

EMAR



Em 1935, um artigo que tinha como um dos autores o físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) revelou uma característica ‘fantasmagórica’ que pode estar presente em sistemas formados por diminutas entidades quânticas, como átomos, elétrons ou partículas de luz.

Essa propriedade, mais tarde denominada emaranhamento, possibilitava uma nova forma de transmissão instantânea de informação entre dois pontos do espaço, sem que houvesse troca de energia ou matéria. Assim, dois átomos que estivessem no estado emaranhado poderiam se influenciar mutuamente, mesmo se separados por distâncias astronômicas.

No início deste século, uma revelação impressionou a comunidade de físicos: o emaranhamento é o fenômeno que garante a velocidade extraordinária dos chamados computadores quânticos, que prometem resolver em segundos tarefas que levariam milhões de anos para um computador convencional.

Mesmo que hoje seja obtido corriqueiramente nos laboratórios do mundo, o emaranhamento ainda desafia a compreensão dos físicos.

Ivan S. Oliveira

Alexandre M. Souza

Roberto S. Sarthour

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)

Mário S. Reis

Centro de Investigação em Materiais

Cerâmicos e Compósitos (Ciceco)

Universidade de Aveiro (Aveiro, Portugal)

Diogo O. Soares-Pinto

CBPF e Universidade de Aveiro

ANHAMENTO

Um recurso computacional que desafia os físicos



Imagine duas caixas opacas e duas bolas de bilhar, uma preta e uma branca. De olhos vendados, coloca-se uma bola em cada caixa, que é então tampada, para que não se saiba qual bola está em qual caixa. Cada uma das caixas é entregue a uma pessoa, digamos aos amigos Beto e Alice. Ela não deve abrir sua caixa, mas ele poderá abrir a dele, depois de se distanciar de sua amiga.

Beto afasta-se de Alice, de forma que não haja comunicação entre eles. Beto, agora, pode abrir sua caixa para saber a cor da bola que está nela. Antes de abri-la, porém, tudo o que Beto sabe é que a probabilidade de ele encontrar a bola branca é de 50%, sendo essa a mesma probabilidade de encontrar a preta.

Beto abre a caixa e verifica que a bola que está com ele é a preta, concluindo que a branca está com Alice. Contudo, para Alice, que não pode abrir sua caixa, há 50% de chance de sua bola ser preta e 50% de ela ser branca. Mas, para Beto, a bola de Alice é branca, com 100% de certeza.

Assim, Beto, mesmo distante e incomunicável, obtém informação sobre o que está na caixa de Alice.

Correlação, informação e realismo

Esse exemplo simples de um experimento imaginado com objetos macroscópicos (bolas e caixas) encerra conceitos importantes em física:

i) o conceito de correlação: a cor da bola de Beto está correlacionada à cor da bola de Alice, pois só há duas bolas, uma preta e outra branca. Por causa dessa correlação, Beto pode concluir o que Alice encontraria ao abrir a caixa dela, mesmo estando distante de sua amiga;

ii) o conceito de informação: antes de abrir a caixa, Beto não tem qualquer conhecimento sobre a cor de sua bola. Ele só sabe que a probabilidade de encontrar uma bola preta ou branca é de 50%. Quando Beto abre sua caixa, passa a ter certeza de que a bola com Alice é branca, embora sua amiga continue pensando que pode estar tanto com a preta quanto com a branca. Ou seja, Beto obteve a informação sobre a bola de Alice, apenas observando a cor daquela que está com ele e, a menos que ele envie essa informação para Alice por algum meio físico (telefone, fax, correio eletrônico, carta etc.), ela continuará ignorando qual a cor da bola dela;

iii) finalmente, há o conceito de realismo: segundo essa idéia, as bolas com Beto e com Alice têm uma cor definida (ou preta, ou branca), ainda que as caixas jamais sejam abertas e nunca se olhe para as bolas.

Situação inusitada

Bolas e caixas são exemplos de objetos com um número incontável de átomos e moléculas ligados quimicamente entre si. Situações como a do experimento imaginado acima, envolvendo corpos macroscópicos, são bem descritas pelas leis usuais da probabilidade, as mesmas que regem um jogo de dados ou de cara ou coroa.

Agora, vamos imaginar uma situação tão interessante quanto inusitada: vamos abandonar a idéia de realismo. Ou seja, vamos supor que as bolas não tenham uma cor definida antes que as caixas sejam abertas. Com isso, a bola de Beto passa a ter uma cor apenas no momento em que ele abre a caixa e olha para ela. Suponha, como antes, que Beto abra a sua caixa e verifique que a bola nela é a preta.

O que acontece com a bola de Alice?

Ora, como Beto encontrou 'preta', e só há duas cores possíveis, ele conclui que a bola com Alice é branca. Mas, como a caixa de Alice não foi aberta, a bola nela não poderia ter uma cor definida, pois abandonamos a hipótese de realismo *a priori*... a menos que o ato de Beto observar a cor da bola em sua caixa tenha influenciado, de alguma forma, a cor da bola de Alice. Mas, estando Beto e Alice remotamente separados um do outro, como essa influência poderia ser possível?

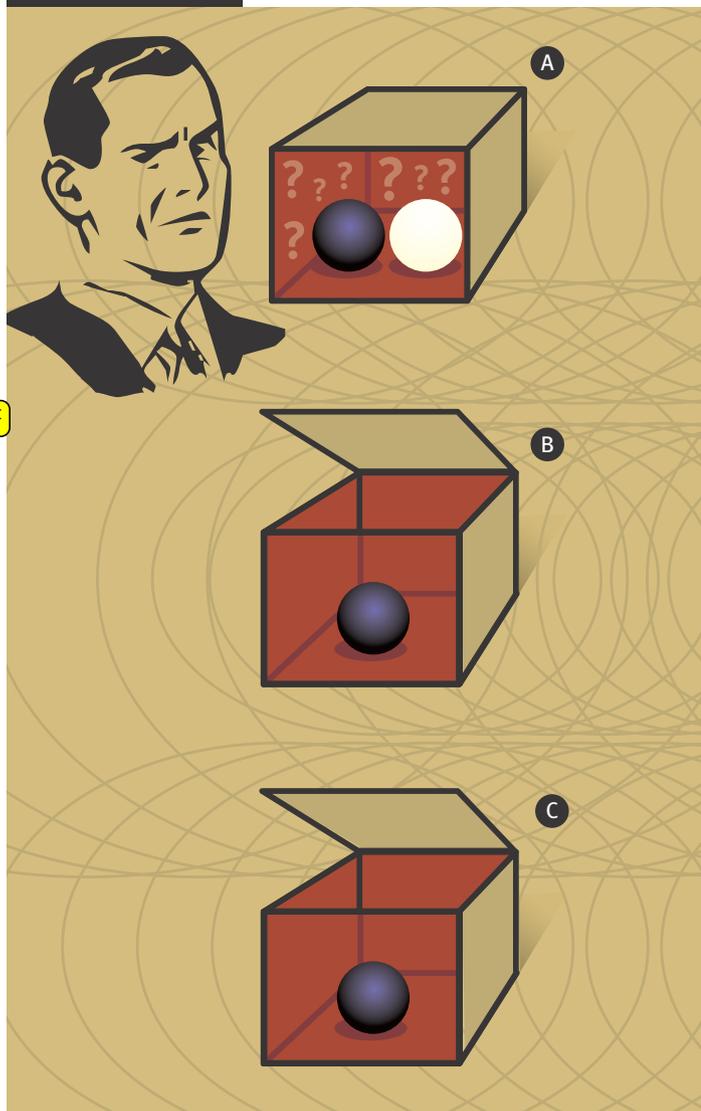
Que confusão!

Parece que não podemos abandonar a hipótese do realismo, mas...

Admirável mundo quântico

Mas é isso que acontece no mundo quântico, ou seja, nas dimensões dos átomos, elétrons, fótons (partículas de luz) etc. Nesse diminuto universo, é possível criar situações em que a observação de uma

Beto

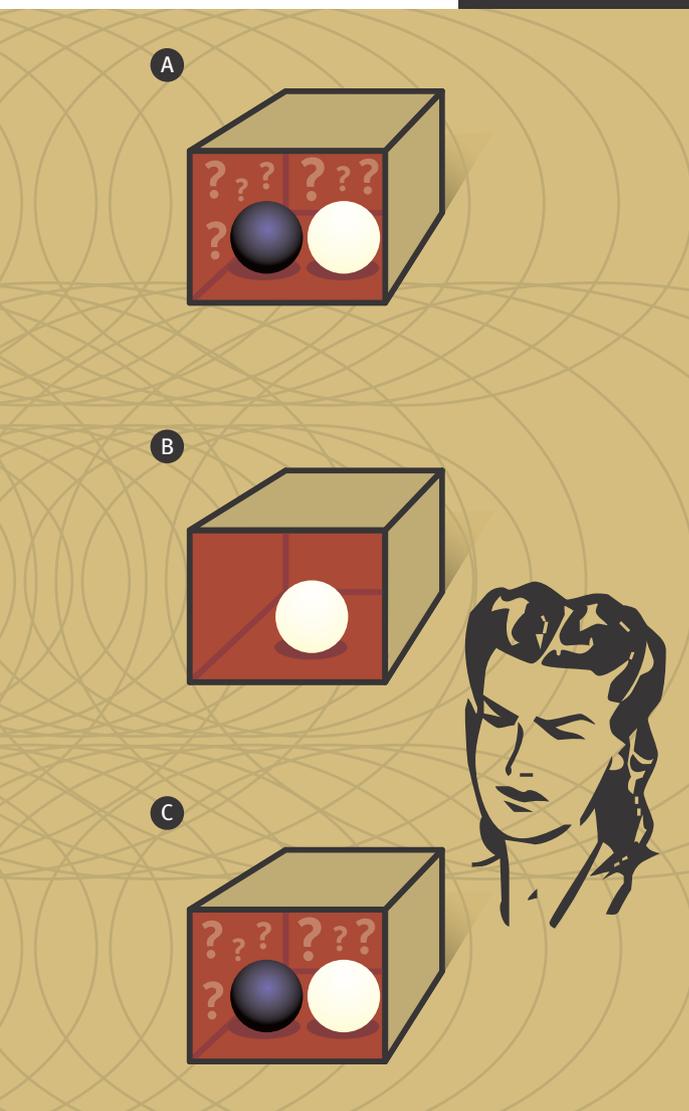


propriedade física de um objeto (como a velocidade de um elétron) influencie outra propriedade física de um objeto distante do primeiro (como a posição de um outro elétron). Esse fenômeno é chamado pelos físicos de não-localidade.

Para que a não-localidade seja observada em um experimento de laboratório, é preciso que os constituintes do sistema físico em questão (por exemplo, dois fótons, dois elétrons etc.) estejam em um estado quântico chamado estado 'emaranhado'. Esse termo (do alemão, *Verschränkung*) foi cunhado pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) em 1935, em um artigo em que ele analisava a questão da não-localidade. Quando duas ou mais partículas encontram-se emaranhadas, elas comportam-se como se fossem um único objeto indissociável, mesmo quando distantes umas das outras.

Em nosso exemplo, se as bolas fossem objetos quânticos emaranhados, antes de Beto abrir sua cai-

Alice



xa a bola nela não seria nem preta, nem branca. Ela se tornaria preta ou branca apenas no momento em que a caixa fosse aberta, e a bola fosse observada. E, nesse momento, a cor da bola de Alice também seria definida. Mas a informação sobre a cor da bola de Alice permaneceria só com Beto, a menos que este use um meio clássico de comunicação (carta, fax, telefone, correio eletrônico etc.) para informar Alice sobre a cor da bola que está com ele (figura 1).

Ação fantasmagórica

Einstein foi o maior opositor da mecânica quântica, uma teoria que se desenvolveu principalmente na década de 1920 e que lida com os fenômenos que ocorrem em nível atômico e subatômico. Apesar de ter proposto a idéia do emaranhamento, em artigo de 1935, escrito em co-autoria com dois outros físicos, Boris Podolski (1896-1966) e Nathan Rosen (1909-

Figura 1. Dois efeitos quânticos correlatos: a superposição de estados e o emaranhamento. Cada uma das duas caixas fechadas contém uma bola, que pode ser branca ou preta. Em A, antes que as caixas sejam abertas, as bolas não têm cor definida, estando em uma ‘superposição’ de preto com branco, como se tivessem as duas cores ao mesmo tempo. Em B, a cor de cada bola só se define no momento em que a caixa for aberta. Além disso, se as bolas estiverem emaranhadas, a observação da cor de uma delas afetaria a cor da bola na outra caixa. Em C, caso as bolas não estejam em um estado emaranhado, a observação da cor de uma das bolas não afeta a cor da outra, que continua em uma superposição das duas cores. Esses fenômenos não ocorrem com objetos macroscópicos, como bolas de bilhar, por exemplo, mas já foram observados inúmeras vezes em laboratórios de física em experimentos com partículas quânticas, como átomos, elétrons, fótons etc.

1995), Einstein nunca acreditou na realidade física desse fenômeno, em função da estranheza com que via essa “fantasmagórica ação a distância” (palavras dele) entre dois objetos quânticos. Chegou a dizer que a mecânica quântica deveria ser abandonada, pois levaria à parapsicologia! Para ele, essa teoria era “matemática com magia negra” (ver ‘A estranha natureza da realidade quântica’ em *CH* n° 7).

No entanto, até o ano da morte de Einstein (1955), não havia condições experimentais para se testar em laboratório se sistemas quânticos reais exibem, de fato, as estranhas propriedades do emaranhamento, pois nesses experimentos é preciso manipular átomos e outras partículas quânticas individualmente. Essas condições só começaram a surgir no final da década de 1970. De lá para cá, incontáveis experimentos têm confirmado as previsões da mecânica quântica sobre os estados emaranhados, inclusive aquela fantasmagórica influência de um corpo sobre outro, distante do primeiro.

Foi no início da década de 1980 quando começaram a surgir as primeiras idéias de se utilizar fenômenos quânticos para fins computacionais, dando início à área de pesquisa conhecida como computação quântica (ver ‘Computação quântica: manipulando a informação oculta do mundo quântico’, em *CH* n° 193).

Algoritmo de Shor

A computação quântica estuda os fenômenos quânticos para fins computacionais, o que basicamente significa desenvolver algoritmos de cálculos para resolver problemas matemáticos complexos (para nossos propósitos aqui, podemos pensar em um algoritmo como uma seqüência lógica de tarefas realizadas passo a passo). Um desses algoritmos, até agora considerado o mais importante de todos, foi descoberto em 1993 por Peter Shor, pesquisador dos Laboratórios Bell (Estados Unidos). Shor inventou um algoritmo quântico para fatorar números grandes. ▶

Fatorar um número significa escrevê-lo como um produto de números primos. Por exemplo, $15 = 3 \times 5$; $231 = 3 \times 7 \times 11$. Enquanto o produto de números é considerado uma tarefa computacionalmente simples, a fatoração é muito trabalhosa e complicada. Exemplo: quanto tempo o leitor imagina que um computador usual, como um PC, precisaria para descobrir que o número

114.381.625.757.888.867.669.235.779.976.146.612.010.218.296.721.242.362.562.561.842.935.706.935.245.733.897.830.597.123.563.958.705.058.989.075.147.599.290.026.879.543.541

é igual ao produto de

3.490.529.510.847.650.949.147.849.619.903.898.133.417.764.638.493.387.843.990.820.577

por

32.769.132.993.266.709.549.961.988.190.834.461.413.177.642.967.992.942.539.798.288.533?

A resposta é surpreendente: esse número, conhecido como RSA 129, foi fatorado em abril de 1994 por uma equipe de cientistas liderada por Derek Atkins, Michael Graff, Arjen Lenstra e Paul Leyland, usando cerca de 600 computadores conectados pela internet. Agora, vem o melhor: um computador quântico, executando o algoritmo de Shor, não levaria mais que uns poucos segundos para encontrar a resposta.

O maior número fatorado até o momento foi o RSA 640, com 193 dígitos. A tarefa foi realizada por cientistas alemães em maio de 2005 e levou cinco

meses de processamento em um único computador. Outros números estão propostos no sítio da internet http://en.wikipedia.org/wiki/RSA_numbers. Prêmios em dinheiro são oferecidos para quem conseguir fatorá-los.

Emaranhamento na prática

Em 2001, foi descoberto por que os algoritmos quânticos são tão mais velozes que os clássicos (ou seja, algoritmos que são executados por computadores usuais). Resposta: o emaranhamento. Portanto, esse fenômeno é um recurso computacional responsável pelo aumento da velocidade de processamento dos computadores quânticos. É possível aumentar ou diminuir a quantidade de emaranhamento, tanto quanto o espaço de memória ou qualquer outro recurso físico dos computadores.

Além de aumentar a velocidade de processamento dos computadores quânticos, o emaranhamento tem outras aplicações conhecidas (e acredita-se que a lista de aplicações esteja longe de ser esgotada):

i) enviar *bits* (o *bit*, do inglês *binary digit*, ou dígito binário, é a unidade de informação) de um ponto a outro, com eficiência maior que aquela das redes clássicas de comunicação (como a internet);

ii) mandar mensagens secretas de forma 100% segura, um novo campo denominado criptografia quântica. Exemplo simples: cria-se um par emaranhado de partículas, fica-se com uma delas, enquanto

a outra é enviada ao destinatário, carregando a informação secreta que se quer transmitir; caso esta última seja interceptada antes de chegar ao destino final, o emissor e o receptor ficarão sabendo e tomarão as medidas necessárias. Esse recurso, empregando fótons, já está sendo usado, em caráter experimental, por bancos;

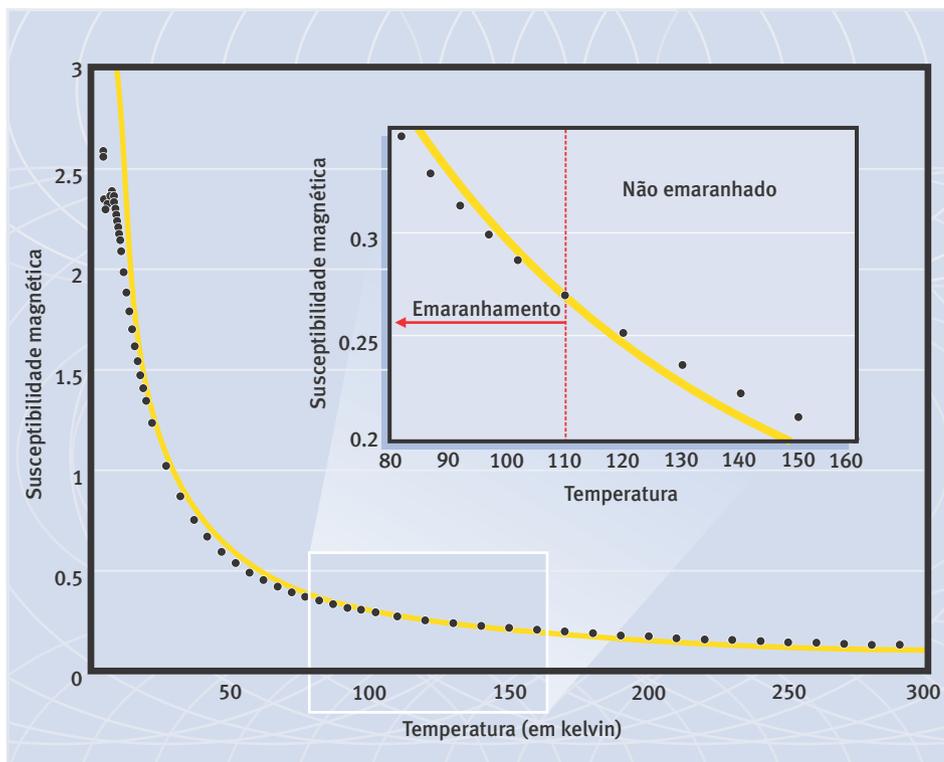


Figura 2. Susceptibilidade magnética medida no composto $\text{Na}_2\text{Cu}_5\text{Si}_4\text{O}_{14}$ em função da temperatura. A curva contínua (em amarelo) representa a região limítrofe. Abaixo dela, o sistema está emaranhado. Os pontos (pretos) representam a susceptibilidade magnética medida no material. No destaque, no qual uma região do gráfico foi ampliada, é possível ver que, para temperaturas inferiores a cerca de 110 kelvin, o sistema encontra-se emaranhado.

iii) ser a base para a mais exótica forma de comunicação: o teleporte (por vezes, chamado teletransporte). Nesse fenômeno, a informação sobre o estado quântico de um objeto (por exemplo, um átomo) viaja de um ponto a outro do espaço, sem que haja transporte de matéria ou energia, mas apenas de informação (ver ‘Teletransporte com átomos’, em *CH* n° 207).

Tudo isso graças ao emaranhamento.

Princípio da exclusão

A partir de 2001, começaram a surgir novas idéias sobre emaranhamento, dessa vez não ligadas a sistemas físicos, como átomos ou elétrons, mas à matéria macroscópica. Estamos falando de sistemas contendo um número incontável de átomos e elétrons ligados entre si e em equilíbrio térmico (ou seja, à mesma temperatura).

Vale lembrar aqui que os fenômenos quânticos que ocorrem com átomos e elétrons refletem-se nas propriedades da matéria macroscópica (nem poderia ser de outra forma). Por exemplo, o chamado princípio de exclusão de Pauli, que aprendemos nas aulas de química do Ensino Médio, afirma que dois elétrons não podem estar no mesmo estado quântico ao mesmo tempo. Esse é o princípio por trás dos tipos de ligações químicas que ocorrem entre átomos, e, se ele não existisse, não existiriam objetos macroscópicos, nem mesmo a vida.

Reação ao campo

O que se começou a investigar a partir de 2001 foram as manifestações do emaranhamento em sistemas macroscópicos, como materiais magnéticos, semelhantes a ímãs. Para isso, investigam-se propriedades físicas desses objetos que são sensíveis ao emaranhamento. Por exemplo, qualquer material magnético tem uma propriedade chamada susceptibilidade magnética. Definida de modo simples e conciso, podemos dizer que essa grandeza mede a ‘reação’ (ou resposta) do material à ação de um campo magnético aplicado sobre ele. Quanto maior a susceptibilidade, maior a ‘reação’ magnética.

A susceptibilidade magnética é uma grandeza sensível ao emaranhamento, pois seu valor muda caso haja emaranhamento entre os constituintes fundamentais do magnetismo, que são os *spins* dos átomos que formam o material (podemos pensar nos *spins* como a propriedade que faz os átomos se comportarem como diminutas bússolas). Quando um material magnético é sujeito à ação de um campo magnético, os *spins* tendem a apontar na direção do campo ou na direção contrária a ele, como minúsculas bússolas apontando todas para o Norte, ou todas para o Sul.

Comportamento macroscópico

Um ponto importante a lembrar: o *spin* é uma propriedade quântica. Portanto, isso faz com que essa ‘agulha’ atômica possa apontar nas duas direções simultaneamente, em uma situação equivalente à de a bola ser ao mesmo tempo preta e branca. Além disso, *spins* podem ser emaranhados uns com os outros. Nesse caso, a observação da direção de um *spin* afeta a direção do outro. E essa propriedade reflete-se na susceptibilidade magnética do material.

Assim, estudando-se a susceptibilidade magnética em função da temperatura do material (ou da intensidade do campo magnético aplicado sobre ele), pode-se observar o comportamento do emaranhamento em um sistema físico macroscópico. Um exemplo desses está na figura 2, que mostra a variação da susceptibilidade magnética de um composto formado por quatro elementos químicos ($\text{Na}_2\text{Cu}_5\text{Si}_4\text{O}_{14}$) em função de sua temperatura. A curva contínua (em amarelo) representa a região limítrofe, abaixo da qual o sistema encontra-se emaranhado (ou seja, os átomos dessa grande célula estão emaranhados). Os pontos (em pretos) representam a susceptibilidade magnética medida no material (os *spins*, no caso, pertencem aos átomos de cobre).

Vê-se no destaque da figura 2 que, a temperaturas inferiores a cerca de 110 kelvin, o sistema encontra-se emaranhado (note que, nessa região, os pontos pretos estão abaixo da curva). É claro que, nesse caso, não se podem observar os efeitos da não-localidade (ou seja, aquela ação a distância típica do estado emaranhado), pois os átomos estão ligados quimicamente entre si (e não há como separá-los sem destruir o emaranhamento). Mas, em outros experimentos (com fótons emaranhados, por exemplo), hoje corriqueiros em vários laboratórios do mundo (inclusive no Brasil), a não-localidade e suas conseqüências ficam bem evidenciadas.

Nova revolução

O emaranhamento é um fenômeno notável, pois está, ao mesmo tempo, ligado a questões fundamentais de natureza filosófica até hoje não resolvidas pela física, bem como a aspectos tecnológicos que podem levar em um futuro próximo a uma nova revolução na computação e nas comunicações. Não deixa de ser surpreendente que essa grandeza, com características “fantasmagóricas”, como definiu Einstein, seja tanto um poderoso recurso natural para os computadores quânticos quanto uma propriedade presente em fenômenos corriqueiros, como é o caso do magnetismo dos materiais.

Certamente, os próximos anos revelarão novas surpresas sobre o emaranhamento. ■

SUGESTÕES PARA LEITURA

- OLIVEIRA, I. S. *Física moderna para iniciados, interessados e aficionados*. São Paulo: Editora Livraria da Física (2005).
- NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L. *Computação quântica e informação quântica*. São Paulo: Bookman (2005).
- RAPPAPORT, T. G.; GHIVELDER, L.; FERNANDES, J. C.; GUIMARÃES, R. B.; CONTINENTINO, M. A. ‘Experimental observation of quantum entanglement in low-dimensional spin systems’. *Physical Review B* 75 054422 (2007).
- SOUZA, A. M., REIS, M. S., SOARES-PINTO, D. O., OLIVEIRA, I. S., SARTHOUR, R. S. ‘Experimental determination of thermal entanglement in spin clusters using magnetic susceptibility measurements’. *Physical Review B* v. 77, 104402 (2008).
- SCHRÖDINGER E. ‘Discussion of probability relations between separated systems’. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31, 555-563 [2], (1935).
- OLIVEIRA, I. S. (ed. cient.). *Informação quântica – do teleporte à última fronteira da computação*. Rio de Janeiro: CBPF (2006). Disponível em formato PDF na página do projeto de divulgação científica ‘Desafios da Física’: <http://mesonpi.cat.cbpf.br/desafios/>