[Uma versão deste texto foi publicada em *Ilustríssima, da Folha de S. Paulo* (02/06/13)]

A TRILOGIA BOHR

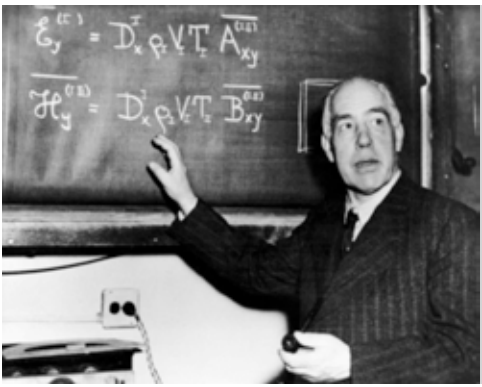
100 anos do modelo que levou a física quântica ao interior do átomo

com Antonio Augusto Passos Videira, UERJ

A identidade

Em 19 de junho de 1913, uma carta partiu de Manchester (Inglaterra) para a Dinamarca. Nela, havia a passagem: "Talvez, eu tenha feito uma pequena descoberta sobre a estrutura dos átomos. Não conte isso para ninguém."

De pequena, a descoberta nada tinha. Marcava o início da conquista do interior do átomo pela teoria quântica. O remetente era o jovem dinamarquês e recém-doutor em física teórica Niels



Niels Bohr

Crétido: Wikimedia Commons

Bohr (1885-1962), que, naquele momento, acabava um período de estudo com Ernest Rutherford (1871-1937), descobridor, dois anos antes, do núcleo atômico, caroço central onde se estocam 99% da massa do átomo. O mundo científico não levou a sério o modelo. Nem mesmo Rutherford achava ter feito algo importante.

Antes de Manchester, Bohr havia passado pouco tempo na então catedral mundial da física, o Laboratório Cavendish, em Cambridge (Inglaterra), para trabalhar com o descobridor do elétron, Joseph Thomson (1856-1940). Porém, seu inglês precaríssimo e alguma falta de tato social criaram dificuldades de relacionamento por lá.

Bohr decidiu aceitar convite de Rutherford. Depois de curto período de laboratório trabalhando com radioatividade – manualmente, o dinamarquês era desajeitado –, Bohr voltou sua atenção para o modelo atômico com núcleo, que, no entanto, tinha um problema sério: segundo o eletromagnetismo, elétrons, por terem carga elétrica (no caso, negativa), perderiam energia ao orbitar o núcleo e acabariam engolidos por este. Átomos, portanto, seriam instáveis e não deveriam existir.

O início da jornada de Bohr para livrar o átomo dessa 'incoerência' começou ainda em fevereiro de 1913, quando ele tomou conhecimento de resultados relativos ao modo como os átomos devolvem ao meio a luz (energia) que incide sobre eles. Vista com lentes especiais, a energia expelida se apresenta como raias (linhas paralelas) com cores (frequências) diversas. Esse é o chamado espectro atômico (ou raias espectrais). E cada átomo tem seu conjunto de raias, de 'risquinhos' coloridos, como um tipo de identidade.

Desde que os primeiros espectros atômicos começaram a ser medidos, partir da década de 1860, permanecia um mistério: por que raias e não uma faixa contínua de cores? A resposta a essa pergunta levaria quase 60 anos. E o feito seria de Bohr.

Abandonando o laboratório, Bohr, de volta à teoria, iniciou sua jornada rumo à estrutura atômica, depois de ouvir de um colega, o físico-químico húngaro Georg Von Hevesy (1885-1966), sobre os chamados isótopos – variações de um mesmo elemento químico,

cujo núcleo tem o mesmo número de prótons, mas diferente quantidade de nêutrons. Bohr logo percebeu que, na radioatividade, o núcleo, ao expelir parte nacos de si mesmo, mudaria de posição na Tabela Periódica, ou seja, os elementos se transformariam. Mais importante: a radioatividade tinha que ser um fenômeno nuclear. Comprovar essas ideias seria ratificar o modelo de Rutherford.

Entusiasmado, Bohr foi cinco vezes a Rutherford. Este – nutrido, talvez, pela má compreensão, incredulidade ou contumaz falta de tempo – não se entusiasmou. No ano seguinte, a lei do deslocamento radioativo entraria para o currículo de outros pesquisadores, dois químicos. No entanto, nessa primeira decepção científica de Bohr há a marca de algo que lhe acompanharia pela vida: a agudeza para relacionar fenômenos aparentemente desconexos.

Segundo subsídio importante para Bohr: seu contato com Charles Galton Darwin (1887-1962), neto do famoso naturalista Charles Darwin (1809-1882). Esse colega tentava entender como partículas alfa (dois prótons unidos a dois nêutrons) perdem energia ao atravessar a matéria, chocando-se quase exclusivamente contra os elétrons – o papel do núcleo nessas colisões é desprezível.

As contas de Darwin não batiam com os resultados experimentais. Bohr percebeu que o problema era seu colega ter tratado os elétrons como entidades livres no interior atômico. Bohr, porém, assumiu que essas partículas se comportavam como entidades vibratórias (osciladores) que absorviam e expeliam energia e estavam ligadas ao núcleo.

Para isso, Bohr usou as ideias do físico alemão Max Planck (1858-1947), que, em 1900, inaugurou a física quântica, ao propor que, na natureza, a energia é gerada ou absorvida em diminutos grânulos (batizados quanta). Bohr conjeturou que os elétrons só poderiam irradiar energia na forma de 'pacotinhos'.

O físico holandês Abraham Pais (1918-2000), em seu livro *Niels Bohr's times* (Os tempos de Niels Bohr; Oxford University Press, 1994), escreve: "Assim, a teoria quântica penetrou o interior do átomo pela primeira vez nos escritos de Bohr".

O modelo atômico quântico começava a se desenhar. Bohr consolidava sua identidade como físico.

A supremacia

O terceiro (e mais importante subsídio) a Bohr foi seu contato, em 6 de março de 1913, com uma fórmula que descrevia o espectro do átomo de hidrogênio, a chamada fórmula de Balmer – homenagem a um professor de uma escola de meninas na Basileia, o suíço Johann Balmer (1825-1898), que teve essa ideia aos 60 anos de idade e só publicaria mais dois artigos em vida.

A fórmula de Balmer descrevia e previa, com precisão, as raias coloridas no espectro do átomo de hidrogênio. Mas o que a fórmula significava? Três décadas de mistério se acumulavam até 1913.

Ao vê-la, Bohr – com aquela capacidade em juntar fenômenos aparentemente díspares – entendeu o porquê das raias do espectro. Segundo Pais, Bohr assumiu que a fórmula estava correta. E some-se a isso a convicção do jovem físico de que não seria possível explicar os átomos com a física clássica.

A composição básica do modelo quântico do átomo de hidrogênio estava completa. Sua essência: o elétron, ao girar em torno do núcleo, só pode fazer isso caso se mantenha em órbitas predeterminadas. Se o elétron receber luz – ou seja, um *quantum* de energia –, ele salta para uma órbita mais energética, passa fração de segundo lá e, ao voltar à sua órbita original, expele a energia na forma de um *quantum*.

É esse processo, repetido continuamente, que dá origem às raias espectrais. O espaçamento dessas linhas (a descontinuidade) é explicado, então, pelo fato de a luz expelida pelos átomos ser quantizada, ter valores discretos.

Cerca de 30 anos de mistério desaparecem.

No artigo em que descreve essas ideias, publicado em julho de 1913, Bohr propõe um dos postulados mais corajosos da física: em seu estado fundamental (de energia mínima), a órbita do elétron é estável, o que evita que ele seja 'engolido' pelo núcleo. Estados mais energéticos (excitados) são instáveis – daí, o elétron expelir a luz absorvida.

Contexto histórico necessário: a ideia de usar o *quantum* de Planck para entender o átomo estava mais ou menos no ar por volta de 1910. Nessa época, esse enfoque foi usado, por exemplo, pelo físico austríaco Arthur Haas (1884-1941), o britânico John Nicholson (1881-1955) e o químico dinamarquês Niels Bjerrum (1879-1958). Portanto, Bohr deve ser visto como produto de sua época. E não um gênio atemporal. Mas nenhum outro foi tão longe quando ele nesse tema.

Naquele mesmo ano, em setembro e novembro, Bohr publicaria dois outros artigos, desdobramentos do de julho. No primeiro, aplica as ideias quânticas para átomos mais pesados que o hidrogênio; no outro, para moléculas. Importantes, sem dúvida, até mesmo para a química, mas sem o impacto do primeiro.

Diferentemente do modelo de Rutherford, o de Bohr teve boa recepção e repercussão – apesar de para muitos a ideia central ainda parecer bizarra: quando a energia é mínima, a órbita do elétron é estável. Mas resultados experimentais foram se acumulando nos anos seguintes. O principal deles foi a confirmação dos saltos quânticos, ou seja, a ida do elétron para uma órbita mais energética e seu retorno para a órbita inicial.

O átomo – assim como imaginado na Antiguidade – voltava a ser uma entidade estável. Mais tarde, o físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955), idealizador da teoria da relatividade, classificaria o modelo de Bohr como a "mais alta forma de musicalidade na esfera do pensamento".

Visto de hoje, porém, o desdobramento mais importante da trilogia Bohr (aqueles três artigos de 1913) estava nas entrelinhas: Bohr percebeu que a física clássica – na qual os fenômenos são descritos no espaço e no tempo – não serviria para sistemas atômicos. Seria preciso um profundo reajuste nesse sentido. Mas, mesmo limitada, aquela física era indispensável para o entendimento da física quântica. Chamou a isso princípio da correspondência.

A essa altura, vale questão intrigante: se a matéria ordinária é formada por átomos, e estes são entidades discretas, por que o

mundo é percebido como contínuo? O princípio da correspondência ajuda a responder: "Onde o mundo parecer contínuo, as 'regras' da mecânica quântica correspondem às da física clássica", nas palavras do físico Fred Alan Wolf. E isso explica por que as páginas desta *Ilustríssima,* da *Folha de S. Paulo*, são percebidas como extensas e não como grânulos de matéria e energia.

Estava aí a semente de um dos capítulos – a mecânica quântica – mais fascinantes de toda a história da física.

A fama de Bohr se consolidou com sete palestras dadas em 1922 em Göttingen (Alemanha). Na plateia, físicos e matemáticos da mais alta estirpe. Foi o encontro da então 'Santa Trindade Teórica': Bohr, de Copenhague; Arnold Sommerfeld (1868-1951), de Munique; Max Born (1882-1970), de Göttingen. Até hoje, as palestras são conhecidas como 'Festival Bohr'. Muitos jovens físicos – por exemplo, Werner Heisenberg (1901-1976), que anos depois daria contribuições importantíssimas para a teoria quântica – foram influenciados pelas ideias ali discutidas.

O relato de, pelo menos, um desses jovens, que estava presente às palestras, dá a Bohr a supremacia nos debates com Sommerfeld e Born.

O ultimato

Bohr será para sempre lembrado por seu modelo de 1913. Mas, a partir da década de 1920, a imagem de filósofo da natureza se consolida nele. Daí para frente, cada vez mais, seus artigos traziam conceitos em vez de números e fórmulas. Hoje, analisar as ideias filosóficas de Bohr tornou-se uma indústria acadêmica.

Três eventos principais marcam a faceta filosófica de Bohr. O primeiro é a apresentação do princípio da complementaridade, em setembro de 1927, em Como (Itália), encontro no qual ele afirma que as visões das partículas subatômicas como corpúsculos e ondas devem ser vistas como complementares (e necessárias) para o entendimento do mundo microscópico, mas não há experimento que force uma entidade quântica a revelar simultaneamente esses dois comportamentos.

O segundo evento ocorre um mês depois. Na Conferência Solvay, em Bruxelas, Bohr debate com Einstein a mecânica quântica, a teoria recém-elaborada que, baseada na ideia inicial do *quantum* de energia, descreve fenômenos do universo atômico e subatômico. No encontro, Einstein imagina experimentos com os quais tenta mostrar que aquela teoria estava equivocada, pelo fato de indicar apenas a probabilidade e não a 'certeza' – como na física clássica – de um fenômeno ocorrer. Bohr responde com sua característica agudeza mental, desbancando – ironicamente, com base na relatividade, teoria de Einstein – cada um dos argumentos de seu colega alemão.

O terceiro grande momento da visão filosófica de Bohr se dá em 1935, quando Einstein e dois colaboradores esboçam um experimento igualmente imaginário – hoje, conhecido como paradoxo EPR – cujo argumento central era mostrar que havia 'realidades ocultas' das quais a mecânica quântica não dava conta. Ou seja, a mecânica quântica seria uma teoria incompleta.

No paradoxo EPR, duas partículas interagem e depois se afastam bastante. Para Einstein e colegas, se a mecânica quântica fosse aceita como uma descrição completa da realidade física, surgiria, então, um tipo de comunicação instantânea entre essas partículas. E, segundo Einstein, essa "fantasmagórica ação a distância" violaria sua teoria da relatividade, que prevê que não pode haver comunicação com velocidade superior à da luz no vácuo (300 mil km/s).

A resposta de Bohr, meses depois, é um primor: seu foco não é o experimento em si. É, na verdade, uma réplica de natureza filosófica que concluiu que uma partícula 'sentiria' instantaneamente o que acontece com a outra, mesmo que estivessem separadas por distâncias astronômicas. A explicação era mais ou menos a seguinte: depois de interagirem, as duas passariam a fazer parte de um só sistema – grosso modo, seriam inseparáveis. Hoje, o emaranhamento, fenômeno bizarro que permite essa 'telepatia' entre dois objetos quânticos, é corriqueiro nos laboratórios – inclusive, no Brasil.

A resposta de Bohr ao paradoxo EPR deu ares de vitória à chamada interpretação de Copenhague. A partir daí, aceitaram-se

com mais naturalidade as esquisitices da mecânica quântica, segundo a qual entidades quânticas (elétrons, prótons, fótons, átomos etc.) podem estar em dois lugares ao mesmo tempo; podem ora se comportar como ondas, ora como partículas; podem se 'comunicar' com velocidade acima da luz; e, estranhamente, só se tornam fenômenos (portanto, realidade física) depois de observadas. "Será que a Lua existe quando não estamos olhando para ela?", ironizou certa vez Einstein.

E, talvez, o ponto central da interpretação da mecânica quântica pela Escola de Copenhague: objeto e observador integram o mesmo sistema. Einstein nunca aceitou isso, pois acreditou, até a morte, no princípio da separabilidade: coisas distantes no espaço podem ser descritas individualmente, têm realidades independentes – em termos simples, o que acontece aqui não influencia o que ocorre ali.

Eis aí o coração da discordância entre ele e Bohr.

É comum atribuir – inclua-se entre esses Einstein – a Bohr características do pensamento positivista – não se pode falar do que não se pode observar (ou medir) – ou de um kantismo – a essência das coisas não pode ser conhecida. Segundo o filósofo da ciência Henri J. Folse, isso é uma visão equivocada. Para ele – e seus argumentos são convincentes –, Bohr foi um realista – a associação de suas ideias ao positivismo deram equivocadamente um matiz antirrealista a elas. Elétrons e todas as outras entidades quânticas – apesar da limitação de conhecimento imposta pela teoria – têm realidade física.

O realismo de Bohr, segundo Folse, decorre de sua mais profunda crença no fato de a mecânica quântica – cuja precisão hoje chega a mais de uma dezena de casas decimais – ser uma teoria completa. E a principal consequência disso – árdua para muitos, inclusive Einstein – é a de que seria (e ainda é) preciso um novo conceito de realidade física em harmonia com a teoria do *quantum*. Para Einstein, aceitar essa completude seria afirmar consequências inaceitáveis, como um objeto interferindo em outro, mesmo que afastados por distâncias astronômicas.

Bohr nunca esboçou essa nova concepção de realidade física,

por achar que os problemas fundamentais da ciência diziam respeito não à realidade, mas, sim, à comunicação, ou seja, transmitir experiências e ideias a outras pessoas. Portanto, para ele, a tarefa da física não era descobrir como a natureza é. "Física é sobre o que podemos dizer sobre a natureza".

Para os ainda pouco interessados no assunto, a visão de Copenhague é a mais popular até hoje – em geral, alunos aprendem mecânica quântica na base do "cale boca e calcule". Para Pais, Einstein e Bohr promoveram o maior debate filosófico do século passado. Afirmação forte, sem dúvida. Mas a esmagadora maioria dos físicos e filósofos da atualidade – por praticamente ignorarem a essência da questão – nem mesmo tem condições de concordar ou discordar dessa afirmação.

O ultimato Bohr sobre uma nova realidade continua em aberto, portanto.

Em um mar de cientistas com comportamentos estranhos – o caso emblemático é o do físico britânico Paul Dirac (1902-1984) –, Bohr soava como a normalidade em sua mais límpida plenitude. Pai carinhoso de seis filhos – dois morreram prematuramente –, marido dedicado, bom amigo, pessoa simples e admirada por todos. Herói nacional da Dinamarca, a menção a seu nome na alfândega era suficiente para abreviar a conversa com as autoridades, como lembrava o físico austríaco Guido Beck (1903-1988), um dos pioneiros da pesquisa em física no Brasil. Táxis, muitas vezes, nem cobraram pela corrida até o Instituto de Física Teórica.

No entanto, Bohr era obsessivo ao extremo com o trabalho e a clareza dos artigos – reescrevia-os doentiamente. Paradoxalmente, nunca foi grande palestrante: sua dicção era ruim, e seu pensamento mais rápido que as palavras.

Sua personalidade impressionava. O então jovem físico brasileiro César Lattes (1924-2005) encontrou-se com Bohr, em dezembro de 1947, em Copenhague, depois de ter feito palestra na Sociedade Dinamarquesa de Física. Lattes, mais tarde, contou que, depois de seu próprio pai, Bohr foi a figura masculina que mais o impressionou na vida.

Bohr foi competente administrador da ciência, defensor de refugiados de guerra, fundador da física biológica e da medicina nuclear, incentivador de jovens talentos. E pacifista convicto na Era Nuclear – apesar de ter trabalhado no projeto da bomba atômica. Sempre reconheceu seus (muitos) erros científicos – um deles, uma heresia: abrir mão da conservação da energia em meados da década de 1920, para tentar mostrar que o fóton não tinha realidade física.

Seu agora centenário modelo atômico – que Bohr denominava "panqueca", por causa das órbitas circulares dos elétrons – é hoje um arremedo do que a mecânica quântica sabe sobre o interior do átomo. Pertence à chamada velha teoria quântica.

Sua morte, em 18 de novembro de 1962, causou comoção mundial – talvez, tenha sido mais impactante que a de Einstein. Ele sempre viveu publicamente; Einstein, em reclusão nos últimos 20 anos de vida.

A síntese de Pais deveria ser considerada: Einstein foi o maior físico do século passado; Bohr, o maior filósofo. As discussões entre ambos não eram sobre um fenômeno, uma crença, um aspecto da vida ou detalhe do conhecimento. Foram uma batalha pelo que talvez seja a mais penetrante das questões filosóficas: por que a realidade física é do jeito que é?

Eram discussões sobre a 'alma' da natureza e da linguagem. Nada pode ser mais profundo.