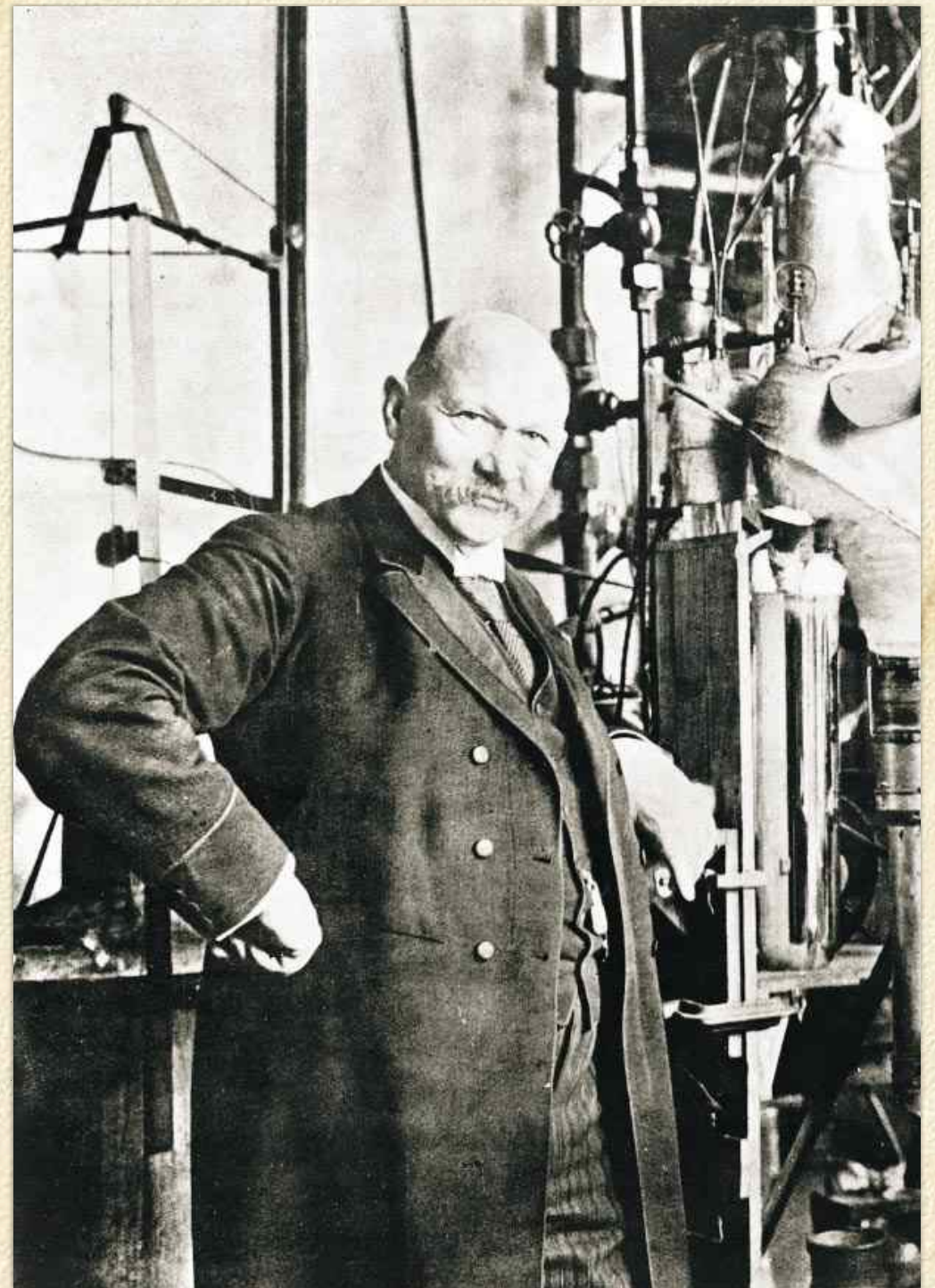
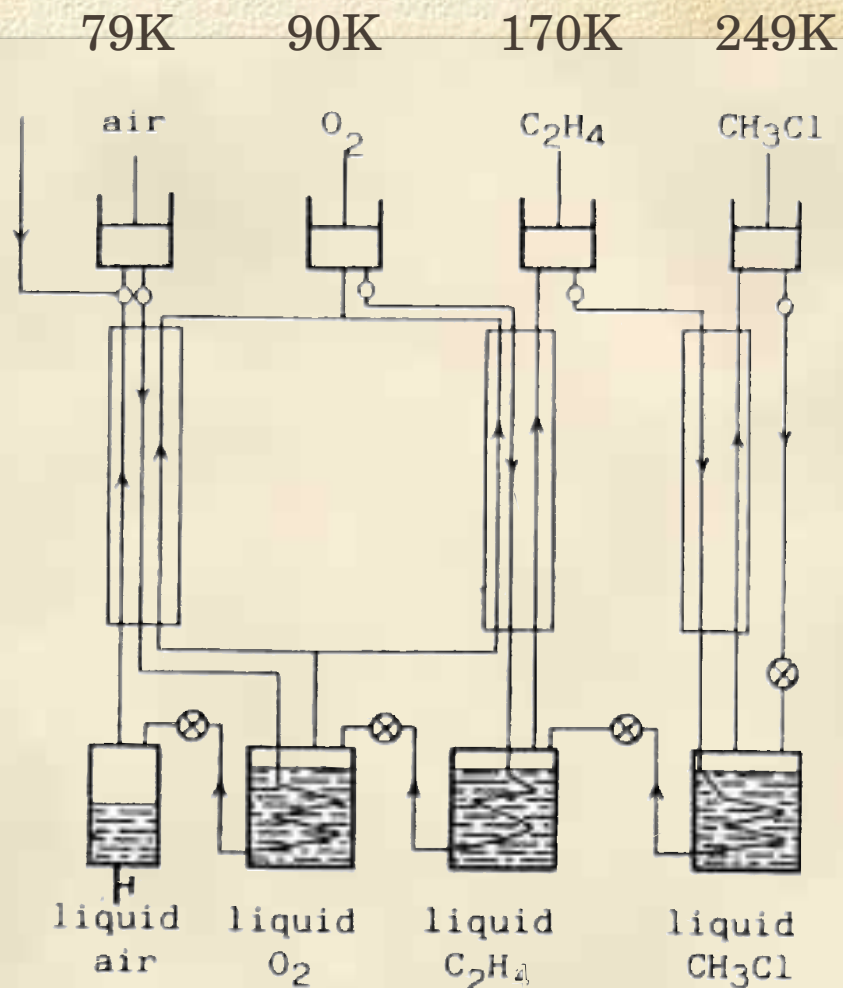


超伝導

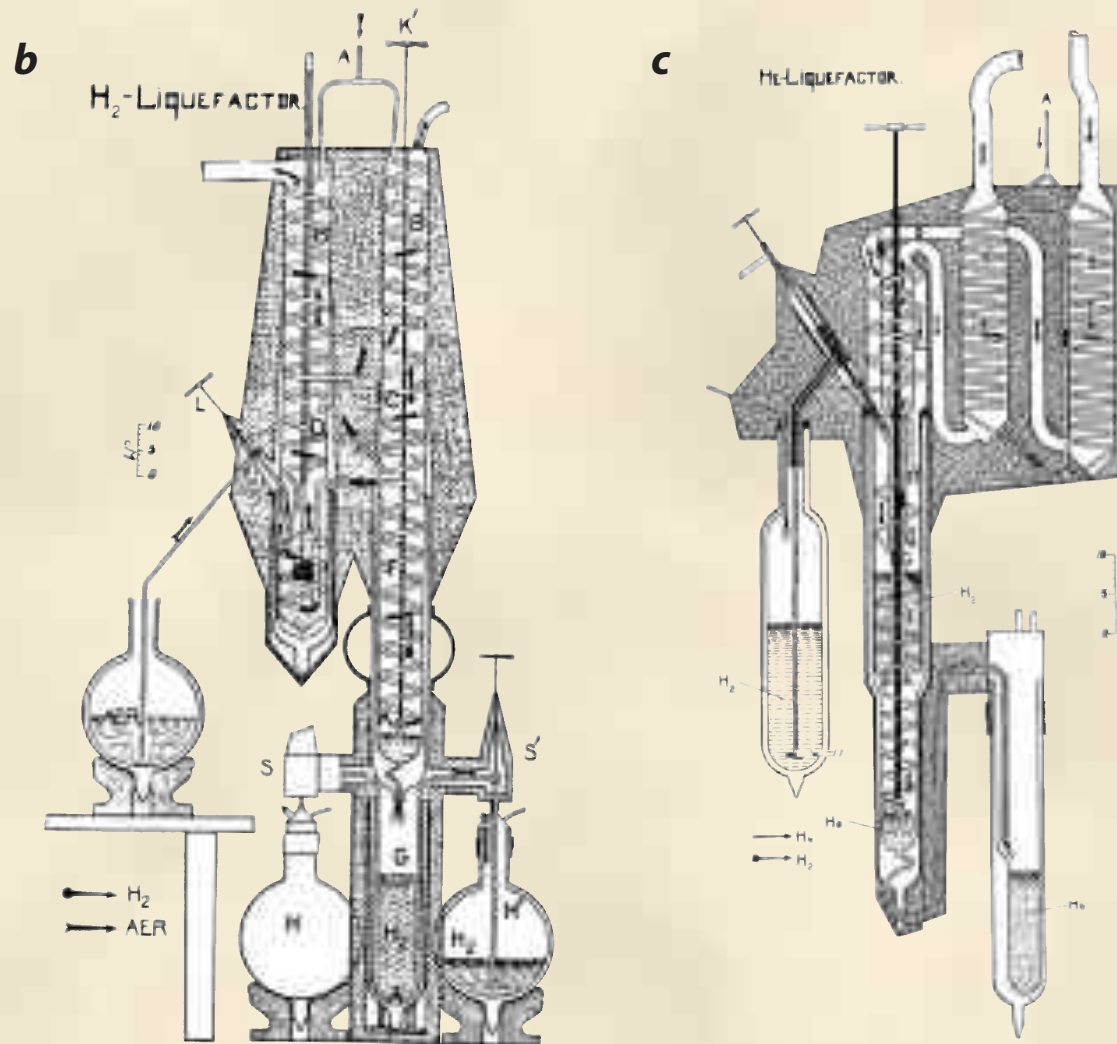
ヘリウムの液化：
Hgの超伝導発見

Heike Kamerlingh Onnes





CASCADE APPARATUS (a) constructed by Onnes in 1892 could produce 14 liters of liquid air per hour. Liquid air was essential for operating the hydrogen liquefier (b) he perfected in 1906. The hydrogen gas travels through the system to a liquid air bath and ultimately to an expansion valve, which permits hydrogen



drogen gas to expand and liquefy. The liquid hydrogen is collected, while gas returns to the compressor. Onnes developed the first helium liquefier (c) in 1908. He posed with his mentor, Johannes Diderik van der Waals, in front of the device in 1911 (d) and, a decade later, with his chief assistant, Gerrit Flim (e).

van der Waals



COURTESY OF THE KAMERLINGH ONNES LABORATORY, LEIDEN UNIVERSITY (a-e)

Kamerlingh Onnes

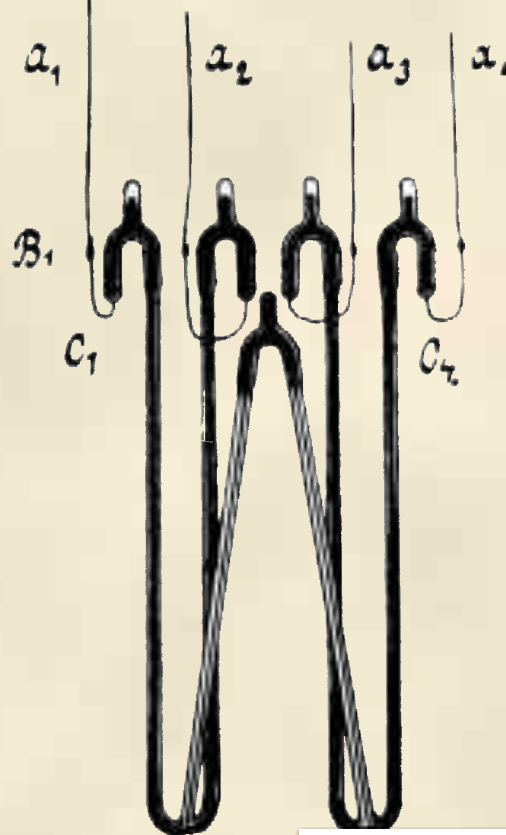
a



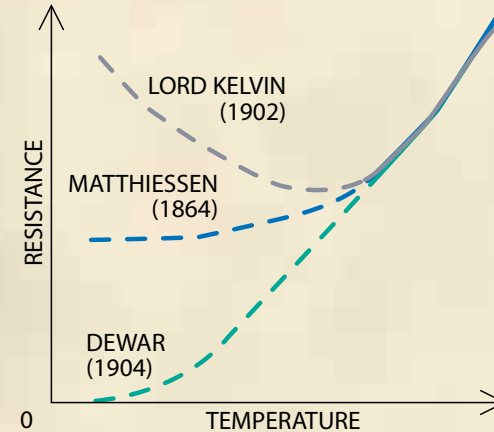
COURTESY OF MUSEUM BOERHAAVE, LEIDEN

CAILLETET COMPRESSOR (a), invented by Louis P. Cailletet, who liquefied oxygen and nitrogen, was extremely useful to Onnes throughout his research. Because no gas is lost during compression or expansion, the device was suitable for working with pure and costly gases. A W-shaped capillary tube (b) carried the mercury

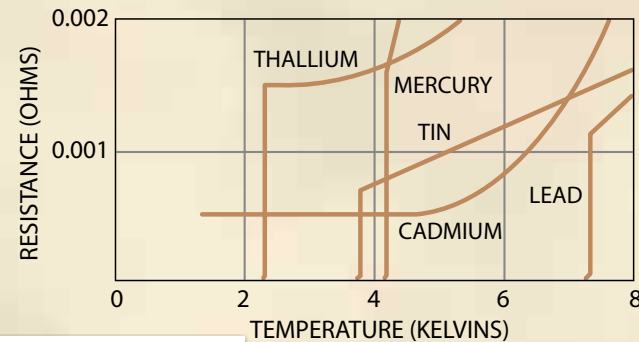
b



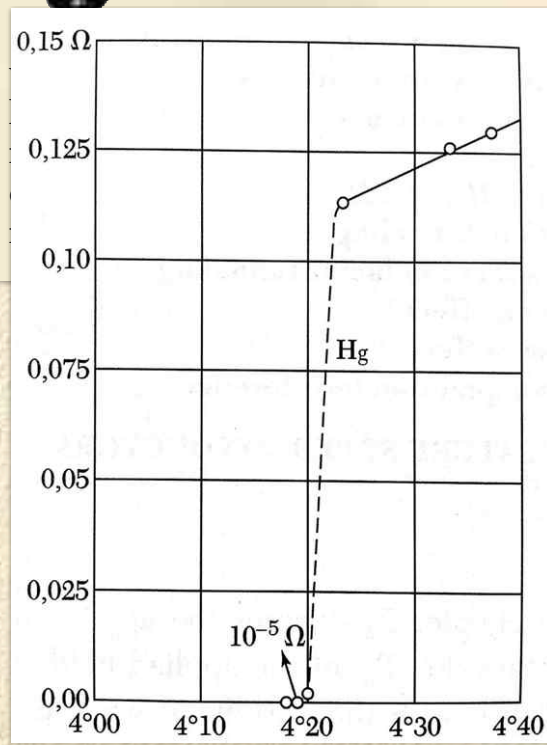
c



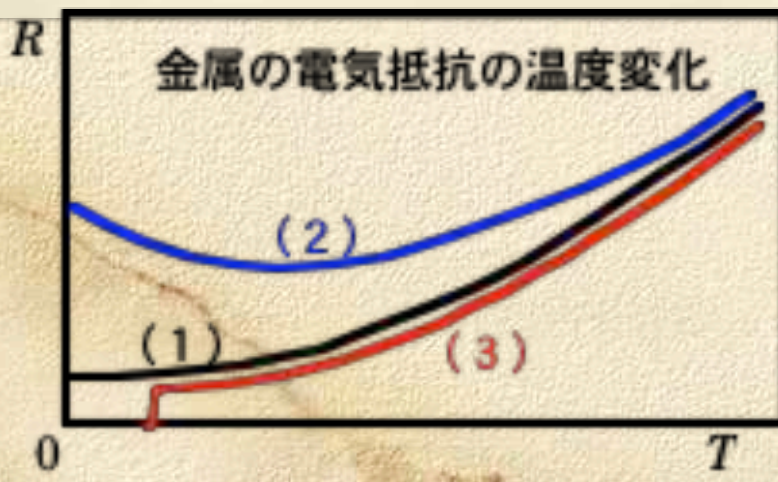
d



COURTESY OF THE KAMERLINGH ONNES LABORATORY, LEIDEN UNIVERSITY (b-d)



istance at low temperatures. s, the predicted behavior of what he actually found. He nce (d) accompany deereas- umber of other metals.



超伝導の特徴

電気抵抗がゼロになる

臨界磁場

マイスナー効果（完全反磁性 \neq 完全導体）

同位体効果

比熱の飛び

マイクロ波吸収：超伝導エネルギーギャップ

常伝導の電気抵抗が大きい \Rightarrow 高い T_C

永久電流：散乱緩和時間 $\tau \sim \infty$ (減衰100,000年以上)

マクロな量子状態への相転移

金属に一般的な基底状態

超伝導の特徴

電気抵抗がゼロになる

臨界磁場

マイスナー効果（完全反磁性 \neq 完全導体）

同位体効果

比熱の飛び

マイクロ波吸収：超伝導エネルギーギャップ

貴金属：Cu, Ag, Au は
超伝導基底状態を持つか？
=> 40 μ K まで常伝導
(注意：磁性不純物の効果)

Compounds	year	T_c (K)
金属		
Hg	1911	4.2
Hg (電気抵抗の図)	1912	4.2
Pb	1913	7.2
NbC	1930	10.3
NbN	1941	16
NbC _{0.3} N _{0.7}	1953	17.8
Nb ₃ Sn	1954	18
Nb ₃ Al _{0.8} Ge _{0.2}	1969	19.2
Nb ₃ Ge	1973	23
MgB ₂	2001	39
酸化物		
La _{2-x} Ba _x CuO ₄	1986	30
La _{2-x} Sr _x CuO ₄	1987.1	40
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}	1987.3	93
BiSrCaCu ₂ O _x	1988.2	105
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	1988.3	120
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	1993	133

Compounds	year	T_c (K)
有機導体		
(TMTSF) ₂ PF ₆ ($P \sim 10$ kbar)	1980	1.3
(TMTSF) ₂ ClO ₄	1981	1.4
(TMTSF) ₂ FSO ₃ ($P = 5-6$ kbar)	1983	2.1
β -(BEDT-TTF) ₂ AuI ₂	1985	5
β -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ ($P = 1.3$ kbar)	1985	8
κ -(BEDT-TTF) ₂ Cu(NCS) ₂	1988	10.3
K ₃ C ₆₀	1991	18
Cs ₂ RbC ₆₀	1991	33
鉄系		
LaFePO	2006	4
LaFeAs(O _{1-x} F _x)	2008.2	26
NdFeAs(O _{1-x} F _x)	2008.5	51
SmFeAs(O _{1-x} F _x)	2008.6	55
Gd _{1-x} Th _x FeAsO	2008.9	56


ヘリウムの液化 4.2 K : 1908 年

Hgの超伝導発見 : 1911 年

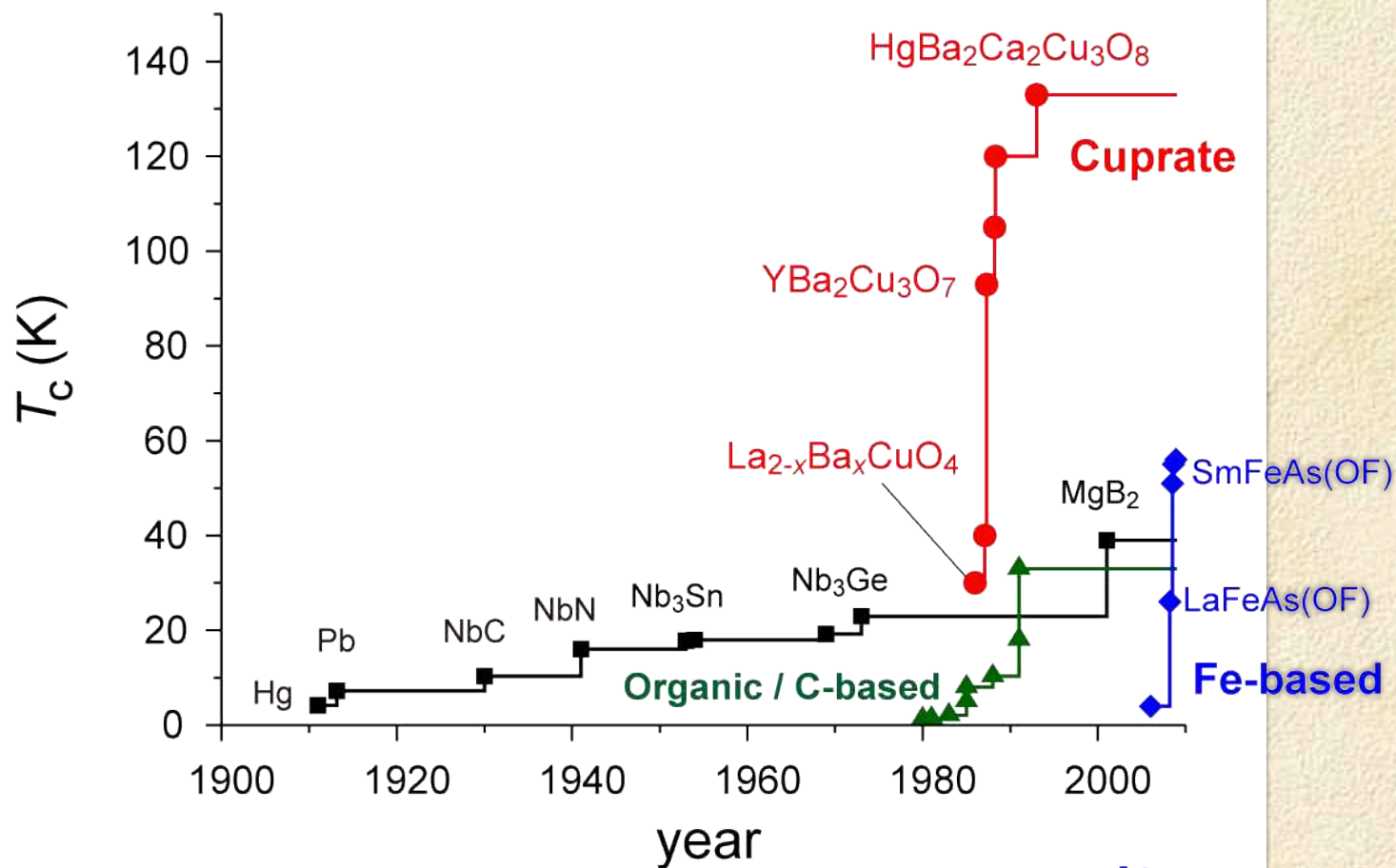
<http://sakaki.issp.u-tokyo.ac.jp/user/kittaka/contents/others/tc-history.html>

(keyword: 転移温度)

超伝導転移温度の推移

 超伝導転移温度の記録の変化をグラフにしてみました。(Made by [S. Kitagawa](#) and S. Kittaka, Nov. 2008)
参考にした論文の一覧は [こちら](#)。

- Records of the superconducting transition temperature T_c -



超伝導の特徴

電気抵抗がゼロになる

臨界磁場

マイスナー効果（完全反磁性 \neq 完全導体）

同位体効果

比熱の飛び

マイクロ波吸収：超伝導エネルギーギャップ

臨界磁場 (G)

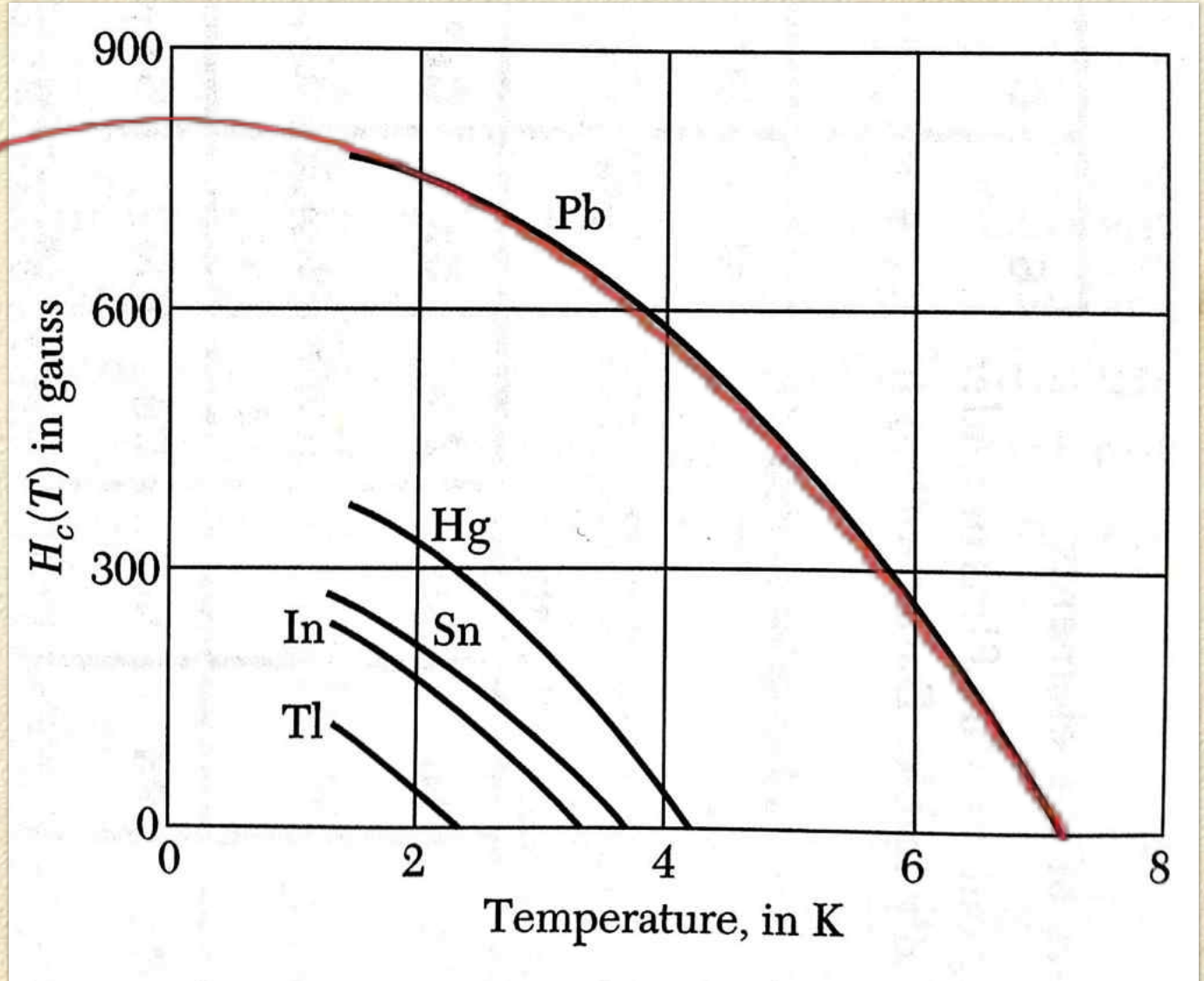
第1種超伝導体

純金属

長い平均自由行程

$$\frac{H_c(T)}{H_c(0)} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2$$

H_c : 数百 Gauss



臨界磁場 (G)

第2種超伝導体

合金

短い平均自由行程

H_C : 数十 Tesla

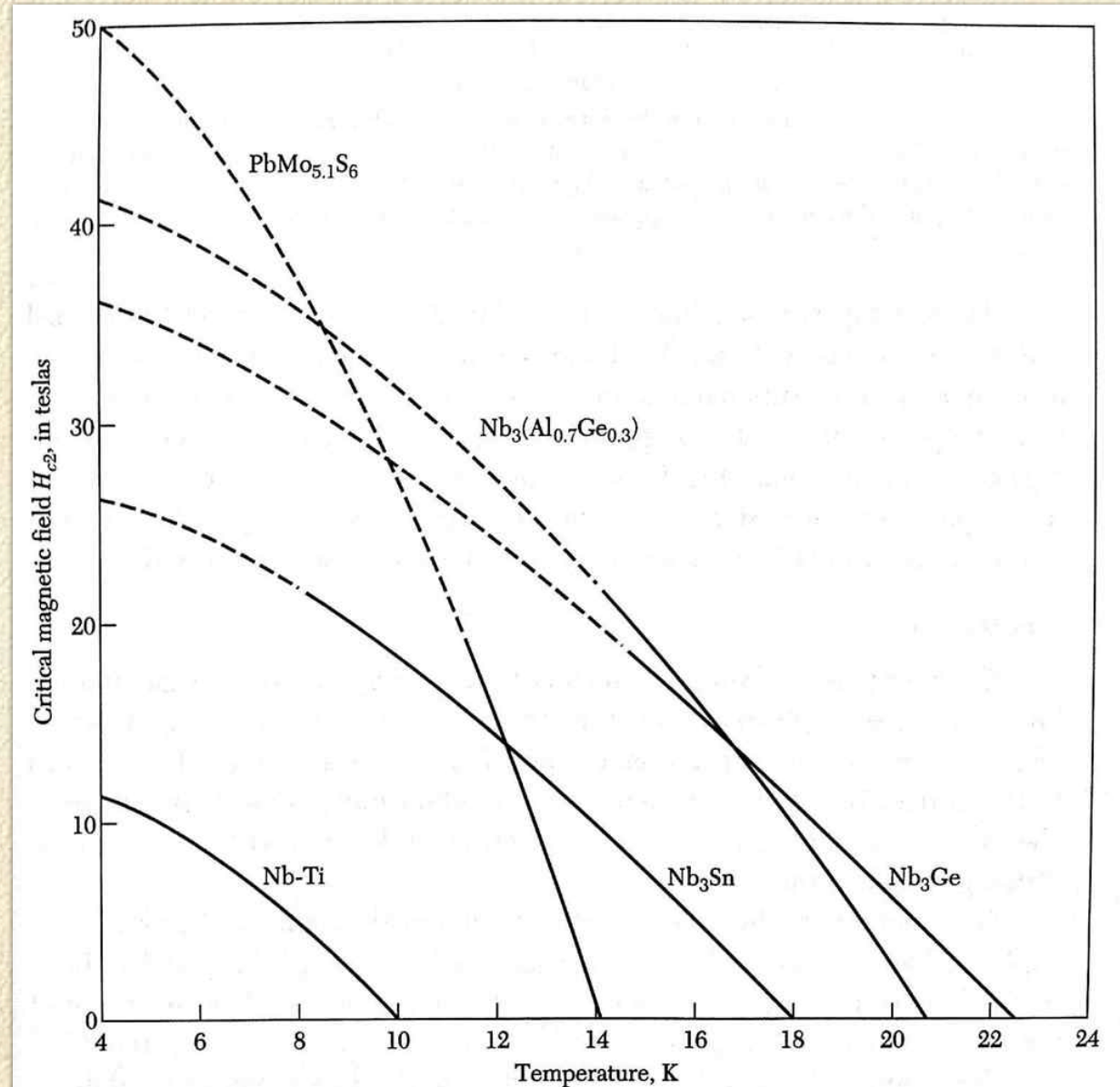


Figure 5b Strong magnetic fields are within the capability of certain Type II materials.

超伝導の特徴

電気抵抗がゼロになる

臨界磁場

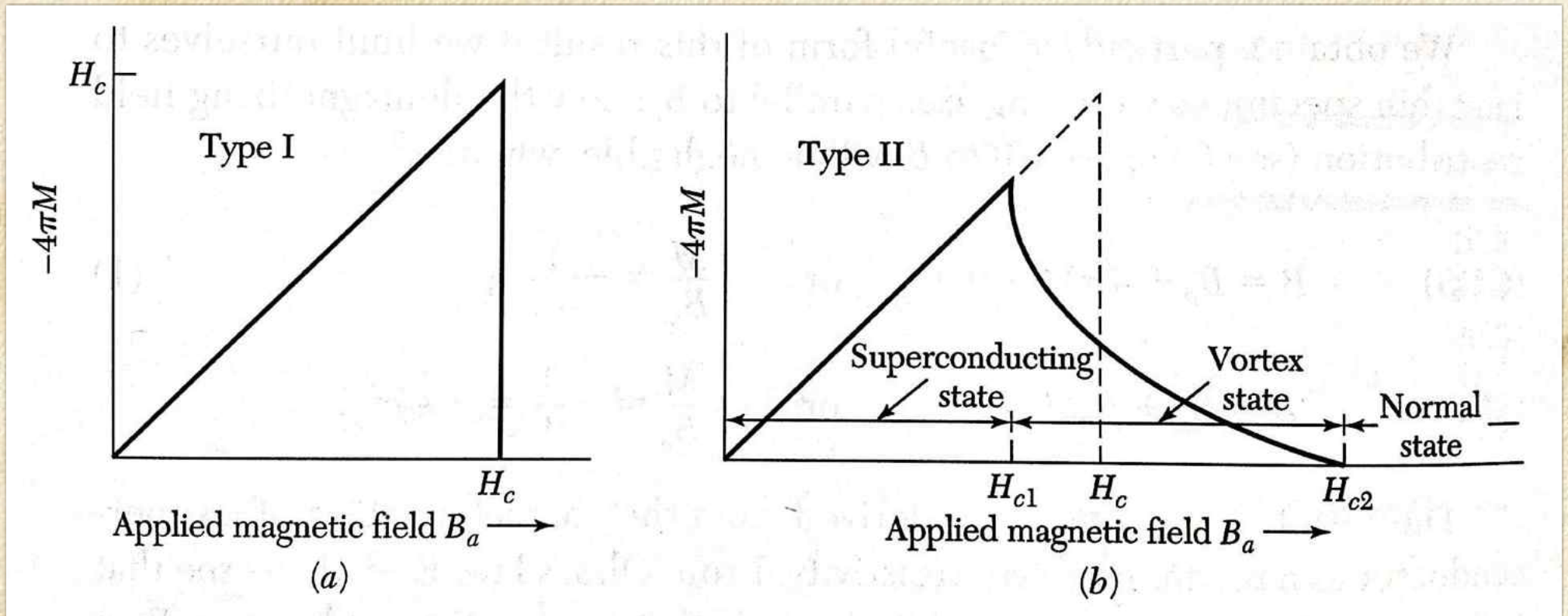
マイスナー効果（完全反磁性 \neq 完全導体）

同位体効果

比熱の飛び

マイクロ波吸収：超伝導エネルギーギャップ

磁化曲線



$$B = B_a + \mu_0 M, \quad B = 0 \quad (\text{マイスナー効果})$$

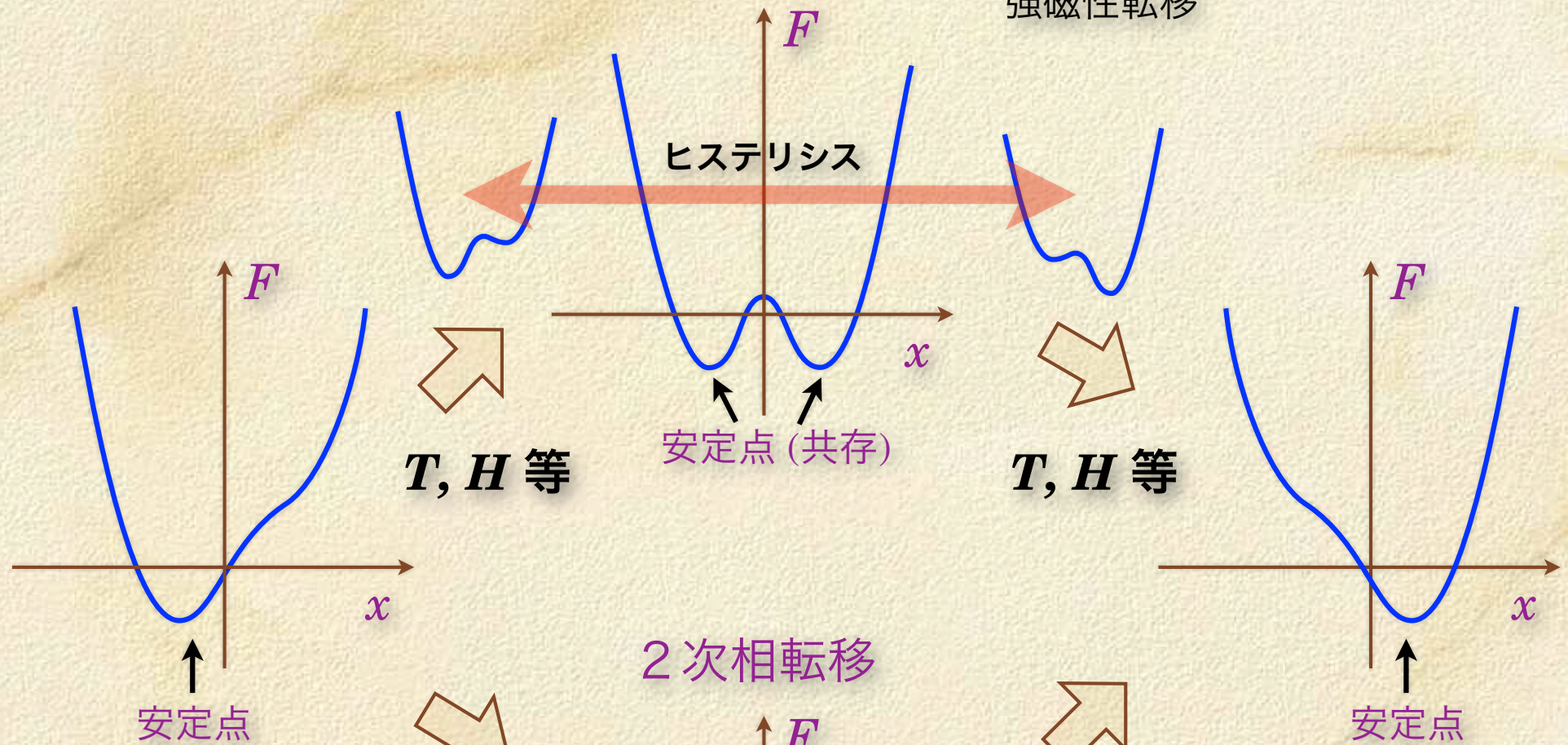
$$\mu_0 M = -B_a$$

$$\chi = -1/\mu_0, \quad (\text{cgs})$$

1 次相転移

固相-液相転移

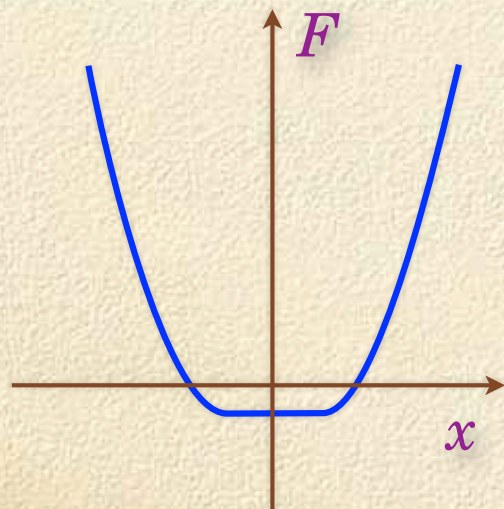
強磁性転移



2 次相転移

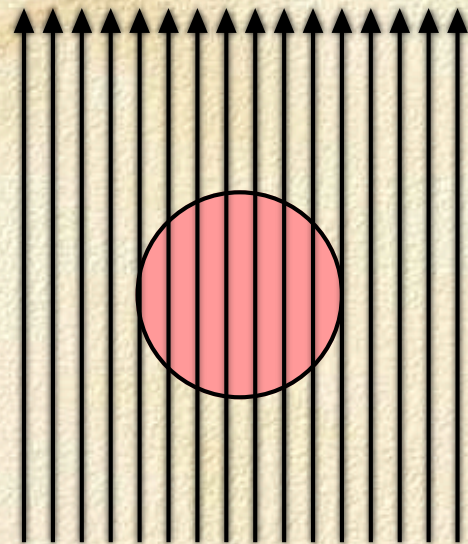
液相-気相転移

超伝導転移

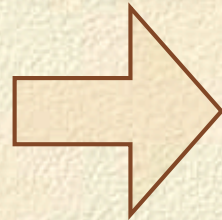


マイスナー効果 (完全反磁性)

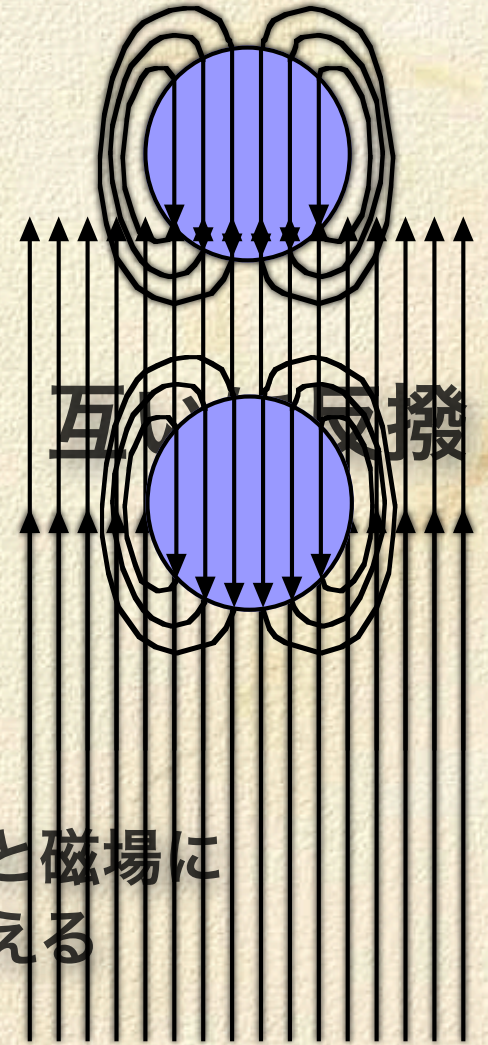
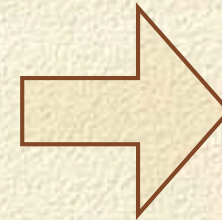
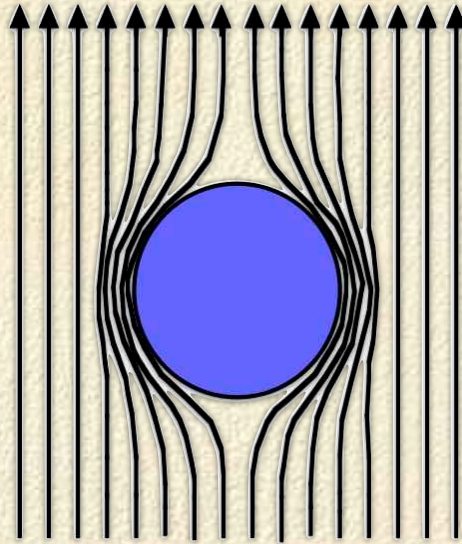
$T > T_c$



温度を
下げる



$T < T_c$

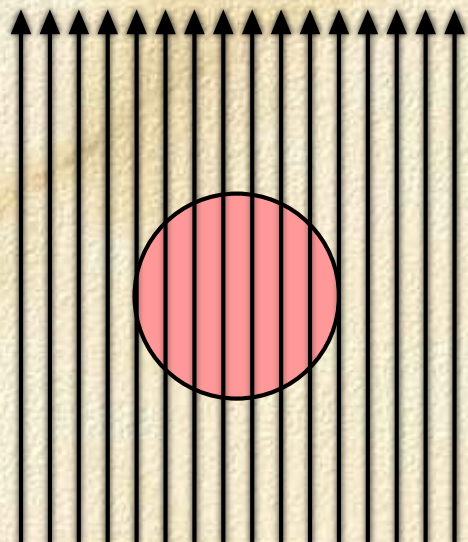


完全反磁性体と磁場に
分けて考える

系のエネルギーは**増大**

$T > T_c$

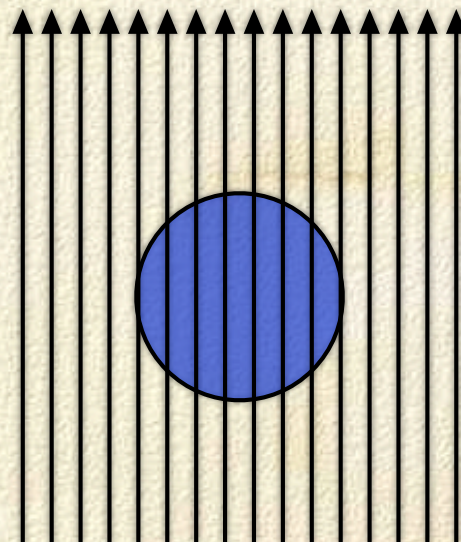
$H \neq 0$



完全導体 (T_c 以下で)

$T < T_c$

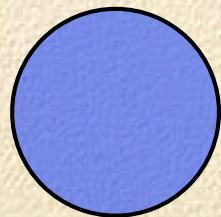
$H \neq 0$



温度を下げる

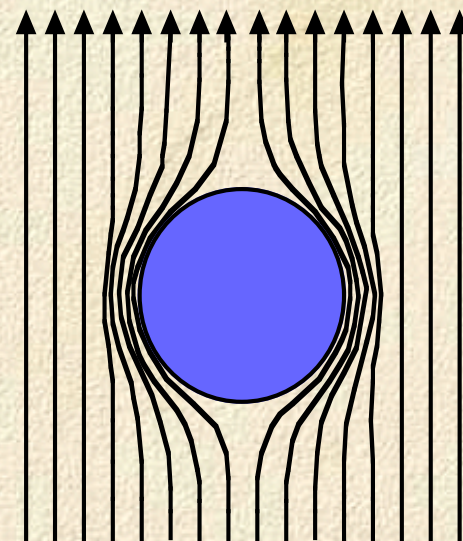
$T < T_c$

$H = 0$



$T < T_c$

$H \neq 0$



磁場をかける

約 1 cm/hr で侵入していく

超伝導体の熱力学

第1種超伝導体

磁場を掛ける事により完全反磁性体が、磁場からされる仕事 W 分

$$W = -\int_0^{B_a} \mathbf{M} \cdot d\mathbf{B}_a = \int_0^{B_a} \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot d\mathbf{B}_a = \frac{B_a^2}{2\mu_0}$$

自由エネルギーが増大： $\Delta F(T, B) = F_N(T, B) - F_S(T, B)$

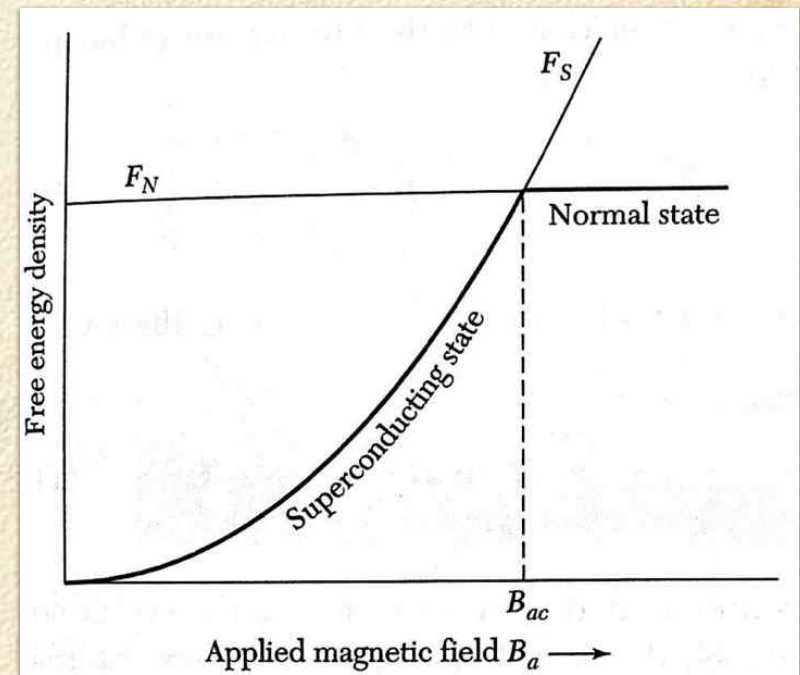
$|M_N| \ll |M_S|$ なので

$$F_N(T, 0) \approx F_N(T, B_{ac})$$

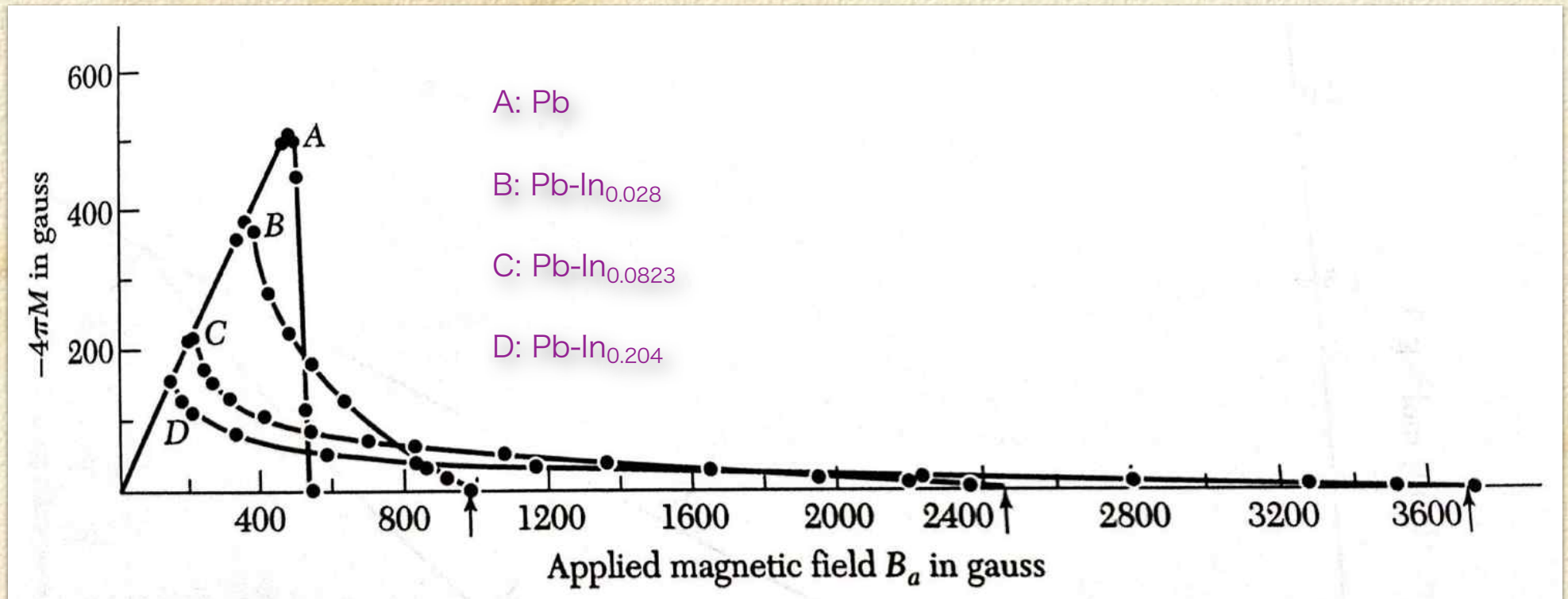
臨界磁場 B_{ac} では

$$F_S(T, B_{ac}) = F_N(T, B_{ac}) \text{ なので}$$

$$F_N(0, B_{ac}) - F_S(0, B_{ac}) = \frac{B_{ac}^2}{2\mu_0}$$



第2種超伝導体



不純物効果：平均自由行程の短距離化
=> 超伝導のコヒーレンス長の短距離化



ボルテックス（渦糸状態、量子磁束）



超伝導の特徴

電気抵抗がゼロになる

臨界磁場

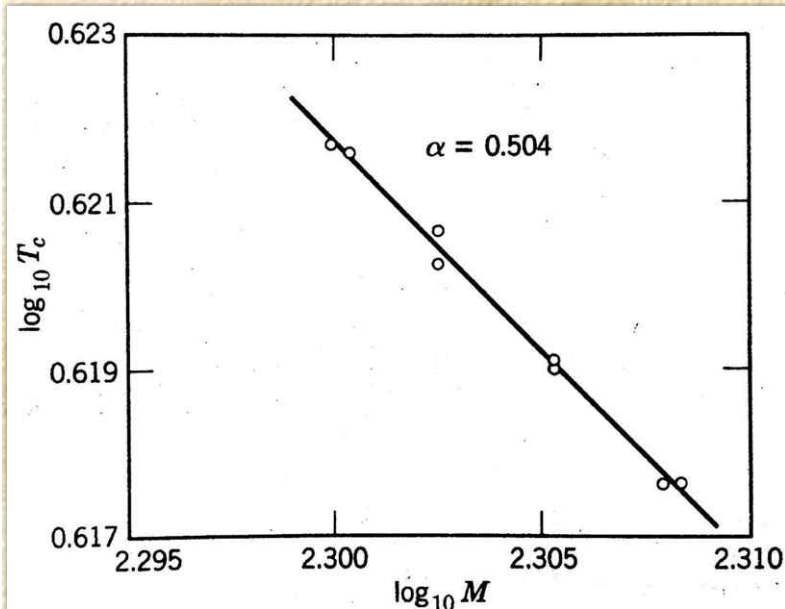
マイスナー効果（完全反磁性 \neq 完全導体）

同位体効果

比熱の飛び

マイクロ波吸収：超伝導エネルギーギャップ

転移温度の同位体効果



水銀の同位体

$M = 199.5 \sim 203.4 \text{ g/mol}$

$T_c = 4.185 \sim 4.146 \text{ K}$

$M^\alpha T_c = \text{一定}$

単振動: $\omega_0 = (K/M)^{1/2}$

$M^{1/2} \omega_0 = K^{1/2}$

If $T_c \propto \omega_0 \therefore \alpha = 1/2$

格子振動の寄与!

Table 4 Isotope effect in superconductors

Experimental values of α in $M^\alpha T_c = \text{constant}$, where M is the isotopic mass.

Substance	α	Substance	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

超伝導の特徴

電気抵抗がゼロになる

臨界磁場

マイスナー効果（完全反磁性 \neq 完全導体）

同位体効果

比熱の飛び

マイクロ波吸収：超伝導エネルギーギャップ

比熱の飛びと温度依存性

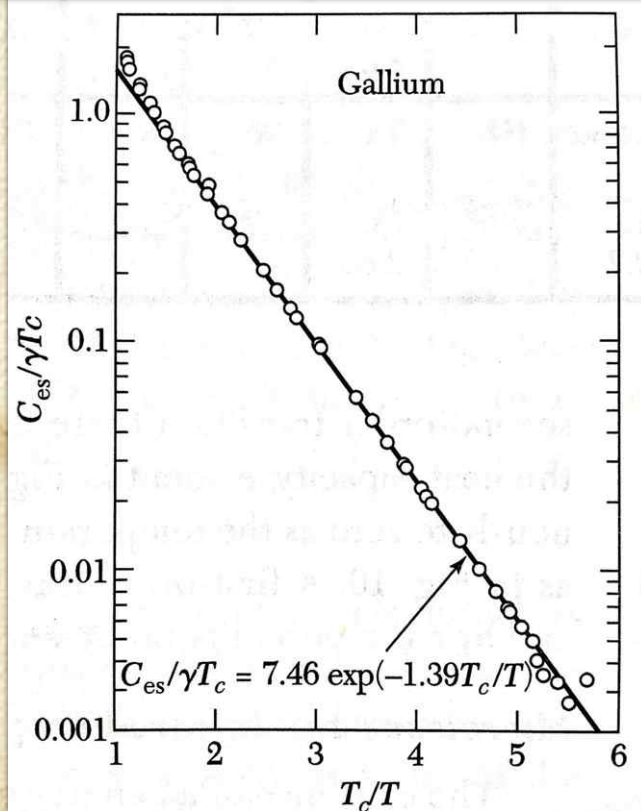
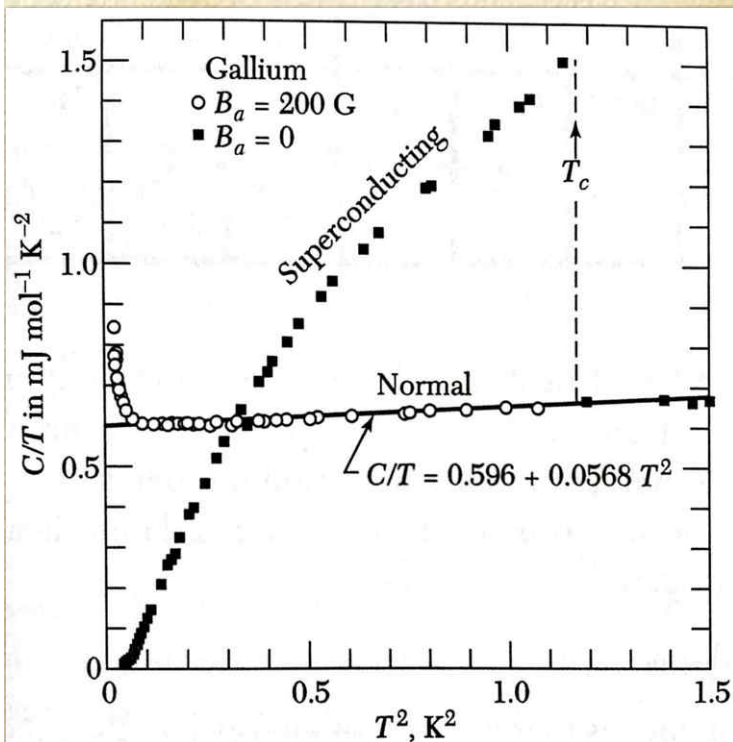
可逆変化：2次転移

$$\frac{C_{es}}{\gamma T_c} \approx a \exp\left(-b \frac{T_c}{T}\right)$$

$$C_{en} = \gamma T, \quad a \approx 10, \quad b \approx 1.5$$

比熱 \propto Boltzmann 因子

エネルギーギャップ $\approx 1.5 k_B T_c$
 (1つの粒子の励起エネルギー)



超伝導の特徴

電気抵抗がゼロになる

臨界磁場

マイスナー効果（完全反磁性 \neq 完全導体）

同位体効果

比熱の飛び

マイクロ波吸収：超伝導エネルギーギャップ

マイクロ波吸収：エネルギーギャップ E_g

$$\frac{\Delta(T)}{\Delta(0)} \sim \left(1 - \frac{T}{T_C}\right)^{1/2}$$

$$\Delta(0) \approx 3 \sim 4 k_B T_C$$

$$\Delta(0) \approx 3.528 k_B T_C \text{ (BCS 理論)}$$

比較： $\approx 1.5 k_B T_C$ 比熱
粒子あたり

$3.5 k_B T_C$ 光吸収
クーパー対あたり

