluno favorito jamais conseguiram superar o ocorrido nesse encontro.

Em setembro de 1943, Bohr ficou sabendo que, em função de seu manifesto desprezo pelos nazistas, estava em vias de ser preso. Um plano de fuga foi rapidamente organizado. Bohr e a família se deslocaram até uma casa nos subúrbios de Copenhague. Ao cair da noite, cruzaram uma campina rastejando até uma praia deserta, onde encontraram um barco de pesca, que os conduziu por 24 quilômetros até a neutra Suécia, deixando para trás as patrulhas marítimas alemãs.

Ao chegar, Bohr foi mandado às pressas para Estocolmo. Assim que sua fuga foi descoberta, o serviço secreto alemão recebeu ordem de assassiná-lo tão logo fosse visto. Embora Estocolmo estivesse fervilhando de agentes alemães, e houvesse muitos simpatizantes alemães em cargos oficiais, Bohr conseguiu uma audiência com o rei. Antes da fuga, soubera que em breve começaria o transporte de judeus dinamarqueses para os campos. O rei da Suécia foi persuadido a colocar em risco a neutralidade sueca e manifestou-se de público contra essa grotesca violação dos direitos humanos. (Em parte como consequência disso, porém mais como resultado da engenhosidade e coragem dinamarquesas, apenas 500 dos 8.000 judeus dinamarqueses foram finalmente transportados.)

Alguns dias mais tarde o governo britânico enviou um bombardeiro Mosquito, sem identificação, até a Suécia para resgatar Bohr. Os agentes sabiam então tanto sobre o bombardeiro quanto sobre Bohr (que se encontrava em outro local). Estavam decididos a fazer todo o possível para mantê-los separados. Após uma série de aventuras e infortúnios dignos de James Bond, Bohr foi finalmente colocado secretamente no compartimento vazio de bombas do Mosquito, que decolou protegido pela escuridão. Conseguiu iludir a Luftwaffe em seu voo sobre a Noruega ocupada pelos nazistas e rumou para cruzar o mar do Norte. Bohr, então com 57 anos, corria o risco de morrer congelado. Quando o Mosquito finalmente

pousou com segurança na Inglaterra, Bohr estava quase inconsciente em consequência de hipotermia e falta de oxigênio.

Bohr mal teve tempo suficiente de se aquecer na Inglaterra (um processo um tanto longo devido à falta de combustível em decorrência da guerra) e foi enviado aos Estados Unidos. Associou-se imediatamente ao Projeto Manhattan, viajando para os laboratórios secretos de Los Alamos, onde a bomba estava sendo montada. Foi recebido pelo físico americano Robert Oppenheimer, chefe do projeto, e mostrou a ele e aos demais colegas o diagrama que recebera de Heisenberg, que não gerou a tranquilidade pretendida por Bohr. Era óbvio para os americanos que aquele reator não podia funcionar. Ao mesmo tempo perceberam que os alemães deviam ter chegado à mesma conclusão. Ou então o diagrama entregue por Heisenberg era uma fraude elaborada, visando esconder os progressos reais por eles alcançados. (Isso permanece um tanto misterioso. O fato é que o empenho alemão em fabricar uma bomba atômica jamais produziu qualquer efeito. Quanto isso se deveu ao esforço deliberado de Heisenberg é ainda motivo de ferrenhas discussões.)

As duas primeiras bombas atômicas americanas foram lançadas sobre as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki em agosto de 1945, botando um ponto final na Segunda Guerra Mundial. Após desempenhar um papel na criação da bomba atômica, Bohr ficou naturalmente horrorizado quando viu seu efeito. Logo começou a usar de seu prestígio para tentar convencer os mais altos escalões a interromper, incontinentemente, todas as pesquisas ligadas à bomba nuclear. Seu empenho foi, no melhor dos casos, repellido. (Churchill era inteiramente a favor de que ele fosse preso.)

Em 1945, Bohr voltou a Copenhague e a seu querido Instituto. Os nazistas não souberam de fato o que fazer com o mais importante Instituto do mundo, especializado numa ciência racialmente inaceitável. Em consequência disso, Bohr encontrou quase tudo como deixara – inclusive uma garrafa de solução de ácido úrico que ele particularmente estimava.

Segundo relatos, ao fugir para a Dinamarca em 1943, Bohr decidira que sua medalha de ouro do Prêmio Nobel não deveria cair nas mãos dos nazistas. Para evitar que isso acontecesse, dissolveu-a no ácido, deixando para trás uma discreta garrafa de líquido turvo em uma obscura prateleira de laboratório. Quando retornou, isolou o ouro em suspensão e tornou a forjar a medalha. Um episódio de delicado simbolismo poético – naturalmente, é bom demais para ser verdade. Mas apenas isso. A medalha de ouro do Nobel não era na realidade de Bohr (ele havia doado a sua para o Fundo Finlandês de Assistência às Vítimas de Guerra). O dono era seu parceiro científico Von Laue, que a enviara a Bohr para preservá-la no início dos anos de chumbo da Alemanha. (Não era apenas a medalha que Von Laue corria o risco de perder. Ao contrário de Heisenberg, Von Laue tornara pública sua opinião a respeito dos nazistas. Os ganhadores do Nobel se tornaram de fato uma espécie em permanente perigo na Alemanha durante esse período. Num acesso de rancor, Hitler tinha proibido qualquer alemão de aceitar o Prêmio Nobel, tendo em vista que ganhadores anteriores, como Einstein, Planck, Heisenberg, Hertz, Thomas Mann etc. etc. eram todos inaceitáveis para a raça superior.)

Após a guerra, Bohr continuou seu trabalho como diretor do Instituto, agora apoiado pelo filho Aage (que também viria a receber o Prêmio Nobel pelo desenvolvimento posterior do modelo “gota líquida” do núcleo atômico). Após a morte de Einstein, em 1955, Bohr assumiu o manto de “maior cientista vivo”. Porém, fez bom uso desse absurdo – organizando uma cruzada pela partilha internacional de todo o conhecimento sobre a fissão nuclear. Em sua opinião, isso evitaria o desenvolvimento de bombas nucleares ainda mais destrutivas. Lógica curiosa, infelizmente incapaz de convencer lógicos como Kruschew e Eisenhower.

Niels Bohr morreu em 1962, aos 77 anos. Homem generoso e de talento, uma raridade, foi homenageado por seu povo, que passou a chamar seu querido Instituto de Instituto Bohr.

ALGUMAS PARTICULARIDADES E PARTÍCULAS DO MUNDO QUÂNTICO

.....

- “Qualquer um que declare que a teoria quântica é clara, na realidade não a compreende.” *Niels Bohr*
- O *quantum* é o equivalente científico do cubismo, que vê um objeto a partir de várias posições ao mesmo tempo. A teoria quântica e o cubismo foram desenvolvidos simultânea e independentemente. Já se chegou a sugerir que no começo do século XX a evolução de nosso modo de ver o mundo deu um “salto”.
- Um *quark* é uma partícula qualquer de um certo grupo de partículas elementares. A cromodinâmica quântica sugere que pode haver algo como 18 tipos de *quark*. Esses tipos (conhecidos como sabores) incluem: *up*, *down*, *strange*, *charmed*, *bottom* (ou *beauty*) e *top*. O termo *quark* foi cunhado pelo físico americano Murray Gell-Mann, a partir de uma palavra criada por James Joyce em sua incompreensível obra-prima *Finnegans Wake*, ela própria descrita por um crítico como “um salto quântico no escuro”.
- “O multiculturalismo é um conceito quântico.” *New Scientist*
- Definição de enciclopédia: “Pluralismo é a crença na coexistência de opiniões incompatíveis ... (ele) gradualmente penetrou todos os

aspectos da cultura, da sociedade e até do conhecimento do século XX...”

- Einstein mostrou que o Universo não consiste em matéria. As partículas fundamentais são energia. Vistos desse modo, todos os objetos físicos têm seu espaço preenchidos com força.
- “O *quantum* é essencialmente a ciência além do sentido. Não é possível ter qualquer *imagem* da realidade final.” *Heisenberg*
- “Estou tão certo quanto possível a respeito de qualquer coisa que jamais se poderá conhecer que a realidade deve ser mais bizarra do que jamais seremos capazes de conceber.” *Bryan Magee*, filósofo contemporâneo.
- “Aversão profunda ao repouso definitivo em qualquer visão total do mundo. Fascinação pelo ponto de vista oposto: recusa a ser privado do estímulo do enigmático.” Receita de Nietzsche para o futuro da ciência, em 1886. Ele disse também: “Os achados mais valiosos são os *métodos*.”
- “A segunda lei da termodinâmica estabelece que não poderá nunca haver outro Humpty Dumpty. A física quântica considera uma ‘teoria de tudo’ tão plausível quanto Papai Noel.” *John Mandeville*, físico.
- Uma palavra de advertência para todos os que procuram uma explicação definitiva do mundo em termos de conhecimento: “Tome cuidado para não fazer do intelecto nosso deus; ele tem ... músculos poderosos, mas nenhuma personalidade.” *Einstein*

- Um progresso recente da física quântica (versão simplificada): Imagine duas partículas subatômicas. Num determinado estágio, esse par forma um sistema, onde o valor de uma equilibra o valor da outra (assim como, digamos, $A \setminus, B / -$). Essas partículas são então separadas por uma grande distância (digamos a metade do Universo). A é então medida e constata-se que seu valor é \setminus . Concluimos, assim, que B deve ter valor $/$. Até aí, muito simples.

Mas, segundo a teoria quântica, A é *desprovida de valor até que seja medida*. E esse valor depende também do método de medição usado. Isso significa que quando A é medida e se constata que é \setminus , B, por ter sido parte do mesmo sistema, deve assumir o valor $/$. Teria de ter assumido esse valor *instantaneamente*.

Assim, se a teoria quântica for verdadeira, algo se move mais rápido que a velocidade da luz. Mas, como sabemos, segundo a teoria da relatividade de Einstein, nada pode atingir essa velocidade. Da mesma forma, essa “sequência” (ou equilíbrio de B em uma distância vasta) ocorreria sem qualquer causa discernível. Estaria além dos domínios da causalidade.

Esse fenômeno é conhecido como Paradoxo EPR.

- A partir do Teorema da Desigualdade de Bell adveio um desenvolvimento posterior do Paradoxo EPR. O Teorema explicava o Paradoxo EPR postulando uma “Realidade não local” (ou seja, um mundo real existindo em nenhum lugar). O mundo real que *conhecemos* se apoia nessa realidade invisível que perdura além do espaço, do tempo ou da causalidade. Segundo Bell, quaisquer partículas que tenham alguma vez sido parte de um sistema permanecerão sempre ligadas por essa realidade não local – que não é afetada pela distância (não importa quão

grande seja), age instantaneamente (isto é, é mais rápida que a luz) e estabelece um vínculo que não passa através do espaço.

Não é a primeira vez que esse método de comunicação é reivindicado. A transmissão de pensamento por percepção extrassensorial funciona do mesmo modo. O mesmo ocorre com o *vodu*. Quando se espeta um alfinete numa representação de alguém que se encontra a quilômetros de distância, essa pessoa imediatamente sente uma dor lancinante e profunda na parte correspondente do corpo.

No entanto, chama-se o Teorema da Desigualdade de Bell de ciência!

CRONOLOGIA

.....

- 1885 Niels Bohr nasce em Copenhague.
- 1900 Max Planck formula pela primeira vez a teoria quântica.
- 1903 Bohr entra na Universidade de Copenhague para estudar física.
- 1905 O *annus mirabilis* de Einstein – no qual ele propõe a teoria da especial relatividade e confirma a teoria quântica de Planck.
- 1911 Bohr conclui tese sobre a teoria dos elétrons dos metais e parte para Cambridge para estudar com J.J. Thomson.
- 1912 Bohr se muda para Manchester para estudar com Rutherford em março. Casa-se com Margarethe Norlund em agosto.
- 1913 Bohr publica a teoria da estrutura atômica.

- 1914-16* Bohr frequenta a Universidade de Manchester.
- 1916* Bohr é nomeado professor de física teórica da Universidade de Copenhague. Einstein publica ensaio sobre a teoria da geral relatividade.
- 1921* Inaugurado o Instituto de Física Teórica de Copenhague, com Bohr como diretor.
- 1922* Descoberta do háfnio. Bohr recebe o Prêmio Nobel de Física.
- 1924* Pauli formula o princípio de exclusão.
- 1925* Heisenberg propõe a física matricial. Schrödinger se opõe a ela com a mecânica ondulatória.
- 1927* Heisenberg formula o princípio de incerteza. Bohr propõe o princípio de complementaridade.
- 1936* Bohr concebe pela primeira vez o modelo da “gota líquida” para o núcleo atômico.
- 1939* Bohr apresenta o modelo de núcleo da “gota líquida” para explicar a fissão nuclear.

- 1941* Heisenberg visita Bohr na Copenhague ocupada pelos nazistas e lhe entrega o diagrama do reator nuclear alemão.
- 1943* Bohr foge da Dinamarca ocupada pelos nazistas.
- 1943-45* Bohr trabalha no Projeto Manhattan, criado para fabricar a primeira bomba atômica.
- 1945* A primeira bomba atômica é lançada sobre Hiroshima. Bohr retorna à Dinamarca. Inicia campanha pela cooperação internacional no campo da fissão nuclear.
- 1962* Bohr morre em Copenhague.

LEITURA SUGERIDA

.....

Niels Bohr: *Física atômica e conhecimento humano* (Rio de Janeiro, Contraponto, 1995) – uma introdução aos fatos reais da lavra do próprio artífice

Robert Gilmore: *Alice no País do Quantum: a física quântica ao alcance de todos* (Rio de Janeiro, Zahar, 1998) – uma introdução acessível e ilustrada

Ruth Moore: *Niels Bohr* (Hodder, 1967) – a biografia básica, com uma boa mistura de vida pessoal e ciência acessível

Abraham Pais: *Niels Bohr's Times* (Clarendon, 1991) – o mais recente estudo biográfico: amplo escopo tanto da vida como da obra, não sendo uma palavra definitiva

Arkady Plonitsky: *Complementarity* (Dute UP, 1994) – os progressos mais recentes, entre eles a nova metafísica da ciência

FILÓSOFOS

em 90 minutos

.

por Paul Strathern

- Aristóteles em 90 minutos
- Berkeley em 90 minutos
- Bertrand Russell em 90 minutos
- Confúncio em 90 minutos
- Derrida em 90 minutos
- Descartes em 90 minutos
- Foucault em 90 minutos
- Hegel em 90 minutos
- Heidegger em 90 minutos
- Hume em 90 minutos
- Kant em 90 minutos
- Kierkegaard em 90 minutos
- Leibniz em 90 minutos
- Locke em 90 minutos
- Maquiavel em 90 minutos
- Marx em 90 minutos
- Nietzsche em 90 minutos
- Platão em 90 minutos
- Rousseau em 90 minutos
- Santo Agostinho em 90 minutos
- São Tomás de Aquino em 90 minutos
- Sartre em 90 minutos

Schopenhauer em 90 minutos
Sócrates em 90 minutos
Spinoza em 90 minutos
Wittgenstein em 90 minutos

Título original:
Bohr and quantum theory

Tradução autorizada da primeira edição inglesa, publicada em 1998 por Arrow Books, de Londres, Inglaterra

Copyright © 1998, Paul Strathern

Copyright da edição brasileira © 1999:
Jorge Zahar Editor Ltda.
rua Marquês de São Vicente 99 - 1º andar
22451-041 Rio de Janeiro, RJ
tel: (21) 2529-4750 / fax: (21) 2529-4787
editora@zahar.com.br
www.zahar.com.br

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação de direitos autorais (Lei 9.610/98)

Grafia atualizada respeitando o novo
Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Ilustração: Lula

ISBN: 978-85-378-0440-7

Edição digital: junho 2011

Arquivo ePub produzido pela **Simplíssimo Livros**
