

FÍSICA

Cores emaranhadas

Grupo de São Paulo obtém o entrelaçamento quântico entre três feixes de luz de diferentes comprimentos de onda

MARCOS PIVETTA

Um esboço da circuitaria interna que poderá ocupar o lugar dos *chips* de silício e se tornar o coração de um computador quântico ganhou contornos mais concretos graças a um experimento inédito realizado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP). Uma equipe formada apenas por brasileiros e coordenada pelos físicos Paulo Nussenzveig e Marcelo Martinelli, do IF-USP, montou um sistema em que foi possível criar – e até certo ponto controlar – o fenômeno do emaranhamento quântico entre três feixes de luz de diferentes comprimentos de onda. Um feixe era verde e estava na porção visível do espectro e os outros dois se situavam no campo do infravermelho próximo, que não pode ser visto a olho nu. Até então o máximo que outros grupos de cientistas haviam conseguido era entrelaçar quanticamente dois feixes de luz de cores distintas ou vários da mesma frequência. “O emaranhamento de feixes de três cores pode ser útil para a construção de computadores quânticos no futuro”, comenta Nussenzveig. “Em tese, poderíamos montar uma rede com componentes quânticos operando em diferentes frequências.” O trabalho foi publicado no dia 17 do mês passado na *Science Express*, versão *on-line* da revista científica americana *Science*.

Além de demonstrar a viabilidade do emaranhamento tricolor, o estudo pioneiro dos brasileiros trouxe uma segunda boa notícia. Os físicos constataram que esse tipo de entrelaçamento pode originar um sistema óptico re-

lativamente robusto, que não se esvai tão facilmente quanto outros modelos mais simples de emaranhamento. Afinal, ninguém quer ter um PC quântico que seja instável por natureza. Alterando levemente a intensidade dos feixes usados no experimento, conseguiram modular o grau de entrelaçamento entre os fótons (partículas de luz) do sistema. Observaram ainda que o fenômeno descrito tecnicamente como a morte súbita do emaranhamento, relatado até agora somente em sistemas mais elementares, também ocorria quando diminuía a intensidade dos feixes de luz abaixo de um determinado nível. A energia do feixe de laser verde usado para iniciar o experimento na USP é pequena, mas não desprezível: da ordem de 50 miliwatts, dez vezes maior do que a empregada em algumas ponteiras a laser.

> O PROJETO

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Informação Quântica (INCT-IQ)

MODALIDADE

Programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia do MCT/CNPq/FAPESP

COORDENADOR


AMIR ORDACCI CALDEIRA – Unicamp

INVESTIMENTO

R\$ 1,5 milhão (FAPESP) - para grupos de pesquisa de São Paulo

Além de Nussenzveig e Martinelli, o time de pesquisadores que fez o trabalho incluiu os alunos de pós-graduação Antônio Sales Coelho e Felipe A. Silva Barbosa, todos do IF-USP, e os físicos Katiúscia Cassemiro e Alessandro Villar, hoje no Instituto Max Planck para Ciência da Luz, na Alemanha. O estudo que redundou no emaranhamento tricolor faz parte das pesquisas tocadas pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Informação Quântica (INCT-IQ), coordenado por Amir Ordacgi Caldeira, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). O instituto é uma iniciativa do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), por meio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), em parceria com a FAPESP.

Como todo fenômeno quântico, o emaranhamento não pode ser explicado pelas leis da física clássica. Está inserido num mundo com regras próprias, estranhas à compreensão da realidade macroscópica e que flertam com o que os leigos chamam de telepatia. Previsto na década de 1930 e comprovado experimentalmente décadas mais tarde, o emaranhamento quântico imprime uma assinatura típica num sistema. Se duas ou mais partículas – átomos, elétrons ou fótons, como no experimento da USP – estão conectadas de uma maneira tão íntima que as modificações sofridas por algumas delas também se refletem nas propriedades das outras, independentemente de estarem separadas por nanômetros de distância ou pelo oceano Atlântico, elas formam



um sistema com as características do emaranhamento quântico. Ao prever a possibilidade do entrelaçamento, Albert Einstein disse que o misterioso fenômeno era dotado de uma “ação fantasmagórica a distância”.

Do ponto de vista aplicado, essas correlações entre as partículas emaranhadas podem ser exploradas de modo a criar os chamados *bits* quânticos ou *qubits*, que, teoricamente, poderiam expandir enormemente a capacidade dos computadores de armazenar, processar, criptografar e transmitir informação. O problema é que o entrelaçamento é um fenômeno frágil, cujos efeitos podem desaparecer devido a ínfimas interferências do ambiente. Os cientistas costumam optar pelos fótons para construir sistemas emaranhados, em vez de átomos ou outras partículas elementares, porque a luz pode ser transmitida por fibras ópticas ou até pelo ar sem perder os efeitos do entrelaçamento.

Para criar o sistema descrito na *Science*, os pesquisadores montaram um sistema denominado oscilador paramétrico óptico (OPO). Trata-se de um dispositivo que possibilita bombear com um feixe de luz (laser) verde um sistema composto de um cristal especial situado entre dois espelhos. O emaranhamento surge quando o feixe de luz verde atravessa o cristal. Nesse momento há a conversão de fótons verdes em pares de fótons no infravermelho, de duas frequências distintas (*ver ilustração na página 50*). “É o cristal que ‘amarra’ os três feixes de luz, que cria o emaranhamento”, explica Martinelli.

Oscilador paramétrico óptico: sistema do IF-USP foi usado para produzir o emaranhamento

Por fim, os novos feixes de luz produzidos, mais o feixe restante de luz verde, são redirecionados para subsistemas de espelhos utilizados para medir suas propriedades. “No nosso experimento há tantos fótons emaranhados que não é possível contá-los”, diz Nussenzeig.

Há quatro anos o grupo da USP tinha obtido sucesso em criar o entrelaçamento quântico com apenas dois feixes de luz. No ano seguinte os físicos publicaram um artigo prevendo a possibilidade de emaranhar uma trinca de feixes, feito que agora demonstraram experimentalmente ser possível. Mas não foi um processo fácil. Quando iniciaram as tentativas de criar o emaranhamento tricolor, depararam com um problema frequente na ciência: os resultados práticos não batiam com as projeções teóricas. Existia uma fonte de contaminação que dificultava o registro do emaranhamento. “Havia um ruído da luz que era intrínseco ao sistema, de natureza quântica”, diz Martinelli. “Mas havia outro tipo de ruído, ruim, que atrapalhava as medições.” Eles precisavam entender a origem da interferência e eliminá-la do sistema.

Nos experimentos com o oscilador paramétrico óptico os físicos usualmente trabalham à temperatura ambiente. No entanto, a estratégia não funcionava na busca pelo entrelaçamento de três feixes diferentes de luz. Os pesquisadores descobriram que, nesse caso, era preciso resfriar o cris-

tal abaixo de uma temperatura para retirar o ruído indesejável do sistema. O calor do ambiente, acima dos 20°C, fazia o cristal vibrar e produzia as interferências. A saída foi manter o cristal a -23°C e, assim, foram criadas as condições para que o entrelaçamento fosse medido de forma satisfatória.

É interessante notar que a pesquisa brasileira tem dado contribuições importantes ao estudo do emaranhamento quântico. Além da equipe de Nussenzeig e Martinelli, outros grupos de pesquisa publicaram artigos em periódicos de renome internacional. Em abril de 2006 o grupo de Luiz Davidovich, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), realizou a primeira medição direta do emaranhamento quântico de partículas e publicou o feito na revista científica britânica *Nature*. Em abril de 2007 a mesma equipe mostrou nas páginas da *Science* como ocorria o fenômeno da morte súbita do emaranhamento. “Há vários grupos nacionais, teóricos e experimentais, realizando trabalhos na fronteira do conhecimento”, afirma Davidovich. “Eles apresentam uma característica interessante: estão distribuídos em vários estados do Brasil e interagem entre si.” ■

► Artigo científico

COELHO, A.S. *et al.* Three-color entanglement. *Science Express*. Publicado on-line em 17 set. 2009.

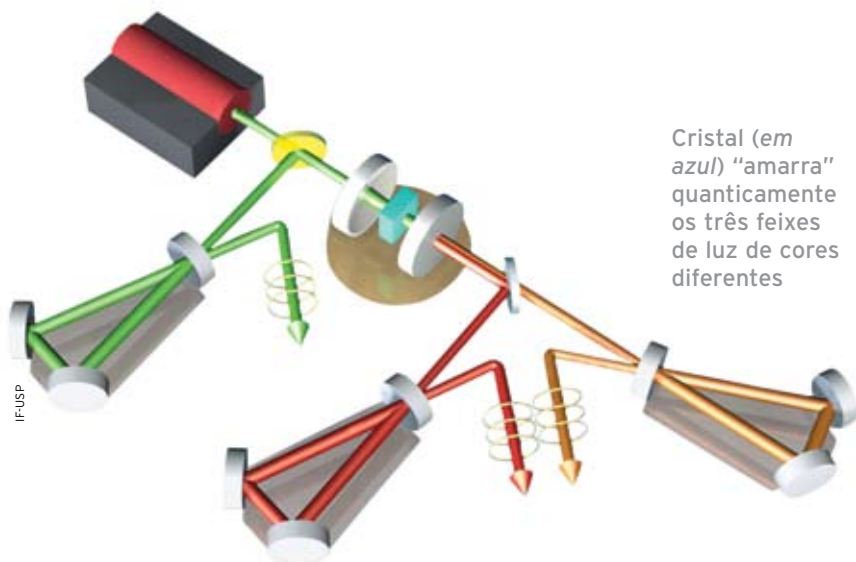
Partículas rebeldes

Comportamento de átomos pode prejudicar o funcionamento de computador quântico

RICARDO ZORZETTO

Uma descoberta recente da equipe de Luis Gustavo Marcassa arrefeceu o ânimo dos pesquisadores empenhados no desenvolvimento teórico e experimental de um computador quântico produzido com átomos mantidos em condições muito especiais. Esse equipamento se vale das propriedades das partículas para realizar cálculos e, acreditam os físicos, poderá no futuro substituir os computadores atuais com vantagens em determinadas situações. Em experimentos feitos no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos, o grupo de Marcassa identificou uma variação sutil no comportamento do sistema considerado ideal para funcionar como processador de um computador quântico. Apesar de pequena, essa oscilação seria suficiente para comprometer o desempenho desses computadores do futuro. Os físicos de São Carlos, no entanto, não se acomodaram depois de encontrar o problema e já começam a propor formas de resolvê-lo.

Num teste aparentemente simples, Marcassa, Valter Aragão do Nascimento e Lucas Caliri aprisionaram com lasers e campos magnéticos uma nuvem de apenas 10 mil átomos do elemento químico rubídio, mantidos a temperaturas baixíssimas – cerca de 10 microKelvin ou 10 milionésimos de grau acima do zero absoluto (-273,15 graus



Cristal (em azul) “amarra” quanticamente os três feixes de luz de cores diferentes

Celsius), quando as partículas apresentam o mais baixo nível de energia possível. Em seguida, iluminaram os átomos com um laser infravermelho e outro azul, excitando-os. Esse procedimento transfere energia para o mais externo de seus 37 elétrons – as partículas fundamentais mais leves conhecidas, de carga negativa, que orbitam o núcleo, formado por partículas de carga positiva (prótons) e neutra (nêutrons).

Energizado, o elétron mais externo do rubídio salta para uma região periférica bem mais distante do núcleo. O afastamento desse elétron faz o átomo aumentar de tamanho cerca de 10 mil vezes e medir quase 1 milésimo de milímetro (micrômetro), tornando-se quase do tamanho de uma bactéria. O novo átomo, inflado como um balão de festa, recebe o nome de átomo de Rydberg – homenagem

ao físico sueco que o previu, Johannes Rydberg – e passa a se comportar de maneira muito especial. Ele apresenta maior sensibilidade a campos elétricos e a campos magnéticos, o que permite interagir com átomos distantes.

“Esses átomos interagem a distâncias muito grandes [*alguns micrômetros*] e torna-se possível distinguir cada um deles e selecionar aquele em que se deseja codificar determinada informação”, explica Marcassa. Devidamente manipulados, conjuntos de dois átomos de Rydberg podem compor a unidade de informação do computador quântico – o *bit* quântico ou *qubit*. Essa seletividade, segundo Marcassa, é vantajosa porque permitiria trabalhar ao mesmo tempo com informações diferentes codificadas nas duplas de átomos, conferindo grande poder de processamento ao computador.

O problema é que no mundo real nem tudo funciona como prevê a teoria. Ao iluminar com laser os 10 mil átomos, os físicos de São Carlos notaram que uma pequena parcela – de 2% a 3% – atingia um nível mais energético ou menos energético do que o desejado. “É preciso tomar cuidado caso se queira construir um computador quântico

Salto de energia: laser faz átomo inflar como balão de festa

usando átomos de Rydberg”, afirma Marcassa, que descreveu esses resultados em artigo publicado em maio na *Physical Review Letters*. Segundo o físico, os poucos átomos em níveis de energia diferen-

tes do desejado já seriam suficientes para atrapalhar o funcionamento de um computador quântico. “Para fazer várias operações é preciso ter controle exato do nível de energia dos átomos”, explica o pesquisador de São Carlos.

Felizmente, esse problema parece ter solução. Adicionando um campo elétrico extra à armadilha, o grupo da USP conseguiu reduzir a proporção de átomos que não atinge o nível de energia desejado. Mas os físicos ainda não estão plenamente satisfeitos. “Estamos procurando outras saídas”, diz Marcassa. Uma delas, ainda em fase de desenvolvimento, exige a aplicação de micro-ondas numa frequência quatro vezes maior que a usada nos fornos de micro-ondas domésticos. ■

► Artigo científico

NASCIMENTO, V.A. *et al.* Electric field effects in the excitation of cold Rydberg-atom pairs. *Physical Review Letters*. v. 102, p. 213.201-1- 213.201-4. 29 mai. 2009.

► O PROJETO

Gases bosônicos e fermiônicos em armadilhas ópticas

MODALIDADE

Linha Regular de Auxílio a Projeto de Pesquisa

COORDENADOR

LUIS GUSTAVO MARCASSA - IFSC-USP

INVESTIMENTO

R\$ 404.233,90 (FAPESP)

