

As interpretações contemporâneas da mecânica quântica

Osvaldo Pessoa Jr.

Departamento de Filosofia, FFLCH
Universidade de São Paulo

Área do conhecimento: Filosofia da ciência

Abertura

É notável que a mecânica quântica, que serve de base para a maioria das modernas teorias da física, tenha dezenas de interpretações diferentes. Ou seja, mesmo havendo concordância a respeito do formalismo mínimo da teoria, não há consenso sobre o que a teoria diz sobre a realidade. Como isso é possível?

“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 deste se exilar no Brasil, em consequência da perseguição política em seu país. 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. Bohm também mostrou que é possível eliminar o sujeito observador da descrição do mundo quântico, ao contrário do que se supunha.

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. Nesse sentido, a teoria causal de Bohm é chamada de 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.

Discussões a respeito de como interpretar a mecânica quântica surgiram tão logo esta 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 mecânica “matricial”, que utilizava matrizes para calcular as probabilidades de se obterem diferentes valores quantizados (discretos) das grandezas observáveis em experimentos atômicos. Alguns 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 é ao mesmo tempo onda. Schrödinger buscou interpretar seu formalismo, que em pouco tempo se mostrou ser equivalente à mecânica matricial, defendendo a hipótese de que na realidade os elétrons em um átomo formam uma onda na qual se distribui uniformemente a carga elétrica. De acordo com sua interpretação ondulatória, o mundo flui continuamente como uma onda, refletindo a função $\psi(\mathbf{r})$ que aparece em sua versão da teoria. Já de Broglie interpretava a nova mecânica quântica de maneira dualista: um elétron no átomo

seria uma partícula de posição e velocidade bem definidas, a cada instante, mas também haveria uma onda associada, semelhante à concebida por Schrödinger.

As interpretações de Schrödinger e de Broglie podem ser consideradas “realistas”, pois segundo eles a teoria quântica representa a realidade de maneira definida a todo instante, mesmo quando não há ninguém fazendo observações ou medições. Isso se opõe à concepção “positivista” (também chamada “descritivista” ou “instrumentalista”), que salienta que a tarefa da ciência é descrever de maneira econômica (através de leis) aquilo que é observável, permitindo assim que se façam previsões de resultados em novos experimentos, e que não faz sentido lançar hipóteses a respeito de uma realidade não observável. Nessa época, Heisenberg e seu colega Wolfgang Pauli (1900-1958) defendiam explicitamente uma abordagem positivista, e a idéia seminal de Heisenberg, que lançou a mecânica matricial, baseava-se apenas em grandezas atômicas que eram diretamente observáveis, não a posição ou velocidade de um elétron em um átomo, mas a intensidade da luz emitida pelo átomo, sua frequência e sua polarização. Em outubro de 1927, o dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), famoso por ter desenvolvido em 1914 um modelo atômico dentro da velha teoria quântica, apresentou uma interpretação bastante elaborada e consistente, de cunho positivista, que fez frente às propostas de Schrödinger e de Broglie, e acabou se tornando a interpretação ortodoxa da mecânica quântica, obtendo as adesões de Heisenberg, Pauli, Born e da maioria dos físicos. O conceito central de sua interpretação era a “complementaridade”.

A interpretação da complementaridade

Para entendermos a interpretação proposta por Bohr, consideremos a figura 1a. Nela, representa-se o experimento da dupla fenda para a luz, que resulta em franjas de interferência na tela à direita. De acordo com a física clássica, as franjas, que alternam claro e escuro, indicam que a luz é uma onda. Ao passar por O , esta onda esférica se propaga até o anteparo com as fendas A e B , e em cada fenda uma parte da onda inicial se propaga como onda esférica até a tela detectora. As regiões em que máximos das duas ondas se superpõem construtivamente são iluminadas, e as regiões em que elas se superpõem destrutivamente são escuras.

Com a física quântica, o que se descobriu é que a luz é detectada na tela por meio de pacotes mínimos de energia, localizados pontualmente, chamados “fótons”. O acúmulo de um grande número desses pontos luminosos resulta nas franjas de interferência que observamos no laboratório. A esta descoberta Bohr deu o nome de “postulado quântico”, cuja primeira formulação é devida ao alemão Max Planck (1858-1947), que em 1900 inaugurou a velha teoria quântica.

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. Presos à linguagem da física clássica, os cientistas só conseguiriam compreender um fenômeno observado no laboratório por meio de quadros clássicos, que seriam de dois tipos: corpuscular ou ondulatório. No quadro corpuscular, concebemos o objeto quântico como uma partícula que descreve uma trajetória bem definida ao longo de todo o experimento. No quadro ondulatório, imaginamos que o objeto quântico é uma onda, que pode ser dividida e recombinada, gerando franjas de interferência. 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.

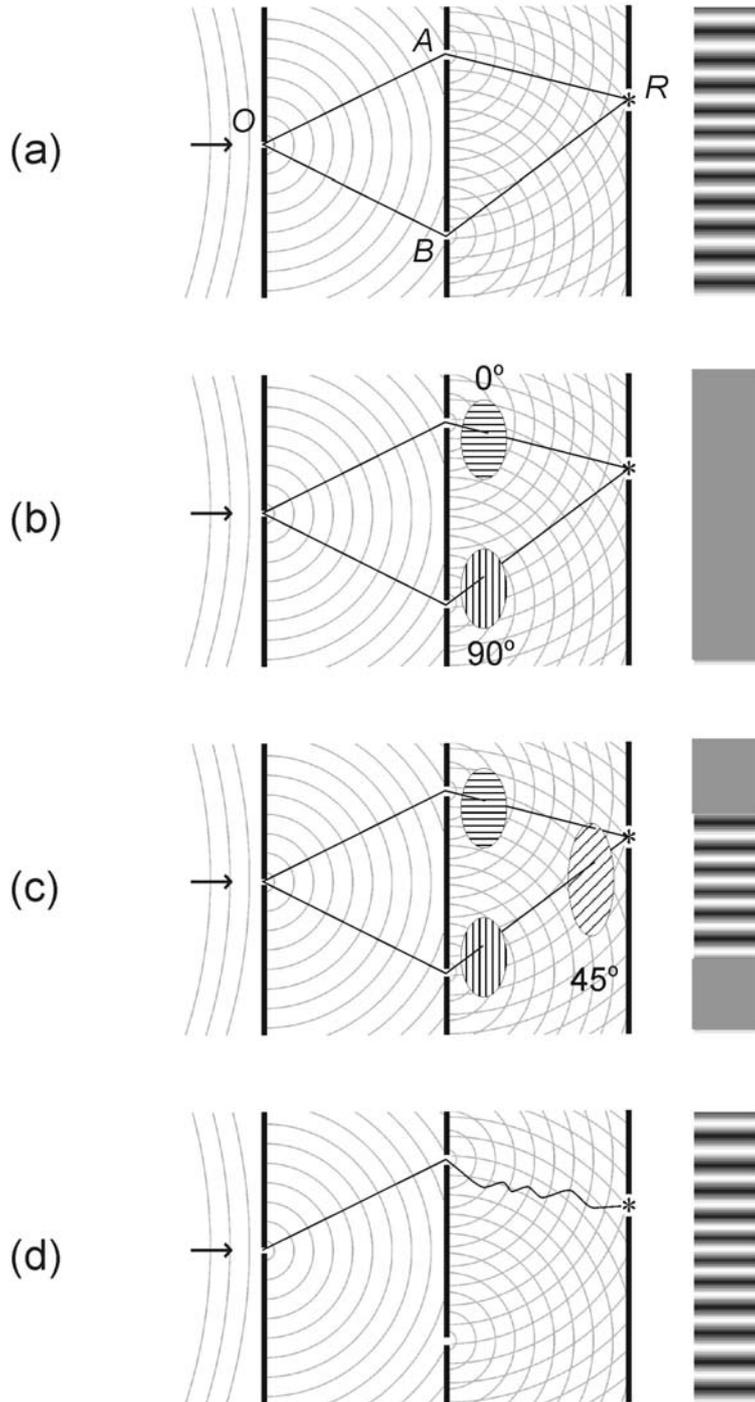


Figura 1. (a) O experimento da dupla fenda é um fenômeno ondulatório, e não há como estipular uma trajetória para o quantum detectado, seja ele luz ou elétron. (b) A colocação de polarizadores ortogonais, no caso da propagação de luz, torna o fenômeno corpuscular, e sabendo-se a polarização do fóton detectado, sabe-se sua trajetória. (c) A informação de trajetória pode ser apagada, e o quantum detectado passa a ser associado a um fenômeno ondulatório. (d) Segundo a interpretação de Bohm, o corpúsculo descreve uma trajetória em ziguezague.

O fenômeno da figura 1a 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: saberíamos sua trajetória, mas não haveria franjas quando um grande número de fótons incidisse na tela.

Outro exemplo de fenômeno corpuscular está na figura 1b, onde se colocam filtros 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) em uma certa direção, que na figura é 0° para a fenda A e 90° para a fenda B . O encontro de ondas polarizadas em direções ortogonais não leva à interferência destrutiva e construtiva, como no caso anterior, de forma que o que se observa na tela detectora é uma iluminação uniforme, sem franjas de interferência. Notamos que utilizamos uma explicação típica de um quadro ondulatório, mas este fenômeno é considerado corpuscular porque o fóton observado na tela é pontual, e a ele 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 se pusesse um detector sensível à polarização da luz. Tal 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 atribuímos trajetórias bem definidas à partícula (associada ao fóton detectado), adotamos um quadro corpuscular.

No entanto, a situação muda na figura 1c. Agora, um outro polarizador, orientado em um ângulo intermediário, 45° , é colocado diante da tela detectora. A luz que passa por este polarizador “perde a informação” sobre qual fenda ela teria passado. De acordo com 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 nesta região. Já os fótons detectados fora desta região continuam associados a um quadro corpuscular.

Por que essa interpretação ortodoxa é considerada positivista? Porque não podemos dizer se um fóton, que será detectado na região central, está associado a um quadro ondulatório ou corpuscular, antes da detecção final do objeto quântico. Poderíamos montar um experimento como o da Figura 1b 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 demorada”, 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 esta 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.

Interpretações realistas

Conforme mencionamos anteriormente, no início da Mecânica Quântica 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”. Tais visões atribuem ao objeto quântico uma natureza estendida no espaço, uma natureza não pontual, que refletiria a função de onda $\psi(\mathbf{r})$ da mecânica ondulatória, ou melhor, o módulo quadrado desta função

(que envolve números imaginários), $|\psi(\mathbf{r})|^2$. Na figura 2, esta hipótese das interpretações realistas ondulatórias é ilustrada em vermelho.

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, de que a realidade existe de uma maneira que independe da presença de um observador. No entanto, qualquer interpretação realista tem problemas ou anomalias. A interpretação realista ondulatória tem dificuldade em explicar o que chamamos de postulado quântico, ou seja, o aspecto pontual das detecções em física quântica. Uma saída é postular um “colapso”, que descreveria a transição de uma onda estendida (como a ilustrada por meio de círculos na figura 1a) para um pacote de onda bem comprimido (que observaríamos como um ponto na tela detetora). Tal transição seria tão rápida, que ocorreria a uma velocidade maior do que a da luz, de maneira “não-local”. Isso é considerado um dos problemas desta interpretação.

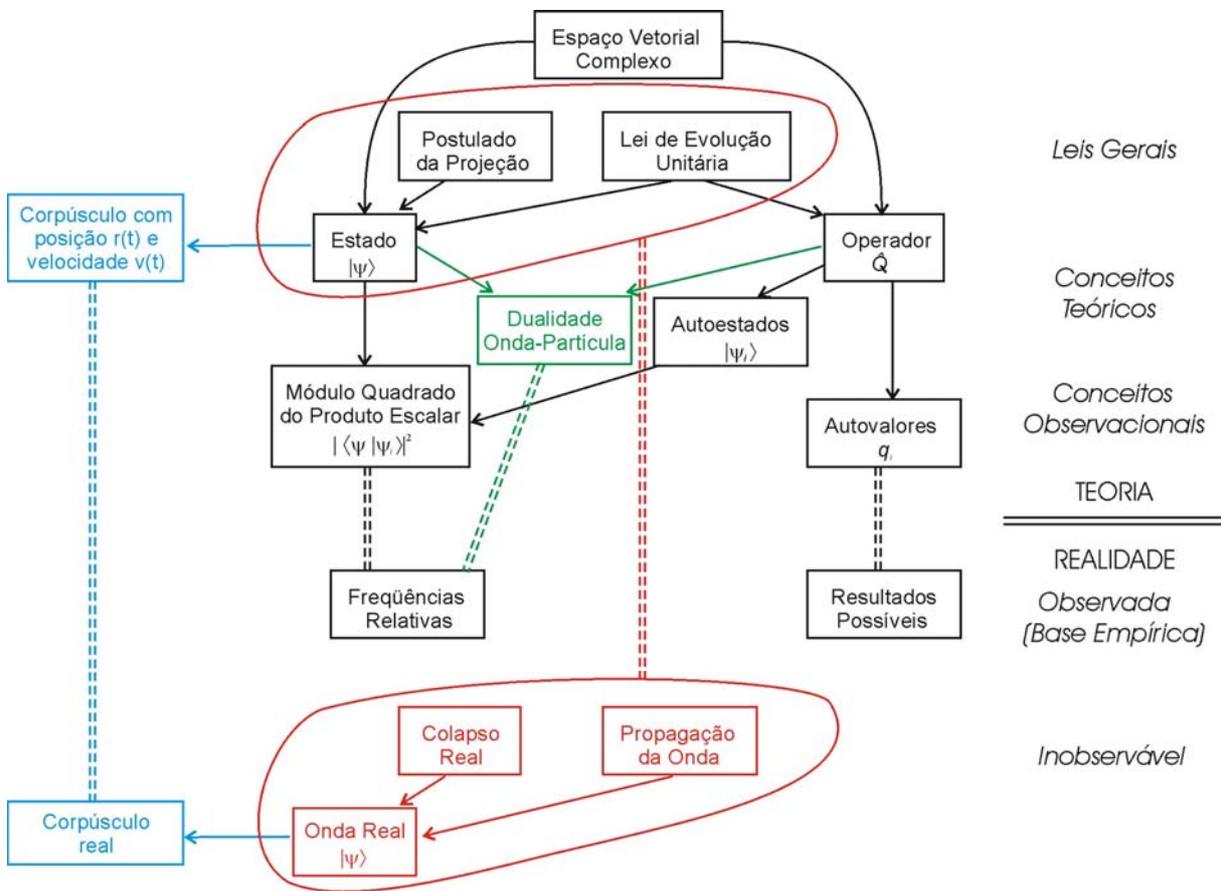


Figura 2. Esquema simplificado da estrutura da teoria quântica, e sua relação com a realidade. Em preto representa-se o formalismo mínimo da teoria e a parte observável da realidade, ambos aceitos por todos. Em verde, uma visão positivista pode introduzir novos conceitos teóricos, mas estes não fazem referência a uma realidade inobservável. Em vermelho, representa-se a realidade não diretamente observável postulada pela interpretação realista ondulatória. Em azul, uma visão realista pode introduzir novos conceitos teóricos, que corresponderiam a variáveis reais mas ocultas.

Uma maneira de evitar essa não-localidade, no experimento da dupla fenda, seria adotar a concepção da “onda piloto” proposta por Louis de Broglie, e que podemos chamar de “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 e 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 uma certa posição seria proporcional ao quadrado da amplitude da onda.

No experimento da dupla fenda, os corpúsculos de de Broglie não seguiriam uma trajetória reta, mas surfariam em ziguezague, passando pelas regiões proibidas (correspondentes às regiões escuras da franja de interferência) com velocidades altíssimas (figura 1d). Há também outros problemas conceituais desta interpretação, como situações em que se prevê que o corpúsculo ficaria parado (no estado s de um átomo, por exemplo), quando se esperaria que eles se movessem junto com a onda. Esta foi a razão pela qual Albert Einstein (1879-1955) se desinteressou pela redescoberta da teoria da onda piloto por David Bohm, em 1952.

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 desta maneira que ele conseguiu escapar da prova de impossibilidade de John von Neumann (1903-1957), que em 1932 havia sugerido ser impossível construir uma versão determinista da mecânica quântica. No determinismo, o estado completo do Universo em um 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 uma outra característica de sua interpretação determinista: ao descrever duas partículas interagentes que se separam a uma grande distância, é necessário estipular uma “ação à distância”, ou seja, o ato da medição feito em uma partícula afetaria instantaneamente a onda localizada a uma grande distância, aparentemente violando a teoria da relatividade restrita, que postula ser impossível transmitir sinais a uma velocidade maior do que a da luz. Essa não-localidade já foi mencionada quando nos referimos ao colapso da onda, dentro da interpretação realista ondulatória. John Bell, cuja exclamação abriu este artigo, teve a genialidade 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 que sim. Experimentos comprovaram as previsões da física quântica e consolidaram o grande dilema dos fundamentos da mecânica quântica: ou abandonamos o realismo (como fez Bohr e outros positivistas) ou abandonamos a localidade (como fez Bohm). A rigor, um conjunto de hipóteses relacionadas à realização de experimentos e de amostragens justas, que recebe o nome de “indução” (em um sentido mais amplo do que o usual), também estão envolvidas, tornando o dilema um “trilema”. 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 à distância”, ao invés de ação à distância. De qualquer maneira, trata-se de uma questão que toda visão realista tem que interpretar.

Interpretações contemporâneas de cunho positivista

Dezenas de interpretações diferentes têm sido propostas na literatura, mas nenhuma está livre de aspectos conceitualmente anômalos. As várias visões positivistas semelhantes que congregam o que pode ser chamado “as interpretações ortodoxas” já não possuem a

hegemonia quase absoluta que detinham antes de 1970, mas ainda têm muitos defensores. Uma versão muito elegante foi proposta na década de 80 por Robert Griffiths, baseado na noção de “histórias consistentes”, e sua idéia teve aplicação em cosmologia.

Muitos físicos salientam que a mecânica quântica é uma teoria essencialmente estatística, e que uma grandeza como a função de onda $\psi(\mathbf{r})$ descreve na verdade um grande número de objetos quânticos preparados de maneira semelhante, e não um objeto quântico individual. Esta tese é conhecida como interpretação mínima dos coletivos (ou “ensembles”) estatísticos. Historicamente, ela foi desenvolvida principalmente no contexto pragmatista dos Estados Unidos e no contexto materialista da União Soviética, antes de 1950, como uma interpretação onde o observador (ou sujeito cognoscente) não teria um papel tão importante como em muitas visões ortodoxas, que eram taxadas de “idealistas”. Parte daqueles que salientavam a interpretação mínima dos coletivos defendiam que a mecânica quântica poderia ser “completada” por uma teoria que se referisse a entidades individuais, consoante com uma postura *realista*. O físico Leslie Ballentine divulgou bastante esta interpretação realista dos coletivos na década de 70, citando Einstein e o filósofo da ciência Karl Popper como fonte de inspiração. No entanto, a postura que parece mais dominante entre os defensores da tese mínima dos coletivos é *positivista*, como se vê no trabalho do físico israelense Asher Peres.

Na óptica quântica e em outras áreas em que os testes de não-localidade, associados ao teorema de Bell, são realizados, o conceito de dualidade onda-partícula tem sido um guia muito útil, indicando a força da interpretação da complementaridade. Na última década, o estudo de partículas correlacionadas abriu o campo da “informação quântica”, envolvendo computação, criptografia e comunicação em sistemas quânticos. O austríaco Anton Zeilinger, um grande expoente desta área, propôs uma interpretação baseada no que chamou de “princípio de quantização de informação”: um sistema quântico elementar, como uma partícula de spin $\frac{1}{2}$, carrega apenas 1 bit de informação. Sua interpretação informacional aplica-se especialmente bem para duas (ou mais) partículas correlacionadas, que no caso mais simples carregam 2 bits. A interpretação de Zeilinger captura a informação essencial de um sistema quântico e não afirma nada além, levando adiante o espírito positivista das interpretações ortodoxas.

Interpretações contemporâneas realistas

Na década de 1970, várias visões de cunho mais realista foram exploradas. Uma delas é a chamada interpretação dos muitos mundos, originada com o trabalho do norte-americano Hugh Everett em 1957. Nesta abordagem, o Universo como um todo estaria associado a uma função de onda que nunca colapsa. As superposições de estados, que a maioria das interpretações restringe para objetos microscópicos (ou para objetos macroscópicos cuidadosamente preparados e isolados, como as superposições de correntes supercondutoras recentemente obtidas em laboratório), são vistas como atingindo o próprio ser humano!

Outra interpretação de ontologia ondulatória, proposta pelo italiano Giancarlo Ghirardi e colaboradores, concebe que os colapsos ocorrem espontaneamente, de maneira aleatória, para qualquer sistema (não somente para aqueles sendo medidos). Houve também um novo interesse na interpretação dualista de David Bohm. A chamada mecânica bohmiana de Sheldon Goldstein e colaboradores concentrou-se apenas nas trajetórias dos corpúsculos (como o da figura 1d), deixando de atribuir realidade para o potencial quântico, ou seja, para a parte ondulatória. Conseguiram estender a mecânica bohmiana para o domínio relativístico, mas ao preço de uma extrema complicação nas equações.

Com uma filosofia parecida, mais recentemente, o holandês Gerard 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 apenas como uma representação matemática que permite realizar cálculos, sem corresponder a uma entidade real. Sua solução para o trilema de Bell envolve uma rejeição do que chamamos de “indução”, mas mesmo assim ele parece aceitar que a natureza seja não-local.

Outra tendência que se intensificou na década de 1990 foi explorar possíveis conexões entre a mente humana e a física quântica. De um lado, a velha hipótese de que a consciência do observador seria a causa do colapso da onda (em interpretações ondulatórias realistas) foi retomada no contexto da não-localidade associada ao teorema de Bell, por exemplo por Henry Stapp. De outro, a hipótese de que a consciência seria um fenômeno essencialmente quântico foi lançada por Roger Penrose, e tem vários seguidores, apesar de não haver evidência concreta de que seja verdadeira. Mais recentemente, autores como o indiano Amit Goswami popularizaram interpretações idealistas, que 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.

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.