

Ação fantasmagórica

Equipe de Campinas detalha fenômeno que torna possível a criptografia quântica

RICARDO ZORZETTO

Em um espaço milhões de vezes menor que a ponta de uma agulha, a natureza se comporta de um modo muito curioso. Nesse mundo ultramicroscópico, duas ou mais partículas – ou mesmo dois ou mais conjuntos distintos de partículas – podem compartilhar uma propriedade peculiar que desafia a intuição e, às vezes, lembra a telepatia. Prevista em 1935 e comprovada experimentalmente na década de 1960, essa propriedade especial chamada emaranhamento ou entrelaçamento quântico – em inglês, *quantum entanglement* – é uma espécie de pacto selado que as partículas ou os conjuntos de partículas mantêm entre si para cumprir uma determinada condição.

Sem um correspondente no mundo macroscópico – governado pelas leis da física propostas por Isaac Newton, que explicam, por exemplo, a queda de uma manga madura da árvore rumo ao solo –, essa propriedade parece um tanto obscura até para os físicos, que ainda não a compreendem por inteiro. Mas o apoio de uma analogia ajuda entender esse fenômeno, cujos detalhes começam agora a ser conhecidos, com a contribuição de físicos da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

É mais fácil explicar o entrelaçamento quando se deixam as partículas de lado e, como costuma fazer o físico Daniel Turolla Vanzella, da Universidade de São Paulo (USP), pensa-se em um par de dados – desses de seis faces, usados nos jogos de tabuleiro. Primeiro é preciso torná-los entrelaçados. Imagine-se então uma máquina de emaranhar dados. Com os dados no interior desse aparelho fictício, o próximo passo é escolher a característica que as pe-

ças deverão compartilhar – digamos, que as faces voltadas para cima somem sempre 7, depois de jogados os dados. Digitado o programa, gira-se a manivela e... *voilà* um par de dados emaranhados. Em um teste, rola-se o primeiro dado sobre uma mesa e a face superior mostra 2. O entrelaçamento ajustado garante que, ao ser lançado, o segundo dado só pode dar como resultado a superfície com o número 5.

Se novamente um deles for jogado e parar com a face 6 para o alto, o outro certamente exibirá o número 1. Mais curioso: antes de lançar qualquer um dos dados, não é possível saber qual será o número que cada um deles mostrará individualmente – cada dado pode cair com qualquer das seis faces para cima. Apenas depois que um dos dados é lançado é que o outro torna-se obrigado a exibir a face que, somada à anterior, dê como resultado o número 7.

Quem não se convencer de que as partículas possam se comportar dessa forma não será exceção. O físico Albert Einstein, que previu esse fenômeno em 1935 em um estudo com Boris Podolsky e Nathan Rosen, também via o emaranhamento com desconfiança.

Embora seja impossível os dados de tabuleiro – as-



FOTOS EDUARDO CESAR

Fótons emaranhados: propriedades compartilhadas

sim como todos os objetos macroscópicos – apresentarem esse comportamento na realidade, os experimentos realizados em laboratório confirmam que é assim mesmo que a natureza se comporta no mundo das partículas, no qual as distâncias são medidas em nanômetros (milionésimos de milímetro), explica o físico Antonio de Toledo Piza, da USP.

Em dois estudos teóricos publicados no início deste ano, os físicos Carlos Escobar e Daniel Rigolin, da Unicamp, ajudam a desvendar sutilezas do emaranhamento quântico. Em linhas gerais, eles verificaram que a intensidade do emaranhamento entre dois componentes de um sistema – sejam duas partículas distintas, sejam dois conjuntos de partículas – diminui conforme aumenta a distância entre um componente e outro. De volta aos dados, é como se o emaranhamento enfraquecesse à medida que um dado é levado para longe do outro, reduzindo a certeza de que a segunda peça ficará com a face 5 para o alto assim que a primeira revela o número 2.

Outra descoberta é que a intensidade ou o grau do entrelaçamento entre componentes com níveis de energia diferentes é menor que entre componentes com níveis de energia semelhante. Talvez outra comparação ajude. A confiabilidade de que o pacto entre os dados se concretizará fica menor quando um deles é chacoalhado com maior energia – e o outro, com menos força – do que quando ambos são agitados com a mesma intensidade. Assim, a certeza de que os dados apresentarão o resultado programado – soma 7 – é maior quando ambos são agitados muito intensamente ou com intensidade menor, desde que se mantenha o mesmo vigor.

Num laboratório de física, claro, não há pesquisadores atirando dados sobre a mesa. Em vez disso, eles trabalham com conjuntos distintos de partículas de carga elétrica negativa (elétrons), que se movimentam ao redor dos núcleos dos átomos, ou ainda com feixes de laser, conjuntos de bilhões de partículas de luz, os fótons. O comportamento das partículas, porém, não difere daquele dos dados dotados dessa propriedade quase mágica.

Complicado? Talvez. Mas é essa propriedade física que torna viável o desenvolvimento de tecnologias futuristas como o teletransporte quântico, como é chamada a transferência de informações próprias de uma partícula para outra, distante – nada a ver, ao menos por ora, com a confortável forma de viajar do seriado *Jornada nas estrelas* porque a partícula não é transmitida no processo, apenas suas características.

Acredita-se ainda que essa propriedade permita a produção comercial de sistemas ultra-seguros de codificação de informações, a criptografia quântica. Os sistemas de criptografia atuais, como os usados pelos bancos, baseiam-se no embaralhamento dos dados a serem transmitidos, que só podem ser lidos por quem conhece uma chave numérica, um número com milhares de dígitos que dá acesso à informação correta. Já a criptografia quântica se aproveita de propriedades das partículas para codificar a informação. Assim, a mensagem se torna inviolável, já que a mais sutil tentativa de espionagem altera a informação – como garante o Princípio da Incerteza, formulado pelo físico Werner Heisenberg – e denuncia o gato.

Aos poucos, a teoria chega à prática, ainda que de forma experimental. O primeiro físico a demonstrar em 1997 o teletransporte quântico, o austríaco Anton Zeilinger, da Universidade de Viena, conseguiu em abril outro feito notável: usou fótons entrelaçados para codificar informações durante a transferência de uma doação de € 3 mil (cerca de R\$ 12 mil) da prefeitura de Viena para a conta do laboratório no banco Austria Creditanstalt, em vez do sistema de criptografia usual do banco.

Os dois estudos brasileiros contribuem para a compreensão desse fenômeno por mostrar como o entrelaçamento quântico deve se comportar em condições mais próximas às reais. Publicados na *Physical Review A*, os trabalhos ganharam destaque em duas publicações virtuais de referência nessa área, o *Virtual Journal of Quantum Information* e o *Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology*. No artigo de 13 de janeiro, Escobar e seu aluno de doutorado Gustavo Rigolin avaliaram a intensidade do emaranhamento entre conjuntos de partículas com padrão distinto de energias, por exemplo, feixes



de laser de cores diferentes, como vermelho e azul – as cores são determinadas pelo nível de energia com que vibram os fótons, como os dados agitados com intensidades distintas.

Por causa da dificuldade dos cálculos, não se chegou a valores exatos do grau de emaranhamento nesse caso. Mas Escobar e Rigolin apresentaram duas formas diferentes de calcular o limite mínimo a partir do qual pode se considerar que esses conjuntos de partículas estão entrelaçados. Nesse estudo, verificaram ainda que o nível de entrelaçamento entre conjuntos de partículas com níveis de energia distintos – ou que se encontram em estados não-simétricos, como dizem os físicos – é inferior ao alcançado por conjuntos de partículas com mesmo nível de energia (estados simétricos).

De outro modo, os físicos ajudaram a determinar a intensidade mínima dessa conexão tão diáfana quanto íntima, classificada pelo próprio Einstein, há quase 70 anos, como uma ação fantasmagórica a distância. É um avanço considerável em relação ao obtido pela equipe de Reinhard Werner, da Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha, que em 2003 determinou o grau de entrelaçamento para conjuntos de partículas em estados simétricos, como dois feixes de laser de mesma cor.

Os resultados da equipe de Campinas são importantes por significarem um passo em direção ao que ocorre na realidade. De modo distinto do que se passa nas previsões teóricas – que levam em conta condições ideais –, na prática há interferências de todo tipo e até mesmo a qualidade da fibra óptica pode alterar o padrão de energia do laser que transporta. Por essa razão, conhecer o limite a partir do qual conjuntos de partículas em estados não-simétricos compartilham essa propriedade é essencial para a criação de sistemas verdadeiramente eficientes de criptografia, teletransporte ou computação quântica. Além disso, quanto mais emaranhados os conjuntos de partículas, mais úteis são do ponto de vista tecnológico, pois o grau de entrelaçamento está diretamente relacionado à facilidade de manipular a informação – por exemplo, para cálculos em um fu-

turo computador quântico – ou à probabilidade de fazê-la chegar íntegra ao seu destino no teletransporte quântico, explica Rigolin.

No segundo artigo, publicado em 9 de abril, Escobar, Rigolin e Lea Ferreira dos Santos, hoje pesquisadora da Universidade do Estado de Michigan, Estados Unidos, analisaram como o grau de entrelaçamento varia em um sistema que simula um processador quântico. Em vez de fótons, os físicos adotaram como modelo o controle de características de elétrons por meio da alteração do campo magnético. Em uma fileira única de elétrons dispostos lado a lado a distâncias iguais um do outro, como as contas de um colar esticado, o grau de entrelaçamento diminui conforme aumenta a distância.

Talvez seja mais fácil pensar em uma série de bolas de sinuca dispostas ao longo de uma linha nesta ordem: branca, marrom, verde, amarela, azul, rosa, vermelha e preta. A equipe da Unicamp viu que a intensidade dessa interação entre o elétron na posição da bola branca e o na posição da marrom pode atingir 80% do grau máximo de entrelaçamento possível, enquanto esse nível fica em torno de 60%, entre o elétron no lugar da branca e o situado na posição da bola verde – e assim por diante. Nesse mesmo trabalho, surgiu um resultado inesperado. Os físicos constataram que, em alguns casos, a intensidade do entrelaçamento alcança os graus mais baixos quando o campo magnético próximo de cada elétron varia de modo aleatório (regime caótico) do que na situação em que os campos magnéticos são homogêneos – justamente o contrário do que indicavam estudos anteriores. Além disso, os níveis máximos de entrelaçamento surgiram na transição entre o regime caótico e o homogêneo (não-caótico). É um detalhamento fundamental para determinar quão confiável seria um processador quântico real construído segundo esse modelo em um material semiconductor – como elétrons aprisionados em pontos quânticos (pirâmides de poucos nanômetros de altura) de arseneto de índio depositado sobre arseneto de gálio. “O ideal é manter o campo magnético homogêneo, mas, em sistemas como esse, qualquer imperfeição no material torna o regime caótico”, diz Rigolin. •

