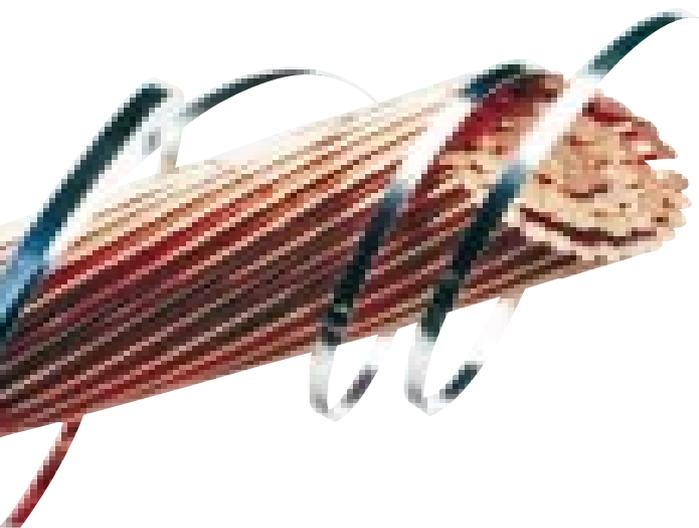


## COLABORADORES

Alexandre Lopes de Oliveira (doutorando)  
e Viviana P. Rammuni (doutoranda)

# A supercondutividade

Descoberta há exatos 90 anos, a supercondutividade é hoje um dos campos mais intensos de pesquisa em física. O entendimento mais recente do fenômeno já levou a desdobramentos práticos, como ímãs especiais, fios supercondutores e protótipos de trens que flutuam sem atrito sobre trilhos magnéticos. Porém, muitas questões permanecem sem resposta.



Mesmo com espessura final cerca de 100 vezes inferior, três fitas supercondutoras como a mostrada acima (prateada) têm praticamente a mesma capacidade de condução que o cabo formado por dezenas de fios de cobre.

**No início do século 20**, nomes como Hendrik Lorentz (1853-1928) e Paul Ehrenfest (1880-1933) – para citar apenas dois deles – ajudaram a transformar a Holanda em um dos principais centros de pesquisa em física do mundo. Foi também nesse país que, há exatos 90 anos, foi descoberto um dos fenômenos mais notáveis da natureza, a supercondutividade, que hoje é um dos campos mais ativos e profícuos da física teórica e experimental, principalmente pela vasta gama de aplicações que se vislumbra para os chamados materiais supercondutores.

A supercondutividade foi observada pela primeira vez em 1911 na Holanda pelo físico Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926). Ao resfriar mercúrio, estanho e chumbo a baixíssimas temperaturas, próximas ao zero absoluto (ou 273 graus celsius negativos), esse professor da Universidade de Leiden, importante centro de pesquisa daquele país, descobriu que esses elementos passavam a conduzir corrente elétrica sem dissipar calor, ou seja, a resistência elétrica torna-se praticamente nula, o que permite aos elétrons se movimentarem livremente através da estrutura cristalina desses materiais.

Além da descoberta do fenômeno da supercondutividade, Kamerlingh-Onnes foi o primeiro a obter hélio na forma líquida. Por essas e outras contribuições à física de baixas temperaturas, denominada criogenia, ele ganhou o Nobel de física de 1913.

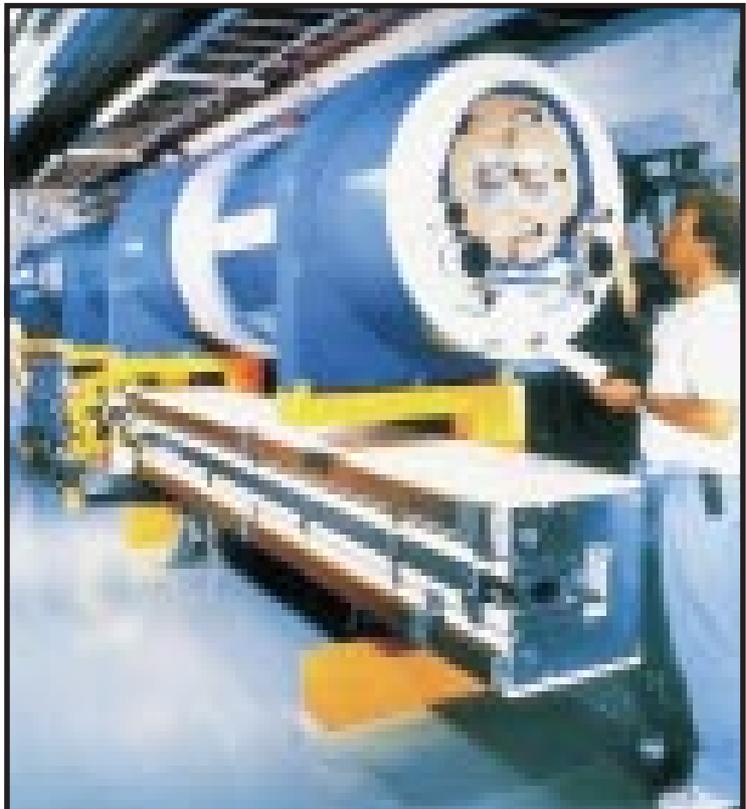
**O ZERO INATINGÍVEL.** Em um condutor convencional – um fio de cobre, por exemplo –, o percurso dos elétrons é dificultado pelos choques contra a estrutura cristalina do material e as impurezas presentes nela. Essa estrutura sofre vibrações principalmente devido ao calor a que o material está submetido. Essas vibrações elásticas devidas ao calor são denominadas fônons.

Os fônons impedem então que os elétrons, que são os portadores convencionais de carga em uma corrente elétrica, percorram essa grade cristalina sem choques. Dessas colisões é que surge a dissipação de calor que se observa em qualquer material que conduz eletricidade – essa perda de calor é denominada efeito Joule, em homenagem ao físico inglês James Joule (1818-1889), que deduziu a lei que rege esse fenômeno.

Diminuir a temperatura de um condutor elétrico faz com que essas vibrações diminuam e, teoricamente, quando o condutor atinge a temperatura de zero absoluto (ou zero kelvin), os fônons desaparecem por completo. Nesse cenário de extrema refrigeração, cessariam os choques dos elétrons contra a estrutura cristalina, e a dissipação de calor também acabaria. Dependendo da pureza do condutor, permanecem só as colisões contra possíveis impurezas, como átomos ou moléculas de outro material que estariam contaminando o condutor, bem como contra as chamadas vacâncias ('vazios' da estrutura cristalina).

No entanto, é preciso ressaltar que o zero absoluto (ou zero kelvin) é inatingível para qualquer material da natureza. Sem entrar em detalhes, apenas adiantamos ao leitor que essa inviabilidade é explicada pelo princípio de incerteza, proposto em 1927 pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976). Porém, hoje, os experimentos já chegam a temperaturas muito próximas ao zero absoluto, da ordem de centésimos de kelvin.

**EXPULSÃO DO CAMPO.** Cerca de duas décadas depois de descoberta a supercondutividade, já havia uma teoria para explicar detalhes do fenômeno, desenvolvida pelo físico teuto-americano Fritz London (1900-1954), que se baseou na teoria do eletromagnetismo, criada pelo físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) ainda no século 19.



Ímã supercondutor empregado no LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons), acelerador que está sendo construído pelo Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern), em Genebra (Suíça).

Com as chamadas equações de London, foi possível entender um efeito tão surpreendente quanto a própria supercondutividade: o efeito Meissner, assim batizado em homenagem ao físico Walther Meissner em 1933. Nesse fenômeno, observa-se que materiais, ao atingirem a fase de supercondução, têm a capacidade de expulsar campos magnéticos. Foi com esse ferramental teórico, publicado em 1935 com a ajuda do irmão, Heinz London, que se explicou por que um campo magnético intenso, a partir de um certo valor, tem a capacidade de destruir a supercondutividade.

**TEORIA BCS.** Porém, à medida que novos fenômenos surgiam, os pesquisadores percebiam que o modelo fenomenológico não era satisfatório para responder a várias questões sobre a supercondutividade. Ainda em 1906, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955) já havia inaugurado a aplicação de uma então recente teoria, a teoria quântica, para entender fenômenos relacionados ao calor nos sólidos – mais especificamente, Einstein aplicou o conceito de quantum (pacote de energia) para explicar certas propriedades térmicas dos sólidos (o chamado calor específico). Com esse trabalho, inaugurou a área hoje denominada teoria quântica da matéria condensada.

&gt;&gt;&gt;

Foi, no entanto, na década de 1920 que surgiu um desdobramento mais consistente dessa teoria: a mecânica quântica, com a qual os físicos hoje tratam os fenômenos na escala dos átomos e das moléculas. Porém, só em 1957 surgiria uma teoria microscópica (ou quântica) para a supercondutividade, através dos trabalhos dos físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991), Leon Cooper e John Schrieffer. E ainda hoje a teoria BCS, batizada com as iniciais dos autores, é a referência para os estudos da área. O trabalho rendeu aos três o Nobel de física de 1972.

Ainda em 1956, Cooper publicou um artigo no qual fazia uma previsão teórica importante: os elétrons durante a fase supercondutora, isto é, quando as vibrações da rede cristalina não interferem nas trajetórias dessas partículas, formam pares e passam a se comportar como se fossem uma entidade única. Esse acoplamento ganhou o nome de pares de Cooper, e sabe-se, com base em experimentos, que, quanto menor a temperatura do material, mais pares desse tipo são formados.

**POR QUE NEM TODOS SÃO?** Apesar da abrangência teórica, a teoria BCS se deparou com dificuldades frente a alguns fatos teóricos e fenômenos experimentais. A primeira limitação da teoria é que ela não pode apontar de antemão que material será um supercondutor. Ela também não responde, por exemplo, a uma pergunta simples: por que todos os sólidos não são supercondutores? E a resposta para esta última questão ainda permanece um mistério – sabe-se, no entanto, que bons condutores de eletricidade (cobre, alumínio entre outros metais) não são bons supercondutores (ver ‘O que é um bom supercondutor?’).

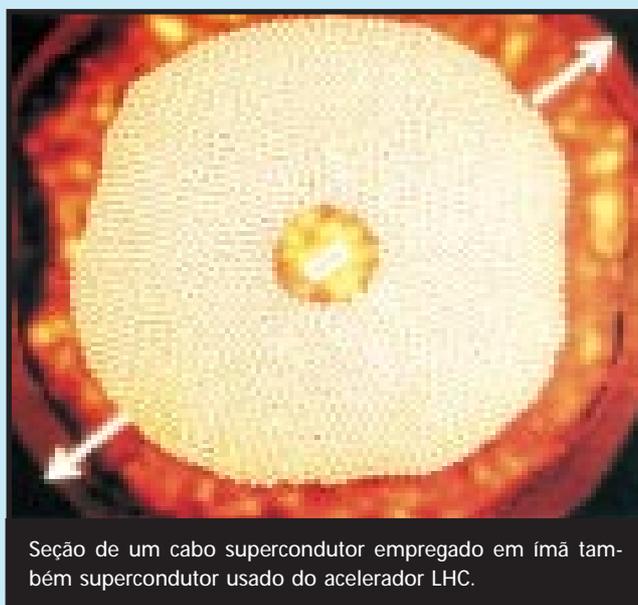
A teoria BCS também sugere que não poderia haver supercondutividade a temperaturas acima de 25 kelvins aproximadamente (ou 248 graus celsius negativos), pois o acoplamento que mantém os elétrons formando pares de Cooper seria desfeito por vibrações da rede, por exemplo.

**ARRANHÃO NO STATUS.** Porém, no início de 1980, verificou-se que tipos especiais de cerâmicas eram supercondutoras a tem-

## O QUE É UM BOM SUPERCONDUTOR?

A classe dos materiais supercondutores não é homogênea. Há aqueles que se mostram mais eficientes na condução de eletricidade, porém neles o fenômeno só surge a temperaturas muito baixas, o que inviabiliza certas aplicações do material. Outros se tornam supercondutores a altas temperaturas (cerca de 200 graus celsius negativos), mas nem sempre conduzem uma quantidade de corrente elétrica (ou densidade de corrente) suficiente.

Um bom supercondutor deve ter três características básicas. Sua temperatura crítica, a partir da qual surge a supercondutividade, deve ser alta. O ideal é que seja acima de 80 kelvins (193 graus celsius negativos), pois, nesse faixa, é possível refrigerá-lo com nitrogênio líquido, que é abundante e



Seção de um cabo supercondutor empregado em ímã também supercondutor usado do acelerador LHC.

relativamente barato – para temperaturas mais baixas, é preciso usar hélio líquido, matéria-prima cara e escassa. Essa passagem da condutividade para a supercondutividade deve acontecer de maneira ‘brusca’ – os físicos preferem o termo ‘sharp’ (em inglês, pontiagudo).

Um bom supercondutor deve ainda

ter a capacidade de expulsar um campo magnético que age sobre ele, para que a supercondutividade não seja destruída, por exemplo, pela ação de um relâmpago ou de outra fonte magnética exterior, o que seria outro fato a inviabilizar sua aplicação.

Por fim, é preciso que ele conduza uma alta densidade de corrente elétrica, sendo esta talvez sua característica mais importante do ponto de vista prático. Hoje, em situações especiais, cabos supercondutores já substituem os

centenários fios de cobre (ver figura).

Nosso trabalho de pesquisa envolve colaborações com doutorandos do próprio CBPF, bem como com pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro, da Universidade Federal Fluminense e da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

## TEORIA APRIMORADA AINDA É CONSISTENTE

Uma das principais linhas de pesquisa do Grupo de Estrutura Eletrônica e Fenômenos Coletivos da Matéria Condensada do CBPF tem sido mostrar que a teoria BCS, em sua forma aprimorada, é ainda compatível com os dados experimentais.

A partir de 1992, o grupo passou a publicar em revistas internacionais de prestígio uma série de trabalhos que mostram que, submetida a um refinamento teórico, a teoria BCS não precisa ser a priori descartada quando se trata de explicar e entender discrepâncias experimentais relacionadas ao chamado efeito isotópico. Grosso modo, esse efeito pode ser descrito da seguinte forma: a teoria BCS prevê que a temperatura crítica

– aquela a partir da qual a supercondutividade se manifesta – é fortemente dependente da massa dos átomos que formam o supercondutor. Porém, experimentalmente, verifica-se que essa relação temperatura crítica-massa não é tão intensa assim.

Os trabalhos de nosso grupo têm mostrado que o aprimoramento da teoria leva a desvios significativos em relação à teoria BCS convencional, porém não a descarta como referência para explicar a supercondutividade em materiais como o nióbio – do qual o Brasil tem grandes reservas – e as cerâmicas supercondutoras, cujos dados experimentais fogem às previsões da teoria convencional.

Mais recentemente, nosso grupo tem ampliado suas linhas de pesquisa

e trabalhado em duas frentes extras: na intrigante relação entre ferromagnetismo e supercondutividade – há indícios experimentais de que esses dois fenômenos podem coexistir em certos materiais sem que os pares de Cooper sejam ‘destruídos’. Outro tema são os chamados ‘*stripes*’. Experimentos muito recentes mostraram que nos supercondutores a altas temperaturas há uma temperatura, designada por  $T^*$ , que serve como um ‘prenúncio’ de que o material, em breve, irá apresentar a supercondutividade. Acredita-se que através do entendimento da  $T^*$  será possível responder a uma série de questões que ainda permanecem em aberto nessa área.

peraturas por volta de 70 kelvins (ou cerca de 200 graus celsius negativos). Desde então, vários outros materiais têm demonstrado o fenômeno da supercondutividade a altas temperaturas, acima de 100 kelvins – vale ressaltar a descoberta recente de um composto promissor, à base de boro e magnésio ( $MgB_2$ ), que vem sendo objeto de intensos estudos teóricos e experimentais.

Mesmo antes de enfrentar as dificuldades com a supercondutividade a altas temperaturas, a teoria BCS já havia sofrido outros arranhões em seu status de teoria de referência: discrepâncias experimentais em relação ao chamado efeito isotópico, que está relacionado com a massa do átomos que formam um supercondutor – contrariando a teoria BCS, experimentos mostram que a variação no fenômeno da supercondutividade não é tão intenso. No entanto, pesquisadores brasileiros vêm mostrando, desde o início da década de 1990, que é possível explicar esses desvios experimentais dentro do âmbito da teoria BCS. (ver ‘Teoria aprimorada ainda é consistente’).

**PROBLEMAS EM ABERTO.** Passado quase um século do descobrimento da supercondutividade, o fenômeno continua sendo um intenso campo de pesquisa. Apesar dos tremendos avanços do conhecimento e das aplicações que empregam supercondutores – por exemplo, os ímãs e fios supercondutores já são usados em aceleradores de partículas, bem como protótipos de trens, ainda em fase experimental, flutuam sobre trilhos

magnéticos –, há ainda uma extensa gama de perguntas a serem respondidas. Talvez, a principal delas seja quais mecanismos microscópicos possibilitariam a supercondutividade a altas temperaturas?

Esta e outras questões permanecem em aberto. No entanto, elas conferem um fascínio extra ao fenômeno da supercondutividade e, com certeza, servem como uma motivação a mais para os cientistas dessa área. ■



Sentados (esq. para dir.): Viviana P. Rammuni e Amós Troper; em pé (esq. para dir.): Alexandre Lopes de Oliveira, Marcus V. Tovar Costa e Nilson Antunes de Oliveira.