

Introdução à Física do Estado Sólido

Física Moderna II-B

Caetano R. Miranda ***AULA 24 – 17/11/2022***

Carlos A. Martins Jr.



sampa



crmiranda@usp.br

Cronograma - revisado

| CRONOGRAMA TENTATIVO - Introdução à Física do Estado Sólido - Física Moderna IIB - 2S 2022 | | | | | |
|--|---------|--|---------|---|--------|
| DATA | aula n° | Segundas (19h - 21h) - Sala 2001 - Ala Central | aula n° | Quartas (21h - 23h) - Sala 2001 - Ala Central | DATA |
| 15-Aug | | | 1 | Apresentação - Curso | 18-Aug |
| 22-Aug | 2 | Revisão - Partículas e ondas - Chocolate | 3 | Átomos e Ions (Elétrons em átomos) - Tabela Periódica | 25-Aug |
| 29-Aug | 4 | Átomos e Ions (Elétrons em átomos) - Simulação | 5 | Moléculas e sólidos (Elétrons em sólidos) - impressão 3D | 01-Sep |
| 05-Sep | Feriado | Independência do Brasil. Não haverá aula. | Feriado | Independência do Brasil. Não haverá aula. | 08-Sep |
| 12-Sep | 6 | Ordem e Simetria | 7 | Ondas em cristais – Estruturas cristalinas - Corte/Colar - Origem | 15-Sep |
| 19-Sep | 8 | Estruturas - Átomos em cristais - VR1 | 9 | Estruturas - Átomos em cristais - VR2 | 22-Sep |
| 26-Sep | 10 | Oficina - Construção Oculus VR | 11 | BNCC & Wikipédia | 29-Sep |
| 03-Oct | 12 | Vibrações térmicas e Fonons | 13 | Vibrações térmicas e Fonons | 06-Oct |
| 10-Oct | 14 | Elétrons livres | 15 | Elétrons livres | 13-Oct |
| 17-Oct | 16 | Condutividade elétrica e teoria de bandas | 17 | Condutividade elétrica e teoria de bandas | 20-Oct |
| 24-Oct | 18 | Semicondutores | 19 | Semicondutores | 27-Oct |
| 31-Oct | 20 | Junção PN - Criação Jogos | 21 | Junção PN | 03-Nov |
| 7/11 | 22 | Dispositivos Eletrônicos / Infográfico | 23 | Magnetismo - Projeto | 10-Nov |
| 14/11 | Feriado | Dia - República. Não haverá aula. | 24 | Supercondutividade - Projeto - Escolha do Tema | 17-Nov |
| 21/11 | 25 | Nanotecnologia | 26 | COPA | 24-Nov |
| 28/11 | 27 | COPA | 27 | Materiais quânticos e energia | 01-Dec |
| 05-Dec | 29 | COPA | 30 | Projeto - Acompanhamento | 08-Dec |
| 12-Dec | 31 | Defesa - PROJETO | 32 | Defesa - PROJETO | 15-Dec |

ENTREGA 1

ENTREGA 2

ENTREGA 3

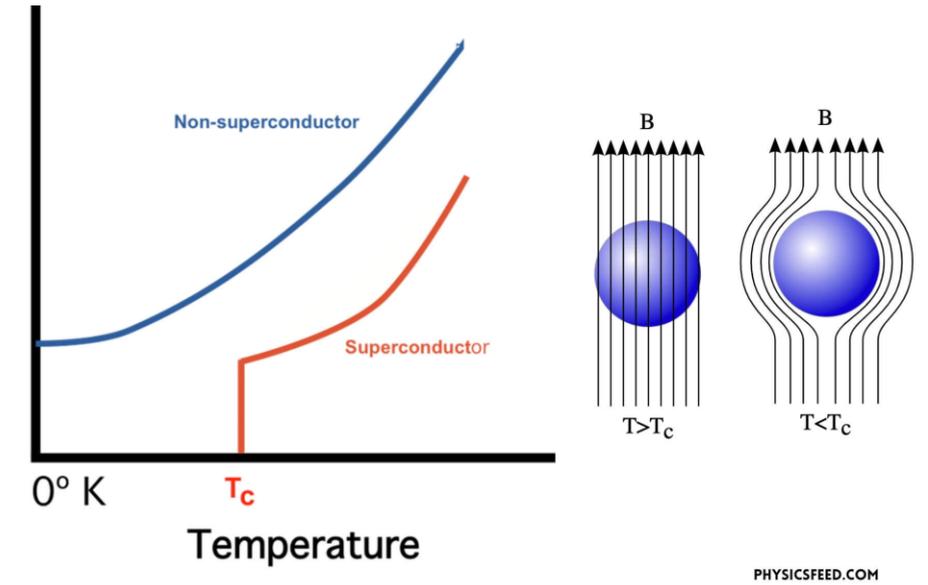
PROJETO

Material baseado no:

Capítulo 10 do Kittel (Introduction to Solid State Physics – 8ª edição)

Capítulo 10 – Física Moderna – Paul A. Tipler & Ralph A. Llewellyn

Supercondutividade



From one transistor...

Margaret Hamilton presents the listings of the software she and her team developed for the transistor-based Apollo guidance computer.



Capa da Science de amanhã (18/11/2022)



EDITORIAL

Shockley was a racist and eugenicist

This week's issue on the 75th anniversary of the transistor describes a triumph of both basic and applied science. What started out as studies on the fundamental physics of silicon led to the device that makes it possible to read this article online. The coinventor of the transistor, William Shockley, who along with John Bardeen and Walter Brattain won the 1956 Nobel Prize in Physics, is correctly recognized as a primary architect of the computer age. Gordon Moore (cofounder of Intel Corporation) famously said that Shockley put the silicon in "Silicon Valley." Appallingly, Shockley devoted the latter part of his life to promoting racist views, arguing that higher IQs among Blacks were correlated with higher extents of Caucasian ancestry, and advocating for voluntary sterilization of Black women. At the time, *Science* did not condemn Shockley for what he was: a charlatan who used his scientific credentials to advance racist ideology.

The failure of *Science* to condemn Shockley began in 1968, when it published a letter lamenting the fact that he was prohibited from speaking at the Polytechnic Institute of Brooklyn. The letter repeated the familiar trope that Shockley was simply asking questions about the role of race in intelligence.

overtly in favor of eugenics as was Shockley, but he was a strong advocate for genetic determinism, even claiming at the behest of the cigarette industry that tobacco itself was not harmful because genetics determined whether smokers would ultimately contract lung cancer.

Following Shockley's death in 1989, *Nature* correctly called out his racism in an obituary, but then published a letter from Seitz defending Shockley and claiming that the reason Shockley became a eugenicist was because of physical trauma he experienced in a near-fatal car accident. When *Science* wrote about this dustup, it referred to Shockley's ideas as merely "unpopular" and "extremely controversial." It then ran a letter from an even more notorious eugenicist, J. Philippe Rushton,

who argued that by merely covering the disagreement at *Nature*, *Science* was delivering an "ad hominem attack." In addition to an ill-advised decision to publish Rushton's letter, *Science* posted a response saying, "no criticism of Shockley was intended." Yikes.

Looking back, it's clear that what was intended as an attempt to make room for dissent and discussion only served to abet Shockley and his cohorts in their effort to build support for eugenics. *Science* gave them a platform and inadequate scorn. The les-

"The process of science is one of continual revision, but it's also one that must have a conscience."



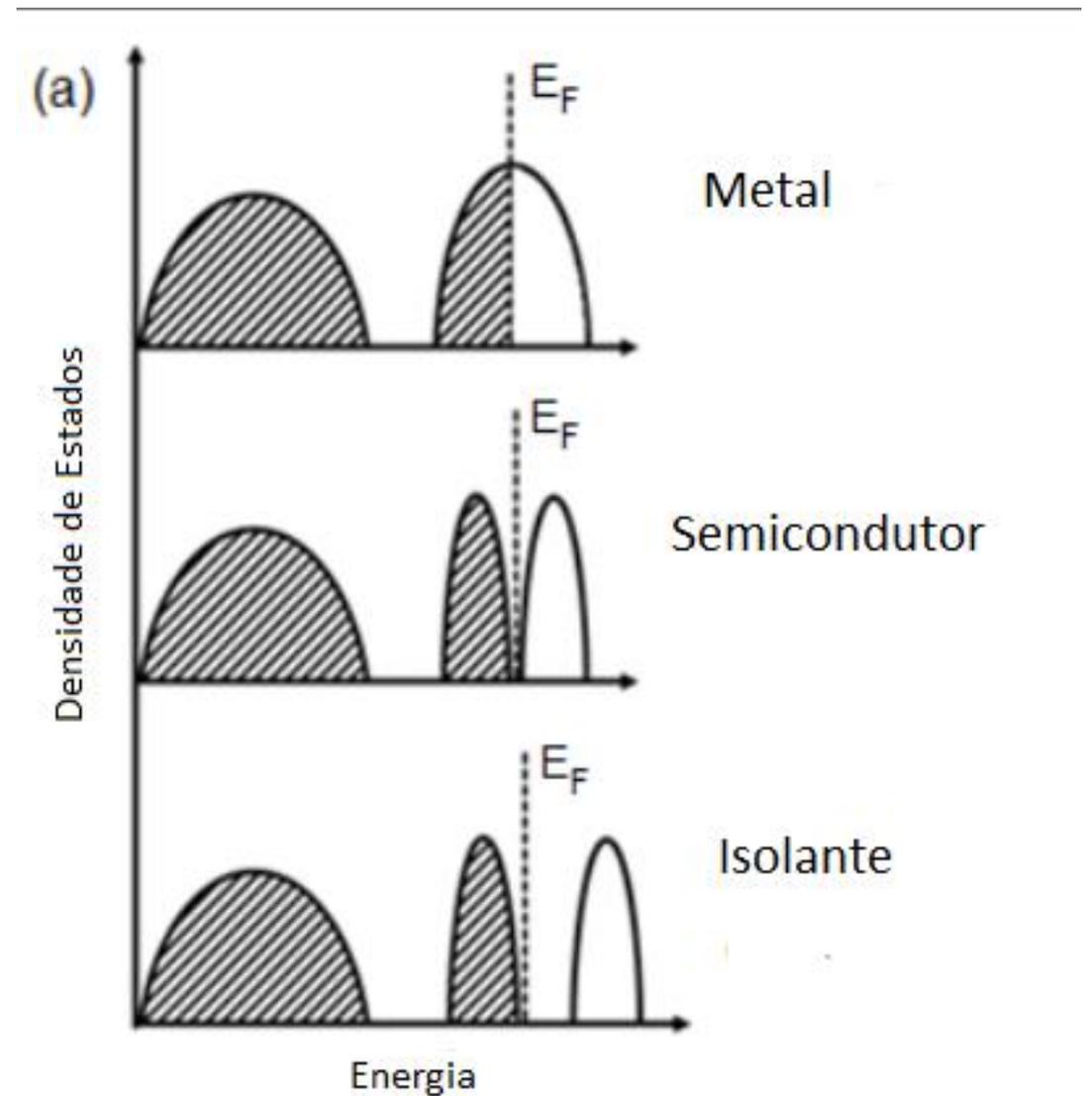
H. Holden Thorp
Editor-in-Chief,
Science journals.
hthorp@aaas.org;
@hholdenthorp

Revisão Semicondutores, Metal e Isolante

Definição:

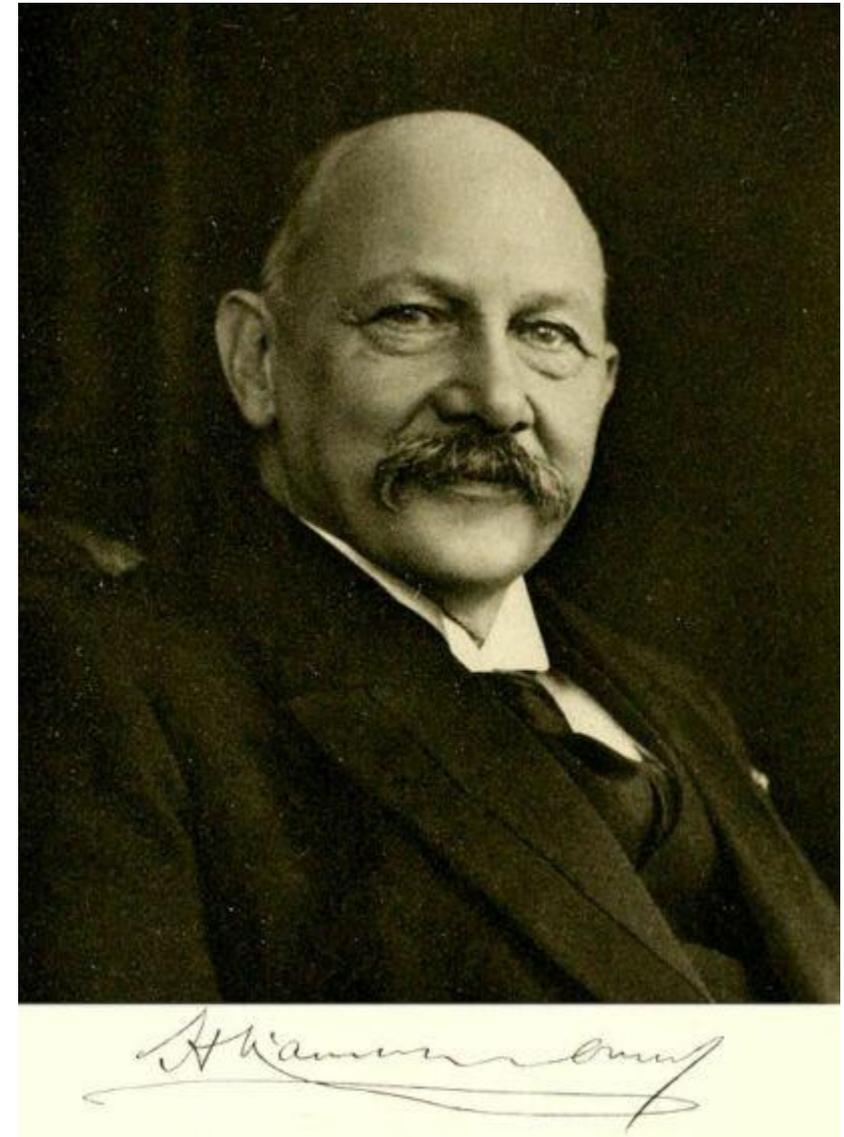
Metal é um material em que a condutividade **diminui** com o **aumento** da temperatura

Em um Isolante ou semicondutor, a condutividade **aumenta** com a temperatura



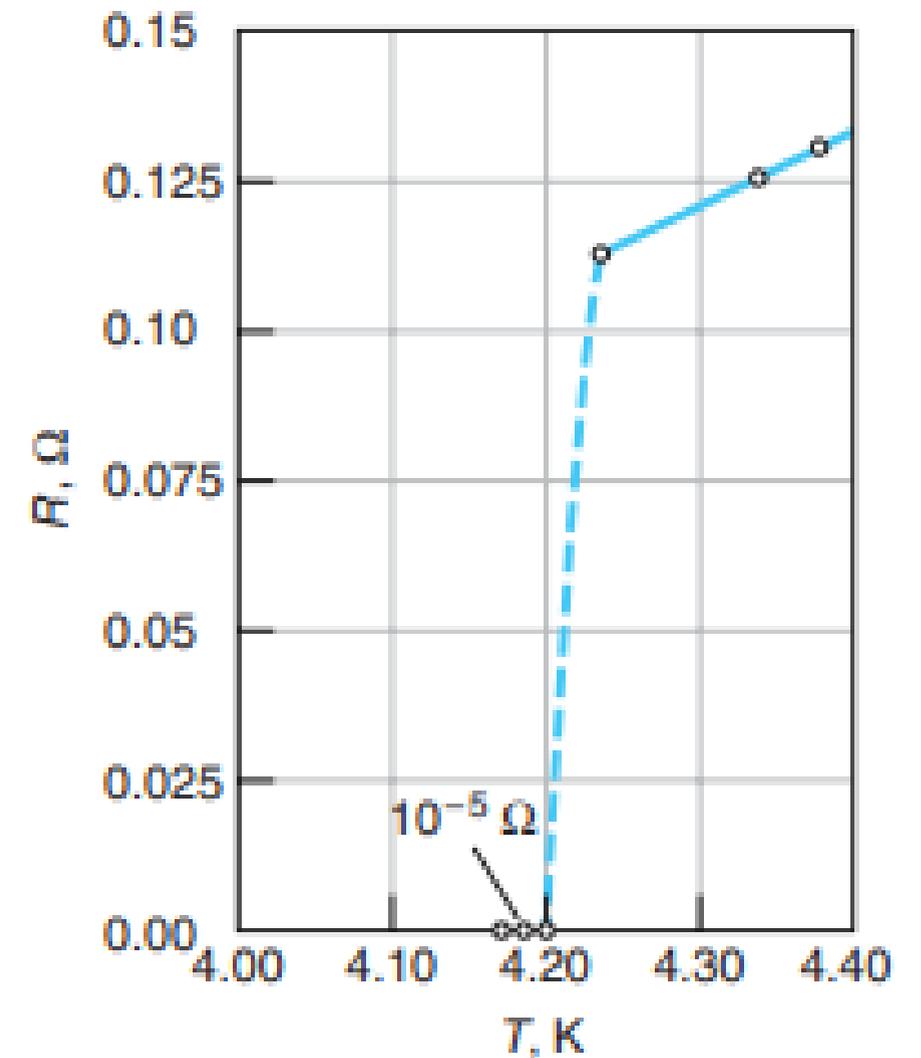
Supercondutor - Um pouco de história

- No início do século XX, existia uma discussão na física se a resistência elétrica de metais seria nula ou não no zero absoluto
- Em 1911, Heike Onnes investigava como era a condutividade de diversos metais em baixa, perto em zero absoluto



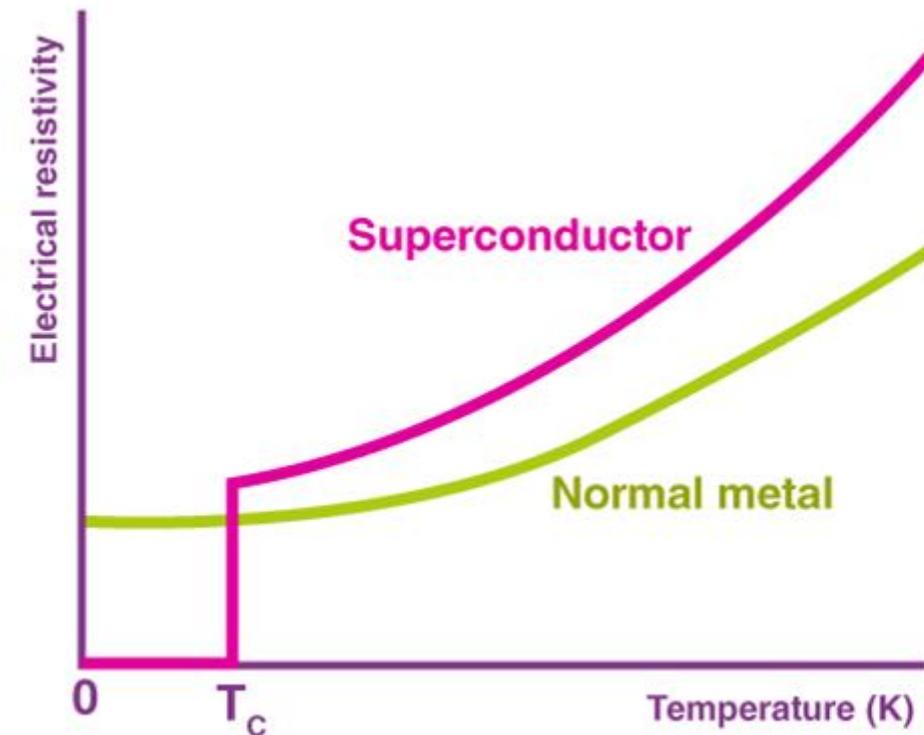
Supercondutor - Um pouco de história

- Durante suas medidas em mercúrio sólido, Onnes obteve que a resistividade chega a valores muito baixos para temperaturas menores que 4.2 K
- Hoje, se sabe que a resistividade é nula
- Esse fenômeno é chamado de **supercondutividade**



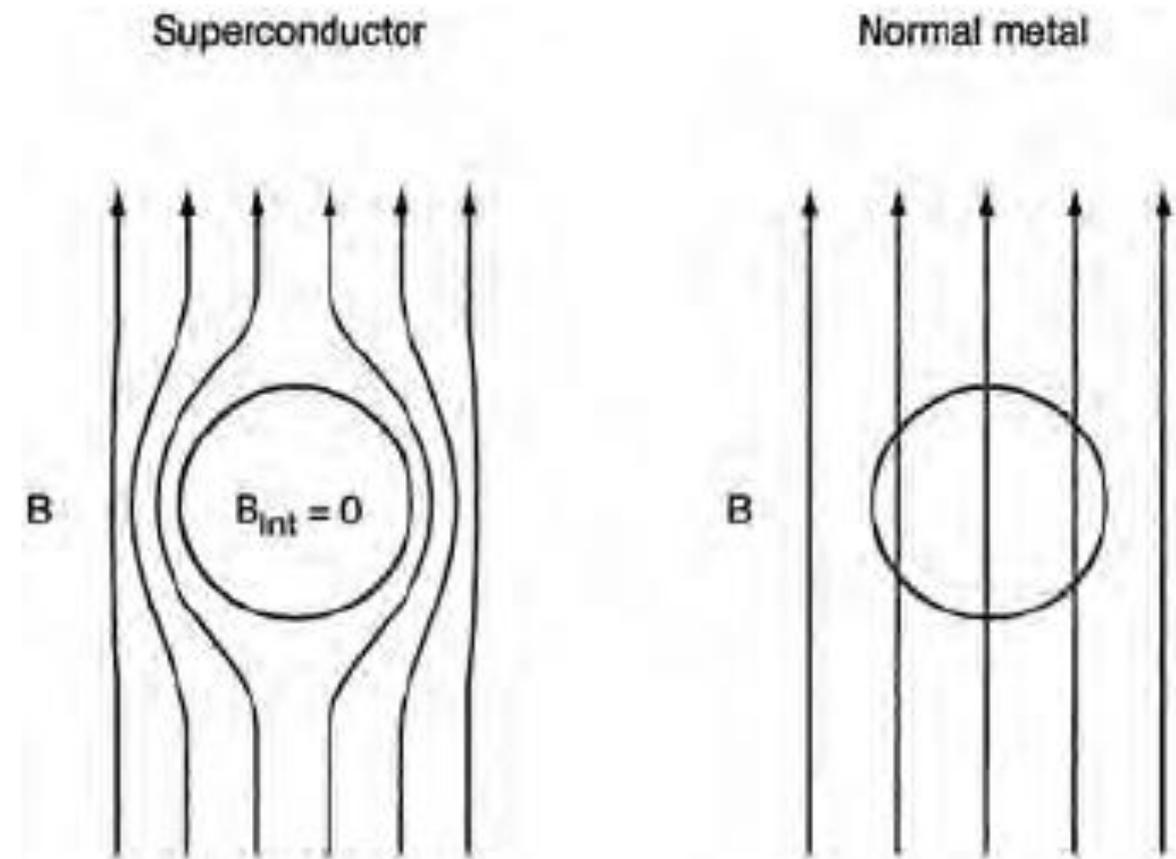
Temperatura crítica

- A temperatura em que um supercondutor começa a apresentar supercondutividade é chamada de **temperatura crítica**
- A temperatura crítica depende do material



Diamagnetismo perfeito

- Além da ausência de resistência elétrica, supercondutores apresentam outra propriedade interessante: **diamagnetismo perfeito**
- Um campo magnético é anulado dentro de um supercondutor



Tipos de supercondutores

- Podemos classificar um supercondutor de acordo com o seu diamagnetismo

Tipo 1: apresentam diamagnetismo perfeito até um valor campo magnético H_c . Para campos maiores, deixa de ser supercondutor

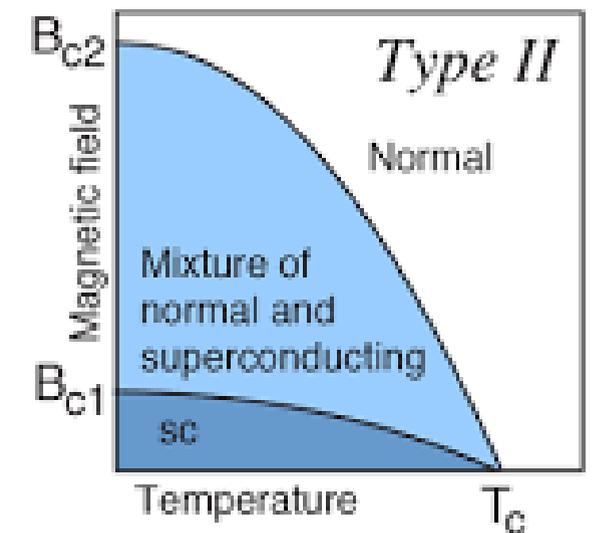
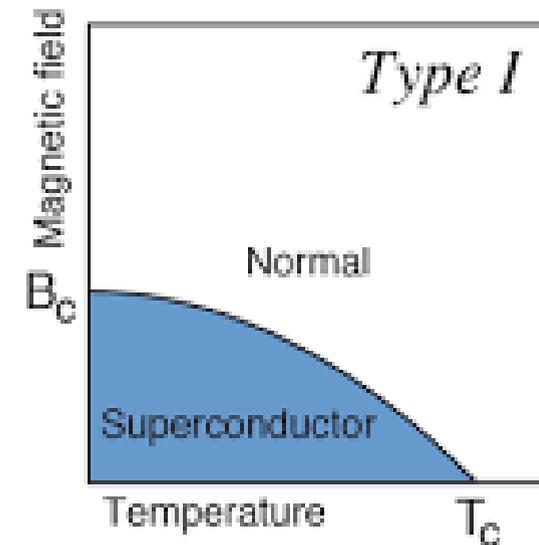
Tipo 2: apresentam diamagnetismo perfeito para campos magnéticos menor que H_{c1} .

Para campos mais fortes, de H_{c1} até H_{c2} , o material se encontra em uma fase intermediária entre a supercondutividade e o estado não supercondutor.

O material só perde a fase supercondutora quando submetida a campos maiores que H_{c2} .

Tipos de supercondutores

- Em um supercondutor tipo 2, existe uma fase intermediária em que o material apresenta supercondutividade ao mesmo tempo que condutividade convencional



Materials Supercondutores

Table 10-6 T_c and B_c values for some type I and type II superconductors

| Type I element | T_c (K) | B_c (at 0 K; T) | Type II compound | T_c (K) | B_{c2} (at 0 K; T) |
|----------------|-----------|-------------------|-----------------------------------|-----------|----------------------|
| Al | 1.175 | 0.0105 | Nb ₃ Sn | 18.1 | 24.5 |
| Cd | 0.517 | 0.0028 | Nb ₃ Ge | 23.2 | 34.0 |
| Hg | 4.154 | 0.0411 | NbN | 16.0 | 15.3 |
| In | 3.408 | 0.0282 | V ₃ Ga | 16.5 | 35.0 |
| Nb | 9.25 | 0.2060 | V ₃ Si | 17.1 | 15.6 |
| Os | 0.66 | 0.0070 | PbMoS | 14.4 | 6.0 |
| Pb | 7.196 | 0.0803 | CNb | 8.0 | 1.7 |
| Sn | 3.722 | 0.0305 | MgB ₂ | 39.0 | 16 |
| Tl | 2.38 | 0.0178 | Rb ₃ C ₆₀ | 29.0 | ? |
| Zn | 0.85 | 0.0054 | Cs ₂ RbC ₆₀ | 33.0 | ? |

Tabela periódica de elementos supercondutores

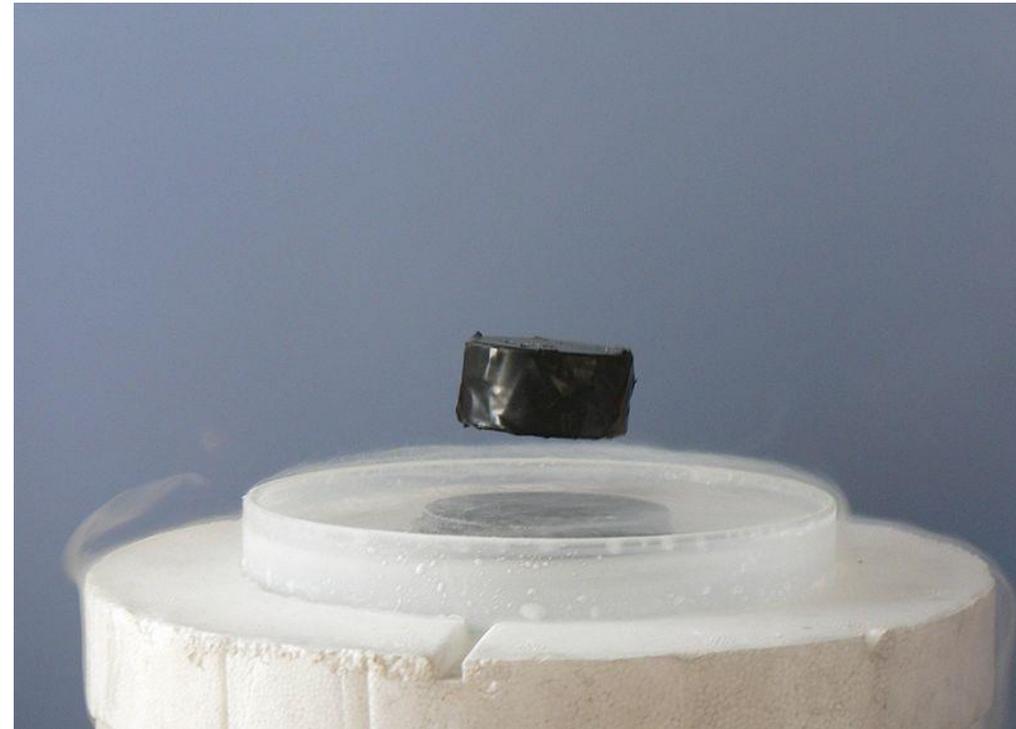
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|----|
| H | superconducting under normal conditions | | | | | | | | | | | | | | | | He | |
| superconducting under high pressure | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Li | Be | | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe | |
| Cs | Ba | La | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | |
| Fr | Ra | Ac | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Ds | Rg | Uub | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | | |
| | | | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr | | |

Efeito Meissner

- Descoberto por Meissner
- É o efeito Meissner que determina se um material é definido como supercondutor ou não



Efeito Meissner

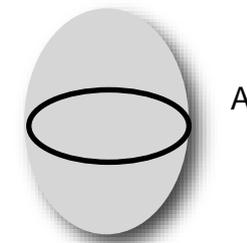
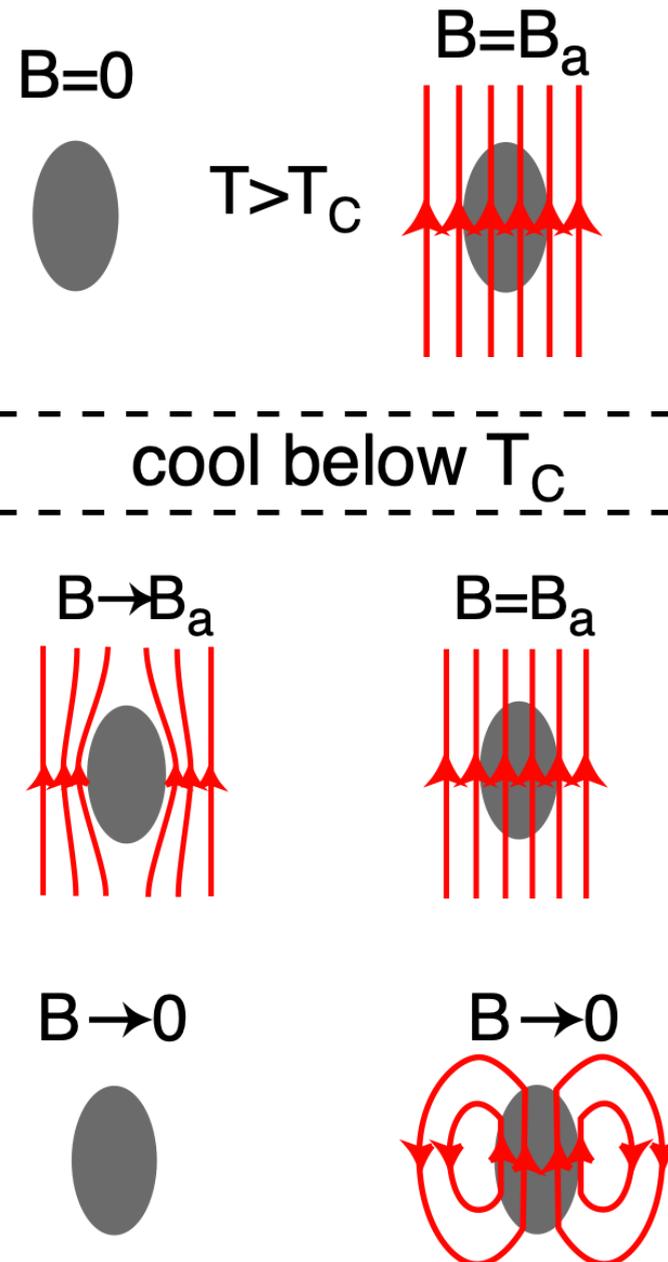


Supercondutores (tipo I) são diamagnetos perfeitos (com $\chi_m = -1$) que sempre repelem o campo externo.

Este chamado efeito Meissner vai além da mera condutividade perfeita.

Efeito Meissner

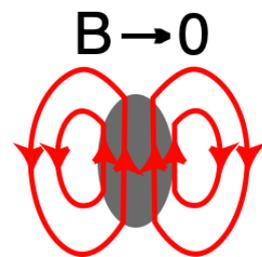
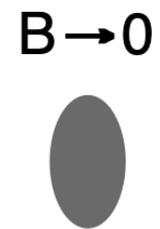
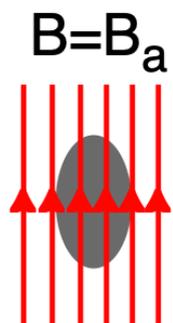
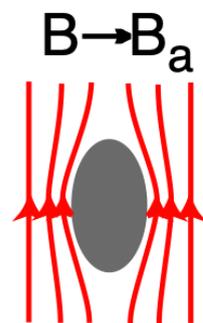
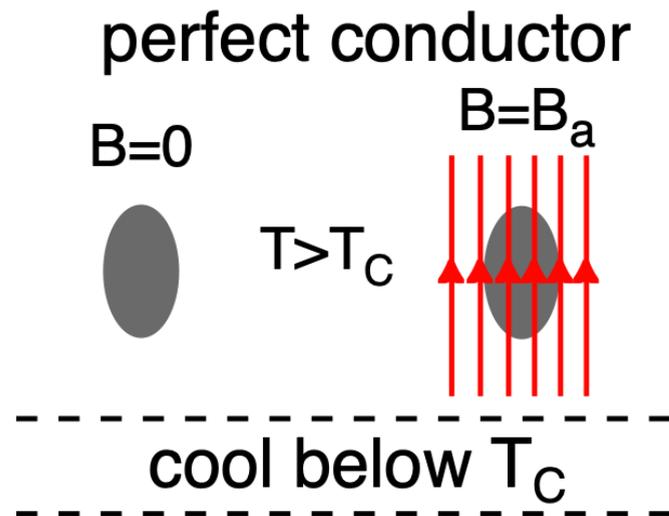
perfect conductor



$$\oint \mathcal{E} d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

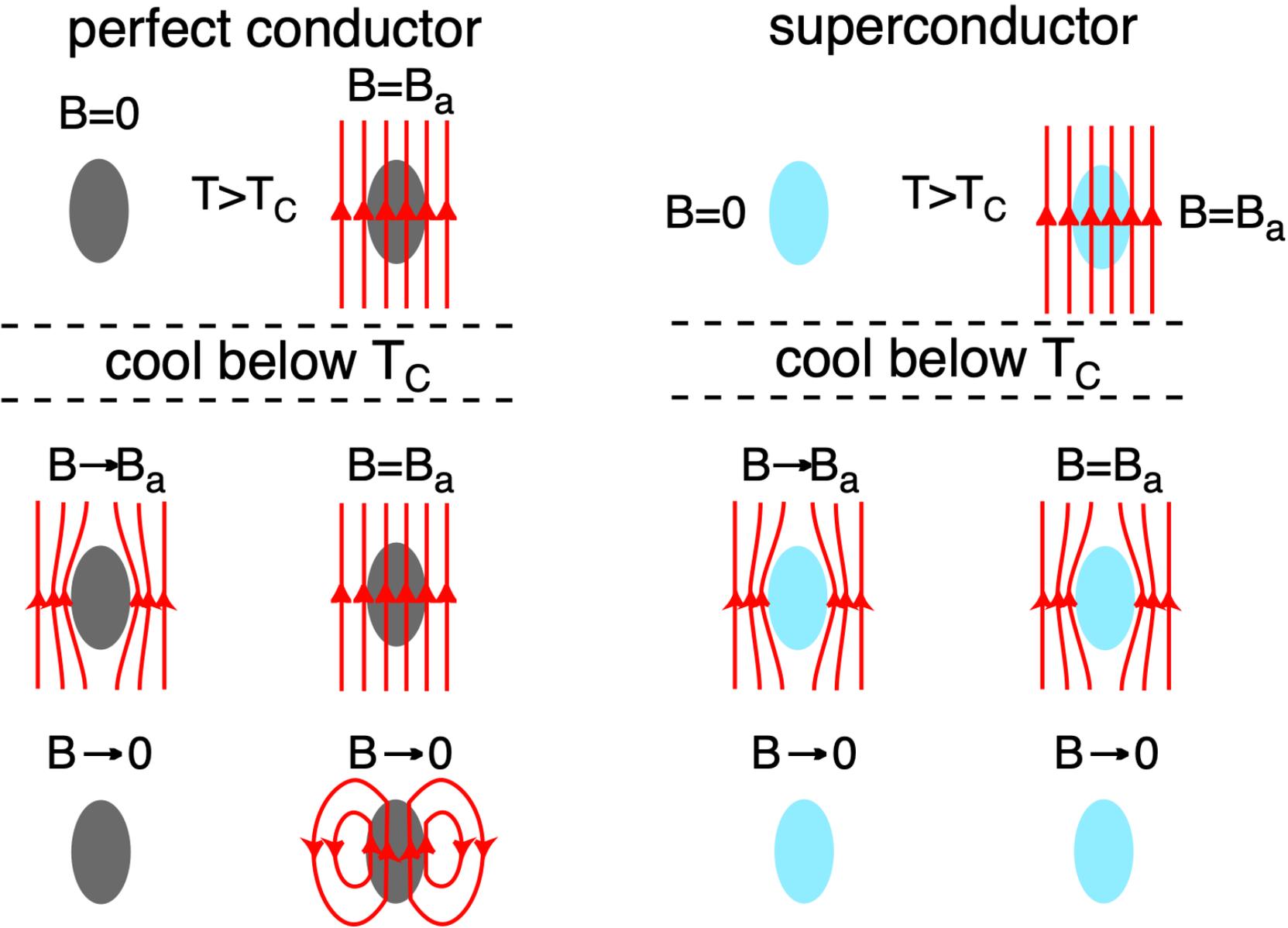
Para um condutor perfeito, o campo magnético dentro do condutor não pode mudar. Um campo fechado é possível.

Efeito Meissner



Cada mudança do campo magnético externo é exatamente compensada por uma mudança da corrente na superfície do material

The Meissner effect



O supercondutor é diferente do condutor ideal.

O efeito Meissner não é meramente uma consequência da condutância perfeita.

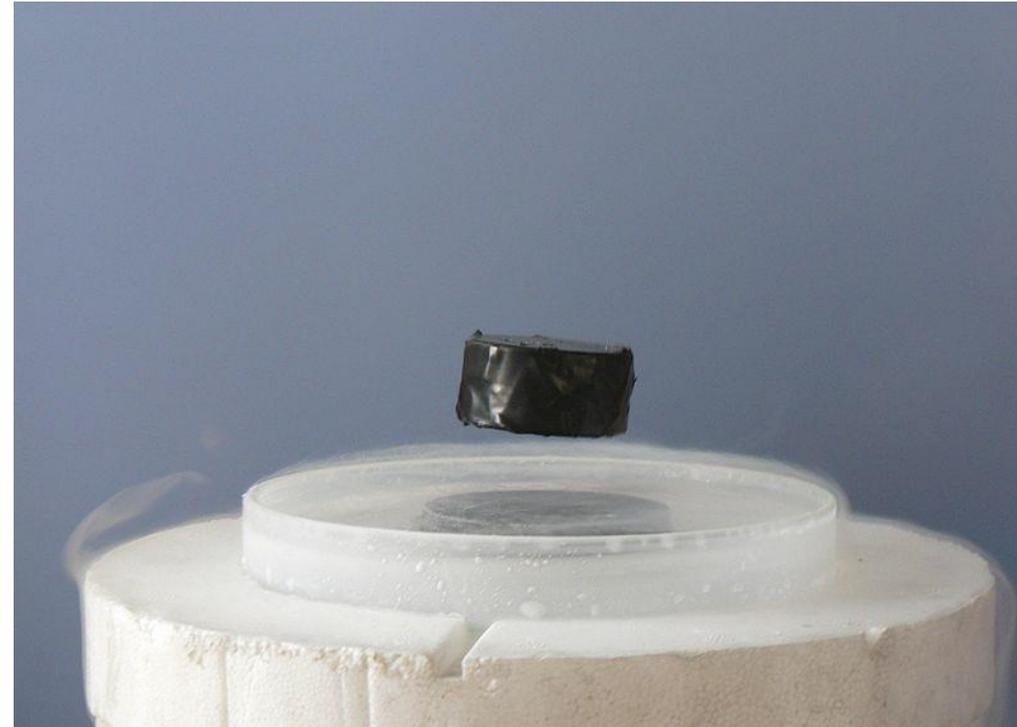
É um efeito genuinamente novo.

Supercorrentes na superfície do supercondutor para mantê-lo livre de campo!

Fase supercondutora: nenhum campo B dentro. E nenhum campo E também...

A essência do efeito Meissner é que o supercondutor **SEMPRE EXPULSA O CAMPO MAGNÉTICO** (diamagneto ideal).

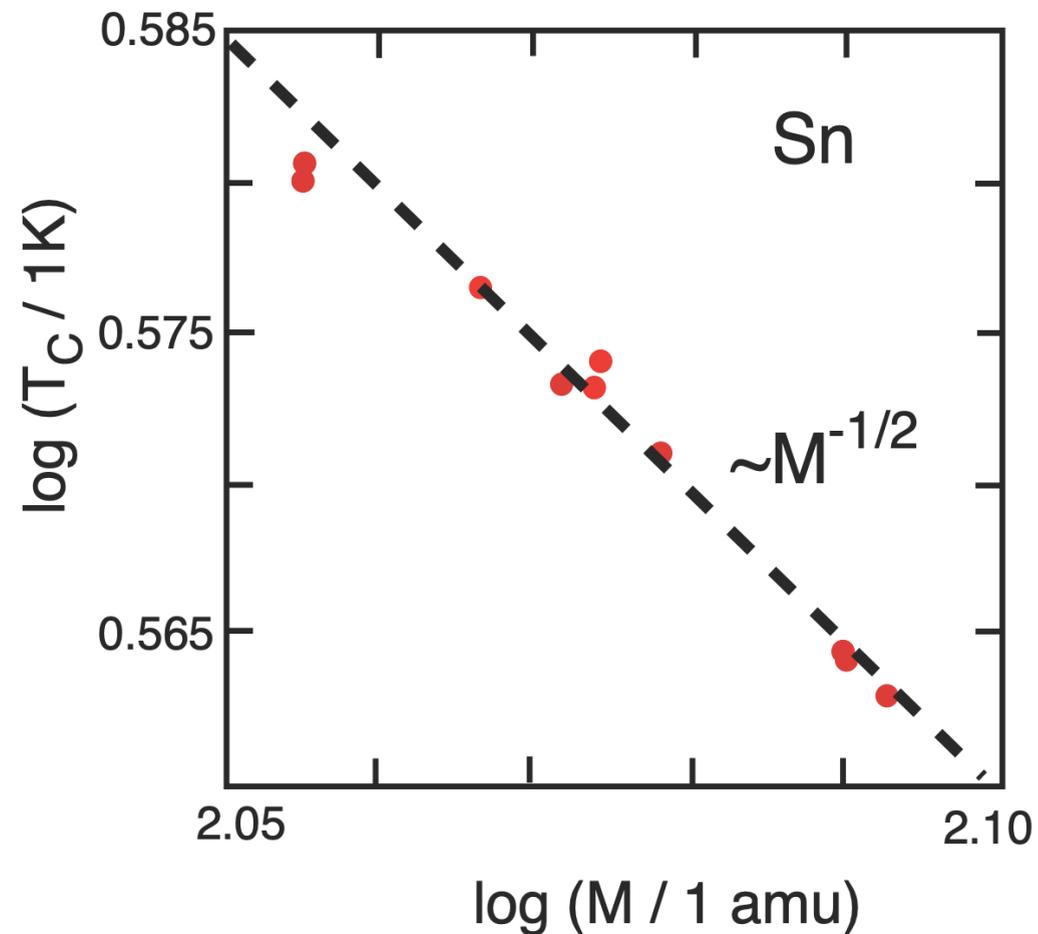
Por que levitação?



A levitação decorre da mesma razão que a levitação diamagnética comum: uma combinação de força gravitacional e força magnética devido ao campo não homogêneo.

A única diferença é a força diferente por causa da suscetibilidade muito maior (negativa).

Efeito Isótopo



lembre-se: energia para oscilador harmônico

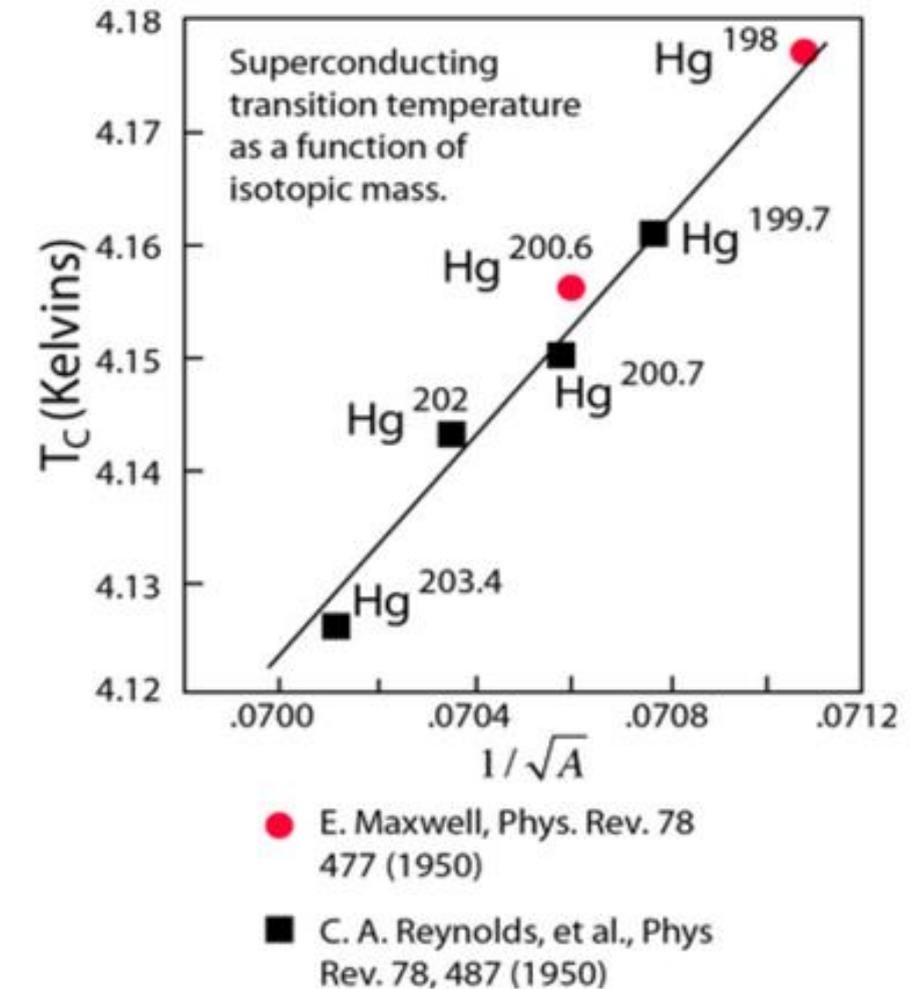
$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma}{M}}$$

Alterar o isótopo de um material deve ter uma influência muito pequena nos estados eletrônicos.

O efeito isotópico sugere que as vibrações da rede estão envolvidas na supercondutividade.

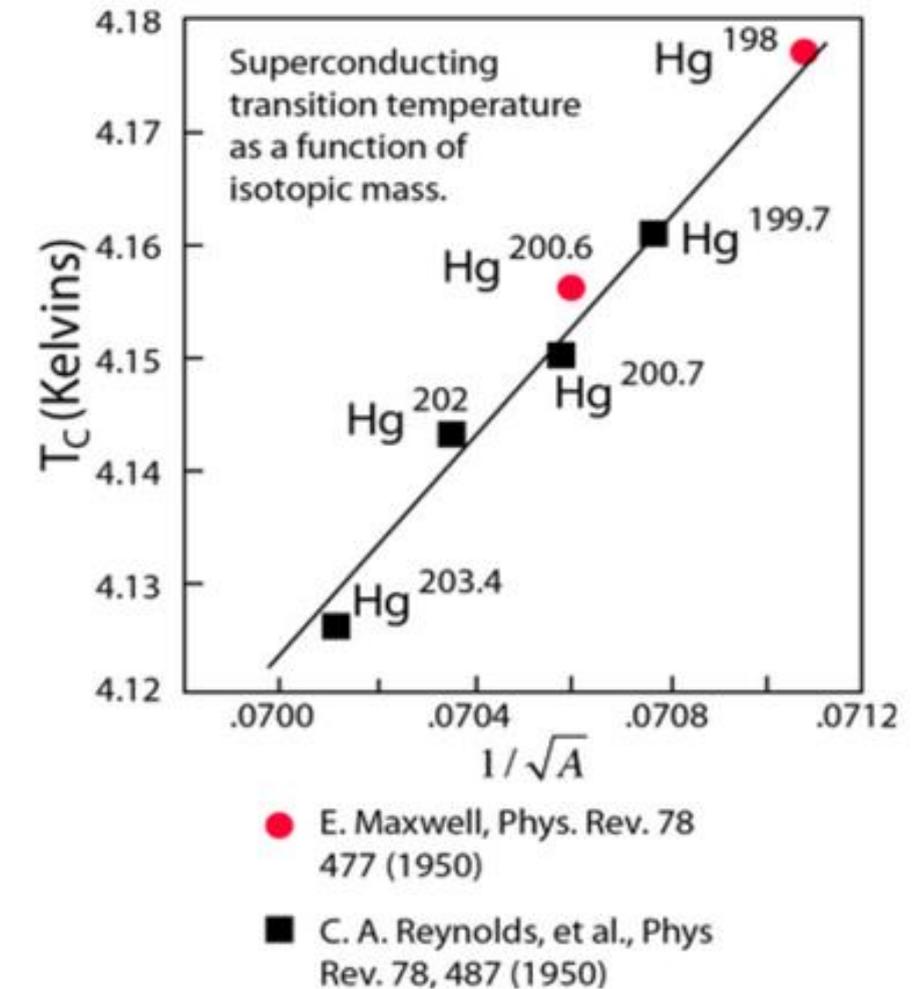
Efeito Isótopo

- Em 1950, foram feitas medidas da temperatura crítica do mercúrio em função da massa do íons da rede cristalina
- Para se obter íons de massa diferente, usa-se isótopos
- Foi observado que a temperatura crítica



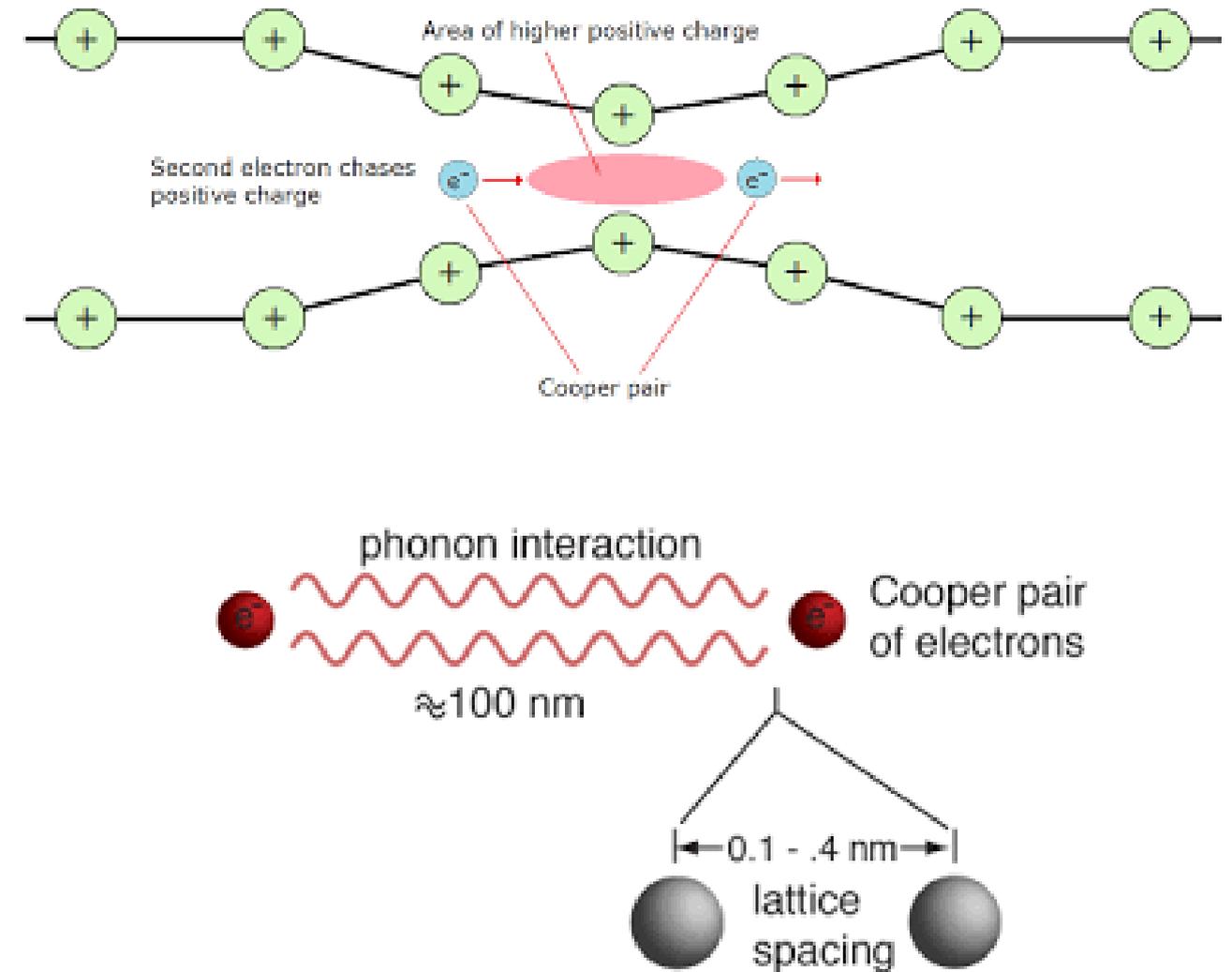
Efeito Isótopo

- Foi observado que a temperatura crítica é dependente da massa do íon
- Portanto, o movimento dos íons afeta os elétrons no estado supercondutor
- A **interação fônon - elétron** é fundamental na supercondutividade



Pares de Cooper

- Um elétron se movendo atrai os átomos ao seu redor
- Isso gera uma distorção na rede cristalina, criando um fônon
- Esse fônon pode interagir com outro elétron, atraindo-o.
- A atração só é atrativa se a distância entre os elétrons é grande

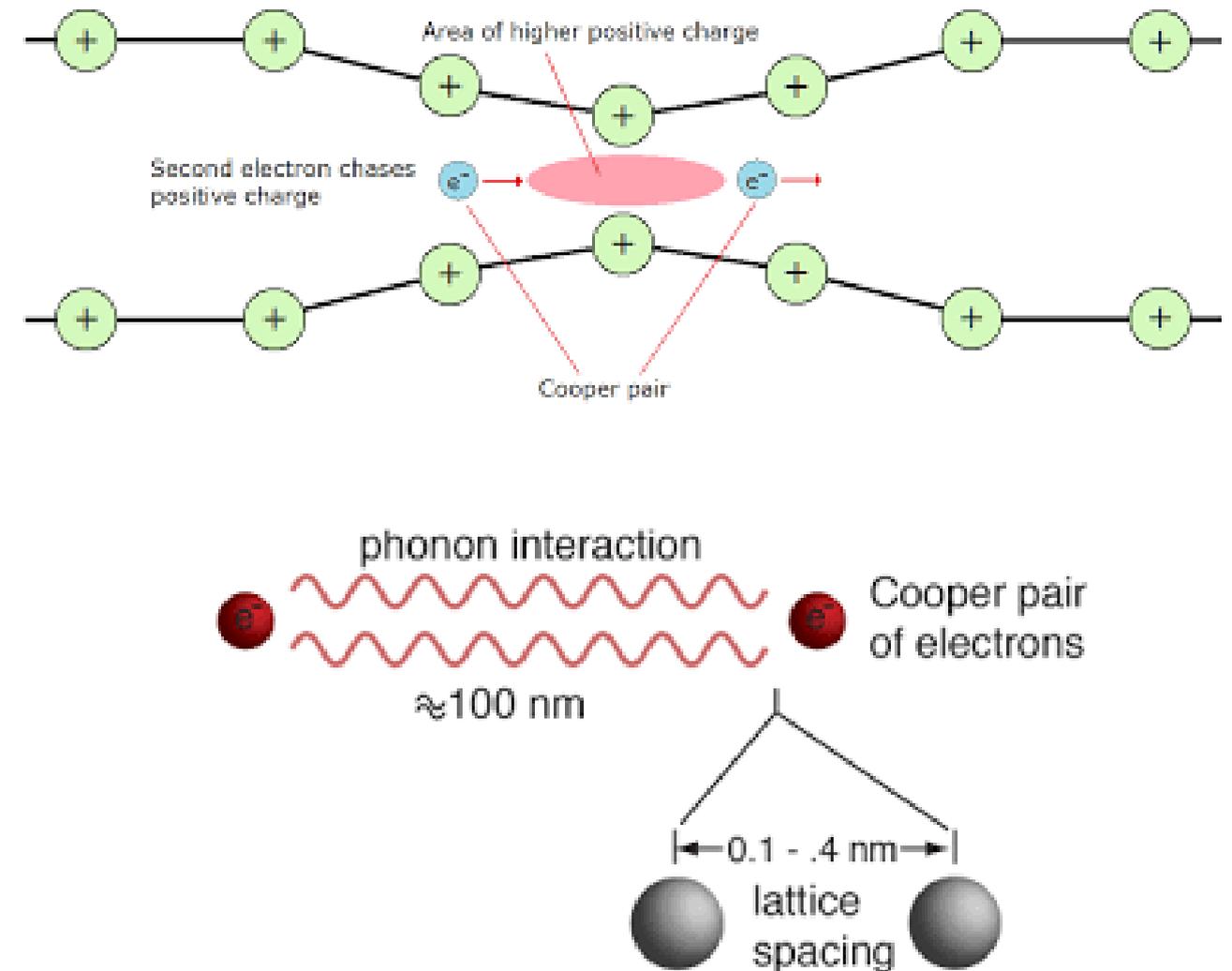


Teoria de BCS

- Os pares de Cooper criam estados ligados entre elétrons
- Como em átomos, a energia desses estados é discretizada
- No caso de pares de Cooper a energia de quebra dos pares é maior que a energia térmica

$$E = 3.5 kT_c$$

- Assim, os elétrons não são espalhados, que é a razão física por trás da resistividade



Teoria BCS

- A Teoria BCS, que utiliza o conceito de pares de Cooper, consegue explicar a supercondutividade em alguns materiais, chamados de **supercondutores convencionais**
- Existem outros supercondutores em que a teoria BCS não consegue explicar
- Ainda não se sabe o explicar a supercondutividade nestes casos

