

# 磁性・超伝導

## 超伝導の基本的性質

2016/12/2

大阪府立大学 工学域・大学院工学研究科 | 電子物理学工学科 / 電子物理学  
工学分野 ホームページ



研究グループ

量子物性研究グループ ⇒ 研究室HP



メンバー紹介

尖戸 寛明

[http://www2.pe.osakafu-u.ac.jp/pe1/contens/member/personal/member\\_shishido.html](http://www2.pe.osakafu-u.ac.jp/pe1/contens/member/personal/member_shishido.html)



# 超伝導(Superconductivity)とは？

## 超電導との違いは？

なし. 伝統的に理学系では超伝導, 工学系では超電導を使うことが多い.

e.g. 文部科学省 → 超伝導  
経済産業省 → 超電導

## 超伝導状態では何が起こるのか？

- (1) 直流電気抵抗が厳密にゼロもしくは非常に近い
- (2) 超伝導体内部では磁束密度がゼロとなる

超伝導は電子系の相転移(Phase transition)の一種

高温の常伝導状態(Normal state)から超伝導転移温度 $T_c$ 以下の低温での超伝導状態へ

# 歴史的経緯

K. Onnes (1911)

水銀の電気抵抗が4.2 K以下でゼロになることを発見

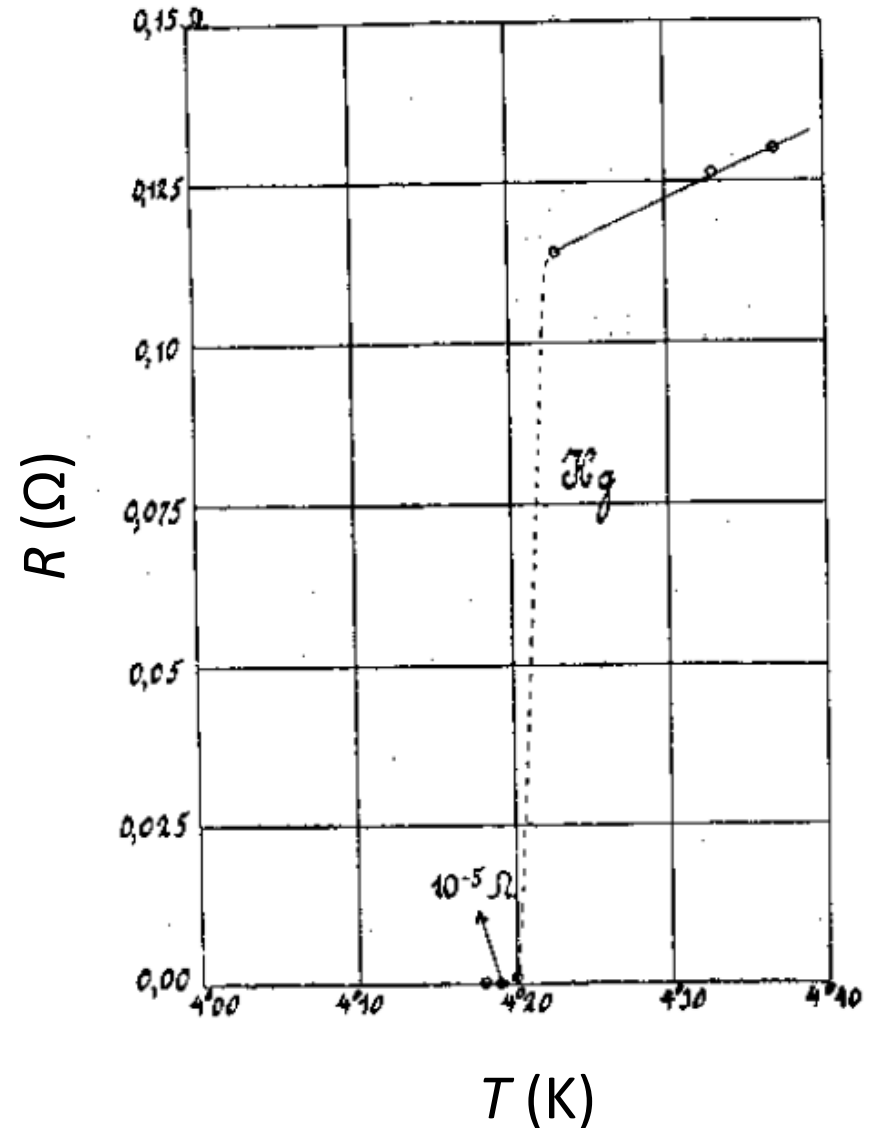
J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer (1957)

量子論による超伝導の理論(BCS理論)

なぜ超伝導が起こるかを初めて説明

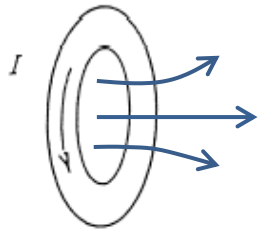
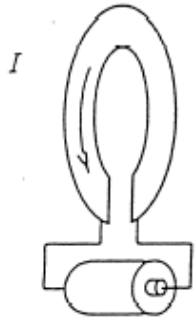
J. G. Bednorz and K. A. Müller (1986)

Ba-La-Cu-O系化合物での超伝導の発見



# 超伝導の特徴

(1) 直流電気抵抗が厳密にゼロもしくは非常に近い



ソレノイド中の超伝導電流の減少はソレノイドが作る磁場を精密に測定することで調べた  
(J. File and R. G. Mills PRL **10** (1963) 93)



その減衰時間は少なくとも100,000年以上、  
ほぼ無限



永久電流(Persistent current)

完全導体 (≠ 超伝導体)

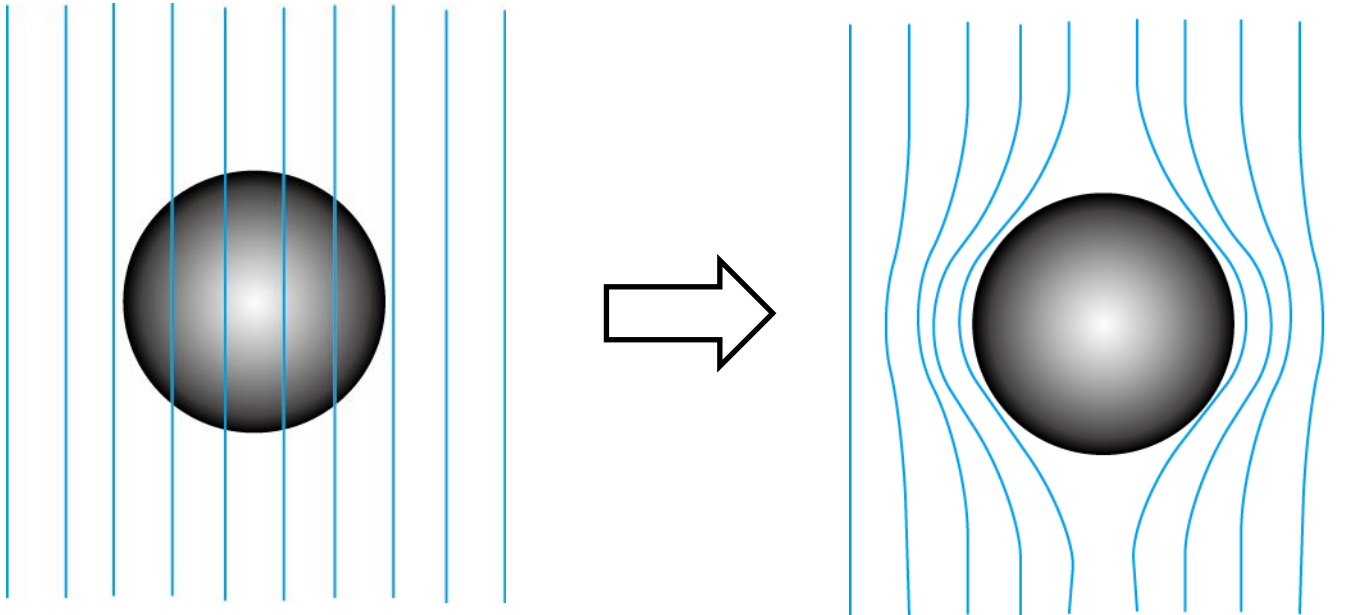
不純物や格子欠陥がなく、電気抵抗がゼロになる

# 超伝導の特徴

(2) 超伝導体内部では磁束密度がゼロとなる



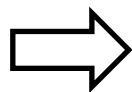
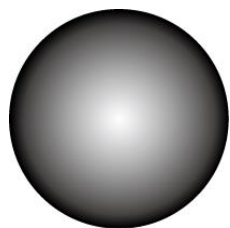
マイスナー効果 (完全反磁性)



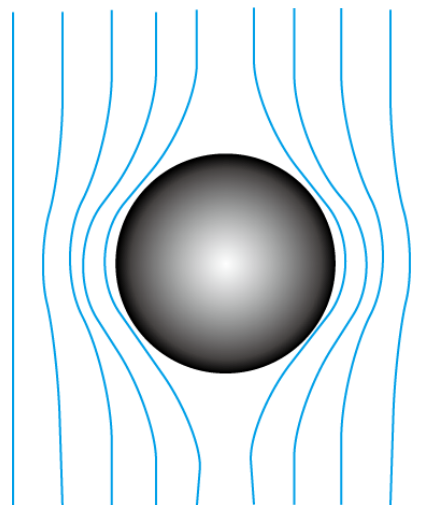
常伝導状態 (高温)

超伝導状態 (低温)

# 完全導体(≠超伝導体)ではマイスナー効果とは異なった振る舞い

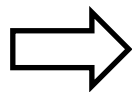
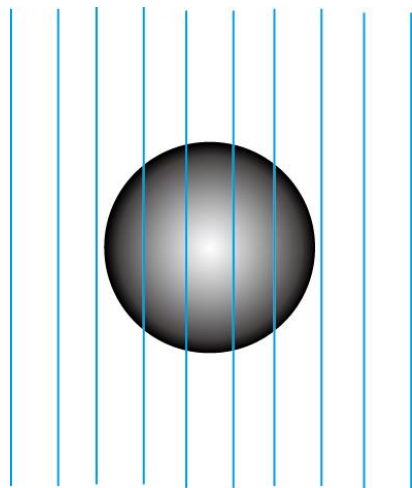


磁場ゼロで冷却  
後磁場をかける

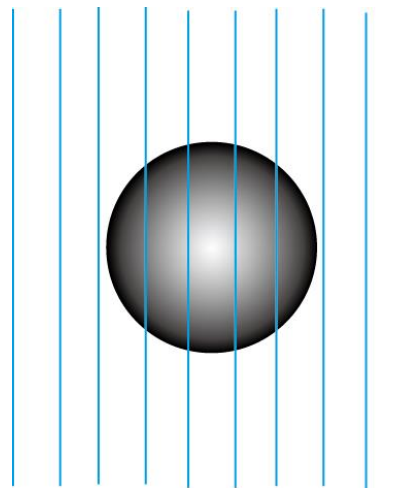


有限抵抗(高温)

抵抗ゼロ(低温)



磁場中で冷却



## 相転移

相を特徴付ける**秩序変数(Order parameter)**がゼロから有限になる.

例1: 氷(固体)  $\leftrightarrow$  水(液体)  $\leftrightarrow$  水蒸気(気体)

秩序変数: 密度

例2: 宇宙の始まり (インフレーション宇宙論)

エネルギーの高い真空  $\rightarrow$  低い真空

Wikipedia:「宇宙のインフレーション」

例3: 強磁性 ( $T < T_c$ )  $\leftrightarrow$  常磁性 ( $T > T_c$ )

秩序変数: 自発磁化

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 0 \text{ (常磁性)} \\ M \neq 0 \text{ (強磁性)} \end{array} \right.$$



超伝導状態では電子がペアを組む

→ クーパー対

超伝導の秩序変数は何か？

Ginzburg-Landau 理論

超伝導電子系の擬波動関数  $\Psi$

→ 超伝導電子密度  $|\Psi|^2$

$\Psi$  : 振幅と位相を持つ

超伝導状態では位相のコヒーレンスが巨視的な距離にわたって保たれる。

→ Josephson効果

巨視的な量子現象

## 超伝導の発生

- 超伝導は周期表の多くの金属元素で発現する.
- いくつかの元素では高圧下で超伝導を示す.
- 高圧下ではすべての元素は金属になる.
- 超伝導は磁性不純物に弱い.



すべての元素は十分な低温, 十分な高圧下では超伝導になる?

→ まだ良くわかっていない

金属水素で室温超伝導が理論的に予言

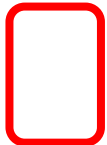
硫化水素( $\text{H}_2\text{S}$ ) は超高圧下では**200 K以上**で超伝導転移

P. A. Drozdov, *et al.*: Nature **525** (2015) 73

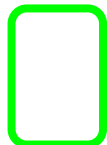
# 様々な元素の超伝導

表1 元素の超伝導に関する定数 (\*印は薄膜かあるいはふつうには安定でないような高压下の結晶変態状態でのみ超伝導になる元素を示す。データは B. T. Matthias の好意によるものを T. Gaballe が修正した。)

絶対零度での臨界磁場 ( $G \cdot 10^{-4} T$ )																	
Li	Be 0.026																
Na	Mg																
K	Ca	Sc	Ti 0.39 100	V 5.38 1420	Cr*	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn 0.875 53	Ga 1.094 51	Ge*	As*	Se*	Br	Kr
Rb	Sr	Y*	Zr 0.546 47	Nb 9.50 1980	Mo 0.92 95	Tc	Ru 7.77 1410	Rh 0.51 70	Pd 0.003 0.049	Ag	Cd 0.56 30	In 3.403 293	Sn (*) 3.722 309	Sb*	Te*	I	Xe
Cs*	Ba*	La <sup>100</sup>	Hf 0.12 1100	Ta 4.483 830	W 0.012 1.07	Re 3.4 198	Os 0.655 65	Ir 0.14 19	Pt	Au	Hg (*) 4.153 412	Tl 2.39 171	Pb 7.193 803	Bi*	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Ce*	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Th 1.265 1.62	Pa 1.4	U*( $\alpha$ )	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	



常圧で超伝導



圧力下もしくは薄膜で超伝導

表 2 代表的な化合物の超伝導

化合物	$T_c$ (K)	化合物	$T_c$ (K)
$Nb_3Sn$	18.05	$V_3Ga$	16.5
$Nb_3Ge$	23.2	$V_3Si$	17.1
$Nb_3Al$	17.5	$YBa_2Cu_3O_{6.9}$	90.0
$NbN$	16.0	$Rb_2CsC_{60}$	31.3
$K_3C_6O$	19.2	$La_3In$	10.4

NbTi

$T_c = 10$  K

C. Kittel 固体物理学入門



- 超伝導リニア
- MRI

強力な磁場の発生に超伝導  
電磁石を使用