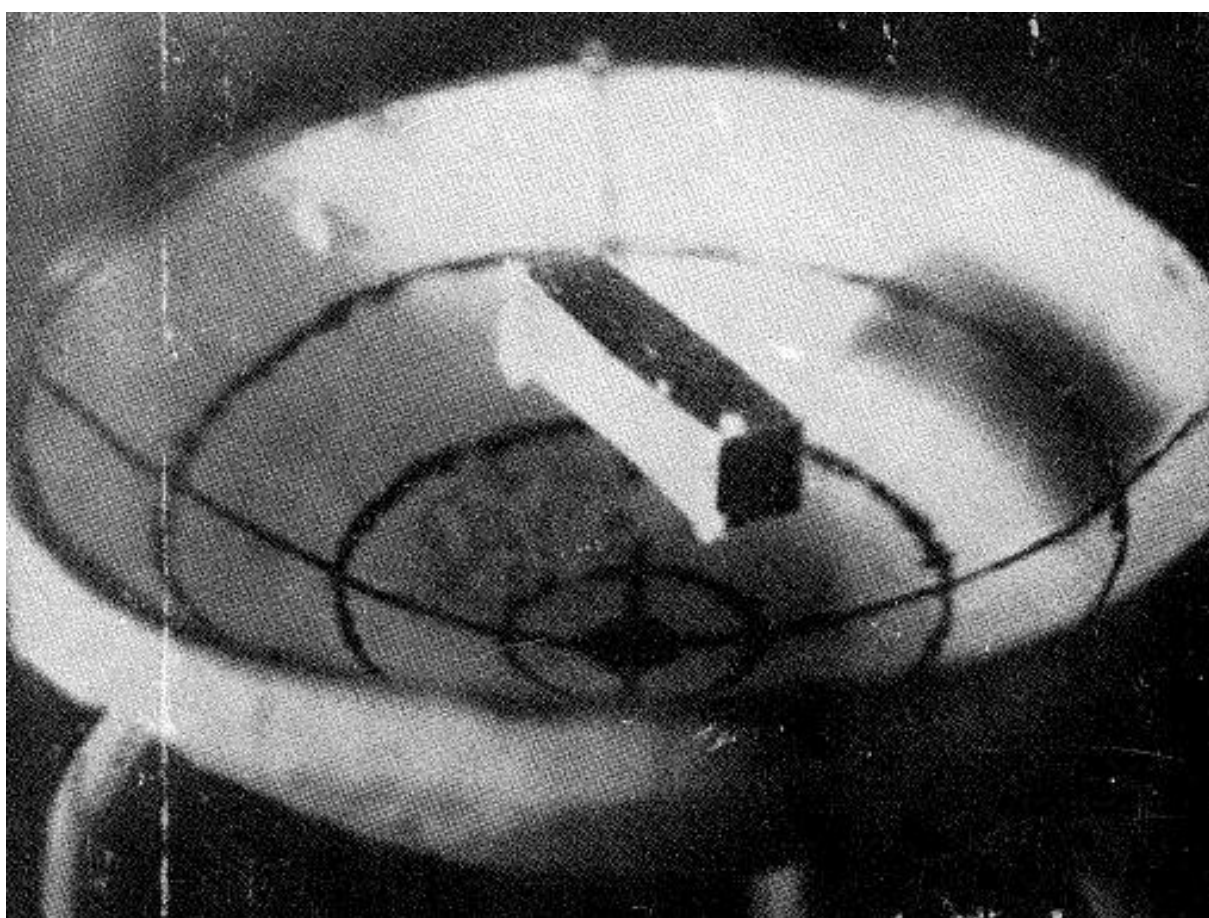


SUPERCONDUTIVIDADE

ESTE TEXTO CONSISTE, EM PARTE, DE UMA TRADUÇÃO RESUMIDA DE CAPÍTULOS DOS LIVROS DE A.W.B. TAYLOR, "SUPERCONDUCTIVITY" E DE M. McCLINTOCK, "CRYOGENICS".



Imã flutuante sobre prato côncavo de chumbo supercondutor.

1. Introdução

Assim que Kamerlingh Onnes teve sucesso na liquefação de hélio, principiou investigações sobre resistência elétrica de metais em baixas temperaturas. Em experimentos com mercúrio a 4,2 K, Onnes observou que a resistência caía para zero de forma abrupta, e nenhuma medida que fez deu algum sinal de resistência, nem mesmo com mercúrio de baixa pureza. Essa condição de perfeita condutividade elétrica desde então passou a se chamar de *supercondutividade*.

Muitos experimentos foram feitos objetivando encontrar uma resistividade residual em supercondutores. Até agora, entretanto, só foi possível colocar um limite nas observações ditado pela sensibilidade das medidas. Até o presente, encontrou-se que a resistividade de um supercondutor não é maior que aproximadamente 10^{-22} ohm cm. Para comparação, a resistência do cobre em baixas temperaturas é da ordem de 10^9 ohm cm.

A forma típica de uma curva de resistência em função da temperatura para um supercondutor é mostrada na Fig. 1. Para metais puros, a transição para o estado supercondutor se dá numa temperatura bem definida – denominada de *temperatura de transição*, T_C – e ocorre num intervalo muito pequeno, de cerca de 0,001 K. . Para esses materiais, portanto, uma temperatura de transição bem definida, T_C , pode se atribuída. Para metais impuros ou tensionados, ou para ligas, a transição ocorre em intervalos de temperatura maiores.

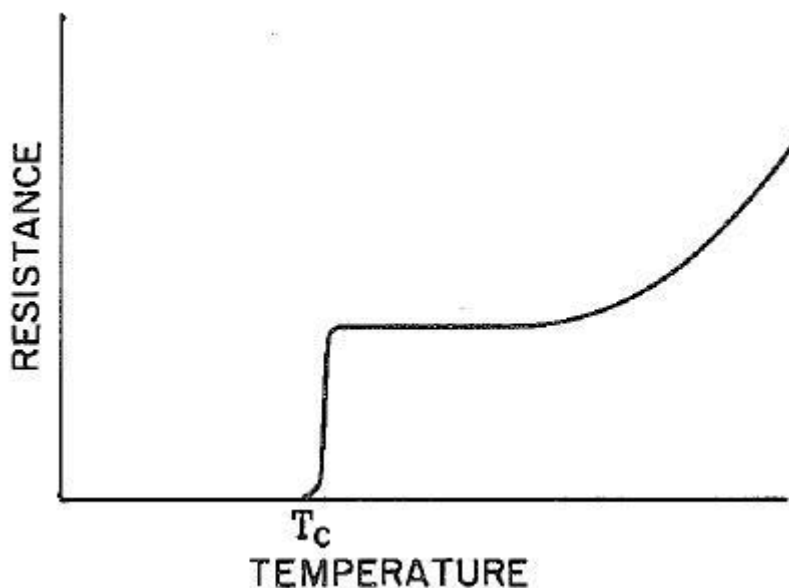


Figura 1. Resistência elétrica de um supercondutor próxima da temperatura de transição

Os metais supercondutores são mostrados na tabela periódica da Fig. 2. As temperaturas de transição se estendem desde 0,14 K, para irídio, até 8,2 K, para tecnécio. É interessante notar que um supercondutor formado por mais de um elemento não é restrito a combinações em que os componentes sejam supercondutores. Assim como em ferromagnetismo, essa propriedade pode ocorrer em ligas formadas por elementos não ferromagnéticos.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1 H							2 He		
2	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
3	11 Na	12 Mg	13 Al 1.19°	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti 0.39°	23 V 5.03°	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni
	29 Cu	30 Zn 0.86°	31 Ga 1.09°	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr 0.55°	41 Nb 9.09°	42 Mo 0.92°	43 Tc 8.22°	44 Ru 0.49°	45 Rh	46 Pd
	47 Ag	48 Cd 0.52°	49 In 3.41°	50 Sn 3.72°	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
6	55 Cs	56 Ba	57 La 4.9, 6.3	72 Hf 0.17°	73 Ta 4.48°	74 W	75 Re 1.70°	76 Os 0.66°	77 Ir 0.14°	78 Pt
	79 Au	80 Hg 3.95, 4.15	81 Tl 2.39°	82 Pb 7.19°	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th 1.37°	91 Pa	92 U 0.68, 1.8	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm

Figura 2. Tabela periódica mostrando os metais supercondutores.

2. Supercondutores de alta T_C

Nos anos que se seguiram à descoberta da supercondutividade em mercúrio, quase todos os elementos metálicos com propriedades supercondutoras foram identificados, assim como as investigações se estenderam às ligas metálicas. As temperaturas de transição dos materiais estudados, entretanto, pouco excediam a uma dezena de graus Kelvin. Até que em 1973, na liga Nb_2Ge , supercondutividade foi observada, com $T_C = 23$ K.

Surpreendentemente, descobriu-se, a partir de 1986, que alguns materiais cerâmicos, isolantes ou de alta resistividade à temperatura ambiente, podem apresentar supercondutividade com temperaturas de transição passando de uma centena de graus K. Alguns desses materiais são especificados na Tabela I com sua respectiva T_C .

Tabela I. Alguns supercondutores e respectivas T_C .

Material	T_C (K)
$Nd_{1,85}Ce_{0,15}CuO_4$	24
$LaBaCuO_4$	36
$YBa_2Cu_3O_7$	92
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_9$	110
$Hg_{0,2}Tl_{0,8}Ca_2Ba_2Cu_3O$	139

3. Propriedades magnéticas de supercondutores

Efeitos muito interessantes são observados quando se aplica um campo magnético num supercondutor. Supercondutividade pode ser destruída pela presença de um campo magnético. A intensidade do campo que leva a isso depende da natureza do supercondutor. Essa intensidade é chamada de *campo crítico* ou *campo de limiar*. Se o valor do campo crítico para um supercondutor for lançado em gráfico em função da temperatura, teremos uma curva aproximadamente parabólica, como a curva da Fig. 3, para mercúrio. A curva separa o estado supercondutor do estado normal como pode-se ver na figura.

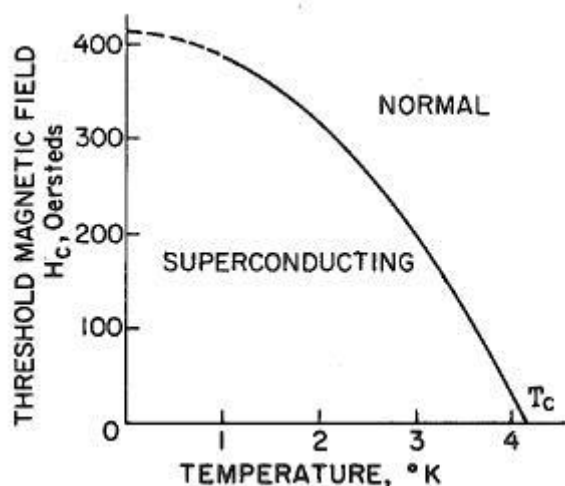


Figura 3. Curva de campo crítico para o mercúrio.

A Fig. 4 mostra a curva crítica para vários supercondutores. Chumbo, por exemplo, é um supercondutor abaixo de 7,2 K na ausência de campo, mas só

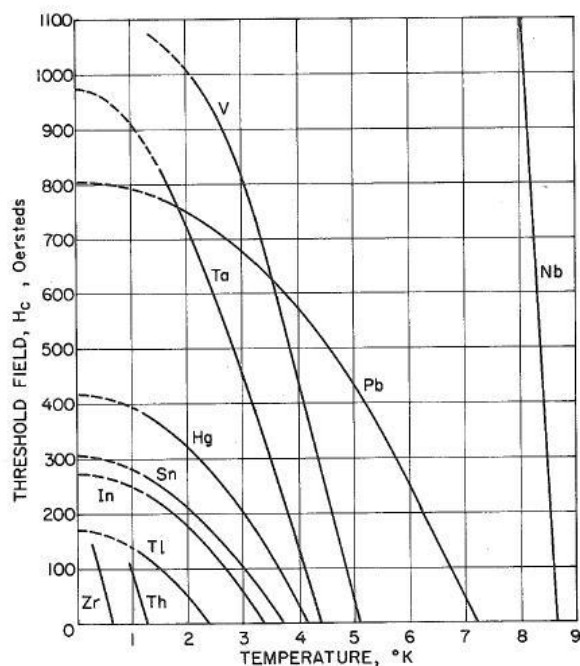


Figura 4. Curvas de campo crítico para vários supercondutores.

abaixo de 2 K para 750 Oe. A transição supercondutora em campo magnético zero é chamada de *temperatura de transição*, enquanto pela ação do campo é chamada de *temperatura crítica*.

A transição do estado supercondutor para o estado normal também pode ser causada pela corrente elétrica que circula no supercondutor. Em metais puros, em volumes não muito pequenos, a extinção é causada pelo campo magnético gerado pela própria corrente. Essa corrente crítica, num fio cilíndrico, é meramente aquela que produz, na sua superfície, o campo magnético crítico. Essa relação é chamada de regra de Silsbee.

Quando um material passa ao estado supercondutor, suas propriedades magnéticas sofrem uma mudança radical. O entendimento dessas propriedades é básico para uma melhor compreensão do estado supercondutor. Mas comecemos com um experimento que inicialmente não envolve materiais supercondutores.

O experimento de Gouy

Considere o experimento ilustrado na Fig. 5. Uma amostra cilíndrica de um material *não ferromagnético* é suspensa entre os dois polos de um ímã. A terminação de baixo da amostra está mergulhada na parte mais forte do campo e a de cima encontra-se numa região em que o campo é aproximadamente zero. Observa-se que para a maioria das substâncias não ferromagnéticas, uma força é exercida verticalmente; para baixo se a substância for *paramagnética* e, para cima, se for *diamagnética*.

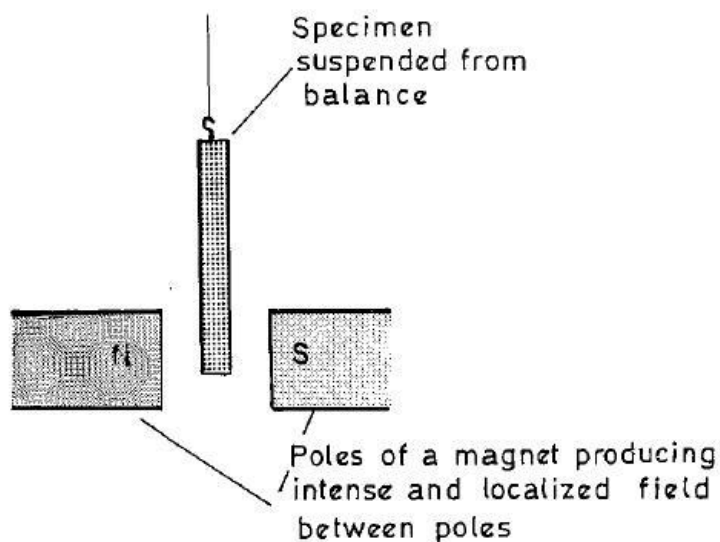


Figura 5. Experimento de Gouy.

Do ponto de vista quantitativo, com o experimento de Gouy, pode-se determinar a *susceptibilidade magnética* do material. A relação é

$$X = 2n_0F/B^2A,$$

onde B é a indução magnética no extremo inferior do cilindro, F é a força vertical, A é área da seção reta e n_0 o poder indutor específico do vácuo. Portanto, X é adimensionada.

Para a maioria dos materiais, X é muito pequena, da ordem 10^{-5} a 10^{-8} . Em particular, esse é o caso para metais no estado normal. *Entretanto, materiais no estado supercondutor são fortemente diamagnéticos com $X = -1$ para todos os supercondutores.* Consequentemente no experimento de Gouy, a força em um cilindro supercondutor é entre 10^5 e 10^6 vezes maior que no cilindro no estado normal!

As forças que um corpo diamagnético está sujeito num campo magnético não uniforme podem ser representadas em termos de *correntes de magnetização induzidas*. Quando não existe campo magnético aplicado no corpo, o movimento das cargas elétricas no corpo (elétrons) não produz nenhuma corrente. Quando o campo é aplicado, sua ação muda o movimento das cargas resultando em correntes fluindo no corpo.

Correntes de magnetização induzidas em supercondutores

A Fig. 6 ilustra as correntes induzidas em um cilindro supercondutor longo quando submetido a um campo magnético uniforme. Aqui as correntes de magnetização são correntes superficiais fluindo em torno do cilindro.

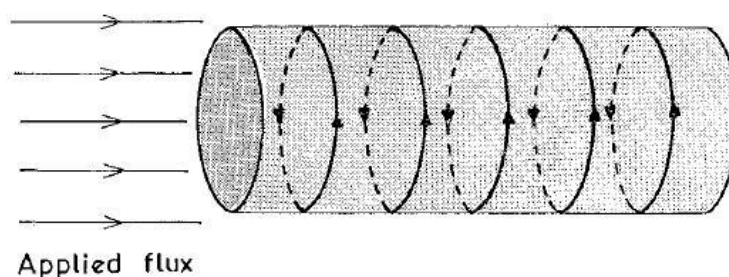


Figura 6. Correntes de magnetização induzidas num cilindro supercondutor longo.

Assim como toda corrente elétrica, as correntes de magnetização experimentam forças devidas a um campo magnético e, também, geram campos magnéticos. Este é outro efeito das correntes de magnetização. O campo gerado por essas últimas tem o nome de *campo magnético induzido*.

O efeito Meissner

Representações das linhas de campo geradas por correntes de magnetização induzida em um cilindro e uma esfera, ambos no estado supercondutor, encontram-se na Fig. 7. *O campo total gerado é a soma dos campos aplicado e induzido.*

No caso de um supercondutor, esse campo total exhibe um comportamento notável. As linhas de campo são quase completamente excluídas do interior do espécime. A virtual exclusão das linhas de campo magnético de um sólido no estado supercondutor foi descoberta em 1933 por Meissner e é conhecida como *efeito Meissner*.

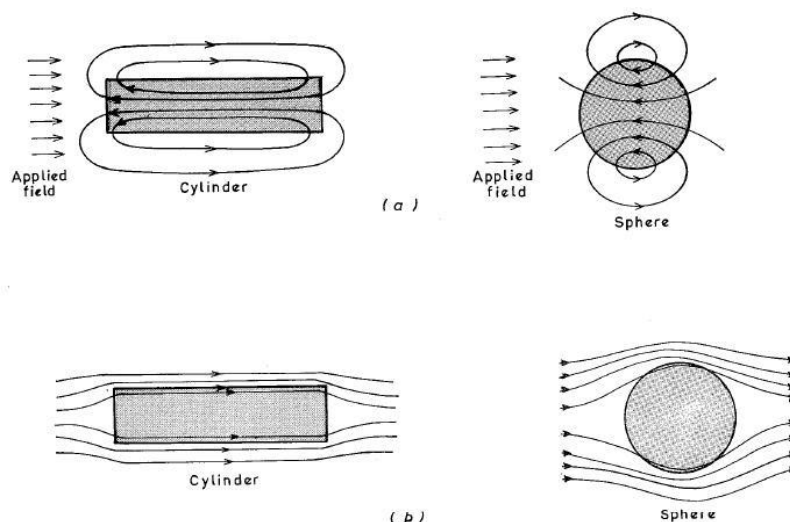


Figura 7. (a) O campo magnético induzido em um cilindro e em uma esfera supercondutores em um campo aplicado homogêneo. (b) O campo total (campo induzido mais campo aplicado).

Conforme ilustra a Fig. 7, algumas linhas de campo são completamente externas aos espécimes e as que penetram são confinadas numa região muito estreita próxima à superfície. A Fig. 8 mostra como a indução magnética decai com a profundidade no supercondutor tornando-se completamente nula no seu interior. A distância em que o campo penetra no supercondutor, contada a partir da superfície é conhecida como *profundidade de penetração*. Observa-se que essa grandeza não depende da forma do objeto supercondutor mas somente na sua composição e temperatura. A zero Kelvin a profundidade de penetração é estimada em 10^{-5} mm e aumenta com o aumento da temperatura.

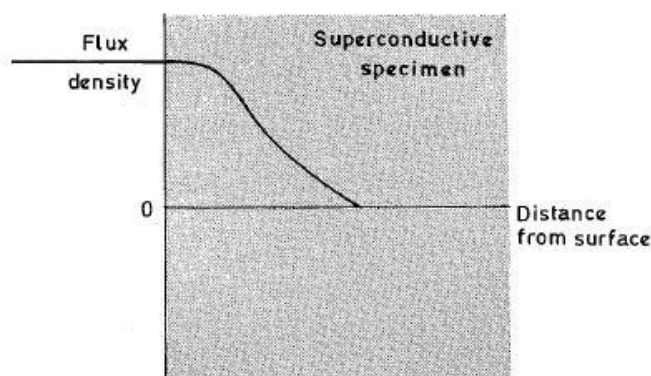


Figura 8. Profundidade de penetração do campo magnético na superfície de um supercondutor.

Um experimento de verificação do efeito Meissner

Vamos considerar então esse efeito num arranjo experimental como o da Fig. 7 que mostra um corpo cilíndrico longo supercondutor de diâmetro muito maior que a profundidade de penetração do campo. Um campo magnético é aplicado paralelamente ao eixo do cilindro. O cilindro é envolvido por um conjunto de espiras de um metal normal ligado a um galvanômetro.

Se o corpo estiver no estado supercondutor (Fig. 9.a), as linhas de campo são expulsas e se arranjam em sua volta. Se o cilindro estiver no estado normal (Fig. 9.b), as linhas de campo atravessam o cilindro e sua configuração é a mesma quando o cilindro não está presente (Fig. 9.c).

Se o experimento for iniciado com o corpo no estado normal (Fig. 9.b) e por resfriamento passar ao estado supercondutor (Fig. 9.a) haverá uma mudança abrupta no padrão de indução magnética e, devido à variação de fluxo magnético, uma corrente irá circular no galvanômetro.

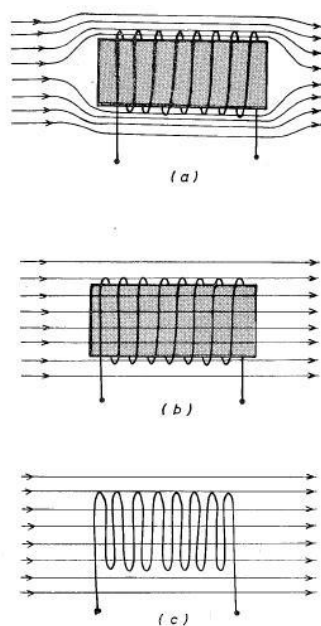


Figura 9. Arranjo experimental para observação do efeito Meissner.

Efeitos de força

As correntes de magnetização quando fluem num supercondutor em que um campo magnético está aplicado, produzem efeitos similares a todos os outros tipos de corrente. Existe, portanto, a possibilidade de que um espécime supercondutor seja sujeito a uma força quando sujeito a um campo magnético.

No interior de um supercondutor a indução magnética é nula. Não existem correntes de magnetização dentro do corpo e, portanto, não existem forças nessa região. As correntes de magnetização fluem apenas na superfície do corpo e qualquer força no corpo se aplica, portanto, na sua superfície.

É claro que, dependendo da forma do supercondutor, as forças nos vários pontos da superfície anulam umas às outras e a força total exercida é nula. Uma esfera, num campo uniforme é um exemplo disso. Entretanto, para determinadas formas de supercondutores e configurações de campo magnético, essa força resultante pode não ser nula. Um exemplo surpreendente dessas forças é a esfera supercondutora flutuante de Simon, mostrada na Fig. 10. Neste caso, a corrente circula nos anéis supercondutores e o campo magnético gerado onde se encontra a esfera, não sendo uniforme, produz uma força resultante que se contrapõe à força da gravidade.

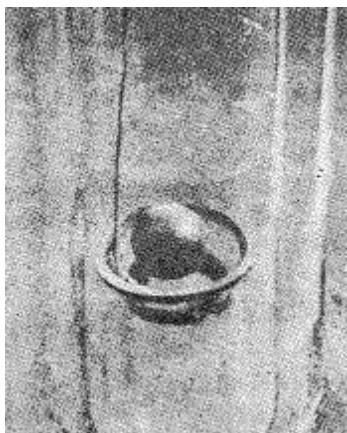


Figura 10. A esfera supercondutora de Simon.