

低温科学A

2021年度前期

第2回：液体窒素・超伝導実験

理学研究科・物理学第一教室

固体量子物性研究室

北川 俊作

石田 憲二

今日のアウトライン

液体窒素で（安全に）遊ぶ

超伝導と量子力学を見る・触る

液体窒素を学ぶ・液体窒素で遊ぶ

液体窒素 = 窒素の液体



沸点(1気圧)

: $-196^{\circ}\text{C} = 77\text{ K}$

- つけるだけで室温の1/4
 - 化学的に不活性
- 非常に便利な冷却剤

77K (-196°C)の世界では
何が起きるのか？

水分 → 凍る

花 → 粉々

バナナ → 釘が打てる？

指 → 凍傷！

DANGER!!!!

凍傷に注意!
(皮手袋を使用すること)

特に注意:
目に直接液体窒素が入る
冷えた金属に触る
液体窒素が衣服にしみこむ

77K (-196°C)の世界では 何が起きるのか?

空気・窒素・酸素...

→ 液化する

→ 体積の大幅な減少

1 Lの気体の窒素

→ 液化すると1.4 mL (1/700倍)

逆に言うと...

液体窒素が気化すると
えらいことになる!

1リットルの液体窒素
→ 気化すると700リットル



バスタブ
2杯分以上



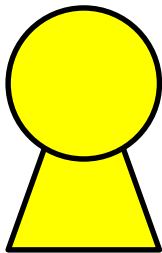
DANGER!!!!

**絶対に液体窒素を
密閉容器に入れてはいけない!**

窒素が気化 → 酸素濃度の低下

窒息にも注意！！

でも、周りに酸素は
たくさんあるから
大丈夫じゃない？



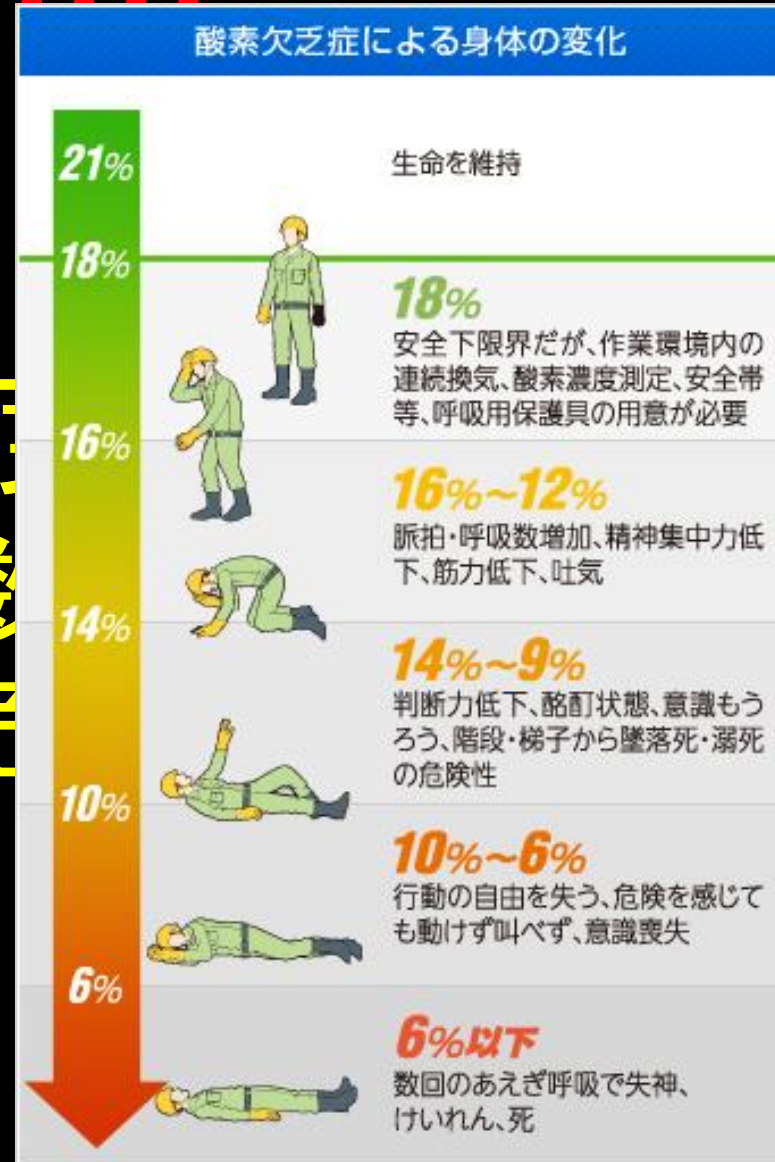
DANGER!!!!

周囲の酸素濃度に注意!

**(酸素濃度が数%低下
しただけでも危険!)**

DANGER

周囲の酸素濃度 (酸素濃度が数 分だけでも危



シゲマツ情報局より

77K (-196°C)の世界では
何が起きるのか?

室温(約300 K)の1/4の
熱エネルギー



低温での面白い現象

77K (-196°C)の世界では
何が起きるのか?

室温(約300 K)の1/4の
熱エネルギー



量子力学的効果が
顔を出し始める

77K (-196°C)の世界では
何が起きるのか？

室温(約300 K)の1/4の
熱エネルギー



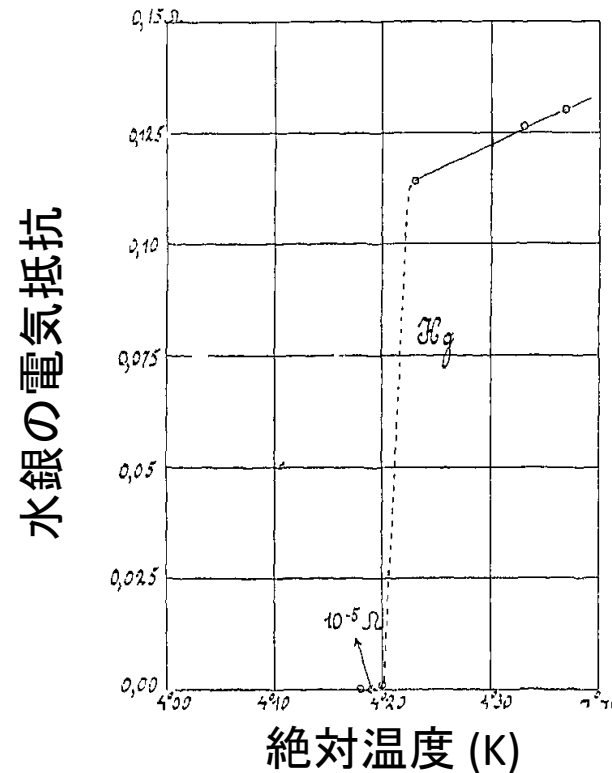
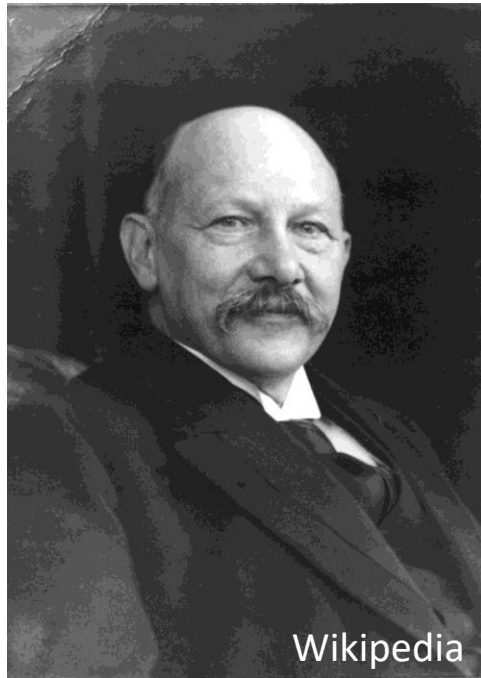
銅酸化物高温超伝導体

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ は超伝導になる！

超伝導って？

高温超伝導って？

超伝導: 電気抵抗がゼロになる現象

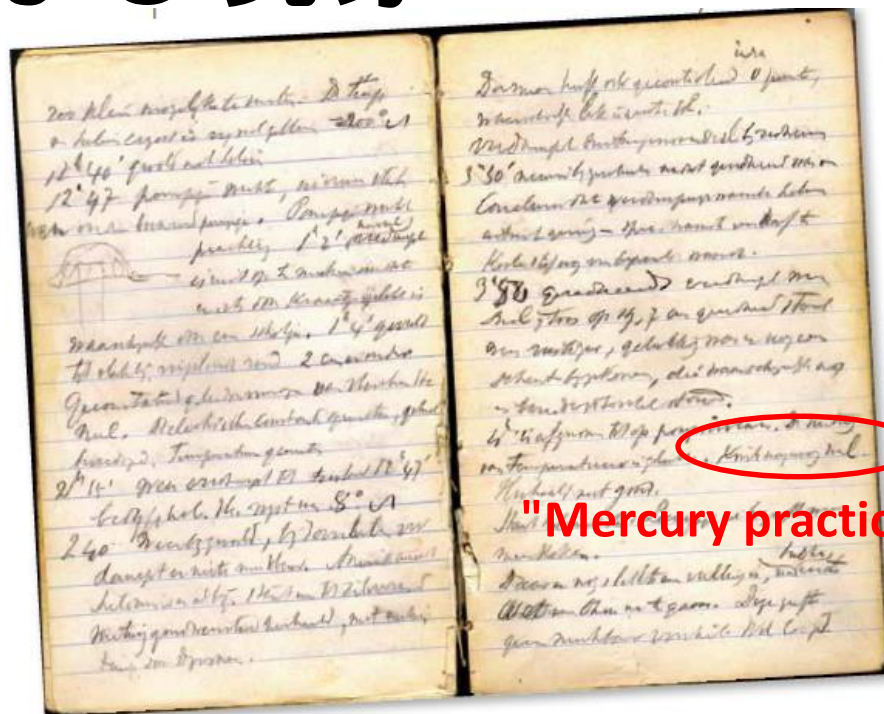


1911年4月8日、オランダの
H. Kamerlingh Onnesが発見
(水銀の超伝導4.2ケルビン)

超伝導: 電気抵抗が ゼロになる現象



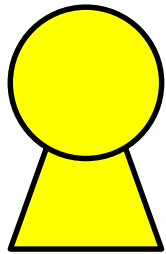
Wikipedia



Booklet "100 years of Superconductivity"

1911年4月8日、オランダの
H. Kamerlingh Onnesが発見
(水銀の超伝導4.2ケルビン)

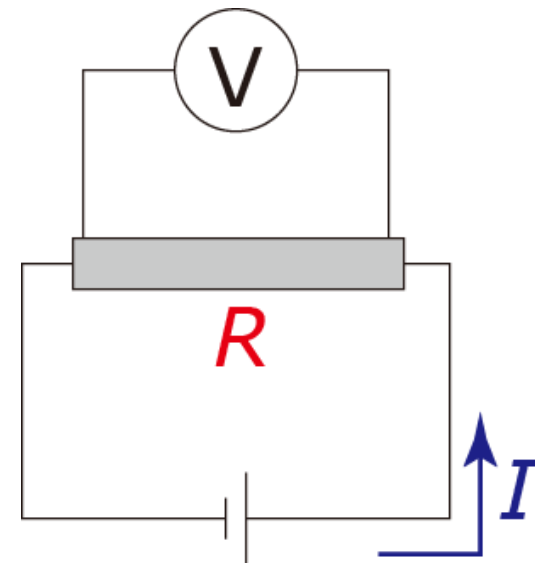
そもそも、電気抵抗ってなんでしたっけ？



オームの法則

$$V = I \times R$$

(電圧) = (電流) × (電気抵抗)



電流による消費電力

$$P = I^2 \times R$$

超伝導: $R = 0$

➡ 電圧ゼロ・消費電力ゼロ
夢の導電線!!!?

でも、冷やさないと
超伝導にならない...

超伝導になる温度: 臨界温度 T_c

水銀 4.2ケルビン

鉛 7.2ケルビン

アルミニウム 1.2ケルビン

Nb_3Ge 23ケルビン

(→1985年までの世界記録)

1985年以前:

超伝導にするには液体窒素でも不十分

1986年、臨界温度 T_c が30ケルビンを超す 超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ が発見された！

Possible High T_c Superconductivity in the Ba–La–Cu–O System

J.G. Bednorz and K.A. Müller

IBM Zürich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland

Received April 17, 1986

Metallic, oxygen-deficient compounds in the Ba–La–Cu–O system, with the composition $\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_5\text{O}_{5(3-y)}$ have been prepared in polycrystalline form. Samples with $x=1$ and 0.75 , $y>0$, annealed below 900°C under reducing conditions, consist of three phases, one of them a perovskite-like mixed-valent copper compound. Upon cooling, the samples show a linear decrease in resistivity, then an approximately logarithmic increase, interpreted as a beginning of localization. Finally an abrupt decrease by up to three orders of magnitude occurs, reminiscent of the onset of percolative superconductivity. The highest onset temperature is observed in the 30 K range. It is markedly reduced by high current densities. Thus, it results partially from the percolative nature, but possibly also from $2D$ superconducting fluctuations of double perovskite layers of one of the phases present.

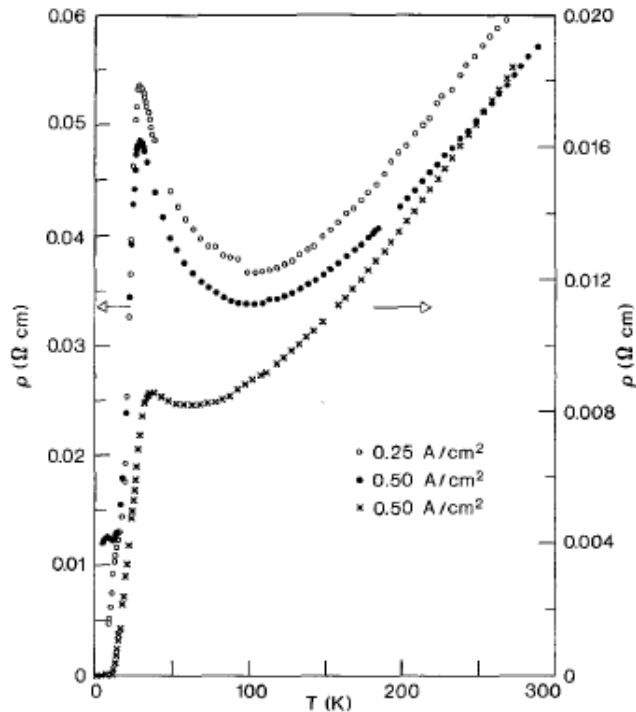
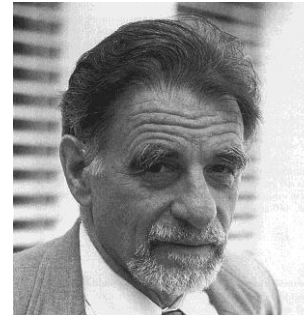
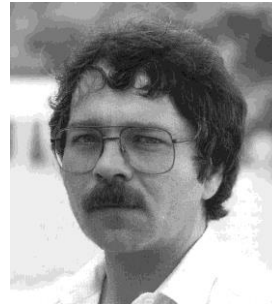


Fig. 1. Temperature dependence of resistivity in $\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_5\text{O}_{5(3-y)}$ for samples with $x(\text{Ba})=1$ (upper curves, left scale) and $x(\text{Ba})=0.75$ (lower curve, right scale). The first two cases also show the influence of current density



1986年、臨界温度 T_c が30ケルビンを超す超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ が発見された！

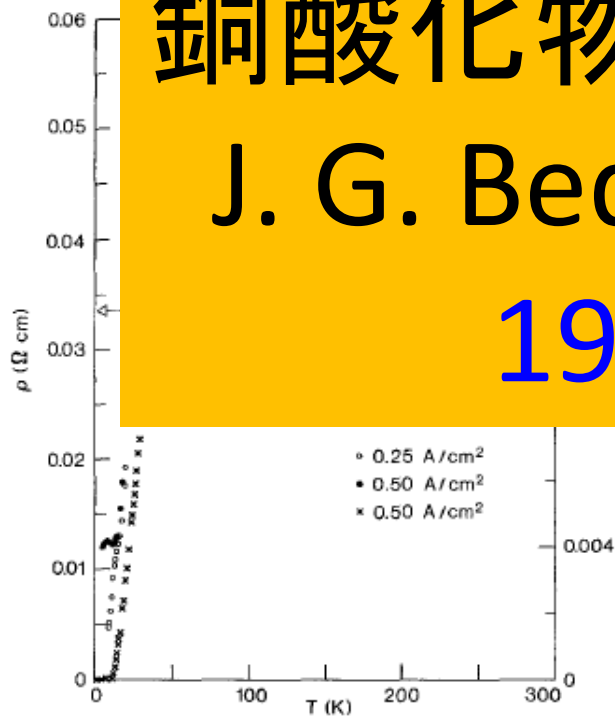
Possible High T_c Superconductivity
in the Ba–La–Cu–O System

J. G. Bednorz and K. A. Müller

銅酸化物高温超伝導体の発見

J. G. Bednorz and K. A. Müller

1987年ノーベル賞



but possibly also from 2D superconducting fluctuations of double perovskite layers of one of the phases present.

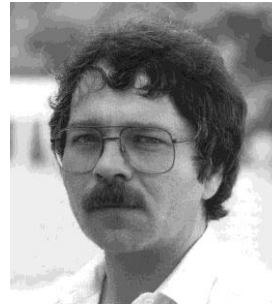
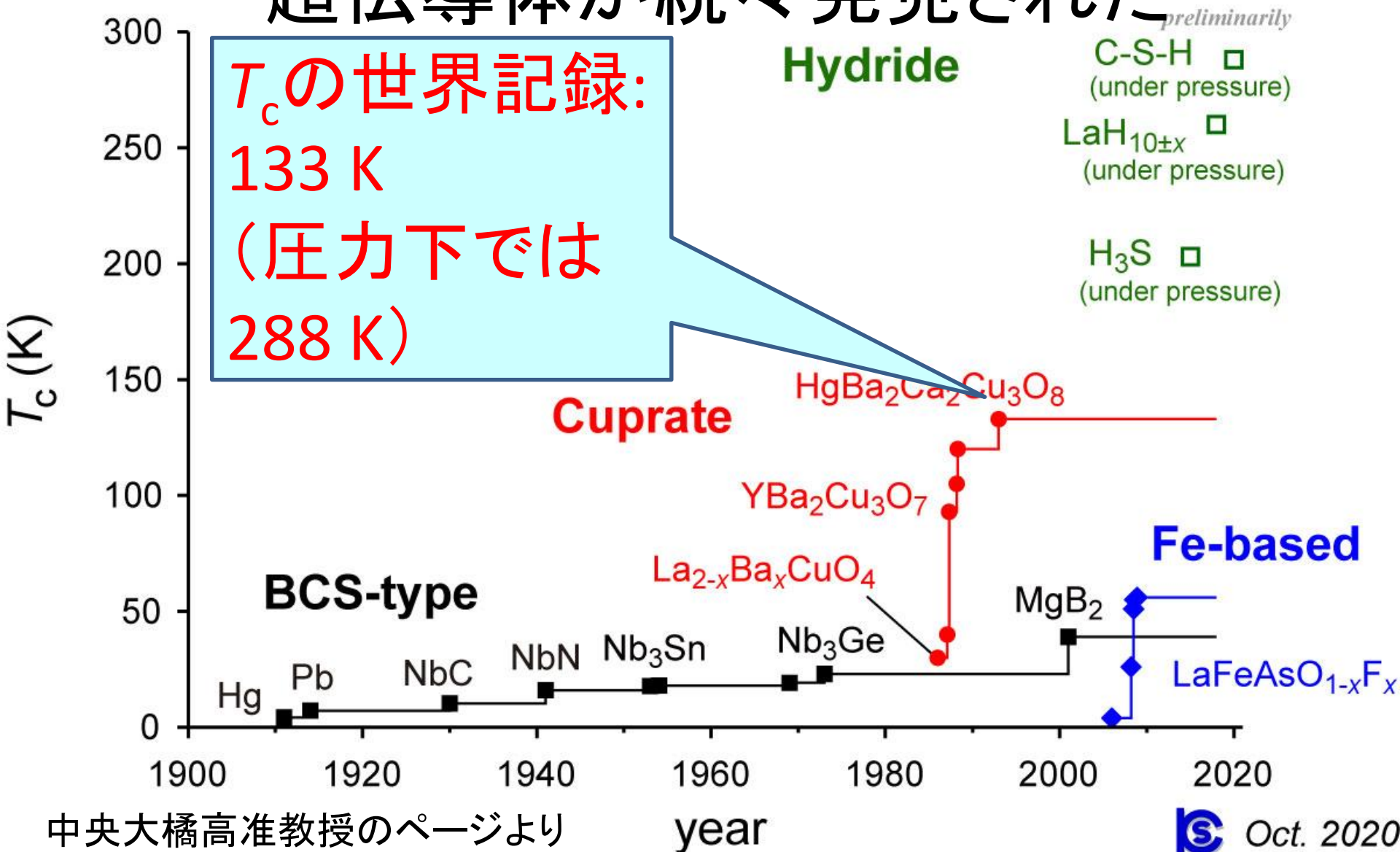
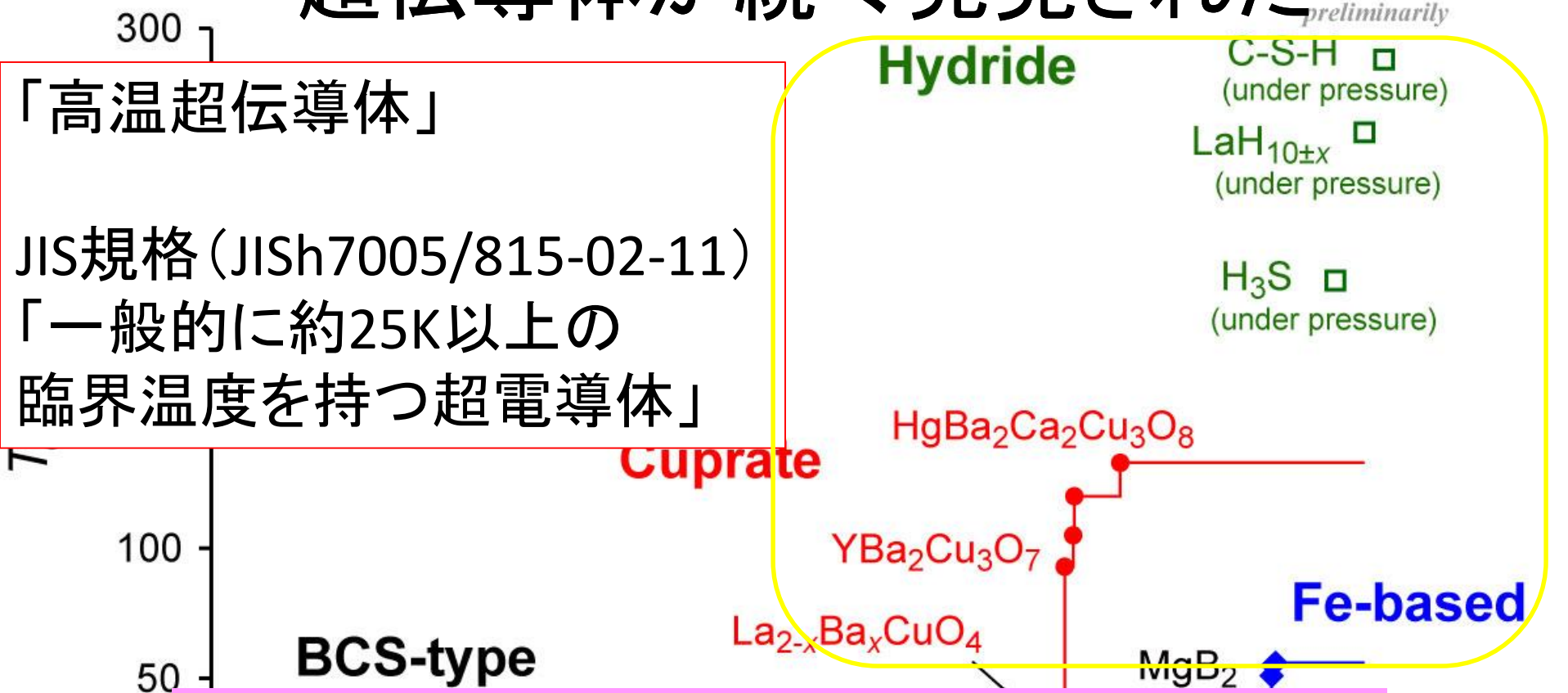


Fig. 1. Temperature dependence of resistivity in $\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_3\text{O}_{5(3-y)}$ for samples with $x(\text{Ba})=1$ (upper curves, left scale) and $x(\text{Ba})=0.75$ (lower curve, right scale). The first two cases also show the influence of current density

さらに臨界温度 T_c の高い 超伝導体が続々発見された



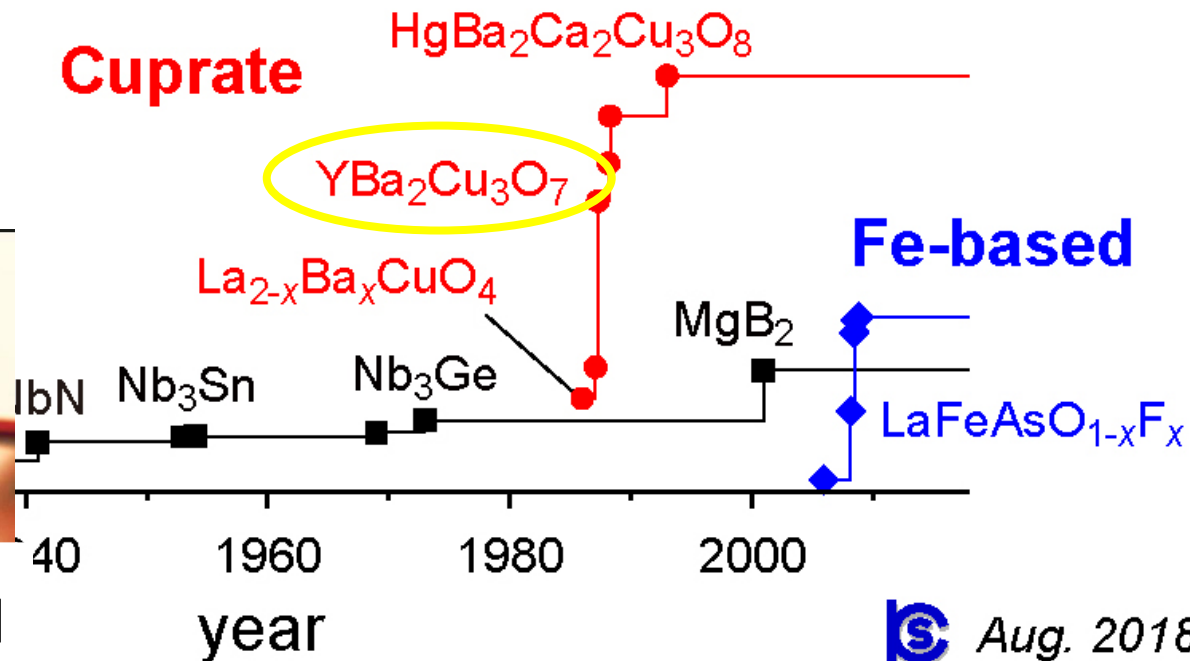
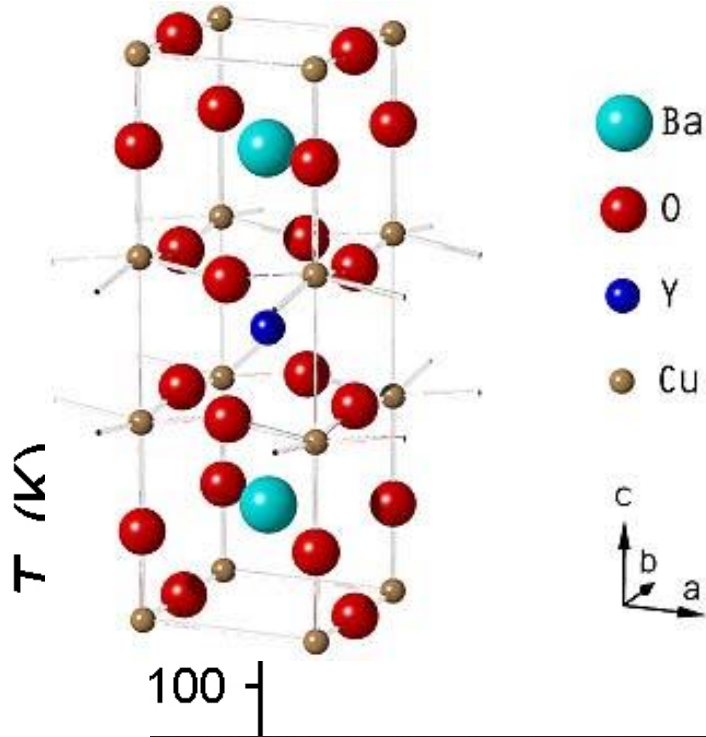
さらに臨界温度 T_c の高い 超伝導体が続々発見された



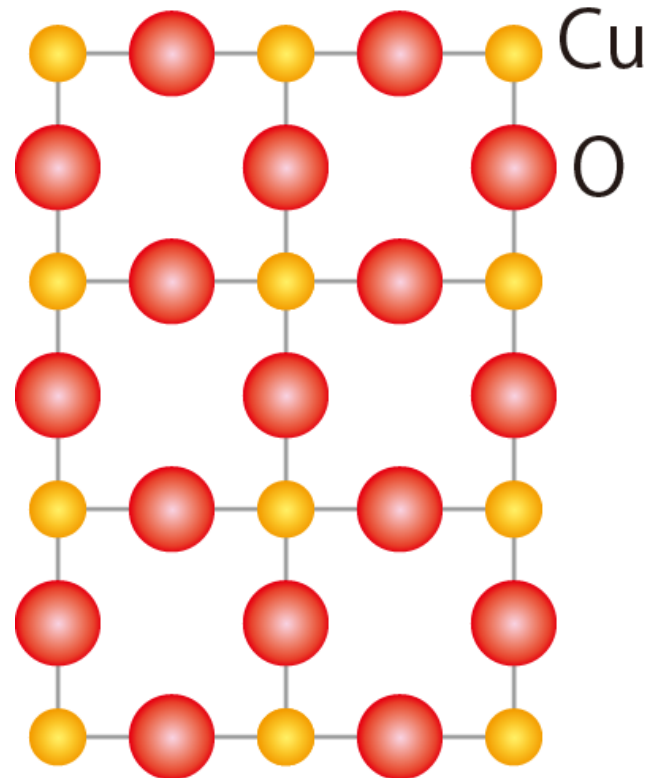
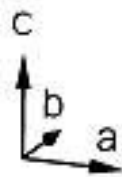
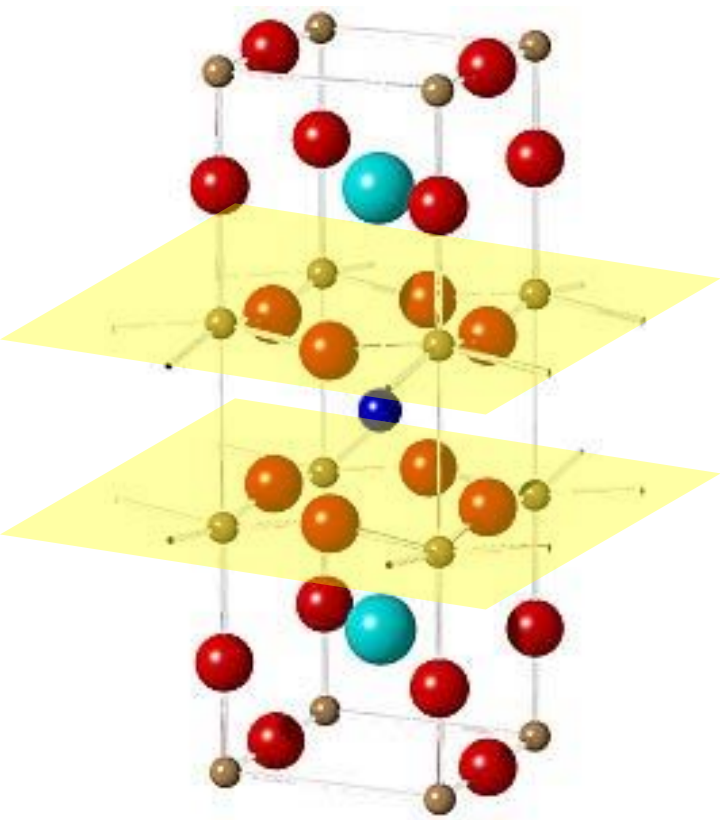
日常感覚からは低温だが、
超伝導転移温度としては「高温」



1987年、史上初めてT_cが
液体窒素温度を超えた
(T_c ~ 93 K) 超伝導体



Paul C. W. Chu



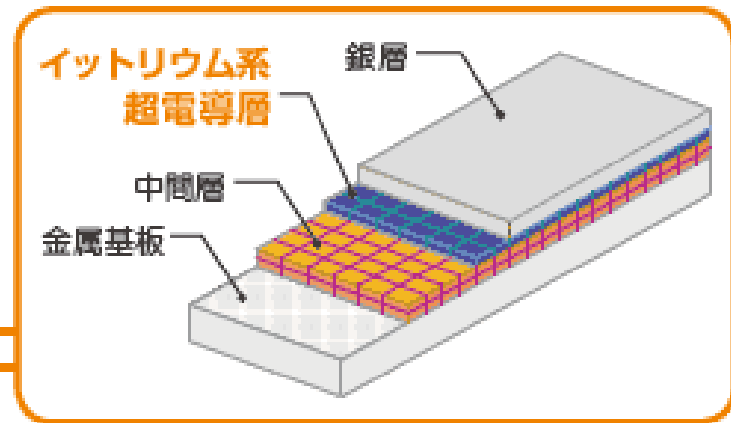
CuO₂面が超伝導に重要!
(すべての銅酸化物高温超伝導体に共通)



超高压超電導ケーブルにも使われている



最大 275kV



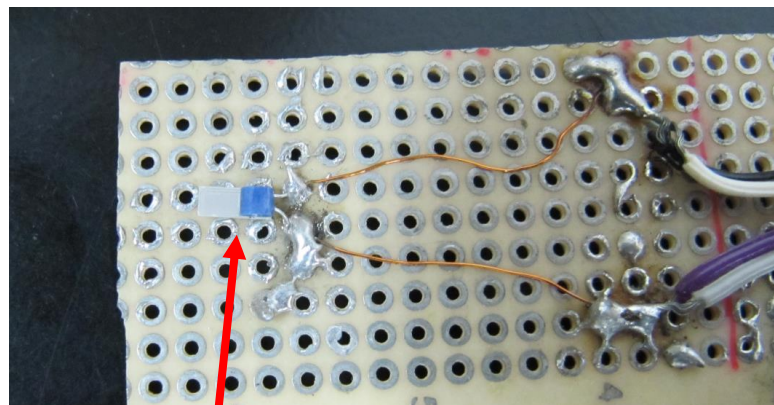
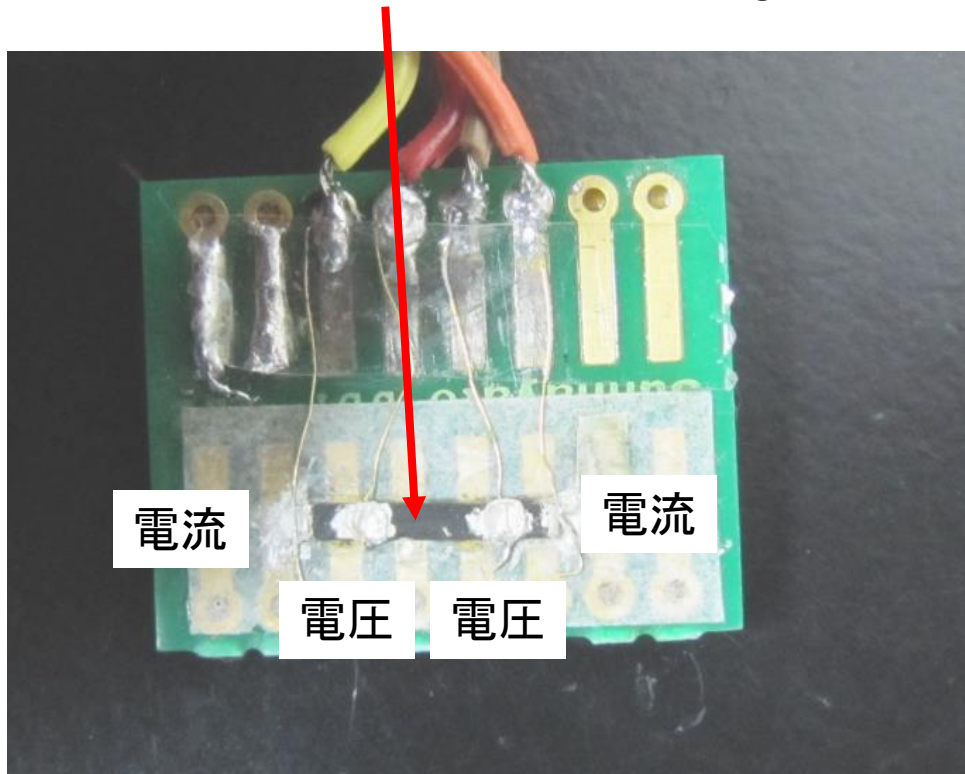
<http://www.furukawa.co.jp/>

低損失の送電線実現まであと一歩??

それでは、高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ が
超伝導になる瞬間を見てみましょう!

セットアップ

高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$



白金薄膜温度計

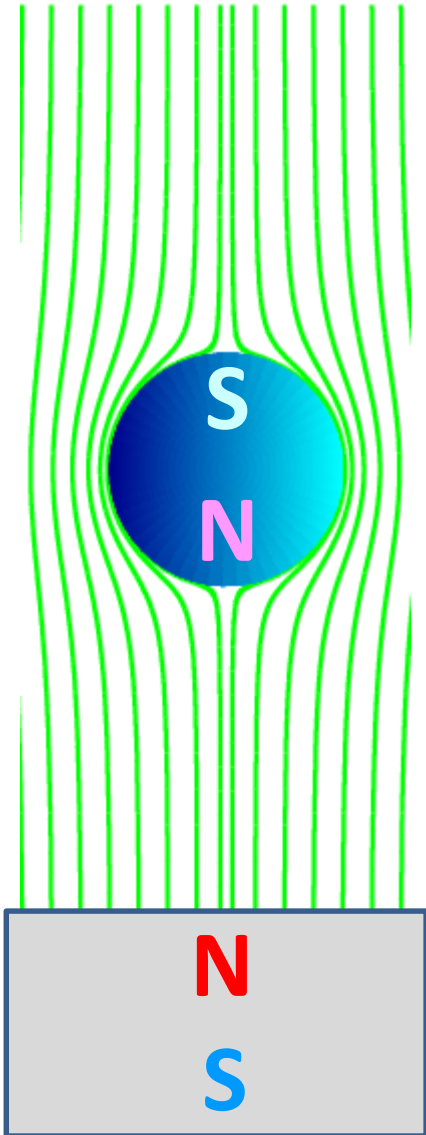
磁気浮上

超伝導体の上に磁石を浮かせてみよう!

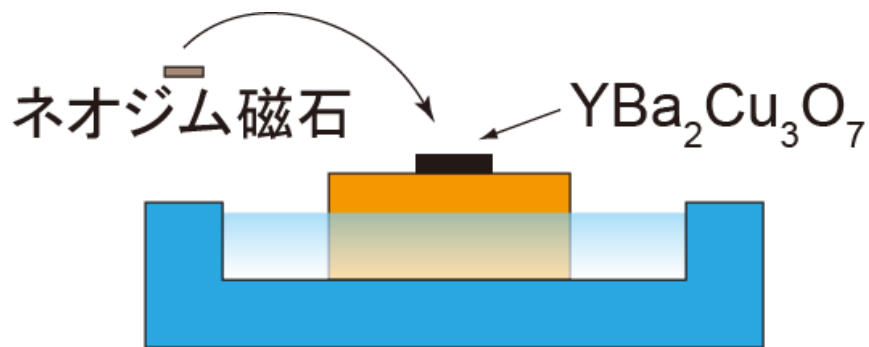
なぜ浮くのか？

超伝導のもう一つの性質
マイスナー効果：
超伝導体内部の磁束が
ゼロになるという性質

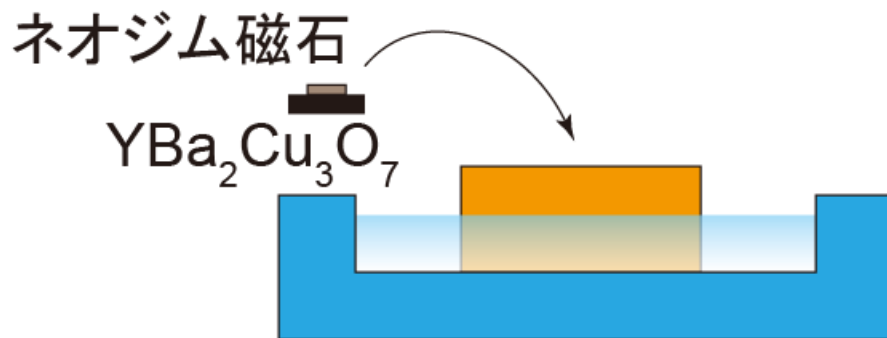
内部磁場を打ち消すために
常に磁石に同じ極が
正対するように振る舞う



いろいろやってみましょう!



後乗せ



先乗せ

磁石を回転させる

磁石の上に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ を乗せるetc.

注意事項の復習

1. 液体窒素には素肌を触れない。皮手袋を使用
2. 目は常に高く遠く。
3. 冷えた金属や衣服へのしみこみに注意!
4. 密閉容器に液体窒素を入れない。
5. 液体窒素のそばで深呼吸しない。

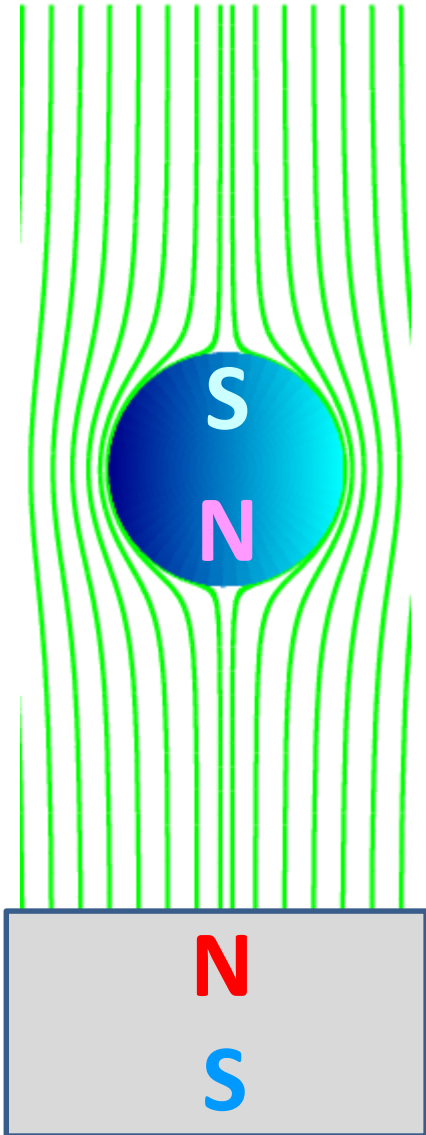
磁気浮上の原理

なぜ浮くのか？

マイスナー効果：
超伝導体がその内部の
磁束を排除しようとする効果

内部磁場を打ち消すために
常に磁石に同じ極が
正対するように振る舞う

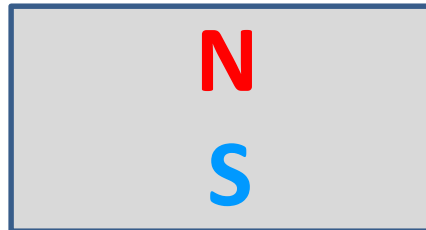
磁石に常に反発する



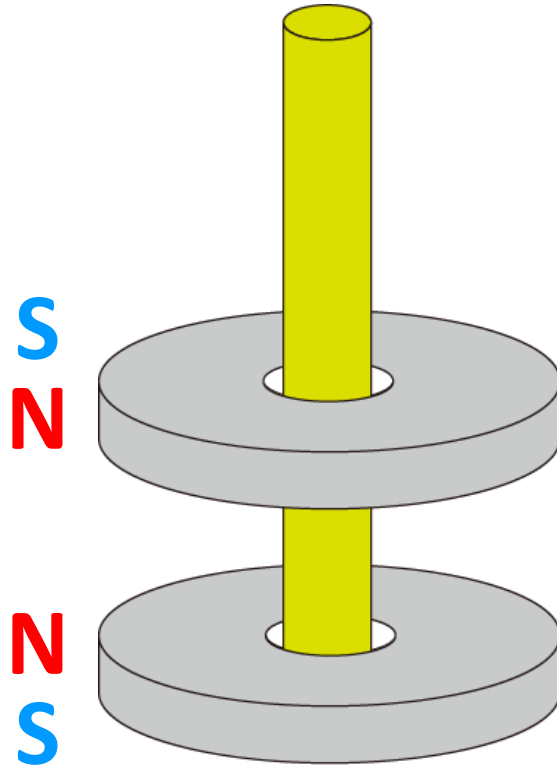
なぜ安定に浮くのか?



?



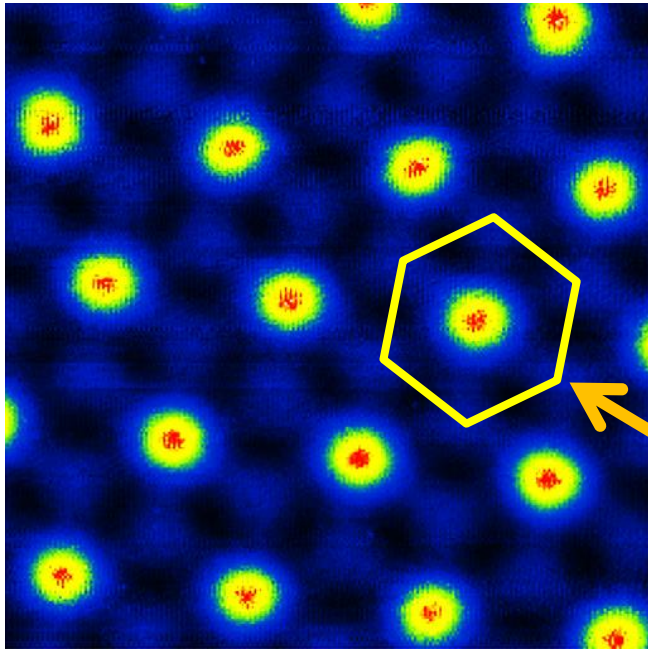
安定に2個の磁石を浮かせるには？



超伝導体の場合も、
磁石を安定に浮かせる力が必要

量子化磁束の侵入

NbSe₂



<http://www.unisoku.co.jp/products/SPMSampleImage.html>

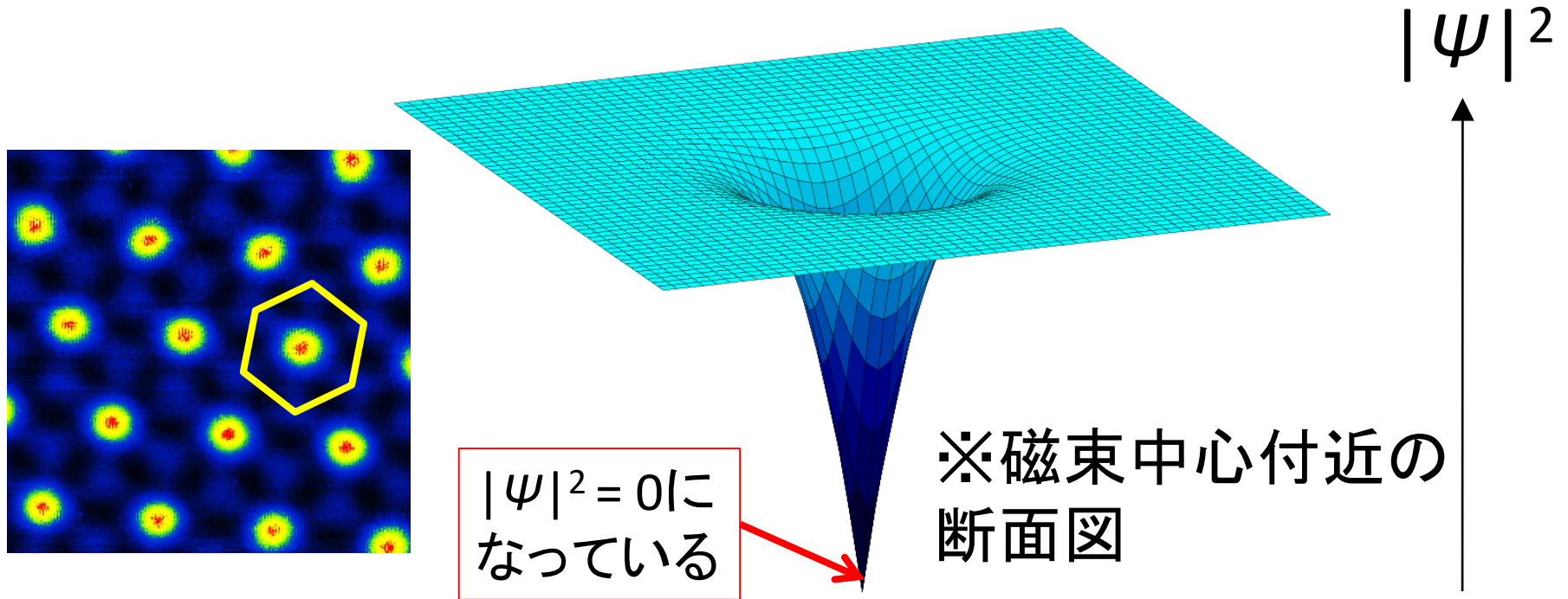
ある種の超伝導体では
磁場をかけると磁束を
完全に排除しない。

「量子化」した
磁束が侵入する

$$\begin{aligned}\Phi_0 &= h/2e \\ &= 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}\end{aligned}$$

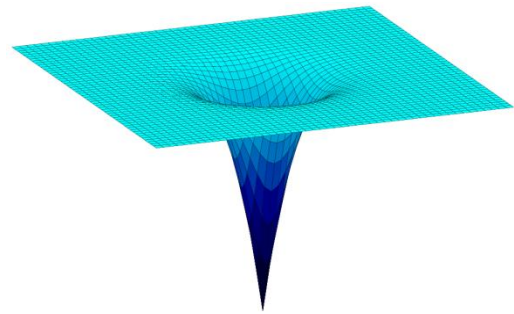
量子化しているなので、切れない・分岐しない

量子化磁束の構造

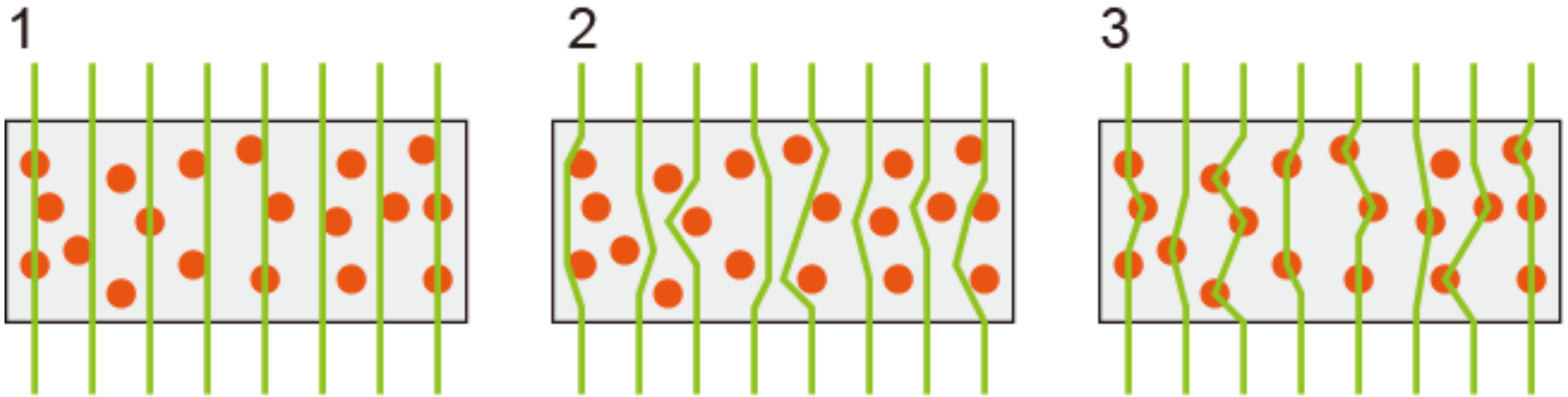


量子化磁束の中心では超伝導の強さ
(超伝導の波動関数)が
ゼロになっていなければならない。

不純物など**超伝導になりにくい**部分が含まれている場合...

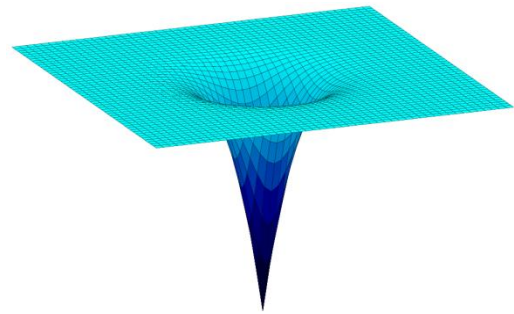


Q:量子化磁束はどのような侵入の仕方をするか?

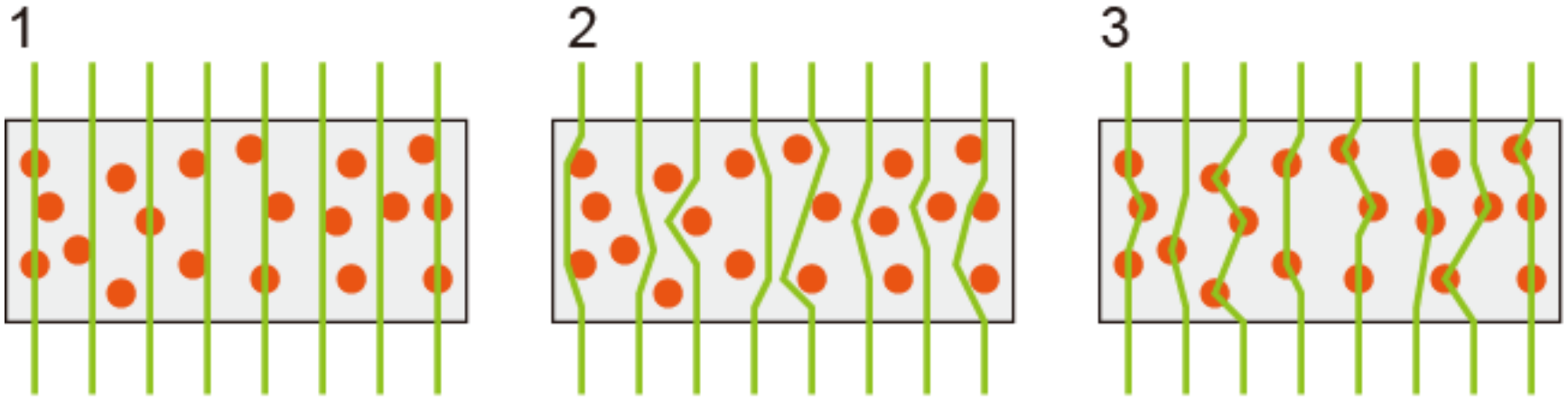


● → 不純物
— → 磁力線

不純物など超伝導になりにくい部分が含まれている場合...

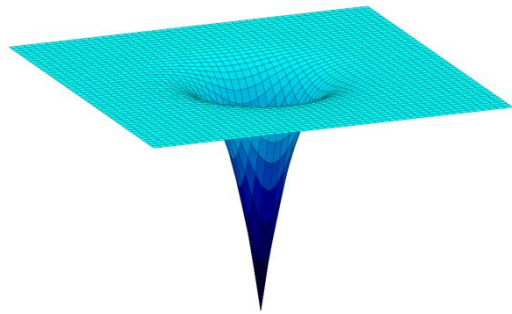


ヒント: わざわざ物質が超伝導になるのは、超伝導になった方がエネルギー的に〇〇だから

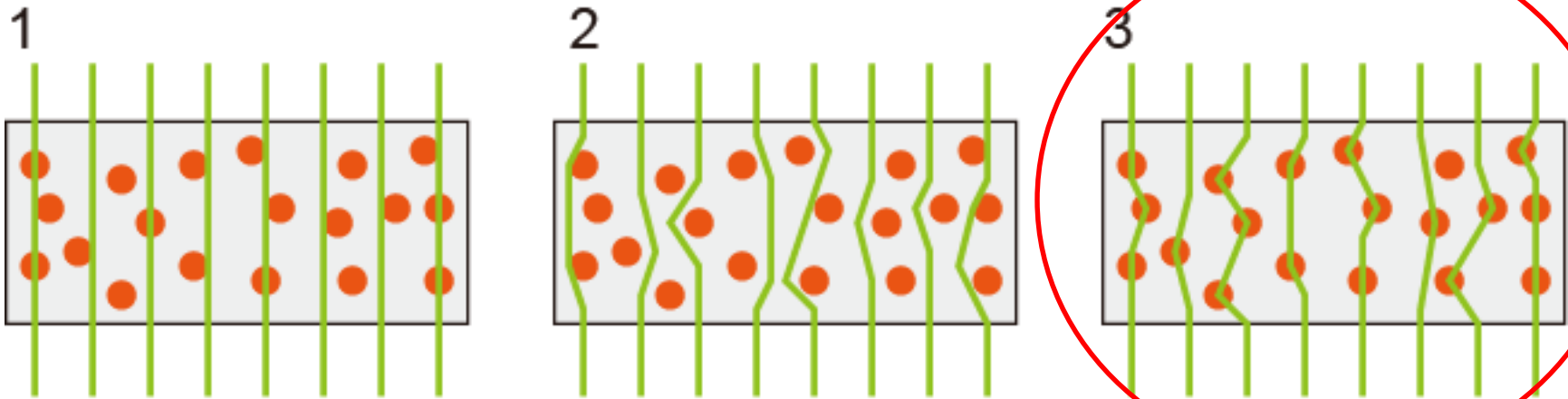


● → 不純物
— → 磁力線

不純物など**超伝導になりにくい**部分が含まれている場合...

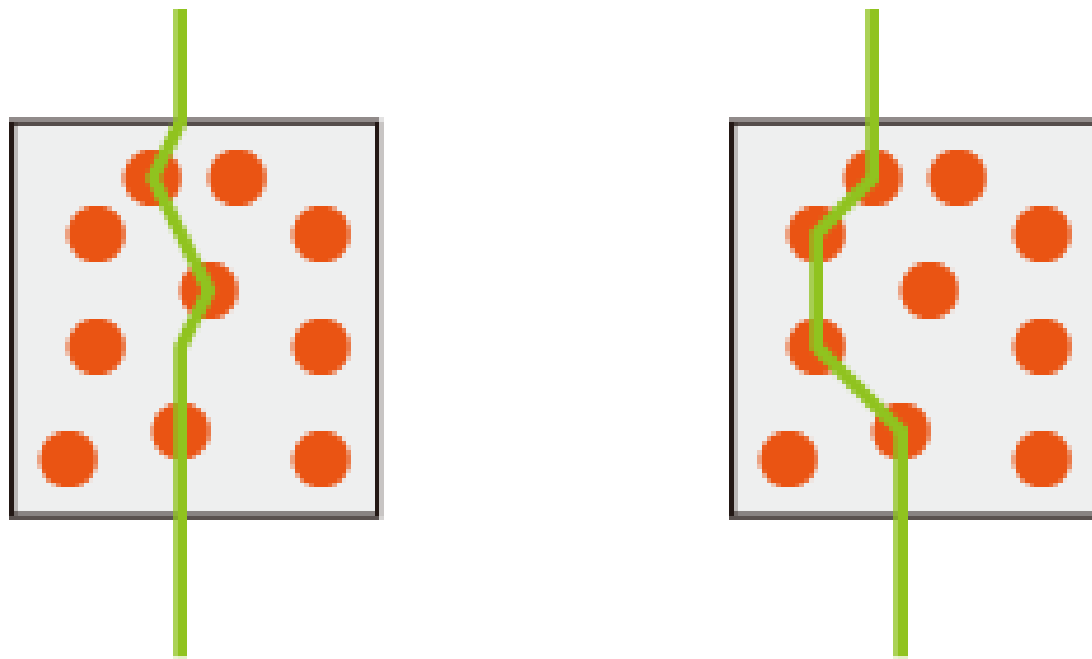


A: 超伝導を壊す量が
最小限でいいので



磁束のピン止め効果

磁束が別のところに移動するには
超伝導の部分を通過しなければいけない



移動するのに**エネルギーが必要**

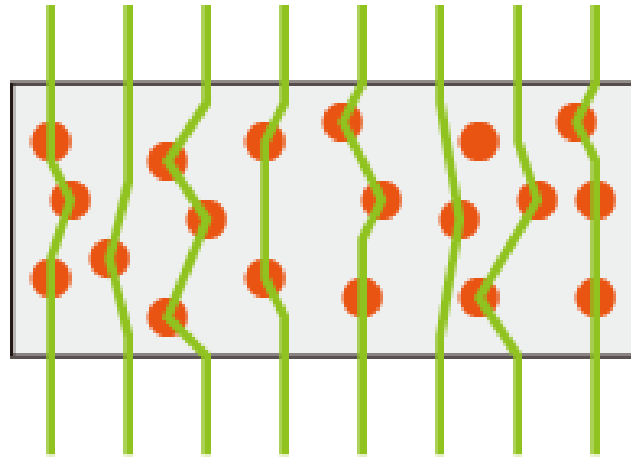
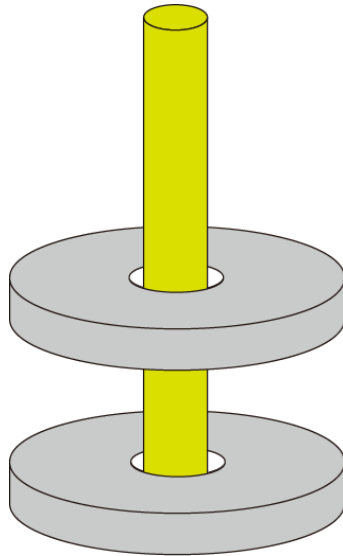


磁場分布変化を妨げる方向に力が働く

ピン止めされた磁束が
磁石の移動を妨げる



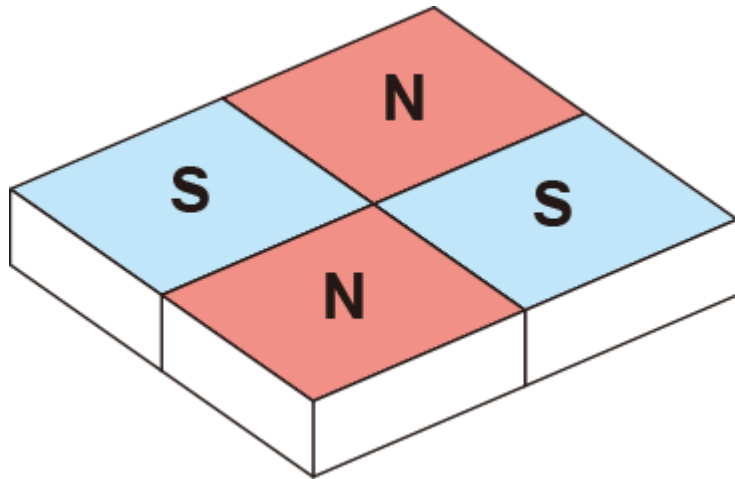
磁石が安定に浮上する



おまけ実験

その1:
マイスナー効果だけで
浮かせる

その2:
室温超伝導?



四重極磁石

本日のまとめ

1. 液体窒素は気をつけて使えば非常に便利な寒剤
2. 超伝導の基本性質：
電気抵抗ゼロとマイスナー効果
3. 磁気浮上は、マイスナー効果・
磁束量子化・ピン止め効果など
超伝導の不思議がいっぱい詰まった現象

低温の世界・超伝導の世界は面白い!