

Mecânica quântica

uma nova imagem do mundo



Diferentemente das chamadas ‘revoluções científicas’ anteriores, que incluíram embates com concepções prevalecentes fora dos domínios da ciência, as mudanças de perspectiva ocorridas no início do século passado envolveram revisões radicais de concepções próprias da física. Em particular, a transição do mundo físico como contemplado no último ano do século 19 para aquele visto, duas décadas mais tarde, através da mecânica quântica – teoria que teve que ser inventada para descrever os fenômenos do diminuto universo das entidades atômicas e moleculares –, é, até hoje, a mais profunda e também, em muitos aspectos, a mais desconcertante delas. Nas palavras recentes de um especialista, “a mecânica quântica é muito mais que apenas uma ‘teoria’, ela é uma forma completamente nova de ver o mundo”.

A. F. R. de Toledo Piza

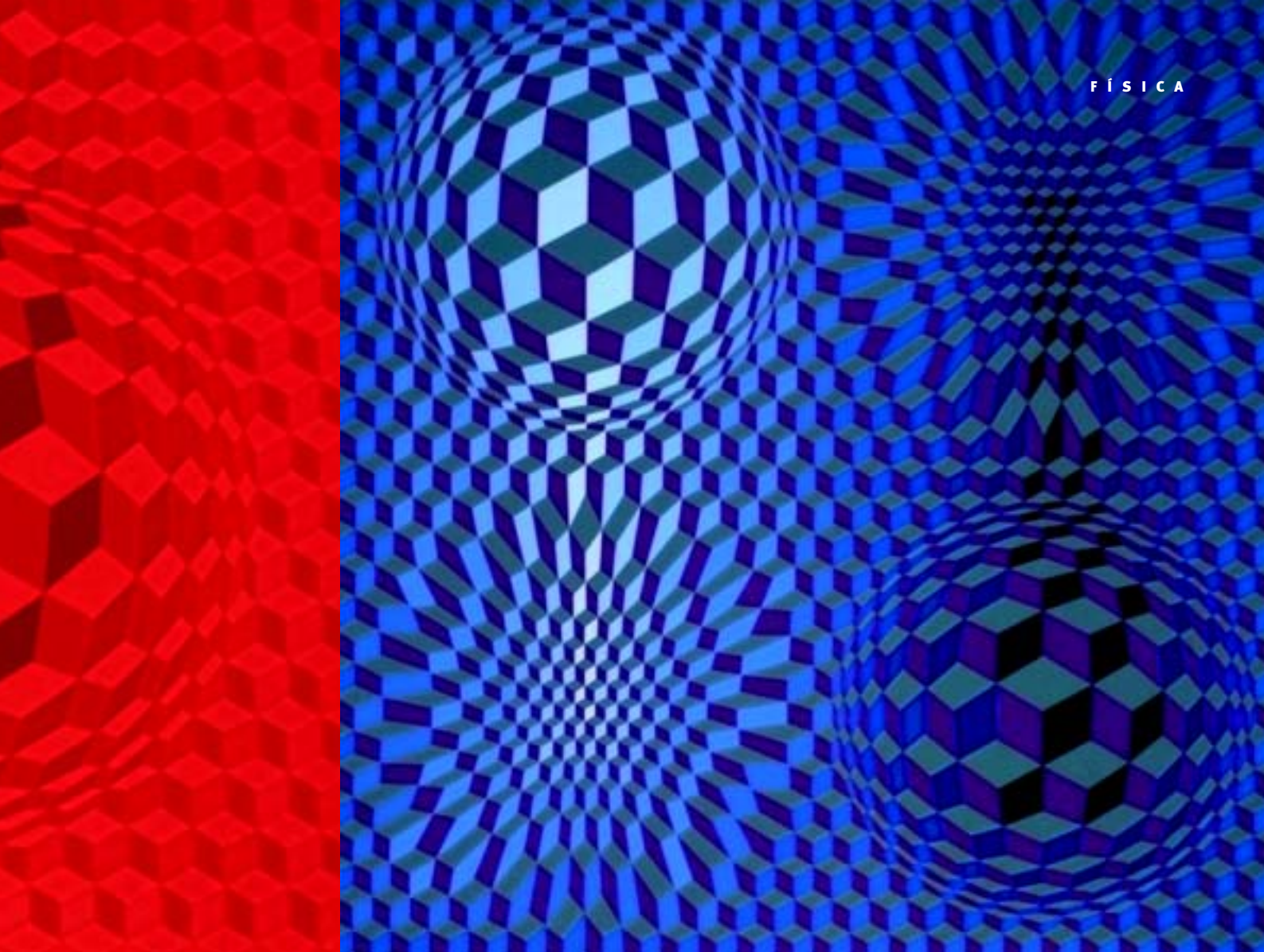
Instituto de Física,
Universidade de São Paulo

Até os físicos cultivam mitos sobre a física. Um desses mitos anuncia de forma recorrente o ‘fim da física’, significando, com isso, não seu colapso, mas o fechamento final e definitivo dessa forma de conhecimento. Um dos registros mais conhecidos disso data precisamente de 1900, quando o influente físico irlandês William Thomson (lord Kelvin, 1824-1907), visivelmente imbuído do espírito de mudança de século, afirmou, em uma conferência proferida na Royal Society e intitulada ‘Nuvens do século 19 sobre a Teoria Dinâmica do Calor e da Luz’ – assuntos de sua especialidade –, que “agora não há nada novo por ser descoberto em física. Tudo o que resta são medidas cada vez mais precisas”.

Lord Kelvin menciona que existiriam apenas “duas pequenas nuvens no horizonte da física”: o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley e o chamado problema da radiação do corpo negro. O éter era tido como um meio material que servia de suporte à propagação das ondas eletromagnéticas – luz, por exemplo.

Em 1887, os físicos norte-americanos Albert Michelson (1852-1931) e Edward Morley (1838-1923), em um dos experimentos mais famosos e importantes da física, não conseguiram comprovar – como estava inicialmente previsto – a existência do éter. Já o problema do corpo negro diz respeito à intensidade de radiação emitida por um corpo aquecido.

O nome ‘corpo negro’ vem do fato de que se trata de um corpo que deve ter a propriedade de absorver toda a radiação que incida sobre ele, reemitindo-a, depois de reprocessar a energia absorvida, segundo apenas propriedades gerais suas, notadamente a temperatura. Hoje, o exemplo mais notável de corpo negro é o próprio universo como um todo, que contém ‘radiação de fundo’ – o que exclui de consideração as altas temperaturas de estrelas; por exemplo, do Sol, em particular – correspondente a uma temperatura de 2,74 kelvin. A física da época não conseguia explicar, como, a uma dada temperatura, a intensidade da radiação



emitida dependia do valor da frequência com a qual ela era emitida.

A segunda das nuvens

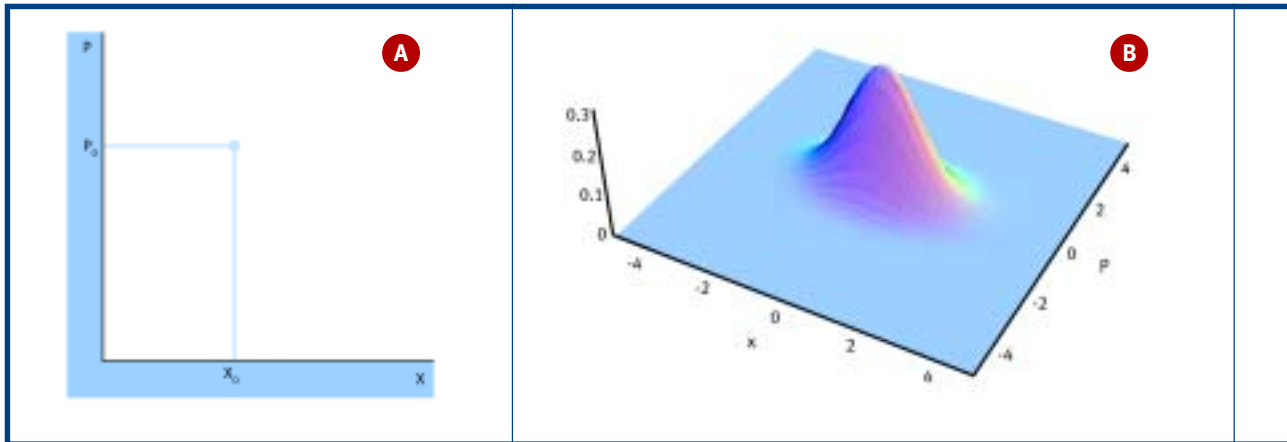
Ainda em 1900, a segunda das pequenas nuvens se transformaria em ativa tempestade, com o sucesso da hipótese dos 'quanta' do físico alemão Max Planck (1858-1947), ou seja, a de que, na natureza, a energia é emitida e absorvida em 'pacotes' – daí o uso do termo latino *quanta*, que no singular (*quantum*) significa 'quanto' ou 'quantidade' – e não como um fluxo contínuo, como se acreditava. A outra pequena nuvem mostraria sua face demolidora cinco anos mais tarde, com os trabalhos de Albert Einstein (1879-1955) sobre a teoria da relatividade restrita, em que ele mostrou que o conceito de éter era totalmente desnecessário.

Diferentemente das chamadas 'revoluções cien-

tíficas' anteriores, que envolveram embates com concepções prevaletentes fora dos domínios da ciência – como a revolução copernicana, que nasceu com a proposição feita pelo astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) de que a Terra e os planetas então conhecidos giravam em torno do Sol –, as mudanças de perspectiva ocorridas no início do século passado foram as primeiras grandes revoluções 'internas', isto é, que envolveram revisões radicais de concepções próprias da física.

Em particular, a transição do mundo físico como visto no último ano do século 19 por Kelvin – usualmente chamado mundo da física clássica – para o mundo visto através da mecânica quântica é, sem dúvida, até hoje, a mais profunda e também, em muitos aspectos, a mais desconcertante delas. Nas palavras recentes do anglo-americano Anthony Leggett, ganhador do prêmio Nobel de Física de 2003, "a mecânica quântica é muito mais que apenas uma 'teoria', ela é uma forma completamente nova de ver o mundo". ▶

VICTOR VASARELY / METAFORAS, 1979



A grande ruptura

No que se refere à mecânica, o ordenamento clássico do mundo foi completado pelo físico e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727), ao estabelecer que o movimento de sistemas de corpos materiais – planetas ou partículas – obedece a leis ou a equações de movimento determinísticas, ou seja, que permitem conhecer situações tanto passadas quanto futuras a partir de informação suficiente sobre a natureza do sistema e sobre sua situação em um dado instante de tempo. Especificamente, conhecidas as massas e as forças que agem sobre cada um dos corpos – o que define a natureza do sistema –, bem como conhecidas, em um determinado instante, suas posições e velocidades – o que define a situação ou o chamado estado do sistema naquele instante –, é possível, em princípio, determinar suas posições e velocidades, ou seja, seu estado em qualquer outro instante de tempo passado ou futuro, isto é, tanto as trajetórias que os corpos percorrem quanto a forma pela qual eles as percorrem.

Na realidade, a mecânica quântica, como é hoje entendida, emergiu apenas um quarto de século depois da proposta ousada de Planck, com os trabalhos do alemão Werner Heisenberg (1901-1976) e do austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), após um período de maturação conhecido como a época da ‘velha teoria quântica’, uma seqüência clarividente e quase heróica de colagens em que idéias inovadoras eram usadas lado a lado com elementos habilmente pinçados da física tradicional. Os protagonistas centrais nesse período foram novamente Einstein, bem como o dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) e o francês Louis de Broglie (1892-1987).

Na forma em que emergiu dos trabalhos de Heisenberg e de Schrödinger, a mecânica quântica

compartilha diversas características gerais da mecânica clássica. Notadamente, ela também descreve em termos de leis ou equações de movimento determinísticas a evolução ao longo do tempo do estado do sistema que esteja sendo considerado. A grande ruptura com as idéias clássicas ocorre em relação àquilo que de fato constitui o estado do sistema. E essa ruptura se dá basicamente por dois motivos: i) a dinâmica clássica levava a resultados em contradição com o comportamento observado em sistemas atômicos; ii) a incapacidade de a velha teoria quântica oferecer uma descrição coerente dos resultados experimentais.

A mudança de visão está longe de parecer natural ou intuitiva: enquanto, no caso da mecânica clássica, o estado é expresso em termos de quantidades que têm um conteúdo empírico imediato, como posições e velocidades, no caso da mecânica quântica, o estado do sistema é dado de forma muito mais abstrata, a ponto de ter que ser complementado por um conjunto de regras específicas de interpretação cujo propósito é o de estabelecer o contato indispensável entre as propriedades do estado quântico abstrato e aquilo que é efetivamente observado.

O que, então, passa a ser um estado no contexto quântico?

Questões inevitáveis

Tomemos como exemplo um caso bem simples: o de uma única partícula. Segundo a física clássica, a definição de estado dessa partícula em um determinado tempo t consiste em dar, em algum sistema de coordenadas, sua posição x e sua velocidade v – ou, equivalentemente, o seu momento, que é expresso pelo produto da velocidade pela massa da partícula ($p = mv$). Esse estado pode ser repre-

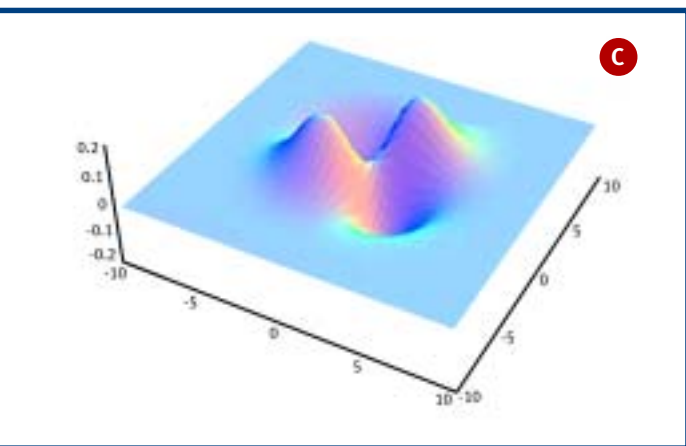


Figura 1. Em (a), estado clássico de uma partícula com posição x_0 e momento p_0 bem definidos, ou seja, sem imprecisão na medida dessas duas variáveis. Em (b), representação do estado clássico de uma partícula em uma situação real, ou seja, no caso em que os valores das medidas da posição e da velocidade (ou momento) da partícula contenham imprecisões. Em (c), um possível estado quântico bem definido de uma partícula. Os valores da distribuição em pares de posições diferentes podem não apenas ser negativos – como neste caso –, mas também, em geral, complexos

sentado como um ponto em um plano definido por um par de eixos representando os diferentes valores possíveis das posições e das velocidades (ou momentos), como mostra a figura 1a. Assim, conhecendo-se a massa da partícula e as forças que agem sobre ela, a dinâmica newtoniana permite obter o ponto correspondente ao estado da partícula em qualquer outro instante, anterior ou posterior a t .

Essa definição do estado clássico corresponde a uma situação ideal, em que a posição e a velocidade são conhecidas de forma absolutamente precisa. Em uma situação real, é inevitável que os valores das medidas – no caso, da posição e da velocidade da partícula – contenham imprecisões. Uma possível forma de descrever essa situação consiste em representar o estado imperfeitamente conhecido por uma distribuição sobre o plano das posições e das velocidades, como na figura 1b. Aqui, o estado é representado em cada pequena região desse plano por uma altura que é proporcional à probabilidade de que a posição e a velocidade da partícula estejam de fato nessa região. Novamente, conhecendo-se a massa da partícula e as forças agindo sobre ela, a dinâmica newtoniana permite calcular a distribuição que representa o conhecimento do estado da partícula em qualquer outro instante, passado ou futuro.

Em contraste com a descrição clássica, o estado quântico dessa mesma e única partícula – mesmo quando perfeitamente conhecido – é dado como uma distribuição de algo que tem caráter de probabilidade, mas que é dependente não de uma posição e de uma velocidade, mas de duas posições. Em outras palavras, os valores assumidos pela distribuição que caracteriza o estado quântico da partícula dependem de duas posições, x e x' , possivelmente diferentes (figura 1c), sem qualquer referência explícita a velocidades.

Assim, apenas uma das duas variáveis dinâmicas básicas de cada partícula intervém diretamente – e de forma ‘duplicada’ – na especificação do estado quântico. Como no caso da mecânica clássica, conhecendo-se a massa da partícula e as forças que agem sobre ela, é possível, utilizando-se as leis determinísticas da evolução dos estados quânticos, calcular a distribuição que representa o estado da partícula em qualquer instante passado ou futuro. Aqui, no entanto, algumas questões inevitavelmente se colocam: i) de que forma, precisamente, deve ser interpretada essa distribuição? ii) o que se pode dizer com relação às velocidades ou aos momentos?

Relação de incerteza

A primeira dessas perguntas foi parcialmente respondida em 1926 pelo físico teórico da Universidade de Göttingen (Alemanha), Max Born (1882-1970): os valores $\rho(x, x')$ – assumidos pela distribuição quando são iguais – devem ser interpretados como uma distribuição de probabilidades para a posição da partícula. Isso significa que a especificação completa do estado quântico de uma partícula não associa a ela, em geral, uma posição bem definida. Diz-se, então, que as partículas quânticas são, comumente, ‘deslocalizadas’. Essa interpretação deixa em aberto, porém, o papel desempenhado pelo restante da distribuição, $\rho(x, x')$, com x e x' diferentes.

Essa parte da questão tem a ver com o que o estado quântico diz sobre a velocidade e foi elucidada, em 1927, por Heisenberg, combinando a interpretação de Born com as idéias expostas, em 1924, por De Broglie sobre as propriedades ondulatórias das partículas quânticas e que haviam motivado o trabalho de Schrödinger. Segundo De Broglie, a cada valor p do momento da partícula se associa um comprimento de onda λ inversamente proporcional a p . Desse modo, caso fosse possível verter a distribuição $\rho(x, x')$ da linguagem das posições para a linguagem de comprimentos de onda – em que ela tomaria a forma de outra distribuição, ▶

$\rho(\lambda, \lambda')$ – então seria possível extrair dela uma distribuição de probabilidades para comprimentos de onda – e, portanto, valores do momento p –, usando a interpretação de Born para a nova distribuição.

A versão é, de fato, possível e se baseia em recursos matemáticos desenvolvidos um século antes – e, portanto, no contexto de um mundo ainda completamente clássico – por Jean Baptiste Fourier (1768-1830), matemático francês que apenas escapou da guilhotina graças a mudanças políticas que resultaram da execução de Maximilien Robespierre (1758-1794), líder da fase da Revolução Francesa conhecida como Reinado do Terror. A distribuição de probabilidades para a velocidade obtida desse modo depende de toda a distribuição bidimensional $\rho(x, x')$. A relação de incerteza de Heisenberg – que afirma a impossibilidade da definição simultânea da posição e da velocidade (ou momento) de uma partícula além de um determinado limite – nada mais é, na realidade, que uma propriedade geral da interdependência das duas distribuições de proba-

bilidade e, portanto, uma consequência geral da definição quântica de estado.

Lista de sucessos

Complementado por uma lei determinística de evolução dos estados quânticos, esse esquema rapidamente se mostrou inteiramente adequado para reproduzir quantitativamente todas as propriedades observadas dos espectros atômicos, em particular as que se mostravam recalcitrantes aos procedimentos híbridos da velha teoria quântica, como as intensidades das diversas linhas espectrais – estas últimas podem ser entendidas como a radiação eletromagnética emitida por um átomo quando este, depois de absorver energia, volta a algum outro estado de menor energia, que pode, em particular, ser seu estado normal (fundamental). Por exemplo, as ‘órbitas’ de Bohr – um primeiro mo-

Experiências com átomos frios

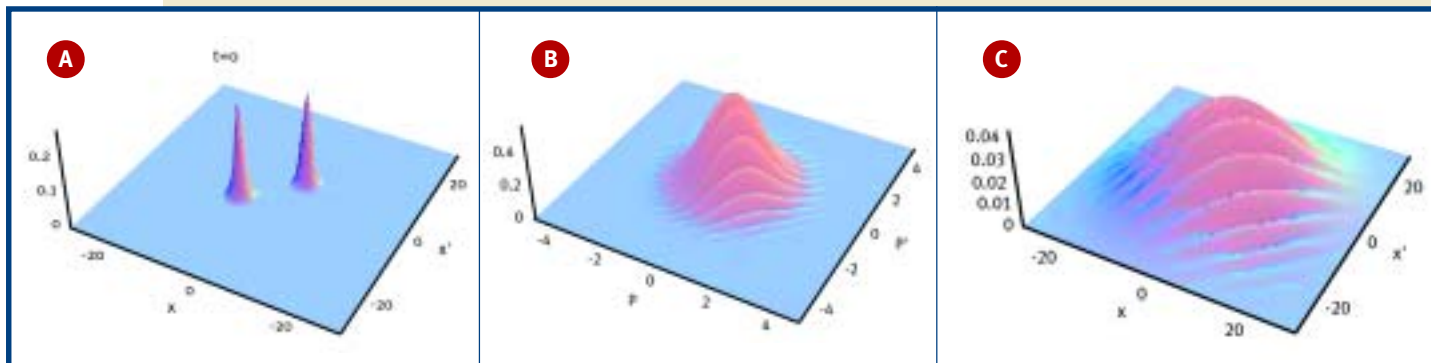
Em 1995, uma importante predição feita por Einstein – com base no trabalho a ele enviado em 1924 pelo físico indiano Satyendranath Bose (1894-1974) e referente ao comportamento de um gás quântico ideal a temperaturas muito baixas – pôde, pela primeira vez,

ser verificada em uma experiência de laboratório. Nesse experimento, bem como em outros que se seguiram, quando foi possível baixar a temperatura a uma fração de milionésimo de kelvin, foi observado que praticamente todos os átomos de um gás de bai-

xa densidade – aprisionado em uma armadilha que consistia basicamente de uma ‘garrafa magnética’ – passavam a ocupar um único estado quântico estacionário determinado pela armadilha.

Isso demonstrou o que havia sido previsto teoricamente e, por razões óbvias, denominado condensação de Bose-Einstein. Um condensado de Bose-Einstein é, portanto, um ‘laboratório’ ímpar para a realização experimental controlada de estados quânticos de partículas – através do controle das

Figura 2. Estado inicial em que parte dos átomos se encontra em torno da posição $x = -5$ e parte em torno da posição $x = 5$ na armadilha dividida por uma barreira na região $x = 0$ (a), e sua representação em termos de momentos (b). O item (c) representa o estado após evolução decorrente da remoção da armadilha e da barreira. Os valores em (b) e (c) são, na realidade, números complexos, dos quais os gráficos representam apenas os módulos



delo sobre como os elétrons se movem em torno do núcleo atômico – foram simplesmente descartadas, sendo substituídas por estados quânticos estacionários, isto é, com a propriedade especial de serem independentes do tempo, segundo a lei determinística de evolução da nova teoria.

Aplicações a outros fenômenos, cuja compreensão não era possível em termos da física clássica, logo aumentaram a lista de sucessos no uso da mecânica quântica. Entre os mais imediatos, estão: i) a compreensão do ferromagnetismo, ou seja, a existência de imantação permanente, como pode ocorrer no ferro; ii) a compreensão de propriedades dos núcleos dos átomos, vistos como sistemas formados por um conjunto de prótons e nêutrons ligados entre si por forças muito mais intensas que as forças eletromagnéti-

cas; iii) a compreensão da natureza das ligações químicas em termos da estrutura eletrônica dos átomos – no que se refere a estas últimas, diz-se, muitas vezes, que a mecânica quântica permitiu, pelo menos em princípio, reduzir a química à física.

Progressos experimentais mais recentes permitem até uma visualização direta de alguns estados quânticos (ver ‘Experiências com átomos frios’). ▶

características da armadilha – e para o estudo das propriedades dinâmicas desses estados – pela observação do resultado da evolução provocada, por exemplo, pela simples remoção da armadilha, que destrói o caráter estacionário do estado em que cada um dos átomos inicialmente se encontra.

Duas possibilidades

Em uma experiência realizada em 1997, pelo Grupo de Átomos Frios do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), em Boston (Estados Unidos), o volume da armadilha em que estavam confinados os átomos foi dividido em duas

partes, por meio de uma barreira óptica criada em seu interior. Quando os átomos frios se acomodam à nova situação da armadilha, qual é a natureza do estado quântico que é coletivamente ocupado? A resposta mais simples é a de que alguns átomos ficam aprisionados em uma das partes da armadilha, enquanto os demais ficam na outra parte. Uma caricatura unidimensional do estado quântico desse tipo, que representaria toda a coleção de átomos, aparece na figura 2, juntamente com sua representação em termos de momentos. A distribuição de probabilidades para as posições mostra duas regiões preferenciais, enquanto a distribuição de momentos se concentra em torno de zero, com uma dispersão que, em particular, obedece ao princípio de incerteza de Heisenberg.

ESTADO INICIAL

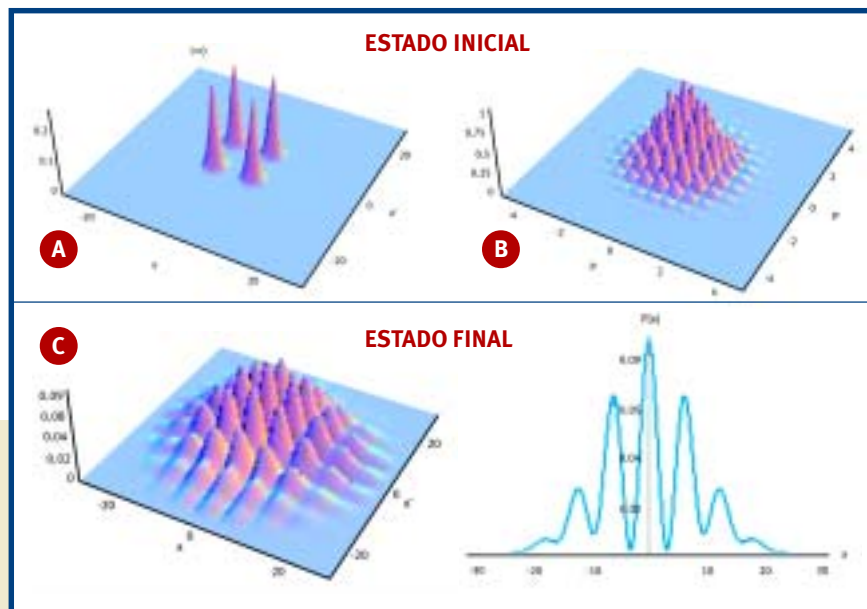
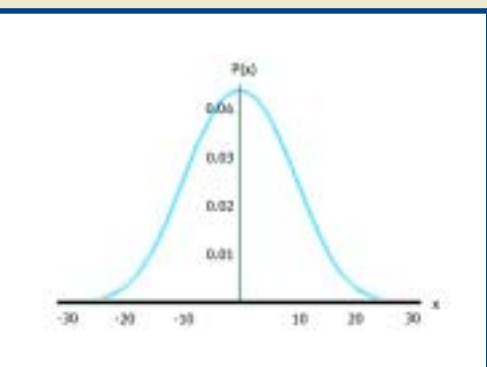


Figura 3. Em (a), estado inicial em que cada um dos átomos está ‘deslocalizado’ na armadilha dividida. Em (b), representação de (a) em termos de momentos. A estrutura adicional ao longo da linha $p = p'$ provém da ‘deslocalização’ dos átomos. Em (c), a distribuição final de probabilidades mostra uma sucessão de máximos e mínimos semelhante à que é observada experimentalmente – comparar com a figura 4

Essa não é, porém, a única possibilidade a ser considerada. Uma alternativa perfeitamente viável em termos quânticos é a de que cada um dos átomos se ‘deslocalize’, podendo ser encontrado com probabilidade 1/2 em cada uma das duas regiões em que foi dividida a armadilha. Nesse caso, a caricatura unidimensional do estado tem o aspecto da figura 3. No que se refere à representação espacial, ela difere da anterior pelos valores não nulos em duas regiões correspondentes a valores diferentes da posição, ou seja, $x \neq x'$. E isso modifica drasticamente ▶



Teste direto da ‘realidade’

Uma das facetas mais discutidas da nova teoria quântica de Heisenberg e Schrödinger foi certamente o caráter probabilístico da interpretação dos estados quânticos. A resistência de Einstein em admitir o alegado caráter fundamental dessa teoria é ilustrada por sua famosa afirmação, segundo a qual estava convencido de que “Deus não joga dados”.

O que resultou decisivo para que se pudesse obter progresso nessa questão foi o trabalho publicado por Einstein, em 1935, juntamente com Boris Podolsky (1896-1966) e Nathan Rosen (1909-1995), em que suas objeções foram formuladas de forma precisa. Esse trabalho, de fato, dá argumentos para que a pergunta que lhe serve de título seja respondida negativamente: ‘A descrição quântica

da realidade física pode ser considerada completa?’ Os argumentos se baseiam em uma definição do que seja uma ‘descrição completa’, segundo a qual ela deve ser capaz de dar conta corretamente de todos os ‘elementos de realidade’. Quanto a estes, são definidos como quaisquer propriedades de um sistema físico que possam ser determinadas sem que isso interfira de forma a modificá-las. O trabalho propõe, então, uma ‘experiência de pensamento’ que mostraria que esse requisito não é satisfeito pela teoria quântica.

A implicação seria a de que o caráter probabilístico da interpretação dos estados quânticos fosse uma consequência do caráter incompleto da teoria e, desse modo, meramente reveladora da existência de variáveis adicionais desconhecidas,

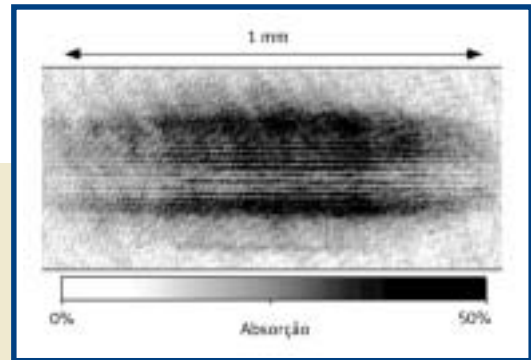
a distribuição de probabilidades para os momentos, que passa a mostrar numerosos máximos.

Qual dessas duas possibilidades corresponde à realidade?

Átomos ‘deslocalizados’

O resultado da experiência – que consiste em eliminar a armadilha juntamente com a barreira e observar a distribuição espacial de átomos depois de um determinado tempo de evolução – permite optar entre essas duas possibilidades. De fato, a distribuição espacial se expande de forma diferente nos dois casos, devido às diferentes distribuições de momentos. A distribuição de posições observada ao fim da expansão contém um padrão de máxi-

Figura 4. Distribuição final de átomos observada através da absorção de luz em experiência de 1997 feita no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (Estados Unidos)

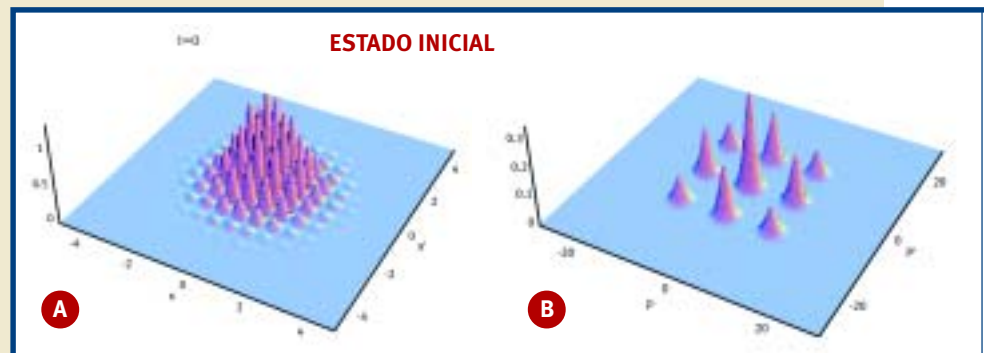


mos e mínimos que sinaliza claramente a preferência pela segunda das duas alternativas (figura 4), ou seja, os átomos devem estar inicialmente ‘deslocalizados’, como na figura 3.

Em outra experiência, realizada em 2001, na Universidade de Florença (Itália), são criadas não apenas uma, mas uma seqüência densa de barreiras paralelas, separando a armadilha inicial em um gran-

de número de regiões. Supondo os átomos ‘deslocalizados’, isso corresponde a um estado quântico como o esquematizado na figura 5, cuja distribuição de momentos $\rho(p, p' = p)$ tem, no entanto, apenas três picos. A distribuição observada após a expansão confirma esse tipo de estado, ao refletir essa distribuição de momentos, mostrando três máximos na distribuição final de posições.

Figura 5. A experiência de Florença (Itália), semelhante à da figura 3, mas com átomos ‘deslocalizados’ que podem ocupar um grande número de regiões da armadilha, separadas por barreiras (a). Em (b), a distribuição de momentos $\rho(p, p' = p)$ mostra três máximos, além de outros em regiões com $p' \neq p$. O estado final exhibe três grupos separados de átomos (c), como observado experimentalmente (d)



que vieram, por isso, a ser chamadas variáveis escondidas. As probabilidades na interpretação dos estados quânticos seriam, por sua vez, semelhantes às que são usadas, por exemplo, por companhias de seguro para garantir a viabilidade de suas operações ou por cassinos para assegurar sua margem de ganho no jogo da roleta.

O trabalho de Einstein, Podolski e Rosen – hoje, designado simplesmente EPR – foi respondido por Bohr, que questionou o julgamento de ‘não interferência’ sobre o sistema observado, como usado na discussão da experiência de pensamento proposta. De fato, o critério de não interferência usado por EPR se baseia em argumentos de localização: duas partes do sistema espacialmente separadas e não interagentes entre si não podem influir uma sobre a outra, ou seja, qualquer medida feita sobre uma delas não afetaria o estado da outra. Bohr argumentou, no entanto, que esse critério é violado pela ‘deslocalização’ – às vezes denominada não-localidade pelos físicos – que é admitida, em geral, pela definição quântica de estado de um sistema físico. Ou seja, uma medida feita sobre uma das duas partes do sistema pode alterar o estado quântico da outra, independentemente da existência de qualquer interação entre elas.

Com isso, a questão é remetida à da ‘realidade’ dos estados quânticos – em geral, ‘deslocalizados’ – como entidades fundamentais. A contribuição decisiva para tratá-la foi dada apenas em 1966 por John Bell (1928-1990), físico irlandês que trabalhava sobre a teoria das partículas elementares. Bell mostrou que as probabilidades envolvidas na interpretação dos estados quânticos ‘deslocalizados’ podiam, de fato, em determinadas condições, levar a resultados experimentais de natureza estatística diferentes e incompatíveis com aqueles que poderiam ocorrer caso elas tivessem o caráter das probabilidades com que operam as companhias de seguros ou que intervêm em uma roleta de cassino. Isso tornou possível um teste experimental da ‘realidade’ da ‘deslocalização’ quântica.

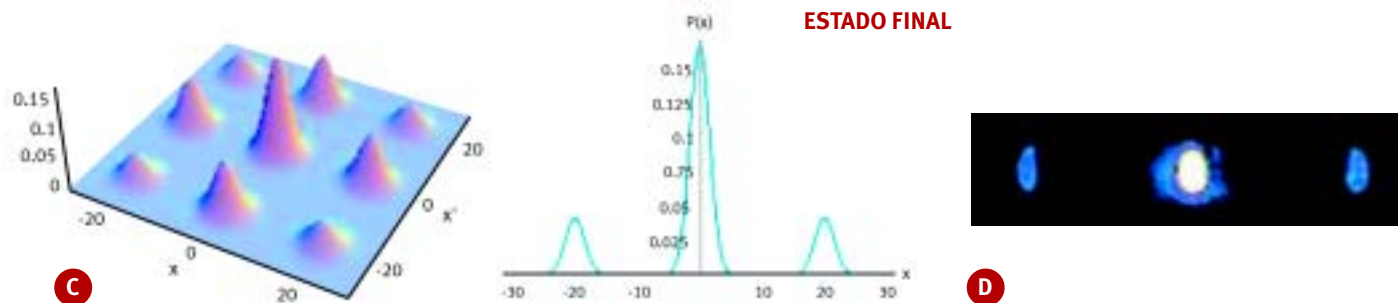
Uma paródia não técnica

Várias experiências foram realizadas com base no trabalho de Bell, sendo provavelmente as mais completas, até a presente data, as realizadas, como parte de seu programa de doutoramento, por Alain Aspect, cuja tese foi defendida em Paris, em 1983, tendo Bell como um dos integrantes da banca examinadora. Os resultados das experiências de Aspect apontam claramente para a correção das predições da teoria quântica em situações nas quais elas conflitam com as predições de uma estatística resultante da existência de variáveis escondidas e, por isso, são vistos como uma forte indicação experimental de que, não obstante Einstein, ‘Deus joga dados’.

Uma paródia não técnica – mas, mesmo assim, fiel e quantitativamente correta – do que está envolvido nas experiências de Aspect foi apresentada em uma conferência dada em 22 de outubro de 1988, no Departamento de Teologia da Universidade de Princeton (Estados Unidos), por Edward Nelson, físico inglês pertencente ao Departamento de Matemática dessa universidade. Com uma nova ambientação, a paródia é a seguinte: Antônio e Beatriz, que vivem em lugares distantes um do outro, participam de um jogo promovido por Teodorico, um amigo comum que trabalha em um laboratório de alta tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (SP). Todos os dias, Antônio e Beatriz recebem, cada um, um cartão contendo três quadrículas (A, B e C), que, quando raspadas, mostram uma de duas inscrições possíveis: ‘ganha’ ou ‘perde’. Antônio e Beatriz têm que escolher, ao acaso e independentemente um do outro, apenas uma das três quadrículas, raspá-la e registrar tanto a quadrícula escolhida quanto o resultado obtido.

Ao fim de alguns anos, eles compilam dados estatísticos sobre a frequência dos casos em que apenas um deles ganhou e verificam que: i) quando escolheram a mesma quadrícula, isso aconte-

P. PEDRI ET AL. / PHYS. REV. LETT. VOL. 87, 220401, 2001 (DETAIHE)



ceu sempre; ii) quando escolheram quadrículas diferentes, isso aconteceu em 25% dos casos.

O jogo consiste em descobrir como Teodorico preparava os pares de cartões.

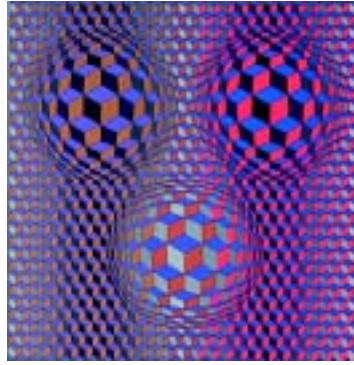
Jogo quântico

A primeira constatação de Antônio e Beatriz indica que as quadrículas dos dois cartões devem ter inscrições opostas. Quanto à segunda, existem duas possibilidades: i) ou as três inscrições em cada cartão são iguais; ii) ou uma delas é diferente das outras duas. Se elas são iguais, apenas um dos dois ganha, quaisquer que sejam as escolhas feitas por cada um. Se uma das inscrições é diferente das outras duas, entre as seis escolhas possíveis de quadrículas diferentes – A e B; B e A; B e C; C e B; A e C; C e A, sendo que as letras de cada par representam, respectivamente, a opção no primeiro e segundo cartões –, há duas em que apenas um deles ganha. Portanto, a fração dos casos em que isso ocorre não pode ser menor que $1/3$, qualquer que seja a proporção com que as duas possibilidades sejam utilizadas na preparação dos pares de cartões.

No entanto, Antônio e Beatriz observam que, na realidade, essa fração é apenas $1/4$. Esse resultado, incompreensível em termos de probabilidades como as de companhias de seguros ou jogos de cassino, pode, no entanto, ser entendido supondo que o jogo de Teodorico é um jogo quântico. Na realidade, o par de cartões corresponde a um par de fótons (partículas de luz); as quadrículas são determinados estados de polarização (direção do respectivo campo elétrico) de cada um deles; e as probabilidades são probabilidades quânticas. O que se conclui do resultado, diz Nelson, é que os cartões “não podem ser preparados com antecedência!”

O achado de Bell consistiu em identificar estados quânticos que, para certas medidas, levam a resultados estatísticos incompatíveis com qualquer preparação de tipo não quântico. No caso, o mínimo de $1/3$ para a fração dos casos em que apenas um dos jogadores ganha corresponde a um limite válido para qualquer preparação não quântica.

Existe, porém, um estado quântico para a polarização de um sistema de dois fótons – representado na paródia pelo conjunto de dois cartões – e existem também três direções de polarização para cada um deles – representadas pelas três quadrículas –, tais que, quando as direções escolhidas



para cada um dos fótons são diferentes – Antônio e Beatriz escolhem quadrículas diferentes –, a fração de casos em que apenas um dos fótons é medido como tendo a polarização escolhida – a leitura de apenas uma das quadrículas escolhidas é ‘ganha’ – é exatamente $1/4$ e, portanto, fora das possibilidades de um mundo não quântico.

O estado quântico de Bell, de fato, exclui a possibilidade de que a inscrição em cada quadrícula de cada cartão – isto é, o resultado da medida que ela representa – esteja ‘determinada com antecedência’ pela preparação do respectivo cartão. Os resultados obtidos dependem da existência de propriedades quânticas ‘deslocalizadas’, que envolvem o par de cartões como um todo.

Nova forma de ver o mundo

Além das experiências de Aspect e das experiências com átomos frios (ver ‘Experiências com átomos frios’), existe hoje um enorme repertório de resultados experimentais que confirmam de forma muito direta as previsões da teoria quântica. Mais que isso, essa teoria com 80 anos de existência tem que ser declarada absolutamente invicta até hoje, pois suas previsões, mesmo as mais surpreendentes ou estranhas, resultaram corretas em todos os casos em que puderam ser testadas.

Os testes mais diretos se tornaram possíveis apenas recentemente, graças ao desenvolvimento alcançado por técnicas experimentais de precisão em escala atômica. A isso se deve, sem dúvida, o forte reforço do grau de ‘realidade’ associado a essa nova forma de ver o mundo, dando origem, inclusive, a uma ‘engenharia quântica’, isto é, ao desenvolvimento sistemático de técnicas de manipulação e controle da realidade física como revelada através da teoria quântica.

O trabalho de Einstein, Podolski e Rosen criticava a teoria quântica por não ter previsões definidas para os ‘elementos de realidade’ de então. Setenta anos depois, pode-se dizer que as respostas dos oráculos experimentais às questões que lhes foram formuladas – em boa medida como resultado dessa crítica – parecem sinalizar obstinadamente no sentido de uma redefinição do que deva ser tomado como ‘realidade’.

VICTOR VASARBEY / COMUCTION, 1987

SUGESTÕES PARA LEITURA

DE TOLEDO PIZA, A. F. R. *Schrödinger & Heisenberg: a física além do senso comum* (Coleção Imortais da Ciência, Odysseus Editora, São Paulo, 2003).

HUSSEIN, M. S. e SALINAS, S. R. A. (orgs.) *100 anos de física quântica* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2002).

DAVIDOVICH, L. *O gato de Schrödinger: do mundo quântico ao mundo clássico* (Ciência Hoje, vol. 24, n. 143, p. 26, 1998)

DAVIDOVICH, L. *Informação quântica: do teletransporte ao computador quântico* (Ciência Hoje, vol. 35, n. 206, p. 24, 2004)

Na internet: NELSON, E. *Space-Time-Chance*.

Disponível em www.math.princeton.edu/~nelson/papers.html