

A mecânica quântica é uma das colunas que sustentam a física contemporânea, ao lado da teoria da relatividade.

Suas previsões têm sido comprovadas experimentalmente com precisão impressionante nos últimos 100 anos.

É notável, no entanto, que a mecânica quântica tenha dezenas de interpretações diferentes.

Ou seja, mesmo havendo concordância sobre o formalismo da teoria, não há consenso sobre o que ela diz em relação à realidade.

Como isso é possível?

Oswaldo Pessoa Jr.

*Departamento de Filosofia,
Faculdade de Filosofia,
Letras e Ciências Humanas,
Universidade de São Paulo*

As interpretações DA MECÂNICA QUÂNTICA

“Mas em 1952 eu vi o impossível ser feito.” Com essas palavras, o físico norte-irlandês John Stewart Bell (1928-1990) exprimiu sua surpresa ao tomar conhecimento da nova interpretação da física quântica proposta pelo norte-americano David Bohm (1917-1992), alguns meses antes de este se exilar no Brasil, em consequência da perseguição política em seu país depois da Segunda Guerra.

O que era considerado impossível, antes dessa data, era que o mundo da física atômica pudesse ser determinista, ou seja, que ele pudesse seguir uma causalidade estrita, como parece ocorrer com os fenômenos macroscópicos de nosso cotidiano, explicados pela chamada mecânica clássica, dita determinista (ou causal). Uma das características mais marcantes da teoria que lida com o diminuto universo atômico e subatômico, a chamada mecânica quântica, é o fato de ela fornecer apenas a probabilidade de um fenômeno ocorrer.

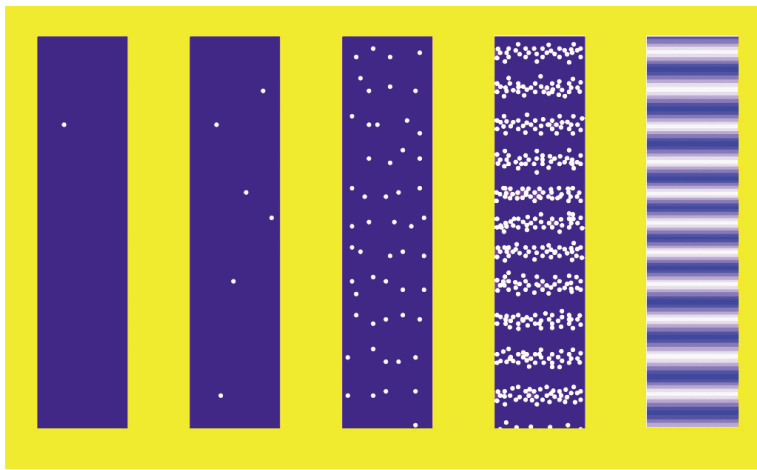
Foi motivo de grande debate entre os físicos (e, de certo modo, ainda é) a seguinte questão: esse caráter probabilístico é uma característica inerente à própria natureza ou advém do fato de a mecânica quântica ser uma teoria incompleta?

Antes de prosseguirmos, vale apresentar aqui, de modo simples e conciso, alguns elementos da mecânica quântica. *Quantum* é o termo, em latim, para quantidade. Essa idéia foi lançada em 1900 pelo físico alemão Max Planck (1858-1947) ao propor que, na natureza, a energia é gerada e absorvida em diminutos pacotes, os *quanta* (*quantum*, no singular). Cinco anos depois, o físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) aplicou o conceito de *quantum*

à luz, indicando que essa radiação, bem como todo o restante do espectro eletromagnético (microondas, infravermelho, ultravioleta, raios X etc.), é constituída por esses pacotes de energia, mais tarde batizados de fótons.

INTERPRETAÇÕES REALISTAS VERSUS POSITIVISTAS

Que consequências esse resultado de Bohm teria para o trabalho dos físicos? Praticamente nenhuma. Isso porque as novidades introduzidas pelo norte-americano não podiam ser testadas experimentalmente: sua abordagem concordava com todas as previsões experimentais da mecânica quântica. Ou seja, ela era consistente com o formalismo mínimo da teoria, que é o nome dado ao conjunto de regras e leis básicas da teoria, com o qual todos os físicos concordam. Nesse sentido, a teoria causal de Bohm é chamada uma ‘interpretação’ da teoria quântica. Uma interpretação é um conjunto de teses ou imagens que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria, sem afetar as previsões observacionais da teoria. Pode ser que, no futuro, haja um teste experimental que diferencie duas interpretações: nesse caso, a rigor, teríamos duas teorias diferentes. No entanto, enquanto esse teste não puder ser realizado, é costume chamar as duas versões de interpretações da mesma teoria quântica. ▶



Cientistas costumam considerar irrelevante o problema da interpretação, pois geralmente as previsões observacionais não mudam de uma interpretação para outra. É por isso que o assunto faz parte da filosofia da ciência. Mesmo assim, uma interpretação pode desempenhar um papel importante na maneira como um cientista representa intuitivamente um problema e pode guiá-lo na formulação de novos problemas ou na recusa de tratar de uma classe de problemas. É possível também que um cientista use diferentes interpretações privadas em diferentes situações. E, por fim, a recusa em trabalhar com imagens, que representariam uma realidade que estaria por trás dos fenômenos observados, também é considerada uma interpretação. Um célebre debate interpretativo deu-se no final do século 19, com relação à realidade dos átomos.

Discussões sobre como interpretar a mecânica quântica surgiram tão logo essa teoria foi formulada, a partir de junho de 1925. De um lado, os alemães Werner Heisenberg (1901-1976), Max Born (1882-1970) e Pascual Jordan (1902-1980) desenvolveram a chamada mecânica matricial, que utilizava matrizes para calcular as probabilidades de se obter diferentes valores de medições feitas em experimentos atômicos. Meses depois, o austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) formulou a mecânica ondulatória, baseada na idéia do francês Louis de Broglie (1892-1987) de que toda partícula tem propriedades ondulatórias.

Schrödinger buscou interpretar seu formalismo – que, em pouco tempo, mostrou-se equivalente à mecânica matricial – defendendo a hipótese de que, na realidade, os elétrons em um átomo formam uma onda na qual a carga elétrica distribui-se uniformemente. Segundo sua interpretação ondulatória, o mundo flui continuamente como uma onda. De Broglie, por sua vez, interpretava a nova mecânica quântica de modo dualista: um elétron no átomo

Figura 1. No experimento da dupla fenda, a formação das franjas de interferência é feita *quantum por quantum*

seria uma partícula com posição e velocidade bem definidas a cada instante, mas também haveria uma onda associada a ela, semelhantemente àquela concebida por Schrödinger. Para nossos propósitos aqui, poderemos imaginar a partícula como um surfista que é carregado por uma onda (denominada onda-piloto).

As interpretações de Schrödinger e de De Broglie podem ser consideradas ‘realistas’, pois nelas a mecânica quântica representa a realidade de modo definido, a todo instante, mesmo quando não há ninguém observando ou fazendo medições do fenômeno quântico. Isso se opõe à concepção ‘positivista’ (também chamada descritivista ou instrumentalista), que salienta que: i) a tarefa da ciência é descrever de maneira econômica (por meio de leis) aquilo que é observável, permitindo assim que se façam previsões de resultados em novos experimentos; ii) não faz sentido lançar hipóteses sobre uma realidade não observável.

Nessa época, Heisenberg e seu colega austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) defendiam explicitamente uma abordagem positivista. E a idéia seminal de Heisenberg baseava-se apenas em grandezas atômicas que eram diretamente observáveis, não na posição ou na velocidade de um elétron em um átomo, mas na intensidade e na frequência da luz emitida pelo átomo, bem como no plano de oscilação (polarização) dela.

A COMPLEMENTARIDADE

Em outubro de 1927, o dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), famoso por ter desenvolvido em 1913 um modelo atômico dentro da velha teoria quântica (que se estendeu de 1900 até 1925), apresentou uma interpretação bem elaborada e consistente, de cunho positivista (parece correto argumentar que ele se aproximava mais de um construtivismo inspirado no filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804), mas essa visão também adota as teses i e ii da seção anterior). Essa visão fez frente às propostas de Schrödinger e de De Broglie e acabou tornando-se a interpretação ortodoxa da mecânica quântica, obtendo as adesões de Heisenberg, Pauli, Born e da maioria dos físicos.

Com a mecânica quântica, descobriu-se que a luz é detectada por meio de pacotes mínimos de energia, localizados pontualmente, os chamados fótons. O acúmulo de um grande número de fótons em uma tela resulta nas franjas de interferência que obser-

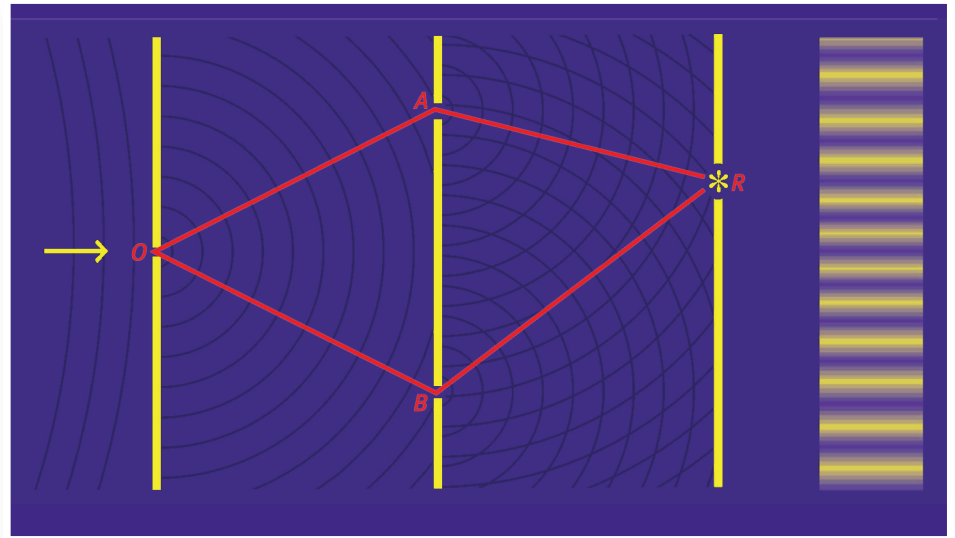
Figura 2. O experimento da dupla fenda é um fenômeno ondulatório, e não há como estipular uma trajetória para o *quantum* detectado, seja ele luz ou elétron

vamos no laboratório (figura 1). Onde há mais fótons incidindo, mais iluminada fica a região. A essa descoberta, Bohr deu o nome postulado quântico, pois foi primeiramente proposto como uma hipótese por Planck, em 1900.

O princípio de complementaridade foi introduzido por Bohr em 1927, em três acepções diferentes, das quais uma se tornou mais importante, especialmente após 1935: a dualidade onda-partícula. Segundo ela, presos à linguagem da física clássica, os cientistas só conseguiriam compreender um fenômeno quântico observado no laboratório por meio de quadros clássicos, que seriam de dois tipos: corpuscular ou ondulatório. No primeiro, concebemos o objeto quântico como uma partícula que descreve uma trajetória bem definida ao longo de todo o experimento. No segundo, imaginamos que o objeto quântico é uma onda, que pode ser dividida e recombinada, gerando franjas de interferência (apenas a detecção de cada *quantum* é pontual).

No quadro corpuscular, não pode haver franjas de interferência, e no quadro ondulatório não se podem atribuir trajetórias bem definidas ao objeto quântico. O princípio de complementaridade afirma que qualquer experimento com uma entidade quântica, como um elétron, pode ser compreendido ou em um quadro corpuscular, ou em um ondulatório, mas nunca em ambos ao mesmo tempo. Ou seja, se observo franjas de interferência, não posso atribuir trajetórias, e vice-versa.

Um exemplo de quadro ondulatório é dado na figura 2. Nela, representa-se o experimento da dupla fenda para a luz, que resulta em 'franjas' de regiões mais iluminadas e menos iluminadas na tela à direita, em função de um fenômeno óptico denominado interferência. Segundo a física clássica, as franjas, que alternam claro e escuro, indicam que a luz é uma onda. Ao passar por O, essa onda esférica propaga-se até o anteparo com as fendas A e B, e, em cada fenda, uma parte da onda inicial propaga-se como onda esférica até a tela detectora. Ficam iluminadas as regiões em que os 'picos' (ou máximos) das duas ondas superpõem-se (interferência construtiva). Ficam escuras as regiões em que um 'pico'



e um 'vale' somam-se (interferência destrutiva).

O fenômeno da figura 2 é ondulatório: não podemos atribuir uma trajetória ao fóton detectado em R, pois é como se ele passasse simultaneamente por ambas as fendas (como diríamos de uma onda na física clássica). Se apenas uma das fendas estivesse aberta, aí o fenômeno seria corpuscular: conheceríamos sua trajetória, mas não haveria franjas quando um grande número de fótons incidisse na tela.

Essa interpretação pode ser considerada positivista porque, em geral, não podemos dizer se um fóton está associado a um quadro ondulatório ou corpuscular, antes de sua detecção final. Um exemplo disso é apresentado adiante (ver 'Um experimento ilustrativo').

DE VOLTA À ONDA-PILOTO

No início da mecânica quântica, como mencionamos, houve tentativas de interpretar a teoria em termos realistas. A proposta original de Schrödinger é um exemplo do que pode ser chamado interpretação realista ondulatória. Essas visões atribuem ao objeto quântico uma natureza estendida no espaço, uma natureza não pontual.

A vantagem de uma visão realista é que, em todo instante, podemos considerar que o objeto quântico existe conforme a interpretação o representa. Isso satisfaz uma intuição básica que possuímos: a de que a realidade existe de uma maneira que independe da presença de um observador. Mas qualquer interpretação realista tem problemas ou anomalias. A interpretação realista ondulatória tem dificuldade em explicar o que denominamos, acima, postulado quântico, ou seja, o aspecto pontual das detecções ▶

em física quântica. Uma saída é postular um ‘colapso’ da onda, ou seja, a transição de uma onda estendida (como a ilustrada por meio de círculos na figura 2) para um pacote de onda bem comprimido (que observaríamos como um ponto na tela detectora). Essa transição seria tão rápida que ocorreria a uma velocidade maior do que a da luz, de um modo denominado pelos físicos ‘não-local’.

Isso é considerado um dos problemas dessa interpretação, pois, segundo a teoria da relatividade restrita de Einstein, de 1905, nenhum corpo pode viajar a uma velocidade superior à da luz no vácuo (300 mil km/s).

Um modo de evitar essa não-localidade, no experimento da dupla fenda, seria adotar a concepção da ‘onda-piloto’, de De Broglie. Chamaremos essa interpretação realista dualista. O objeto quântico consistiria de duas partes: um corpúsculo, que carrega energia e é detectado, e uma onda, que guia a partícula, mas não carrega energia nem é detectada. O corpúsculo seria uma ‘variável oculta’, com posição e velocidade bem definidas a cada instante, que ‘surfaria’ na onda que o acompanha, de forma que a probabilidade de ele se encontrar em certa posição seria proporcional ao quadrado da ‘altura do pico’ (amplitude) da onda-piloto. O termo variável oculta é atribuído ao pretenso corpúsculo, porque ele não é previsto pelo formalismo mínimo da mecânica quântica, e, apesar de sua posição ser observável, sua velocidade não o é.

No experimento da dupla fenda, os corpúsculos de De Broglie não seguiriam uma trajetória reta, mas sim surfariam em ziguezague, passando pelas regiões proibidas (partes escuras da franja) com velocidades altíssimas (figura 3). Há outros problemas conceituais dessa interpretação: situações em que se prevê que o corpúsculo ficaria parado, quando se esperaria que se movesse juntamente com a onda.

Essa foi a razão pela qual Einstein – um realista convicto que debateu por quase três décadas a mecânica quântica com Bohr, opondo-se à interpretação ortodoxa – desinteressou-se pela redescoberta da teoria da onda-piloto por Bohm, em 1952.

‘PAIXÃO’ A DISTÂNCIA

Bohm aperfeiçoou a interpretação de De Broglie, ao levar em conta não só as variáveis ocultas do objeto quântico, mas também as do aparelho de medição. Foi dessa maneira que sua teoria determinista conseguiu escapar da chamada prova de impossibilidade, deduzida pelo matemático húngaro John von Neumann (1903-1957), que, em 1932, havia sugerido ser impossível construir uma versão determinista da mecânica quântica (mais tarde, mostrou-se que o alcance desse teorema não era o inicialmente pensado). No determinismo, o estado completo do universo em certo instante determinaria univocamente o estado completo em qualquer instante futuro. Ou seja, no determinismo, não existe acaso real: o que acontece é que nosso conhecimento limitado do mundo impede que possamos fazer previsões exatas.

O próprio Bohm percebeu claramente outra característica de sua interpretação: ao descrever duas partículas interagentes que se separam a uma grande distância, é necessário estipular uma ‘ação a distância’, ou seja, o ato de medição feito em uma partícula afetaria instantaneamente a onda localizada muito longe da partícula medida, aparentemente violando a teoria da relatividade restrita (pois essa influência se daria instantaneamente; portanto, com velocidade maior que a da luz). Essa

não-localidade já foi mencionada quando nos referimos ao colapso da onda, na interpretação realista ondulatória.

Bell, cuja exclamação abriu este artigo, teve a sagacidade de fazer a pergunta certa: será que a não-localidade é uma característica de toda interpretação realista da teoria quântica? Em poucas semanas, em 1964, provou teoricamente que sim.

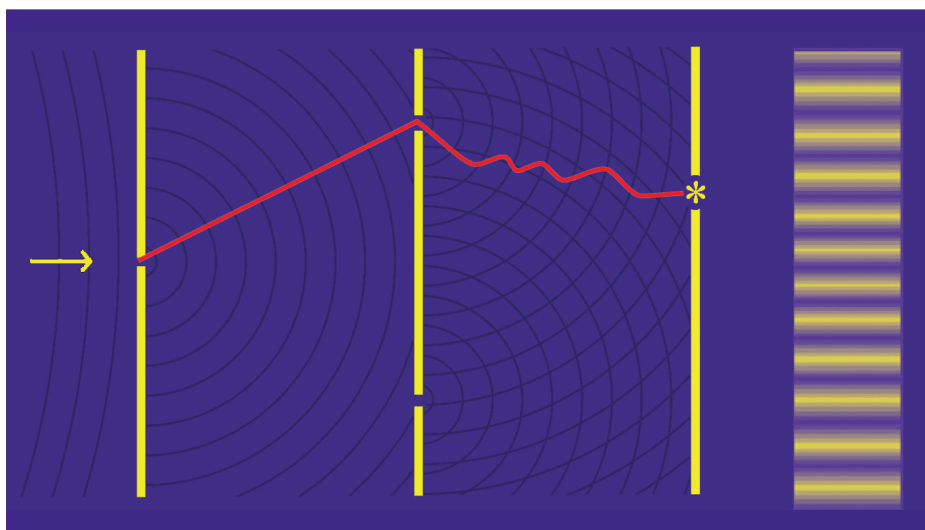


Figura 3. Segundo a interpretação de Bohm, no experimento da dupla fenda, o corpúsculo descreve uma trajetória em ziguezague

UM EXPERIMENTO ILUSTRATIVO

Um exemplo de fenômeno corpuscular no experimento da dupla fenda está na figura 4, onde se colocam filtros ópticos especiais (polarizadores) orientados em direções ortogonais após cada fenda. Cada polarizador absorve metade da luz incidente e deixa passar a outra metade. A porção de luz que é transmitida oscila transversalmente à direção de propagação. Na figura, o ângulo que a luz transmitida forma com o plano horizontal é 0° para a fenda A e 90° para a fenda B. O encontro de ondas polarizadas em direções ortogonais não faz com que elas se somem ou se destruam (ou seja, não ocorre nem a interferência destrutiva, nem a construtiva), como no caso sem polarizadores, de forma que o que se observa na tela detectora é uma iluminação uniforme, sem franjas de interferência.

Note-se que utilizamos uma explicação típica de um quadro ondulatório, mas esse fenômeno é considerado corpuscular, porque ao fóton pontual observado na tela pode ser atribuída uma trajetória bem definida, ou pela fenda A, ou pela fenda B. Isso ficaria mais claro se, no lugar da tela detectora, puséssemos um detector sensível à polarização da luz. Esse detector indicaria claramente a polarização do fóton: se a polarização medida fosse 0° , poderíamos dizer que a partícula passou pela fenda A; se fosse 90° , pela fenda B. Ao atribuirmos trajetórias bem definidas à partícula (associada ao fóton detectado), adotamos um quadro corpuscular.

No entanto, a situação muda na figura 5. Agora, outro polarizador, orientado em um ângulo intermediário (45°), é colocado diante da tela detectora. A luz que passa por esse polarizador ‘per-

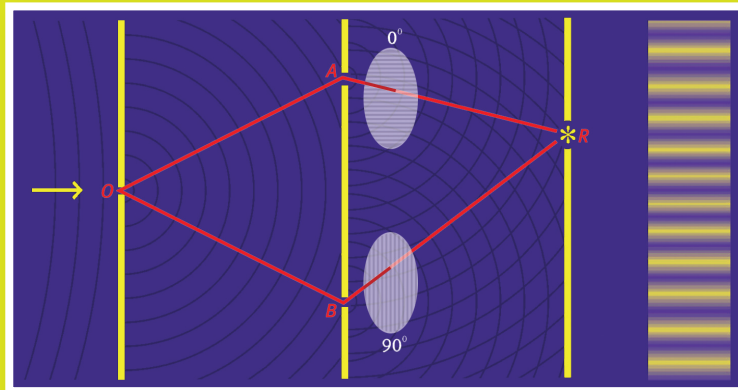


Figura 4. No experimento da dupla fenda para a luz, a colocação de polarizadores ortogonais torna o fenômeno corpuscular, e sabendo-se a polarização do fóton detectado, sabe-se sua trajetória

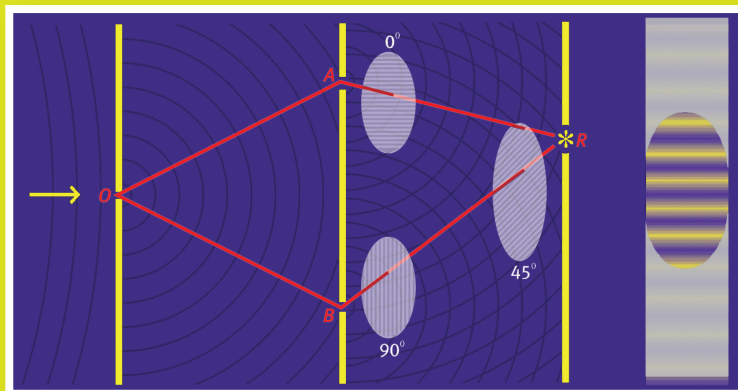


Figura 5. A informação de trajetória pode ser apagada, e o quantum detectado passa a ser associado a um fenômeno ondulatório

de a informação’ sobre por qual fenda ela teria passado. Segundo a interpretação da complementaridade, o fenômeno associado aos fótons incidentes na região central da tela é ondulatório, o que é confirmado pelas franjas de interferência observadas naquela região. Já os fótons detectados fora daquela região continuam associados a um quadro corpuscular.

Poderíamos montar um experimento como o da figura 4 e, antes de encerrado o experimento, sermos tentados a dizer que o fenômeno será corpuscular. Mas, logo em seguida, alguém poderia pôr em ação uma ‘escolha demo-

rada’, e introduzir o polarizador a 45° , transformando o experimento em um fenômeno ondulatório. Ou seja, a atribuição de um quadro clássico (corpuscular ou ondulatório) só pode ser feita após o encerramento do experimento. Antes disso, não se pode atribuir à realidade do objeto quântico uma natureza de partícula ou de onda.

Em suma, como essa interpretação não associa nenhuma representação à realidade antes do final do experimento, ela pode ser considerada positivista. A ela, só interessa representar o que é observado, não aquilo que é inobservável.

Experimentos comprovaram as previsões da mecânica quântica e consolidaram o grande dilema dos fundamentos dessa teoria: ou abandonamos o realismo (como fizeram Bohr e outros positivistas) ou abandonamos a localidade (como fez Bohm). O abandono da localidade não viola diretamente as previsões da teoria da relatividade (ou seja, não se pode transmitir informação a velocidades maiores do que a da luz), de forma que alguns autores sugerem que se fale em 'paixão a distância', em vez de ação a distância. De qualquer modo, trata-se de uma questão que toda visão realista tem que interpretar.

TENDÊNCIAS CONTEMPORÂNEAS

Nas últimas décadas, dezenas de interpretações diferentes, tanto de cunho positivista quanto realista, têm sido propostas na literatura, mas nenhuma está livre de aspectos conceitualmente anômalos.

As visões positivistas que congregam as interpretações ortodoxas já não têm a hegemonia quase absoluta que detinham antes da década de 1970, mas ainda contam com muitos defensores. Muitos físicos salientam que a mecânica quântica é uma teoria essencialmente estatística, de forma que ela não se aplicaria a um objeto quântico individual, mas apenas a um conjunto deles, preparados de maneira semelhante. Essa tese define a interpretação dos coletivos estatísticos, cuja versão tradicional é realista, defendendo que a mecânica quântica poderia ser 'completada' por uma teoria que se referisse a entidades individuais. No entanto, uma versão positivista dessa interpretação tem ganhado muitos adeptos, sendo divulgada, por exemplo, pelo físico israelense Asher Peres.

Nos testes de não-localidade, o conceito de dualidade onda-partícula tem sido um guia útil, indicando a força da interpretação da complementaridade. Na última década, o estudo de partículas correlacionadas, que se comportam como uma entidade única, mesmo se separadas por grandes distâncias (ver 'Emaranhamento: um recurso computacional utilizado pelos físicos' em CH 249), abriu o campo da informação quântica, envolvendo computação, criptografia e comunicação em sistemas quânticos. O austríaco Anton Zeilinger

DA FILOSOFIA À HISTÓRIA DA CIÊNCIA

O autor deste artigo dedica-se à pesquisa sobre filosofia da ciência, com ênfase em fundamentos conceituais da física quântica e na modelagem causal da história da ciência. Tem diversos artigos publicados em periódicos no Brasil e no exterior, bem como escreveu ou organizou alguns livros sobre suas linhas de pesquisa.

propôs uma interpretação que captura a informação essencial de um sistema quântico e não afirma nada além, levando adiante o espírito positivista.

Na década de 1970, visões de cunho mais realista passaram a ser exploradas. Ocorreu um novo interesse pela interpretação dualista de Bohm, sem, porém, atribuir realidade à onda-piloto. De modo similar, o físico holandês Gerardus 't Hooft vem procurando reformular os fundamentos da física contemporânea a partir de uma interpretação estritamente determinista em que a função de onda é vista de maneira epistêmica, ou seja, é vista como uma representação matemática que permite realizar cálculos, sem corresponder a uma entidade real.

Muitos físicos teóricos têm aderido às idéias do norte-americano Hugh Everett (1930-1982), que, em 1957, propôs que o universo como um todo seria um sistema quântico, sem observadores externos. Sua visão realista ondulatória resolve a

questão da natureza do colapso da onda quântica

sem ter que postular que é a consciên-

cia humana que causa esse colapso, como nas interpretações idealistas.

Essas foram popularizadas mais recentemente pelo indiano Amit Goswami e viraram moda na mídia. Para quem é místico, certamente vale a pena estudar os conceitos da teoria quântica. Mas é incorreto

supor que a física quântica implica essas visões idealistas ou qualquer esoterismo. ■

SUGESTÕES PARA LEITURA

- BOHR, N. *Física atômica e conhecimento humano: ensaios 1932-1957*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.
- HERBERT, N. *A realidade quântica*. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1989.
- JAMMER, M. *The philosophy of quantum mechanics*. New York: Wiley, 1974.
- PESSOA JR., O. *Conceitos de física quântica*. 2 vols. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
- ZEILINGER, A. *A face oculta da natureza*. São Paulo: Globo, 2005.