

現代物理学の考え方

その6

超伝導・超流動を見る

南方久和・溝口憲治

量子の世界の観察

超流動・超伝導を見る

超流動

ヘリウムの噴水

こぼれる超流動ヘリウム

超伝導

磁気浮上

魚釣り効果

浮上走行

^4He の超流動

Superfluidity

大学祭
理工祭

ヘリウム
委員会

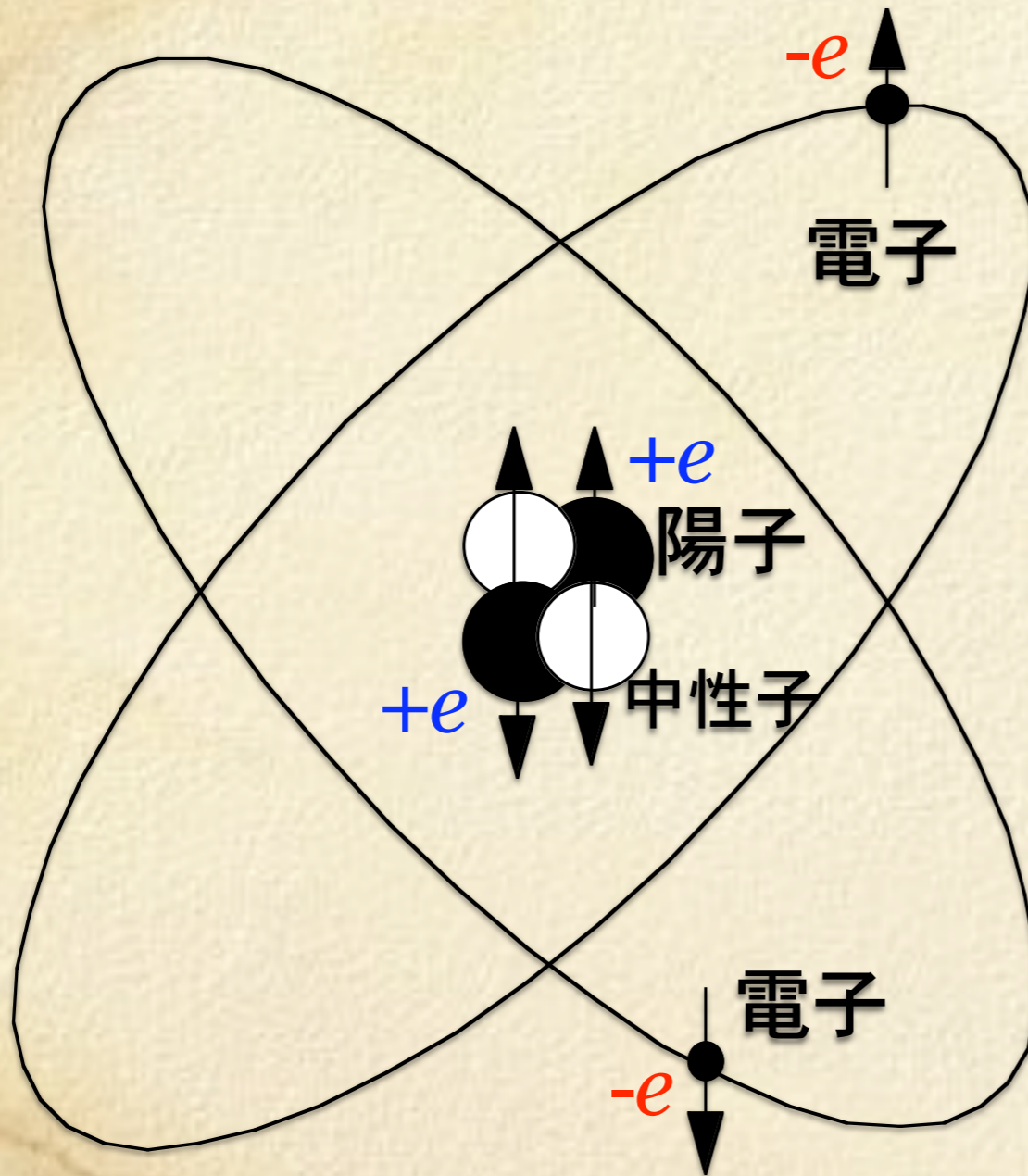


液体ヘリウム
-270度Cの
研究用 寒剤



${}^4\text{He}$ とは？

太陽神：Helios



スピン

電子, $S=1/2$: 2個

陽子, $S=1/2$: 2個

中性子, $S=1/2$: 2個

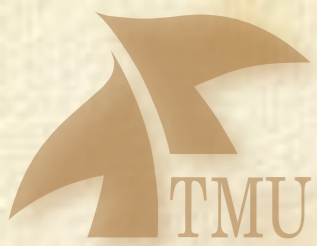
全スピンは、

$S=0$

の整数スピン

ボーズ粒子！

水素原子の次に**軽い**元素



Fermi-粒子 フェルミ粒子

Pauli の排他律 に従う粒子

一つの量子状態には**最大
1つ**の粒子しか入れない

スピンの $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ (半整数) の粒
子

電子、陽子、中性子
 ^3He 原子など

Bose-粒子 ボーズ粒子

一つの量子状態に**いくつ
でも**粒子が入れる

スピンの $0, 1, 2, 3, \dots$ (整数) の粒子

光子、重陽子、 ^4He 原子
フォノンなど

全体主義の「ボーズ粒子」 個人主義の「フェルミ粒子」

ある温度, **2.17K** 以下では

殆ど全ての ${}^4\text{He}$ 原子が
一つの最低エネルギー状態に
(ボーズ粒子だから出来る)

超流動状態

(ボーズ・アインシュタイン凝縮)

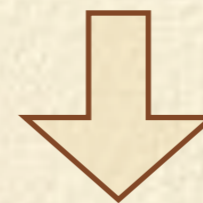
超流動状態とは？

ほとんどのHeは、

○運動量 = 0 の状態

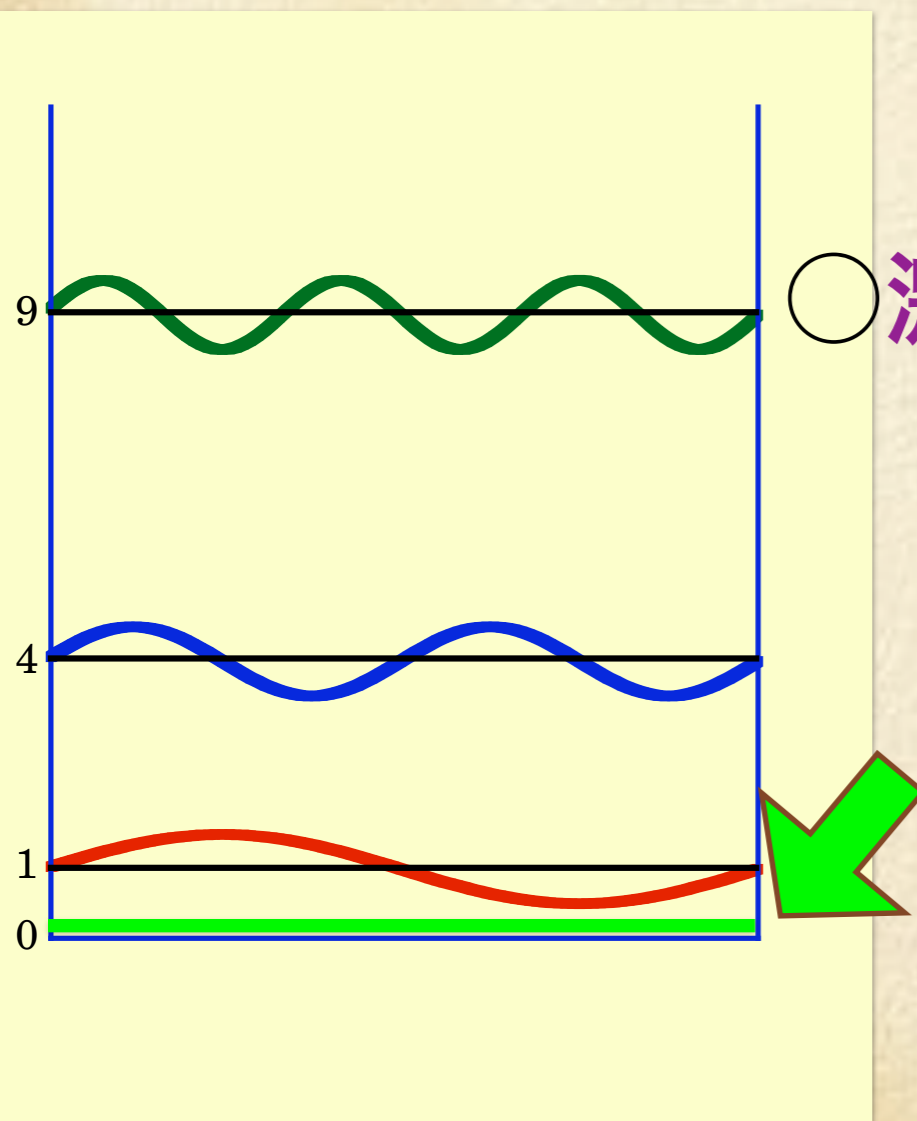
○一つの量子状態

○激しい運動：衝突 ⇒ 起こらない



粘性抵抗 = ゼロ

摩擦無し !!



しかし、実際の振舞は

2流体モデル

○整然としたデモ隊（超流動He II）

粘性抵抗 無し

+

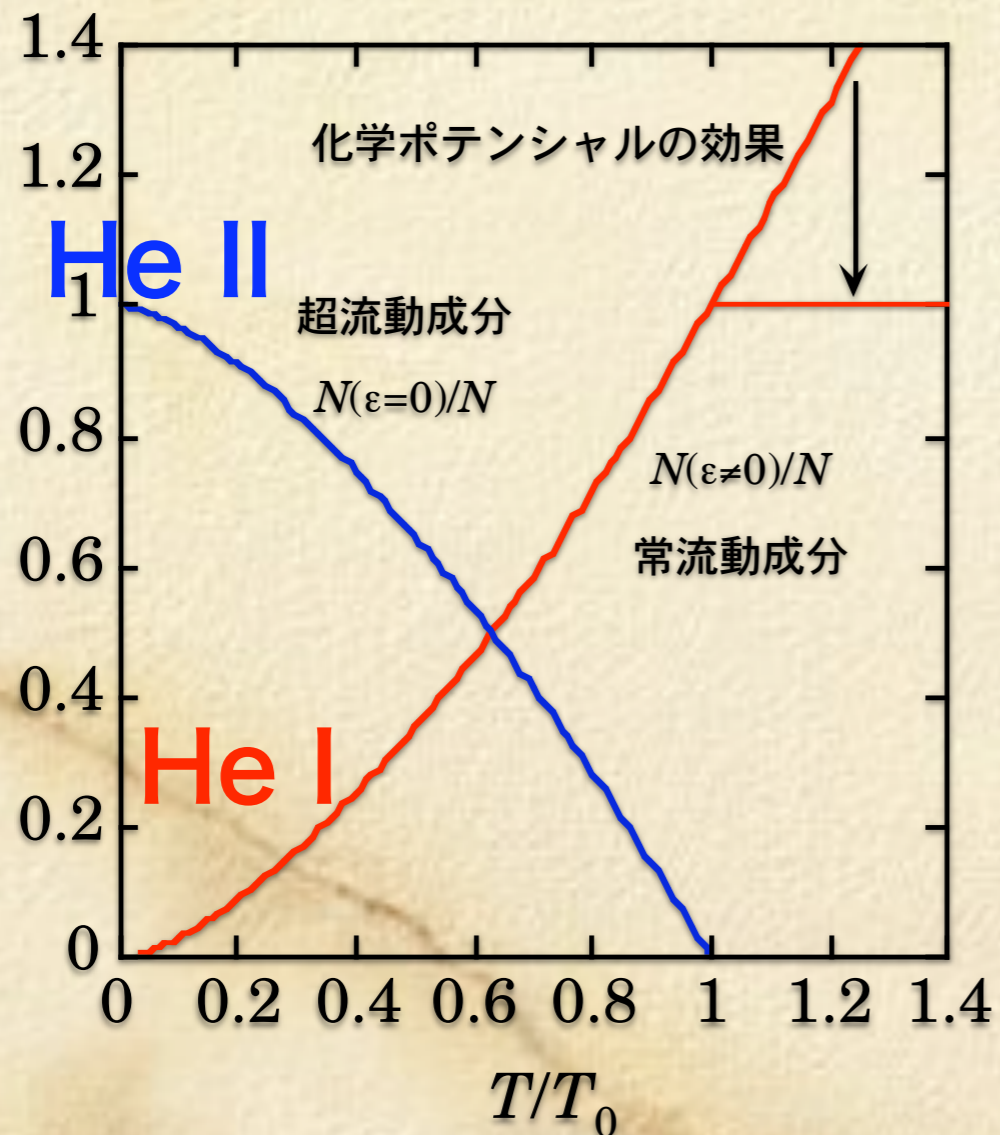
○新宿の駅前の雑踏（常流動He I）

粘性抵抗 有り

超流動の観察

ヘリウムの噴水

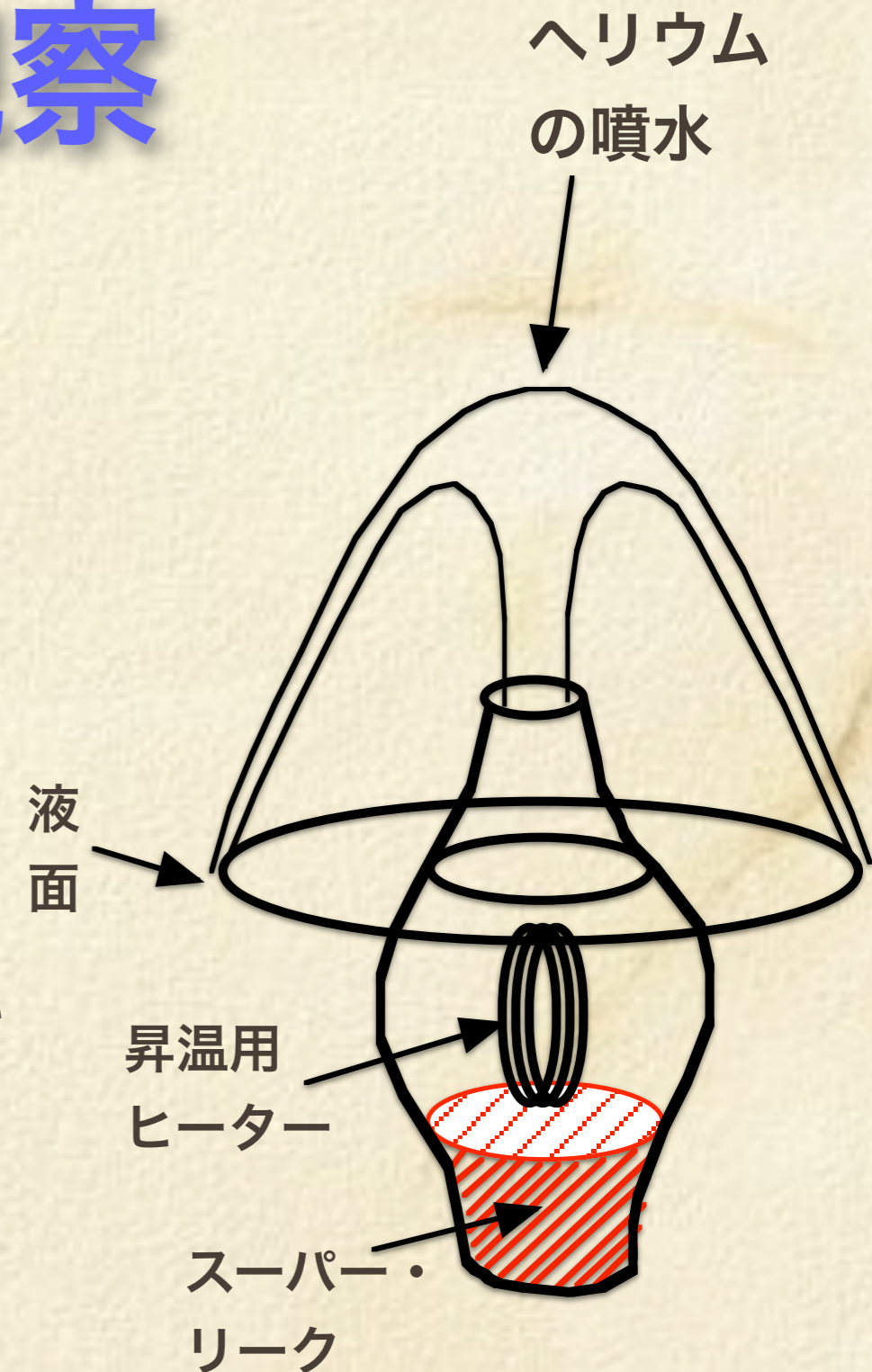
- 2流体モデルの良いデモンストレーション



超流動の観察

スーパー・リーク

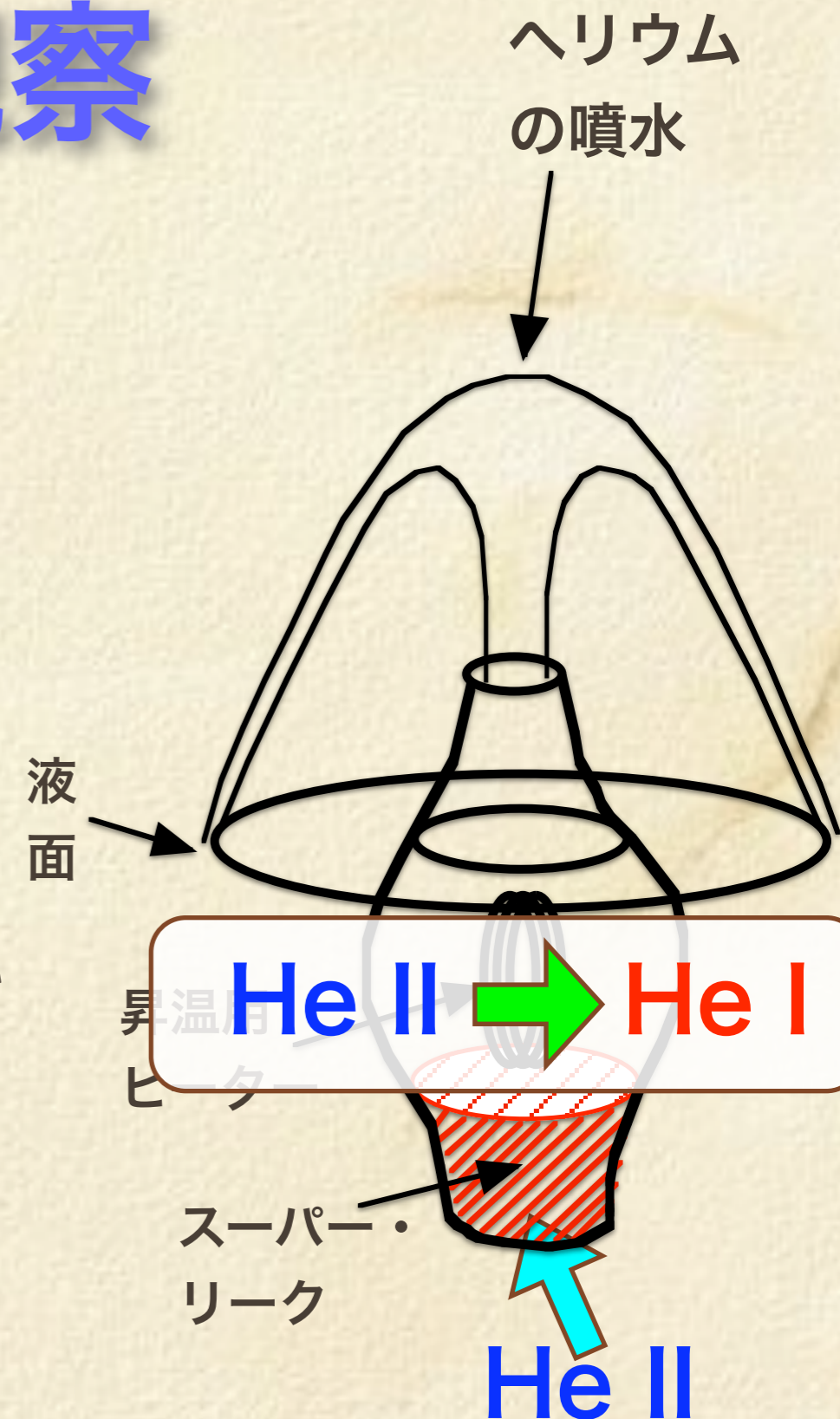
- 非常に細かい粉末がビッシリと詰まった物。
- 常流動He I は容易には通れない
- 超流動He II は容易に通過



超流動の観察

スーパー・リーク

- 非常に細かい粉末がビッシリと詰まった物。
- 常流動He I は容易には通れない
- 超流動He II は容易に通過
- ヒーターで加温
- 超流動He II の濃度減少を補って吹き出すHeの噴水



こぼれる超流動 He II

超流動He II 間の引力が極端に弱く、ヘリウム原子とガラス壁の分子間の引力で壁をよじ登り、ついにはぽたぽたとこぼれてしまう。

Film flow、ナノメートルの厚みで、毎秒・数十mの速さ

ガラス容器



こぼれる液体He

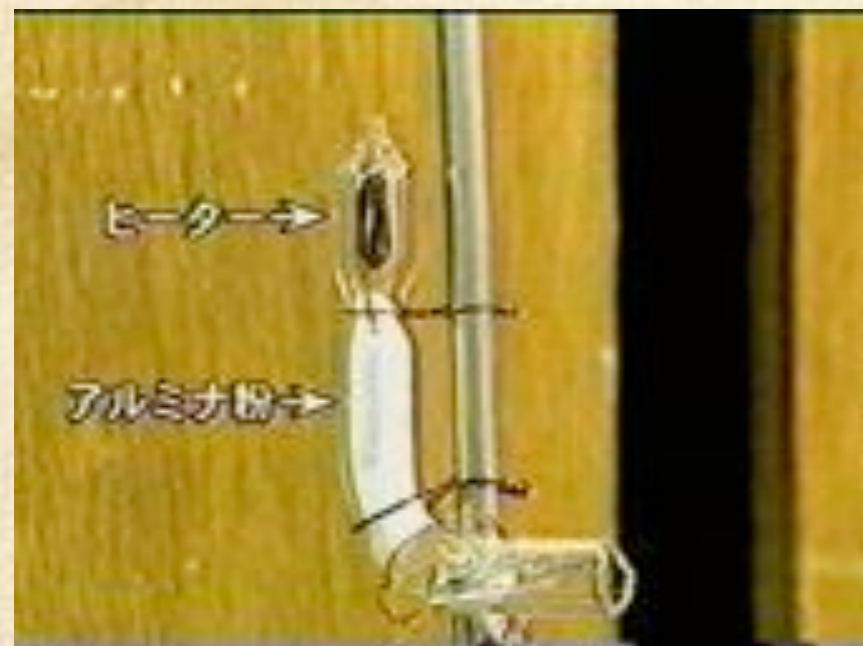
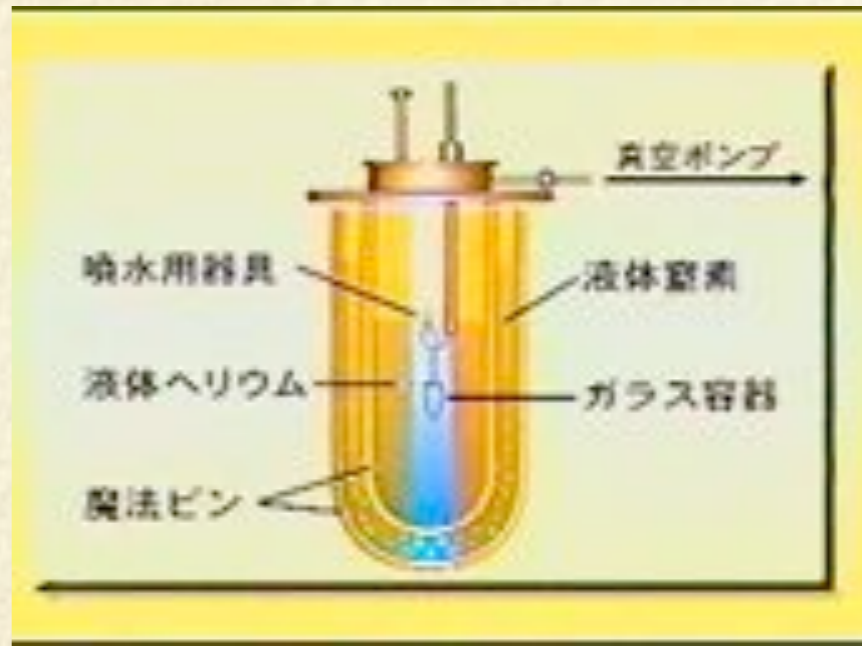
超流動の観察

ヘリウムの噴水

こぼれる超流動ヘリウム

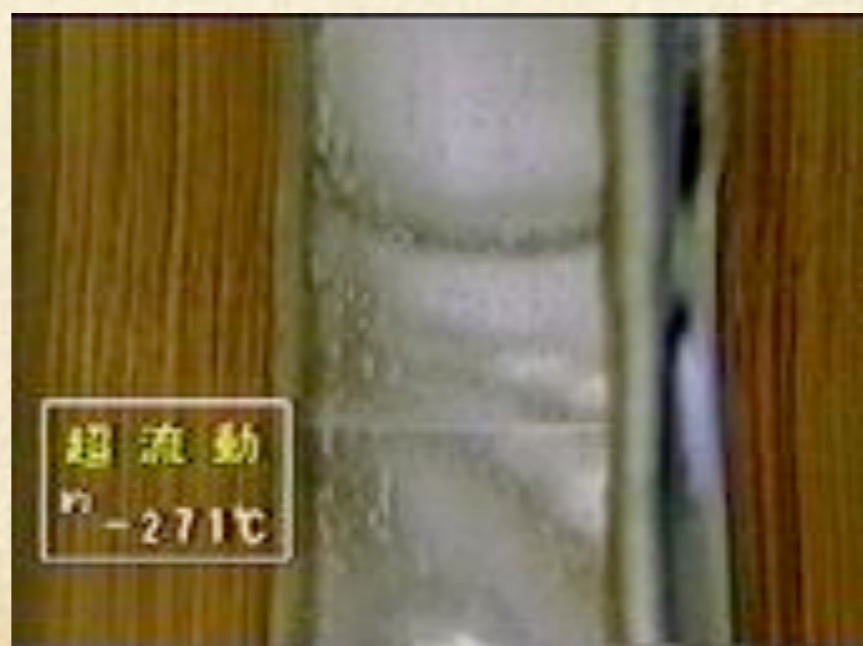
液体ヘリウム

～超流動と極低温～



大気圧が760 torrで、気圧が下がると暴れん坊のHe原子だけ蒸発して温度が下がってくる。

37 torrでは激しく沸騰していたHeが、36 torrで超流動になるとピタッと納まる様子。





見にくいですが、電流値に合わせて噴水の高さが上がっていく様子



やはり見にくいですが、ガラス容器の先端から滴が垂れる様子



液面は、縁よりも十分下がっているため、He IIが壁をよじ登り垂れている。

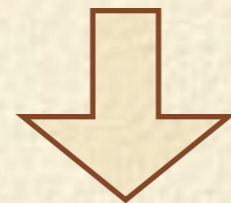


超伝導現象

Superconducting phenomena

超伝導

電気抵抗が消滅する現象



超流動の**摩擦無し!!**と類似の現象

超伝導って何？

マクロなスケールの **量子現象**

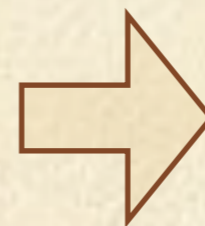


大部分の電子で**一つの量子状態**を作る

フェルミ粒子ではあり得ぬ**現象**



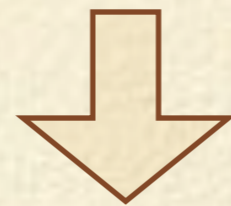
~~パウリの排他率~~



ボーズ粒子化？

フェルミ粒子をボーズ粒子に！

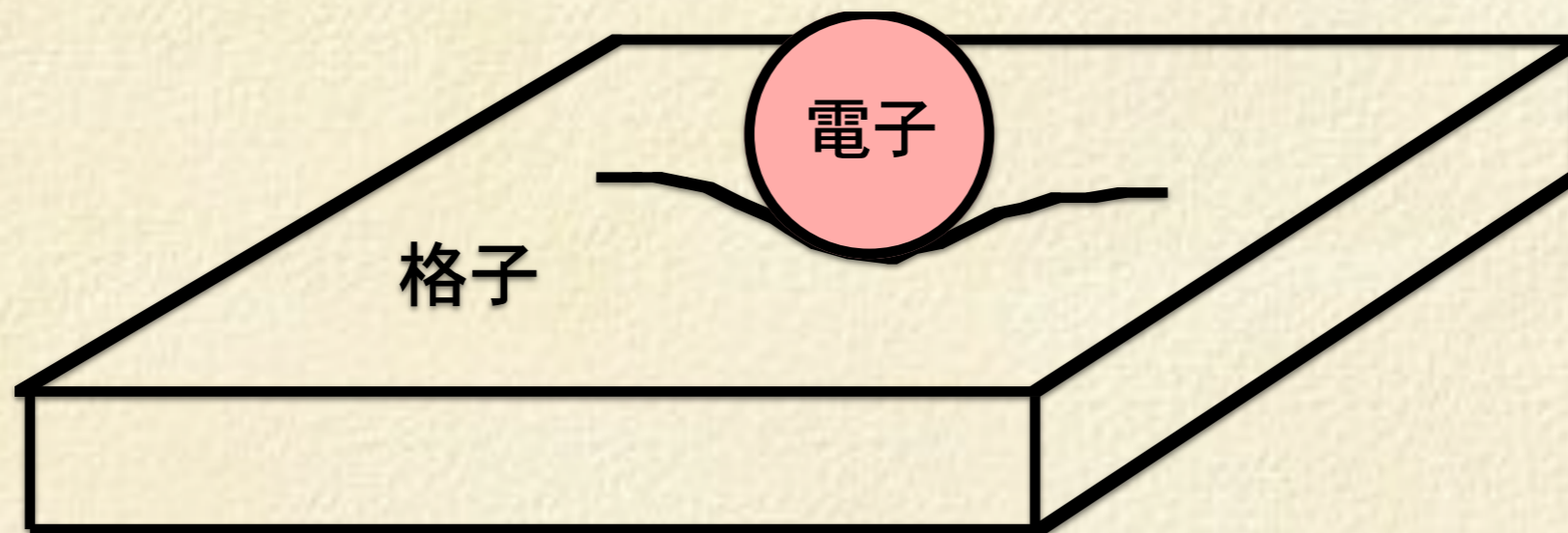
電子は $S=1/2$:フェルミ粒子



2つ集めれば、 $S=0$ のボーズ粒子！

クーパー対 = $(\uparrow \rightarrow) + (\downarrow \leftarrow)$

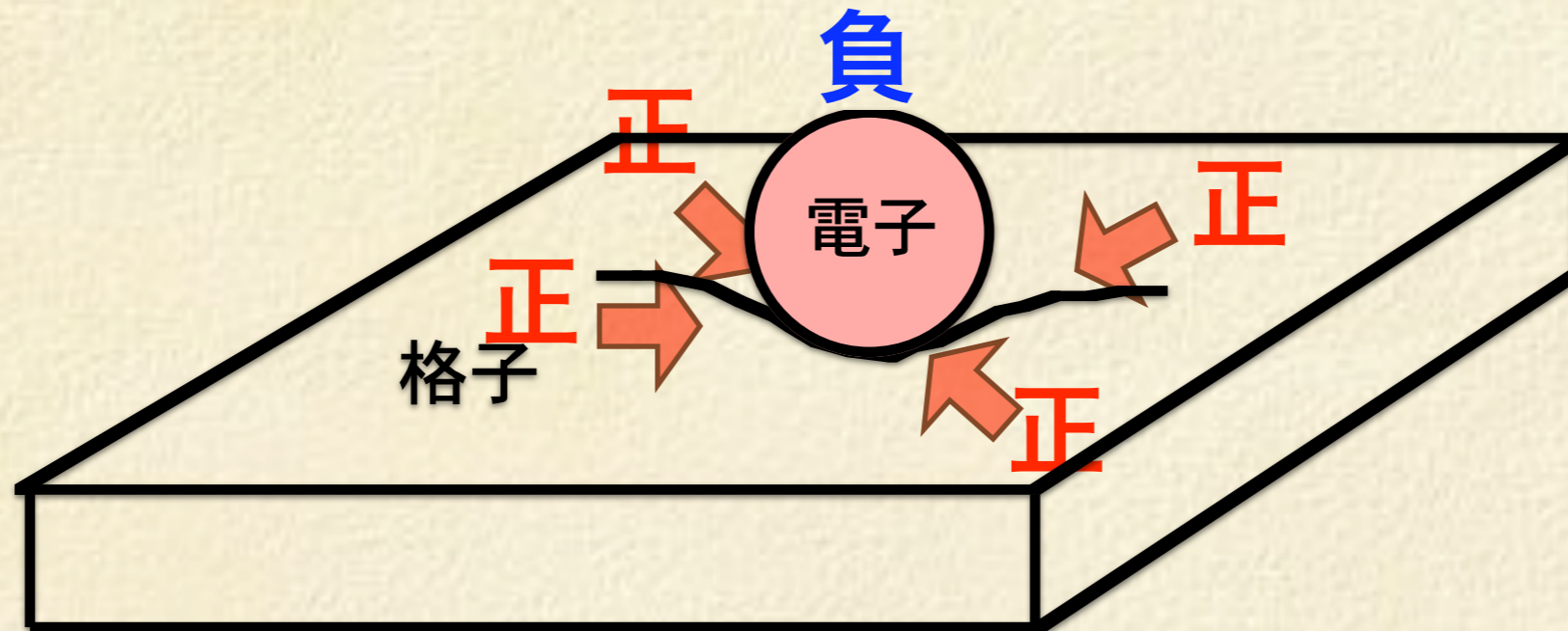
クーパ-対を作る引力は？



コンニャク模型

格子の**正電荷** → 引力 ← 電子の**負電荷**
イオンは**重い** 電子は**高速**

クーパ対を作る引力は？



コンニャク模型

格子の**正電荷** → 引力 ← 電子の**負電荷**
 イオンは**重い** 電子は**高速**

電子には格子が**歪んだまま**に見える

超伝導状態とは？

○全クーパー対から作られる**巨視的**量子状態

フェルミ粒子より安定なクーパー対
量子状態を壊すにはエネルギーが必要

○衝突：電気抵抗 ⇒ **巨視的**($\sim 10^{20}$ 個)量子状態の変化



確率的に起こり得ない



電気抵抗 = ゼロ

超伝導状態に特徴的な現象

- 電気抵抗が消失
- マイスナー効果（磁束の排斥）
- 磁束の量子化（フラクソイド）

超伝導体の磁気浮上の観察

超伝導体の磁気浮上

マイスナー効果 + フラックスのピン止め効果

魚釣り効果 (逆さにしても落ちない)

フェライト磁石の楕円レール上を浮上走行

酸化物高温超伝導体

超伝導になる温度：超伝導転移温度 T_c


$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$: 90K (≈ -180 度C)

液体窒素温度 : 78K (≈ -200 度C)



手軽に確認が可能

略称 : YBCO

A photograph showing a small, rectangular, white, irregularly shaped object wrapped in crinkled aluminum foil. This object is levitating above a stack of several dark brown, rectangular neodymium magnets. The background is a plain, light-colored surface.

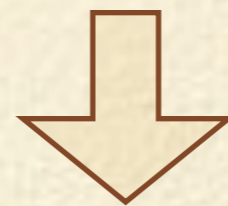
アルミフイルドで
包んだ YBCO

超強力磁石

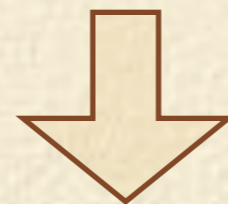
超伝導体の磁気浮上

マイスナー効果

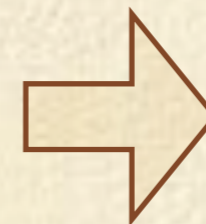
超伝導状態



超伝導電流により磁束は打消される

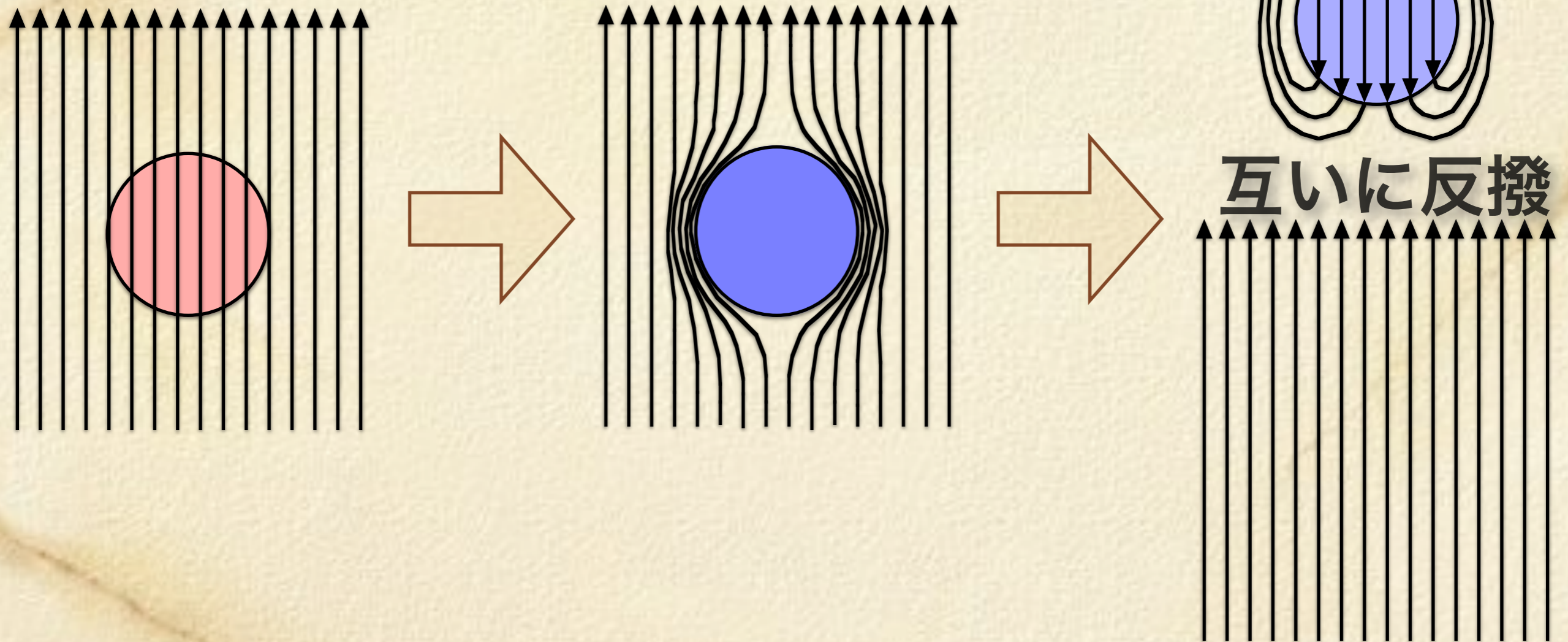


反対向きの磁石

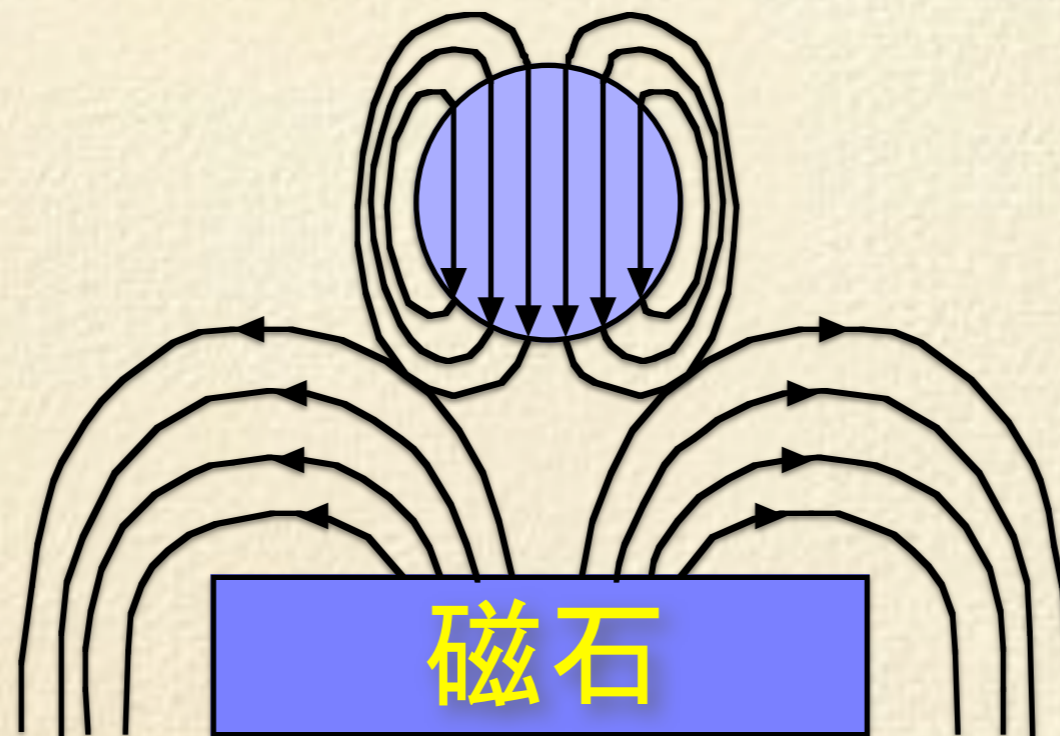


反発

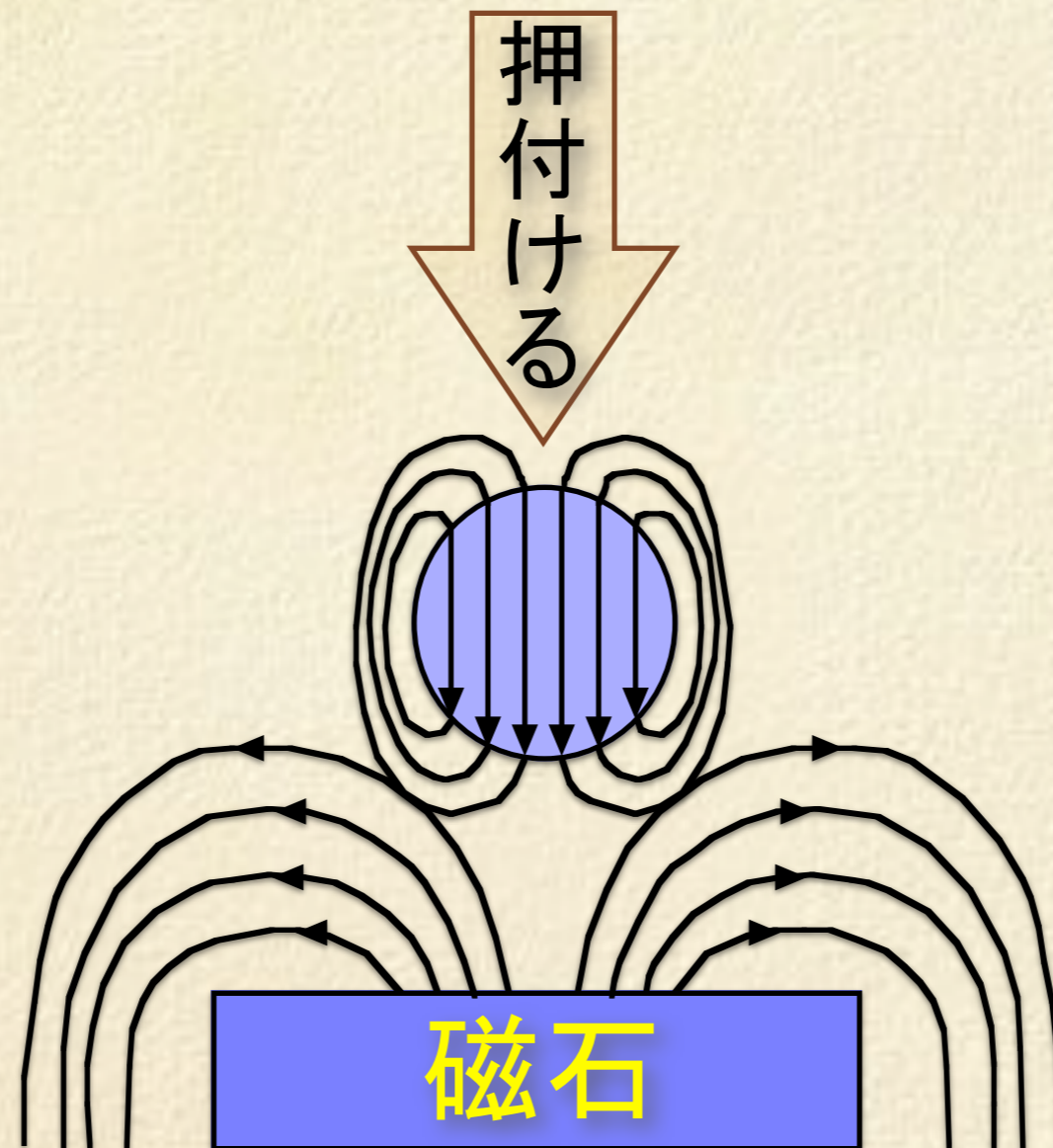
$T > T_c$ 温度を下げる $T < T_c$



超伝導体の磁気浮上

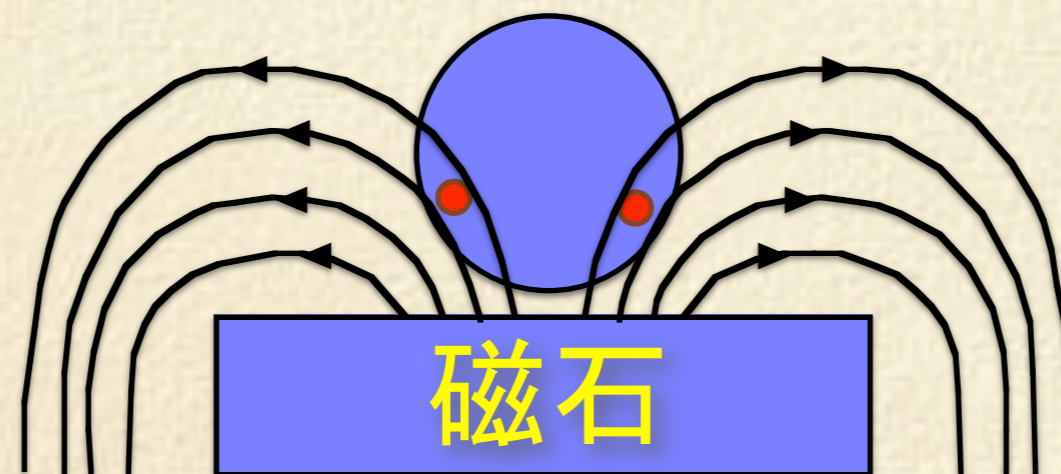


超伝導体の磁気浮上



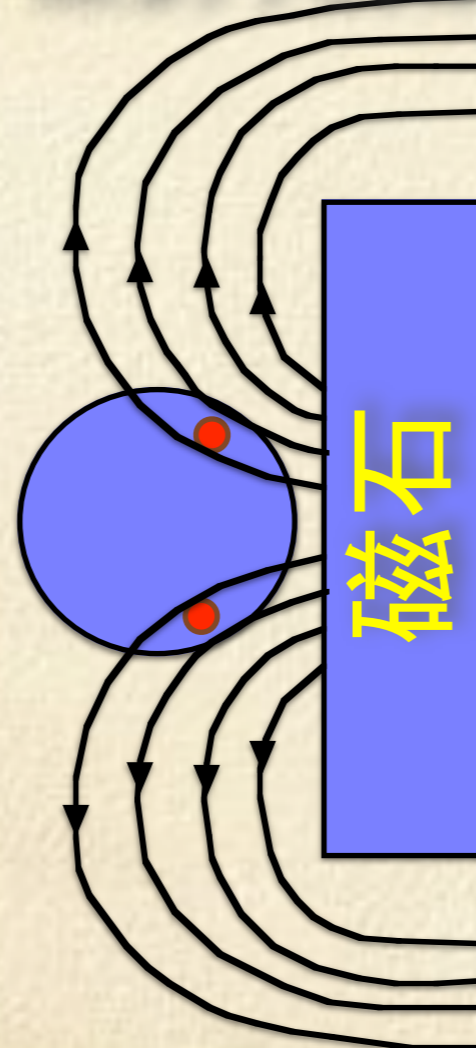
超伝導体の磁気浮上

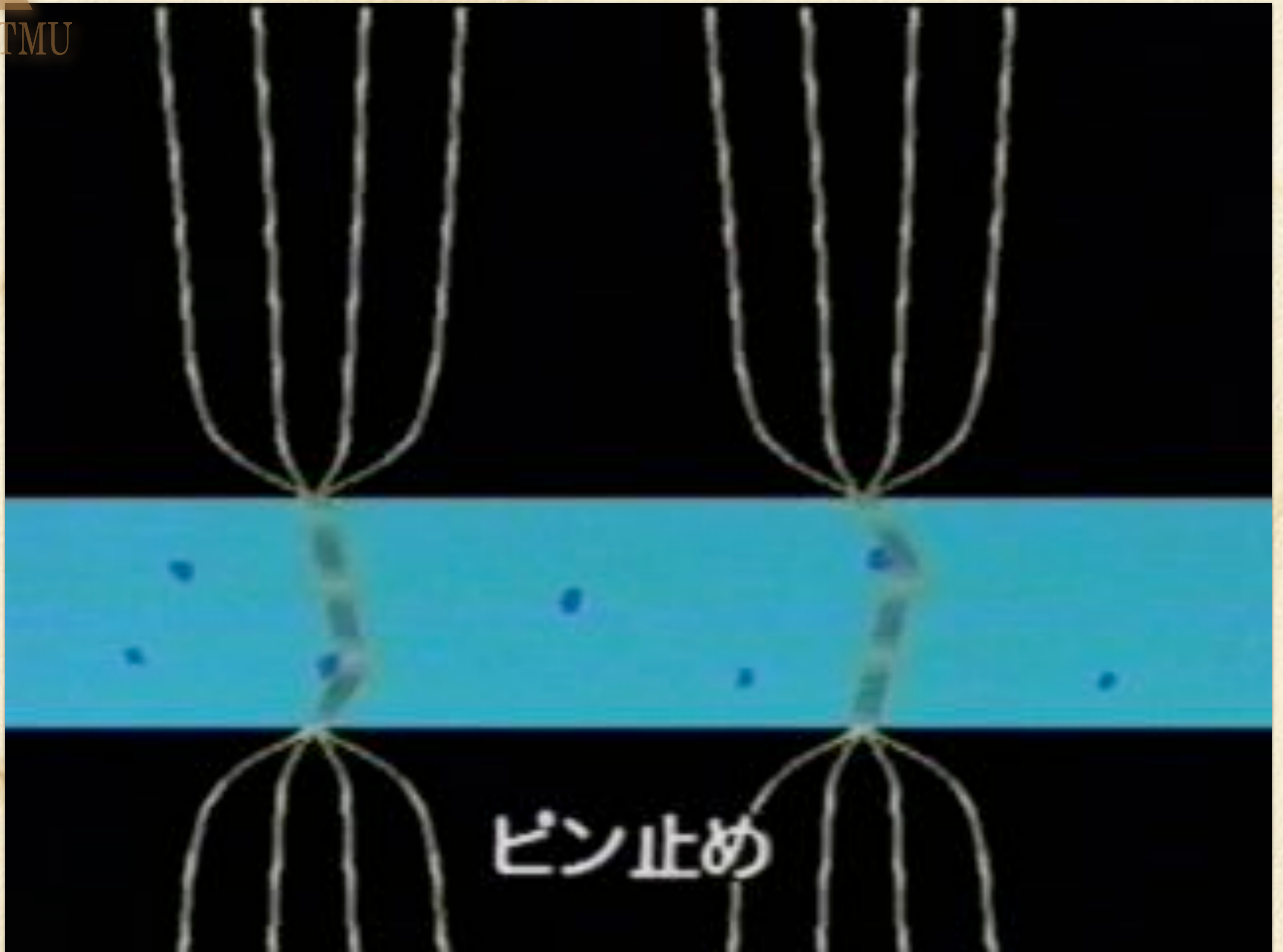
3次元的ピン留め
魚釣り現象



超伝導体の磁気浮上

3次元的ピン留め
魚釣り現象





ピン止め

