

# O Fenômeno da Supercondutividade

Edson Sardella\*

- **Resumo:** Analisamos diversos aspectos do fenômeno da supercondutividade: históricos, as motivações que levaram à descoberta do inesperado fenômeno físico, a explicação deste, entre outros.

Unitermos: Supercondutividade, Condutividade, Pares de Cooper, Vórtice

---

**Abstract:** We analysed several aspects of the superconducting phenomenon: the historical ones, the motivation which lead to the discovery of the unexpected physical phenomenon, the explanation of how this occurs, among others.

**Keywords:** Superconductivity, Conductivity, Cooper Pairs, Vortex.

---

## Introdução

Dentre as várias sub-áreas da Física da Matéria Condensada, a supercondutividade certamente é a que mais tem atraído o interesse dos pesquisadores em Física nos últimos dez anos, depois da fantástica descoberta de Alex Müller e Georg Bednorz, da IBM de Zurich em 1986. Mais tarde voltaremos a falar sobre esta notável descoberta. Primeiro abordaremos o fenômeno da supercondutividade: como foi descoberto, em que época e em qual contexto, as duas principais propriedades dos materiais supercondutores, como este fenômeno foi explicado, entre outros assuntos.

## Condutividade em metais

Antes de mais nada, vamos primeiro entender o que venha a ser *condutividade*. A matéria é composta de *átomos*. Os átomos por sua vez são compostos de três tipos de partículas: no seu núcleo reside os *protons* (carga positiva) e os *neutrons* (sem carga), e girando ao redor do núcleo os elétrons (carga negativa). Nas devidas proporções, podemos pensar no átomo como um sistema solar. A carga líquida de um átomo é zero, isto é, contém o mesmo número de cargas positivas e negativas. Alguns materiais, como um fio de cobre por exemplo, o elétron mais afastado do núcleo pode facilmente se desligar do átomo quando submetido a uma

---

\* Professor Assistente Doutor do Departamento de Física da Faculdade de Ciências/UNESP - Câmpus de Bauru.

*diferença de potencial*. Podemos conseguir isto ligando os extremos do fio a uma bateria. Ao desligar-se do átomo, o elétron fica *livre* para movimentar-se ao longo do material. É neste momento que inicia-se a *condução* de elétrons diretamente do polo negativo para o polo positivo da bateria. Esta é uma simplificada versão do modelo clássico de Lorentz, outro grande físico teórico deste século.

A condutividade é uma propriedade intrínseca de cada material. Entre os metais, a prata é a que exhibe melhor condutividade, embora o cobre e o alumínio são os metais mais utilizados para condução de eletricidade, uma vez que estes materiais são mais abundantes na natureza e suas condutividades são ligeiramente inferiores ao da prata. Todavia, mesmo no melhor dos condutores, sempre haverá perda de energia no processo de condução elétrica. Isto deve-se ao fato dos elétrons livres sofrerem constantes colisões com os *íons* do metal<sup>1</sup> (ver Figura 1). Os íons por sua vez formam um arranjo periódico mais comumente chamado de *rede cristalina*. Ao colidir-se com os íons da rede, o elétron perde parte de sua energia cinética (ou energia de movimento), em forma de energia térmica. Esta é a principal, senão única, causa da perda de energia elétrica na transmissão das usinas hidrelétricas para as fábricas, residências, etc. Esta perda é bastante significativa.

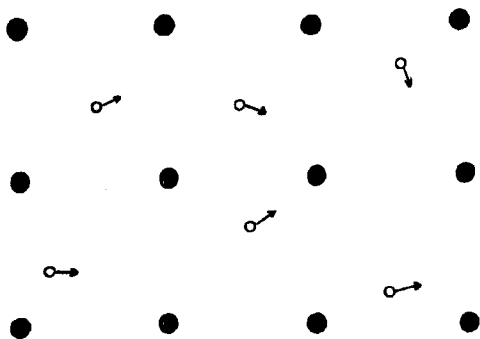


Figura 1. Os círculos sombreados simbolizam os íons da rede cristalina e os círculos com flexas os elétrons de condução.

### Super Condutividade

Agora que possuímos um modesto entendimento de como ocorre a condutividade elétrica em metais, tentaremos entender o fenômeno da supercondutividade. A supercondutividade foi descoberta primeiramente por Kamerlingh Onnes na Universidade de Leiden, Holanda, em 1911. Na época havia uma frenética corrida em alguns países Europeus pelo domínio da tecnologia de baixas temperaturas. A técnica utilizada era a de liquefação de certos tipos de gases

<sup>1</sup> Os íons são criados quando os elétrons mais fracamente ligados ao núcleo tornam-se livres deixando assim um excesso de carga positiva para trás.

tais como nitrogênio, hélio, entre outros. O primeiro laboratório a atingir temperaturas próximas do zero absoluto (zero Kelvins =  $-273^{\circ}\text{C}$ ) foi justamente o de Kamerlingh Onnes liquefazendo o gás nobre de hélio. No entanto, seu objetivo maior era de fato estudar o comportamento das propriedades eletromagnéticas dos sólidos a baixas temperaturas. De acordo com uma história apócrifa, Onnes solicitou a um de seus estudantes que medisse a resistividade<sup>2</sup> do mercúrio sólido. Na época já era conhecido que a resistividade dos metais diminuía com a redução da temperatura, porém o resultado da experiência era simplesmente surpreendente (ver Figura 2). O estudante observava que abaixo de uma determinada temperatura (conhecida como temperatura crítica ou simplesmente  $T_c$ ) de aproximadamente 4.2K, a resistividade, abruptamente, cai para o valor zero, isto é, condutividade infinita<sup>3</sup>. Em outras palavras, uma vez resfriado abaixo de  $T_c$  o mercúrio poderia manter um corrente elétrica indefinidamente sem jamais se dissipar. Cético diante deste resultado, Kamerlingh Onnes pediu ao estudante que repetisse a experiência e o resultado se confirmava. Por estas e outras importantes descobertas, Kamerlingh Onnes foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física de 1913.

Alguns fatos frustrantes se sucederam após a descoberta da supercondutividade. Um deles é que materiais com  $T_c$  mais alta parecia inatingível. Isto tornava qualquer aplicação tecnológica inviável do ponto de vista econômico devido ao alto custo de fabricação do hélio líquido<sup>4</sup>. A segunda foi que correntes elétricas suficientemente altas destruíam a supercondutividade e o metal retornava ao estado normal.

---

<sup>2</sup>A resistividade é o recíproco de condutividade. Quanto menor a resistividade maior a condutividade e vice-versa.

<sup>3</sup>Daí o termo supercondutividade.

<sup>4</sup>A fabricação do hélio líquido custa aproximadamente dez reais por litro.

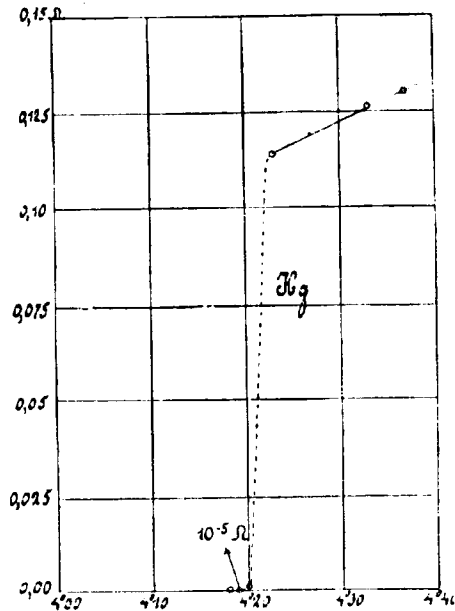


Figura 2. Resistividade (eixo vertical) versus temperatura.

### A teoria BCS

A supercondutividade permaneceu inexplicada por um longo período. A explicação deste fenômeno representou um grande desafio para os físicos. Até mesmo Einstein fez um tentativa (fracassada). A primeira explicação satisfatória da supercondutividade só veio acontecer quatro décadas e meia após a descoberta de Kamerlingh Onnes. Em 1957, três físicos americanos, John Bardeen, Leon N. Cooper, e John R. Scheriffer desenvolveram uma teoria<sup>5</sup> que, embora seja difícil de ser compreendida do ponto de vista matemático, a idéia na qual ela se fundamenta é consideravelmente simples. Eles assumiram que os elétrons de condução, aqueles que descrevemos no modelo de Lorentz, atuam em *pares* e o agente intermediador é o íon da rede. Estes pares de elétrons são acoplados pelos íons, os quais criam uma espécie de *pasta subatômica*. Quando um par flui através da rede, deixa para trás um *rasto*. Este rasto serve de passagem para outros pares de elétrons fluírem evitando assim colisões com a rede. Este modelo conseguia explicar, por exemplo, o decaimento abrupto da resistividade para valores nulos.

A teoria BCS reinou até 1986. A teoria previa que a temperatura crítica não devia ultrapassar o limite de aproximadamente 30K. Desde o supercondutor de kamerlingh Onnes, o máximo valor de temperatura crítica que se conseguiu alcançar foi de 23K para o nióbio-germânio. Esta previsão da teoria BCS para a temperatura crítica foi tomada como um dógma por muitos físicos experimentais. Entretanto em

<sup>5</sup>Esta teoria ficou conhecida como teoria BCS devido às iniciais dos sobrenomes de seus autores.

1986, dois experientes físicos especialistas em cristalografia da IBM de Zurich, Alex Müller e Georg Bednorz romperam a barreira dos 30K usando um material cerâmico feito de lantânio, bário, cobre e oxigênio. Apenas um ano após a descoberta de Müller e Bednorz, um físico chinês naturalizado americano, Paul Chu, descobriu um supercondutor feito de ítrio, bário, cobre e oxigênio com temperatura crítica de 90K. Assim rompeu-se a barreira do hélio, ou seja, para o líquido resfriador do supercondutor não mais era necessário o hélio líquido. O nitrogênio líquido pode atingir temperaturas de até 70K, bem abaixo do limite das temperaturas críticas dos supercondutores descobertos recentemente. Descobertas de supercondutores de *altas* temperaturas tem atingido valores de  $T_c$  de até 125K. Por esta importante contribuição, Müller e Bednorz conquistaram o Prêmio Nobel de Física de 1986.

Estas descobertas não invalidaram a teoria BCS. Acredita-se apenas que o mecanismo de formação dos pares seja diferente nos supercondutores a altas temperaturas, mas os elétrons ainda atuam em pares. Até o presente momento ainda não há um conceito sobre qual é o mecanismo responsável pela supercondutividade no supercondutores a altas temperaturas.

## O Efeito Meissner

Entre a descoberta da supercondutividade e a explicação do fenômeno, muitos progressos foram alcançados. Por volta de 1950, dois físicos russos, Vitaly C. Ginzburg e Lev D. Landau, desenvolveram uma teoria *fenomenológica* que era capaz de *descrever* a supercondutividade, mas não conseguia *explicar* porque a supercondutividade de fato ocorria. Em breve voltaremos a falar sobre esta teoria. Antes falaremos sobre uma importante descoberta feita por W. Meissner em 1933. Meissner observava que, se um supercondutor for congelado abaixo de sua temperatura crítica quando na presença de um campo magnético<sup>6</sup>, o campo magnético rodeia mas não penetra no supercondutor (ver Figura 3). Este efeito é conhecido como efeito de Meissner (ou de levitação). Assim, colocando-se um cubo de material magnético sobre um supercondutor, o cubo levitará. O material magnético induz supercorrentes dentro do supercondutor. Por sua vez, estas supercorrentes criam um campo magnético dentro do supercondutor que se contrapõem ao campo magnético do material magnético o que causa a repulsão entre os dois materiais. Dizemos assim que o supercondutor é um diamagnético perfeito, isto é, possui a habilidade de expelir totalmente um campo magnético. Porém, se aumentarmos continuamente a intensidade do campo magnético até alcançar um certo valor crítico ( $H_c$  Figura 4), o supercondutor retorna ao seu estado normal, isto é, a supercondutividade é destruída. Materiais que exibem este tipo de comportamento são chamados supercondutores do tipo-I. Supercondutores do tipo-I são de pouco interesse tecnológico, uma vez que campos relativamente fracos podem suprimir a supercondutividade nestes materiais.

---

<sup>6</sup> Uma corrente em circuito pode gerar em torno deste um campo magnético o qual possui as mesmas propriedades que campos magnéticos produzidos por um ímã.

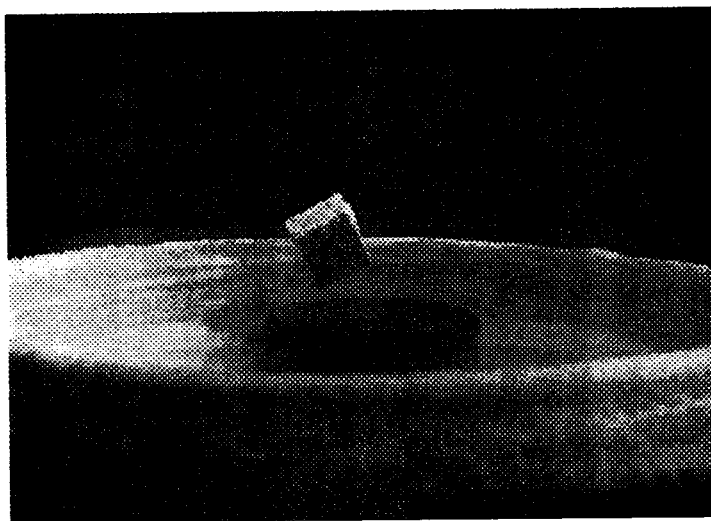


Figura 3. Um cubo de material magnético flutua acima de um supercondutor. O disco supercondutor encontra-se imerso em nitrogênio líquido para mantelo resfriado.

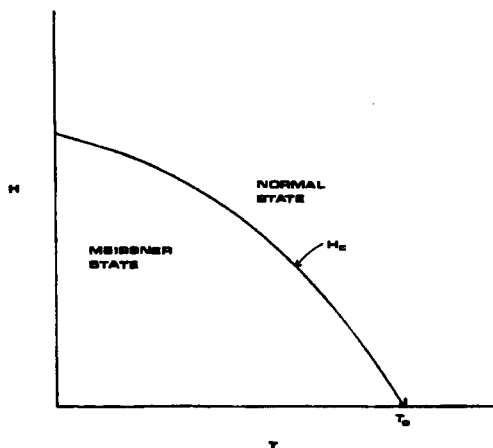


Figura 4. Campo magnético crítico  $H_c$  versus temperatura: diagrama de fase de um supercondutor do tipo-I.

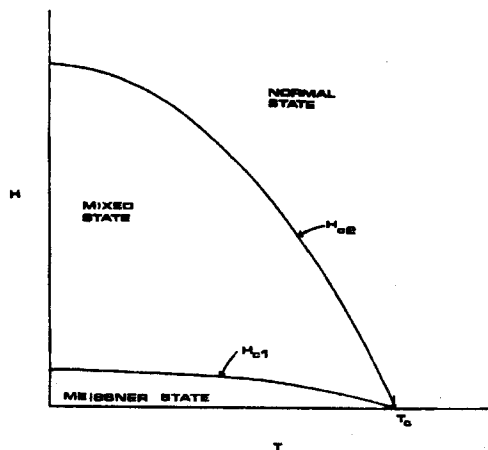


Figura 5. Campos magnéticos críticos  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$  versus temperatura: diagrama de fase de um supercondutor do tipo-II.

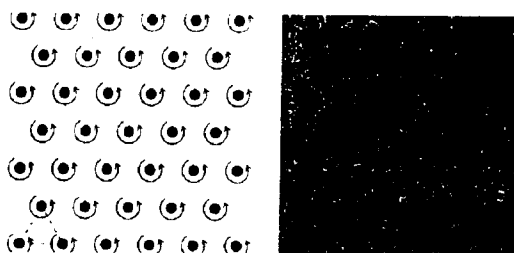


Figura 6. A esquerda: desenho esquemático de uma rede de vórtices. A direita: imagens tiradas da superfície de um supercondutor espalhando-se pó magnético sobre esta. Na presença de um campo magnético o pó se coagula em torno do campo formando as manchas escuras da figura.

Supercondutores do tipo-II comportam-se de uma forma ligeiramente diferente. Nestes materiais existe um segundo campo crítico ( $H_{c2}$  na Figura 5) que é muito mais alto que o valor do primeiro campo crítico ( $H_{c1}$ ). Entre o primeiro e o segundo campo crítico o supercondutor encontra-se num estado *misturado*. Neste estado o supercondutor não mais repele o campo magnético inteiramente, entretanto, o supercondutor continua a conduzir sem resistência até que o campo magnético exceda o valor do segundo campo crítico. No estado misturado o supercondutor permite a penetração de campo magnético porém de forma localizada. Em algumas regiões o material continua supercondutor, ao passo que em outras volta ao seu estado normal (ver Figura 6). Nesta figura, as regiões escuras correspondem a estado normal e as claras ao estado supercondutor. Isto forma uma estrutura de *vórtice*, parecido com um roda moimho: no centro o campo é máximo ao seu redor giram as supercorrentes.

Usando a teoria de Ginzburg e Landau mencionada no começo desta seção, Alexei A. Abrikosov, um estudante de Landau na Academia de Ciências de

Moscou, em 1957 sugeriu que estes vórtices formam um arranjo (rede) periódico em forma hexagonal (ver Figura 6). A previsão (teórica) de Abrikosov foi mais tarde confirmada por físicos experimentais do Instituto MaxPlanck de Stutgart. Esta rede de vórtices não são totalmente regular. Devido a impurezas e imperfeições do cristal e interações entre eles mesmos, esta rede de vórtices pode sofrer de formações. Nos supercondutores a altas temperaturas estas deformações da rede de vórtices são muito mais fortes que nos supercondutores convencionais. Isto pode produzir efeitos indesejáveis, uma vez que para se deformarem os vórtices precisam dispendir energia e dissipação de energia implica em aparecimento de resistividade no estado misturado. Este efeito pode inviabilizar muitas aplicações tecnológicas destes materiais.

Um discussão mais detalhada das propriedades da rede de vórtices infelizmente vai além do espaço reservado para esta monografia. Contudo, estarei sempre a disposição daqueles que participaram do Ciclo de Seminários para quaisquer outros esclarecimentos. Espero que estas informações tenham sido de algum valor para vocês e que tenham gostado desta leitura.

## Referências

*SUPERCONDUCTIVITY-The Threshold of a New Technology*, Jonathan L. Mayo, TAB BOOKS.<sup>7</sup>

*Resistance in High-Temperature Superconductors*, David J. Bishop, Peter L. Gammel e David A. Huse, Scientific American, página 24, fascículo de fevereiro de 1993.

*SUPERCONDUCTIVITY-The Next Revolution*, Gianfranco Vidali, Cambridge University Press, 1993.

---

<sup>7</sup> Este livro já foi traduzido para o português.