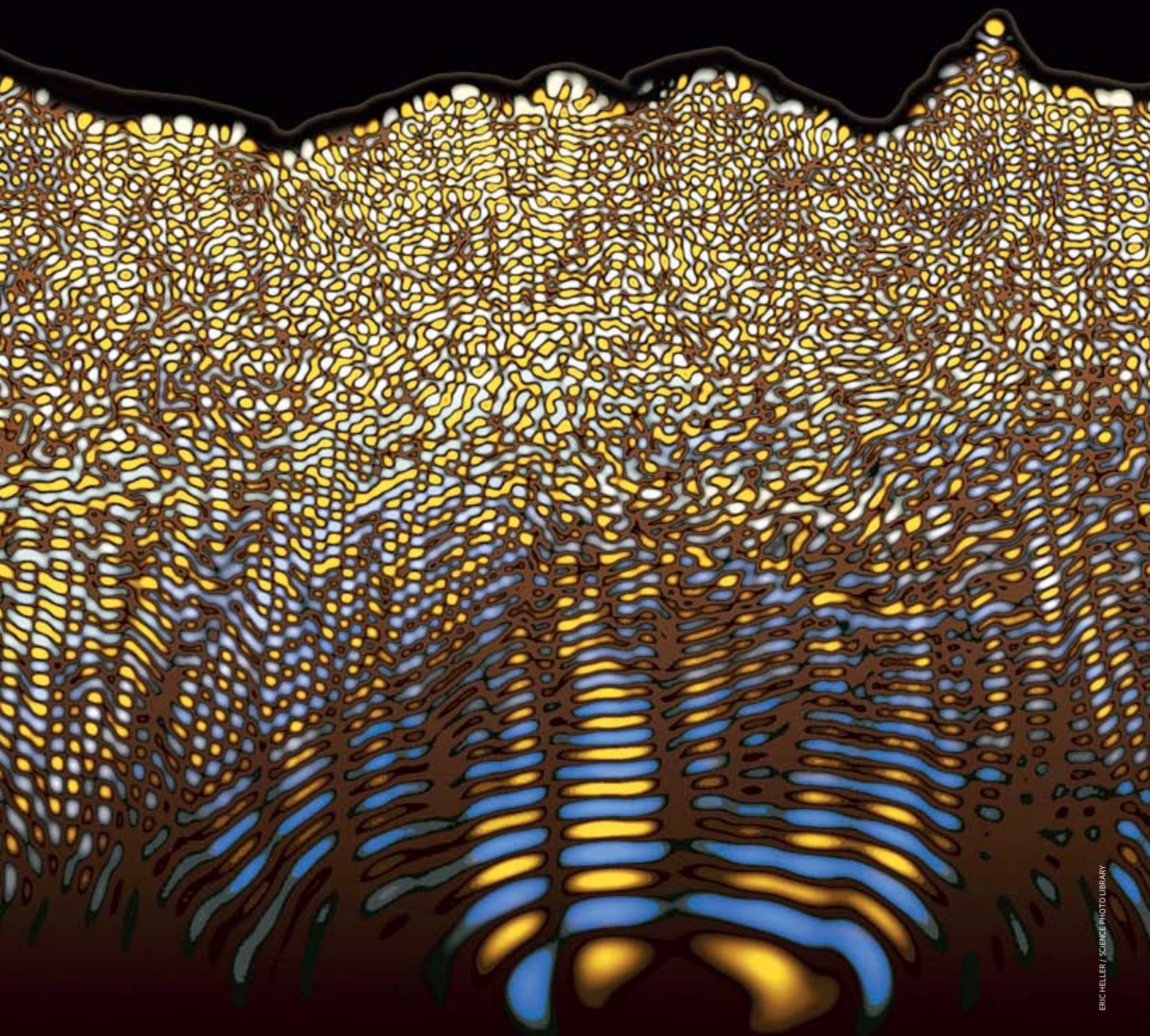


A nova onda dos qubits



Sistemas à temperatura ambiente podem ter uma porção quântica útil para a computação

Marcos Pivetta

Por que um computador quântico poderia, em tese, realizar em minutos cálculos que nem em bilhões de anos os mais potentes supercomputadores conseguiriam fazer? Até 2007 parecia não haver outra resposta possível a essa pergunta a não ser atribuir as vantagens de uma máquina impulsionada por qubits, os bits quânticos, ao emaranhamento ou entrelaçamento quântico, misterioso e estranho fenômeno que aumentaria exponencialmente a capacidade de processamento de dados. Partículas, átomos ou moléculas descritos como emaranhados se encontram tão fortemente ligados entre si — os físicos usam o termo correlacionados — que são capazes de trocar informação independentemente de estarem lado a lado ou a milhares de quilômetros de distância. Apesar de poderoso, o entrelaçamento é também frágil e apenas se mantém em situações especiais, em sistemas extremamente controlados, que não interagem com o ambiente externo.

Nos últimos cinco anos, um novo conceito para aferir correlações não previstas pelas leis da física clássica, a discórdia quântica, ganhou terreno e hoje fornece indícios de que talvez seja possível construir dispositivos quânticos a partir de componentes sem nenhum traço de emaranhamento. E não é só isso. Átomos e partículas com certo nível de discórdia podem conservar suas propriedades quânticas à temperatura ambiente, em sistemas macroscópicos, e em situações em que exista ruído, aqui entendido como a influência do meio externo no sistema.

Derivada de um conceito similar da teoria da informação, a discórdia é uma medida estatística usada para determinar se existe algo de quântico num sistema físico, como um conjunto de elétrons ou moléculas. Os cientistas realizam uma série de medidas para descobrir se há propriedades tipicamente quânticas,

COMPUTAÇÃO

FÍSICA

TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO

Modelo computacional de ondas quânticas: a dualidade partícula-onda da matéria gera os ganhos potenciais do mundo quântico

como a chamada dualidade partícula-onda, capazes de estabelecer um canal de comunicação entre alguns dos componentes do sistema. Essa ligação pode ser o próprio emaranhamento, a forma de conexão quântica mais forte que se conhece (embora de difícil manutenção), ou outros tipos de correlações quânticas mais fracas. A natureza exata dessas correlações mais tênues ainda não é conhecida pelos pesquisadores, mas há evidências de que elas podem ser mais duradouras que o emaranhamento e suficientes para transmitir informação.

“Antes do conceito de discórdia, muitos pesquisadores pensavam que sistemas sem emaranhamento não podiam ser quânticos”, diz Roberto Serra, da Universidade Federal do ABC (UFABC), um dos físicos brasileiros que mais têm se dedicado ao tema dentro do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Informação Quântica (INCT-IQ), iniciativa mantida conjuntamente pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela FAPESP. “Mas estamos mostrando que sistemas com algum tipo de discórdia (e sem emaranhamento) podem ser robustos e servir de base para aplicações em metrologia e computação.”

A discórdia quântica engloba, portanto, toda e qualquer correlação que está em desacordo (daí o nome do conceito) com as leis da física newtoniana, visíveis em nosso dia a dia. A quantidade de discórdia de um sistema é dado por uma equação matemática. “Se a medida da discórdia for diferente de zero, o sistema tem algo de quântico”, explica o físico Felipe Fanchini, da Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop), que tem publicado trabalhos teóricos sobre o novo conceito.

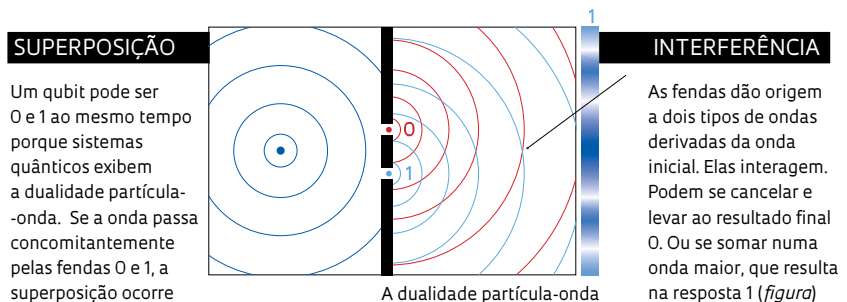
Com essa noção de discórdia na cabeça, físicos de todo o mundo, com destaque para alguns trabalhos recentes de pesquisadores brasileiros, estão encontrando algo de quântico em sistemas antes vistos como estritamente clássicos, ou seja, que aparentemente eram regidos somente pela física newtoniana. Uma equipe de cientistas do INCT-IQ publicou dois artigos praticamente em seguida no segundo semestre do ano passado na revista *Physical Review Letters (PRL)* com resultados de experimentos que exploram esse novo conceito.

A diferença entre bit e qubit

BIT	QUBIT
<p>0</p> <p>•</p> <p>•</p> <p>•</p> <p>1</p>	<p>0</p> <p>•</p> <p>•</p> <p>•</p> <p>1</p>
<p>É a menor unidade de informação dos computadores atuais.</p> <p>Representa apenas um de dois valores possíveis, 0 ou 1</p>	<p>Análogo quântico do bit clássico. Pode assumir dois valores simultaneamente, 0 e 1. Essa característica amplia a capacidade de fazer cálculos em paralelo</p>

A origem dos ganhos quânticos

Os efeitos da superposição de estados e da interferência de ondas



Alguns sistemas com discórdia quântica parecem ter a capacidade de codificar e processar a informação

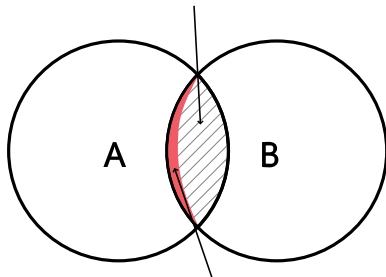
Num artigo de 12 de agosto, Serra e colaboradores do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC-USP), do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro, e da Embrapa dão conta de que mediram pela primeira vez de forma direta a discórdia num sistema quântico a cerca de 26 graus Celsius criado com

o emprego da técnica de ressonância magnética nuclear. Trata-se de um embrião do que um dia pode vir a ser um computador quântico líquido.

No laboratório do CBPF os pesquisadores codificaram dois qubits em moléculas de clorofórmio (CHCl_3), um composto incolor, denso e adocicado usado hoje como solvente e matéria-prima para a produção de precursores de polímeros como o teflon. A rigor codificaram um bit quântico no *spin* do núcleo do átomo de hidrogênio e outro no de carbono ao aplicarem um campo magnético de 12 teslas, milhões de vezes maior do que o da Terra, no sistema. O *spin* é uma propriedade fundamental das partículas elementares, como os elétrons e os fótons, e dos núcleos dos átomos e costuma ser representada por uma seta para cima ou para baixo. “Usamos pulsos de campo magnético para manipular o *spin* do núcleo”, afirma o físico Diogo de Oliveira Soares Pinto, do grupo dos professores Tito Bonagamba e Eduardo Azevedo, da USP de São Carlos, que participou do experimento. “Nas condições em que fizemos o trabalho é impossível haver emaranhamento.”

A discórdia quântica

Correlações clássicas



Correlações quânticas (discórdia)

Dois sistemas correlacionados, A e B, podem ter elementos em comum, uma zona de intersecção que os conecta, como mostra a ilustração esquemática de um diagrama de Venn (acima). Essas ligações são chamadas pelos físicos de correlações. Todas as correlações que estão em desacordo com as leis da física clássica compõem a discórdia quântica. Mesmo ínfima, a discórdia parece ter a capacidade de transmitir informação e talvez possa ser útil para a criação de dispositivos quânticos

Em 30 de setembro, um segundo artigo do mesmo grupo na *PRL* apresentou outro resultado interessante, derivado novamente de observações feitas no sistema de dois qubits criado nas moléculas de clorofórmio. Os pesquisadores mediram mudanças súbitas no comportamento da discórdia quântica em razão do contato com o meio ambiente. Viram como os efeitos quânticos do sistema iam sumindo devido a flutuações e ruídos do ambiente térmico. Depois de um tempo, as interações podiam desestruturar os dois qubits, causando uma perda progressiva de coerência do sistema.

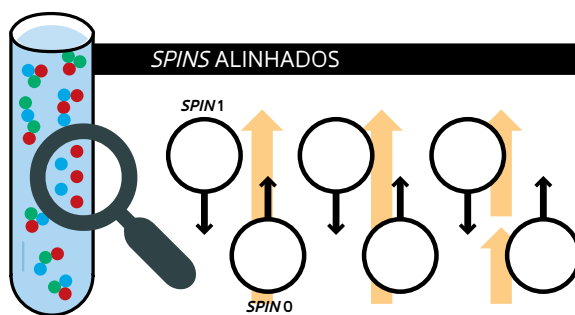
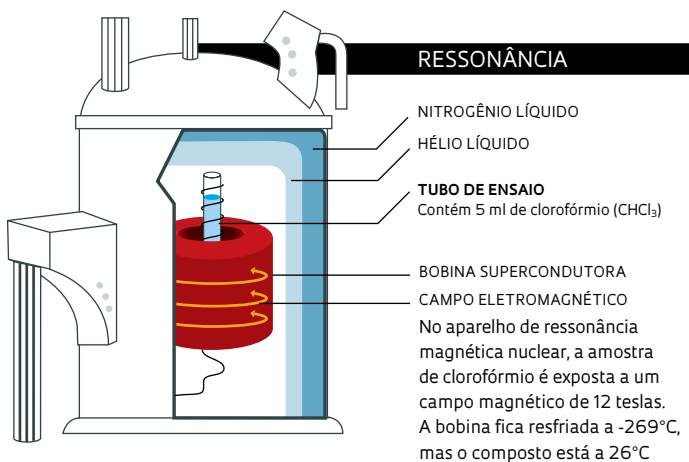
No experimento, os físicos perceberam que a discórdia parece ser bastante resistente a ambientes que causam perturbações no sistema. Nos cerca de cinco mililitros de clorofórmio usados no experimento, apenas uma em cada 1 milhão de moléculas do composto carregava os qubits codificados em seus átomos. Apesar de “diluído” num sistema que é quase totalmente clássico, o caráter quântico da amostra de clorofórmio se preserva e pode se útil para o desenvolvimento

de aplicações. “Qualquer processo de comunicação precisa ter o controle sobre as formas de correlação de um sistema”, afirma Ivan Oliveira, do CBPF, um dos coautores dos dois estudos citados. “Precisamos separar a parte clássica e a quântica da informação.”

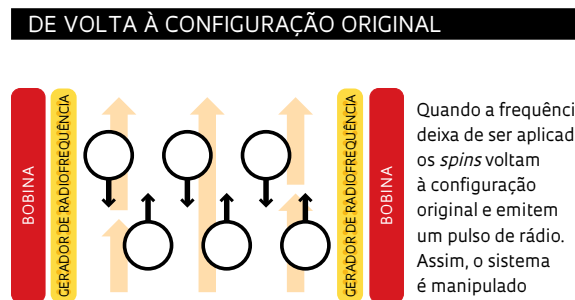
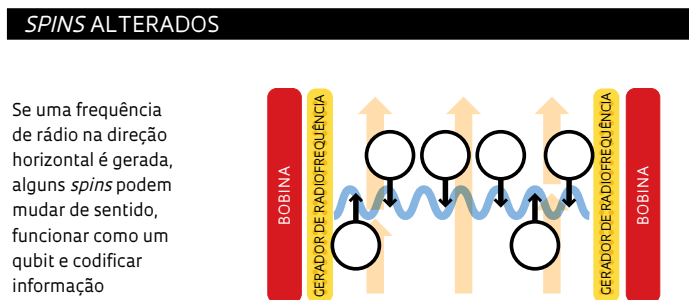
Mais recentemente ainda, em 10 de fevereiro deste ano, os brasileiros publicaram um terceiro artigo sobre discórdia na *PRL*. Dessa vez eles trabalharam com um sistema óptico, para o qual criaram uma forma simples e direta de verificar se há ou não discórdia em fótons, partículas de luz. Foram codificados dois qubits usando uma propriedade dos fótons, a sua polarização, se horizontal ou vertical, e desenvolvido um esquema de registrar, como uma só medida, se há ou não correlações quânticas no sistema, um estratagema denominado testemunha da discórdia. Normalmente é preciso fatiar o sistema em várias partes, como se faz numa tomografia para fins médicos, e realizar ao menos quatro medidas para descobrir se há uma conexão quântica entre os fótons.

Um computador líquido

Dois qubits são codificados manipulando o *spin* do núcleo de átomos de carbono e hidrogênio do clorofórmio



O *spin* do núcleo dos átomos de carbono e hidrogênio se alinha com a direção vertical do campo. Nessa temperatura, aproximadamente metade fica com o *spin* para cima e metade para baixo



“Agora, com apenas uma medida, conseguimos dizer se poderia haver ou não discórdia”, explica Stephen Walborn, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), coautor do estudo.

UM CONCEITO IGNORADO POR ANOS

A ideia da discórdia quântica foi inicialmente proposta em 2001 por dois grupos de físicos que desenvolveram o conceito de forma independente, o chefiado por Wojciech H. Zurek, do Laboratório Nacional de Los Alamos, nos Estados Unidos, e o liderado por Vlatko Vedral, da Universidade de Oxford, na Inglaterra. A proposta não causou muito impacto na comunidade científica em seus primeiros anos de vida. Era uma ideia bastante abstrata sobre um campo de estudo cujo centro principal de interesse girava historicamente em torno do emaranhamento, misterioso fenômeno que Albert Einstein descrevera como tendo uma “ação fantasmagórica a distância”.

Quando em 2007 surgiram os primeiros trabalhos experimentais mostrando que sistemas à temperatura ambiente com discórdia (e sem emaranhamento) podiam transmitir informação por meio de bits quânticos, boa parte dos físicos foi reler os trabalhos de seis anos atrás de Zurek e Vedral. Houve um *boom* de interesse pelo tema. “A discórdia quântica deu uma nova luz a questões que estavam sendo debatidas há anos”, diz o físico Amir Caldeira, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), coordenador do INCT-IQ e autor de trabalhos sobre discórdia.

Segundo Vlatko Vedral, nem todo sistema que apresenta discórdia quântica pode ser manipulado para gerar aplicações em computação ou outras áreas. “Precisamos ser cuidadosos ao escolher os sistemas com que vamos trabalhar. Essa questão ainda está em aberto”, afirma o físico de Oxford. “Para entendermos a diferença que há entre o mundo clássico e o quântico, para entendermos por que um gato não pode estar em dois lugares, mas os átomos podem, acho que temos de ser capazes de discriminar os estados que têm discórdia e os que não têm.” Por ora, os físicos sabem apenas que certos sistemas com discórdia (e sem entrelaçamento), como as moléculas de clorofórmio ou os fótons, podem processar os tão desejados bits quânticos.

A caixa preta de US\$ 10 milhões

Do tamanho de uma sala, máquina com 128 qubits emaranhados se intitula o primeiro computador quântico comercial

Quando se contar a história da computação quântica, o dia 25 de maio de 2011 provavelmente será lembrado. Nesta data, a companhia canadense D-Wave Systems anunciou, em meio a um certo ceticismo da comunidade acadêmica, a venda do autointitulado primeiro computador quântico produzido para fins comerciais. Em vez de *chip* de silício como os micros atuais, o D-Wave One, nome da máquina, faz cálculos explorando as propriedades quânticas de um processador com 128 qubits, implementados por um conjunto de anéis supercondutores de corrente mantidos a 30 milikelvin, temperatura perto do zero absoluto. A primeira unidade do computador custou supostos US\$ 10 milhões à empresa aeronáutica americana Lockheed Martin, que o instalou no final do ano passado no centro de computação quântica da Universidade da Califórnia do Sul (USC, na sigla em inglês), no *campus* de Marina Del Rey.

O D-Wave One é, literalmente, uma grande caixa preta. O processador, que mede uns poucos centímetros,

fica protegido das interferências do meio externo por estar abrigado em um compartimento fechado com o dobro da altura de um homem e 10 metros quadrados de área. Dentro desse invólucro com ares de um cubo irregular há sistemas de resfriamento e proteção contra a influência de campos magnéticos externos, que são os responsáveis por garantir as melhores condições para o processamento dos qubits.

“O *chip* quântico é composto por 128 anéis supercondutores iguais, cada um com o tamanho de 100 micrômetros (um centésimo de milímetro)”, diz o físico teórico Frederico Brito, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que trabalhou na empresa D-Wave entre maio de 2008 e julho de 2009. Quando gira nos anéis no sentido anti-horário, a corrente representa um *spin* para cima (ou o 0 da computação clássica). Quando corre no outro sentido, faz as vezes do *spin* para baixo (ou o 1). Um dispositivo presente em cada anel e denominado junção Josephson gera efeitos quânticos, como

O qubit é o análogo quântico do bit clássico, definido como a menor unidade em que a informação pode ser codificada, armazenada e transmitida nos computadores atuais e nos sistemas de telecomunicações, como fibras ópticas ou redes sem fio. Há, no entanto, diferenças significativas entre os dois conceitos. Num dado momento, um bit clássico, também denominado dígito binário, só pode se encontrar em apenas um de dois valores ou estados possíveis: 0 ou 1, por exemplo. Nos computadores de hoje em dia o 0 é representado pela interrupção da voltagem num circuito (estado *off*) e o 1 pela liberação da corrente (estado *on*). Um qubit é mais do que isso. Ele pode, simultaneamente, representar os valores equivalentes a 0 e 1. Pode estar numa

OS PROJETOS

1. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Informação Quântica nº 2008/57856-6
2. Informação quântica e decoerência nº 2005/04471-1

MODALIDADES

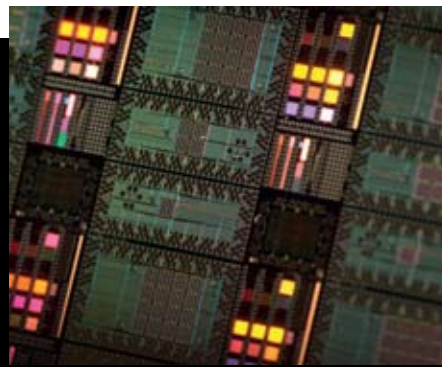
1. Projeto Temático
2. Programa Jovem Pesquisador

COORDENADORES

1. Amir Caldeira – Unicamp
2. Roberto Serra – UFABC

INVESTIMENTO

1. R\$ 1.384.811,24 (FAPESP) e R\$ 5.700.000,00 (CNPq)
2. R\$ 68.321,95 (FAPESP)



O invólucro negro que protege o computador quântico D-Wave One e seu *chip* de 128 qubits: máquina tem o dobro da altura de um homem, ocupa área de 10 metros quadrados e funciona perto da temperatura do zero absoluto

tunelamento e interferência de ondas, que potencializam a capacidade teórica da máquina de resolver problemas.

Para alguns físicos, o D-Wave One é também uma caixa preta no sentido metafórico. Pouca gente sabe como a máquina funciona e se há algo de quântico realmente nela. Para tirar dúvidas e vencer resistências da comunidade acadêmica, a empresa canadense publicou um artigo em 12 de maio do ano passado, menos de duas semanas antes da divulgação da

venda de seu primeiro computador, na prestigiada revista científica britânica *Nature*. No trabalho, os cientistas da companhia dão detalhes sobre a técnica usada para gerar os 128 qubits. A máquina explora a chamada computação quântica adiabática.

De forma simplificada, esse tipo de computação consiste em fazer um sistema trabalhar em seu menor nível de energia possível, no chamado estado fundamental, geralmente próximo da temperatura do zero absoluto. Em

seguida são promovidas mudanças tão lentamente no sistema que essas alterações são capazes de manter as propriedades quânticas do dispositivo sem fazê-lo funcionar no nível seguinte de energia. No caso do computador da D-Wave as alterações consistem em fazer a corrente mudar de sentido, do horário para o anti-horário, ou vice-versa.

Cerca de 85% dos qubits da máquina já se encontram operacionais, segundo Daniel Lidar, diretor do centro de computação quântica da USC. "Ainda não sabemos o quão potente é o processador", afirma Lidar. "Pretendemos estudá-lo com muita atenção." O D-Wave One foi desenvolvido para procurar as melhores soluções para certos tipos de problema, como o reconhecimento de imagens e o envelhecimento de proteínas.

superposição de estados, uma estranha propriedade quântica que potencializa a realização de cálculos em paralelo. "Os qubits aumentam de maneira exponencial a capacidade de computação", comenta Roberto Serra. "De forma simplificada, podemos dizer que dois qubits equivalem a 4 bits, 3 qubits a 8 bits, 4 qubits a 16 bits e assim por diante."

A superposição de estados é uma capacidade típica dos sistemas quânticos (sejam eles formados por átomos, elétrons, fótons ou moléculas) de se comportar concomitantemente como partícula e onda. É a tal da dualidade partícula-onda. A situação se torna menos surreal quando se toma como exemplo a onda criada por uma pedra arremessada num lago. Ela causa oscilações na

superfície da água na forma de círculos concêntricos que podem, ao mesmo tempo, atravessar duas pontes vizinhas na beira do lago. Nesse caso, se uma ponte for a representação do número 0 e outra do 1, parte da onda é 0 e parte é 1. A onda é 0 e 1 ao mesmo tempo.

Mas um computador quântico que dese duas respostas para um problema seria de pouca valia. Afinal, apenas uma delas é a certa. Aí entra em ação um segundo fenômeno quântico, a interferência de ondas. Retomando o exemplo do lago, depois de atravessar as duas pontes, a onda 1 e a onda 0 se reencontram. Essa interação pode ser destrutiva, as ondas se cancelam e o resultado final é 0. Ou construtiva, as ondas se somam e a resposta é 1. Os chamados algoritmos quânticos são

instruções matemáticas, espécie de programas, que aumentam a probabilidade da superposição de estados e da interação de ondas de levarem à resposta certa ao final do processamento de dados. Estranho? Sim. Bem-vindo ao mundo quântico. ■

Artigos científicos

1. AGUILAR, G.H. *et al.* Experimental estimate of a classicality witness via a single measurement. *Physical Review Letters*. v. 108, n. 6, p. 063601-1/063601-4. 10 fev. 2012.
2. AUCCAISE, R. *et al.* Environment-induced sudden transition in quantum discord dynamics. *Physical Review Letters*. v. 107, n. 14, p. 140403-1/140403-5. 30 set. 2011.
3. AUCCAISE, R. *et al.* Experimentally witnessing the quantumness of correlations. *Physical Review Letters*. v. 107, n. 7, p. 070501-1/070501-5. 12 ago. 2011.