

Aula 14 – Supercondutividade

Prof. Luis Gregório Dias

Sumário

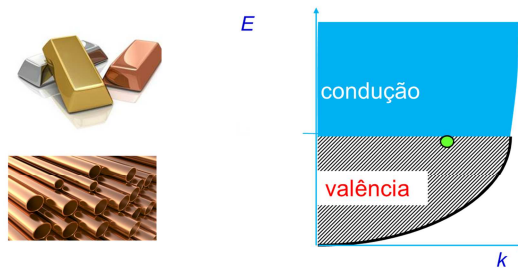
Introdução	1
Resistividade em metais.	1
Corrente elétrica em metais	2
Supercondutividade.....	3
Descoberta da supercondutividade.....	3
Supercondutores de alta temperatura crítica	4
Pares de Cooper	5
Efeito Meissner	6

Introdução

Nesta aula, falaremos sobre [supercondutividade](#). Iniciaremos com conceitos básicos como corrente elétrica, resistência e resistividade em metais. Depois, abordaremos o fenômeno da supercondutividade, iniciando com sua descoberta por Heike Kamerlingh Onnes em 1911 e passando pela descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica em 1986. Falaremos também sobre a teoria microscópica do estado supercondutor e a formação de pares de Cooper. Para finalizar, mostramos a supercondutividade acontecendo “ao vivo e à cores” durante uma visita a um laboratório do Instituto de Física da USP, como mostrado na video-aula especial.

Resistividade em metais.

Como vimos na Aula 11, a estrutura de bandas e seu preenchimento determinam várias das propriedades elétricas de materiais cristalinos. Isto porque processos de transporte tais como [condução de corrente elétrica](#) e [condução de calor](#) ocorrem por injeção de energia no sistema (ou seja, são fundamentalmente processos que tiram os elétrons do seu estado de equilíbrio termodinâmico). Tais processos são dominados pelos [elétrons com energia próxima à energia de Fermi](#) que recebem energia adicional e assim são “promovidos” para a banda de condução.



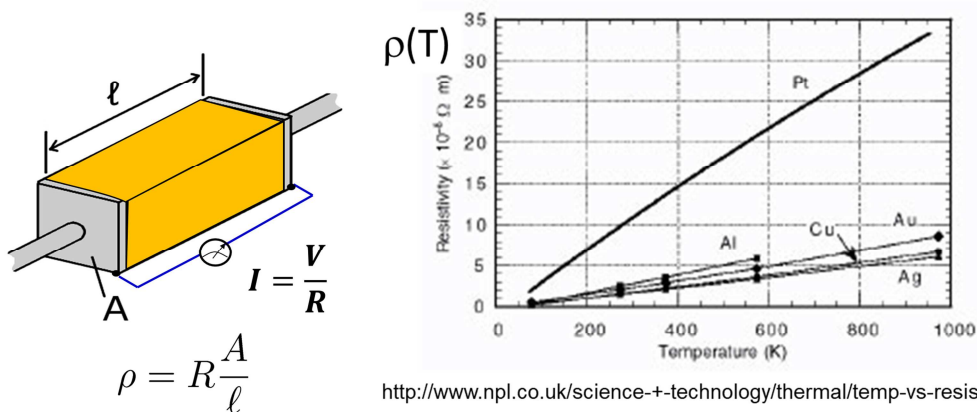
Gap = 0 → Metal.

Figura 1: Elétron em um metal.

No caso de **metais**, o preenchimento das bandas ocorre de tal forma que a última banda está apenas parcialmente preenchida (vide Figura 1). Desta forma, a “promoção” de um elétron ocupando o último estado ocupado para o primeiro estado desocupado tem um custo energético pequeno. Nesta situação, o material será um bom condutor de eletricidade e de calor, que caracterizam os metais.

Corrente elétrica em metais

Como vimos acima, metais conduzem **corrente elétrica**. Se aplicarmos uma diferença de potencial V (medida em **Volts [V]** no S.I.) entre duas extremidades de um metal, uma corrente elétrica I (medida em **Ampères [A]** no S.I.) vai fluir através do material, como ilustrado na na Figura 2 à esquerda.



<http://www.npl.co.uk/science-+technology/thermal/temp-vs-resistivity>

Figura 2: A resistividade em metais **decrece** com a temperatura.

Em vários casos de interesse, a corrente será diretamente proporcional à diferença de potencial. Este é o chamado **regime ôhmico** e é descrito pela famosa **Lei de Ohm** $I = \frac{V}{R}$, onde R é a **resistência** do sistema (ou circuito) medida em Ohms (Ω) em unidades do sistema internacional. A resistência não é *intrínseca* ao material. Ou seja, depende das dimensões do metal pelo qual passa a corrente: por exemplo, quanto maior o comprimento ℓ (Figura 2 à esquerda) da região do metal entre os contatos, maior será a resistência.

A resistência é uma medida da *dissipação de energia* que ocorre à medida em que os elétrons se movem pelo material. A potência dissipada pela passagem de corrente elétrica é dada por $P = V.I = I^2R$ (medida em Watts [W]) A origem microscópica desta perda de energia está ligada a diferentes processos de espalhamento sofridos pelos elétrons ao se deslocar pelo metal.

Podemos definir também a *resistividade* ρ , que é uma quantidade intrínseca ao metal, e depende apenas do material e não das dimensões. A resistividade pode ser obtida multiplicando-se a resistência pela área transversal A e dividindo-se pelo comprimento ℓ , na forma:

$$\rho = R \frac{A}{\ell}$$

Equação 1

No Sistema Internacional, a resistividade é dada em *Ohms vezes metro* [$\Omega.m$], uma vez que a área é dada em m^2 e o comprimento em metro.

Um fato empírico, ilustrado na Figura 2 à direita, é que a *resistividade de um material diminui à medida que a temperatura diminui*. Uma das razões para este comportamento é que os processos de espalhamento de elétrons no material são suprimidos à baixas temperatura. Na maioria dos metais a resistividade atinge um valor mínimo a baixas temperaturas mas este valor é, usualmente, diferente de zero.

Supercondutividade

Em alguns materiais, a *resistividade vai a zero* abaixo de uma determinada temperatura (vide Figura 3 à esquerda). A temperatura onde ocorre esta transição é denominada *temperatura crítica ou T_c* . Neste regime, a condução de corrente elétrica ocorre sem dissipação de energia. Este fenômeno é denominado *supercondutividade*.

Descoberta da supercondutividade.

As primeiras evidências experimentais de comportamento supercondutor datam no início do século XX. Um dos pioneiros nesta pesquisa foi o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), que, entre outros feitos, foi o primeiro a liquefazer o gás Hélio em 1908. Para isto, ele precisou criar um sistema criogênico capaz de alcançar temperaturas baixíssimas, da ordem de 1,5 K (aproximadamente -272 C). Em 1911, Onnes mediu a resistividade de metais com alto grau de pureza em função da temperatura neste regime de temperaturas ultra-baixas. No caso de *mercúrio sólido*, seus dados mostraram que a resistividade cai abruptamente a praticamente zero para $T=T_c \sim 4,2$ K (vide Figura 3 à direita). Isto marcou a descoberta da supercondutividade. Onnes recebeu o prêmio Nobel dois anos depois, em 1913, pelos seus trabalhos em Física de baixas temperaturas.

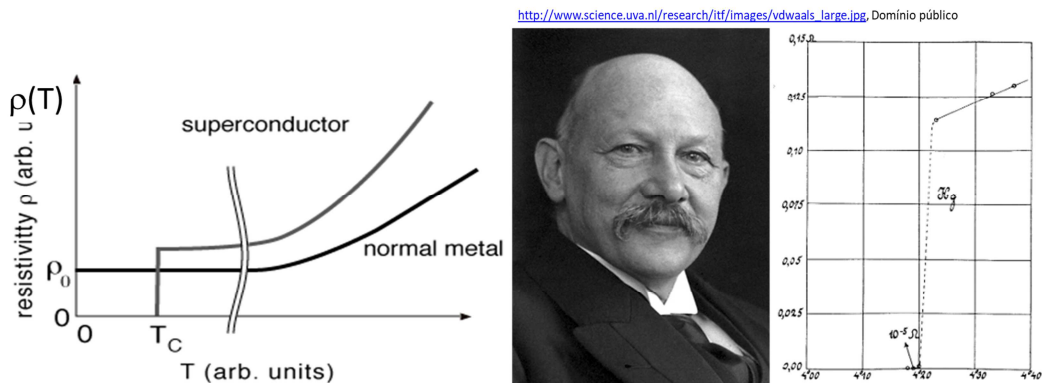


Figura 3: (Esq.) A resistividade decresce com a temperatura em metais e vai a zero na transição supercondutora a $T=T_c$. (Dir.) Heike Kamerlingh Onnes (foto) descobriu a supercondutividade em Mercúrio (Hg) com $T_c=4,2$ K.

Supercondutores de alta temperatura crítica

A descoberta da supercondutividade em mercúrio abriu o caminho para o estudo do fenômeno em outros materiais. Como mostrado na Figura 4, os primeiros materiais supercondutores foram metais como chumbo (Pb) e nióbio (Nb) além de compostos de Nióbio. Esses materiais tem temperaturas críticas baixas (menos que 30K) de modo que a refrigeração necessária para atingir o estado superconductor é um empecilho para seu uso em dispositivos eletrônicos.

Nos anos 80, foram descobertas as chamadas **cerâmicas supercondutoras** feitas à base de compostos de cobre (cupratos). Embora estes materiais sejam tipicamente isolantes (e não metais), eles apresentam comportamento superconductor a temperaturas críticas mais altas do que os metais. A descoberta das cerâmicas supercondutoras rendeu o prêmio Nobel a Bednorz e Muller no ano seguinte.

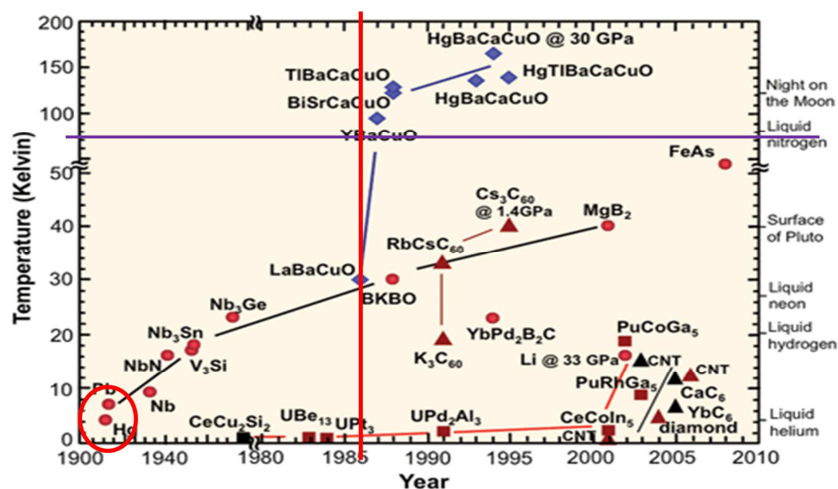


Figura 4: Materiais supercondutores: T_c versus ano da descoberta A linha horizontal marca a temperatura de liquefação do nitrogênio (77 K) . Fonte: Department of Energy dos EUA

<http://www.ccas-web.org/superconductivity/#image1>

Em 1987, foi descoberta a supercondutividade no composto YBaCuO (ítrio, bário, cobre, oxigênio) com uma temperatura crítica bastante elevada, da ordem de 92K. Esta temperatura é alta o suficiente para que a supercondutividade seja obtida via refrigeração com nitrogênio líquido, algo bastante mais eficiente e barato do que a refrigeração com Hélio líquido. Esta descoberta marcou o início da pesquisa em materiais que apresentam **supercondutividade a altas temperaturas críticas** ou “high T_c ”. Vários materiais deste tipo foram descobertos desde então, como mostrado na Figura 4.

Pares de Cooper

A supercondutividade em metais é descrita pela “teoria BCS”. O nome faz uma referência às iniciais dos sobrenomes de seus idealizadores: John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer. Um dos elementos básicos da teoria é que, no estado supercondutor, a corrente elétrica não é conduzida por elétrons mas sim por pares de elétrons correlacionados entre si, denominados **pares de Cooper**.

A formação dos pares de Cooper ocorre por um processo no qual existe uma **força atrativa** entre os elétrons que se sobrepõe à repulsão Coulombiana usual. Em metais, a teoria BCS prevê que o processo de formação de pares de Cooper é mediado por distorções na rede cristalina do metal.

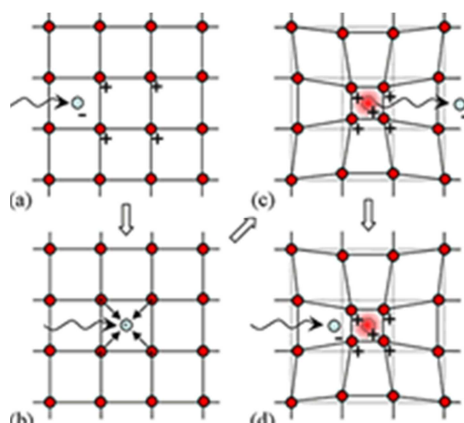


Figura 5: Formação de pares de Cooper em um supercondutor.

Uma maneira simplificada de entender o processo é ilustrada na Figura 5. O deslocamento de um elétron pelo material provoca distorções na rede pela atração entre os elétrons e os íons positivamente carregados. Estas distorções geram regiões com densidade de carga positiva que, por sua vez, podem atrair um segundo elétron. Ou seja, efetivamente este elétron vai ser “atraído” ao primeiro por conta das distorções na rede.

Se esta atração for grande o suficiente, é energeticamente favorável que os elétrons formem pares (denominados pares de Cooper). Embora os elétrons sejam férmions, os pares de Cooper se comportam como **bósons**, o que muda significativamente as

propriedades do material. Em particular, os pares de Cooper apresentam um gap no seu espectro, o que suprime os efeitos de espalhamento e permite o seu trânsito sem colisões. Em outras palavras, o material deixa de se comportar como um metal (férmions preenchendo parcialmente uma banda de energia) e passa a se comportar como um supercondutor.

Efeito Meissner

Uma das “assinaturas” do estado supercondutor é a expulsão de linhas de campo magnético externo do interior do material. Quando um campo magnético é aplicado a um material, os elétrons em seu interior sofrem a ação do campo e, sendo partículas carregadas, respondem de acordo com as leis do eletromagnetismo. Se o material é um condutor (elétrons livres para se mover), a Lei da Indução de Faraday prevê que o movimento dos elétrons é no sentido de formar correntes elétricas que induzam um campo magnético oposto ao campo aplicado. Em um condutor perfeito, o campo magnético externo é completamente cancelado no interior do material devido à indução de Faraday. Este é o [diamagnetismo perfeito](#).

No supercondutor, algo mais ocorre: o campo é expulso do interior do material na transição supercondutora que ocorre em $T=T_c$. Estes são os chamados [supercondutores do tipo I](#). Neste tipo de material, correntes se formam na superfície e produzem um campo magnético que cancelam completamente o campo magnético externo no interior do material (vide Figura 6 à esquerda).

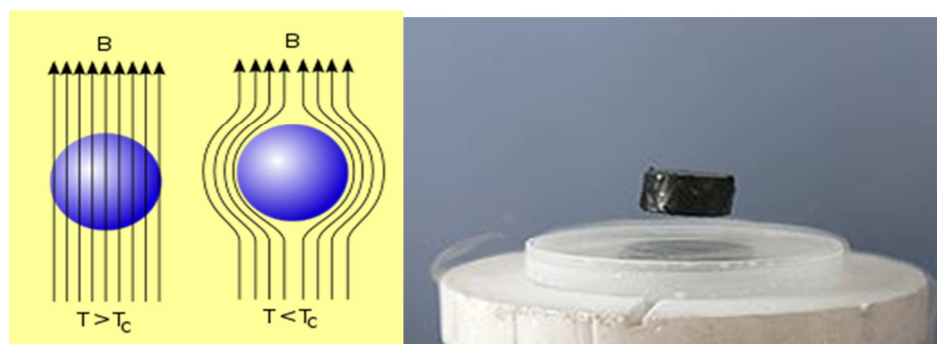


Figura 6: Ilustração do Efeito Meissner

Na transição para o estado supercondutor, o campo magnético é abruptamente expulso do interior do material. Este é o [efeito Meissner](#). Com isso, a deformação das linhas de campo fora da superfície exerce uma força sobre o material que, se for maior que seu peso, faz com que o material “flutue” (vide Figura 6 à direita).

Na video-aula, mostramos uma demonstração deste efeito filmada no Laboratório de Transições de Fase e Supercondutividade no Instituto de Física da USP.