

TÓPICOS EM FÍSICA DO ESTADO SÓLIDO – SUPERCONDUTIVIDADE

1. HISTÓRIA

Supercondutividade é o fenômeno caracterizado pela resistência elétrica zero e pela expulsão de campos magnéticos que ocorre em certos materiais, quando esses se encontram abaixo de uma determinada temperatura. O fenômeno foi descoberto pelo físico alemão Heike Kamerlingh Onnes em 8 de Abril de 1911, em Leiden. Onnes realizou medidas de resistência elétrica em mercúrio, enquanto a amostra era resfriada, chegando a uma temperatura de 4K (-269°C). As figuras abaixo mostram o resultado obtido por Onnes, e ilustram a diferença de comportamento entre um metal usual e um supercondutor.

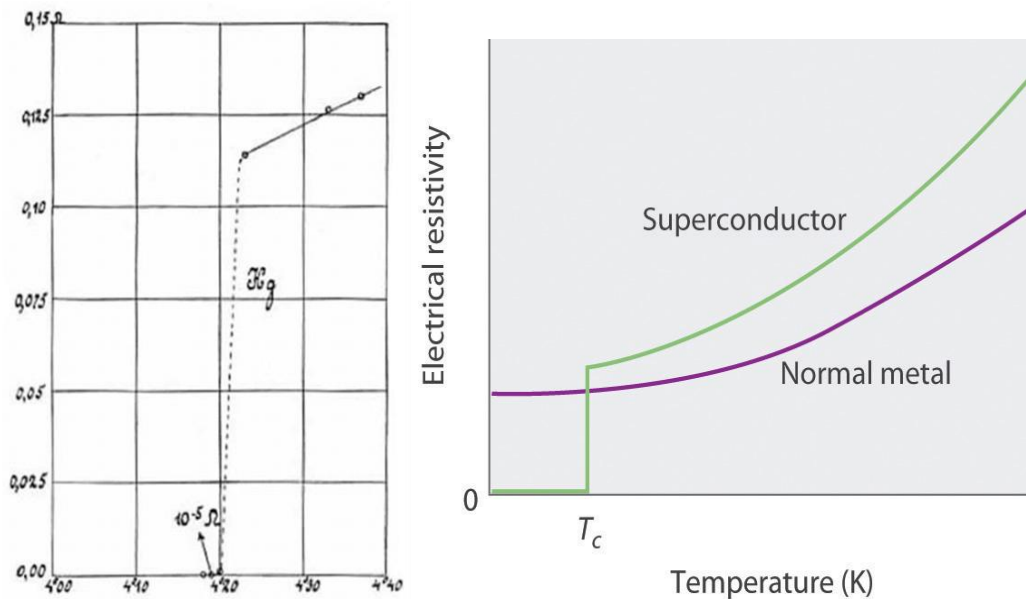


Figura 1: Resultado obtido por Onnes e diferença de comportamento entre um metal usual e um supercondutor

Em 1933, Walther Meissner e Robert Ochsenfeld verificaram que, além de apresentar resistência nula, materiais supercondutores são capazes de expelir completamente campos magnéticos de seu interior. Esse efeito foi batizado de efeito Meissner, e está ilustrado na figura abaixo. Em realidade, o campo magnético é capaz de penetrar no material por uma distância característica chamada de Comprimento de Penetração de London, que varia de material para material, mas é tipicamente da ordem de 50 ~ 500 nm.

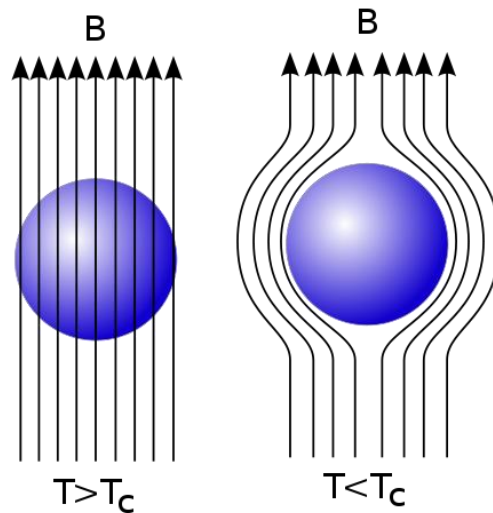


Figura 2: Ilustração d o efeito Meissner. Materiais supercondutores exibem diamagnetismo perfeito.

2. CARACTERÍSTICAS DOS SUPERCONDUTORES

Os supercondutores são ainda caracterizados pela Transição de Fase Supercondutora, que ocorre a uma temperatura que varia de material para material. Durante a transição de fase, várias propriedades físicas do material sofrem variações bruscas, como ilustrado na figura abaixo.

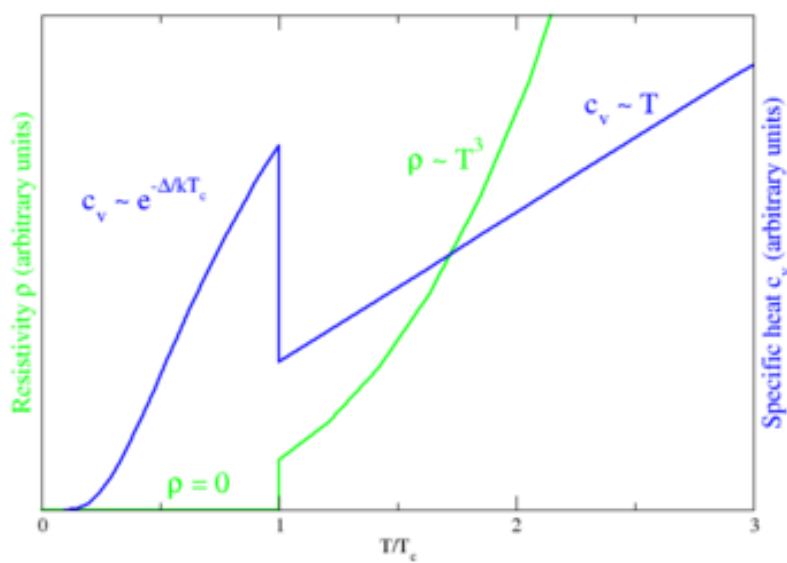


Figura 3: Mudança no comportamento da resistividade e do calor específico durante a transição de fase supercondutora.

Ainda, quando já na fase supercondutora, a uma determinada temperatura, materiais supercondutores podem perder suas propriedades supercondutoras e voltarem ao estado normal se forem sujeitos a correntes elétricas e campos magnéticos suficientemente altos

3. TEMPERATURAS CRÍTICAS E CLASSIFICAÇÃO DOS SUPERCONDUTORES

O gráfico abaixo mostra a evolução das temperaturas críticas dos materiais supercondutores ao longo do tempo. Supercondutores com temperatura crítica abaixo de 77 K são chamados de supercondutores de baixa temperatura (LTS), enquanto materiais com temperaturas críticas acima de 77 K são chamados de supercondutores de alta temperatura (HTS). Ainda podemos classificar esses materiais:

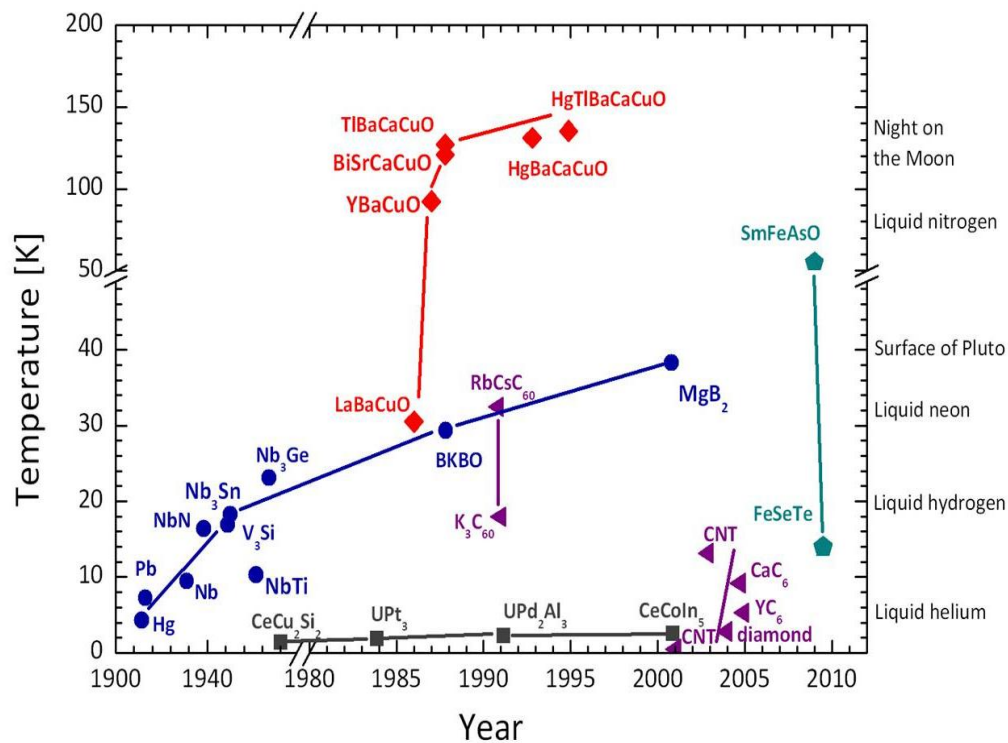


Figura 4: evolução das temperaturas críticas dos materiais supercondutores ao longo do tempo. As linhas coloridas são guias para os olhos unindo as diferentes famílias de materiais.

- (i) De acordo com a dependência do estado supercondutor com o campo magnético aplicado: o tipo 1, no qual o estado supercondutor passa por uma transição de fase para campos magnéticos acima de H_{c2} (tipicamente da ordem de), e o tipo 2, que

possui um campo crítico inferior H_{c1} e um superior, H_{c2} . O estado intermediário é chamado de estado de vórtex.

- (ii) De acordo com a teoria utilizada para explicá-lo: o convencionais, que são bem descritos pela teoria BCS, e os não convencionais, que não são.

4. TEORIA BCS

A teoria de Bardeen, Cooper e Schrieffer (BCS) é a única capaz de explicar a origem microscópica da supercondutividade, porém, seu domínio de validade se restringe aos supercondutores convencionais. A teoria BCS foi desenvolvida em 1957 e seus autores ganharam o prêmio Nobel de 1972 pelo seu desenvolvimento. Aqui, uma imagem de um dos artigos onde a teoria foi proposta:

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 108, NUMBER 5

DECEMBER 1, 1957

Theory of Superconductivity*

J. BARDEEN, L. N. COOPER,[†] AND J. R. SCHRIEFFER,[‡]
Department of Physics, University of Illinois, Urbana, Illinois
(Received July 8, 1957)

A theory of superconductivity is presented, based on the fact that the interaction between electrons resulting from virtual exchange of phonons is attractive when the energy difference between the electrons states involved is less than the phonon energy, $\hbar\omega$. It is favorable to form a superconducting phase when this attractive interaction dominates the repulsive screened Coulomb interaction. The normal phase is described by the Bloch individual-particle model. The ground state of a superconductor, formed from a linear combination of normal state configurations in which electrons are virtually excited in pairs of opposite spin and momentum, is lower in energy than the normal state by amount proportional to an average $(\hbar\omega)^2$, consistent with the isotope effect. A mutually orthogonal set of excited states in

one-to-one correspondence with those of the normal phase is obtained by specifying occupation of certain Bloch states and by using the rest to form a linear combination of virtual pair configurations. The theory yields a second-order phase transition and a Meissner effect in the form suggested by Pippard. Calculated values of specific heats and penetration depths and their temperature variation are in good agreement with experiment. There is an energy gap for individual-particle excitations which decreases from about $3.5kT_c$ at $T=0^\circ\text{K}$ to zero at T_c . Tables of matrix elements of single-particle operators between the excited-state superconducting wave functions, useful for perturbation expansions and calculations of transition probabilities, are given.

I. INTRODUCTION

THE main facts which a theory of superconductivity

basic. F. London⁴ suggested a quantum-theoretic approach to a theory in which it was assumed that

Figura 5: Artigo de J. Bardeen, L. N. Cooper e J R. Shchrieffer propondo a teoria da supercondutividade, que mais tarde ficou conhecida como teoria BCS.

De acordo com a teoria BCS, o estado supercondutor está separado do estado normal por um gap de energia. Esse gap seria originado da interação elétron-phonon-elétron. Essa interação indireta entre dois elétrons acontece quando o primeiro elétron interage com a rede cristalina e a deforma. O segundo elétron interage com a rede cristalina deformada e altera

seu estado, de modo a diminuir sua energia. Essa interação entre os elétrons é, na verdade, atrativa! O par de elétrons que se interage possui característica central, que é: se um orbital com vetor de onda \mathbf{k} e spin up está ocupado, então um orbital com vetor de onda $-\mathbf{k}$ e spin down também está ocupado, o mesmo ocorrendo pra estados desocupados. Esse par de elétrons recebe o nome de par de Cooper, e é essencial para a teoria BCS.

Porém, a teoria falha ao prever um limite superior para a temperatura de transição de fase supercondutora e ao descartar a possibilidade de coexistência entre supercondutividade e ferromagnetismo, o que mostra que ainda há muito a ser feito nessa área.