

Niels Bohr e a teoria quântica



O brasão adotado por Bohr quando foi sagrado cavaleiro, com o símbolo chinês do Yin e Yang e a frase latina *Contraria sunt complementa* (Os opostos são complementares).

Prêmio Nobel de 1922, o dinamarquês Niels Bohr é considerado, depois de Einstein, o maior físico do século XX. E um dos homens que mais radicalmente influenciaram a visão de mundo contemporânea. Seu modelo quântico do átomo, publicado em 1913, é o marco inicial da física atômica. Nos anos 1920, inspirou e liderou toda uma brilhante geração de físicos de várias nacionalidades, que, em um esforço coletivo, estruturaram a mecânica quântica, revolucionando os conceitos da ciência. Às vésperas da Segunda Guerra Mundial, seus cálculos sobre o núcleo do átomo trouxeram novos esclarecimentos sobre o fenômeno da fissão nuclear, abrindo caminho para a construção da bomba atômica.

Embora tenha participado por dois anos do projeto de produção da bomba, Bohr – assim como Einstein – logo se conscientizou da terrível perspectiva que ela trazia para a humanidade. Já em 1944, tentou, inutilmente, persuadir o primeiro-ministro britânico Churchill e o presidente norte-americano Roosevelt da necessidade de negociações internacionais, incluindo a União Soviética, para tratar da questão. Em plena década de 1950, contaminada pela “guerra fria” entre Estados Unidos e União Soviética, empenhou-se a fundo na luta por um uso pacífico da energia atômica e, em carta pública à ONU, clamou pela construção de um “mundo aberto”, convencido de que o livre trânsito de pessoas e ideias era indispensável ao controle dos artefatos nucleares.

Bohr foi uma das mais festejadas celebridades da história da ciência. A mansão com a qual foi presenteado, em 1931, pela Real Academia Dinamarquesa de Ciência e Letras tornou-se local de peregrinação obrigatório para grandes cientistas, artistas e chefes de

Estado em visita à Dinamarca. Um divertido cartum publicado na imprensa dinamarquesa o mostra, já velhinho, quase achatado pelo peso das medalhas, comendas, diplomas e demais honrarias que recebeu ao longo da vida.

Picasso e Kandinsky

Se Einstein desempenhou na ciência um papel semelhante ao de Picasso nas artes, Bohr pode ser comparado a outro grande inovador da pintura, o russo Wassily Kandinsky. A analogia se justifica. Embora revolucionário, Picasso é herdeiro de uma longa tradição de arte figurativa. Suas imagens, extraordinariamente originais, ainda estão associadas a objetos que nos são familiares: homens, cachimbos, guitarras, frutas. Já Kandinsky, ao recriar a pintura abstrata, rompeu totalmente com essa tradição. Os signos que cobrem suas telas não se referem ao mundo que julgamos conhecer a partir do senso comum, mas a outro nível de realidade.

Com a teoria da relatividade, Einstein revolucionou conceitos fundamentais da física, afirmando que as medidas de espaço e tempo não são valores absolutos, mas dependem do movimento do observador; que a matéria e a energia se convertem uma na outra; que a força gravitacional pode ser pensada como uma deformação geométrica do espaço-tempo. Até o final de sua vida, porém, manteve-se fiel a alguns pressupostos da visão de mundo clássica: o de que as “leis” da natureza determinam rigorosamente os fenômenos; o de que o cientista pode conhecer essas “leis” e, portanto, descrever os fenômenos “de fora”, com total objetividade. Foram esses pressupostos básicos que Bohr abandonou na chamada “Interpretação de Copenhague” da mecânica quântica. Nela, a incerteza em relação às grandezas investigadas e a interferência do observador no fenômeno que pretende observar, modificando suas características, são reconhecidas como algo inerente ao processo de conhecimento. Não o resultado de uma atividade científica deficiente, mas uma “limitação natural” de nossa capacidade de conhecer.

A “Interpretação de Copenhague” está longe de ser a última palavra no assunto. Desde os anos 1930, quando assumiu seus contornos definitivos, explicações ainda mais ambiciosas e radicais foram apresentadas por físicos como o norte-americano David Bohm e outros. Ela continua aceita, porém, pela maioria da comunidade científica. E, mesmo que venha a ser substituída, em futuro próximo, por uma concepção mais profunda e abrangente da realidade, isso não lhe tira o mérito histórico de ter sido marco inicial da abertura de mentalidades que hoje se expressa na busca de novos paradigmas para as ciências.

Toda a tradição racionalista apóia-se na rígida distinção entre sujeito e objeto. Aquele que pensa e aquilo que é pensado. A física clássica tratava essa distinção como óbvia.

Ninguém em sã consciência confundiria a maçã que cai da árvore com a mente brilhante de Isaac Newton, capaz de elaborar uma teoria acerca do fenômeno. Porém, quando chegamos a áreas de fronteira do conhecimento, como ocorreu na formulação da teoria atômica, essa distinção já não nos parece tão clara.

O “eu” que observa o “eu”

Bohr teve a percepção disso talvez antes mesmo de ouvir falar em átomos. Foi por meio de um livro, lido na juventude e do qual jamais se separou até o final de sua vida. Já maduro, ele mantinha um exemplar desse livro, todo sublinhado e inúmeras vezes manuseado, em seu escritório de diretor do Instituto de Física Teórica de Copenhague. Sempre que um novo físico estrangeiro chegava para uma temporada de trabalho no Instituto (e isso ocorria frequentemente, pois, graças a Bohr, a capital da Dinamarca se transformara na Meca da física de vanguarda de antes da Segunda Guerra Mundial), o livro lhe era passado. Aquilo funcionava como uma espécie de ritual de iniciação para o visitante.

Tratava-se de uma novela do escritor Poul Martin Møller, *As aventuras de um estudante dinamarquês*. Nela ocorre o engraçado diálogo entre dois primos: um dotado de espírito prático; o outro, dado a divagações filosóficas. Quando o primeiro repreende o segundo por ainda não ter arrumado emprego, este responde: “É por causa de meu estudo sem fim da questão que não realizo nada. Agora mesmo, estou pensando sobre meus pensamentos acerca disso. Sim, estou pensando sobre o fato de estar pensando, e divido a mim mesmo em uma série recessiva infinita de ‘eus’, que se contemplam uns aos outros. Não sei em qual parar e considerar como sendo o ‘eu’ real, e, no instante em que paro, há outro ‘eu’ parado lá. Torno-me confuso e tomado pela vertigem, como se estivesse encarando um abismo sem fundo, e o pensamento termina em uma horrível dor de cabeça”.

O físico Leon Rosenfeld, que foi colaborador íntimo e biógrafo de Bohr, acreditava que, embora se divertisse com as desventuras do pobre estudante, este não deixava de vê-lo como uma espécie de caricatura sua. A aguda compreensão de que a realidade está sempre além de nossa capacidade de descrevê-la fazia com que escrever um texto científico fosse para ele uma verdadeira tortura. Apesar da extraordinária capacidade de trabalho e de ser um conferencista brilhante quando falava de improviso, sentia enorme hesitação na escolha da expressão escrita adequada aos seus pensamentos, podendo lutar horas e até dias com uma única frase ou palavra. Era como se buscasse comunicar em cada sentença todos os matizes da verdade que podia intuir, as ressalvas, as reservas, os poréns [1].

Uma famosa anedota a respeito da complexidade da expressão de Bohr nasceu de uma entrevista coletiva sua à imprensa. Depois que levou um tempo enorme tentando explicar determinado assunto de maneira tão completa quanto possível, os jornalistas sentiram-se totalmente à deriva e resolveram pedir socorro ao irmão de Niels, Harald Bohr, um grande matemático, também presente, solicitando-lhe que resumisse a exposição. Harald foi rápido e preciso, e então perguntou ao irmão: “É isso mesmo que você queria dizer?”. Ao que Niels respondeu, contrariado: “Ora, Harald, você diz isso de maneira terrivelmente clara!”.

Uma infância segura e feliz

Não devemos imaginar, porém, que Bohr fosse um gênio atormentado. Longe disso. Há poucos exemplos, em toda a história da ciência, de uma personalidade tão equilibrada, harmoniosa e bem-sucedida quanto a sua. Ele não foi um hipocondríaco atormentado por problemas financeiros como Kepler. Não foi um polemista arrogante, vaidoso e perseguido por suas idéias como Galileu. Não foi um celibatário ressentido e vingativo como Newton. Nem sequer uma criança mal ajustada ou o protagonista de uma séria crise conjugal como Einstein.

Niels Henrik Bohr nasceu em Copenhague, Dinamarca, no dia 7 de outubro de 1885. Sua infância, segura e feliz, transcorreu em ambiente familiar caloroso, encorajador, culto e muito bem respaldado economicamente. O pai, Christian Bohr, professor de fisiologia da Universidade de Copenhague, era cientista de renome internacional. A mãe, Ellen Adler Bohr, pertencia a uma das mais ricas e ilustres famílias judias da Dinamarca. O irmão menor, Harald, antes de se tornar matemático, destacou-se nacionalmente como jogador de futebol e foi, ao longo de toda a vida de Niels, seu amigo mais íntimo.

Ainda estudante na Universidade de Copenhague, Bohr recebeu a medalha de ouro da Real Academia Dinamarquesa de Ciências e Letras pelo desenvolvimento de um método original para determinar a tensão superficial da água. Doutorou-se, em 1911, com uma tese sobre a teoria eletrônica dos metais, em que já realçava a inadequação da física clássica para o tratamento dos fenômenos no nível atômico.

Thomson e Rutherford

Com um prêmio em dinheiro da Fundação Carlsberg – o primeiro dos muitos que receberia ao longo da vida –, viajou para Cambridge, Inglaterra, onde esperava trabalhar

com Joseph John Thomson, descobridor do elétron e Prêmio Nobel de Física de 1906. Thomson era, então, o herói científico de Bohr. Mas, suficientemente jovem e sincero, Bohr apontara, em sua tese de doutoramento, erros de cálculo cometidos por Thomson. Foi demais para a vaidade do inglês. Quando o dinamarquês chegou a Cambridge, Thomson o recebeu friamente. Tão friamente que, na primeira oportunidade, Bohr mudou-se para Manchester, juntando-se ao grupo de físicos que, sob a entusiasmada liderança do neozelandês Ernest Rutherford, avançava às apalpadelas no misterioso espaço interior do átomo. Com Rutherford, sim, a empatia foi total. Ele e Bohr tinham em comum uma grande abertura mental, corações calorosos e, principalmente, exuberante senso de humor.

Thomson imaginara o átomo como um pudim de passas. A carga positiva formaria a massa compacta do pudim. Os elétrons negativos, que ele mesmo descobrira, fariam o papel das passas, salpicadas aqui e ali. Sabemos hoje que esse modelo saboroso é fisicamente insustentável. Pois, em contato direto, cargas elétricas de sinais contrários se anulam. Para manter sua identidade elétrica, essas cargas precisam estar separadas. Rutherford demonstrou, experimentalmente, que tal separação ocorria no interior do átomo. As partículas alfa haviam sido recentemente descobertas. Bombardeando os átomos de uma finíssima folha de ouro com um feixe de partículas alfa, ele verificou que a maioria das partículas atravessava a folha praticamente sem se desviar, enquanto umas poucas eram violentamente rebatidas [2].

O neozelandês concluiu daí que os átomos estruturavam-se como minúsculos sistemas planetários. A maior parte de seu espaço interior seria formada por uma região vazia, atravessada sem problemas pelas diminutas partículas alfa. A carga positiva estaria toda concentrada em um núcleo central, responsável pelos rebatimentos das partículas. Separados da carga positiva pelo vazio, os elétrons negativos girariam ao redor desse núcleo como os planetas em torno do Sol.

O modelo planetário de Rutherford tinha tudo para dar certo: ajustava-se perfeitamente às observações experimentais; era simples e fácil de ser representado graficamente; e sua analogia com o Sistema Solar fornecia à inteligência a reconfortante idéia de que um mesmo padrão regia as diferentes estruturas do Universo, do microcosmo ao macrocosmo. Sua força como imagem era mesmo tão grande que ele foi definitivamente incorporado como representação do átomo, no repertório comum da cultura de massas.

Apresentava, porém, um defeito, suficientemente importante para comprometer sua legitimidade aos olhos da ciência. Pois contrariava uma lei fundamental da física clássica. Segundo esta, cargas em movimento emitem radiação eletromagnética, e, ao fazê-lo, perdem energia continuamente. Isso significa que os elétrons em trânsito seriam necessariamente desacelerados, descrevendo órbitas cada vez menores e chocando-se contra o núcleo atômico em uma fração de segundo. Se assim fosse, não sobraria

nenhum átomo no Universo e nós não estaríamos aqui para falar do assunto. Não é o que acontece na natureza, felizmente. Sabemos que os átomos permanecem estáveis por longo tempo.

Um intelecto menos ousado teria simplesmente descartado o modelo planetário, em nome das velhas e boas leis da física. Mas Niels Bohr agiu de outra maneira. Com o atrevimento que caracteriza as inteligências realmente livres e criadoras, ele se lançou à gigantesca tarefa de corrigir o deficiente modelo de Rutherford, sem cair de quatro diante dos dogmas científicos.

“No meio de meus pensamentos selvagens”

Em 1912, Bohr estava noivo de Margrethe Norlund e, da Inglaterra, escrevia-lhe diariamente. Essas cartas nos permitem acompanhar, passo a passo, a fervilhante evolução de seu pensamento. No dia 26 de maio, ele assistiu a uma apresentação de Otelo, de Shakespeare. A peça o colocou em tal estado de excitação mental que ele perdeu o sono. Era madrugada quando escreveu a Margrethe: “No meio de meus pensamentos selvagens, sinto o tempo todo que há algo crescendo em minha mente”. Na carta do dia 28, ele afirmou: “Acredito que talvez tenha resolvido uma coisinha. O que posso fazer com isso e o que pode decorrer daí não sei em absoluto”. Uma semana depois, foi a Harald que ele se dirigiu, escrevendo que trabalhava em uma idéia que “poderia trazer uma pequena luz a algumas questões relativas à estrutura do átomo”. Junho, julho e agosto transcorreram em ritmo frenético. Bohr trabalhava dia e noite, em uma intensidade que teria deixado outros cientistas exaustos. Após calcular e recalcular, concluiu que não era a idéia geral do modelo de Rutherford que estava errada; eram as leis da física clássica que não se aplicavam aos fenômenos atômicos!

Bohr corrigiu o deficiente modelo planetário de Rutherford incorporando a ele o conceito quântico de energia, proposto, em 1900, pelo alemão Max Planck. É preciso abrir aqui um largo parêntese para avaliar todo o alcance dessa contribuição. Na física clássica, a energia é pensada como uma espécie de fluido, capaz de ser armazenado pelos corpos materiais e de se transferir continuamente de um corpo a outro quando eles interagem. Não existe uma quantidade mínima, indivisível, de energia. Por menor que seja a porção, sempre é possível fracioná-la em porções ainda menores. Ao estudar a radiação emitida por um corpo aquecido, porém, Planck percebeu que os cálculos poderiam ser muito simplificados se, em vez desse fluido contínuo, a energia fosse concebida como um fluxo descontínuo de “grãos” indivisíveis.

A idéia inspirava-se no antigo atomismo grego. Sabemos que, para os filósofos atomistas da Grécia (Demócrito, Leucipo e outros), a matéria não podia ser dividida

indefinidamente. Em certo ponto da divisão, chegava-se a um componente mínimo, o “átomo”, palavra que significa exatamente “indivisível”. Ao descobrir o elétron, Thomson demonstrou que o átomo podia ser decomposto em partes ainda menores, possuindo, portanto, uma estrutura interna. E o modelo planetário de Rutherford seria uma tentativa de representar essa estrutura. Mas, ainda em 1900, foi no atomismo de Demócrito e Leucipo que Planck se baseou, adaptando ao domínio da energia o conceito de “indivisível” que os gregos haviam forjado para explicar a estrutura da matéria. Constituída por quantidades mínimas indivisíveis, a energia não fluiria continuamente de um corpo a outro, mas se transmitiria em pequenos bocados, de forma descontínua.

Planck batizou esses “átomos” de energia com a palavra latina quanta (plural de quantum). Mas, a bem da verdade, não acreditava em sua existência física. Em seu entendimento, os quanta eram apenas um bom artifício de cálculo. Conservador, filho de jurista, temia que o abandono dos princípios clássicos levasse a física ao caos. Muitos anos mais tarde, em sua autobiografia, confessaria não ter percebido na época as conseqüências revolucionárias da concepção quântica de energia. Porém, o gancho lançado por ele foi rápida e firmemente agarrado por Einstein. Em 1905, na mesma época em que lançou sua versão da teoria especial da relatividade, o então jovem físico judeu-alemão utilizou o conceito quântico de energia para explicar o chamado efeito fotoelétrico – a propriedade que certos corpos possuem de emitir elétrons quando banhados pela luz.

Convencido de que a descontinuidade da energia era uma realidade física, Einstein chegou a nova concepção sobre a natureza da luz: ela não seria uma onda que se propagava no éter, como afirmara a física clássica, porém um fluxo de corpúsculos, depois batizados como fótons (os quanta de energia eletromagnética). Sete anos mais tarde, Bohr foi o próximo a fazer um uso revolucionário da idéia da quantização da energia. O modelo de átomo que dela resultou inaugurou a nova física atômica e pôs em xeque o paradigma científico dominante.

O átomo de Bohr

A quantização da energia faz com que, no interior do átomo, o elétron só possa se mover em determinadas órbitas, situadas a distâncias precisas do núcleo – distâncias nas quais sua energia de movimento (cinética) possui valores que são múltiplos inteiros do quantum. As posições intermediárias são proibidas, porque, para a partícula transitar por elas, sua energia de movimento teria que corresponder a múltiplos fracionários do quantum – o que contraria a própria idéia da indivisibilidade dessa quantidade mínima.

Nas órbitas permitidas, também chamadas de “estados estacionários”, o elétron se move sem irradiar energia. A troca de energia com o meio só ocorre quando a partícula salta de uma dessas órbitas a outra. Assim, ao receber do meio exterior um quantum de energia, o elétron desaparece de sua órbita original e aparece instantaneamente em outra órbita permitida, mais afastada do núcleo. Diz-se que o átomo está, então, em um “estado excitado”. Pouco depois, ele retorna ao seu “estado fundamental”, quando o elétron salta de volta à órbita primitiva, devolvendo ao meio exterior o quantum de energia excedente, na forma de fóton ou “grão” de radiação eletromagnética.

Embora fosse ainda uma construção incipiente, concebida apenas para o átomo de hidrogênio (o mais simples de todos, dotado apenas de um próton e de um elétron), o modelo atômico de Bohr já transgredia amplamente a visão de mundo da física clássica. Não apenas pela utilização do conceito quântico de energia e pela concepção dos “estados estacionários”, nos quais a partícula se movimenta sem emitir radiação, mas também pelas consequências que daí decorrem. Uma delas é que, ao saltar de uma órbita a outra, o elétron deve fazê-lo sem passar pelo “espaço intermediário”. Como já foi dito, ele desaparece de uma órbita para reaparecer instantaneamente na outra – algo que desafia o senso comum, baseado na observação grosseira dos fenômenos da vida cotidiana.

Apesar de o salto eletrônico admitir outras interpretações, uma primeira tentativa de explicação é dizer que a descontinuidade da energia implica em uma descontinuidade também do espaço. Desse ponto de vista, o “espaço intermediário” entre duas órbitas estacionárias consecutivas simplesmente não existe. Pois, para que o elétron pudesse ocupá-lo, teríamos que somar ou subtrair ao seu nível energético uma fração do quantum. O desenvolvimento posterior da teoria quântica, que chegou a seu ponto de maturação no final da década de 1920, aprofundaria ainda mais o abismo que separa essa construção intelectual do paradigma científico moderno, erigido a partir da física de Newton.

O resumo de uma vida

Ainda em 1912, depois de sua maratona intelectual, Bohr regressou à Dinamarca e casou-se com Margrethe. Ela seria sua companheira de toda a vida, amiga íntima e confidente. Margrethe lhe daria cinco filhos homens: Christian, Hans, Erik, Aage e Ernest. Christian, jovem de grande sensibilidade e talento científico e artístico, morreria afogado em 1934, quando uma tempestade o arrancou do barco “Chita”, em que velejava na companhia do pai e de outros. Foi a maior tragédia vivida por Bohr. Desesperado, ele precisou ser agarrado pelos amigos para não se atirar nas ondas enfurecidas em busca do filho. Aage seguiria a carreira do pai, trabalhando com ele no projeto da bomba, em Los Alamos, Estados Unidos; sucedendo-o na direção do Instituto de Física Teórica; e sendo também agraciado com o Prêmio Nobel, em 1975.

Com a inevitável simplificação inerente a toda biografia – ainda mais uma biografia sumária como esta –, pode-se dividir a trajetória de Bohr em três etapas distintas. A primeira, caracterizada por exuberante energia juvenil e por uma ousadia intelectual que beira ao atrevimento, culminou com a criação do modelo atômico. Vislumbres geniais e idéias revolucionárias temperaram-se nela com um método de trabalho ainda convencional: agindo predominantemente sozinho, o cientista reuniu dados experimentais, elaborou uma teoria capaz de explicá-los e buscou comprovar sua teoria com a realização de novos testes.

Na segunda etapa, dominada pela construção da teoria quântica, ele se afastou definitivamente dessa figura algo romântica do gênio solitário. Percebendo a tremenda complexidade da tarefa que tinha pela frente, procurou reunir à sua volta o maior número de talentos. Tornou-se então principalmente um líder: inspirador e catalisador do trabalho coletivo de toda uma geração mais jovem de cientistas brilhantes. Sob sua batuta, o Instituto de Física Teórica de Copenhague, hoje Instituto Bohr, transformou-se em um centro mundial da ciência de vanguarda. Submetendo as idéias extravagantes de seus colaboradores a um questionamento severo, procurando traduzir em palavras o ultra-abstrato formalismo matemático da teoria quântica, Bohr se revelou um sofisticado filósofo da ciência.

Na terceira etapa, finalmente, ele teve que gerir a enorme celebridade conquistada nas fases anteriores. Patrimônio da cultura dinamarquesa, sua casa estava permanentemente aberta aos mais ilustres visitantes estrangeiros. Graças ao charme e à calorosa hospitalidade de Margrethe, pôde-se sair muito bem nessa delicada tarefa. Mas a fama não o afastou da atividade intelectual. Como filósofo da ciência, procurou estender alguns dos mais importantes conceitos da teoria quântica, como o princípio da complementaridade [veja adiante], aos mais diversos campos do conhecimento e da atividade humana. Como cientista no sentido estrito da palavra, incursionou, já idoso, por novas e promissoras áreas de investigação, como a biologia molecular.

Algumas de suas últimas fotos nos dão um vislumbre de sua extraordinária dimensão como ser humano: imerso em reflexões, com seu cachimbo antológico; ao lado de Margrethe; cercado de netos, com um sorriso escancarado nos lábios; conversando com o prêmio Nobel da Paz Albert Schweitzer; recebendo a rainha Elizabeth II, da Inglaterra, em sua residência oficial; discursando para uma multidão em Moscou, tendo como o intérprete o brilhante físico soviético Lev Landau. Intelectualmente ativo até seu derradeiro dia de vida, 18 de novembro de 1962, Bohr, então com 77 anos, gravou naquela data a última das cinco fitas de depoimentos que concedeu ao grande historiador da ciência Thomas Kuhn, sobre a criação da teoria quântica.

A batalha da teoria quântica

Tudo isso aconteceria, porém, muitos anos mais tarde. No início da década de 1920, Bohr estava no auge de sua vitalidade. Em reconhecimento à sua contribuição ao desvendamento da estrutura do átomo, a Real Academia Sueca concedeu-lhe, em 1922, o Prêmio Nobel de Física. E a Universidade de Copenhague criou, especialmente para ele, o Instituto de Física Teórica. À frente dessa instituição, que dirigiu até o final da vida, tratou de aglutinar, na capital da Dinamarca, seu batalhão de gênios científicos: o alemão Werner Heisenberg e o austríaco Wolfgang Pauli, os russos Georg Gamow e Lev Landau, o sueco Oskar Klein e o norueguês Hendrik Kramers, o húngaro George de Hevesy e o norte-americano John Slater, para citar apenas os mais famosos.

Depois do modelo atômico de Bohr, o edifício em construção da teoria quântica ganhou mais um pavimento por obra do físico e príncipe francês Louis de Broglie. Se a luz, antes considerada um fenômeno ondulatório, possuía também natureza corpuscular, como demonstrara Einstein, por que não cogitar que os objetos tratados como corpúsculos (elétrons e até mesmo átomos) pudessem exibir, em determinadas condições, propriedades de onda? De forma simplificada, foi essa a indagação que De Broglie se fez. A partir dela, chegou a uma equação que associa a qualquer corpo material uma onda. Se a massa do corpo é muito grande, como ocorre com os entes macroscópicos, o comprimento de onda se torna tão pequeno que escapa a capacidade de detecção dos instrumentos de medida. Quando a massa é pequena, porém, como acontece com os átomos e partículas subatômicas, as características ondulatórias se tornam bastante expressivas.

De Broglie realizou essa previsão teórica em 1924. Três anos mais tarde, ela foi confirmada experimentalmente, quando se observou que, ao incidir sobre um cristal, os feixes de elétrons exibiam propriedades ondulatórias típicas, como a difração. A compreensão desse comportamento dúbio – ora corpuscular ora ondulatório – dos objetos atômicos suscitou muita controvérsia nos meios científicos.

O famoso “experimento das duas fendas” esteve no centro da polêmica. Acompanhemos, passo a passo, o seu desenvolvimento:

- O aparato experimental consiste em uma fonte de elétrons que emite uma partícula de cada vez. As partículas só podem passar através de duas fendas paralelas e incidem em um anteparo recoberto com papel fotográfico situado atrás delas.
- Estudando a distribuição das impressões produzidas no papel, os cientistas buscam determinar como as fendas influenciam as trajetórias dos elétrons.
- Quando apenas uma delas está aberta, as impressões formam uma faixa na área do papel situada em frente à fenda. A intensidade dessa faixa é máxima em sua

linha média e diminui à medida que se avança para as duas extremidades. Isso corresponde perfeitamente a uma distribuição clássica de impactos produzidos por corpúsculos e não há nada de inesperado no resultado experimental.

- Tudo muda, porém, quando se abrem simultaneamente as duas fendas. Em lugar de duas únicas faixas, uma para cada fenda, o que aparece então é uma série de faixas paralelas. Nos intervalos entre elas, a densidade dos pontos produzidos pelos impactos decai gradualmente. E também diminui à medida que as faixas se afastam do centro.
- A figura formada é típica de um fenômeno conhecido como “interferência”, que ocorre quando dois ou mais movimentos ondulatórios se sobrepõem.
- Isso significa que os elétrons se propagam pelo aparelho como se fossem ondas. Ao baterem no papel fotográfico, porém, continuam produzindo impressões pontuais – características dos corpúsculos. E o paradoxo está nesse comportamento ambíguo, ora corpuscular ora ondulatório, das partículas.

Três interpretações consistentes foram apresentadas em um primeiro momento para o fenômeno: a do próprio De Broglie, a do físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961); e a da chamada Escola de Copenhague, aglutinada em torno de Bohr. Mais tarde, surgiram outras interpretações, ainda mais sofisticadas, notadamente duas delas, propostas em épocas diferentes pelo físico norte-americano David Bohm (1917-1994). Vejamos, em uma apresentação ultrassimplificada, essas cinco interpretações:

- Interpretação de De Broglie: O elétron é, de fato, um corpúsculo, mas sempre acompanhado por uma onda, que guia o seu movimento. Mais rápida do que o corpúsculo, essa “onda-piloto” define a trajetória que ele pode percorrer. A “onda-piloto” não conduz energia. Porém, manifesta propriedades ondulatórias clássicas, como reflexão, difração e interferência, que podem ser observadas experimentalmente.
- Interpretação de Schrödinger: O elétron é, de fato, uma onda, mas, ao interagir com outros objetos, sua energia se concentra e produz um fenômeno pontual. A quantização decorre da interação. Uma anedota, que circulou entre os cientistas da época, afirma que, se o mesmo princípio valesse no mundo macroscópico, ao atirar uma pedra grande na água romperíamos o casco de um navio situado longe da margem.
- Interpretação do Copenhague: Não sabemos nem interessa saber o que o elétron realmente é, mas, sim, como ele se comporta no contexto da observação. E ele se comporta ora como corpúsculo ora como onda. Embora esses conceitos clássicos sejam mutuamente excludentes, é preciso considerar ambos para ter uma descrição exaustiva do fenômeno (Princípio da Complementaridade de Bohr).
- Primeira interpretação do Bohm: Antes de o elétron ser observado, a simples presença da aparelhagem experimental cria um “campo quântico” à sua volta. Este determina uma estrutura no espaço, definindo as trajetórias possíveis da partícula. Ao contrário do que ocorre com os campos clássicos, a intensidade do “campo quântico” é constante, não decaindo com o quadrado da distância.
- Segunda interpretação de Bohm: As partículas subatômicas não são objetos individuais, mas expressões de uma “totalidade indivisível”, como diminutas pontas de um gigantesco iceberg. A maior parte do iceberg permanece inacessível à observação, constituindo o que Bohm chamou de “ordem

implícita”. O próprio ato de observar, que exige troca de energia entre o aparato de observação e o sistema observado, produz flutuações na “totalidade indivisível”, fazendo algumas pontas imergirem e outras emergirem. Isso produz no observador a ilusão de partículas em movimento.

Todas essas interpretações dão conta do fenômeno observado e possuem uma impecável lógica interna. Diferem radicalmente, porém, em suas visões de realidade. Duas gerações mais moço do que Bohr, David Bohm apresentou sua primeira interpretação na década de 1950 e a segunda já nos anos 1980. Esse caráter tardio fez com que suas interpretações, extremamente revolucionárias, tivessem um impacto relativamente pequeno na história da ciência. A grande batalha pela interpretação da teoria quântica ocorreu na década de 1920. E, nela, Bohr e companhia levaram a melhor.

Certo viés empirista

Dois fatores contribuíram para o sucesso da Escola de Copenhague. O primeiro foi certo viés empirista, que vinha ao encontro da mentalidade científica dominante. Uma velha aversão à metafísica, cujas raízes devem ser buscadas na filosofia nominalista do século XIV senão em fontes ainda mais antigas, fez com que se consolidasse pouco a pouco no seio da comunidade científica a idéia de que a natureza última da realidade não é assunto da ciência. A esta não interessaria saber o que a realidade efetivamente é, mas apenas como ela se comporta. Ora, esse parece ser o cerne da chamada Interpretação de Copenhague. Embora seu pensamento compreenda muitas nuances, Bohr e colaboradores aparentemente se renderam à idéia de que a verdadeira natureza dos objetos quânticos não dizia respeito à física, mas à metafísica. Na impossibilidade de conhecer o elétron, a “coisa em si”, caberia aos cientistas tão somente descrever seu comportamento no contexto experimental.

Dependendo de como o experimento era organizado, ele se comportava ora como corpúsculo ora como onda. Os comportamentos corpuscular e ondulatório dos objetos atômicos seriam como duas faces da mesma moeda. Para descrever a moeda de forma exaustiva, havia que olhar cada uma delas. Mas era impossível olhá-las de frente ao mesmo tempo. Quando uma face era encarada, a outra se escondia. Desistindo de investigar um nível mais profundo da realidade, no qual a dualidade partícula-onda pudesse eventualmente ser superada, Bohr contornou o problema com seu famoso Princípio da Complementaridade, segundo o qual modelos mutuamente contraditórios, porém dotados de coerência interna, são imprescindíveis para uma descrição exaustiva dos fenômenos. Suas palavras: “Evidências obtidas sob diferentes condições experimentais não podem ser compreendidas dentro de um quadro único, mas devem ser vistas como complementares, no sentido de que só a totalidade do fenômeno esgota as informações possíveis sobre os objetos”.

Em seus anos maduros, ele procurou fazer da complementaridade um princípio filosófico geral, aplicável aos mais variados campos do conhecimento. E, quando foi nomeado cavaleiro, no final de década de 1940, adotou como motivo de seu brasão de armas o símbolo chinês do *Yin e Yang*, encimado pela frase latina *Contraria sunt complementa* (Os opostos são complementares). Como orientação para a vida prática, o Princípio da Complementaridade oferece excelente antídoto contra todas as formas de fanatismo. Mas, como diretriz para o processo cognitivo, não deixa de constituir uma capitulação frente ao empirismo. A própria analogia com o Yin e Yang revela-se inconsistente, pois, na antiga filosofia chinesa, esses princípios arquetípicos regem um nível muito mais profundo de realidade do que aqueles descritos pelos modelos científicos. Ademais, os místicos taoístas sempre insistiram na existência de um nível ainda mais profundo de experiência, no qual toda dualidade é transcendida e a realidade se apresenta como uma unidade indiferenciada.

A influência do observador

O fato de o comportamento da partícula depender de como o experimento era organizado pôs em evidência um aspecto crucial e até então negligenciado do processo cognitivo: a influência do observador no fenômeno observado. Um dos dogmas da ciência moderna é a presunção de que, ao realizar um experimento, o experimentador deve permanecer tanto quanto possível “de fora”, para não comprometer a pretensa objetividade de seus resultados. Bohr e colaboradores constataram que, por mais cuidadosa que fosse a experiência, por mais neutro que ficasse o observador, o próprio ato de observar interferia inevitavelmente no fenômeno observado.

Ao estudarmos a realidade macroscópica, essa influência pode ser obscurecida pela margem de erro admitida nas medições. Na escala atômica e subatômica, porém, ela, por assim dizer, salta aos olhos, pois as ordens de grandeza do sistema que está sendo medido e do sistema de medição são praticamente as mesmas. Torna-se impossível demarcar claramente a fronteira entre o fenômeno e o aparato experimental. Em que pese sua escorregadela empirista, a Escola de Copenhague demoliu o dogma da objetividade do processo cognitivo – e esta não foi uma contribuição de pequena importância.

Rolo compressor

O outro fator do sucesso da Interpretação de Copenhague foi de natureza mais política do que científica. É o que sustenta o físico e filósofo da ciência James Cushing,

professor da Universidade de Notre Dame, nos Estados Unidos. Enquanto seus opositores, entre os quais Einstein, argumentavam de maneira isolada, tropeçando muitas vezes uns nos outros, a Escola de Copenhague atuava como um rolo compressor. Animados pelo dinamismo de Bohr, seus membros transformaram a defesa de seu ponto de vista numa verdadeira cruzada.

Um famoso episódio, decididamente tragicômico, ilustra bem a obstinação de Bohr na defesa de seu ponto de vista. Ele se tornou conhecido graças a Heisenberg, principal responsável pelo formalismo matemático da teoria quântica e, na época, o mais íntimo colaborador do gênio dinamarquês. Erwin Schrödinger havia chegado à sua célebre equação de onda, que descreve o comportamento das partículas subatômicas. A enorme vantagem da Equação de Schrödinger era o fato de ela proporcionar à teoria quântica uma ferramenta matemática relativamente simples e familiar. A interpretação que Schrödinger dava à sua fórmula colidia, porém, frontalmente com a de Bohr. Para o austríaco, já vimos, as ondas eletrônicas eram ondas físicas reais e não ondas probabilísticas, conforme a interpretação de Max Born (1882-1970), endossada pela Escola de Copenhague [3].

Ao saber disso, Bohr convidou Schrödinger a visitá-lo na capital da Dinamarca. As discussões entre anfitrião e convidado começaram já na estação de trem e prosseguiram por vários dias, desde manhãzinha até tarde da noite. Diz Heisenberg: “Embora Bohr fosse uma pessoa inusualmente atenciosa e cortês, ele era capaz, nesse tipo de discussão, de insistir fanaticamente e com uma clareza de argumentos quase terrificante”. E refutava, ponto por ponto, cada objeção de seu oponente, numa argumentação infinitamente trabalhosa. Como resultado do esforço intelectual, o pobre Schrödinger acabou adoecendo e teve que ficar de cama na casa dos Bohr. Enquanto Margrethe cuidava do hóspede tão bem quanto podia, o próprio Niels permanecia à cabeceira de sua cama quase o dia inteiro e a sentença “Mas Schrödinger, você tem que admitir que” era constantemente ouvida. Finalmente, o convidado teve um ataque de nervos e começou a gritar desesperado: “Se tivermos que continuar com esse maldito salto quântico, então lamento jamais ter tido qualquer coisa a ver com a teoria atômica”.

Cidadela da liberdade

Ao lado das especulações filosóficas, Bohr prosseguiu seu trabalho como físico. Depois do modelo do átomo e da mecânica quântica, os cálculos sobre o núcleo atômico, realizados na década de 1930, foram sua terceira grande contribuição científica. A questão era explicar como os componentes do núcleo podiam manter-se coesos, apesar da repulsão eletromagnética entre os prótons. O dinamarquês imaginou que atuaria entre eles uma força semelhante àquela que mantém a coesão de uma gota d'água. Apesar do caráter aproximado dessa hipótese, ela lhe permitiu explicar, com notável êxito, o

processo de fissão nuclear, quando um núcleo pesado se fragmenta em dois núcleos menores, liberando formidável quantidade de energia.

A Europa vivia então um momento tenebroso. A ascensão do nazismo na Alemanha punha em risco o próprio futuro da civilização. Percebendo a gravidade da conjuntura política e não se acovardando diante dela, Bohr passou a trabalhar ativamente na ajuda aos cientistas ameaçados por Hitler. A preocupação de que os alemães pudessem tirar partido das possibilidades militares da energia nuclear levou-o até a quebrar um segredo e revelar ao físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) que ele seria o ganhador do Prêmio Nobel de Física de 1938. Essa indiscrição providencial deu a Fermi e família a oportunidade de abandonarem a Itália fascista para o recebimento do prêmio na Suécia. De lá, eles voaram diretamente para os Estados Unidos, onde Bohr já lhes havia providenciado asilo e condições de sobrevivência.

Bohr tornou-se, ele próprio, um alvo dos nazistas. Quando os alemães invadiram a Dinamarca, em 1940, o cientista procurou ainda retardar ao máximo sua saída do país, fazendo do Instituto de Física Teórica de Copenhague uma autêntica cidadela da liberdade, um centro de resistência e ajuda aos refugiados. Em 1943, porém, sob ameaça de prisão imediata, ele, Margrethe e outros membros da família tiveram que fugir para a Suécia durante a noite, em um barco providenciado pelo movimento de resistência e pilotado pelo próprio cientista. Dias depois, Bohr era levado para a Inglaterra, em um vôo conturbado que quase lhe custou a vida. Ao chegar em Londres, descobriu, aturdido, quão adiantado estava o projeto anglo-americano de construção da bomba atômica.

Eterno retorno

Quando termina uma biografia? A de Niels Bohr encerra-se oficialmente na manhã de 18 de novembro de 1962, quando um ataque cardíaco lhe tirou a vida. Reconstruída a Europa após os horrores da guerra, ele empenhara todo o seu prestígio na promoção da paz e do diálogo Leste-Oeste e agora desfrutava de uma velhice tão bem vivida quanto o fora toda a sua existência. Mas, pensando na teoria do “eterno retorno” do filósofo Friedrich Nietzsche (1844-1900), talvez devêssemos encerrar esta brevíssima biografia décadas antes, em uma tarde ensolarada. A Interpretação de Copenhague da teoria quântica chegara à sua completa maturação. Bohr, Heisenberg e amigos saem para um passeio de barco. O vento favorável os arrasta para o Sul. No leme, Bohr está em um estado de espírito favorável à filosofia. Começa falando acerca das dificuldades da linguagem, das limitações de nossos meios de expressão, de quão gratificante era o fato de essa limitação já poder ser matematicamente incorporada à teoria atômica. Nesse momento, um de seus velhos conhecidos o interrompe abruptamente: “Ora, Niels, não há nada de novo nisso! Você nos dizia exatamente a mesma coisa quando éramos jovens!”.

Notas

[1] A reflexão filosófica de Bohr – inspirada pela leitura juvenil do texto de Møller, e amadurecida durante as densas conversas que manteve com Heisenberg e outros durante os anos de fundamentação da teoria quântica – o levou a uma concepção da realidade e do processo cognitivo muito semelhante à do budismo, especialmente no que se refere às noções budistas de “insubstancialidade do eu” e de “vazio” (*śūnyatā*). No entanto, discordando de tais concepções, seria preciso dizer que a “recessão infinita de eus” da divertida passagem de Møller só se sustenta no domínio da atividade cognitiva da mente, intrinsecamente dualista. Quando transcende o mental, porém, e avança, cada vez mais, no sentido da unidade, o observador se aproxima do que poderíamos denominar, apenas alusivamente, como o “Eu Final”. E, no limite da ascese, se identifica inteiramente com a Realidade Absoluta, que foi chamada de Parashiva pelo shaiva siddhanta, de Brahman pelo advaita vedanta, de Dao pelos taoistas chineses, de Ayn pelos cabalistas judeus, de Hén pelos neoplatônicos gregos etc. Referindo-se a esse nível supremo de experiência, o grande iogue Ramakrishna Paramahansa afirmou que ele era “mais firme do que o Monte Meru”, querendo dizer, provavelmente, que, nesse estágio, a consciência se estabiliza de todo, deixando de flutuar de “eu” em “eu”. A refutação exitosa dessas noções budistas foi feita, durante o século IX d.C., por Adi Shankaracharya. Como era costume na época, reconhecendo a superioridade da argumentação de Shankaracharya, os mestres budistas que debateram com ele renunciaram, depois, às suas concepções originais, e, humildemente, se tornaram discípulos do grande *advaitim* (monista). Para uma exposição um pouco mais desenvolvida do tema, ver o texto “A realidade absoluta e suas manifestações primordiais”, postado, neste Blog, na seção Espiritualidade / Conceitos.

[2] Emitidas espontaneamente pelos elementos radioativos ou durante processos induzidos de fissão nuclear (desintegração explosiva do núcleo atômico), as partículas alfa são constituídas por dois prótons e dois nêutrons. Dotadas de carga elétrica positiva (devido aos dois prótons), essas partículas possuem estrutura idêntica à do núcleo atômico do elemento hélio.

[3] Ondas probabilísticas – Dezesseis anos mais moço do que Bohr, Werner Heisenberg foi o autor de uma das peças fundamentais da teoria quântica, o Princípio da Incerteza. Ele afirma que é impossível determinar com precisão a posição e a velocidade de um objeto atômico. Quando se organiza um experimento de forma a determinar claramente a posição, a medição da velocidade fica extremamente incerta. Ao contrário, quando se procura medir com rigor a velocidade, é a posição que fica imprecisa. O Princípio da Incerteza fez com que o conceito de órbita, ainda utilizado no modelo atômico de Bohr de 1913, tivesse que ser descartado. A teoria já não nos permitiria um conhecimento preciso da trajetória do elétron, mas tão somente o conhecimento das trajetórias possíveis, dentro de uma faixa de indeterminação.

Professor de Heisenberg, Max Born tirou importantes conclusões do Princípio da Incerteza. De seu ponto de vista, a famosa equação de onda de Schrödinger não descreveria uma onda física real, mas uma onda de probabilidades. Em outras palavras, a fórmula nos informaria sobre o conjunto das posições que a partícula poderia ocupar a cada instante. E quais, entre as várias posições possíveis, eram mais ou menos prováveis. Porém, se uma determinada possibilidade iria mesmo se efetivar ou não, isso era algo que escapava à capacidade preditiva da teoria. A efetivação ou não de uma possibilidade seria puramente casual. Na visão de Born, endossada pela Escola de Copenhague, possibilidades e probabilidades são tudo o que podemos saber e o que há para saber. Esse enfoque revolucionário privava a física de seu caráter determinista, tão caro ao paradigma moderno.

Einstein reagiu indignado a essa introdução do acaso na ciência. Seu repúdio ao indeterminismo vinha de uma convicção profunda, de natureza filosófica e até religiosa, de que existe uma ordem no universo. E de que essa ordem é acessível à inteligência humana. Se não podíamos perceber essa ordem, era porque não sabíamos o suficiente. Daí sua “teoria das variáveis ocultas”, segundo a qual processos ainda mais profundos se desenvolveriam por trás da cena dos fenômenos atômicos. Uma vez conhecidos, esses processos permitiriam superar o indeterminismo da física quântica.

Cada uma das objeções de Einstein foi refutada por Bohr e companhia em famosa polêmica travada no final dos anos 1920. Foi talvez o debate mais estimulante de toda a história da ciência. A Interpretação de Copenhague acabou sendo adotada pela maioria dos físicos. Mas, ao contrário do que muitos manuais afirmam, a controvérsia não foi definitivamente resolvida e continuou motivando novas e sofisticadas elaborações teóricas, como as protagonizadas por David Bohm.

<http://josetadeuarantes.wordpress.com/2012/03/28/niels-bohr-e-a-teoria-quantica/>