

TEOREMA DE BELL

50 anos da descoberta mais profunda da ciência

Um país da América do Sul quer manter a privacidade de suas informações estratégicas, mas se vê obrigado a comprar os equipamentos para essa tarefa de um país bem mais avançado tecnologicamente. Mas esses aparelhos podem estar ‘grampeados’...

Surge, então, a dúvida quase óbvia: haverá, no futuro, privacidade 100% garantida? Resposta: sim. E isso vale até mesmo para um país que compre a tecnologia antiespionagem do ‘inimigo’.

O que possibilita a resposta afirmativa acima é o resultado que já foi classificado como o mais profundo da ciência – repita-se, da ciência: o chamado teorema de Bell, que trata, por sua vez, de



John Bell
Crédito: Wikimedia
Commons

uma das perguntas filosóficas mais agudas e penetrantes feitas até hoje e que alicerça o próprio conhecimento: o que é a realidade?

O teorema de Bell – que completa agora 50 anos – garante que a realidade, em sua dimensão mais íntima, é inimaginavelmente estranha.

Ação fantasmagórica

A história do teorema, de sua comprovação experimental e suas aplicações modernas tem vários começos. Talvez, aqui, o mais apropriado seja um artigo de 1935 do físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) e de dois colaboradores, o russo Boris Podolsky (1896-1966) e o norte-americano Nathan Rosen (1909-1995).

Conhecido como paradoxo EPR (iniciais dos sobrenomes dos autores), o experimento teórico ali descrito resumia uma longa insatisfação de Einstein com os rumos que a mecânica quântica (teoria dos fenômenos na escala atômica) havia tomado. Inicialmente, causou amargo no paladar do autor da relatividade o fato de aquela teoria, desenvolvida na década de 1920, fornecer apenas a probabilidade de um fenômeno ocorrer. Isso contrastava com a ‘certeza’ (determinismo) da física dita clássica, a que rege os fenômenos macroscópicos.

Einstein, na verdade, estranhava sua criatura, pois havia sido um dos criadores da teoria quântica. Por exemplo, em 1905, havia proposto que a luz é formada por fótons, ou seja, diminutos pacotes (ou *quanta*) de energia.

Com alguma relutância inicial, o indeterminismo da mecânica quântica acabou digerido por Einstein. Porém, algo nunca lhe passou pela garganta: a não localidade, ou seja, o estranhíssimo fato de algo aqui influenciar instantaneamente algo ali – mesmo que esse ‘ali’ esteja muito distante. Einstein acreditava que coisas distantes tinham realidades independentes.

Einstein chegou a comparar – e, para os místicos de plantão, vale salientar que é só uma analogia – a não localidade a um tipo de telepatia. Mas a definição mais famosa de Einstein para essa estranheza foi “fantasmagórica ação a distância”.

A essência do paradoxo EPR é a seguinte: sob condições especiais, duas partículas que interagiram – e, depois, se separaram – acabam em um estado denominado emaranhado, como se fossem ‘gêmeas telepáticas’. De forma menos pictórica, diz-se que as partículas estão conectadas (ou correlacionadas, como preferem os físicos) e permanecem assim, mesmo depois da interação.

A estranheza maior vem agora: se uma das partículas desse par for perturbada – ou seja, sofrer uma medição qualquer, como dizem os físicos –, a outra ‘sente’ essa perturbação instantaneamente. E isso independe da distância entre as duas partículas. Podem estar separadas por anos-luz, isto é, trilhões de quilômetros.

No artigo EPR, os autores diziam que era impossível imaginar que a natureza permitisse a tal conexão instantânea entre dois objetos. E, por meio de argumentação lógica e complexa, Einstein, Podolsky e Rose concluíam: a mecânica quântica tem que ser incompleta. Portanto, provisória.

Superior à luz?

Uma leitura apressada (porém, muito comum) do paradoxo EPR é dizer que uma ação instantânea (não local, no vocabulário da física) é impossível, porque violaria a relatividade de Einstein: nada pode viajar com velocidade superior à da luz no vácuo (cerca de 300 mil km/s). E isso inclui informação.

No entanto, a não localidade não pode ser usada para mandar ou receber mensagens, pois ela atuaria apenas na dimensão microscópica. No mundo macroscópico, se quisermos fazer isso, teremos que usar sinais que nunca viajam com velocidade maior que a da luz no vácuo. Ou seja, relatividade é preservada.

A não localidade tem a ver com conexões persistentes (e misteriosas) entre dois objetos: interferir com (alterar, mudar etc.) um deles, interfere com (altera, muda etc.) o outro. Instantaneamente. O simples ato de observar um deles interfere com o estado do outro.

Einstein não gostou da versão final do artigo de 1935, que só viu impressa – a redação ficou a cargo de Podolsky. Imaginou um texto menos filosófico. Pouco meses depois, viria a resposta do fí-

sico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) ao EPR. Einstein e Bohr, poucos anos antes, haviam protagonizado o que para muitos é um dos debates filosóficos mais importantes da história. Assunto: ‘a alma da natureza’, nas palavras de um filósofo da física.

Em sua resposta ao EPR, Bohr reafirmou tanto a completude da mecânica quântica quanto sua visão – classificada como antirrealista – do mundo universo atômico: não é possível dizer que uma entidade quântica (elétron, próton, fóton etc.) tenha uma propriedade antes que esta seja medida. Isto é, tal propriedade não seria real, não estaria oculta no objeto, à espera de um aparelho de medida ou qualquer interferência (até mesmo o olhar) do observador. Quanto a isso, Einstein, mais tarde, ironizaria: “Será que a Lua só existe quando olhamos para ela?”

Apesar de ter sido reescrita várias vezes, a resposta de Bohr é obscura e tortuosa – talvez, reflexo do modo como ele sabidamente se expressava. Conta-se que entender suas palestras era um desafio. Mesmo assim, foi classificado pelo físico e historiador da física holandês Abraham Pais (1918-2000) como o maior filósofo do século passado.

Argumento de autoridade

Um modo de entender o que seja uma teoria determinista é o seguinte: é aquela na qual se pressupõe que a propriedade a ser medida está presente (ou ‘escondida’) no objeto e pode ser determinada com certeza. Os físicos denominam esse tipo de teoria com um nome bem apropriado: teoria de variáveis ocultas.

Em uma teoria de variáveis ocultas, a tal propriedade (conhecida ou não) existe, é real. Daí, por vezes, os filósofos classificarem esse cenário como realismo – Einstein gostava do termo ‘realidade objetiva’, isto é, as coisas existem sem a necessidade de serem observadas.

Mas, na década de 1930, um teorema havia ‘provado’ que seria impossível haver uma versão da mecânica quântica como uma teoria de variáveis ocultas. O feito era de um dos maiores matemáticos de todos os tempos, o húngaro John von Neumann (1903-

1957). E, fato não raro na história da ciência, valeu o ‘argumento da autoridade’ em vez da ‘autoridade do argumento’.

O teorema de von Neumann era perfeito do ponto de vista matemático, mas “errado, tolo” e “infantil” – como chegou a ser classificado – do ponto de vista físico, pois partia de uma premissa equivocada. Sabe-se hoje que Einstein desconfiou dela: “Temos que aceitar isso como verdade?”, perguntou a dois colegas. Mas não foi além.

O teorema de von Neumann serviu, porém, para praticamente pisotear a versão determinista (portanto, de variáveis ocultas) da mecânica quântica feita, em 1927, pelo físico e nobre francês Louis De Broglie (1892-1987), Nobel de Física de 1929, que, por conta disso, acabou desistindo dessa linha de pesquisa.

Por exatas duas décadas, o teorema de von Neumann e as ideias de Bohr – que formou em torno dele uma influente escola de jovens notáveis – dissuadiram tentativas de buscar uma versão determinista da mecânica quântica.

Mas, em 1952, o físico norte-americano David Bohm (1917-1992), inspirado pelas ideias de De Broglie, apresentou uma versão de variáveis ocultas da mecânica quântica – hoje, denominada mecânica quântica bohmiana, homenagem ao pesquisador que trabalhou na década de 1950 na Universidade de São Paulo (USP), quando perseguido nos EUA pelo macartismo, período conhecido como ‘caça aos comunistas’.

A mecânica quântica bohmiana tinha duas características em sua essência: i) era determinista (ou seja, de variáveis ocultas); ii) era não local (isto é, permitia a tal ação a distância). Esta última fez Einstein (um localista convicto) perder o interesse inicial por essa nova versão.

Protagonista

Entra em cena a principal personagem desta história: o físico norte-irlandês John Stewart Bell, que, ao tomar conhecimento da mecânica bohmiana, teve uma certeza: o “impossível havia sido feito”. Mais: von Neumann estava errado.

A mecânica quântica de Bohm – ignorada logo de início pela comunidade de físicos – acabava de cair em terreno fértil: Bell,

desde a universidade, remoía, como um *hobby*, os fundamentos filosóficos da mecânica quântica (EPR, von Neumann, De Broglie etc.). E tinha tomado partido nesses debates: era um einsteiniano assumido e achava Bohr obscuro.

Bell nasceu em 28 de junho de 1928, em Belfast, em uma família anglicana sem posses. Deveria ter parado de estudar aos 14 anos, mas, por insistência da mãe, que percebeu os dotes intelectuais do segundo de quatro filhos, foi enviado a uma escola técnica de ensino médio onde aprendeu coisas práticas (carpintaria, construção civil, biblioteconomia etc.).

Ao se formar, aos 16 anos, tentou empregos em escritórios, mas o destino quis que terminasse como técnico preparador de experimentos no Departamento de Física da Universidade Queen's, também em Belfast.

Os professores do curso logo perceberam o interesse do técnico pela física e passaram a incentivá-lo, com indicações de leituras e aulas. Com uma bolsa de estudo, Bell se formou em 1948 em física experimental e, no ano seguinte, em física-matemática. Ambos com louvor.

De 1949 a 1960, Bell trabalhou no AERE (Estabelecimento para a Pesquisa Energia Atômica), em Harwell (Reino Unido), onde conheceu sua futura mulher, a física Mary Ross, que se tornaria sua interlocutora em vários trabalhos sobre física. “Ao olhar novamente esses artigos, vejo-a em todo lugar”, disse Bell, em homenagem recebida 1987.

Defendeu seu doutorado em 1956, depois de um período na Universidade de Birmingham (Reino Unido), sob orientação do físico teuto-britânico Rudolf Peierls (1907-1995). A tese inclui uma prova de um teorema muito importante da física (teorema CPT), mas a prioridade acabou ficando com outro físico da época. Mary já era doutora há cerca de 10 anos.

O teorema

Por discordarem dos rumos que as pesquisas no AERE haviam tomado, o casal decidiu trocar empregos estáveis por posições tempo-

rárias no Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN), em Genebra (Suíça). Ele na Divisão de Física Teórica; ela na de Aceleradores.

Bell passou 1963 e o ano seguinte trabalhando nos EUA. Lá, encontrou tempo para se dedicar a seu *hobby* intelectual e gestar o resultado que marcaria para sempre sua carreira e lhe daria, décadas depois, fama.

Bell se fez a seguinte pergunta: será que a não localidade da teoria realista (entenda-se, de variáveis ocultas) de Bohm seria uma característica de qualquer teoria realista da mecânica quântica? Em outras palavras, se as coisas existirem sem serem observadas, elas teriam que necessariamente estabelecer aquela fantasmagórica ação a distância?

O teorema de Bell, publicado em 1964, é também conhecido como desigualdade de Bell, designação que reflete sua essência, pois trata de uma inequação – na verdade, sua matemática não é muito complicada. Mas, de modo muito simplificado, podemos pensá-lo assim: $B \leq 2$ – o ‘B’ é simplesmente homenagem nossa a Bell.

Para nossos propósitos aqui, a forma de interpretá-lo pode ser esta: se os dados de um experimento mostrarem que ‘B’ é maior do que 2, a desigualdade, então, será violada. E, se isso ocorrer, teremos que abrir mão de uma das duas suposições: i) realismo (as coisas existem sem serem observadas); ii) da localidade (o mundo quântico não permite conexões mais velozes que a luz).

O artigo do teorema não teve grande repercussão – Bell havia feito outro antes, mas, por erro do editor do periódico, acabou publicado só em 1966. A supremacia das ideias de Bohr e o teorema de von Neumann ainda assombravam a área.

Hippies em cena

A retomada das ideias de Bell – e, por conseguinte, do EPR e de Bohm – ganhou momento com fatores externos à física: *hippies*; geração paz e amor; luta pelas liberdades civis; oposição à guerra do Vietnã; movimento estudantil; maio de 1968; filosofias orientais; telepatia; consciência humana; drogas psicodélicas etc.

Em resumo: rebeldia.

Uma das personagens desse cenário, o físico norte-americano John Clauser, disse anos depois: “A guerra do Vietnã dominava os pensamentos políticos da minha geração. Sendo um jovem físico naquele período de pensamento revolucionário, eu naturalmente queria ‘chacoalhar o mundo’”.

Traduzida para a física, essa rebeldia significava – talvez, para ir contra o ‘sistema’ – dedicar-se a uma área herética na academia: interpretações (ou fundamentos) da mecânica quântica. Mas fazer isso aumentava consideravelmente as chances de um jovem físico arruinar sua carreira, pois EPR, Bohm e Bell eram considerados assuntos filosóficos; portanto, não físicos. Some-se a isso a crise do petróleo de 1973, que diminuiu a oferta de postos para jovens físicos.

A alquimia estava completa: rebeldia e recessão.

Clauser, juntamente com três colegas, Abner Shimony, Richard Holt e Michael Horne, publicaram suas primeiras ideias sobre o assunto em 1969, com o título ‘Proposta de experimento para testar teorias de variáveis ocultas’. E, em parte, fizeram isso porque perceberam que as desigualdades de Bell poderiam, naquele momento, ser testadas com fótons – até então, pensava-se em arranjos experimentais mais complicados.

Em 1972, a tal proposta virou experimento – feito por Clauser e Stuart Freedman (1944-2012) –, e a desigualdade de Bell foi violada.

O mundo parecia ser não local – ironicamente, Clauser era um localista. Apenas parecia, pois o experimento continuou por cerca de uma década incompreendido e, portanto, desconsiderado pela comunidade de físicos. Mas aqueles resultados serviram para reforçar algo importante: fundamentos da mecânica quântica não eram só filosofia. Eram também física experimental.

Mudança de cenário

O aperfeiçoamento de equipamentos de óptica (incluindo, *lasers*) permitiu que, em 1982, um experimento se tornasse um clássico da área.

Pouco antes, o físico francês Alain Aspect havia decidido iniciar a um doutorado tardio, mesmo sendo um físico experimental

experiente. Escolheu como tema o teorema de Bell. Foi ao encontro do colega norte-irlandês no CERN. Em entrevista ao físico Ivan dos Santos Oliveira Júnior, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, no Rio de Janeiro (RJ), e ao autor deste texto, Aspect contou o seguinte diálogo entre ele e Bell. “Você tem uma posição permanente?”, perguntou Bell. “Sim”, disse Aspect. Caso contrário, “você seria muito pressionado a não fazer o experimento”, disse Bell.

A leitura da conversa acima é a seguinte: quase duas décadas depois do artigo seminal de 1964, o tema continuava revestido de preconceito.

Em um experimento feito com pares de fótons emaranhados, a natureza, mais uma vez, mostrou seu caráter não local: a desigualdade de Bell foi violada. Os dados mostraram $B > 2$. Em 2007, por exemplo, o grupo do físico austríaco Anton Zeilinger verificou a violação da desigualdade, usando fótons separados por... 144 km.

Na entrevista dada no Brasil, Aspect disse que, até então, o teorema de Bell era pouquíssimo conhecido pelos físicos, mas ganharia fama depois de seu experimento, por conta, em parte, dos vários convites que Aspect recebeu para falar de seus resultados. Bell participou da banca de doutorado de Aspect.

Não local

Afinal, por que a natureza permite que haja a tal ‘telepatia’ einsteiniana? É, no mínimo, estranho pensar que uma partícula perturbada aqui possa, de algum modo, alterar o estado de sua companheira nos confins do universo.

Há várias maneiras de interpretar as consequências do que Bell fez. De partida, algumas (bem) equivocadas: i) a não localidade não pode existir, porque viola a relatividade; ii) teorias de variáveis ocultas (Bohm, De Broglie etc.) da mecânica quântica estão totalmente descartadas; iii) a mecânica quântica é realmente indeterminista; iv) o irrealismo – ou seja, coisas só existem quando observadas – é a palavra final. A lista é longa.

Quando foi publicado, o teorema ganhou a seguinte leitura rasa (e errônea): isso não tem importância, pois o teorema de von

Neumann já havia descartado as variáveis ocultas, e a mecânica quântica é mesmo indeterminista. Hoje, entre os que não aceitam a não localidade, há aqueles que chegam ao ponto de dizer que Einstein, Bohm e Bell não entenderam o que fizeram.

O filósofo da física norte-americano Tim Maudlin, da Universidade de Nova York, em dois excelentes artigos ‘What Bell did’ (O que Bell fez; <http://arxiv.org/abs/1408.1826>) e ‘Reply to comments on What Bell did’ (Resposta aos comentários sobre o que Bell fez; <http://arxiv.org/abs/1408.1828>), oferece uma longa lista de equívocos.

Para Maudlin, renomado na área de filosofia da física, o teorema de Bell e sua violação significam uma só coisa: a natureza é não local (‘fantasmagórica’) e, portanto, não há esperança para a localidade, como Einstein gostaria – e, nesse sentido, pode-se dizer que Bell mostrou que Einstein estava errado. Assim, qualquer teoria determinista (realista) que reproduza os resultados experimentais obtidos até hoje pela mecânica quântica – por sinal, a teoria mais precisa da história da ciência – terá que necessariamente ser não local.

De Aspect até hoje, desenvolvimentos tecnológicos importantes permitiram algo impensável há poucas décadas: estudar isoladamente uma entidade quântica (átomo, elétron, fóton etc.). E isso deu início à área de informação quântica, que abrange o estudo da criptografia quântica – aquela que permitirá a segurança absoluta dos dados – e dos computadores quânticos, máquinas extremamente velozes. De certo modo, é filosofia transformada em física experimental.

E muitos desses avanços se devem à rebeldia de uma geração de físicos jovens que queriam contrariar o ‘sistema’. História saborosa desse período está em *How the hippies saved physics* (Como os hippies salvaram a física; W. W. Norton & Company, 2012), do historiador da física norte-americano David Kaiser. E uma análise histórica detalhada no livro *The quantum dissidentes – rebuilding the foundations of quantum mechanics (1950-1990)* (Springer, 2015), do historiador da física Olival Freire Júnior, da Universidade Federal da Bahia.

Para os mais interessados no viés filosófico, os dois volumes premiados de *Conceitos de física quântica* (Editora Livraria da Física), do físico e filósofo Osvaldo Pessoa Jr., da USP.

Privacidade garantida?

A esta altura, o(a) leitor(a) talvez esteja se perguntando sobre o que o teorema de Bell tem a ver com uma privacidade 100% garantida. No futuro, é (bem) provável que a informação seja enviada e recebida na forma de fótons emaranhados. Pesquisas recentes em criptografia quântica garantem que bastaria submeter essas partículas de luz ao teste da desigualdade de Bell. Se a ela for violada, então, 100% de certeza de que a mensagem não foi bisbilhotada indevidamente. E o teste independe do equipamento usado para enviar ou receber os fótons. A base teórica para isso está, por exemplo, em ‘The ultimate physical limits of privacy’ (Os limites físicos finais da privacidade), dos físicos Artur Ekert e Renato Renner (<http://bit.ly/1GHZ7kP>).

Em um futuro não muito distante, talvez, o teorema de Bell se transforme na arma mais poderosa contra a espionagem. E isso é tremendo alento para um mundo que parece rumar à privacidade zero. E isso será mais uma linha no currículo de um teorema que é, segundo o físico norte-americano Henry Stapp, especialista em fundamentos da mecânica quântica, “o resultado mais profundo da ciência”. Merecidamente, tudo indica. Afinal, por que a natureza optou pela ‘ação fantasmagórica a distância’?

A resposta é um mistério. Pena que a pergunta nem mesmo seja citada nas graduações de física no Brasil.

Bell morreu de hemorragia cerebral em 1 de outubro de 1990.