

Bài 9

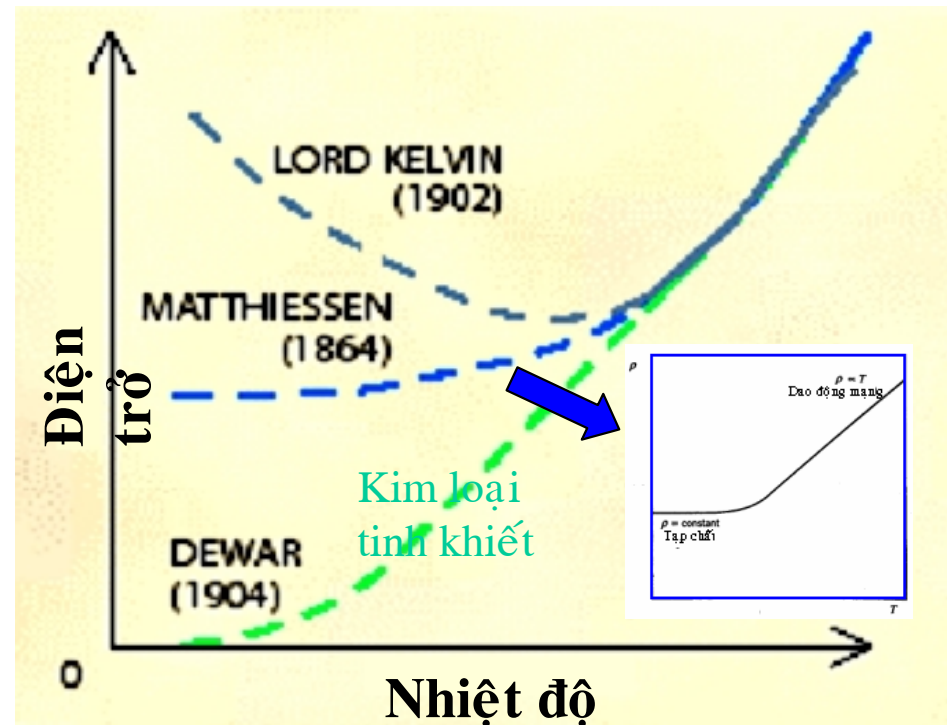
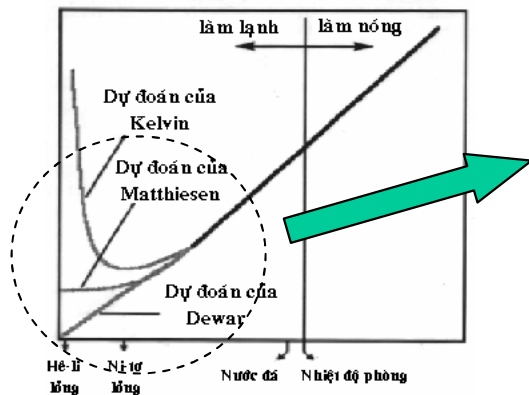
Siêu dẫn



Những dự đoán lý thuyết về điện trở của kim loại ở nhiệt độ thấp ở đầu thế kỷ 20



Kelvin (1824-1907):
Electron bị đông cứng
và điện trở tăng lên





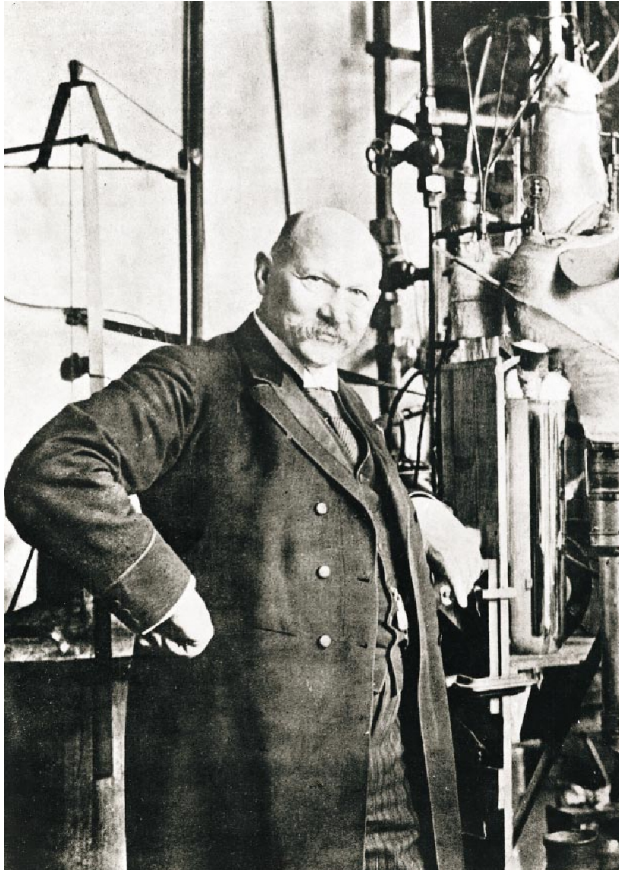
Heike Kamerlingh Onnes

(1853-1926)

Điện trở giảm xuống 0

- 1908 – hóa lỏng helium (~ 4 K)
- 1911- nghiên cứu điện trở của Hg ở nhiệt độ thấp và phát hiện hiện tượng siêu dẫn
- 1913 – giải thưởng Nobel về Vật lý

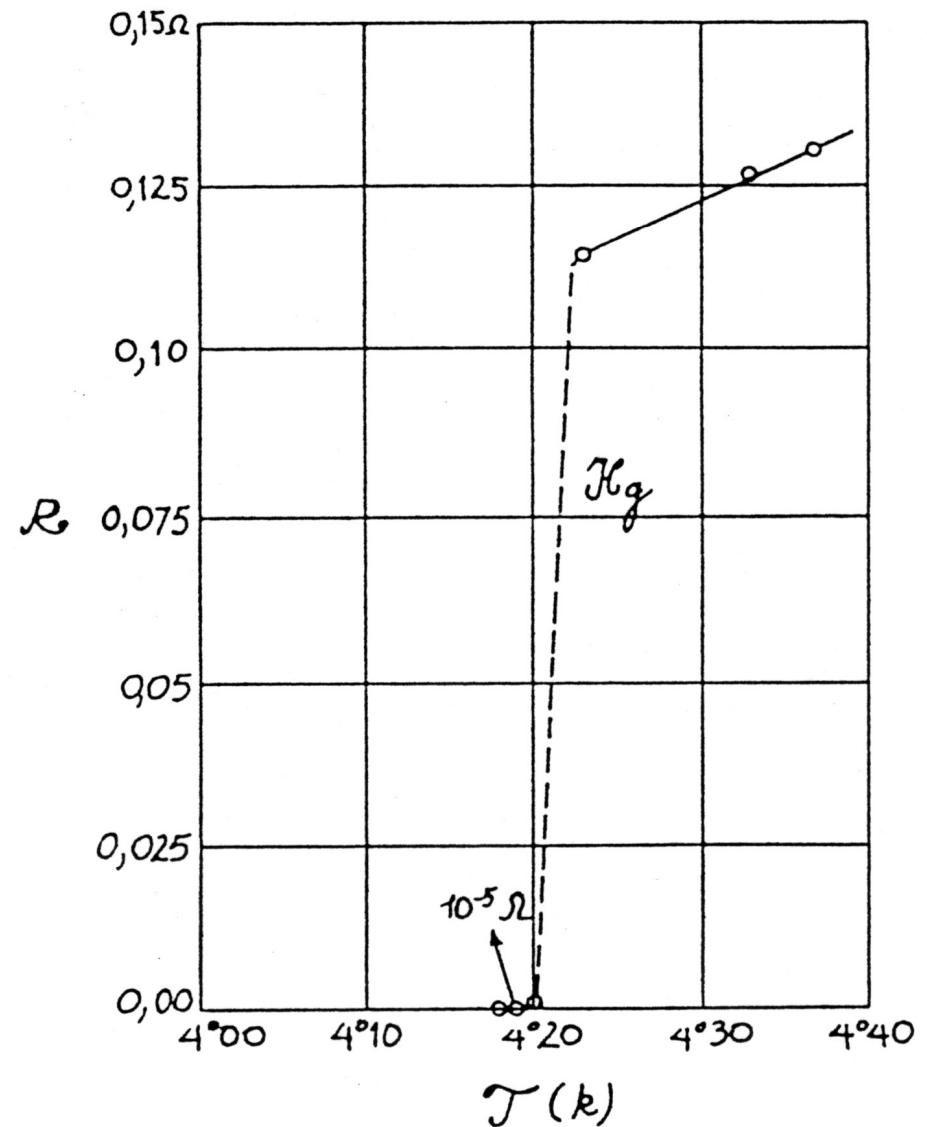
Siêu dẫn



Kamerlingh Onnes, 1911

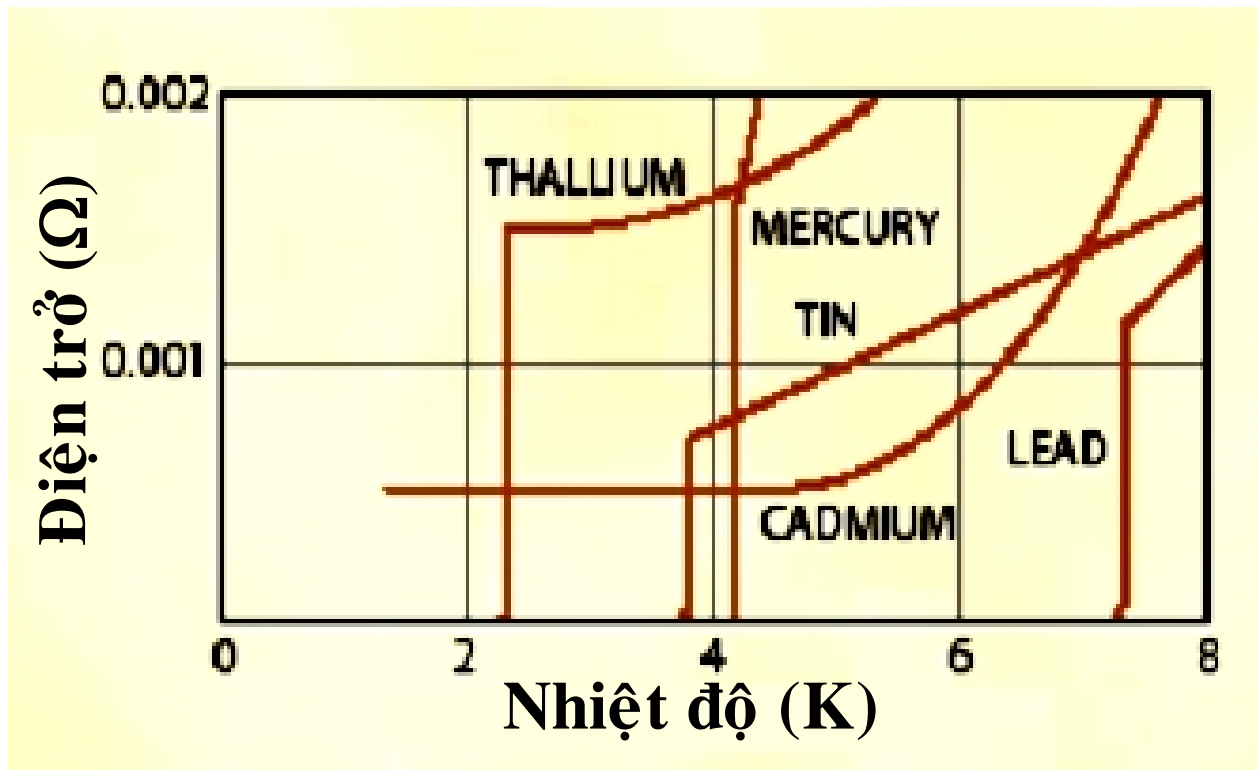
“Door meten tot weten”
 (“Từ đo đạc đến kiến thức”)

Sự dẫn điện hoàn hảo



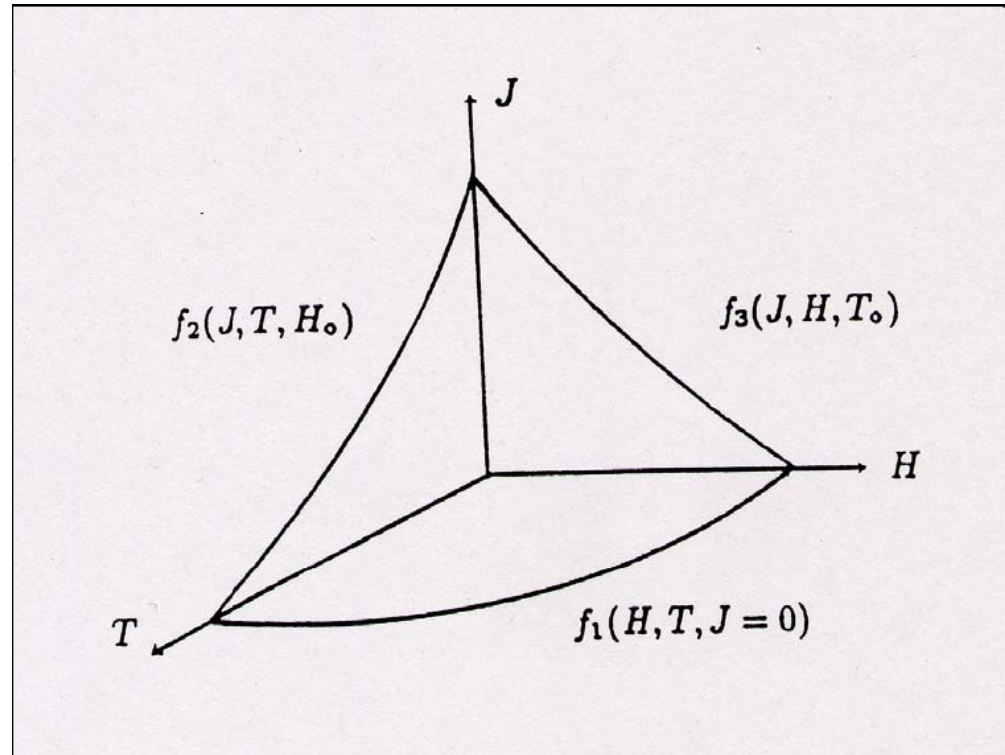
$R(T)$ ở nhiệt độ thấp

Thực nghiệm



Siêu dẫn có 3 thông số tối hạn :

- o Nhiệt độ tối hạn , T_c
- o Từ trường tối hạn, H_c
- o Mật độ dòng tối hạn, J_c .



*Muốn ở trong trạng thái siêu dẫn
không được vượt qua 3 giới hạn đó*

Chất siêu dẫn là một chất dẫn điện hoàn hảo : điện trở của nó thực tế *bằng 0* (chứ không phải rất nhỏ). Ngay với các phép đo chính xác nhất cũng không thể phát hiện điện trở dư trong chất siêu dẫn.

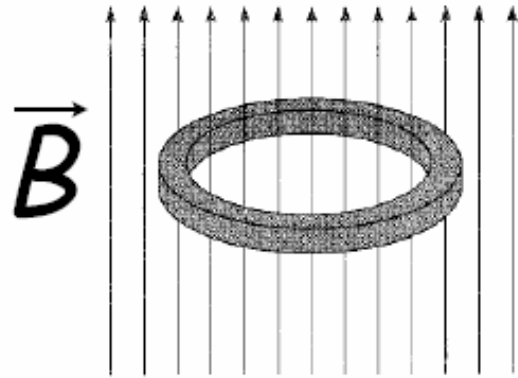
Một khi có dòng chạy trong vòng dây siêu dẫn kín, dòng điện được duy trì chừng nào dây còn được giữ ở nhiệt độ thấp. Dòng điện dừng chạy trong dây mà không bị mất mát do điện trở được gọi là *dòng dư* (persistent current).

Người ta đã quan sát được các dòng dư duy trì trong nhiều năm mà không hề giảm cường độ.

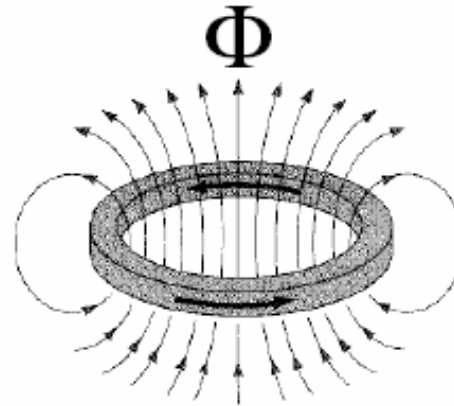
Tính toán lý thuyết cho thấy thời gian giảm vào khoảng

$$10^{4.10^7} \text{ năm !}$$

Dòng dư trong vòng có thể xuất hiện bằng cách hạ nhiệt độ trong từ trường ngoài.



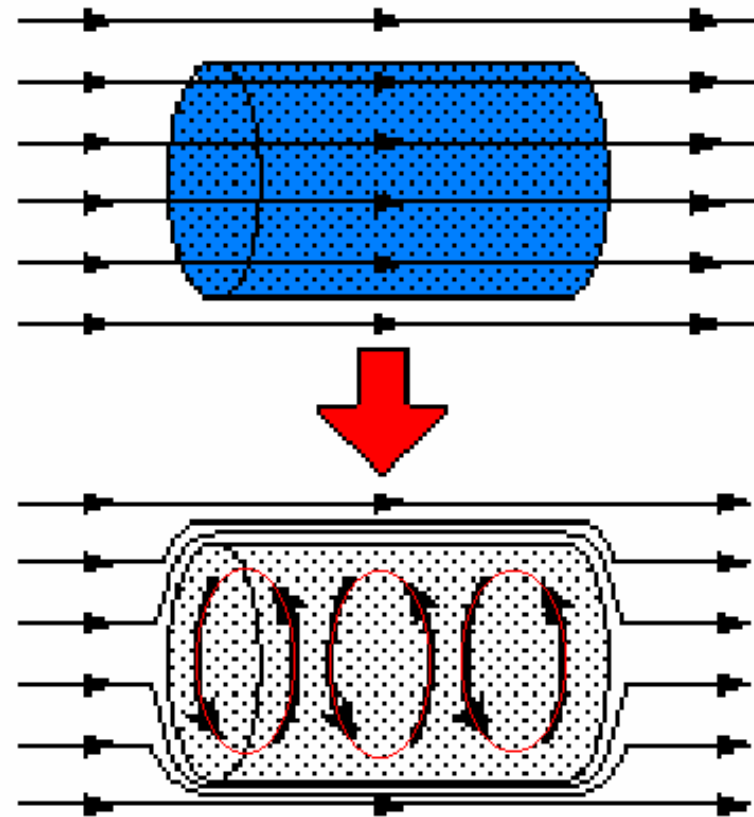
Đặt vòng dây siêu dẫn ở $T > T_c$ trong từ trường ngoài



Hạ nhiệt độ $T < T_c$. Ngắt từ trường, trong vòng xuất hiện dòng cảm ứng (dòng siêu dẫn). Dòng dư này có thể tồn tại vô cùng lâu.

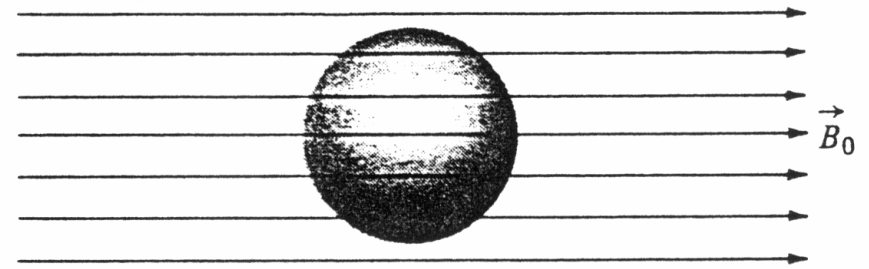
Hiệu ứng Meissner

- 1933 – Walther Meissner và Robert Ochsenfeld
- $T < T_c$: từ trường ngoài hoàn toàn bị đẩy ra khỏi phần trong của chất siêu dẫn do sự xuất hiện của các dòng bề mặt
- Chất siêu dẫn là chất nghịch từ lý tưởng $\chi = -1$

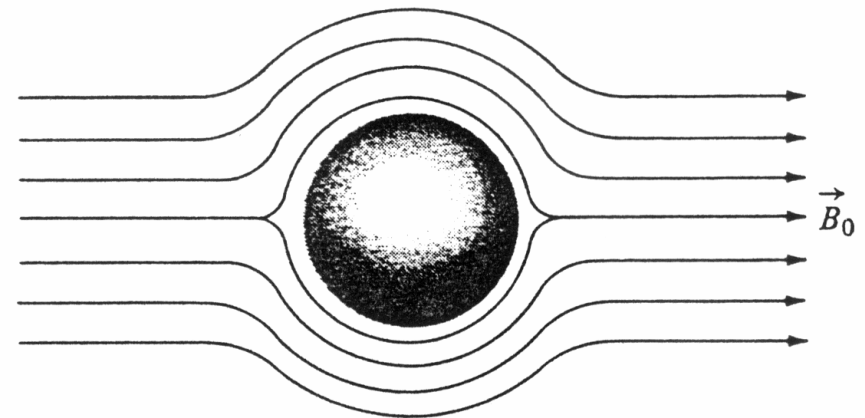


Các dòng I xuất hiện triệt tiêu B .
 $I \times B$ trên chất SD tạo ra lực đẩy.

Hiệu ứng Meissner

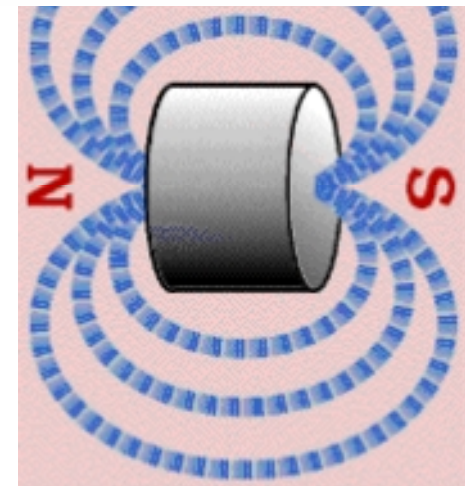


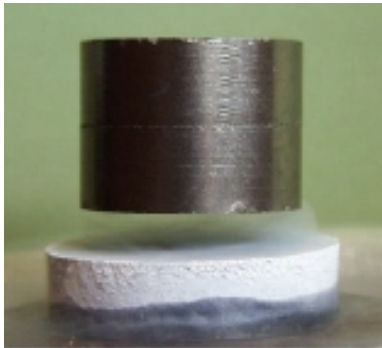
(i) $T > T_c$



(ii) $T < T_c$

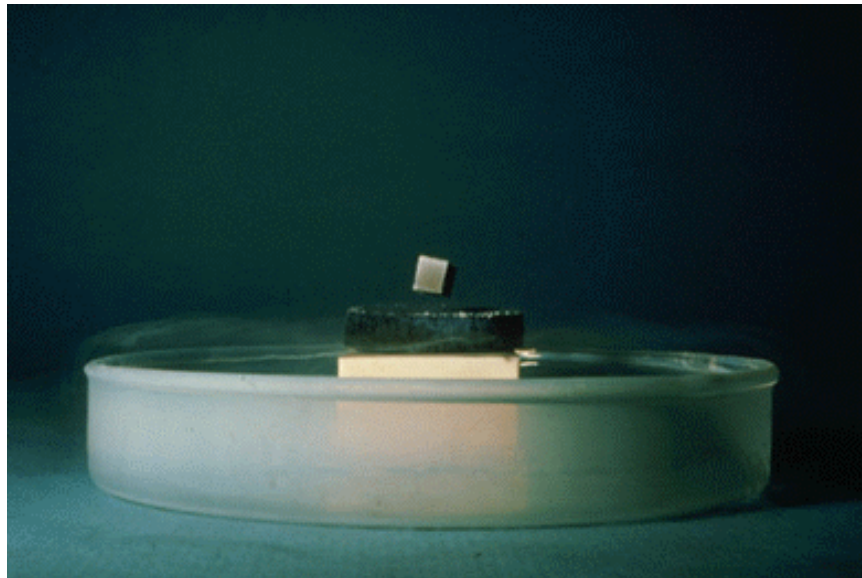
- Từ trường mạnh có thể phá hủy trạng thái siêu dẫn





Nam châm

Chất siêu dẫn



Đặt nam châm lên một chất có tính siêu dẫn. Hạ nhiệt độ $T < T_c$ nam châm bị đẩy và lơ lửng trên chất siêu dẫn.

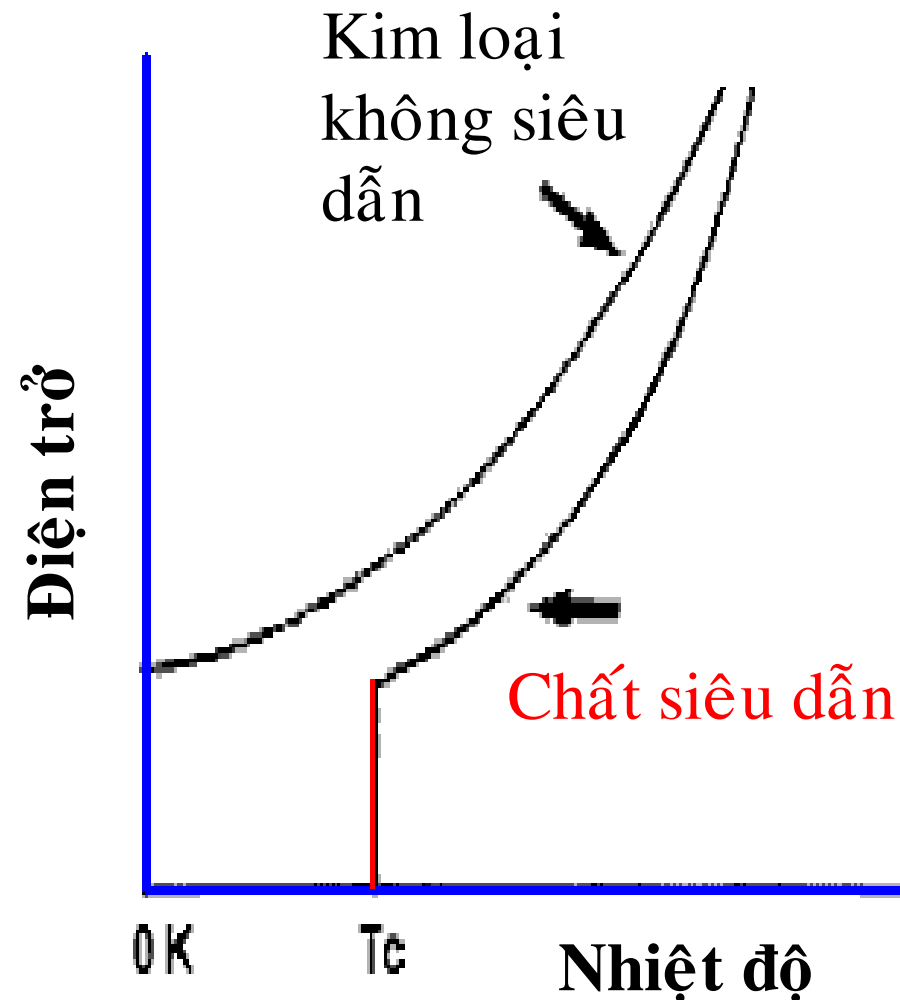
Hkì cho nhiệt độ tăng, mẫu mất tính siêu dẫn và nam châm rơi xuống



- Hai loại chất siêu dẫn :

Loại I (các chất dẫn điện mềm)
: kim loại thuần

- Được phát hiện đầu tiên và cần nhiệt độ rất thấp để trở thành siêu dẫn
- Các chất siêu dẫn loại I tồn tại dưới 2 trạng thái : bình thường và siêu dẫn
- Các chất siêu dẫn phụ thuộc nhiệt độ
- Các chất siêu dẫn là các chất nghịch từ lý tưởng.
- Những chất dẫn điện tốt nhất (cu,Ag,Au) không có tính siêu dẫn

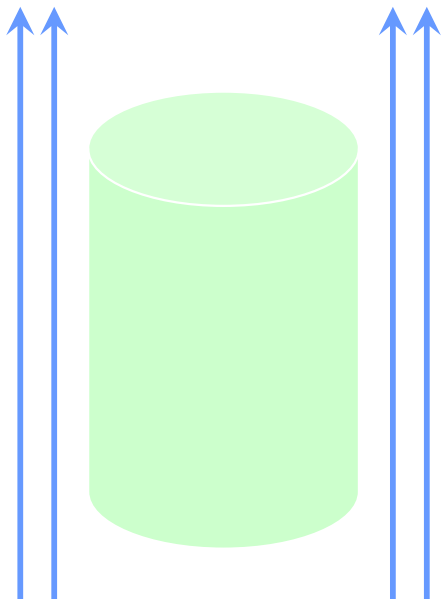


- Chất dẫn điện bình thường :
 $\rho = \rho_0$ ở $T = 0 \text{ K}$
- Các chất siêu dẫn :
 $\rho = 0$ ở $T < T_c$
(trạng thái siêu dẫn)

Chất siêu dẫn loại I

- Hai điều kiện:

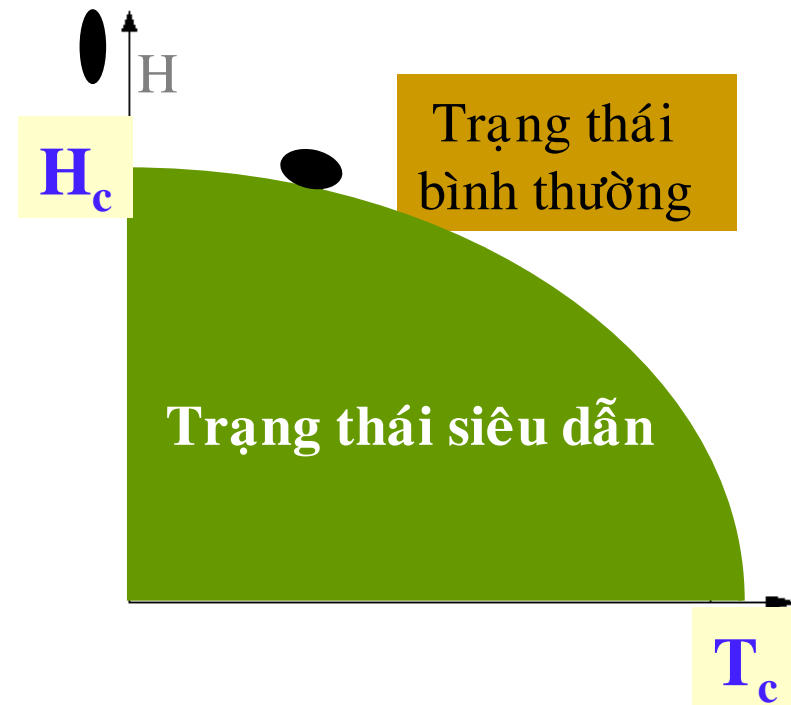
1. Điện trở = 0
2. Hiệu ứng Meissner



- Trạng thái siêu dẫn

$$T < T_c$$

— $H < H_c$



Nhiệt độ tối hạn T_c của một số chất siêu dẫn.

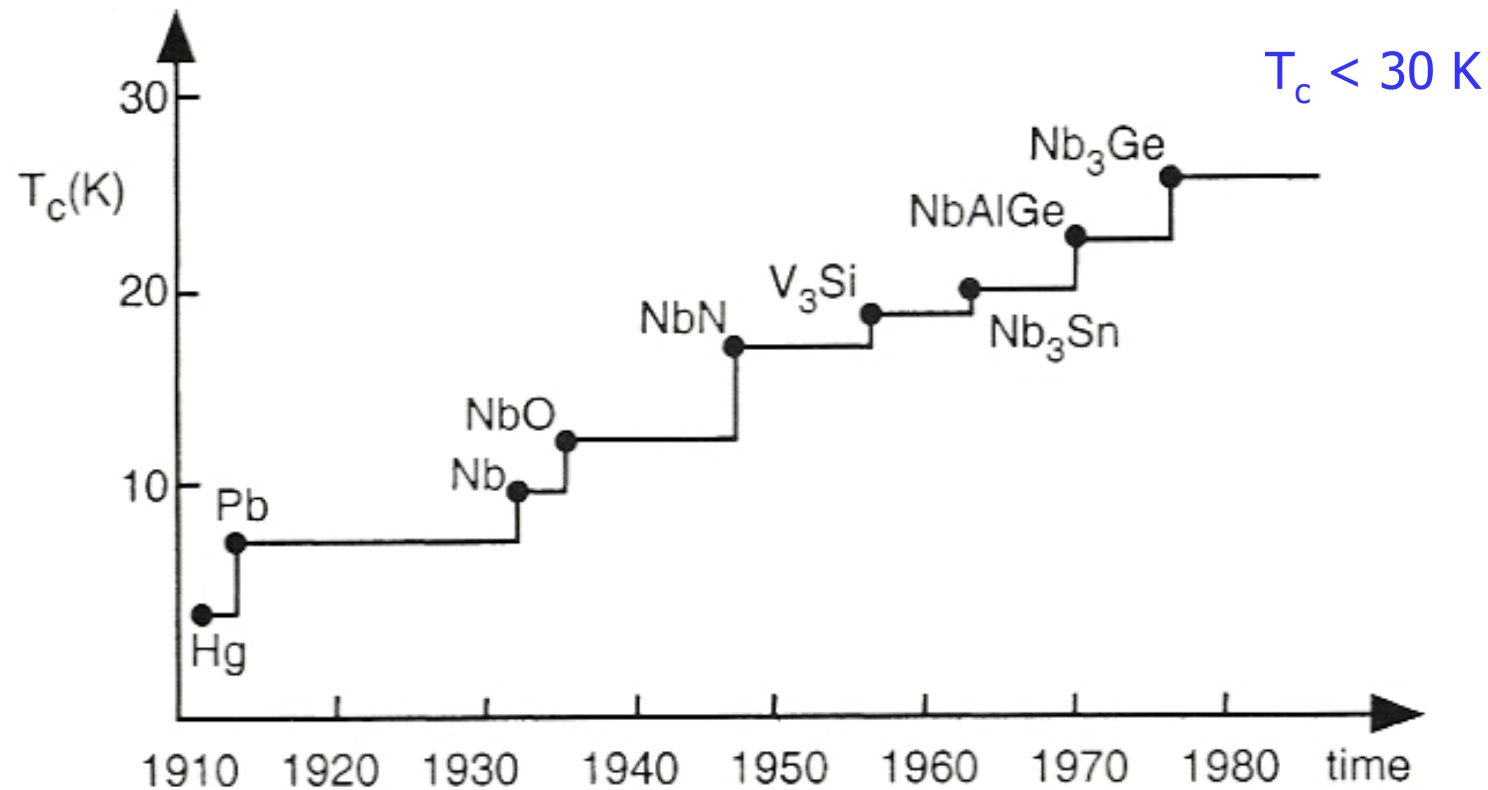
Nguyên tố $T_c (K)$

Nhôm	1,19
Kẽm	0,546
Gallium	1,09
Niobium	9,46
Indium	3,40
Thiếc	3,722
Osmium	0,66
Tungsten	0,012
Hg	4,153
Chì	7,18

Nhiệt độ tối hạn T_c (Kelvin)

Li ...	Be 0.026											B ...	C ...	N ...	O ...	F ...	Ne ...
Na ...	Mg ...											Al 1.140	Si* 7	P* 5	S* ...	Cl ...	Ar ...
K ...	Ca ...	Sc ...	Ti 0.39	V 5.38	Cr* ...	Mn ...	Fe ...	Co ...	Ni ...	Cu ...	Zn 0.875	Ga 1.091	Ge* 5	As* 0.5	Se* 7	Br ...	Kr ...
Rb ...	Sr ...	Y* ...	Zr 0.546	Nb 9.50	Mo 0.90	Tc 7.77	Ru 0.51	Rh 0.0003	Pd ...	Ag ...	Cd 0.56	In 3.4035	Sn 3.722	Sb* 3.5	Te* 4	I ...	Xe ...
Cs* 1.5	Ba* 5	La(fcc) 6.00	Hf 0.12	Ta 4.483	W 0.012	Re 1.4	Os 0.655	Ir 0.14	Pt ...	Au ...	Hg 4.153	Tl 2.39	Pb 7.193	Bi* 8	Po ...	At ...	Rn ...
Fr ...	Ra ...	Ac ...															
...			Ce* 2	Pr ...	Nd ...	Pm ...	Sm ...	Eu ...	Gd ...	Tb ...	Dy ...	Ho ...	Er ...	Tm ...	Yb ...	Lu 0.1	...
...			Th 1368	Pa 14	U* 2	Np ...	Pu ...	Am ...	Cm ...	Bk ...	Cf ...	Es ...	Fm ...	Md ...	No ...	Lr ...	...

Nhiệt độ tới hạn của các chất siêu dẫn

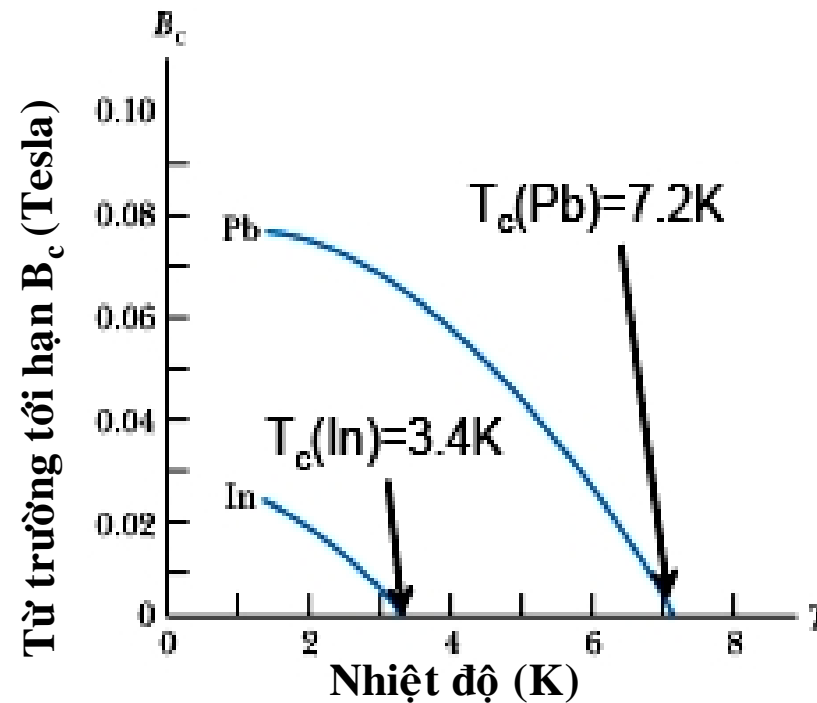
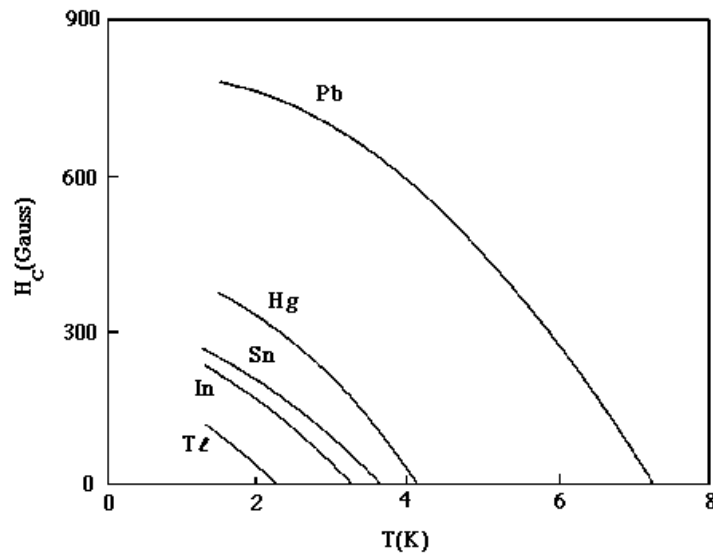


Các chất siêu dẫn truyền thống

Từ trường tới hạn của các chất siêu dẫn

Từ trường mạnh nhất mà một chất còn duy trì được tính siêu dẫn được gọi là *từ trường tới hạn* B_c .

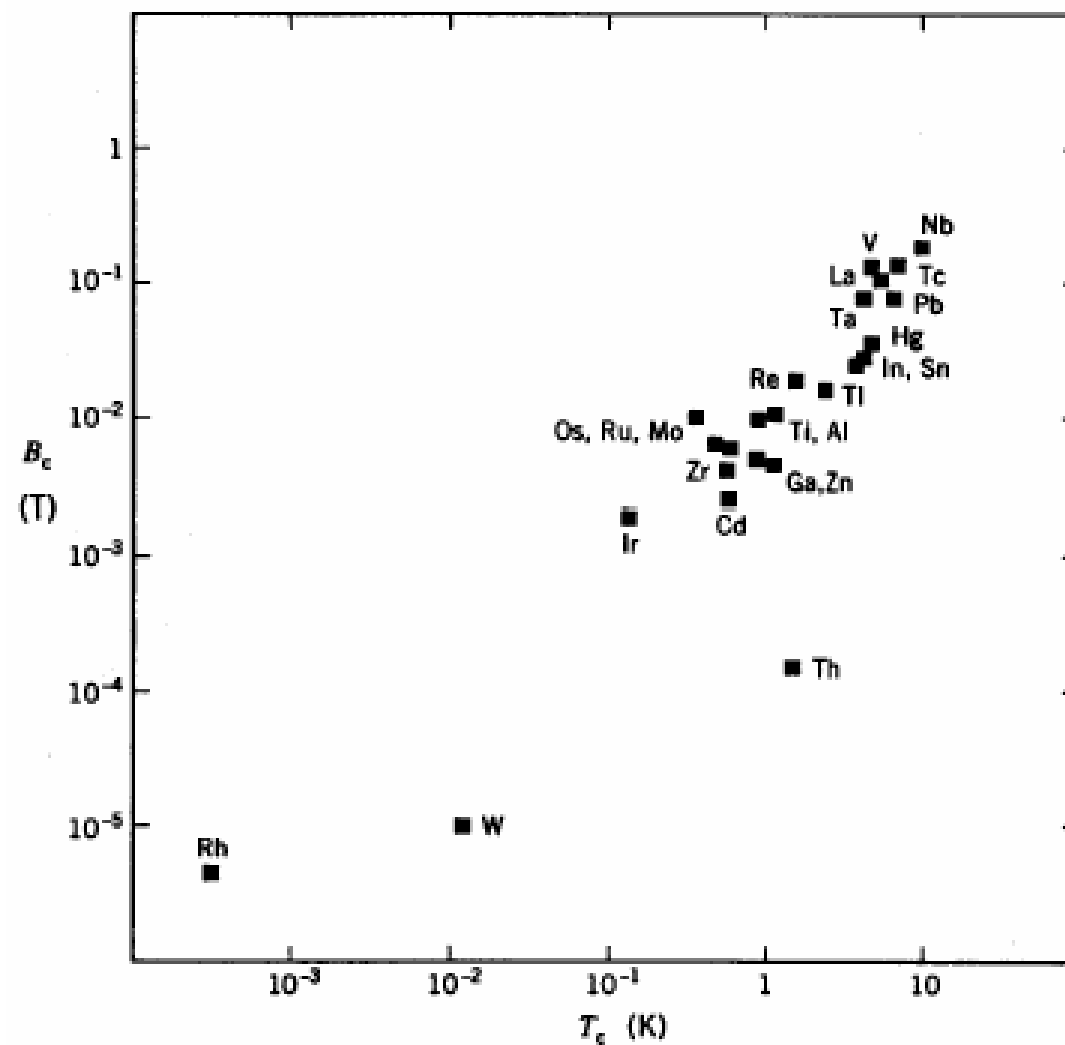
Cường độ của từ trường tới hạn là một hàm của nhiệt độ. B_c cực đại ở 0 K.



Cường độ từ trường tới hạn B_c (ở 0 K)
của 1 số chất siêu dẫn loại I.

Chất siêu dẫn	$B_c(0)$, T
Al	0,0105
Hg	0,0411
In	0,0281
Pb	0,0803
Sn	0,0305
Zn	0,0054

Tương quan giữa từ trường tối hạn B_c và T_c



$$B_c(0) \sim 0.01 T_c$$

Mật độ dòng tới hạn của các chất siêu dẫn

Từ trường tới hạn có thể được tạo ra bởi dòng chạy trong các mạch ngoài hoặc bởi dòng chạy trong chính chất siêu dẫn.

➡ Một chất siêu dẫn chỉ có thể tải một dòng tối đa nhất định nào đó. Độ lớn của dòng tới hạn này phụ thuộc không những vào độ lớn của từ trường tới hạn mà còn vào dạng hình học của vật dẫn.

- Hai loại chất siêu dẫn :

- **Loại II** (các chất dẫn cứng)

- Phát hiện hàng chục năm sau loại I.
 - Thường là hợp kim.
 - Khác với loại I trong chất siêu dẫn loại II sự chuyển từ trạng thái bình thường sang siêu dẫn xảy ra từ từ.
 - Có hai trường tới hạn B_{c1} & B_{c2} .

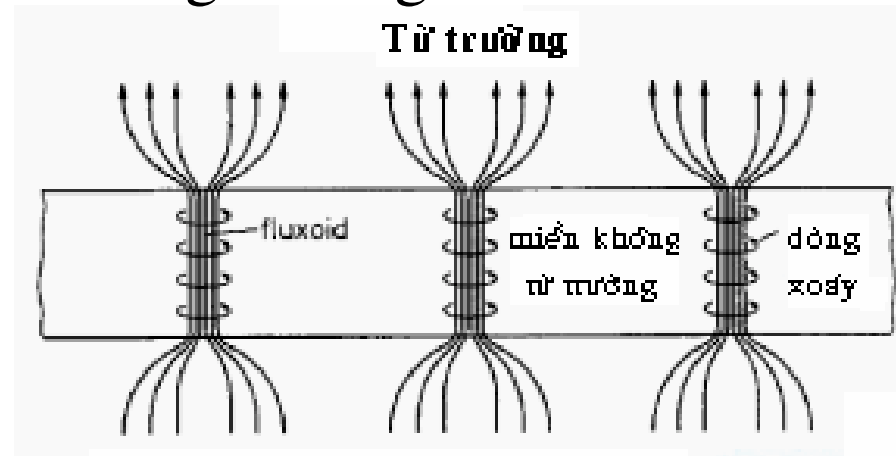
Hợp kim cho phép từ trường xuyên vào một phần nếu từ trường có cường độ trung bình và sẽ mất tính siêu dẫn và cho từ trường xâm nhập vào hoàn toàn khi từ trường đủ mạnh.

Hợp kim có 2 giá trị tới hạn : ở giá trị B_{c1} , cảm ứng từ bắt đầu xuyên vào và ở giá trị B_{c2} hợp kim cho từ trường xuyên vào hoàn toàn và mất tính siêu dẫn.

Ví dụ, ở nhiệt độ 4,2 K, hợp kim niobium-thiếc Nb_3Sn có các giá trị tới hạn $B_{c1} = 0,019$ T và $B_{c2} = 22$ T.

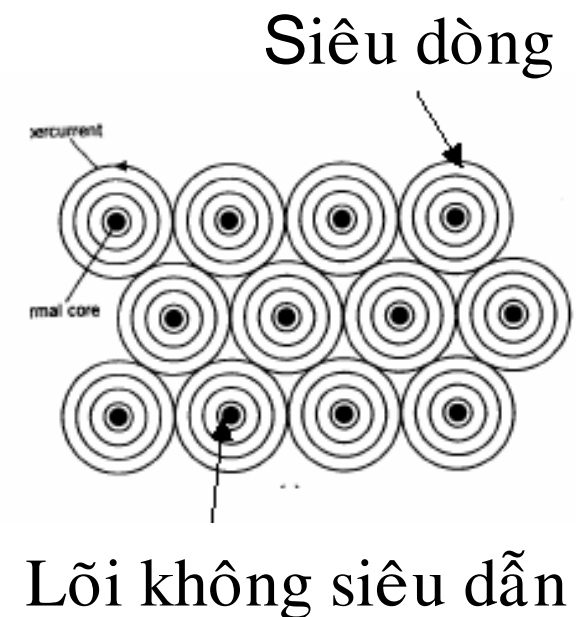
Các chất siêu dẫn cho phép từ trường xâm nhập một phần khi đưa vào từ trường có cường độ trung gian được gọi là *các chất siêu dẫn loại II*.

Trong từ trường trung bình, chất siêu dẫn loại II ở trong trạng thái hỗn hợp : khối vật liệu là siêu dẫn nhưng bị xuyên bởi các sợi rất mảnh là chất dẫn thông thường.

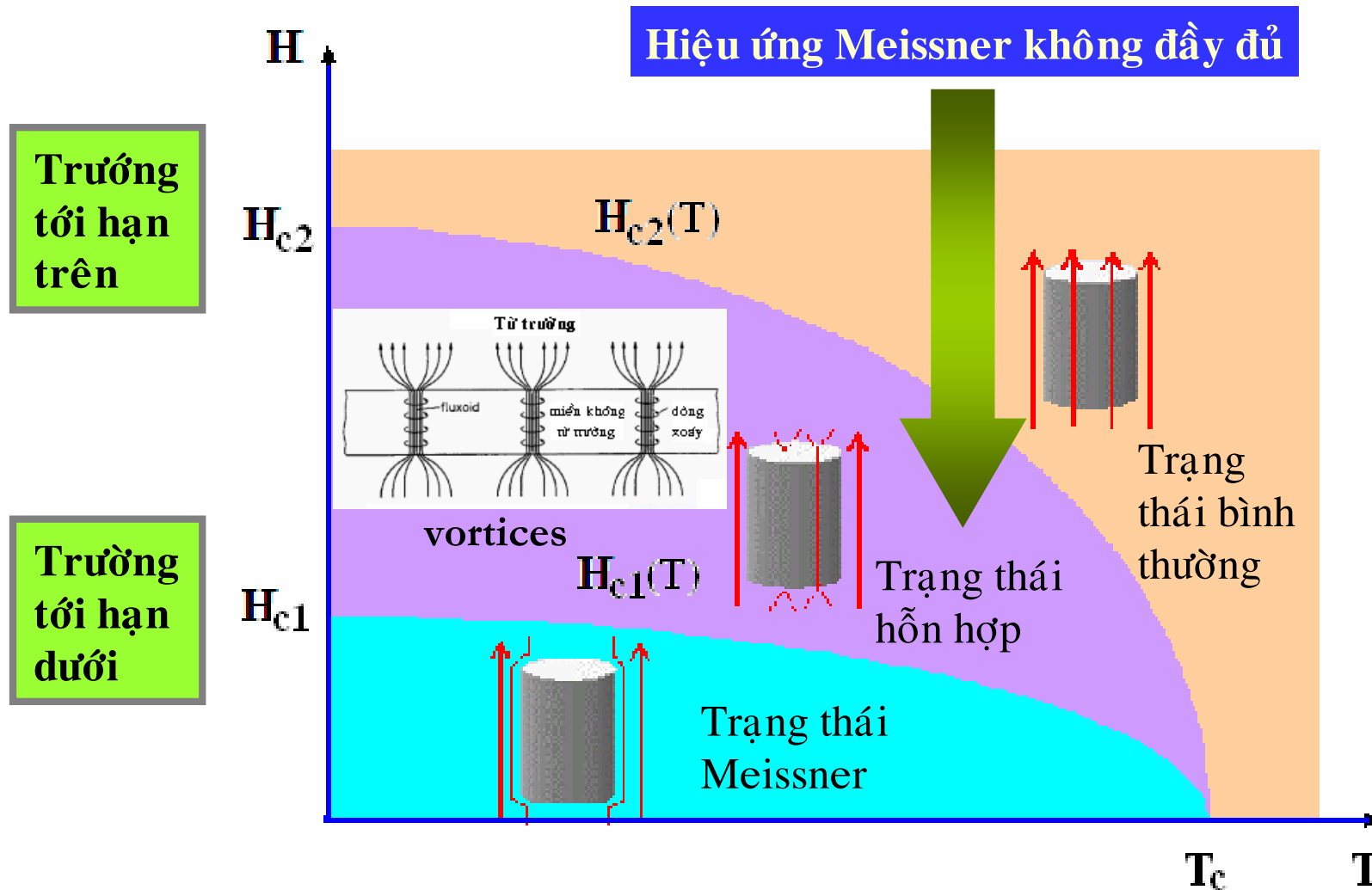


Các dây này định hướng song song với từ trường ngoài và chúng có tác dụng dẫn các đường sức từ.

Một dòng chạy quanh chu vi của mỗi dây; dòng này chặn khối siêu dẫn khỏi từ trường trong dây. Sự chảy của dòng này mang đặc điểm xoáy. Do đó, các dây được gọi là các *ống xoáy* (vortex).

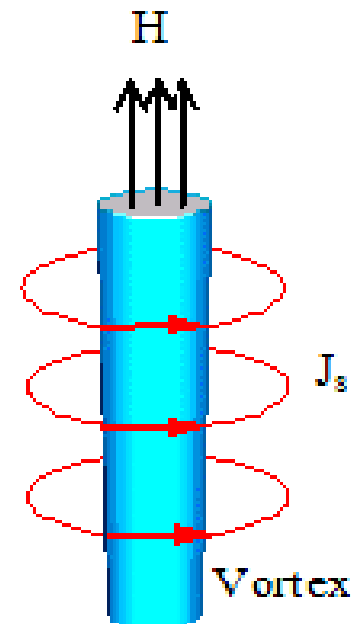


Trường tới hạn trong siêu dẫn loại II



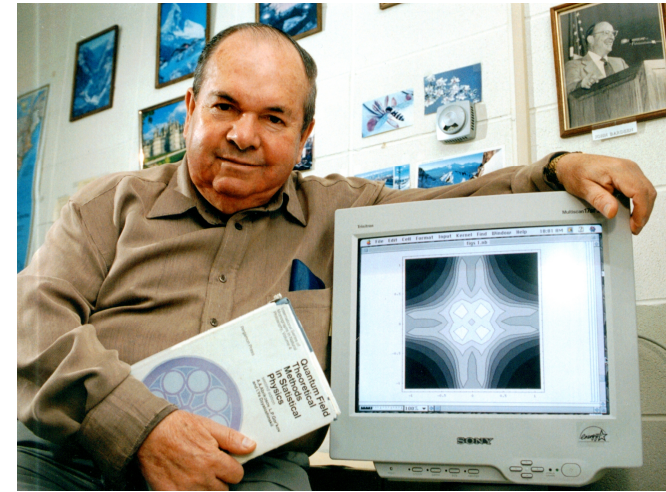
Ống xoáy (vortex) trong chất siêu dẫn

- Có lõi được bao quanh bởi các dòng siêu dẫn (supercurrent)
- Bên trong lõi : các electron bình thường
- Ngoài lõi : các electron siêu dẫn (các cặp Cooper)

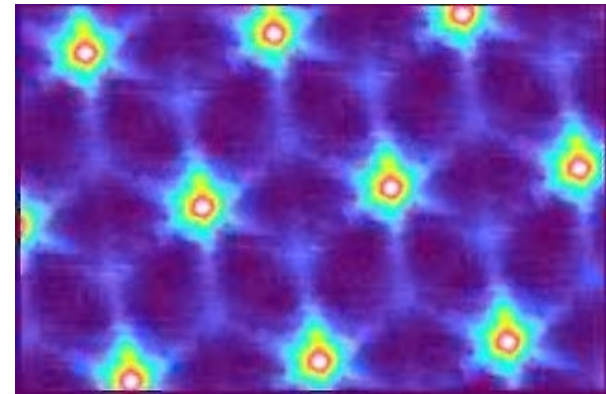


Mạng các đường xoáy Abrikosov

- 1953 – Mạng các đường xoáy Abrikosov : các ống xoáy sắp xếp tối ưu trong miền xoáy theo mạng tam giác
- 2003 – Giải Nobel về Vật lý

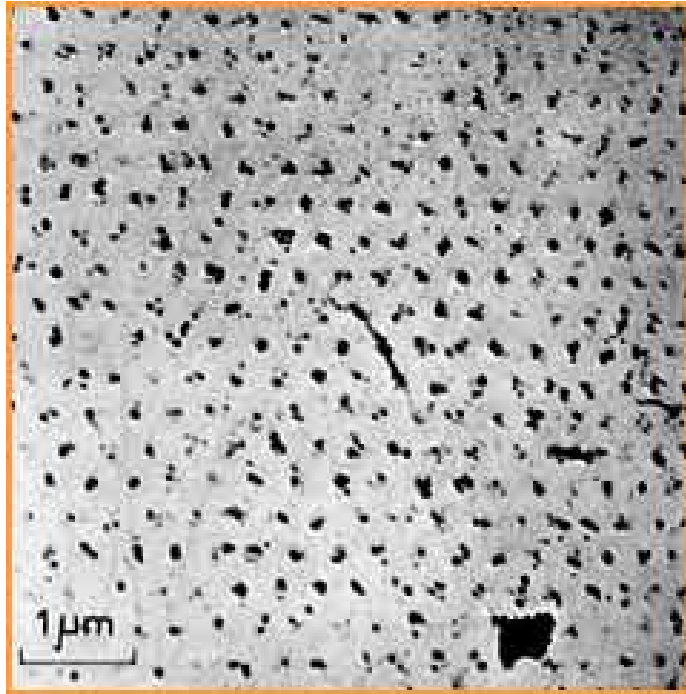


A. A. Abrikosov



© AT&T, 1995

Mạng các đường xoáy Abrikosov



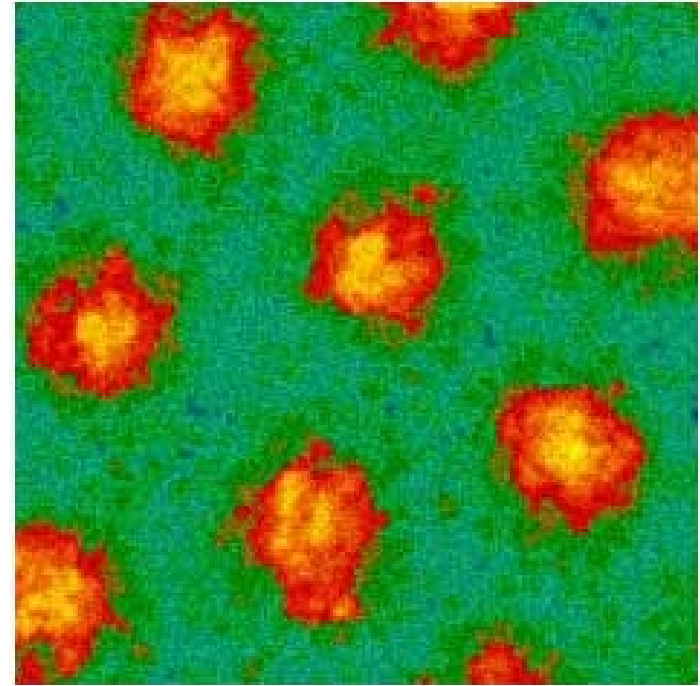
First image of Vortex lattice, 1967

Bitter Decoration

Pb-4at%In rod, 1.1K, 195G

U. Essmann and H. Trauble

[© Physics Letters **24A**, 526 \(1967\)](#)



Vortices in MgB₂, 2002

Scanning Tunnel Spectroscopy

MgB₂ crystal, 2K, 2000G

M. R. Eskildsen et al.

[© Phys. Rev. Lett. **89**, 187003 \(2002\)](#)

Hiển vi điện tử (x 8300)

Hiệu ứng Meissner

Bình thường



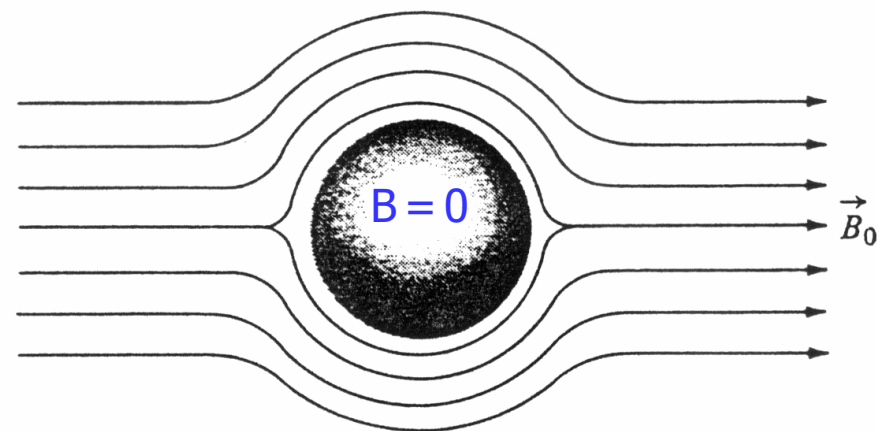
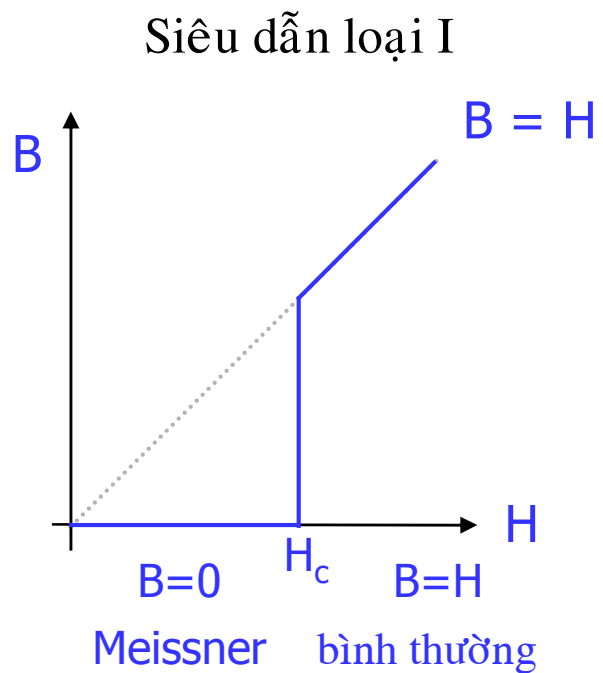
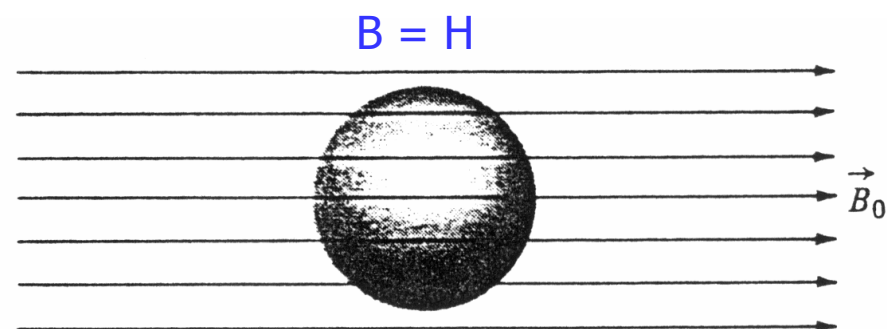
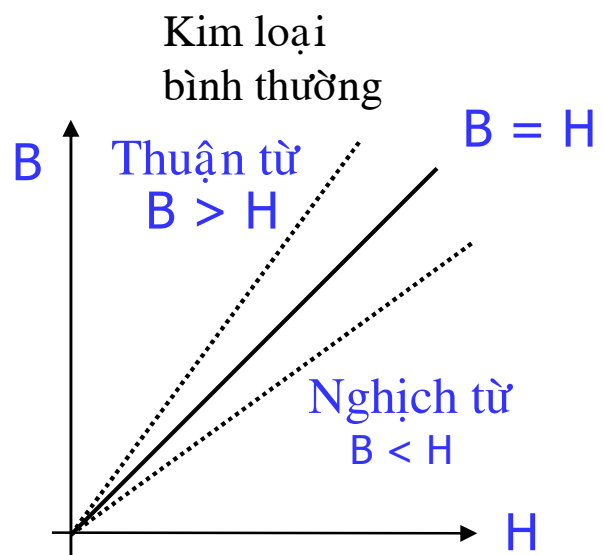
Loại I



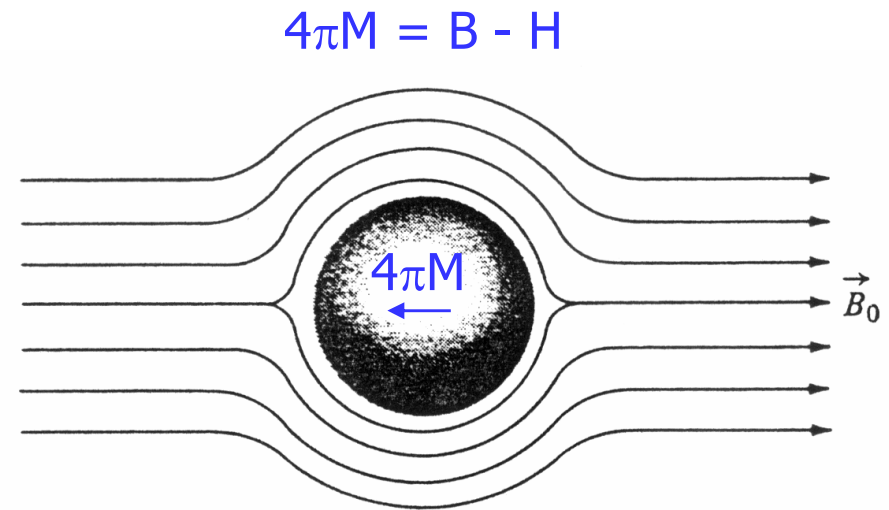
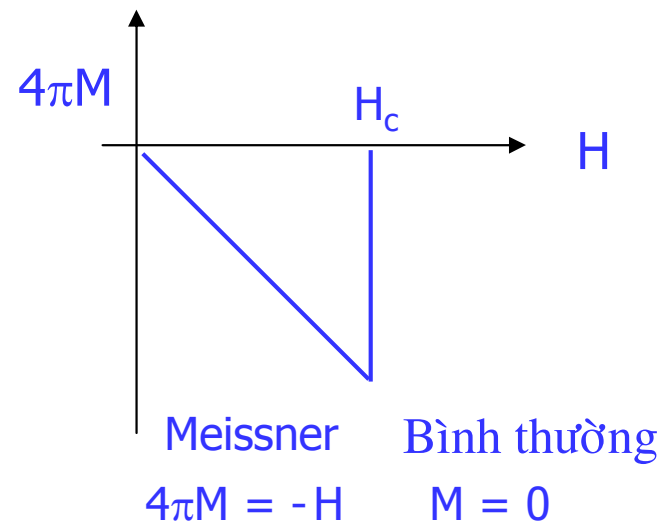
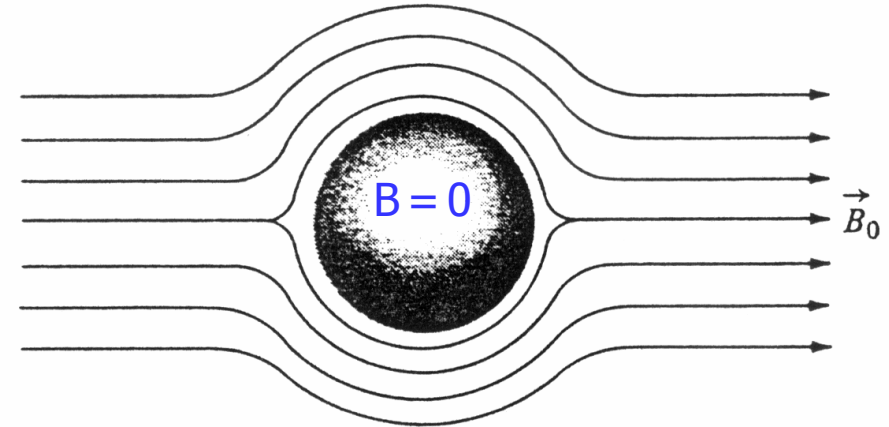
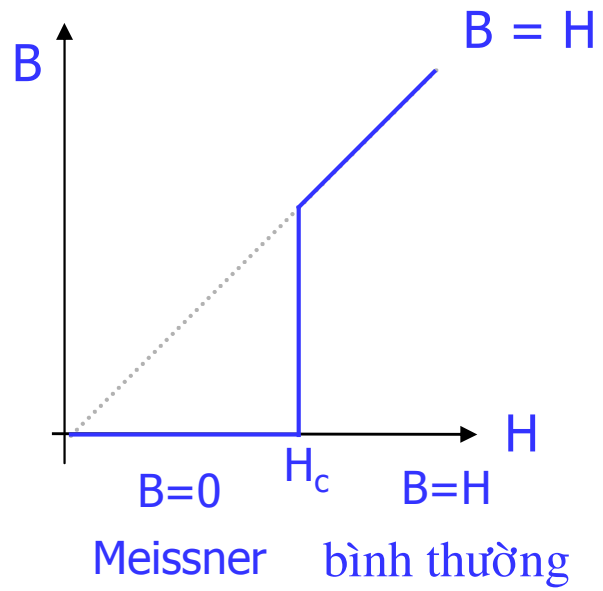
Loại II



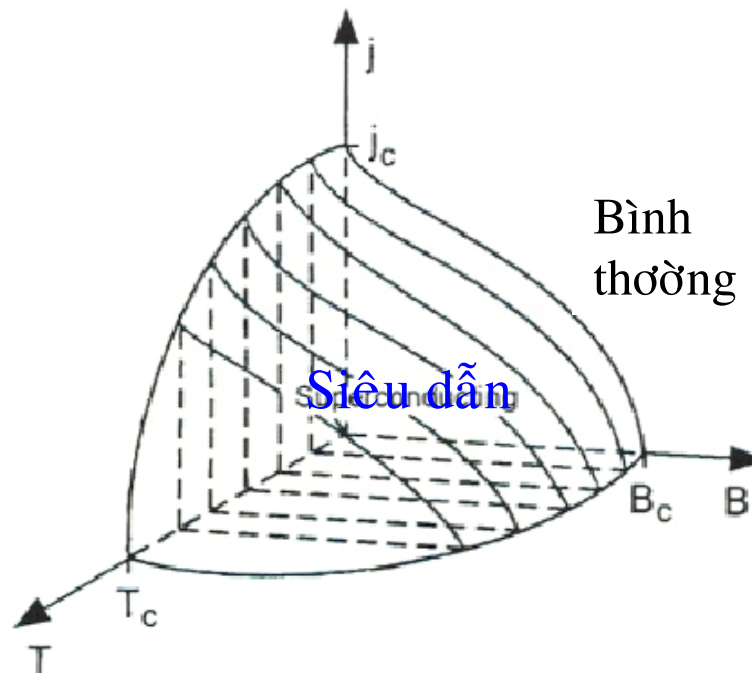
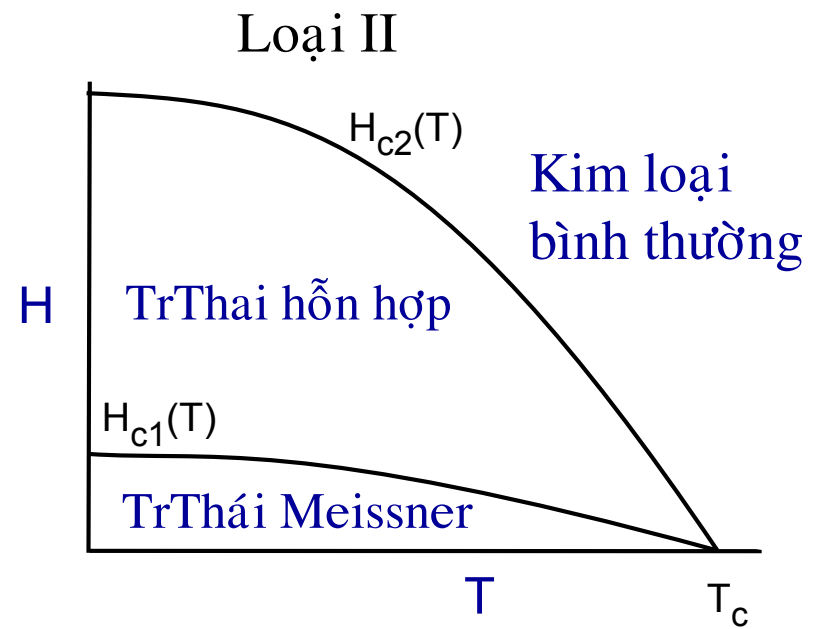
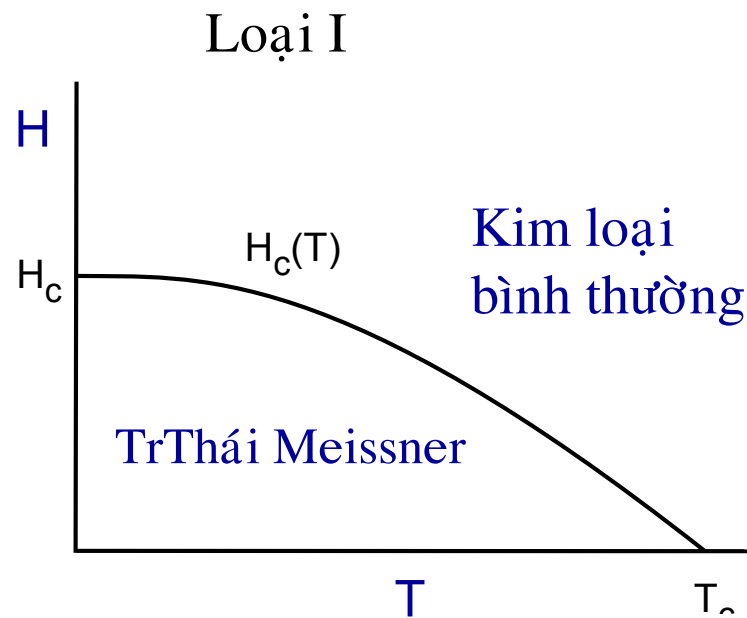
Sự từ hóa các chất siêu dẫn



Siêu dẫn loại I



Giản đồ Pha



Lý thuyết về hiện tượng siêu dẫn

Hiệu ứng đồng vị (1950)

Trong quá trình đi tìm lý thuyết để giải thích cơ chế siêu dẫn, bằng thực nghiệm người ta phát hiện ra rằng : nhiệt độ tới hạn của một chất siêu dẫn phụ thuộc vào khối lượng của các ion của mạng .

Nếu thay các nguyên tử bởi các nguyên tử nặng hơn (thay các đồng vị bằng các đồng vị nặng hơn) thì nhiệt độ tới hạn hơi giảm xuống.

T_c phụ thuộc vào khối lượng của nguyên tử

$$T_c \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$$

Tổng quát hơn

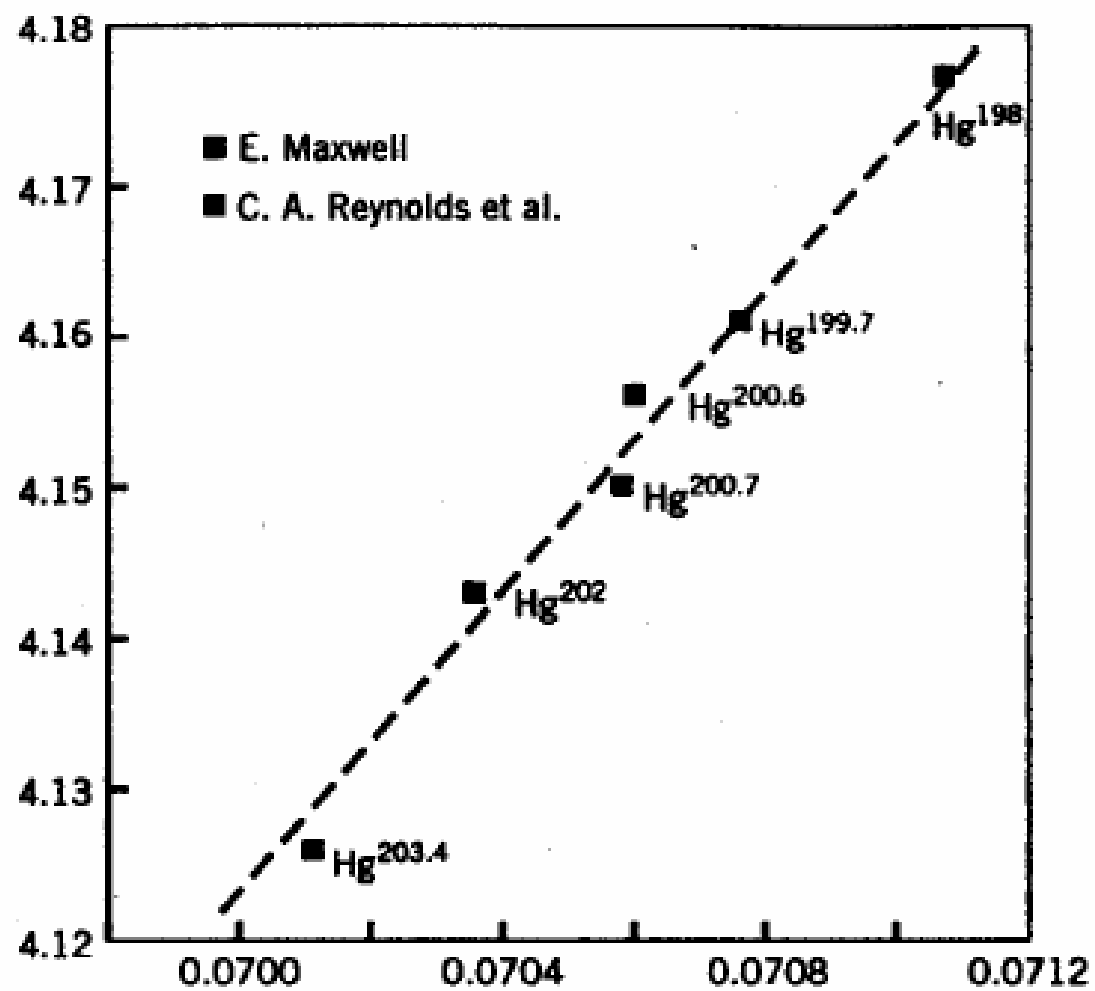
$$T_c M^a = \text{const}$$

Đồng vị
nhiên

Độ phong phú tự
(atom %)

^{196}Hg	0.15
^{198}Hg	9.97
^{199}Hg	16.87
^{200}Hg	23.10
^{201}Hg	13.18
^{202}Hg	29.86
^{204}Hg	6.87

T_c (K)

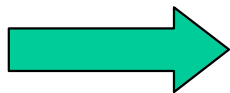


$\frac{1}{\sqrt{M}}$

Hiệu ứng đồng vị trong các chất siêu dẫn

Các giá trị thực nghiệm của α trong $M^\alpha T_c = \text{const}$
(M - khối lượng của đồng vị)

Chất	α	Chất	α
Zn	0.45 ± 0.05	Ru	0.00 ± 0.05
Cd	0.32 ± 0.07	Os	0.15 ± 0.05
Sn	0.47 ± 0.02	Mo	0.33
Hg	0.50 ± 0.03	Nb ₃ Sn	0.08 ± 0.02
Pb	0.49 ± 0.02	Zr	0.00 ± 0.05

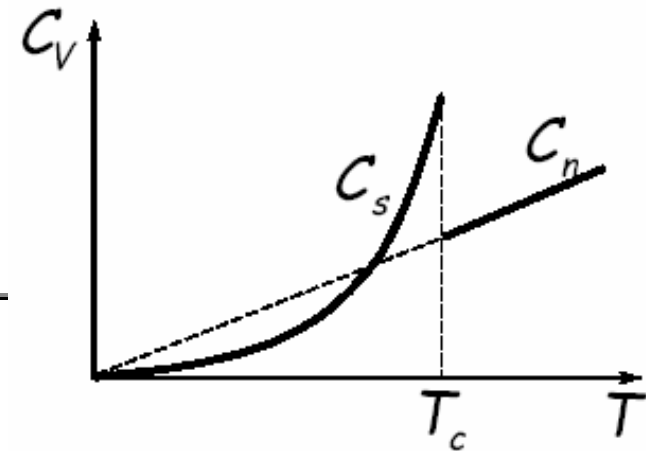


Mạng có vai trò quan trọng

Phonon tham gia vào quá trình siêu dẫn

Nhiệt dung

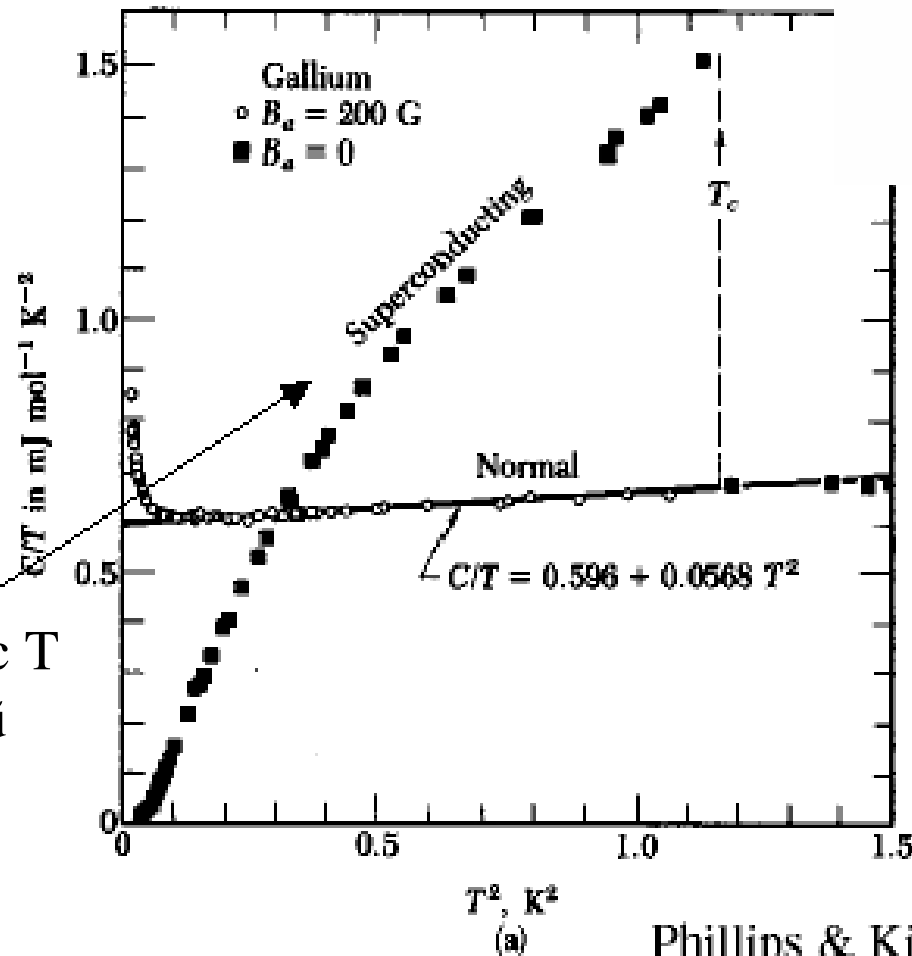
Gián đoạn ở T_c



$$C_n(T) = \gamma T$$

$$C_s(T) = AT^{-3/2}e^{-\Delta_0/k_B T}$$

$$\begin{aligned} \Delta C_v|_{T=T_c} &= C_s - C_n \\ &= \text{const.} T_c \end{aligned}$$



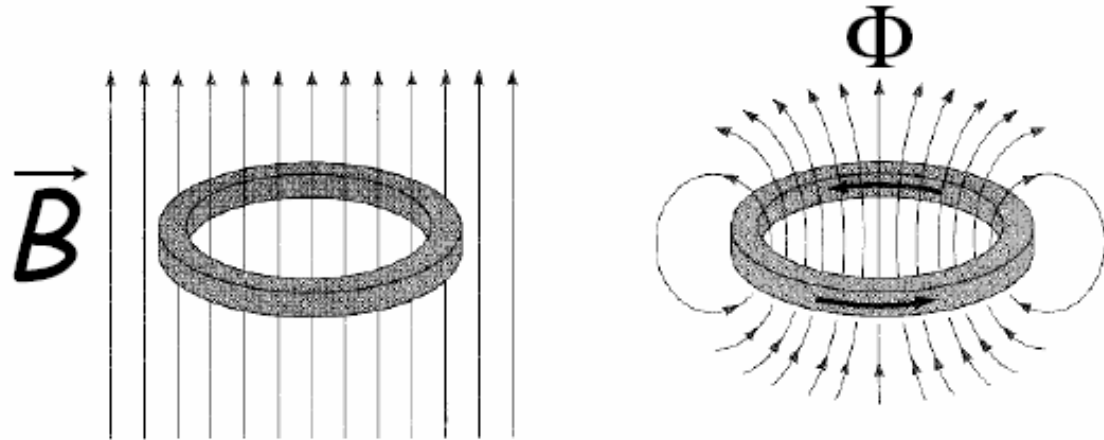
Sự phụ thuộc T
theo hàm mũ

$$C \propto e^{-b/kT}$$

Phillips & Kittel

Chứng tỏ có vùng cấm năng lượng !

Sự lượng tử hóa của Từ thông

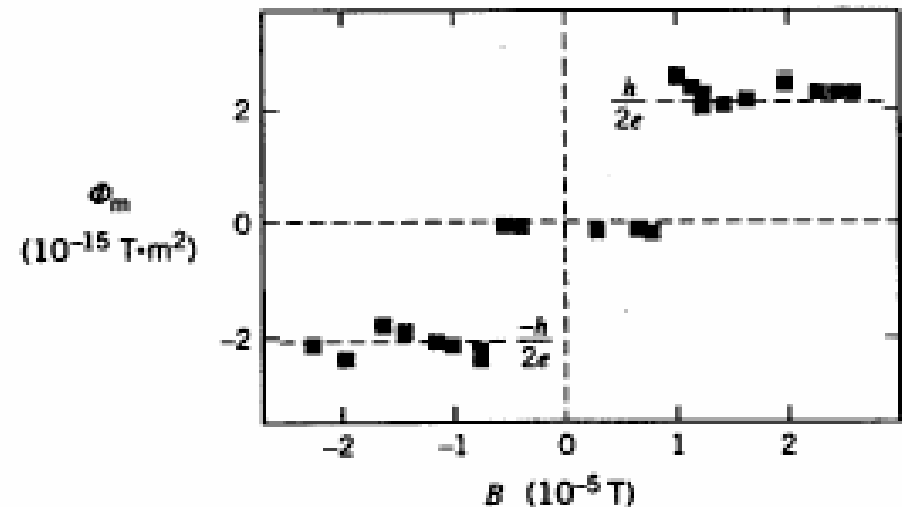


Sau khi thôi đặt từ trường ngoài lên vòng xuyên siêu dẫn từ thông bị bắt (do dòng persistent) bị lượng tử hóa

$$\Phi = n \frac{h}{2e} = n \Phi_0, \quad n \in \mathbb{N} \quad \Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Tm}$$

Lượng tử từ thông

Một đầu mối !



“Fluxoids”

Bằng chứng thực nghiệm về sự lượng tử hóa của từ thông trong vòng xuyên siêu dẫn (1961).

Deaver & Fairbank, Doll & Näbauer 196

Lý thuyết siêu dẫn

- hiện tượng luận :

- * F & H. London (1935)
- * Ginzburg & Landau (1950)

- lượng tử :

- * Frohlich (1950)
- * Bardeen, Cooper & Schrieffer (BCS)
(1957) – Giải thưởng Nobel

Lý thuyết về hiện tượng siêu dẫn

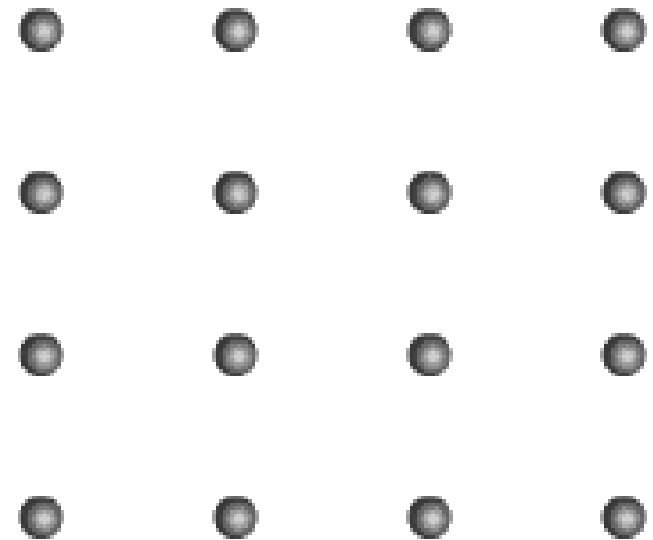
Vitaly L. Ginzburg



- Những năm 1930 – mô hình lượng tử không giải thích được hiện tượng siêu dẫn
- 1950 – lý thuyết hiện tượng luận của Vitaly Ginzburg và Lev Landau
 - ❖ phương trình Ginzburg-Landau
 - ❖ mô tả siêu dẫn gần nhiệt độ tới hạn T_c
- 2003 – Ginzburg được giải thưởng Nobel về Vật lý

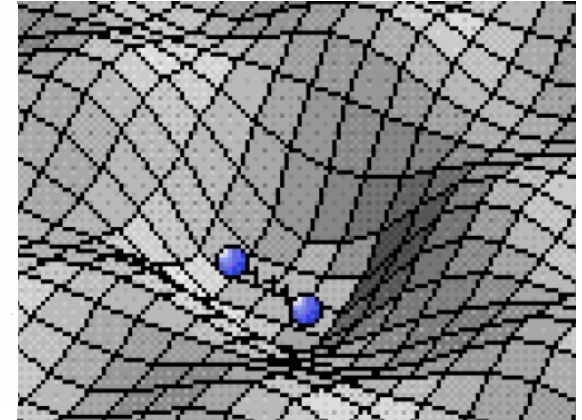
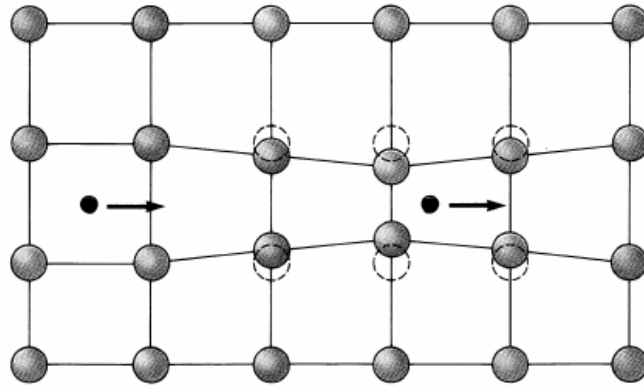
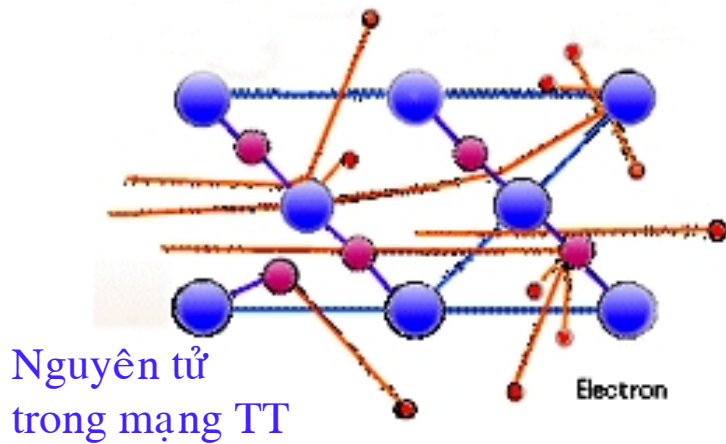
Lý thuyết BCS

- BCS = John **Bardeen**, Leon **Cooper** và Robert **Schrieffer**
- 1957 – giải thích *tại sao* xuất hiện hiện tượng siêu dẫn
- Cặp Cooper = sự kết cặp của các electrons
- 1972 – giải thưởng Nobel về Vật lý



Trạng thái dẫn điện bình thường

Trạng thái siêu dẫn



1. Electron #1 làm biến dạng mạng (ion dương) khi chuyển động qua nó
2. Electron #2 bị hút bởi mạng bị biến dạng nếu lực hút lớn hơn lực đẩy tĩnh điện --> cặp electron được tạo thành.
3. Các cặp (cặp Cooper) có khoảng cách có thể lên đến μm .
4. Năng lượng liên kết của cặp Cooper $\sim 1 \text{ mV}$, chỉ có thể ở nhiệt độ thấp.
5. Sự hút giữa các electron kết đôi phụ thuộc vào khối lượng của ion.

- Các cặp Cooper là các bosons --> tất cả các cặp Cooper đều có thể ở trong cùng trạng thái năng lượng (sự ngưng tụ Bose-Einstein)

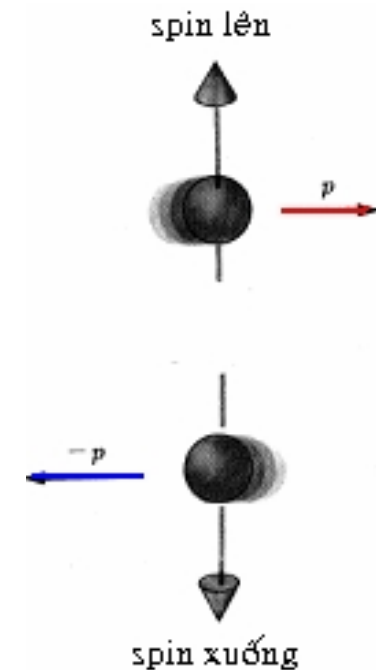
- một cặp Cooper có năng lượng nhỏ hơn năng lượng của 2 electron riêng biệt

- Trong một cặp Cooper , spin của electron ($+1/2$ hoặc $-1/2$) triệt tiêu và spin tổng cộng bằng 0

- Tất cả các cặp Cooper đều ở trạng thái cơ bản

- Các cặp Cooper được mô tả bởi một hàm sóng kết hợp mở rộng ra toàn hệ

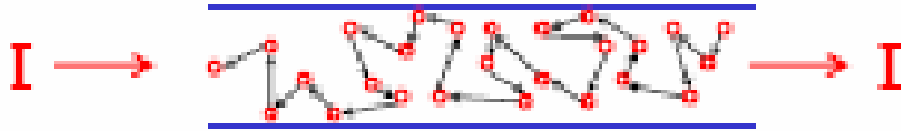
- muốn thay đổi xung lượng của một cặp phải thay đổi xung lượng của tất cả các cặp (Các va chạm chỉ có thể ảnh hưởng đến *toàn* hệ của các cặp), một sự thay đổi như vậy cần có năng lượng lớn.



- Các chất dẫn điện tốt (Cu) có biên độ dao động mạng nhỏ
 - nên tán xạ electron-mạng ít
 - Biên độ dao động nhỏ hạn chế sự tạo thành cặp Cooper
- Các chất dẫn điện kém (Hg , thiếc , chì) có biên độ dao động mạng lớn
 - va chạm electron -mạng xảy ra nhiều
 - → thuận lợi cho việc tạo cặp

Kim loại bình thường

Electron có điện tích $-e$

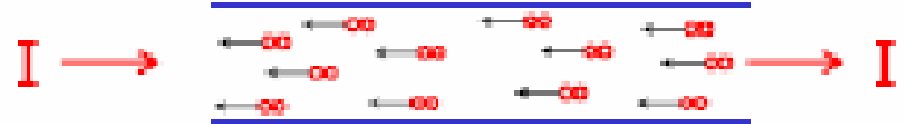


Sự **tán xạ** các electron tạo nên điện trở

Dòng điện **tạo ra điện thế**
→ gây nên sự mất mát năng lượng

Siêu dẫn : LT BCS

Cặp Cooper có điện tích $-2e$

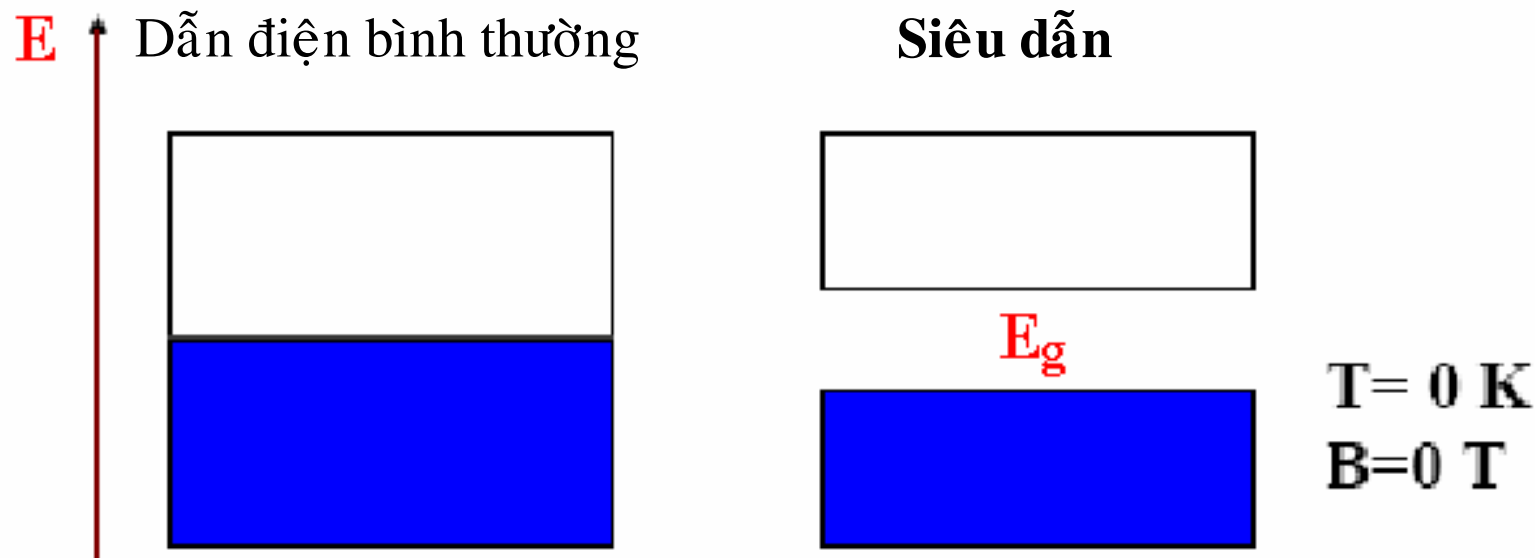


Các cặp Cooper tải siêu dòng không gặp cản trở

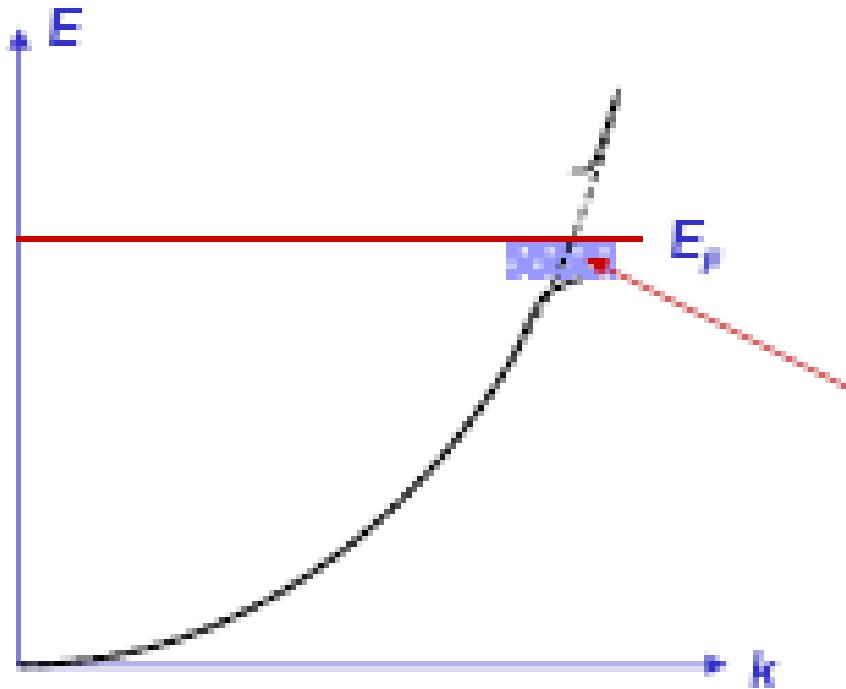
Siêu dòng **không tạo ra điện thế** → không gây nên sự mất mát năng lượng

Vùng cấm siêu dẫn

- Trong trạng thái bình thường bất kỳ sự thay đổi năng lượng nào cũng làm cho các electron chuyển lên trạng thái kích thích (các mức trống).
- Trong trạng thái siêu dẫn, năng lượng của các trạng thái bị chiếm giảm do sự hình thành các cặp Cooper --> xuất hiện khoảng cấm năng lượng E_g .



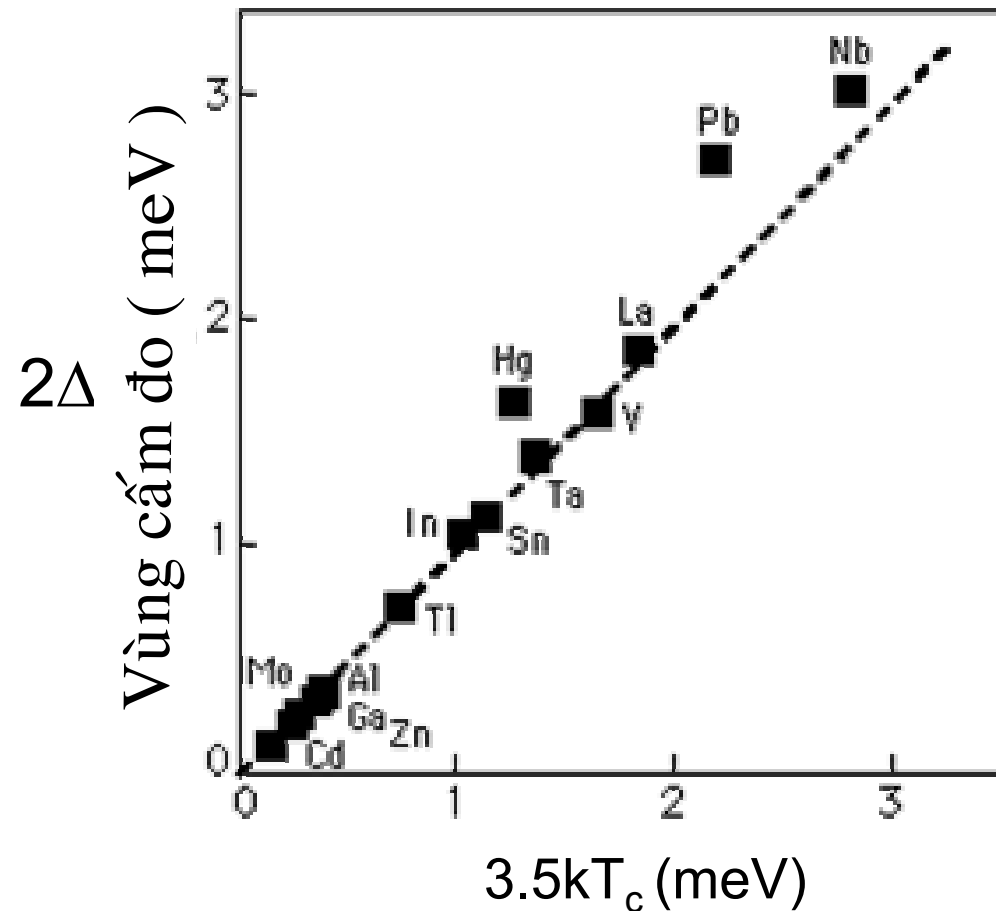
Vùng cấm siêu dẫn



Sự giảm năng lượng làm xuất hiện vùng cấm do tương tác của 2 electron có spin ngược nhau tạo thành cặp Cooper.

$$E_g = 2\Delta$$

Độ rộng vùng cấm siêu dẫn



Độ rộng vùng cấm và T_c có liên quan với nhau

Vài kết quả của Lý thuyết BCS

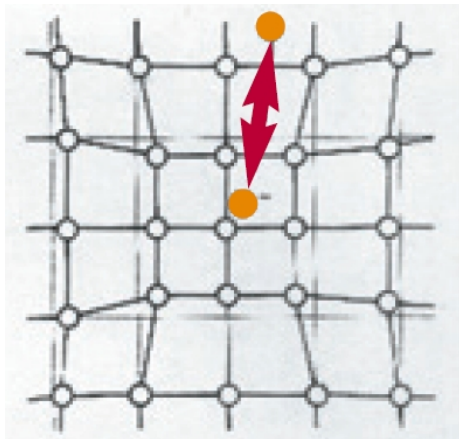
Năng lượng liên kết của cặp Cooper

$$\Delta \approx 2\eta\omega_D e^{-\frac{1}{F \cdot N_F}}$$

$\eta\omega_D \approx k_B T_D$ năng lượng phonon Debye

F thế hiệu dụng

N_F mật độ trạng thái Fermi



Kích thước của cặp Cooper 100 nm
Hằng số mạng 0,1 ÷ 0,4 nm

Vài kết quả của Lý thuyết BCS

Độ rộng vùng cấm và T_c có liên quan với nhau

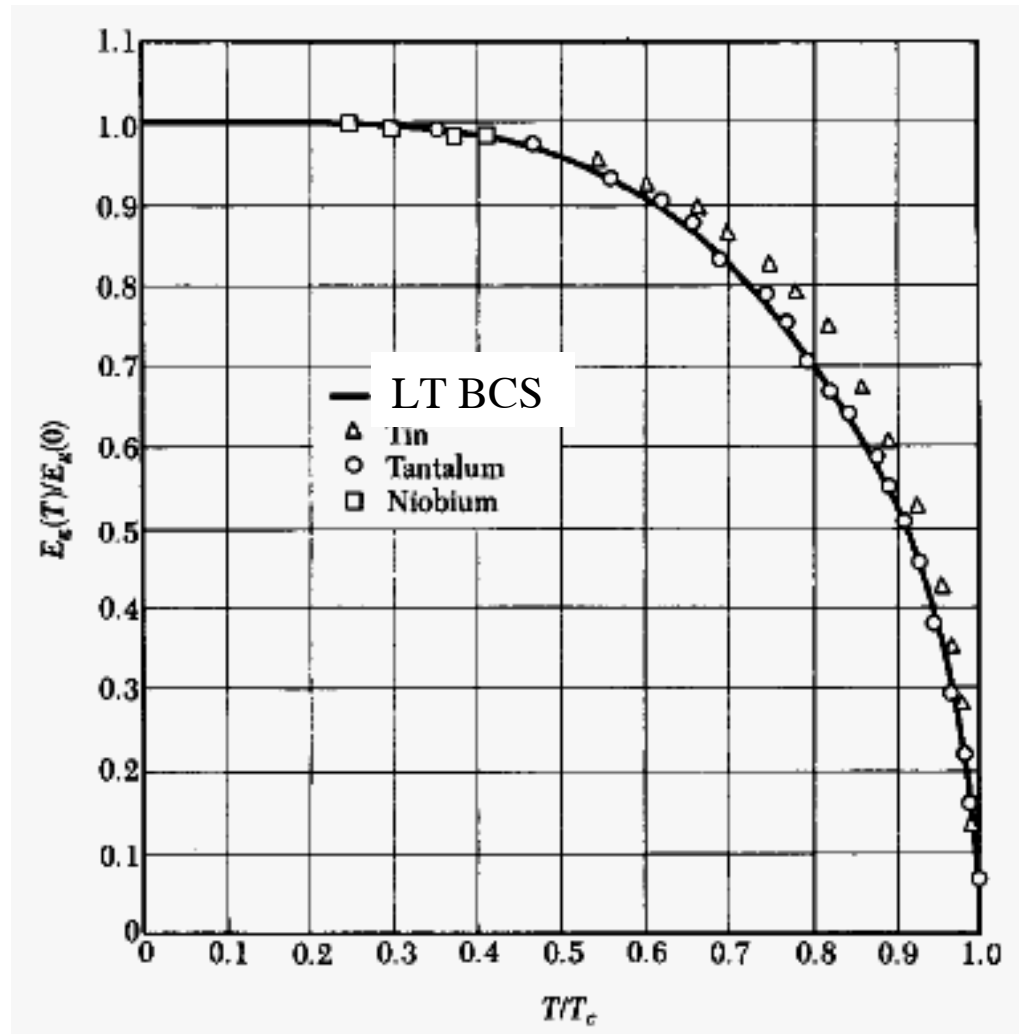
$$\Delta(0K) \approx 1,76 \cdot k_B T_c$$

$$\Delta(T) \approx 1,74 \cdot \Delta(0K) \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/2}$$

Từ trường tới hạn

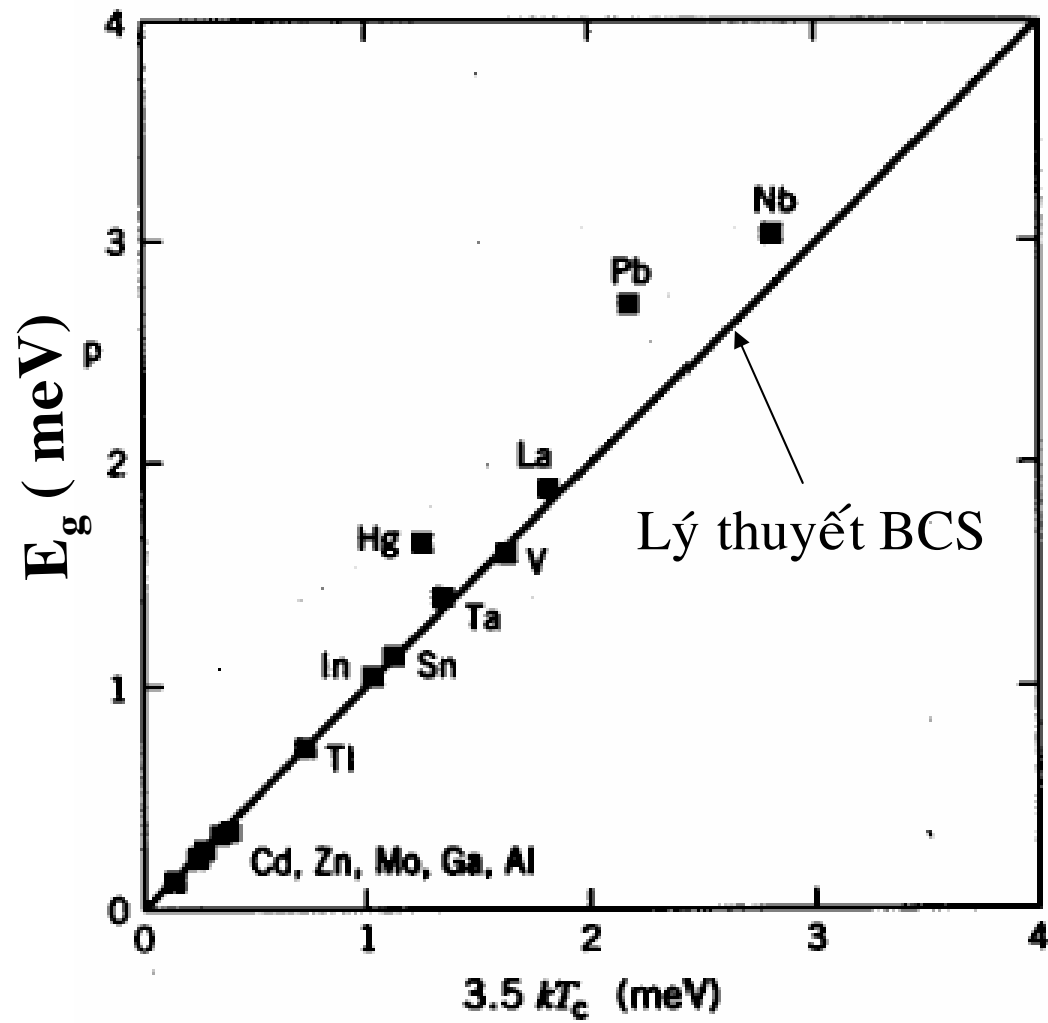
$$H_c(T) = H_c(0K) \left[1 - a \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right] \quad a \text{ là 1 hằng số của chất SD}$$

Vài kết quả của Lý thuyết BCS



Lý thuyết BCS không đúng với vật liệu siêu dẫn gốm

Vùng cấm



Nhiệt dung

$$C \propto e^{-\frac{E_{gap}}{2k_B T_c}}$$

Các chất siêu dẫn nhiệt độ cao



J. Georg Bednorz K. Alexander Müller

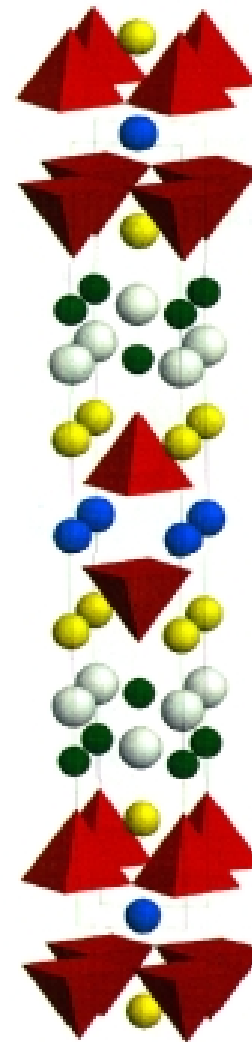
Năm **1986**, Bednorz và Muller phát hiện siêu dẫn trong $\text{La}_{5-x}\text{Ba}_x\text{Cu}_5\text{O}_{5(3-y)}$

$\text{La}_{5-x}\text{Ba}_x\text{Cu}_5\text{O}_{5(3-y)}$ với $x = 0,75$ có $T_c \sim 30\text{K}$, trong trạng thái bình thường là chất dẫn điện kém

Hợp chất chính LaCuO_2 là chất cách điện !

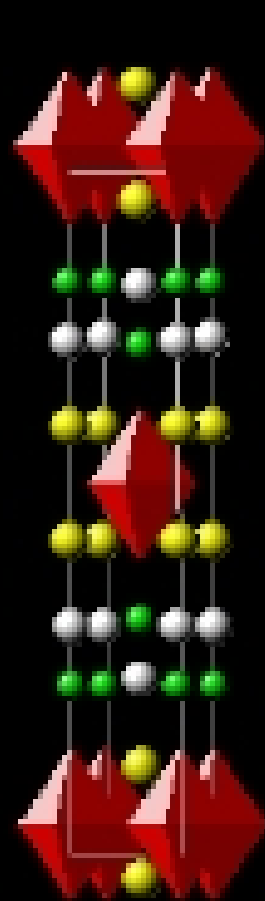
Giải thưởng Nobel về Vật lý 1987

Các chất siêu dẫn nhiệt độ cao



Lớp kép CuO_2

- Các chất siêu dẫn nhiệt độ cao có cấu trúc lớp.
- Ở $T > T_c$, các vật liệu này có tính bán dẫn rất dị hướng.
- Một số nhóm siêu dẫn T cao điển hình :
 - * yttrium-barium-copper-oxide (ký hiệu YBCO),
 - * bismuth-strontium-calcium-copper oxide (ký hiệu
BSCCO),
 - * thallium-barium-calcium-copper-oxide (ký hiệu
TBCCO).
- Chất siêu dẫn có chứa Hg đạt nhiệt độ tối hạn cao nhất
 $T_c \sim 160 \text{ K}$.
- Vật liệu có T_c cao nhất thường là *loại p*.



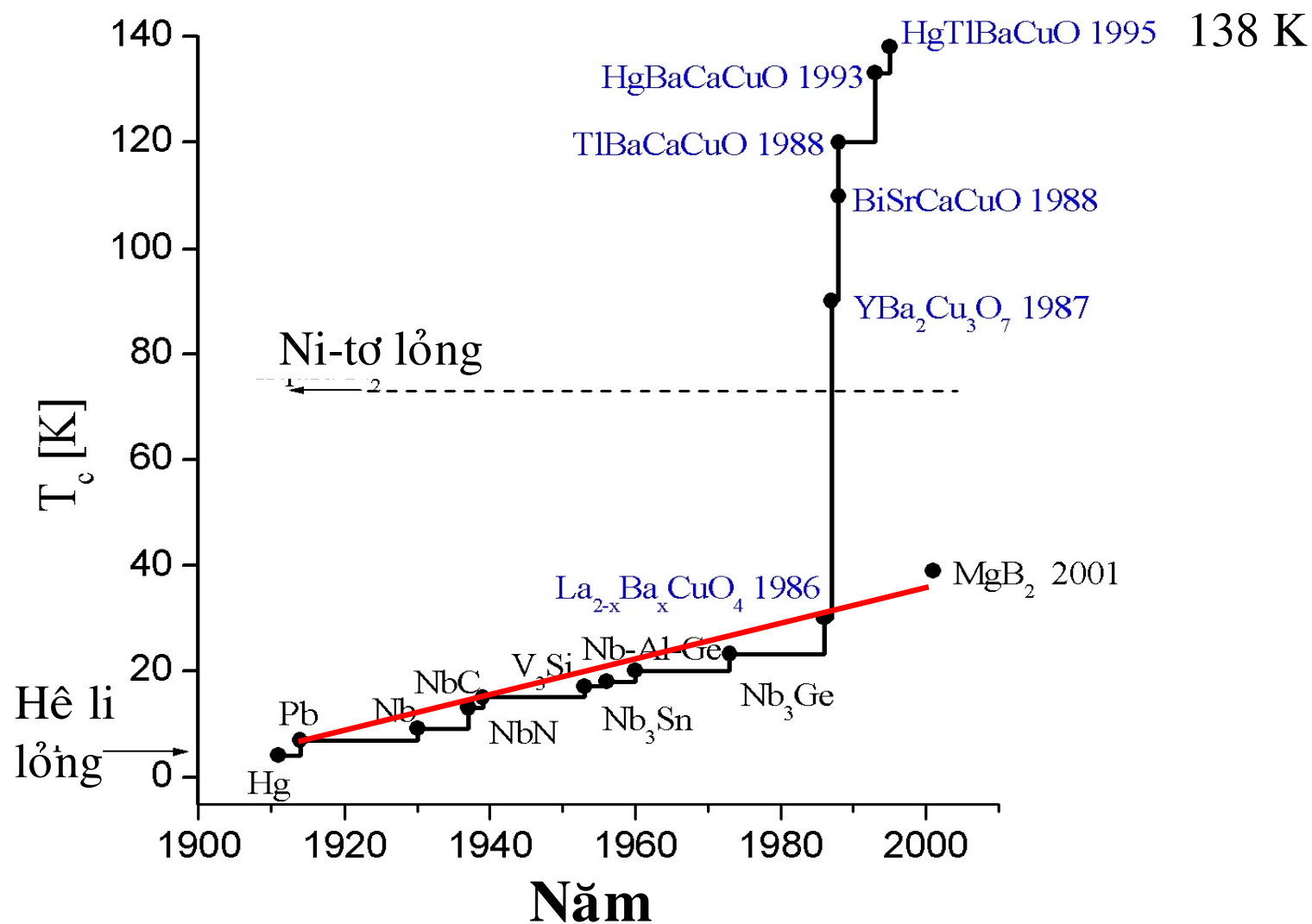
$T_c \sim 40\text{ K}$



95K



138 K



Chất siêu dẫn $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$ đạt nhiệt độ tối hạn cao
 $T_c = 164 \text{ K}$

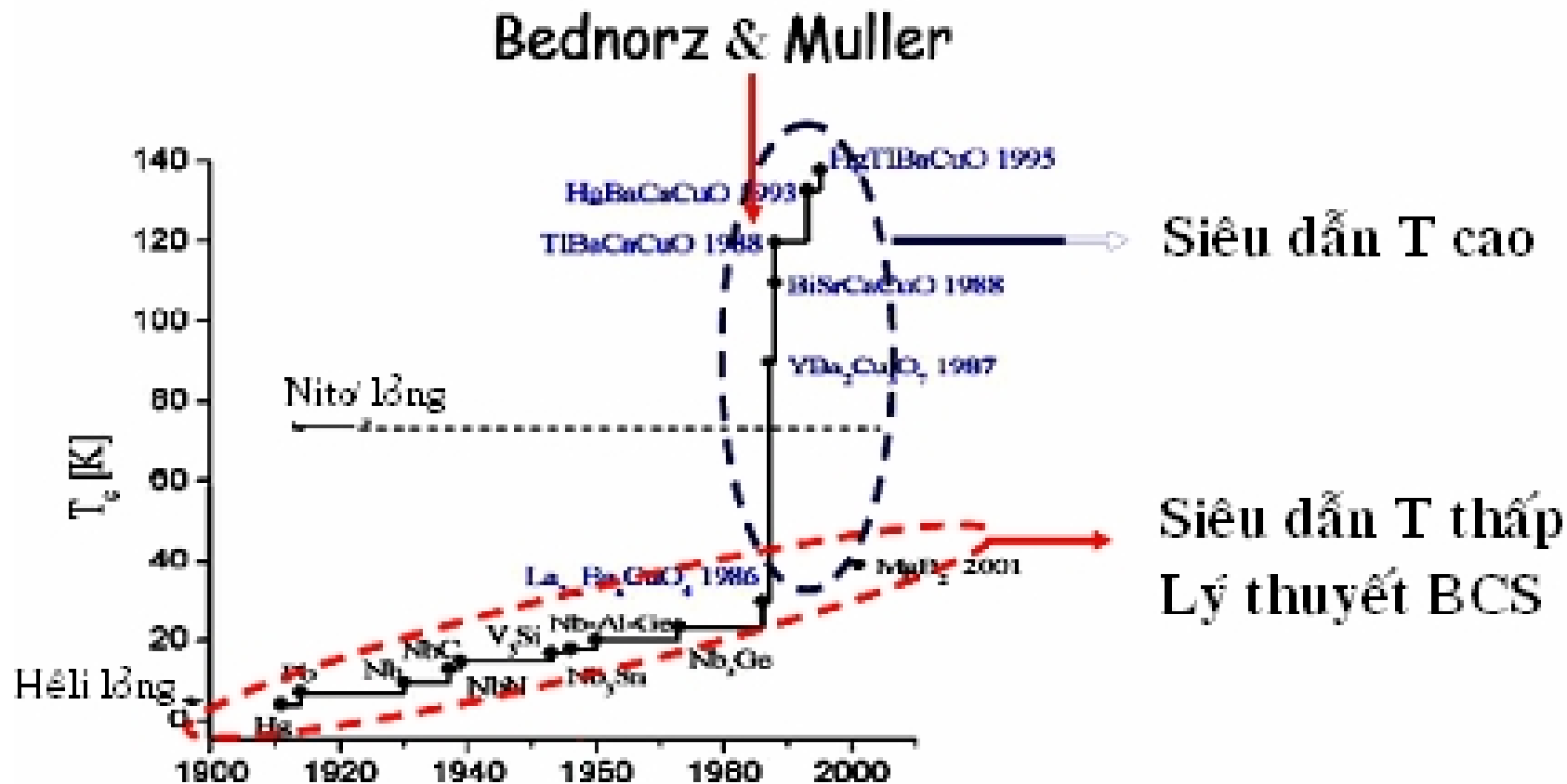


Critical Temperatures of Some Superconducting Materials.

Materials	T_c [K]	Remarks
Tungsten	0.01	—
Mercury	4.15	H.K. Onnes (1911)
Sulfur-based organic superconductor	8	S.S.P. Parkin et al. (1983)
Nb ₃ Sn and Nb–Ti	9	Bell Labs (1961), Type II
V ₃ Si	17.1	J.K. Hulm (1953)
Nb ₃ Ge	23.2	(1973)
La–Ba–Cu–O	40	Bednorz and Müller (1986)
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} ^a	92	Wu, Chu, and others (1987)
RBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} ^a	~92	R = Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{10+δ}	113	Maeda et al. (1988)
Tl ₂ CaBa ₂ Cu ₂ O _{10+δ}	125	Hermann et al. (1988)
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ}	134	R. Ott et al. (1995)

^aThe designation “1-2-3 compound” refers to the molar ratios of rare earth to alkaline earth to copper. (See chemical formula.)

Tất cả các chất siêu dẫn nhiệt độ cao đều thuộc loại II

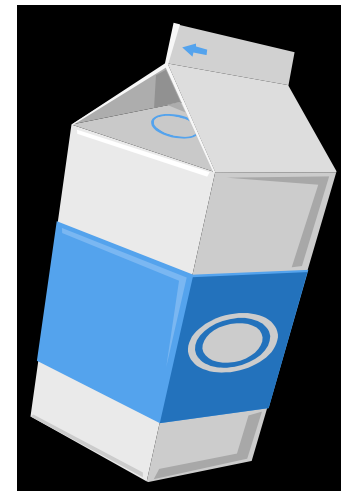


Cơ chế siêu dẫn trong các chất siêu dẫn nhiệt độ cao khác với chất siêu dẫn nhiệt độ thấp.

Các chất siêu dẫn nhiệt độ cao

- Có khả năng ứng dụng thực tế
 - T_c cao hơn
 - H_{c2} lớn hơn
- Dễ làm lạnh :
 - He (4,22 K): \$5/lit
 - N (77,36 K): 10¢/lit

sữa tươi : 66¢/lit



Ứng dụng : Vận tải

**Tàu chạy trên đệm từ :
tàu Maglev**

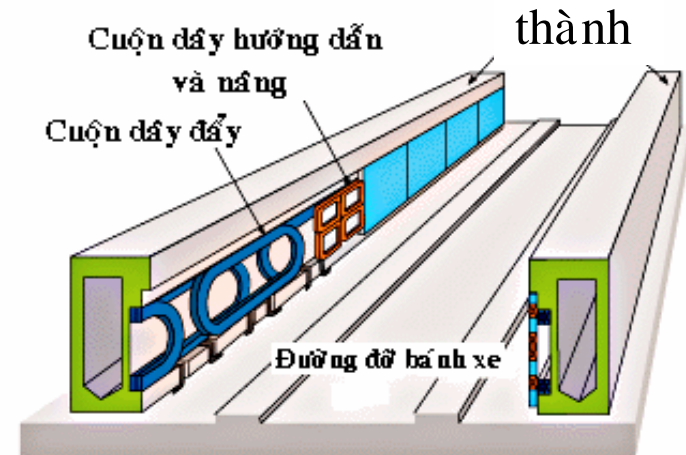


Tàu Yamanashi MLX01MagLev



Vận tốc có thể lên đến 500 km/giờ ,
các tàu maglev sẽ là phương tiện nối
liên các thành phố cách nhau hơn
1000 km trong tương lai gần.

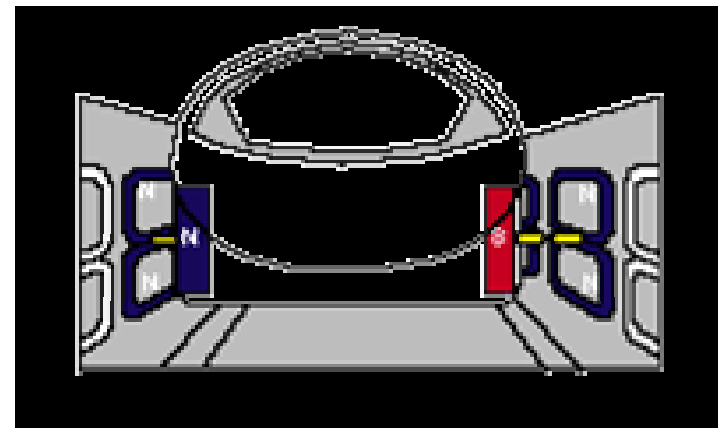
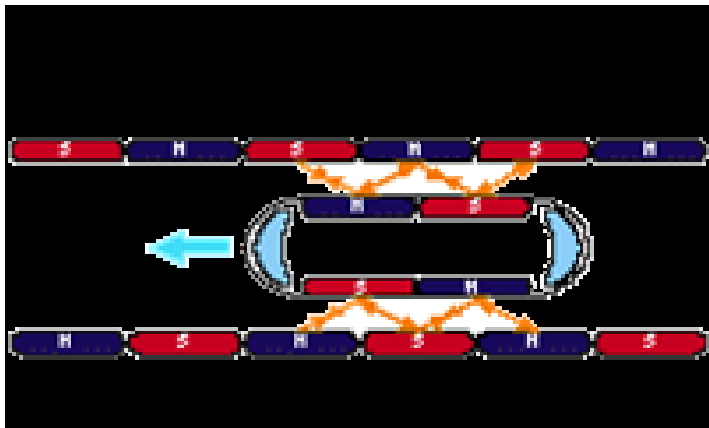
Máy bay thương mại Boeing-777 dùng
cho các chuyến bay đường dài có vận
tốc khoảng 905 km/ giờ .



Đường chạy nằm giữa hai thành có lắp liên tiếp các cuộn dây thẳng đứng. Các cuộn dây này không phải dây siêu dẫn.

Khi tàu đi qua mỗi cuộn dây, chuyển động của các nam châm siêu dẫn trên tàu cảm ứng dòng điện trong các cuộn dây làm cho chúng trở thành các nam châm điện.

Các nam châm trên con tàu và trên các thành tạo lực nâng (tàu cách đường dẫn 1-10 cm) và giữ cho tàu ở giữa tâm đường.



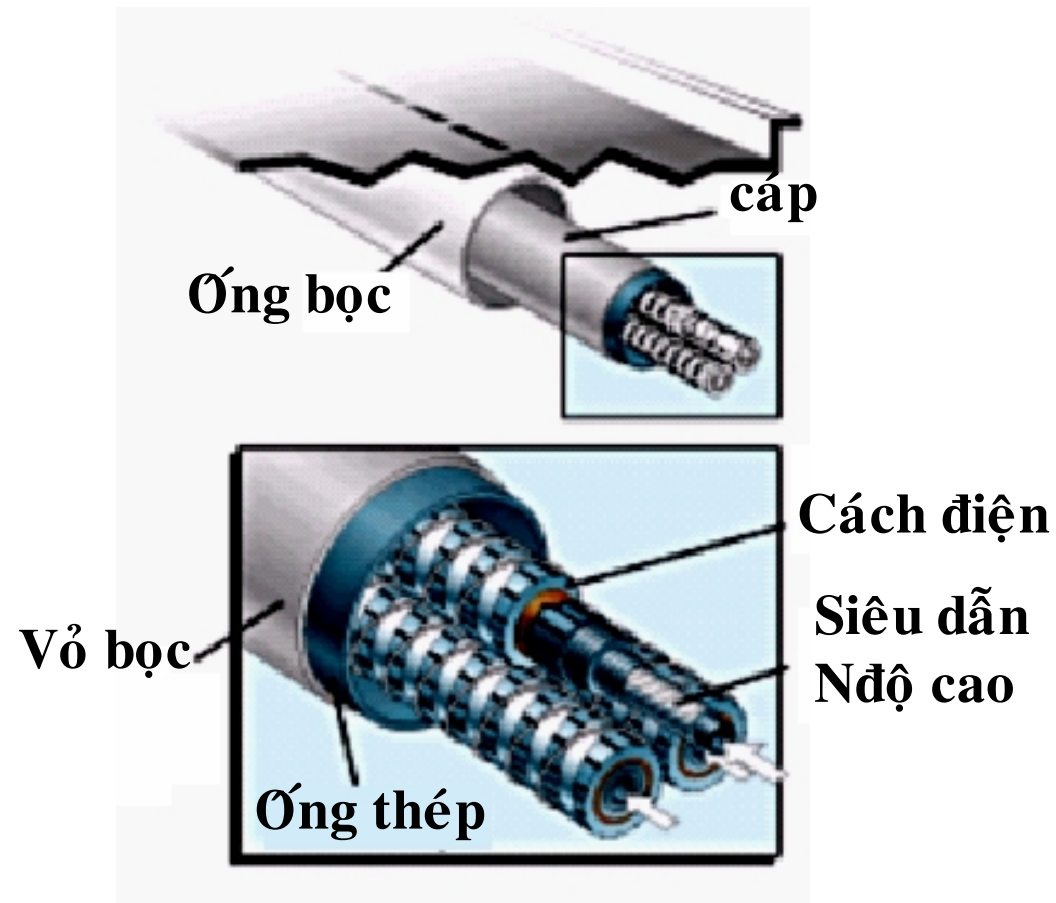
Ứng dụng : Y tế



MRI (Magnetic Resonance Imaging) cho các hình ảnh chi tiết về các mô mềm.

Các cuộn dây nam châm siêu dẫn tạo ra từ trường mạnh và đồng nhất trong cơ thể của bệnh nhân.

Ứng dụng : Tải điện



Cáp tải điện siêu dẫn làm lạnh bằng nitơ lỏng.