

10.5 Supercondutividade

Em 1904, Heike Kamerlingh Onnes^(veja figura 10.5.1) fundou um laboratório de criogenia¹ na universidade de Leiden (Holanda). Neste laboratório, ele conseguiu liquefazer hélio² em 1908 pela primeira vez e gerou temperaturas tão baixas como 1,5 K, que era o recorde de baixas temperaturas naquela época. Era sabido que a resistividade elétrica dos metais tende a diminuir quando se esfria o metal. Kamerlingh Onnes e Gilles Holst³ encontraram este comportamento para platina e ouro, mas, para temperaturas muito baixas, a resistência parecia ficar constante. Esta resistência residual podia ser provocada por impurezas. Então era interessante estudar o comportamento da condutividade elétrica de metais muito puros a temperaturas extremamente baixas. Eles decidiram usar mercúrio, que pode facilmente ser purificado por destilação repetida. No dia 11 de abril de 1911, Kamerlingh Onnes e Holst fizeram uma descoberta fenomenal quando estudaram a resistência elétrica de um arame de mercúrio⁴ a baixas temperaturas. Abaixo da temperatura de 4,2 K, a resistência elétrica do arame simplesmente desapareceu. Primeiramente pensaram que havia ocorrido algum erro. Mas logo verificaram que era mesmo uma total ausência de resistência elétrica. Kamerlingh Onnes percebeu que se tratava de um novo fenômeno de suma importância. Ele chamou este fenômeno de *supracondutividade* e mais tarde mudou o nome para *supercondutividade*⁵. Kamerlingh Onnes encontrou este estado supercondutor também com chumbo e estanho abaixo das temperaturas de 7,2 K e 3,8 K respectivamente. Estas temperaturas que separam o regime supercondutor do regime de condução comum é chamado de *temperatura crítica*.



Fig. 10.5.1 Heike Kamerlingh Onnes (21/09/1853 – 21/02/1926), o descobridor da supercondutividade. Ele foi o primeiro a liquefazer o gás hélio. Ele cunhou a palavra entalpia, contribuiu para a termodinâmica de fluidos e descobriu um fenômeno que mais tarde foi identificado como uma manifestação da superfluidez. Seu lema era „Door meten tot weten“ (Através do medir, ao saber). Seu sucesso se deve ao fato de unir profundos conhecimentos de física teórica, de física experimental e a habilidade de comandar uma grande equipe de técnicos e cientistas. Talvez esta habilidade tenha sido uma herança familiar, pois Heike era filho de um dono de fábrica⁶.

Imagem: By Nobel foundation –

<http://www.archive.org/details/lesprixnobel1913nobe>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33409889>

A supercondutividade não se limita aos metais mercúrio, chumbo e estanho. Há diversas substâncias que se tornam supercondutores abaixo de alguma temperatura crítica T_C . A tabela 10.5.1 mostra algumas substâncias com suas respectivas temperaturas críticas. As colunas 3, 4 e 5 mostram características que explicaremos mais adiante.

¹ A criogenia é a arte de gerar baixas temperaturas.

² Sob pressão atmosférica, hélio ferve numa temperatura de 4,222 K ou -268,928°C.

³ Gilles Holst (20/03/1886–11/10/1968) é conhecido por ter inventado a lâmpada de sódio de baixa pressão.

⁴ “Arame de mercúrio” soa curioso quando pensamos naquele líquido metálico. Mas abaixo da temperatura de -28,8290°C mercúrio é sólido.

⁵ Na literatura de língua alemã, o termo “Supraleitung” ainda é usado. Também em francês o fenômeno é chamado de “*supraconductivité*”.

⁶ Dirk van Delft: Heike Kamerlingh Onnes and the Road to Liquid Helium IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM (ESNF), No. 16, April 2011

Tabela 10.5.1 Materiais supercondutores com suas temperaturas críticas e campos críticos.

Material	T_c [K]	B_{c1} [T]	B_{c2} [T]	Tipo
Tungstênio W	0,015	0,000115	--	I
Gálio Ga	1,083	0,0058	--	I
Alumínio Al	1,196	0,0105	--	I
Mercúrio Hg	4,153	0,0411	--	I
Tântalo Ta	4,483	0,0829	--	I
Chumbo Pb	7,193	0,0893	--	I
Nióbio Nb	9,26	0,199	0,5	II
Liga de Nióbio e Titânio	10,1	?	15	II
PMo ₆ S ₈	14,4	?	60	II
NbN	15,7	?	15,3	II
Nb ₃ Ge	23	?	38	II
H ₂ S (com $P=90$ gigapascal)	203	?	?	?

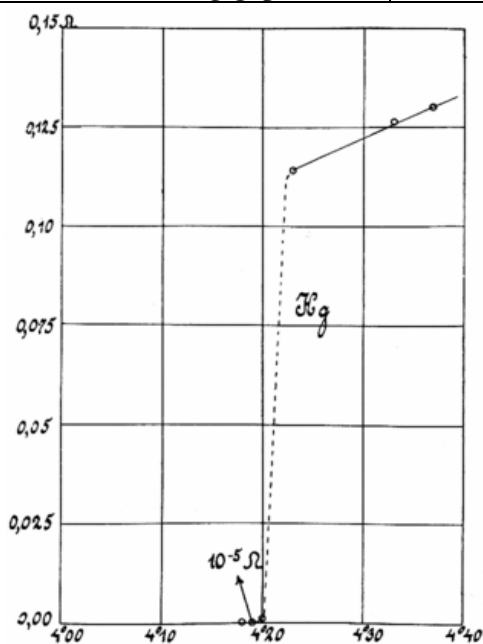


Fig. 10.5.2 Resistência de um arame de Hg em dependência da temperatura. O eixo horizontal mostra a temperatura em Kelvin e o eixo vertical a resistência. (Péssimo exemplo para os alunos não escrever as grandezas nos eixos! Repare também na forma curiosa de escrever a unidade Kelvin, que, na época, podia ser chamada de grau: $4,20\text{K}=4^{\circ}20$). O gráfico é das anotações de Heike Kamerlingh Onnes escaneado de Boston Studies in the Philosophy of Science vol.124 (p.269), <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6250081>.

A figura 10.5.2 mostra as anotações gráficas de Kamerlingh Onnes referentes à descoberta original com mercúrio. O eixo horizontal mostra a temperatura da amostra em Kelvin e o eixo vertical, a resistência. O valor de resistência $10^{-5}\Omega$ anotado num dos pontos experimentais abaixo de $4,2\text{K}$ é gerado pela resolução do instrumento de medida e não corresponde ao real valor da resistência da amostra. Este é praticamente zero. Pode-se mostrar isto da seguinte maneira: num anel de material potencialmente supercondutor, injeta-se corrente e se resfria o mesmo abaixo da sua temperatura crítica. Enquanto se mantém esta temperatura, a corrente não cessará mesmo sem a presença de uma bateria no circuito. A permanência dessa corrente pode ser monitorada com medidas do campo magnético gerado por ela. Mantendo o estado supercondutor durante anos, nenhuma diminuição da corrente é observada⁷. Quem trabalhou com fios elétricos e resistores deve ficar sumamente estupefato com a notícia de que há condutores desta natureza.

⁷ J. File and R. G. Mills: Observation of Persistent Current in a Superconducting Solenoid. Phys. Rev. Lett. 10, 93 – 1963

Provavelmente o leitor se pergunta neste ponto por que o assunto de supercondutividade se encontra no capítulo de propriedades magnéticas da matéria. Este assunto parecia ser mais adequado ao capítulo de correntes elétricas. Mas os supercondutores, além de serem condutores perfeitos, exibem também um efeito magnético muito curioso. Este efeito foi descoberto somente 22 anos após a descoberta da supercondutividade.

Entre 1922 e 1925 Fritz Walther Meissner⁸ montou, na PTR (Physikalisch-Technische Reichsanstalt), em Berlim, uma máquina para liquefazer hélio. Com uma máquina em Leiden e outra em Toronto, esta era a terceira geradora de hélio líquido no mundo. Seguindo uma proposta de Max von Laue⁹, Meissner junto com Robert Ochsenfeld¹⁰ investigou o comportamento de supercondutores no campo magnético em 1933.

Gabriel Lippmann¹¹ já tinha previsto que, ao aplicar campo magnético num condutor perfeito, iam aparecer correntes que geram um campo que anula \vec{B} dentro do condutor. Isto seria consequência da regra de Lenz para o caso extremo de um condutor perfeito. Então era esperado que, ao aplicar campo magnético num supercondutor, o campo seria expulso da região do supercondutor. Mas Meissner e Ochsenfeld encontraram algo que vai além deste efeito da lei de indução¹². Meissner e Ochsenfeld inverteram a ordem temporal das coisas: ao invés de resfriar o material primeiramente abaixo da temperatura crítica e de aplicar o campo magnético depois, eles estabeleceram primeiramente o campo e esfriaram a amostra depois. Enquanto o material está com uma temperatura acima da temperatura crítica, há resistividade elétrica, e o campo penetra dentro da amostra. Rapidamente se estabelece um equilíbrio, e o campo fica estático, $\partial\vec{B}/\partial t = 0$. Então não há que se esperar o aparecimento de correntes induzidas pela lei de indução. Agora se esfria a amostra abaixo da temperatura crítica e acontece algo totalmente inesperado: o campo é novamente expulso da região ocupada pelo material supercondutor. Este efeito, conhecido como *efeito de Meissner-Ochsenfeld*, é hoje considerado uma das principais características do estado supercondutor. Costuma-se dizer que um supercondutor é um material perfeitamente diamagnético, no qual vale sempre $\vec{M} = -\vec{H}$ e portanto $\vec{B} = 0$. Isto é um tanto um abuso de nomenclatura, pois aqui \vec{M} não é uma densidade de momentos de dipolos. Mas vimos na seção 10.2 que uma densidade de dipolos magnéticos numa amostra é magneticamente equivalente a uma

⁸ Fritz Walther Meißner (16/12/1882 – 15/11/1974) estudou engenharia mecânica, matemática e física. Doutorou-se com a orientação de Max Planck. Ele construiu várias máquinas de liquefazer hélio. Ele foi presidente da BAdW (Bayerische Akademie der Wissenschaften) e teve uma influencia enorme no desenvolvimento da física técnica na Alemanha.

⁹ Max von Laue (09/10/1879 - 24/04/1960) estudou física e matemática e doutorou-se orientado por Max Planck investigando interferências em placas paralelas. Ele trabalhou na teoria da relatividade e defendeu Einstein contra os nazistas. Sua maior contribuição científica foi seu estudo da difração de raios-X em redes cristalinas. Em 1957 ele se posicionou junto com outros cientistas de renome (Os Dezoito de Gotinga) contra um planejado armamento nuclear da Republica Federal da Alemanha.

¹⁰ Robert Ochsenfeld (18/05/1901 - 05/12/1993) saiu da PTR em 1933, trabalhou como professor numa escola elite dos Nacional-Socialistas, depois desenvolveu armas (torpedo) e se afiliou na NSDAP. Depois da guerra ele foi preso pelos aliados por ter colaborado com os nazistas. Após sua liberação (1947), ele trabalhou na PTR – PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt).

¹¹ G. Lippmann: Sur les propriétés des circuits électriques dénués des résistance. Comptes rendus. 168 p. 73-78 1919. Veja dados do pesquisador Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann na nota de rodapé 4 na seção 4.6.

¹² Meissner, W.; Ochsenfeld, R.: "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit". *Naturwissenschaften*. **21** (44): 787–788. (1933).

corrente na superfície da amostra (veja a figura 10.2.1). Então podemos aqui interpretar inversamente as correntes superficiais provocadas pelo campo magnético como uma magnetização.

A primeira máquina de liquefazer hélio ficou pronta em 1908 e a terceira em 1925. Parece que estas máquinas são mesmo complicadas! Mas, um dia, mesmo as coisas mais complicadas se tornam rotineiras e hoje há estes geradores de hélio líquido em diversas instituições. Eu tive a sorte de estudar física numa universidade que possuía uma destas máquinas e, numa aula de física básica, pude ver uma demonstração impressionante do efeito Meissner. O hélio líquido estava guardado num recipiente de Dewar¹³ sem o usual espelhamento das paredes duplas de tal forma que o interior era visível. O professor¹⁴ segurava uma corrente fina que se dividia em três segurando um pratinho de chumbo como se fosse um prato para pendurar um vaso de plantas (veja a figura 10.5.3). Havia um pequeno ímã permanente no prato de chumbo. O professor enfiou este arranjo no recipiente Dewar e abaixou o prato até a superfície do hélio. Após certo tempo, a temperatura do metal abaixou, o chumbo entrou no estado supercondutor e o ímã pulou para cima e ficou pairando no ar¹⁵ alguns centímetros acima da superfície do prato.

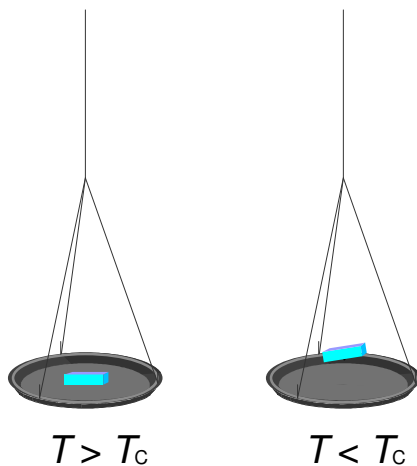


Fig. 10.5.3 Demonstração do efeito Meissner. Um ímã permanente se afasta da superfície um prato de chumbo e fica pairando no ar no momento de o chumbo passar para o estado supercondutor.

A expulsão do campo, ou seja, a anulação dos valores do campo \vec{B} dentro do chumbo é criada por correntes numa fina camada superficial do supercondutor, e estas correntes fluem sem cessar.

A condição $\vec{B} = 0$ dentro do chumbo lembra a condição $\vec{E} = 0$ dentro de um condutor, que estudamos na eletrostática na seção 3.2 quando discutimos a carga-imagem de uma carga na

frente de um plano condutor (compare figuras 3.2.7 e 3.2.8). Mas há detalhes que são bem diferentes. Na eletrostática tivemos cargas superficiais e aqui temos correntes superficiais. Na eletrostática o campo podia ter somente uma componente normal à superfície do condutor. Aqui justamente a componente normal tem que ser praticamente zero. Pode-se descrever tudo de novo com um método-imagem, mas a imagem não tem os sinais das cargas opostas. Aqui o ímã é exposto a um campo magnético que equivale ao campo de um ímã-imagem com os mesmos polos como indicado na figura 10.5.4. Percebemos que isto equivale a uma força repulsiva e que os torques que podem eventualmente aparecer numa orientação inclinada garantem um equilíbrio estável¹⁶.

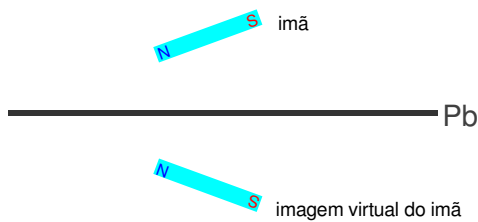
¹³ Recipiente Dewar é uma garrafa térmica com paredes duplas espelhadas com alto vácuo entre as paredes. Esta garrafa foi inventada pelo químico James Dewar.

¹⁴ Prof. Dr.-Ing. Heinz Niedrig

¹⁵ “Pairar no ar” é uma maneira coloquial de descrever a impressão visual. Na verdade o ímã se encontrava no hélio em forma gasosa, pois o hélio líquido estava em ebulição.

¹⁶ A estabilidade se refere a rotações. O ímã poderia ainda deslizar para o lado. Na experiência este deslizamento foi evitado usando um prato de chumbo com uma pequena beirada.

Fig.10.5.4 O campo magnético gerado pelas correntes superficiais no supercondutor garantem $\vec{B} = 0$ no interior do mesmo. No semiespaço acima do supercondutor, este campo é equivalente ao campo que seria gerado por um ímã espelhado na superfície do supercondutor.



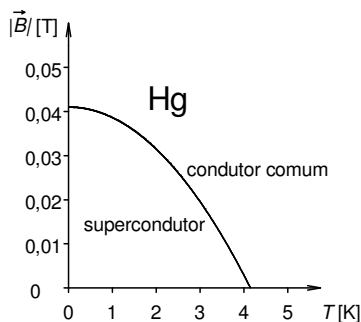
O leitor encontrará facilmente imagens impressionantes de levitação magnética na internet sob o título de efeito Meissner. No entanto todas estas imagens são feitas com as famosas cerâmicas supercondutoras de alto T_C que podem ser postas no estado supercondutor com nitrogênio líquido. Com estes supercondutores, o efeito Meissner é um tanto

diferente e comentaremos sobre isto mais adiante.

A anulação do campo \vec{B} dentro do supercondutor não é abrupta na sua superfície. Para uma geometria simples, a intensidade do campo diminui exponencialmente com a profundidade p : $|\vec{B}| \sim \exp\{-p/\lambda_L\}$. O parâmetro λ_L é uma característica do material e ele é chamado de *profundidade de penetração de London*. A lei $|\vec{B}| \sim \exp\{-p/\lambda_L\}$ é resultado de uma teoria fenomenológica da supercondutividade que foi elaborada pelos irmãos Fritz e Heinz London¹⁷. Valores típicos da profundidade de penetração ficam na faixa de 20 nm à 500 nm.

Uma consequência do efeito Meissner é uma distribuição não uniforme da densidade de corrente num arame supercondutor que leva uma corrente diferente de zero. Se a densidade de corrente fosse uniforme, como num arame comum, haveria campo magnético no interior do arame, como vimos na seção 7.5 (fórmula 7.5.9). Por causa do efeito Meissner, a corrente flui apenas numa fina camada superficial do arame supercondutor.

A capacidade dos supercondutores de expulsar campo magnético tem limites. Quando se aplica um campo muito intenso, o estado supercondutor é destruído. Conseqüentemente devemos dividir não apenas a escala de temperatura num intervalo supercondutor e num de condutividade comum, mas devemos separar uma região



supercondutora num plano bidimensional formado por temperaturas e de valores de módulo de campo \vec{B} aplicado na amostra. A figura 10.5.5 mostra a região supercondutora e a região de condução comum para o caso de mercúrio.

Fig. 10.5.5 Região supercondutora e de condução comum de Hg no plano de temperatura e módulo de campo externo aplicado.

A curva que separa estas regiões pode aproximadamente ser descrita com uma fórmula bastante simples:

¹⁷ Fritz Wolfgang London (07/03/1900 – 30/03/1954), Heinz London (07/11/1907 – 03/08/1970) London F., London H.: “The Electromagnetic Equations of the Superconductor” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Engineering Sciences*. **149** 866 pp. 71-88 (1935)

$$B_c(T) = B_{c1} \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right\} \quad (10.5.1)$$

O valor B_{c1} é uma característica do material, e estes valores estão registrados na terceira coluna da tabela 10.5 para alguns materiais.

Em 1935 Lev Vasilyevich Shubnikov¹⁸ descobriu que a expulsão do campo magnético do interior de um material supercondutor não é sempre total¹⁹. Para alguns materiais, chamados de supercondutores do tipo II, o campo pode parcialmente penetrar na amostra. Na época, os colegas de Shubnikov não apreciaram esta descoberta. Somente quando este fato foi redescoberto²⁰ nos Estados Unidos no ano 1961, a comunidade científica deu-lhe a devida importância.

Um campo externo muito fraco também é totalmente expulso destes supercondutores do tipo II, mas, quando o módulo do campo excede o valor limite B_{c1} , o material ainda não se torna completamente normal. A maior parte da amostra ainda continua supercondutora e sem campo magnético. Mas em minúsculos canais a condição supercondutora é destruída e nestes canais se concentram as linhas do campo magnético. Ao redor de cada canal, flui supercorrente que protege o resto do material do campo magnético. A figura 10.5.6 mostra esta configuração esquematicamente.

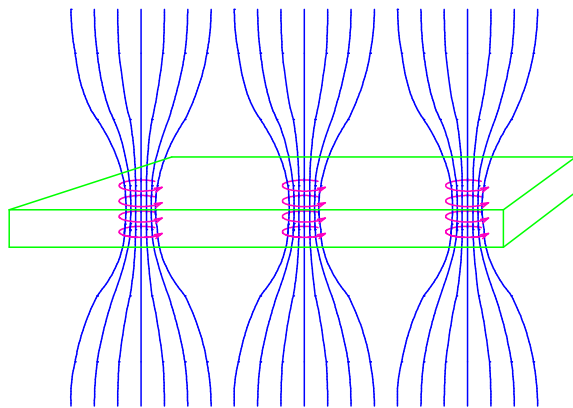


Fig. 10.5.6 Penetração de linhas de campo num supercondutor do tipo II. O campo é confinado em canais finos cujo centro não fica no estado supercondutor. Supercorrentes permanentes (mostradas em magenta) protegem o resto da amostra do campo.

Uma descrição teórica destes canais foi elaborada por Alexei Alexeyevich Abrikosov²¹, e eles são chamadas de *vórtices de Abrikosov*.

¹⁸ Lev Vasilyevich Shubnikov (Лев Васи́льевич Шу́бников) (09/09/1901 – 10/11/1937) estudou física no Instituto Politécnico de Leningrado e se formou em 1926. Ele desenvolveu um novo método de crescer cristais. De 1926 até 1930 ele trabalhou em Leiden e descobriu junto com de Haas o importante efeito Shubnikov–de Haas. Em 1930 ele montou o primeiro laboratório de criogenia da União Soviética em Kharkiv (Харків) na Ucrânia. Meissner ajudou na montagem de uma máquina de liquefazer hélio neste laboratório. Neste lugar Shubnikov pesquisou as propriedades magnéticas de hidrogênio sólido e descobriu os supercondutores do tipo II. Em 1937 ele foi vítima de uma “ação de limpeza” da NKVD (Comissariado do povo para assuntos internos). Baseado em acusações falsificadas, ele foi condenado à morte e foi fuzilado pelo regime de Stalin.

¹⁹ Rjabinin, J. N.; Schubnikow, L.W. "Magnetic properties and critical currents of superconducting alloys". *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*. **7** (1): 122–12., (1935).
Rjabinin, J. N.; Schubnikow, L.W. "Magnetic properties and critical currents of supra-conducting alloys". *Nature*. **135** (3415): 581–582. (1935). Bibcode:1935Natur.135..581R. doi:10.1038/135581a0

²⁰ J.E. Kunzler, E. Buehler, F.S.L. Hsu, J.H. Wernick: Superconductivity in Nb₃Sn at High Current Density in a Magnetic Field of 88 kgauss“ *Phys. Rev. Lett.* **6**, 89 (1961)

²¹ Alexei Alexeyevich Abrikosov (Алексе́й Алексе́евич Абрико́сов; 25/06/1928 – 29/03/2017)

De uma teoria²² de F. London segue que cada vórtice de Abrikosov abriga uma exata quantidade de fluxo magnético. Este *quantum de fluxo magnético* tem o valor

$$\Phi_1 = \frac{h}{|q|} \quad (10.5.2),$$

sendo h a constante de Planck e q a carga elétrica das partículas que transportam carga. Também o fluxo magnético através de um anel supercondutor é sempre um múltiplo inteiro do quantum de fluxo. Naturalmente esperar-se-ia que $|q|$ valesse uma carga elementar. Mas isto não é o caso. $|q|$ vale $2e$, e o valor do quantum de fluxo magnético vale

$$\Phi_1 = \frac{h}{2e} = 2,067833831(13) \times 10^{-15} \text{ Tm}^2 \quad (10.5.3).$$

Este valor está de acordo com uma explicação microscópica da supercondutividade elaborada por John Bardeen²³, Leon N Cooper²⁴ e John Robert Schrieffer²⁵. De acordo com esta teoria, BCS, as partículas que transportam carga no supercondutor são pares de eletros que se formam em temperaturas muito baixas. Estes objetos são chamados de pares de Cooper²⁶. É difícil entender a teoria BCS. Na próxima seção, descreveremos alguns detalhes das explicações teóricas da supercondutividade. A quantização do fluxo magnético foi observada de maneira independente por dois grupos de físicos experimentais²⁷.

Há uma força repulsiva entre os vórtices de Abrikosov e esta força tende a arrumá-los em redes regulares. Podem-se visualizar estas redes de várias maneiras. Uma maneira é com uma poeira ferromagnética espalhada na superfície de uma amostra.

Os grãos da poeira se acumulam nas saídas dos vórtices. O padrão dos montes de poeira é depois fixado com um filme de carbono e posteriormente analisado num microscópio eletrônico. A figura 10.5.7 mostra uma visualização de uma rede de vórtices de Abrikosov.

²² F. London: "A New Conception of Superconductivity" *Nature* **140** pp.793-7 (1937)

²³ John Bardeen (23/05/1908 – 30/01/1991) foi a única pessoa a ganhar dois prêmios Nobel de Física; o primeiro pela invenção do transistor e o segundo pela teoria BCS.

²⁴ Leon N Cooper (28/02/1930 -) elaborou não apenas a teoria BCS mas também a teoria BCM (Bienenstock, Cooper, Munro) que permite descrever a aprendizagem no córtex visual. O "N" entre Leon e Cooper é nome e não é abreviação.

²⁵ John Robert Schrieffer (May 31/05/1931 -) Sua contribuição para a teoria BCS foi de ter encontrado a maneira de descrever a totalidade dos pares de Cooper ao invés de considerar pares individuais. Sua atividade acadêmica estava principalmente concentrada na supercondutividade.

²⁶ Dever-se-iam chamar de pares de Fröhlich, pois Herbert Fröhlich (09/12/1905 – 21/01/1991) elaborou a proposta de que a interação de elétrons com fônons consegue gerar estados ligados de dois elétrons. Mas Cooper era o primeiro a mostrar que, devido ao princípio de Pauli, uma interação arbitrariamente fraca era suficiente para formar estados ligados de dois elétrons (Cooper L.N: *Phys.Rev.* 104 p. 1189 (1956)).

²⁷ Doll R., Näbauer M.: "Experimental Proof of Magnetic Flux Quantization in a Superconducting Ring" *Physical Review Letters* 7 (2) 51-52 (July 1961)

Deaver B., Fairbank W.: "Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders" *Physical Review Letters* 7 (2) 43-46 (July 1961)

Uma demonstração muito elegante da quantização de fluxo foi dada mais tarde por B. Lischke usando o efeito Aharonov-Bohm. Lischke, B. "Direct observation of quantized magnetic flux in a superconducting hollow cylinder with an electron interferometer." *Physical Review Letters*, 22(25), pp.1366-1368. (1969).

Quando se aumenta a intensidade do campo magnético externamente aplicado, aumenta a densidade dos vórtices de Abrikosov até atingir uma densidade máxima. Quando se tenta aumentar a intensidade do campo magnético ainda mais, o estado supercondutor é totalmente destruído na amostra toda. Correspondentemente o digrama das fases para estes supercondutores do tipo II tem três regiões: a plenamente supercondutora, que podemos chamar de fase Meissner, a mista com vórtices, que, seguindo uma sugestão de Pierre-Gilles de Gennes²⁸, se chama de fase Shubnikov, e a fase de condução comum, que podemos chamar de fase ôhmica. A fronteira entre as fases Shubnikov e Ohm em geral não é descrita por uma simples parábola. Os valores de campos críticos B_{C2} que aparecem na quarta coluna da tabela 10.5.1 informam o intercepto desta fronteira com o eixo vertical. A figura 10.5.8 mostra um exemplo de diagrama de fases de Nióbio.

Fig. 10.5.7 Rede de vórtices de Abrikosov revelada com poeira de nanopartículas de ferro. Ferro é evaporado numa atmosfera de He numa pressão de 45 Pa. No gás os átomos de Fe se juntam e formam cristais de aproximadamente 10 nm. Esta névoa de ferro se deposita numa amostra supercondutora. Depois carbono é evaporado para formar um filme que fixa o padrão de poeira. Imagem da Diplomarbeit de Uwe Köhne 1979 no Instituto de Óptica TU-Berlin., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1514896>

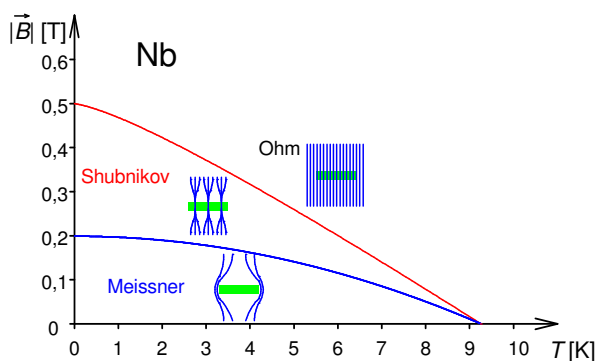
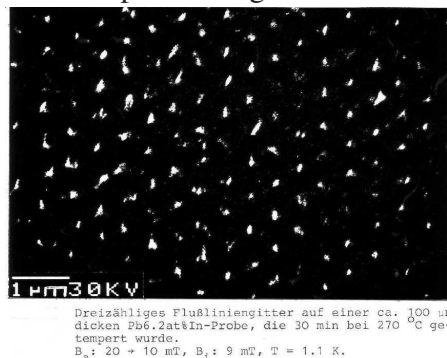


Fig. 10.5.8 Fases Meissner, Shubnikov e Ohm de uma amostra de Nióbio. O desenho da curva vermelha que separa a fase Shubnikov da fase Ohm é qualitativo e não exato.

Ao alterar valores do campo magnético externamente aplicado numa amostra na fase de Shubnikov, movem-se os vórtices de Abrikosov na amostra. Estes movimentos podem encontrar obstáculos em fronteiras entre cristalitos ou outras

impurezas. Estes pontos de fixação dos vórtices tornam os movimentos dos mesmos irreversíveis, e aparecem histereses no comportamento destes supercondutores do tipo II semelhantes às histereses nos materiais ferromagnéticos. São estes pontos de fixação que tornam as experiências de levitação magnética com supercondutores do tipo II diferentes da experiência que descrevi com o prato de chumbo. Com supercondutores do tipo II, as forças entre amostra supercondutora e ímã podem ser tanto repulsivas como também atrativas. Pode-se pendurar uma amostra supercondutora do tipo II nas linhas de campo magnético que atravessam a amostra em vórtices presos em pontos de fixação.

Em 1986 Georg Bednorz²⁹ e Karl Alex Müller descobriram que óxido de lantânio-bárico-cobre (LaBaCuO) se torna supercondutor com a temperatura extraordinariamente alta de

²⁸ Pierre-Gilles de Gennes (24/10/1932-18/05/2007) foi um físico com importantes trabalhos na área de polímeros e cristais líquidos.

²⁹ Georg Bednorz (nascido 16/05/1950) e Karl Alex Müller (nascido 20/04/1927) são recordistas em tempo curto entre descoberta importante (1986) e ganho de-prêmio Nobel (1987).

35 K. Pouco tempo depois, temperaturas críticas ainda mais altas foram encontradas em substâncias parecidas: em YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+x}$) com $T_c = 93\text{ K}$ ³⁰ e em BSCCO ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$) com $T_c = 108\text{ K}$. Trata-se de cerâmicas com estruturas extremamente complexas contendo cobre como íon negativo. Estas temperaturas críticas são mais altas que a temperatura de ebulição do nitrogênio N_2 (77 K). Esta descoberta foi muito festejada porque a geração de nitrogênio líquido é muito mais barata do que a geração de hélio líquido, o que torna estas substâncias boas candidatas para aplicações práticas³¹. Estes supercondutores de alta temperatura crítica são do tipo II.

A grande importância dos supercondutores do tipo II reside no fato de poderem suportar maiores valores do campo magnético e maiores valores da densidade de corrente. Com isto se abrem interessantes possibilidades de aplicação. Por exemplo, energia elétrica pode ser transportada sem gastos ôhmicos. Infelizmente não há isolamento térmico perfeito e conseqüentemente sempre aparecem gastos de energia para manter uma temperatura baixa. No caso dos supercondutores com temperaturas críticas de poucos kelvins, estes gastos seriam tão altos que uma substituição de cabos de transmissão convencionais por cabos supercondutores não seria vantajosa com os supercondutores de baixa temperatura crítica. Para os supercondutores de alto T_c , os gastos com refrigeração equivalem à metade dos gastos ôhmicos de cabos convencionais, e portanto cabos supercondutores começam a ser usados. Linhas de transmissão perto de Nova York (comprimento de 600 m, potência 574 MW) e em Essen (Alemanha, comprimento 1 km, potência 40 MW) foram instaladas a título de teste. Uma linha de transmissão supercondutora de 48 km para 50 MW na Coréia do Sul está em construção. Com estes cabos é vantajoso transmitir a energia com voltagens relativamente baixas, por exemplo, 10 kV e correntes elevadas. Desta maneira grandes transformadores se tornam desnecessários. Talvez a mais importante vantagem destes cabos supercondutores é o pequeno espaço necessário para transportar grandes potências. Então, em cidades densamente ocupadas, cabos supercondutores são vantajosos.

Uma outra aplicação dos supercondutores tipo II é em eletroímãs. Esta aplicação já está sendo usada em larga escala, por exemplo, em máquinas de diagnóstico médico por ressonância magnética nuclear. Tipicamente estas máquinas usam campos magnéticos de 7 T a 15 T e a geração de campo magnético tão intenso com eletroímãs convencionais significaria um gasto de energia enorme. A formação de imagens com ressonância magnética nuclear não somente salvou muitas vidas diagnosticando câncer, mas também contribuiu muito para o avanço das neurociências. Outras aplicações de eletroímãs supercondutores encontramos em aceleradores de partículas como no CERN, em experiências de fusão nuclear controlada e em espectrógrafos de massa.

A construção destes eletroímãs supercondutores é bastante complicada. Primeiramente não adianta enrolar um fio grosso para transportar a corrente. Sabemos que a supercorrente flui apenas numa camada muito fina da superfície. Então usa-se um número muito grande de fitas muito finas com espessura de aproximadamente $20\mu\text{m}$ no lugar de um fio grosso. Estas fitas supercondutoras são embutidas em um bom condutor, por exemplo, cobre. Cobre não é supercondutor. Esta matriz de cobre tem duas funções.

³⁰ M.K.Wu, J.R.Ashburn, C.J.Tornq, P.H.Hor, R.L.Meng: "Superconductivity at 93 K in a new Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure" *Phys. Rev. Lett.* 58 Nr.9 908-910 (1987)

³¹ O leitor pode ter notado que há uma temperatura crítica ainda mais alta na tabela 10.5.1 com a substância H_2S . Mas a pressão elevada que é necessária para atingir o estado supercondutor com H_2S torna esta substância inadequada para aplicações. Por enquanto a supercondutividade deste material foi observada somente em amostras minúsculas sendo pressionadas por uma ponta de diamante.

Em primeiro lugar aparecem enormes forças de Lorentz, que iriam arreventar as finas fitas supercondutoras. O cobre serve para sustentar as fitas mecanicamente. Em segundo lugar, há o perigo de que um repentino deslocamento de vórtice de Abrikosov gere localmente um pouco de calor, e com isto a fita em questão se torne ôhmica naquele lugar. O efeito Joule iria gerar ainda mais calor neste ponto e iria destruir o estado supercondutor das fitas vizinhas também. No fim das contas, todo o fio composto de fitas se tornaria ôhmico e queimaria. A matriz de cobre pode evitar este desastre. Como cobre é um bom condutor, ele pode por um curto tempo absorver a corrente no ponto onde uma fita se tornou ôhmica até este ponto voltar ao estado supercondutor.

Geralmente não se usam os supercondutores de alto T_c para eletroímãs. Estes materiais são cerâmicas e quebram facilmente. Enrolar um solenoide com fios de cerâmica não é fácil. Também pequenas deformações provocadas pelas forças de Lorentz poderiam quebrar estas fitas. Então a maioria dos eletroímãs supercondutores ainda usa materiais de T_c baixo. Ligas com Nióbio são frequentemente usadas.

É interessante ver como se operam estes eletroímãs. A bobina supercondutora forma um circuito totalmente fechado sem fonte. Mas, num determinado local deste circuito, instala-se uma resistência que permite aquecer um pequeno trecho do circuito e torná-lo ôhmico. Feito isto, pode-se injetar corrente na bobina com uma fonte de muito baixa voltagem e alta capacidade de fornecer corrente. A voltagem não precisa ser grande, pois somente a resistência dos fios de alimentação limitará a corrente. A figura 10.5.9a mostra este circuito na configuração de alimentar o solenoide com corrente. Assim que a corrente gera o campo magnético desejado, a resistência de aquecimento é desligada, a refrigeração torna o trecho perto da resistência novamente supercondutor e a corrente circula sem a fonte de alimentação (fig. 10.5.9b).

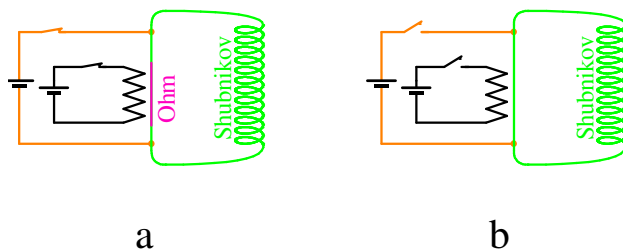


Fig. 10.5.9 (a) “Carregamento” de um eletroímã supercondutor. (b) Modo e operação permanente. Supercondutores são mostrados em verde; a parte transformada em condutor ôhmico em magenta e fio de cobre comum, em laranja. A figura mostra poucas espiras, porém a maioria dos eletroímãs tem milhares de espiras, e o fio supercondutor tem quilômetros de comprimento.

Se o eletroímã é para gerar altos valores de campo, deve se usar um supercondutor do tipo II, e o fio do solenoide se encontra na fase Shubnikov. Infelizmente nesta fase há processos dissipativos que degradam o campo com o passar do tempo por causa dos movimentos de vórtices. Pode-se expressar isto como se fosse uma resistência elétrica que levaria a um decaimento exponencial do campo: $\vec{B}(t) = \vec{B}_0 \exp\{-Lt/R\}$. Valores típicos da indutância L destas bobinas são algumas dezenas de Henry e valores típicos da constante de tempo ficam na faixa de meses. Com isto resulta uma resistência provocada pelo movimento dos vórtices na faixa de $10^{-6} \Omega$. Isto é um valor bem baixo considerando que o fio enrolado tem tipicamente muitos quilômetros de comprimento.

Há aplicações que requerem somente valores modestos do campo magnético, mas que precisam de extrema estabilidade do valor. Um exemplo é a balança de Kibble que discutimos na seção 8.3. Neste caso pode-se usar um condutor do tipo I no eletroímã e não há decaimento algum do campo magnético.

Outras aplicações são cavidades de ressonância para microondas. Estas cavidades são usadas em aceleradores de partículas. Excita-se um campo eletromagnético oscilatório

dentro da cavidade e as partículas a serem aceleradas atravessam a cavidade periodicamente e são aceleradas pelo campo elétrico em cada passagem. Com supercondutores a cavidade de ressonância consegue ter um fator de qualidade muito elevado. Lembramos da física II que o fator de qualidade de um oscilador amortecido é

$$Q = 2\pi \frac{\tau_d}{T_0} \quad (10.5.4),$$

sendo τ_d a constante de tempo do decaimento da energia da oscilação e T_0 , o período da oscilação não amortecida. Poder-se-ia esperar que numa cavidade de ressonância supercondutora de tipo I o fator de qualidade fosse infinito. Mas isto não é o caso. A ausência de resistência elétrica existe para situações estacionárias. Campos oscilatórios conseguem penetrar no supercondutor e provocam correntes de elétrons de condução comuns, e esta parcela de corrente dissipa energia. Mesmo assim os fatores de qualidade são bem elevados. Por exemplo, com uma frequência de 1,3 GHz consegue-se fazer uma cavidade com fator de qualidade de $Q = 5 \times 10^{10}$.

Há outras aplicações muito importantes da supercondutividade. Mas para poder entender os efeitos físicos responsáveis por estas aplicações, precisamos entender um pouco da teoria da supercondutividade. Enfrentaremos este tema difícil na próxima seção.

Exercícios

E 10.5.1: Deduza uma fórmula que descreve a corrente $I_{\text{Ohm}}(t)$ que flui no trecho ôhmico (magenta na fig. 10.5.9) do circuito do eletroímã supercondutor na fase de alimentação do solenoide.

E 10.5.2: Escreva os pontos de destaque desta seção.