

Aos poucos, os supercondutores estão invadindo nosso cotidiano, estando presentes em equipamentos de medicina de diagnóstico, trens supervelozes que 'flutuam' sobre os trilhos e máquinas gigantescas para o estudo da física de partículas. Esses materiais, que conduzem corrente elétrica sem perda de energia, carregam consigo uma longa lista de promessas, que aos poucos vêm sendo cumpridas.

Há cerca de 20 anos, foi descoberta uma nova classe desses compostos: a que apresenta a supercondutividade a 'altas' temperaturas. Desde então, os físicos da área, inclusive no Brasil, vêm tentando desvendar os segredos desses materiais, para entender um dos mais intrigantes – e, por enquanto, misteriosos – fenômenos da natureza.

Nas próximas páginas, o leitor fará uma viagem pelos continentes da supercondutividade, inclusive com direito a uma visita à 'terra incógnita', para conhecer essa região explorada pelos especialistas, mas ainda misteriosa.

Antonio R. de C. Romaguera

Departamento de Física,
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Cristiane Morais Smith

Instituto de Física Teórica,
Universidade de Utrecht (Holanda)

Mauro M. Doria

Instituto de Física,
Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUPER DE ALTA

PASSADO, PRESENTE E FUTURO DE

CONDUTIVIDADE TEMPERATURA CRÍTICA

Em 1911, o físico Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) mostrou, em seu laboratório de Leiden (Holanda), que a resistência metálica do mercúrio caía abruptamente a zero quando a temperatura da amostra ficava abaixo de 268,95 graus celsius negativos. Estava descoberta a supercondutividade, fenômeno no qual não há perda de energia na passagem de corrente elétrica. Esse e outros resultados sobre o comportamento da matéria a baixíssimas temperaturas deram a esse holandês o prêmio Nobel de Física de 1913.

LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY

A ausência de resistência na passagem da corrente faz dos supercondutores materiais úteis para aplicações em situações em que se busca a economia de energia. Atualmente, essas aplicações vão desde aparelhos de ressonância magnética nuclear, comumente usados para realizar diagnósticos médicos, até aceleradores de partículas, como o LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons), na Suíça. Neste último, estão fios feitos de ligas de nióbio-titânio e de nióbio-estanho, que se tornam supercondutores apenas abaixo de suas temperaturas críticas, 263,15 e 254,85 graus celsius negativos, respectivamente. Cada material supercondutor tem sua temperatura crítica, acima da qual a supercondutividade desaparece. ▶

Ímã levita sobre um supercondutor de alta temperatura crítica, resfriado com nitrogênio líquido. Uma corrente elétrica flui da superfície do supercondutor formando um campo magnético que repele o ímã. Esse fenômeno, conhecido como efeito Meissner, é o que possibilita trens supereletrônicos levitarem sobre o trilho

UM FENÔMENO AINDA MISTERIOSO

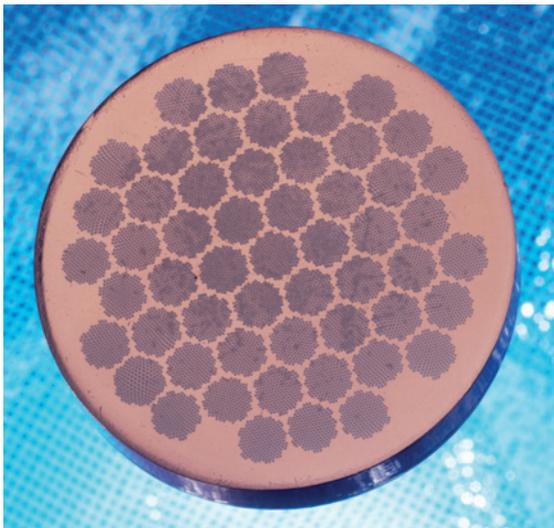
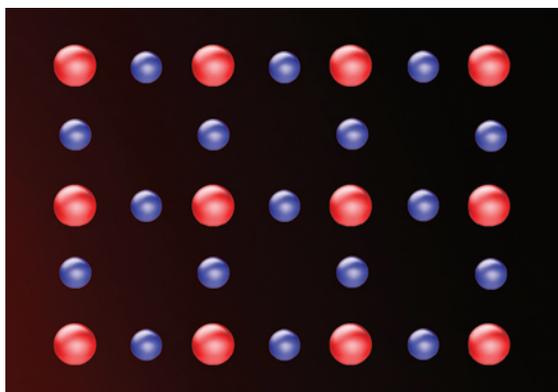


Figura 1. A imagem mostra – em um corte transversal – os fios de material supercondutor usados no Grande Colisor de Hádrons (LHC), envolvidos em uma matriz de cobre. Quando resfriados até a temperatura crítica, na presença de um campo magnético, os 8 mil filamentos de nióbio-titânio desses fios apresentam resistência nula e conduzem elevada corrente elétrica sem perda de energia

A ausência de perda de energia por calor compensa o custo da refrigeração: enquanto fios de cobre comuns transportam, no máximo, 30 ampères de corrente elétrica, os de nióbio-titânio usados no LHC podem atingir mais de 40 mil ampères (figura 1).

DANÇA COLETIVA

Cerca de 50 anos depois da descoberta de Onnes, o fenômeno da supercondutividade foi entendido graças a uma teoria, de 1957, de três físicos norte-americanos: John Bardeen (1908-1991), Leon Cooper e Robert Schrieffer. Essa teoria é conhecida pela sigla BCS (iniciais dos três sobrenomes) e deu a eles o prêmio Nobel de 1972.



A teoria BCS explicou que a supercondutividade deve-se ao fato de os elétrons formarem pares (chamados pares de Cooper). A teoria BCS também previu a existência de uma energia mínima necessária para quebrar cada um desses pares, o chamado hiato de energia (tradução para o termo em inglês *gap*).

A corrente elétrica flui sem perda de energia abaixo da temperatura crítica por causa da sincronização dos pares de elétrons, em uma espécie de dança coletiva, formando uma única entidade que trafega sem colisões pelo material. Nos materiais simplesmente condutores, como nos fios caseiros feitos de cobre, os elétrons movimentam-se ‘solitariamente’, sem se agruparem, chocando-se constantemente uns com os outros e com impurezas e imperfeições no interior do fio ao conduzir a corrente. Daí advém a perda de energia na forma de calor.

FOTO:PARICE LOUIZ/CERN

ALTAS TEMPERATURAS

Em 1986, o físico suíço Alexander Müller e o alemão Georg Bednorz descobriram materiais que apresentavam supercondutividade a ‘altas’ temperaturas, o que lhes valeu o prêmio Nobel em 1987. A denominação alta temperatura vem do fato de que a temperatura crítica – embora ainda muito baixa – está acima da temperatura de liquefação do nitrogênio (198,79 graus celsius negativos), um gás comumente usado na refrigeração.

Novas possibilidades de aplicações práticas surgiram com os supercondutores de alta temperatura crítica ou apenas ATCs (tradução da expressão inglesa *High-Tc*). Esse é o caso do $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, formado por cinco diferentes elementos químicos (bismuto, estrôncio, cálcio, cobre e oxigênio) e cuja temperatura crítica é de 183,15 graus celsius negativos.

No estado supercondutor, o $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ transforma-se em um detector e emissor natural de radiação eletromagnética na faixa de frequências de THz (terahertz, que significa um trilhão de oscilações por segundo). A fabricação de fontes emissoras nessas frequências tem sido um problema até o momento. Esse tipo de radiação tem a habilidade de penetrar papel, roupas, cartolina, plástico e outros materiais, o que torna esse composto importante, por exemplo, para a segurança de aeroportos ou para investigar cargas transportadas.

Figura 2. Os planos formados de átomos de cobre e oxigênio são elementos básicos dos compostos de alta temperatura crítica. Os átomos de cobre (em vermelho) ocupam os vértices, e os de oxigênio (em azul), os segmentos de uma rede quadrada

CEDIDO PELOS AUTORES

Figura 3. Diagrama de temperatura *versus* dopagem. À esquerda, está o ‘continente’ de Néel ou antiferromagnético (AF), situação na qual o material não conduz eletricidade e apresenta propriedades magnéticas. A ‘abóbada’ sobre o eixo x é o ‘continente’ da supercondutividade (SC), no qual o material conduz eletricidade com resistência elétrica nula. Fora dessas duas regiões, está a ‘terra incógnita’

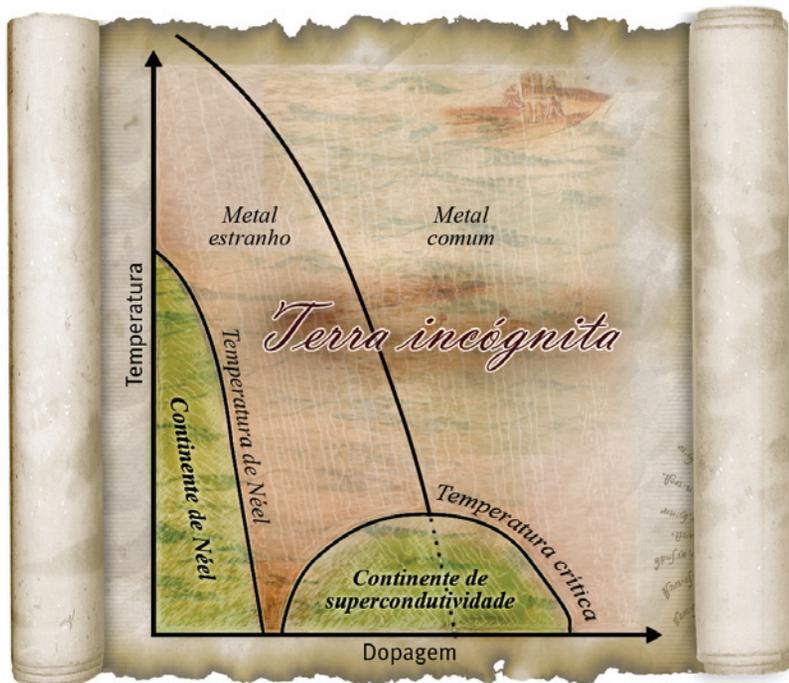
BURACOS POSITIVOS

Nos últimos anos, a visão tradicional da formação dos pares de Cooper e do hiato de energia está sendo questionada nos ATCs graças a avanços na nanociência. Técnicas como o STM (sigla, em inglês, para microscópio de varredura por tunelamento) e a Arpes (espectroscopia de emissão de fótons com resolução angular) foram desenvolvidas para medir propriedades físicas que variam dentro de um material na escala nanoscópica (1 nanômetro é igual a um bilionésimo de metro).

Os supercondutores de alta temperatura crítica são formados por várias camadas sobrepostas de diferentes átomos, sendo as compostas puramente de cobre e oxigênio aquelas onde se origina o fenômeno da supercondutividade (figura 2). As interessantes e úteis radiações THz nada mais são do que oscilações naturais entre essas camadas de cobre e oxigênio, que existem quando o composto se encontra no estado supercondutor.

Os átomos de cobre e oxigênio disputam elétrons entre si. O oxigênio necessita de dois elétrons, e o cobre tem um para doar. Assim, para cada par cobre-oxigênio, fica faltando um elétron. Essa ‘ausência’ – que os físicos denominam ‘buraco’ – comporta-se como um elétron, porém de carga positiva, que fica localizada no cobre, em vista da avidez do oxigênio em segurar dois elétrons extras. O notável é que esses buracos mantêm uma das propriedades fundamentais do elétron: o *spin*. Para nossos propósitos aqui, podemos entender o *spin* como a rotação de uma partícula ao redor de seu próprio eixo. Para simplificar, pensemos no *spin* como tendo apenas duas orientações, para cima ou para baixo.

Na camada de cobre-oxigênio, define-se uma grandeza fundamental para o entendimento dos compostos ATCs: a dopagem. Ela corresponde aos buracos acrescentados à camada, além de seu valor natural, ou seja, de apenas um buraco por átomo de cobre. São os átomos nas demais camadas do composto que, ao subtraírem elétrons da camada de cobre-oxigênio, regulam a dopagem, deixando ali buracos. A dopagem corresponde ao ‘x’ na fórmula $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$.



Quanto mais buracos existirem no plano formado pelos átomos de cobre e oxigênio, maior será a chamada dopagem do material. Compostos com dopagem muito baixa e muito alta não apresentam supercondutividade.

MAPA-MÚNDI

No período das grandes navegações, cartógrafos e navegadores buscavam entender o mundo por meio de mapas. Hoje, os físicos fazem algo semelhante, ao tentar desvendar os mistérios dos ATCs em um novo mapa-múndi: o chamado diagrama temperatura *versus* dopagem (figura 3). Ali, esses pesquisadores tentam investigar as regiões de ‘terra incógnita’, similarmente ao que se fazia nas grandes navegações.

Se os descobrimentos foram impulsionados pelo uso de novos instrumentos na navegação, como o astrolábio, a atual saga dos ATCs também ganhou bastante com o surgimento de novas técnicas nanoscópicas, como o STM e a Arpes.

Um composto ATC adquire propriedades específicas em cada uma das regiões desse diagrama. Fazendo uma analogia com a latitude e com a longitude, no mapa-múndi dos ATCs navega-se: i) por temperatura, aquecendo-se ou resfriando-se uma amostra; ii) por dopagem, que pode ser alterada quimicamente – o que, muitas vezes, implica a confecção de novas amostras.

Iniciaremos agora nossa viagem, em busca de conhecer melhor as várias regiões contidas em nosso mapa-múndi. Seguindo em nosso paralelo com a cartografia, vamos delimitar dois ‘continentes’ importantes.

CONTINENTE DE NÉEL

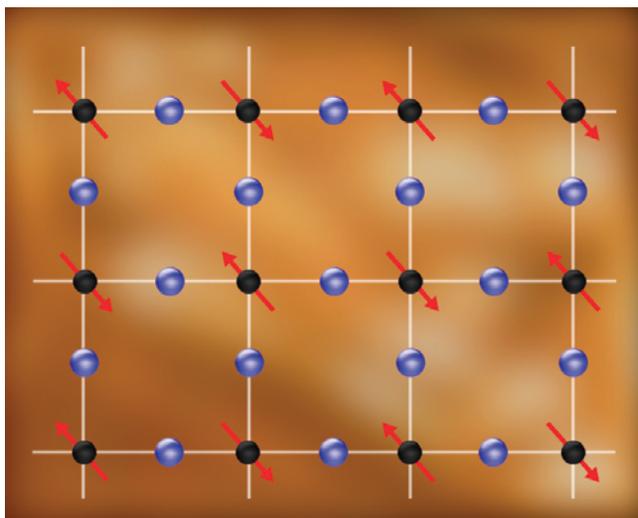
No ‘continente’ antiferromagnético – ou de Néel, homenagem ao físico francês Louis Eugene Néel (1904-2000), Nobel de Física de 1970 –, a dopagem é nula ou muito baixa. Nesse regime, o material não conduz corrente, comportando-se como um composto magnético. O *spin* é a fonte desse magnetismo. A figura 4 mostra a disposição dos *spins* no continente antiferromagnético.

No continente de Néel, os buracos formam uma rede de *spins*, de modo que cada *spin* sempre aponta em direção oposta à de seus quatro primeiros vizinhos. Esse estado ordenado de *spins* pode ser destruído de duas maneiras: i) por aumento da temperatura da amostra, ao ultrapassar a temperatura de Néel (cerca de 30°C); ii) por aumento da dopagem, porque um pequeno acréscimo desta última apenas reduz a temperatura de Néel, mas um acréscimo maior dela destrói totalmente o estado magnético. Neste último caso, os buracos – agora, em grande quantidade – começam a se mover para conduzir corrente elétrica.

Nos dois casos, saímos do continente de Néel e adentramos a terra incógnita.

CONTINENTE SUPERCONDUTOR

No mapa-múndi, o continente supercondutor tem o formato de uma abóbada, delimitada por linha fronteira que é a própria temperatura crítica para cada dopagem do composto ATC. Dentro da abóbada, os buracos formam os pares de Cooper. Fora dela, o composto apresenta resistência elétrica, como nos



fios elétricos comuns e, portanto, não deve ser mais considerado como um supercondutor. Porém, veremos desdobramentos dessa definição mais adiante.

A dopagem que produz a máxima temperatura crítica – posicionada no ponto mais alto da abóbada – é chamada ótima. Abaixo dela, o composto é denominado subdopado; acima dela, superdopado. A temperatura crítica está muito abaixo da temperatura de Néel.

ILHAS NANOSCÓPICAS

Na época dos descobrimentos, os navegadores traziam relatos conflitantes de suas viagens. O mesmo se passa agora com os físicos ao tentarem descrever suas experiências conduzidas nas diversas regiões do mapa-múndi, em especial na ‘terra incógnita’.

Graças à técnica STM, os físicos concluíram que o próprio continente supercondutor ainda precisa ser mais bem explorado e definido. Descobriram que, mesmo dentro da abóbada, o estado supercondutor é altamente heterogêneo – assim como a foz de um rio em forma de delta –, alternando regiões nanoscópicas supercondutoras com outras não supercondutoras. A mudança de dopagem ou de temperatura apenas muda o tamanho e a forma dessas regiões, porém sem afetar sua existência.

Mas foi no estudo das regiões da ‘terra incógnita’, aquela área fora dos dois continentes descritos acima, que o STM (ver ‘O STM e os ATC: binômio proveitoso’) trouxe grandes novidades. Nos últimos anos, descobriu-se algo inusitado: fora da abóbada supercondutora, ainda permanecem ilhas supercondutoras. Portanto, mesmo um pouco acima da temperatura crítica, existem pares de Cooper em um estado especial (resistivo), ocupando ilhas nanoscópicas.

Em resumo: a supercondutividade sobrevive de maneira localizada fora da abóbada!

Muito além dos dois continentes, surge uma linha misteriosa que atravessa, de cima para baixo, nosso mapa-múndi e, como defendem alguns pesquisadores, penetra a abóbada supercondutora – note a linha pontilhada na figura 3 –, em um ponto que é ainda motivo de debate entre os físicos. À esquerda dessa linha, nos domínios da terra incógnita, o composto seria um metal ‘estranho’ – nome indicativo das dúvidas sobre essa região que atribulam os físicos –;

Figura 4. Representação gráfica de um buraco em cada átomo de cobre (pontos pretos) com seu respectivo *spin* (setas vermelhas), em formação antiferromagnética, ou seja, alterando sentidos ‘norte’ e ‘sul’, ‘para cima’ e ‘para baixo’. Os pontos azuis são os átomos de oxigênio

à direita, o composto é tratado como um metal comum. Atualmente, essa linha é denominada de pseudo-hiato (ou, em inglês, *pseudo-gap*).

NO ALTO DA GARAGEM

A física dos materiais condutores de eletricidade, sejam eles supercondutores ou não, baseia-se no chamado princípio de exclusão, descoberto pelo físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958), em 1924.

Para nossos propósitos aqui, podemos imaginar esse princípio como o que dá aos elétrons um comportamento similar ao de carros estacionados em um edifício-garagem, onde cada vaga representa, no caso, uma 'propriedade' física dessas partículas (os físicos a denominam estado quântico) e não uma posição espacial delas. A analogia é útil apenas para entender o princípio de Pauli, que diz que dois elétrons (ou buracos) não podem estar no mesmo estado quântico, assim como dois carros não podem estar na mesma vaga do edifício-garagem.

Nesse edifício, obrigatoriamente, preenchem-se as vagas do andar mais baixo para o mais alto, ou seja, da menor para a maior energia.

Como na vida real, é no alto dessa garagem que há maior probabilidade de acharmos vagas livres. Nos materiais condutores de eletricidade, essa região, no topo, é chamada superfície de Fermi, homenagem ao físico italiano Enrico Fermi (1901-1954), Nobel de Física de 1938.

Os elétrons muito abaixo da superfície de Fermi são inertes, isto é, não conduzem corrente elétrica, pois estão impossibilitados de se mover, visto que as vagas (estados quânticos) em sua vizinhança estão todas ocupadas. São apenas os elétrons do alto, na superfície de Fermi, que podem formar os pares de Cooper.

Os ATCs são edifícios-garagem com cerca de 10^{21} buracos por cm^3 !

PEÇA DO QUEBRA-CABEÇA

No ano passado, o grupo de Ali Yazdani, da Universidade Princeton (Estados Unidos), fez descobertas que prometem revolucionar nosso entendimento dos supercondutores de alta temperatura crítica. O alvo da equipe foi o composto já apresentado aqui: o $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, que tem sido o favorito para estudos com o STM, por apresentar superfície extremamente uniforme. No caso desse composto, o hiato de energia não apresenta um valor fixo, homogêneo, como nos supercondutores convencionais.

O STM E OS ATCS: BINÔMIO PROVEITOSO

O microscópio de varredura por tunelamento – mais conhecido pela sigla inglesa STM – está revolucionando nosso entendimento sobre os supercondutores de alta temperatura crítica, chamados ATCs, ao fazer medidas locais, na escala nanoscópica, da energia necessária para quebrar um par de Cooper.

Com esse equipamento, aplica-se uma voltagem entre a ponta de uma agulha externa e a superfície do supercondutor, medindo-se a corrente elétrica que flui entre elas (figura 5). Sabendo-se os valores da voltagem e da corrente, obtemos a resistência elétrica naquele ponto onde 'repousa' a agulha. Tudo isso na escala nanoscópica.

Em princípio, o alto vácuo que separa a agulha da superfície não permitiria a passagem de corrente entre elas. Mas aqui reside a riqueza (e a estranheza!) do mundo quântico: os elétrons (e buracos) passam ('tunelam', dizem os físicos) de um lado para o outro. Macroscopicamente, seria o equivalente a atravessarmos uma parede e sairmos ilesos do outro lado!

No caso dos supercondutores, a fonte desse elétron (ou buraco) é um dos componentes de um par de Cooper. Assim, com um STM, conseguimos medir a energia necessária para quebrar um desses pares. E isso é justamente o hiato de energia, que, com esse equipamento, pode ser determinado ponto a ponto sobre a superfície do material supercondutor.

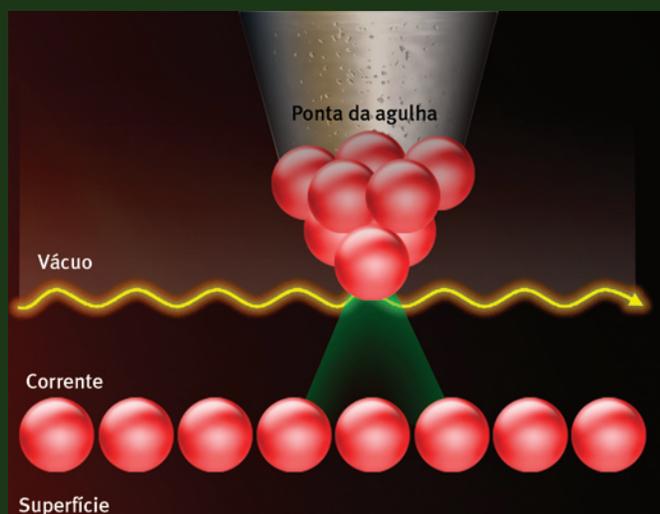


Figura 5. Visão pictórica de um STM (microscópio de varredura por tunelamento). A agulha nanométrica é uma ponta formada por um aglomerado de átomos, como um cacho de uvas. Ela é cuidadosamente posicionada a uma distância equivalente a frações de nanômetros da superfície do supercondutor. Na varredura, a agulha se desloca no plano horizontal, com precisão nanométrica

IMPUREZAS E CAMPO MAGNÉTICO

Na região entre o continente de Néel e o do supercondutor, surge um estado intermediário que alterna faixas magnéticas e supercondutoras e cujas propriedades podem ser desvendadas ao se introduzir impurezas no composto. Esse foi um dos problemas estudados por um dos autores deste artigo (CMS). A existência de dois patamares de temperatura associados ao desaparecimento da supercondutividade no material $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ pode ser inferida também pela presença de um campo magnético aplicado sobre a amostra, como mostraram dois outros autores (MMD e ARCR).

Exemplos da pesquisa dos autores deste artigo estão em *Physical Review Letters* (v. 87, p. 177.010, 2001) e *Physical Review B* (v. 76, p. 052.504, 2007).

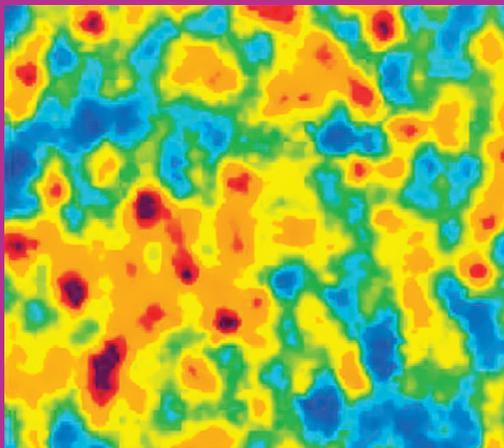


Figura 6. Domínios nanoscópicos em que a energia para a quebra de um par de Cooper é heterogênea, ou seja, varia de um local a outro. Na figura, relativa ao composto $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, a energia de quebra é mais baixa nas áreas em azul escuro e mais alta nas áreas em vermelho escuro

BASEADA EM ILUSTRAÇÃO DE ALI YAZDANI APRESENTADA NA CONFERÊNCIA LT-25, AMSTERDAM (HOLANDA), JUNHO DE 2008

Sugestões para leitura

- DORIA, M. M. e ROMAGUERA, A. R. C. 'Supercondutividade: que vibrações são essas?' *Ciência Hoje* 249, junho 2008.
- CALDAS, H. 'Um novo estado da matéria – a fluidez com pares separados'. *Ciência Hoje* 246, março 2008.
- A. YAZDANI et al. 'Visualizing pair formation on the atomic scale in the high-TC superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ '. *Nature* v. 447, pp. 569-572, 2007.

Na internet

- O misterioso mundo da supercondutividade <http://cienciahoje.uol.com.br/91450>
- Decifreadores de mistérios do mundo quântico <http://cienciahoje.uol.com.br/825>
- Negócios quentes para materiais frios <http://cienciahoje.uol.com.br/94742>
- Supercondutores com aplicações promissoras <http://cienciahoje.uol.com.br/2551>

nais. Essa grandeza só é constante no interior de domínios, definidos por figuras de tamanhos e contornos ainda misteriosos (figura 6).

Yazdani verificou que esses domínios supercondutores desaparecem em temperaturas distintas, alguns em temperaturas mais baixas e outros em temperaturas mais altas que a própria temperatura crítica. Assim, surpreendentemente, algumas regiões perduram para além do 'continente' da supercondutividade, ou seja, além da abóbada, já em terras incógnitas.

Para entendermos essa promessa de revolução, vamos rever o passado. Em 1957, os físicos norte-americanos Michael Tinkham e Rolf Eldridge Glover III (1924-2004) fizeram medidas fundamentais para comprovar a teoria BCS. Verificaram que a razão entre o hiato de energia e a temperatura crítica é uma constante, cujo valor não varia de supercondutor para supercondutor, sendo, portanto, independente de propriedades do material, como previsto pela própria teoria BCS.

Agora, Yazdani mostrou que existe algo similar para os ATCs, embora a teoria para esses compostos ainda não tenha sido feita. Usando STM, ele comprovou que, para cada ilha nanoscópica, a razão entre o hiato de energia em seu interior e a temperatura de desaparecimento da supercondutividade local é uma constante 2,3

vezes maior do que aquela prevista pela teoria BCS. Essas duas grandezas variam de ilha para ilha, mas a razão entre elas não, segundo Yazdani, permanecendo sempre igual a esse misterioso valor.

Esse resultado sugere haver para os ATCs dois patamares de temperatura: i) um associado à formação dos pares dentro de cada um desses diminutos domínios; ii) outro ligado à sincronização dos pares de Cooper de diversos domínios, para fazê-los se comportar como uma entidade única condutora de corrente.

Sem dúvida, Yazdani aportou em uma 'terra incógnita' que, vale lembrar, já havia sido relatada por outros físicos. Com isso, uma peça muito importante acaba de se encaixar no quebra-cabeça dos ATCs. Mas muitas outras precisam encontrar seu lugar antes de entendermos o mecanismo da supercondutividade nesses materiais – e, para isso, vêm colaborando os autores deste artigo (ver 'Impurezas e campo magnético').

As novas técnicas experimentais capazes de operar na escala nanoscópica irão certamente representar um papel importantíssimo para desbravar a terra incógnita. E, quem sabe, em um futuro não distante, os supercondutores a altas temperaturas críticas concretizem todas as tarefas que os físicos vislumbram hoje para esses fantásticos – e ainda misteriosos – materiais. ■