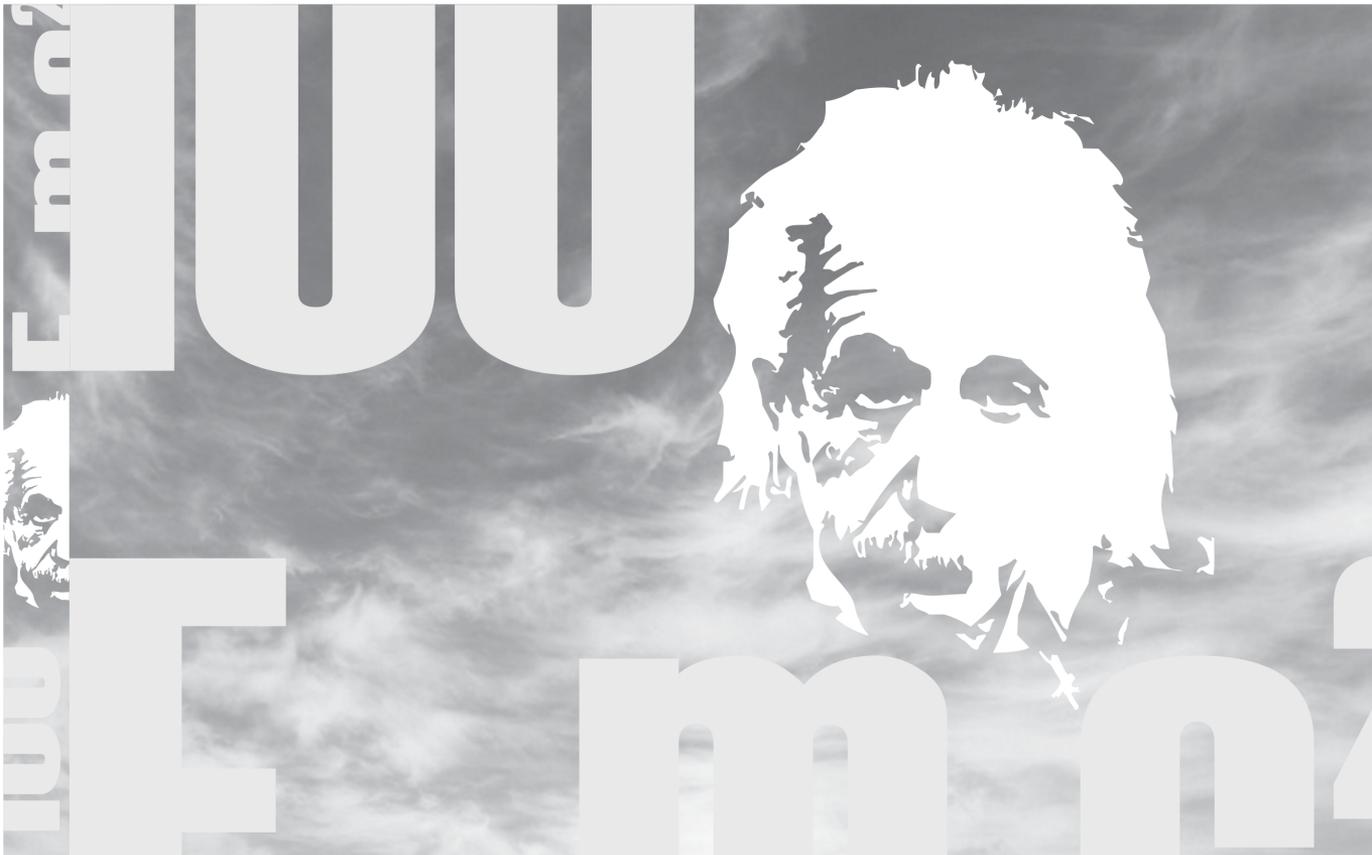


EINSTEIN E A MECÂNICA QUÂNTICA



Luiz Davidovich

Albert Einstein foi um dos pais da mecânica quântica e, ao mesmo tempo, seu grande crítico. No período de 1905 a 1925, ele funda três áreas da física quântica, com repercussões até os dias atuais: a teoria quântica da luz, a teoria quântica dos sólidos e a teoria dos gases bosônicos, incluindo a condensação de Bose-Einstein. Após esse período, no entanto, Einstein reage fortemente contra o caráter probabilístico da nova teoria, que considera incompleta. E ao analisar implicações da nova física, aponta aspectos extremamente sutis do mundo quântico, que só seriam melhor entendidos muitos anos depois.

A mais revolucionária das hipóteses de Einstein: os quanta de luz

Ilustração de abertura

Renan Nunes Paz

¹ EINSTEIN, A. *Annalen der Physik* (Leipzig), 17, 132, 1905; sobre ser a hipótese dos quanta considerada “muito revolucionária” por Einstein, mais que sua teoria da relatividade, ver PAIS, Abraham. *Subtle is the Lord. The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982. p. 30. Esse excelente livro deve ser consultado para um tratamento detalhado das contribuições de Albert Einstein.

Em artigo submetido para publicação em 17 de março de 1905, e publicado em 9 de junho do mesmo ano, com o título “Sobre um ponto de vista heurístico concernindo a geração e a conversão da luz”, Einstein propõe o que considerou a mais revolucionária de suas hipóteses¹: a de que a luz comporta-se como se fosse constituída de unidades elementares de energia proporcional à sua frequência. A formulação dessa hipótese, envolvendo a expressão “como se”, traduz a resistência de Einstein em aceitar que a luz pudesse ser de fato constituída de corpúsculos. A resistência tinha sólidas razões: a teoria de Maxwell do campo eletromagnético apoiava-se em firme base experimental, que incluía a demonstração pelo cientista britânico Thomas Young, em 1800, do caráter ondulatório da luz: um feixe de luz, passando por um anteparo contendo duas fendas, produz em outro anteparo uma figura de interferência, análoga à obtida quando dois estiletos oscilam sincronicamente em um tanque de água (figura 1).

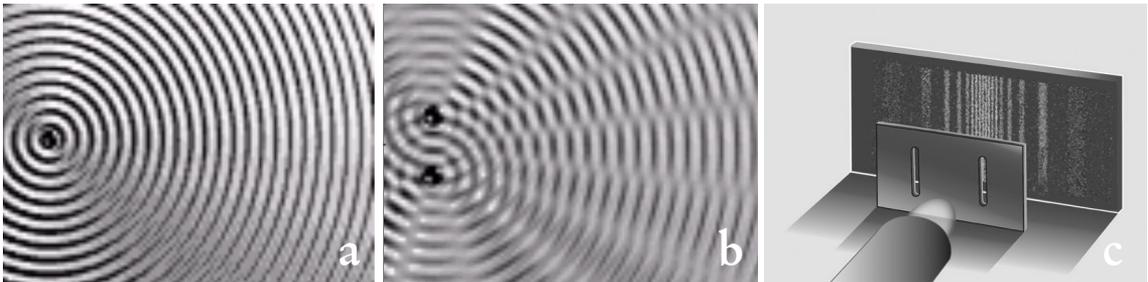


Figura 1: (a) Ondas produzidas em um tanque de água por um pino oscilante; (b) Ondas produzidas no mesmo tanque por dois pinos oscilantes: as raiais são um efeito de interferência, em que o máximo das ondas produzidas por um dos pinos superpõe-se ao mínimo das ondas produzidas pelo outro pino; (c) Experiência de Young: o feixe de luz passa pelo anteparo com duas fendas, produzindo em um segundo anteparo uma série de franjas claras e escuras.

Neste caso, a interferência é obtida quando o máximo da onda circular produzida por um estilete coincide com o mínimo da onda produzida pelo outro, resultando em que a superfície da água não se move.

É importante que os pinos oscilem sincronicamente, caso contrário as regiões em que há interferência destrutiva deslocar-se-iam rapidamente, e não poderíamos ver o padrão ilustrado na figura 1. Para a luz, cada fenda age como se fosse uma fonte secundária, e nas regiões em que o

máximo de uma onda coincide com o mínimo da outra ocorre sombra. Assim como, no tanque de água, é necessário que haja uma sincronicidade das oscilações produzidas pelas duas fendas. Dizemos, nesse caso, que há *coerência* entre as respectivas contribuições.

A resistência de Einstein a essa idéia é compartilhada por toda a comunidade científica da época, que por outro lado assimila rapidamente a contribuição de Planck, anunciada em 14 de dezembro de 1900, data que marca o nascimento da física quântica. Em 19 de outubro do mesmo ano, o físico alemão Max Planck divulga uma expressão matemática para o espectro do corpo negro, que se ajusta admiravelmente bem aos dados experimentais.² O resultado de Planck respondia a um desafio lançado em 1860 por Gustav Kirchoff³, o qual mostrou que a quantidade de energia emitida por unidade de área, de tempo e de frequência, por um corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele, convertendo-a em calor (esse é o “corpo negro”), depende apenas da frequência e da temperatura. Segundo Kirchoff, “é uma tarefa extremamente importante encontrar essa função”. Em 14 de dezembro, Planck publica uma dedução da fórmula apresentada em outubro, baseada na hipótese de que a matéria que emite a radiação é constituída de osciladores cujas energias só podem ser múltiplos de uma quantidade básica, proporcional à frequência de oscilação.⁴ A idéia de Planck de uma energia quantizada, porquanto revolucionária, abrange somente os osciladores materiais, e assim não entra em confronto com a teoria de Maxwell, sólido arcabouço da física do final do século dezenove.

O artigo publicado por Einstein em 1905 propõe uma explicação para o efeito fotoelétrico: luz incidindo sobre a superfície de certos metais leva à emissão de elétrons, cuja energia independe da intensidade da luz e parece aumentar com a frequência. A teoria clássica do eletromagnetismo, por outro lado, previa que a energia do elétron deveria aumentar com a intensidade da luz. Einstein propõe que a emissão de um elétron deve-se à absorção de um fóton de energia $h\nu$, sendo h a constante de Planck e ν a frequência da luz. A energia do elétron emitido é dada por $E = h\nu - W$, sendo W a energia necessária para vencer uma barreira de energia que depende do metal. A dependência linear da energia com a frequência, prevista por Einstein em 1905, só é confirmada experimentalmente 10 anos depois, através do trabalho experimental de Millikan na Universidade de Chicago⁵ e de Duane e Hunt em Harvard⁶. Em 1922, Einstein ganha o Prêmio Nobel de Física, com a citação:

² PLANCK, M. *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, 2, 202, 1900; *Abhandlugen*, vol. 1, p. 687.

³ KIRCHOFF, G. *Ann. Phys. Chem.* 109, 275, 1860.

⁴ PLANCK, M. *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, 2, 237, 1900; *Abhandlugen*, vol. 1, p. 698.

⁵ MILLIKAN, R. A. *Phys. Rev.*, 6, 55, 1915.

⁶ DUANE, W. & HUNT, F. L. *Phys. Rev.*, 6, 166, 1915.

“Por suas contribuições para a física teórica, e em especial pela sua teoria do efeito fotoelétrico”. Mesmo na citação do Prêmio Nobel, não é mencionada a teoria dos quanta de luz, ainda controversa nessa época.

Nasce a teoria quântica dos sólidos

Em 1907, Einstein inaugura a teoria quântica dos sólidos com dois artigos sobre o calor específico.⁷ Essa teoria, baseada na idéia de Planck de quantização dos osciladores materiais, mostra que o calor específico de sólidos anula-se quando a temperatura se aproxima do zero absoluto, e explica o valor anormalmente baixo do calor específico do diamante, que durante muitos anos desafiava qualquer explicação baseada na física clássica. É interessante observar que, até essa data, a hipótese de Planck sobre a quantização de energia dos osciladores materiais desempenha um papel apenas no problema da radiação do corpo negro. O trabalho de Einstein mostra que essa hipótese tem implicações muito mais gerais.

⁷ EINSTEIN, A. *Annalen der Physik* (Leipzig), 22, 180, 1907; *Annalen der Physik* (Leipzig), 22, 800, 1907.

Dualidade onda-corpúsculo e aleatoriedade na teoria dos quanta de luz

Em 1909 Einstein retorna à teoria quântica da luz, em dois artigos nos quais examina as flutuações de energia da luz emitida por um corpo negro, descrita pela distribuição de Planck.⁸ Nesse trabalho, Einstein mostra que há dois tipos de contribuição para essas flutuações, e associa uma delas ao caráter ondulatório da luz, e a outra ao caráter corpuscular, mencionando que esse segundo termo seria o esperado “se a radiação consistisse de quanta pontuais com energia $h\nu$ movendo-se independentemente”. Assim, muitos anos antes da introdução do conceito de complementaridade por Niels Bohr, Einstein aponta para a dualidade onda-corpúsculo da luz.

⁸ EINSTEIN, A. *Phys. Zeitschr.*, 10, 185, 1909; *Phys. Zeitschr.*, 10, 817, 1909.

Em 1916 e 1917, Einstein retorna ao problema da luz, com três artigos que tratam dos processos de emissão e absorção de radiação e que introduzem dois tipos de emissão, espontânea e induzida.⁹ A emissão espontânea ocorre quando um átomo ou molécula encontra-se em um estado excitado e emite radiação, na ausência de qualquer campo eletromagnético. Na emissão induzida, a radiação presente estimula o átomo ou molécula excitada a emitir. Segundo Einstein, a radiação emitida tem a mesma direção do pacote incidente. Mais ainda, “se um pacote de radiação faz com que uma molécula emita ou absorva uma quantidade

⁹ EINSTEIN, A. *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, 18, 318, 1916; *Mitt. Phys. Ges. Zürich*, 16, 47, 1916; *Phys. Zeitschr.*, 18, 121, 1917.

de energia $h\nu$, então um momento $h\nu/c$ é transferido para a molécula, dirigido ao longo do pacote no caso de absorção e na direção oposta, no caso de emissão”. Einstein associa pois, pela primeira vez, um momentum ao fóton! Muitos anos depois, o conceito de emissão induzida teria aplicações importantíssimas no maser (1956) e no laser (1960).

O processo de emissão espontânea tem dois elementos aleatórios: o instante e a direção de emissão. Isso preocupa Einstein profundamente, antes mesmo do aparecimento da interpretação probabilística da mecânica quântica. No artigo de 1917, Einstein considera ser “... um ponto fraco da teoria ... que ela deixe ao acaso o instante e a direção dos processos elementares”. Nesse mesmo artigo, prevê um desenvolvimento que só ocorreria dez anos mais tarde, com a teoria quântica da radiação de Dirac: “As propriedades dos processos elementares... fazem parecer quase inevitável formular uma teoria verdadeiramente quantizada da radiação”.

Em janeiro de 1920, escreve uma carta a Max Born, na qual revela sua preocupação com os aspectos probabilísticos da teoria da radiação: “Poderão a absorção e emissão quânticas da luz jamais ser entendidas no sentido do requisito de causalidade completa, ou um resíduo estatístico permanecerá? Devo admitir que me falte nesse ponto a coragem de uma convicção. Todavia, eu ficaria muito infeliz de renunciar à causalidade completa”¹⁰.

Desenha-se assim, desde cedo, a principal objeção de Einstein à teoria quântica: seu caráter probabilístico.

Ondas de matéria e condensação de Bose-Einstein

Em setembro de 1923, Louis de Broglie faz duas comunicações à Academia Francesa de Ciências.¹¹ Nelas, propõe que a relação $E = h\nu$ aplica-se não somente à radiação, mas também a partículas materiais e, em particular, a elétrons. Isto é, devem-se associar ondas a partículas materiais, implicando que os fenômenos ondulatórios demonstrados anteriormente para a radiação deveriam ser observáveis com partículas. Essas comunicações serviram de base para a tese defendida por de Broglie em novembro de 1924. Uma cópia da tese foi enviada a Einstein por Langevin, um dos examinadores de de Broglie.

Nessa época, Einstein encerrava seu ciclo de contribuições fundamentais à física quântica. Em três artigos, o primeiro publicado em setembro de 1924¹² e os dois outros em 1925¹³, Einstein deduzia as propriedades estatísticas de um gás de partículas idênticas, inspirado por um artigo

¹⁰ EINSTEIN, A. Carta a M. Born, 27 de janeiro de 1920; em BORN, M. (Org.). *The Born-Einstein Letters*. New York: Walker, 1971. p. 23.

¹¹ BROGLIE, L. de C. R. *Acad. Sci. Paris*, 177, 507, 1923; *C. R. Acad. Sci. Paris*, 177, 548, 1923.

¹² *Sitzungsberichte*, Preussische Akademie der Wissenschaften, p. 261, 1924.

¹³ *Sitzungsberichte*, Preussische Akademie der Wissenschaften, p. 3, 1925; *Z. Phys.*, 31, 784, 1925.

enviado para ele pelo físico Satyendra Nath Bose, onde a equação de Planck para a luz é deduzida a partir de um novo método de contagem de estados. O trabalho de Bose impressionou fortemente Einstein, que aceitou o pedido de Bose de interceder para que o artigo, rejeitado pelo *Philosophical Magazine*,¹⁴ fosse publicado. Einstein traduziu o artigo, escrito em inglês, para o alemão, e submeteu-o ao *Zeitschrift für Physik*, adicionando uma nota de tradutor: “Em minha opinião, a dedução da fórmula de Planck por Bose constitui um avanço importante. O método usado aqui leva também à teoria quântica do gás ideal, como discutirei com mais detalhes em outro lugar”.

No segundo artigo, Einstein mostra que, para temperaturas suficientemente baixas, um número crescente de moléculas ocupa o estado de energia mais baixa do gás (com energia cinética nula), efetuando-se assim uma separação do conjunto de moléculas em duas partes, uma que condensa, e outra que permanece um gás ideal. Esse fenômeno é conhecido hoje em dia como “condensação de Bose-Einstein”. Einstein observa ainda, nesse mesmo artigo, que “os quanta e as moléculas não são tratados como estatisticamente independentes”, e que a diferença entre a contagem de estados de Boltzmann e a usada nos artigos de Bose e Einstein “expressam indiretamente uma hipótese sobre a influência mútua das moléculas que por ora é de natureza bastante misteriosa”. Essa influência é entendida pouco depois, através dos trabalhos de Pauli, como uma consequência da obrigatoriedade da função de onda, associada às partículas consideradas completamente simétrica por Einstein.

Em seu primeiro artigo sobre gases quânticos¹⁴, Einstein deduz uma fórmula para as flutuações de energia análoga à que deduzira para a luz em 1909. Novamente aparecem dois termos, um que pode ser associado a partículas e outro a ondas. A existência desse segundo termo é reconhecida por Einstein como uma evidência do aspecto ondulatório da matéria, enfatizado por Louis de Broglie. Para Einstein, essas ondas seriam “ondas guia”, devendo-se associar uma onda a cada partícula.

É interessante observar que, nesse período, Einstein é ainda um dos poucos defensores da tese de que a luz era constituída de corpúsculos, não obstante o fato de que Arthur Compton mostrara, em 1922, ao analisar experimentos em que radiação incidente sobre um átomo provoca a emissão de um elétron e de radiação pelo átomo, que “os quanta de radiação carregam consigo momentum, além de energia”¹⁵.

¹⁴ *Sitzungsberichte*, Preussische Akademie der Wissenschaften, p. 261, 1924.

¹⁵ COMPTON, A. H. *Phys. Rev.*, 21, 483, 1923.

Niels Bohr, juntamente com Hendrik Anton Kramers e John Clarke Slater propõe em janeiro de 1924 uma teoria alternativa¹⁶, chamada de teoria BKS devido às iniciais de seus autores, que abre mão da conservação da energia e do momentum em processos individuais de emissão de radiação em nome da manutenção da teoria ondulatória. Nessa teoria, quando um átomo emite radiação em uma transição de um estado com maior energia para um de menor energia, a energia do átomo muda descontinuamente (uma vez que, segundo o modelo atômico postulado por Bohr em 1913, os níveis atômicos são discretos), enquanto a energia do campo muda continuamente. Isso torna impossível a conservação da energia e momentum em cada etapa do processo: segundo os autores, essas leis de conservação valeriam apenas como uma média estatística, tomada sobre um número muito grande de processos de emissão. Os autores argumentam que as experiências realizadas por Compton em 1922 (e publicadas em 1923) envolvem uma média sobre várias realizações e, portanto, não demonstram a validade das leis de conservação para cada processo individual. Mais ainda, na teoria BKS, o problema da indeterminação do instante de emissão espontânea, que tanto preocupava Einstein, é resolvido através da proposição de que não existe de fato uma emissão espontânea, postulando um “campo eletromagnético virtual”, que de fato provocaria uma emissão induzida para o átomo excitado. Testes experimentais, desenvolvidos por Walther Bothe e Hans Geiger em Berlim¹⁷, e por Arthur Compton e A. W. Simon¹⁸ em Chicago, não confirmaram, no entanto, a teoria BKS.

Em maio de 1925, Einstein é homenageado, por ocasião de sua visita ao Rio de Janeiro, na Academia Brasileira de Ciências. Segundo a ata da sessão da Academia, “O professor Einstein, agradecendo às homenagens que lhe são prestadas, ao invés de um discurso, diz ele, mostra o seu reconhecimento e o seu apreço à Academia fazendo uma rápida comunicação sobre os resultados que, na Alemanha, estão sendo obtidos nos estudos realizados sobre a natureza da luz, comparando a teoria ondulatória e a dos quanta”. Referia-se ele às experiências de Bothe e Geiger¹⁹. Em 21 de abril de 1925, diante das novas evidências experimentais, Bohr propõe, em carta escrita para Fowler, “dar aos nossos esforços revolucionários um funeral tão digno quanto possível”²⁰. E escreve, em artigo publicado julho de 1925: “Devemos estar preparados para o fato de que a generalização necessária da teoria eletrodinâmica clássica requer uma revolução profunda nos conceitos sobre os quais se baseou até agora a descrição da natureza”²¹.

¹⁶ BOHR, N.; KRAMERS, H. A. & SLATER, J. C. *Phil. Mag.*, 47, 785, 1924.

¹⁷ BOTHE, W. & GEIGER, H. *Z. Phys.*, 26, 44, 1924; *Naturw.*, 13, 440, 1925; *Z. Phys.*, 32, 639, 1925.

¹⁸ COMPTON, A. H. & SIMON, A. W. *Phys. Rev.*, 26, 289, 1925.

¹⁹ BOTHE, W. & GEIGER, H. *Op. cit.*

²⁰ PAIS, A. *Op. cit.*

²¹ BOHR, N. *Z. Phys.*, 34, 142, 1925.

Nasce a mecânica ondulatória

A evidência do caráter ondulatório da matéria, exposta no artigo de Einstein, teve um papel decisivo no aparecimento da nova teoria quântica, desenvolvida pelo físico austríaco Erwin Schrödinger e pelo físico alemão Werner Heisenberg. Em artigo enviado para publicação no final de 1925, Schrödinger propõe tratar o gás quântico diretamente a partir de uma descrição ondulatória, “levando a sério a teoria ondulatória das partículas em movimento de Louis de Broglie-Einstein”²². Em 1926, Schrödinger publica seu artigo sobre a equação de ondas para o átomo de hidrogênio²³, que apresenta como uma generalização das considerações de de Broglie e Einstein. Esse artigo marca o nascimento da mecânica ondulatória. As duas contribuições de Schrödinger são recebidas com entusiasmo por Einstein. Em carta a Michel Besso, datada de 1º de maio de 1926, escreve que “Schrödinger publicou dois artigos maravilhosos sobre as regras quânticas”²⁴. Segundo Abraham Pais, essa é a última vez em que ele escreve algo aprovando a mecânica quântica²⁵.

Em junho de 1926, Max Born observa que o módulo ao quadrado da função de onda de Schrödinger deve ser interpretado como uma densidade de probabilidade.²⁶ O abandono da idéia de causalidade clássica, decorrente dessa interpretação, leva Einstein a escrever para Born, em dezembro de 1926, que “A mecânica quântica é muito impressionante. Mas uma voz interna me diz que ela não é ainda a última palavra (*the real thing*). A teoria produz muitos resultados, mas não nos traz mais perto do segredo do Velho. Estou de qualquer forma convencido de que Ele não joga dado”²⁷.

Em março de 1927, Heisenberg estabelece o princípio da incerteza²⁸, mostrando que não é possível ter informação arbitrariamente precisa sobre o momentum (para uma partícula com massa m , na ausência de campos eletromagnéticos, o *momentum* é definido como o produto da massa da partícula por sua velocidade) e a posição de uma partícula: o produto das duas incertezas, definidas matematicamente como o desvio médio quadrático das medidas, deve ser maior que a constante de Planck dividida pelo número 4π .

Cabe aqui um comentário sobre a diferença entre os conceitos de estado nas físicas clássica e quântica. Na teoria clássica, o estado de uma partícula é definido pela posição e pelo momentum da mesma. Conhecidas essas duas quantidades em um dado instante, e as forças que agem sobre a partícula, é possível prever o valor da posição e do momentum da partícula em qualquer instante futuro. Na teoria

²² SCHRÖDINGER, E. *Phys. Zeitschr.*, 27, 95, 1926.

²³ SCHRÖDINGER, E. *Annalen der Physik* (Leipzig), 79, 361, 1926.

²⁴ PAIS, A. *Op. cit.*

²⁵ PAIS, A. *Op. cit.*

²⁶ BORN, M. *Z. Phys.*, 37, 863, 1926.

²⁷ BORN, M. (Ed.) *The Born-Einstein Letters*. p. 90. *Op. cit.*

²⁸ HEISENBERG, W. *Z. Phys.*, 43, 172, 1927.

quântica, a posição e o momentum não podem ser conhecidos com precisão arbitrária no mesmo instante. O estado quântico é definido por uma função matemática, a *função de onda*, que permite determinar as probabilidades de obter valores da posição e do momentum, ou de qualquer outra grandeza física, quando se realizam medidas sobre a partícula. Conhecida a função de onda em determinado instante, a equação de onda permite determiná-la em qualquer instante posterior.

A interpretação probabilística, a dualidade onda-corpúsculo e a complementaridade

A interpretação probabilística permite finalmente conciliar a teoria ondulatória de Maxwell com a noção de que a luz é constituída de corpúsculos. Na experiência de Young, a onda associada aos corpúsculos descreve a probabilidade de eles chegarem nas diversas regiões do anteparo onde se produzem as franjas claras e escuras. As regiões de sombras correspondem a valores nulos da distribuição de probabilidades, ou seja, é nula a probabilidade de um fóton ser observado nas regiões de sombra.

Uma consideração mais detalhada desse experimento, à luz da interpretação probabilística, leva a questões intrigantes. Experiências de Young têm sido realizadas com feixes tênues de luz, de modo que praticamente um só fóton passa pelas fendas de cada vez. Após vários fótons passarem, observamos que aparece a figura de interferência: nenhum fóton atinge a região de sombra. Ora, para produzir a interferência, a onda deve passar pelas duas fendas ao mesmo tempo. Se fechamos uma das fendas, podemos verificar efetivamente que some a figura de interferência. O que ocorre então com os corpúsculos, passam também eles simultaneamente pelas duas fendas? Para responder a essa questão, devemos pensar em uma experiência que permita verificar a hipótese. Colocamos, logo após cada uma das fendas, um detector de fótons, e observamos que, para feixes tênues de luz, jamais ouvimos “cliques” coincidentes em ambos os detectores: os fótons passam sempre, nessa experiência, por uma das duas fendas! Por outro lado, some nesse caso a figura de interferência, pois os fótons detectados são absorvidos pelos detectores.

Não importa como se faça a medida, sempre que detectamos por onde passam os fótons, some a figura de interferência! Esse fenômeno reflete um aspecto complementar da mecânica quântica, salientado pela primeira vez por Niels Bohr: as manifestações dos aspectos corpuscular

(nesse caso, fótons com trajetória definida) e ondulatório ocorrem em experimentos distintos. A configuração experimental é um elemento essencial para a descrição do sistema. O físico dinamarquês Niels Bohr cunha um termo, o *phenomenon*, que se refere a observações obtidas sob condições especificadas, incluindo uma descrição do aparato experimental. Para ele, as condições de medida constituem um elemento inerente a qualquer fenômeno ao qual o termo “realidade física” possa ser atribuído.

Para a física quântica, a observação das franjas exclui, conforme prevê o princípio da complementaridade, afirmações do tipo “o fóton passou por uma fenda ou por outra”. Só podemos dizer que a partícula é descrita por uma função de onda que a localiza em torno das duas fendas ao mesmo tempo! A superposição dessas duas contribuições localizadas produz a figura de interferência, exatamente como nas ondas em um tanque de água.

Mais especificamente, sendo a densidade de probabilidade, segundo Max Born, proporcional ao quadrado do módulo da função de onda, se esta é dada pela soma de duas contribuições (as ondas que emanam das duas fendas na experiência de Young), teremos no quadrado termos que envolvem produtos das duas ondas. São esses os termos de interferência.

Realidade objetiva e estados emaranhados

A partir desse momento, Einstein trava uma batalha heróica contra a nova mecânica quântica, procurando encontrar paradoxos que demolissem as bases dessa teoria. As discussões que teve com Niels Bohr a esse respeito constituem um ponto alto da física do século XX.²⁹ Convencido finalmente da consistência da teoria, Einstein considera-a, no entanto, incompleta, e almeja uma teoria que permita a descrição determinista de fenômenos independentemente das condições experimentais, ou seja, uma teoria que descreva o que ele chama de *realidade objetiva*.

Perseguindo o objetivo de apontar o caráter incompleto da mecânica quântica, Einstein discute, em artigo publicado em 1935 juntamente com Boris Podolsky e Nathan Rosen³⁰, um aspecto extremamente sutil da nova teoria, envolvendo a noção de *estados emaranhados*. Nesse artigo, é introduzido o conceito de “elemento de realidade física”: “se, sem perturbar um sistema, podemos prever com certeza (isto é, com probabilidade igual a um) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento de realidade física correspondendo a essa quantidade física”.

²⁹ BOHR, N. in SCHILP, P. (Ed.) *Albert Einstein. Philosopher-Scientist*. New York: Tudor, 1949. p. 199.

³⁰ EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B. & ROSEN, N. *Phys. Rev.*, 47, 777, 1935.

Considera-se então o seguinte sistema. Duas partículas, cada uma com posição e momentum (q_i, p_i) , estão em um estado com posição relativa bem definida $q = q_1 - q_2$ e momentum total também bem definido $p = p_1 + p_2$ (pode-se mostrar que, embora não se possa ter q_i e p_i bem definidos ao mesmo tempo para uma partícula, devido ao princípio da incerteza de Heisenberg, isso é possível para q e p). É importante observar que somente quantidades relativas ao conjunto de duas partículas estão bem definidas: a posição e o momentum de cada partícula permanecem indefinidos, ligados apenas pela condição de que a soma dos momenta deve ser igual a p e a diferença de posições igual a q . Essa é a situação típica de estados emaranhados: o estado do sistema global é conhecido, mas os estados das partes que o compõem são incertos.

Supõe-se então que a partícula 1 é observada muito depois das duas partículas terem interagido, quando estão muito distantes uma da outra. Como q é bem definido, se medirmos a posição da partícula 1 poderemos saber a posição da partícula 2, sem interagir diretamente com esta partícula. Portanto, de acordo com os autores, q_2 é um elemento de realidade. Por outro lado, poderíamos também medir o momentum da partícula 1, e assim determinar o momentum da partícula 2 sem interagir com ela. Segue assim que p_2 é também um elemento de realidade. Mas a mecânica quântica afirma que q_2 e p_2 não podem ser simultaneamente elementos de realidade, pois não podem ser bem determinados ao mesmo tempo. Portanto, segundo os autores, a mecânica quântica seria uma teoria incompleta. Esse argumento fica conhecido como o “paradoxo EPR”, em virtude das iniciais dos três autores.

Niels Bohr contrapõe a esse argumento o conceito de complementaridade³¹: arranjos experimentais diferentes e complementares são necessários para medir a posição e o momentum da partícula 1, e a complementaridade desses arranjos deve ser levada em consideração na descrição do sistema. Nesse sentido, o conceito de elementos de realidade só deveria ser aplicado para grandezas físicas que podem ser perfeitamente definidas ao mesmo tempo.

No mesmo ano de 1935, Schrödinger publica, logo após Einstein, Podolsky e Rosen, três artigos que aprofundam o exame de conseqüências sutis da nova teoria quântica.³² No primeiro desses artigos, reconhece e estuda o fenômeno de emaranhamento, afirmando que “Eu não diria que o emaranhamento é *um* mas o traço característico da mecânica quântica, aquele que leva ao abandono completo

³¹ BOHR, N. *Phys. Rev.*, 48, 696, 1935.

³² SCHRÖDINGER, E. *Naturw.*, 23, 807, 1935; 23, 823, 1935; 23, 844, 1935. Tradução para o inglês por J. D. Trimmer, *Proc. Am. Phys. Soc.*, 124, 3235, 1980.

do pensamento clássico”. Escreve ainda: “Dispomos assim provisoriamente (até que o emaranhamento seja destruído pela observação) apenas de uma descrição comum dos dois [subsistemas] em um espaço de mais dimensões. Esta é a razão pela qual a informação sobre os sistemas individuais pode ser extremamente reduzida, ou mesmo nula, enquanto a informação sobre o sistema combinado permanece máxima. A melhor informação possível do todo não inclui a melhor informação possível sobre suas partes – e isso é que vem constantemente nos assombrar”.

Propõe ainda um experimento mental para mostrar um aparente paradoxo que resulta das leis da física quântica. A proposta, conhecida como “gato de Schrödinger”, ganhou fama nas décadas seguintes e ainda hoje é um bom exemplo da relação extremamente sutil entre os mundos microscópico e macroscópico. Nos últimos anos, foi possível entender um pouco melhor essa relação, e sujeitá-la a testes experimentais.

O gato de Schrödinger

No mundo microscópico, é comum descrever o comportamento de sistemas através de funções de onda não locais, como no caso da experiência de Young, em que a função de onda do corpúsculo que passa pelo anteparo com duas fendas é localizada em torno das duas fendas. Em seu artigo sobre o gato, Schrödinger argumenta que a existência desses estados não locais no mundo microscópico implica necessariamente que estados desse tipo devem também existir no mundo macroscópico.

O argumento de Schrödinger é baseado no fato de que a equação por ele proposta é linear. Isso significa que, se as ondas associadas a um sistema físico, por exemplo, um fóton ou um átomo, interferem de modo coerente em um determinado instante, essas sobreposições não desaparecem, ou seja, mantêm-se à medida que o tempo passa.

Considere-se agora um gato em uma gaiola hermeticamente fechada, na qual é instalada uma cápsula de cianeto (veneno mortal), que pode ser quebrada por um dispositivo acionado ao ser atingido por uma partícula emitida por um átomo radioativo, também presente na gaiola.

Sendo esse átomo radioativo um sistema quântico, seu processo de emissão de partículas (ou decaimento) pode ser descrito por uma função de onda. Inicialmente, temos uma função que descreve o átomo sem emitir a partícula, mas, à medida que o tempo passa, começa a surgir uma outra componente, que determina a probabilidade de que uma partícula

tenha sido emitida em cada instante. Com o tempo, essa outra função de onda torna-se maior, já que a probabilidade de o átomo emitir uma partícula vai aumentando, de modo que, para tempos grandes, só ela estará presente, indicando que o átomo decaiu e uma partícula certamente foi emitida.

Em um instante intermediário, essas duas funções de onda estariam convivendo simultaneamente no sistema, uma representando o átomo antes de emitir uma partícula e outra o átomo decaído mais a partícula emitida. Lembremos que, se o átomo decaí, a cápsula de cianeto é quebrada, e o gato morre; se o átomo permanece no estado inicial, o gato estará vivo. Portanto, em instantes intermediários, o estado do gato também deve envolver uma superposição de dois estados, um em que ele está vivo e outro em que está morto! O caráter coerente dessa superposição pode em princípio ser colocado em evidência através de uma experiência de interferência. Resta então a pergunta: seria possível colocar em evidência a interferência entre estados macroscopicamente distintos, como os estados do gato? Como realizar essa experiência?

Se simplesmente abrimos a gaiola e observamos o estado do gato, verificamos que ele está vivo ou morto. De fato, essa experiência é equivalente a observar por qual fenda passou a partícula na experiência de Young: verificamos que a partícula sempre passa por uma das duas fendas, mas ao mesmo tempo desaparece a figura de interferência. Ou seja, verificar o caminho da partícula e o efeito de interferência são experiências complementares. Precisaríamos assim pensar em uma maneira de colocar em evidência a coerência do estado do gato, o que envolve uma experiência complementar à de verificar se ele está vivo ou morto.

O caráter central na mecânica quântica da questão colocada por Schrödinger decorre do fato de estar esse problema intimamente ligado à teoria da medida quântica. No processo de medida, um equipamento macroscópico, o aparelho de medida, interage com um sistema microscópico, digamos um átomo que pode estar em um de dois estados (como o átomo que decaí, no exemplo acima), e um ponteiro igualmente macroscópico aponta para a direita ou para a esquerda, dependendo do estado do átomo. Suponha que o átomo esteja em uma superposição dos dois estados, como o átomo na gaiola onde está o gato. O ponteiro de medida deveria então ser colocado em uma superposição das duas posições, direita e esquerda. Na experiência do gato, este funciona de fato como um aparelho de medida, sensível ao estado do átomo que decaí.

Um exame mais cuidadoso desse sistema mostra que o átomo e o aparelho de medida estão em um estado emaranhado, análogo ao discutido por Einstein, Podolsky e Rosen, produzido pela interação entre o átomo que está em uma superposição de dois estados e o aparelho de medida. A observação do aparelho de medida permite concluir em qual estado está o átomo, existindo uma correlação perfeita entre o estado do átomo e a posição do ponteiro.

Em 1954, Einstein volta a esse problema, em carta endereçada a Max Born³³, questionando sobre a inexistência, no nível clássico, da maior parte dos estados permitidos pela mecânica quântica, quais sejam, superposições coerentes de estados localizados. A ausência desses estados no mundo clássico leva físicos ilustres a postular a existência de uma “regra de superseleção”, que impediria a realização de experiências de interferência entre estados localizados, ou ainda de um termo não linear na equação de Schrödinger, cujo efeito seria muito pequeno no mundo microscópico, mas relevante para objetos macroscópicos.

A exploração da fronteira sutil entre os mundos quântico e clássico

Nos últimos anos, começaram a aparecer respostas diferentes a essa questão. Em particular, vários físicos mostraram que a superposição de ondas é rapidamente destruída devido às interações do sistema com o resto do universo.³⁴ Essa interação é responsável pelos efeitos dissipativos que provocam transferências de energia de forma desordenada. Vemos exemplos dessa dissipação em fatos cotidianos, como o esfriamento de uma panela de sopa retirada do fogão, ou o aquecimento de um pneu de automóvel pelo atrito com o solo. Tais efeitos são responsáveis não apenas pela variação da energia desses sistemas macroscópicos, como também pela destruição da superposição coerente de estados que representam as diversas alternativas clássicas (fóton passando por uma fenda ou outra, gato morto ou vivo). Isto é, as componentes ondulatórias de um estado perdem o sincronismo, o que impossibilita o aparecimento do fenômeno de interferência.

Uma propriedade importante desse processo é fundamental para entender a transição do mundo microscópico para o macroscópico: as escalas de tempo para a perda de energia e para a perda da coerência das superposições de estados macroscópicos são muito diferentes entre si. No mundo macroscópico, o tempo de perda de coerência é

³³ Citado por JOOS, E. in GREENBERGER, D. M. (org.) *New Techniques and Ideas in Quantum Measurement Theory*. New York: New York Academy of Science, 1986.

³⁴ Ver, por exemplo, GIULINI, D.; JOOS, E.; KIEFER, C.; KUPSCH, J.; STAMATESCU, I.-O. & H. ZEH, D. *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Berlin: Springer, 1996; ZUREK, W. H. *Rev. Mod. Phys.*, 75, 715, 2003. Ver também DAVIDOVICH, L. *Ciência Hoje*, n. 143, outubro de 1998.

muito menor que o tempo de perda (ou ganho, no caso do pneu) de energia. Por exemplo, para uma pedra que pode estar em dois lugares ao mesmo tempo (isto é, a função de onda da pedra é a superposição coerente de duas componentes localizadas em torno de duas regiões distintas do espaço), separados por uma distância 'd', o tempo de perda de coerência é igual ao tempo de transferência de energia (ou tempo de dissipação) dividido por um fator muito grande, que por sua vez é igual ao quadrado da razão entre a distância 'd' e um comprimento extremamente pequeno, o comprimento de onda da pedra de Louis de Broglie (que é a distância entre dois máximos sucessivos da onda associada à pedra). Em resumo: para temperaturas ambientes (em torno de 30°C), e uma pedra de massa igual a um grama, que poderia ser localizada em duas regiões separadas por um centímetro, esse fator é igual a 10^{40} (o número um seguido de 40 zeros!). Assim, o desaparecimento da coerência entre as funções de onda localizadas associadas às duas posições da pedra é tão rápido que é praticamente impossível observá-la.

A duração extremamente curta dessa superposição parece tornar irrelevante a segunda parte da questão sobre como realizar um experimento de interferência que coloque em evidência a coerência da superposição das funções de ondas. Recentemente, no entanto, o desenvolvimento de técnicas experimentais levou à possibilidade de se produzirem e se medirem estados desse tipo. Essas técnicas envolvem o aprisionamento de átomos em armadilhas magnéticas, ou de campos eletromagnéticos em cavidades supercondutoras, ou ainda a geração de correntes em anéis supercondutores. Nesses sistemas, é possível controlar o processo de dissipação de energia, pois são sistemas muito bem isolados do resto do universo.

No Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos, em Boulder, no Colorado, foi realizado em 1996 um experimento no qual se obteve um átomo, aprisionado em uma armadilha magnética, localizado em duas posições distintas ao mesmo tempo.³⁵ A interferência entre esses estados foi claramente demonstrada. Ainda em 1996, foi realizado outro experimento na Escola Normal Superior de Paris³⁶ – proposto em artigo que teve a participação deste autor³⁷ – que não só levou à construção de uma superposição coerente de dois estados classicamente distintos do campo eletromagnético em uma cavidade, bem como possibilitou, pela primeira vez, acompanhar em tempo real o processo de perda de coerência, além de medir o tempo característico desse processo.

³⁵ MONROE, C.; MEEKHOF, D. M.; KING, B. E. & WINELAND, D. J. *Science*, 272, 1131, 1996.

³⁶ BRUNE, M.; HAGLEY, E.; DREYER, J.; MAÎTRE, X.; MAALI, A.; WUNDERLICH, C.; RAIMOND, J. M. & HAROCHE, S. *Phys. Rev. Lett.*, 77, 4887, 1996.

³⁷ DAVIDOVICH, L.; BRUNE, M.; RAIMOND, J. M. & HAROCHE, S. *Phys. Rev.*, A 53, 1295, 1996.

Verificou-se nesse último experimento que o tempo decresce à medida que o número médio de fótons na cavidade aumenta, ou seja, à medida que o sistema se torna mais macroscópico. Os estados construídos continham um número pequeno de fótons (cerca de cinco) e portanto não poderiam ainda ser considerados como macroscópicos. Não obstante, esse número foi suficiente para permitir o acompanhamento do processo pelo qual a superposição quântica transforma-se numa mistura estatística clássica. Isso significa dizer que um sistema capaz de exibir interferência foi transformado em um que exibe apenas a alternativa clássica do tipo cara ou coroa de uma moeda. Explorou-se assim a fronteira sutil entre o mundo microscópico e quântico de um lado e o mundo macroscópico e clássico do outro.

Superposições coerentes de correntes macroscópicas foram obtidas em anéis supercondutores (junções Josephson).³⁸

³⁸ FRIEDMAN, J. R.; PATEL, V.; CHEN, W.; TOLPYGO, S. K. & LUKENS, J. E. *Nature* (London), 406, 43, 2000; WAL, C. H. van der; HAAR, A. C. J. ter; WILHELM, F. K.; SCHOUTEN, R. N.; HARMANS, C. J. P. M.; ORLANDO, T. P.; LLOYD S. & MOOIJ, J. E. *Science*, 290, 773, 2000.

Fantasmagórica ação à distância

Para Einstein, a idéia prevalente na física quântica de que, para um par de partículas emaranhadas, a medida de uma grandeza física para uma das partículas levava à determinação do valor de uma grandeza física correspondente para a outra partícula, mesmo que elas estivessem muito distantes, correspondia a uma “fantasmagórica ação à distância”, que parecia violar requisitos básicos de causalidade.

Vários autores desenvolvem teorias alternativas, segundo as quais os “elementos de realidade” seriam governados por “variáveis escondidas” que, de forma determinística e local, levariam a valores precisos desses elementos de realidade em cada realização individual.³⁹ Assim, por exemplo, as duas partículas consideradas por Einstein, Podolsky e Rosen teriam, em cada realização experimental, momenta e posições bem definidos, resultantes da interação entre elas, que a teoria quântica não consegue prever por ser uma teoria incompleta, que não inclui a descrição detalhada da ação local das variáveis escondidas sobre os elementos de realidade.

Até 1964, a distinção entre a mecânica quântica e as teorias de variáveis escondidas é considerada como uma questão de preferência filosófica, e alvo de debates aguerridos entre partidários de correntes opostas.

Em 1964, o físico John Bell, trabalhando no Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN) em Genebra, mostra que é possível diferenciar experimentalmente a mecânica quântica das teorias locais de variáveis escondidas

³⁹ FRIESTADT, H. *Suppl. Nuovo Cimento*, 5, 1, 1967; BOHM, D. & BUB, J. *Rev. Mod. Phys.*, 38, 453, 1966; GUDDER, S. P. *J. Math. Phys.*, 11, 431, 1970.

⁴⁰ BELL, J. S. *Physics* (N. Y.), 1, 195, 1964.

⁴¹ FREEDMAN, S. J. & CLAUSER, J. S., *Phys. Rev. Lett.*, 28, 938, 1972; ASPECT, A.; DALIBARD, J. & ROGER, G. *Phys. Rev. Lett.*, 49, 1804, 1982.

(teorias não locais aparecem também, desde o início da mecânica quântica, mas elas não apresentam, em relação à teoria quântica, a vantagem da localidade).⁴⁰ Experimentos realizados posteriormente⁴¹ levam a resultados contrários às previsões das teorias locais de variáveis escondidas. Não é possível supor, assim, que os elementos de realidade têm valores bem definidos, antes da medida! O momentum da partícula 2, na experiência pensada de Einstein, Podolsky e Rosen, torna-se bem definido apenas quando é medido o momentum da partícula 1! No jargão da física quântica, diz-se que ocorre um “colapso” do estado da partícula 2, ao ser medida a partícula 1.

Como conciliar essa concepção com os requisitos da causalidade? A projeção, aparentemente instantânea, do momentum da partícula 2 em um valor bem definido, ao se medir o momentum da partícula 1, não poderia ser usada para transmitir informação instantaneamente, violando assim a causalidade relativística, que afirma ser a velocidade da luz o limite para a transmissão de informação?

É fácil ver que esse processo não pode ser usado para transmitir informação. Se, após a medida realizada sobre a partícula 1, um pesquisador mede o momentum da partícula 2, ele não saberá se o valor por ele encontrado decorre de uma pré-determinação do momentum da partícula 2, em virtude da medida realizada sobre a partícula 1, ou se é apenas um dos resultados aleatórios possíveis, decorrentes da indeterminação do momentum dessa partícula. Assim, ele não pode saber, através de medidas realizadas sobre a partícula 2, se uma medida foi ou não realizada sobre a partícula 1. Além disso, para verificar que existe de fato uma correlação entre as medidas dos dois pesquisadores, eles teriam que se comunicar, e comparar suas tabelas de medidas.

A própria idéia de que o estado da partícula 2 muda instantaneamente ao ser realizada uma medida sobre a partícula 1 leva a paradoxos, quando se consideram, por exemplo, efeitos previstos pela relatividade. Segundo essa teoria, dois eventos simultâneos em um referencial, localizados em regiões distintas, não são simultâneos em um outro referencial que se movimenta em relação ao primeiro. Suponhamos então que, em certo referencial, ocorre a pretendida projeção instantânea do estado da partícula 2 ao ser medida a partícula 1. Mudando-se de referencial, a projeção do estado da partícula 2 poderia ocorrer antes da medida da partícula 1!

⁴² Para a proposta teórica, ver BENNETT, C.; BRASSARD, G.; CREPEAU, C.; JOZSA, R.; PERES, A. & WOOTTERS, W. K. *Phys. Rev. Lett.*, 70, 1895, 1993; para a primeira proposta experimental, ver DAVIDOVICH, L.; ZAGURY, N.; BRUNE, M.; RAIMOND, J. M. & HAROCHE, S. *Phys. Rev.*, A 50, R895, 1994; para realizações experimentais, ver BOUWMEESTER, D.; PAN, J.-W.; MATTLE, K.; ELBL, M.; WEINFURTER H. & ZEILINGER, A. *Nature*, 390, 575, 1997; BOSCHI, D.; BRANCE, S.; DE MARTINI, F.; HARDY L. & POPOVICU, S. *Phys. Rev. Lett.*, 80, 1121, 1998; FURUSAWA, A.; SÖRENSEN, J. L.; BRAUNSTEIN, S. L.; FUCHS, C. A.; KIMBLE, H. J. & POLZIK, E. S. *Science*, 282, 706, 1998; NIELSEN, M. A.; KNILL, E. & LAFLAMME, R. *Nature*, 396, 52, 1998. Ver também DAVIDOVICH L. em *Ciência Hoje*, n. 137, abril de 1998.

⁴³ PRESKILL, J. *Quantum Information and Computation*, Notas de aula disponíveis em <http://www.theory.caltech.edu/~preskill/ph229>, 1998; BENNETT, C. H. & DIVINCENZO, D. P. *Nature*, 404, 247, 2000; BOUWMEESTER, D.; EKERT A. & ZEILINGER, A. (editors). *The Physics of Quantum Information*. Springer, 2000; NIELSEN, M. A. & CHUANG, I. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. Ver também DAVIDOVICH, L. em *Ciência Hoje*, n. 206, p. 24, julho de 2004.

Luiz Davidovich é graduado e doutor em Física e professor do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro. ldavid@if.ufrj.br

O autor agradece o apoio do CNPq, da FAPERJ (através do programa “Cientistas de nosso Estado”) e do Instituto do Milênio de Informação Quântica.

Esse argumento mostra que a idéia do “colapso” é uma representação que, apesar de útil para sintetizar os resultados de medidas realizadas sobre um sistema, não tem fundamento físico: a teoria quântica limita-se a prever os resultados das correlações entre as medidas realizadas sobre as duas partículas. Testes da mecânica quântica envolvem sempre a medida de correlações e prescindem do conceito de colapso. Os resultados de John Bell, que permitem diferenciar a mecânica quântica de teorias de variáveis escondidas, referem-se a correlações entre medidas feitas sobre as duas partículas que formam o par emaranhado.

Surpresas e desafios no final do século XX

O “paradoxo EPR” e a questão levantada por Einstein em sua carta a Born em 1954, sobre a inexistência de superposições coerentes no mundo macroscópico, estão relacionados a questões que se constituíram no cerne de novos desenvolvimentos da física quântica, ocorridos na última década do século XX.

Um estudo detalhado dos estados emaranhados, compreendido por vários pesquisadores, levou à descoberta de propriedades sutis e propostas surpreendentes, envolvendo, por exemplo, a possibilidade de teleportação de estados quânticos, já demonstrada em vários laboratórios.⁴²

Uma nova disciplina, conhecida pelo nome de “informação quântica”, estuda métodos para caracterizar, transmitir, armazenar, compactar e utilizar computacionalmente a informação contida em estados quânticos.⁴³ Além de proporcionar um entendimento mais profundo da física quântica como uma nova teoria da informação, tem conduzido ao desenvolvimento de novos métodos criptográficos e à idéia de construção de computadores quânticos, baseados em algoritmos de cálculo que levam em conta a propriedade de superposição de estados quânticos.

Apesar dos fantásticos sucessos da mecânica quântica, permanece um problema fundamental de difícil solução: não é possível ainda compatibilizar essa teoria com a relatividade generalizada, que é o arcabouço teórico do fenômeno da gravitação. A compatibilização desses dois grandes desenvolvimentos conceituais do século XX poderá exigir uma nova teoria, que teria a mecânica quântica atual como caso limite, assim como a física clássica surge como limite da física quântica.