

T10: Criogenia e Supercondutividade

Ana Carolina Cabral Camara PL2

Objetivos:

- trabalhar com a criogenia
- medir resistências muito pequenas
- observar fenômenos relacionados com a supercondutividade

Fundamentos Teóricos

→ Propriedades dos supercondutores

supercondutor → Temperatura Crítica (T_c): temperatura abaixo da qual a amostra se torna supercondutora (em campo magnético).

Quando $T < T_c$ e $B > B_c$ (campo crítico):

$$B_c(T) = B_0 \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right), \quad B_0 = \text{valor assintótico do campo crítico quando } T \rightarrow 0K.$$

→ Espeto Meissner e distinção condutor perfeito / supercondutor

condutor normal:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{j} : \text{densidade de corrente} \\ \sigma : \text{condutividade elétrica} \\ \vec{E} : \text{campo elétrico} \end{array} \right.$$

metais:

$$\vec{E} = \rho \vec{j}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} : \text{resistividade elétrica}$$

- Condutor Perfeito: (resistência nula)

2ª Lei de Newton:

$$m \vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\vec{j} = n e \vec{v}$$

↓
densidade elétrica
de condução

$$\vec{E} = \frac{m}{n e^2} \frac{d\vec{j}}{dt} = \mu \frac{d\vec{j}}{dt}$$

$$\text{onde } \mu = \frac{m}{n e^2}$$

Se o condutor perfeito estiver sujeito a um campo magnético variável:

$$\nabla \times \vec{E} = -\dot{\vec{B}}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu (\vec{j} + \epsilon \dot{\vec{E}})$$

$$\Rightarrow \lambda^2 \nabla \times \vec{j} = -\dot{\vec{B}} \quad (\text{assumindo } \epsilon \dot{\vec{E}} \sim 0)$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \lambda^2 \nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = -\dot{\vec{B}} \\ \nabla^2 \vec{B} = \dot{\vec{B}} \end{array} \right.$$

$$\text{solução: } \vec{B}(z) = \vec{B}(0) e^{-\frac{z}{\lambda}}$$

distância de penetração do campo magnético abaixo da superfície

→ quando condutor atinge supercondutividade, o seu campo magnético é "congelado". ~~independentemente do q~~

→ alterando o campo exterior sem gerar correntes para manter o campo interno constante para profundidades para além de λ .

Para um condutor perfeito $n \approx 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ (aproximadamente um elétron de condução por átomo) $\Rightarrow \lambda \approx 100 \text{ \AA}$

Os supercondutores têm sempre campo magnético interno nulo (efeito Meissner)

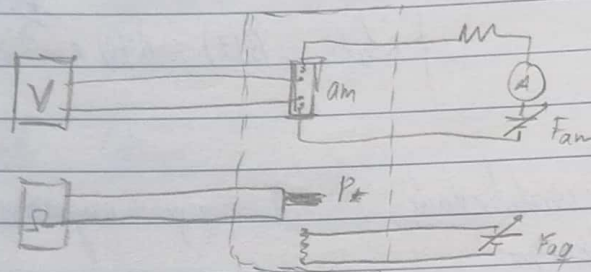
$$\text{Nos supercondutores: } \vec{B}(z) = \vec{B}(0) e^{-\frac{z}{\lambda}}$$

$\Rightarrow B \approx 0$ quando $z > \lambda \rightarrow$ profundidade de penetração de London

Procedimento Realizado

- filme de BiPbSrCaCuO ($T_c \sim 108 \text{ K}$)
- fonte de alimentação ($0-1.5 \text{ V}$, $0-1 \text{ A}$)
- amperímetro
- resistência de proteção da amostra (comercial: $100 \Omega - 1 \text{ k}\Omega$)
- voltímetro digital
- termómetro de platina
- ohmímetro para medida da resistência do termómetro
- tabela de calibração do termómetro
- câmara experimental (vaco vácuo)
- gaseira "thumo" com azoto líquido
- fonte de alimentação do aquecedor colocado na câmara ($0-500 \text{ mA}$)

- ⚠ Cuidados a tomar no manuseio de Azoto líquido
- Acentuar acentos indelegados da pressão associada à ebulição do azoto.
 - Evitar o poder de expansão do azoto (risco de asfixia)
 - Cuidado com copos e olhos → Risco de Queimadura



- ☐ Verificar se as ligações elétricas estão corretas
- ☐ Ajustar a corrente da amostra para 50mA
- ☐ Introduzir o azoto líquido no interior da garrafa "Huaan" com o auxílio do docente.
- ☐ Introduzir a câmara na garrafa
- ☐ Registrar, a intervalos de temperatura convenientes, o valor da tensão da amostra ($V = RI$).
- ☐ Determinar o máximo possível de pontos na vizinhança da transição supercondutora para uma determinação rigorosa de T_c .
- ☐ Mergulhar a câmara no azoto ~~azoto~~ para atingir $T \sim 100K$.
- ☐ Aquecer a câmara, levantando-a um pouco acima do azoto líquido e ligar o aquecedor.
- ☐ Aumentar a corrente lentamente no aquecedor, à medida que for necessário.
- ☐ Registrar os valores de tensão na amostra, a intervalos de temperatura convenientes.

13/12/2021

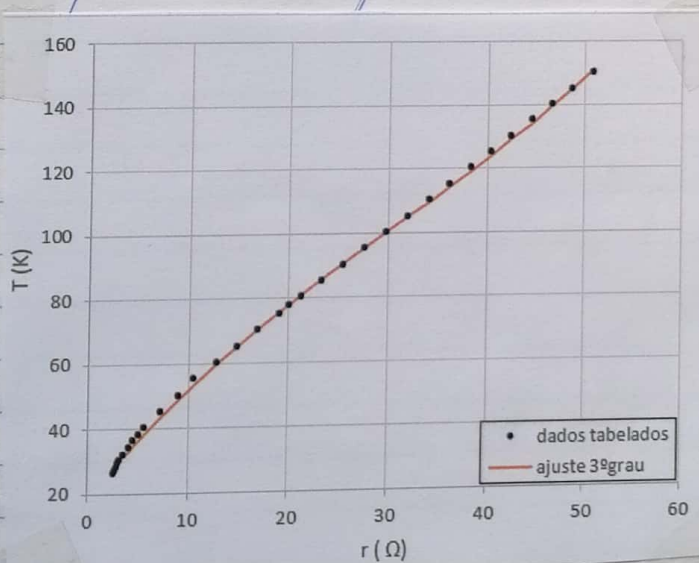
Resultados retirados em aquecimento.

Resultados e Análise de Dados

Com a ajuda dos docentes, foi introduzido o acetato líquido na garrafa "thermo". Observou-se que a resistência do termómetro de platina começou a diminuir imediatamente, dado que o acetato líquido se encontrava a uma temperatura muito baixa.

Esperou-se alguns minutos até a tensão se anular. Após a anulação da tensão, aqueceu-se a amostra, ligando e desligando o aquecedor. Observaram-se pares de pontos (V, r).

No laboratório estava disponível uma tabela com os dados de calibração do termómetro de platina. Utilizando esses dados, foi traçada uma curva da temperatura, $T(K)$, em função de $r(\Omega)$ de modo a obter uma equação de conversão da resistência para temperatura. Os dados tabelados e o ajuste de 3º grau obtido apresentaram-se representados de seguida.

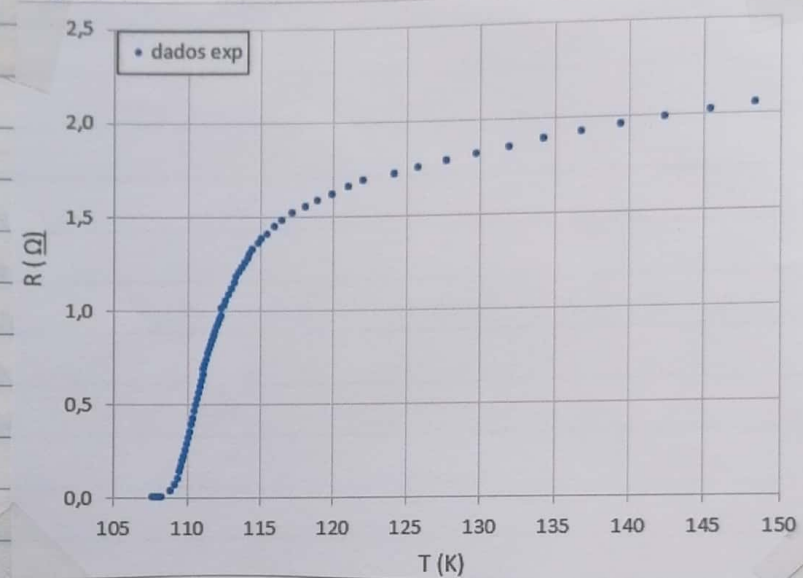


A equação de conversão obtida foi da forma $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$, cujos parâmetros foram:

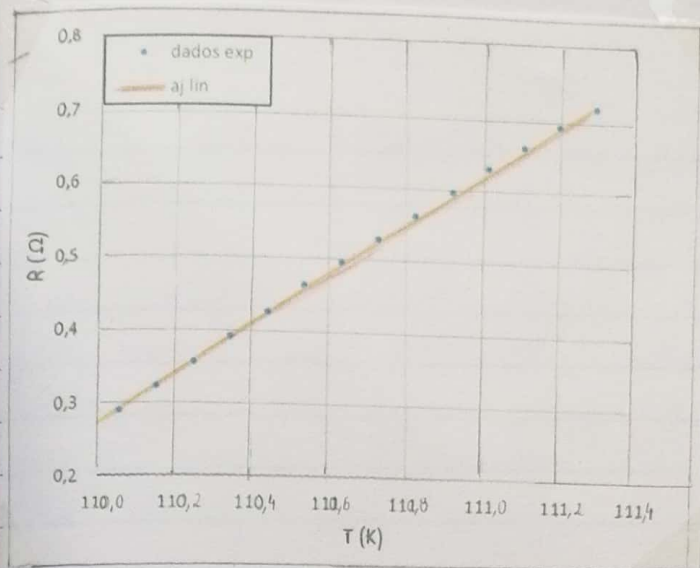
$$a = (0,006 \pm 0,001) ; \quad b = (-0,05 \pm 0,01) ; \quad c = (3,8 \pm 0,1) ; \\ d = (18,7 \pm 0,6)$$

Nota: foi escolhido um ajuste de 3º grau por que este era o menor grau que melhor representava a gama.

Pela lei de Ohm $R = V/I$, a partir dos dados de V recolhidos e dado que a corrente era constante ($I = 0.30 \pm 0.01 \text{ A}$), os valores da tensão, V , foram convertidos em resistências, $R(\Omega)$.
 Aplicando a equação de calibração de terceiro grau mencionada anteriormente, converteram-se os dados $R(\Omega)$ em $T(K)$.
 Traçou-se o gráfico dos dados experimentais, tendo obtido o seguinte

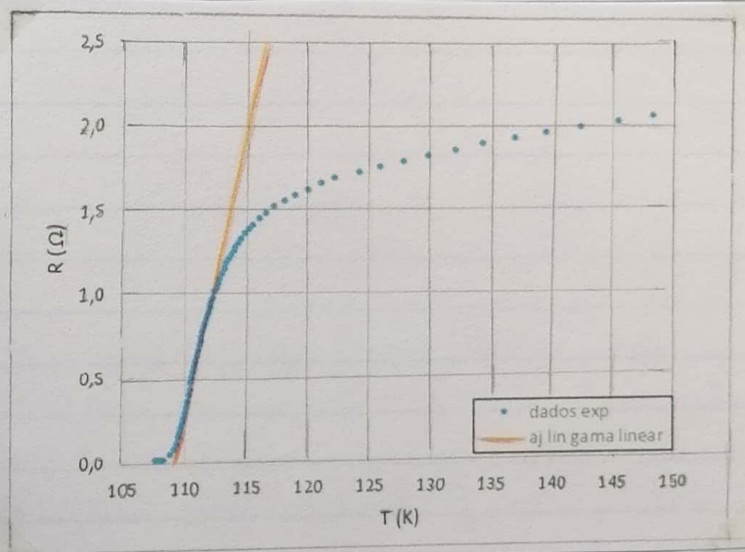


Observa-se claramente que há um desvio da resistência à medida que a temperatura diminui. De facto, existe um valor limite de temperatura para o qual a resistência passa a ser nula: a temperatura crítica, T_c . Para valores de T inferiores a T_c , a resistência é sempre nula. De modo a calibrar este valor, utilizou-se a gama de dados $T \in [109.58 ; 111.30]$, traçando-se um ajuste, dado esta gama apresentar uma tendência linear. O gráfico obtido apresenta-se a seguir, juntamente com o gráfico da gama total dos dados experimentais e com este ajuste, de modo a facilitar a compreensão da gama que está a ser utilizada.



parâmetros do ajuste linear

m	0,344	-37,6	b
$u(m)$	0,003	0,3	$u(b)$
R^2	0,9990	0,006	$u(y)$



Nota: devido a problemas de impressão, os gráficos acima ficaram com qualidade inferior. As linhas nos gráficos foram retocadas à mão para uma melhor percepção.

A temperatura crítica será dada, aproximadamente, pela interseção da reta de ajuste com a linha $R=0$. Portanto, $T = -\frac{b}{m}$.
O valor obtido foi portanto

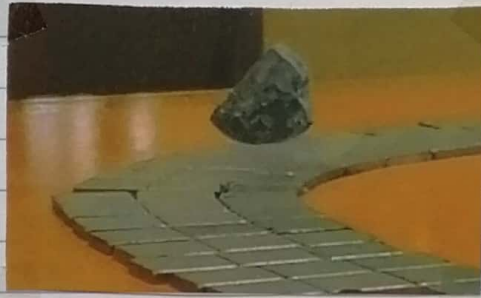
$$T_c = (109 \pm 1) \text{ K}$$

onde a incerteza foi calculada utilizando a equação de propagação de incertezas.

No protocolo é indicado que a amostra (filme de BiPbSrCaCu) apresenta uma temperatura crítica de cerca de 108 K. Tomando

este valor como referência, o erro experimental obtido foi igual a 1%.

Na segunda parte da atividade experimental, observa-se uma demonstração do efeito Meissner. Mergulhando uma pequena amostra em azoto líquido, verifica-se que esta levanta ~~o~~ quando posicionada numa pista que continha 3 linhas de ímãs muito fortes. Foi tirada uma fotografia para representar este inicial fenômeno:



Dito, este fenômeno ocorre porque a amostra se encontra a temperaturas extremamente baixas e o seu campo magnético anula-se. Por outro lado, quando o campo magnético volta a ser não nulo, com o aumento de temperatura, a amostra deixa de levantar.

Conclusão

Com esta atividade foi possível calcular um valor experimental da temperatura crítica de uma amostra BiPbSrCaCuO . O valor obtido foi $T_c = (104 \pm 1) \text{ K}$ com uma incerteza relativa de 1% e um erro percentual igual a 1%. Obtém-se também a curva $R(T)$, concluindo que a resistência diminui à medida que T decresce, até atingir T_c .

Na parte final da atividade experimental, observa-se o fenômeno de levitação de uma pequena amostra metálica (efeito Meissner).