

低温科学A H24 (2012)年度前期

低温科学A 前期 (低温科学全般)

1. 低温科学入門、超伝導現象 (石田)

4/11、18 (低温実験のデモンストレーション)、25、6/20

2. 超流動現象、低温の歴史と技術 (佐々木) 5/9、5/16、5/23

3. 低温科学と量子力学 (金属中の電子、超伝導、超流動) (池田)

5/30、6/6、6/13

4. 低温分光 (レーザー冷却など) (高橋) 6/27、7/4、7/11

低温科学B 後期 (特に超伝導とその応用を中心に)

1. 物質の磁性と超伝導

(局在電子系～遍歴電子系・新しい超伝導物質まで) (吉村)

2. 超伝導応用I (超伝導磁石・核磁気共鳴MRIへの応用) (竹腰)

3. 超伝導応用II

(エネルギー貯蔵、電力輸送、超伝導発電などへの応用) (白井)

4. 超伝導応用III (超伝導量子磁束計の地球物理学への応用) (福田)

5. 磁性I (強磁場と低温物性) (植田)

6. 磁性II (遍歴電子磁性とフラストレーション) (中村)

低温の歴史と技術

低温物質科学研究センター
兼 理学研究科 物理学第一教室
低温物理学研究室
佐々木 豊 (tel: 753-3755)
sasaki@scphys.kyoto-u.ac.jp

2A. 低温の歴史と技術

2A. 1 低温開拓の歴史

2A. 2 絶対零度への挑戦

講義に用いたスライドは<http://www.ltm.kyoto-u.ac.jp/lecturenote>よりダウンロード出来ます。

2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

冷却することの意義1: 暑気払い

気温の低い地下の洞窟や水のある場所に行く
なぜ川の水は冷たいのか興味がわく?

冷却することの意義2: 物質の姿の変化

水(液体)⇒氷(固体)により持ち運び容易・形態の加工が可能・他物質の冷却が容易
柔らかい食品を冷凍すると薄片にしやすい

冷却することの意義3: 化学反応速度の低下

食品の冷蔵・冷凍保存

細菌・微生物の活性の低下

アレニウス則(化学反応速度は温度上昇に対して指数関数的に増加する)

$$v \propto \exp\left(-U/k_B T\right)$$



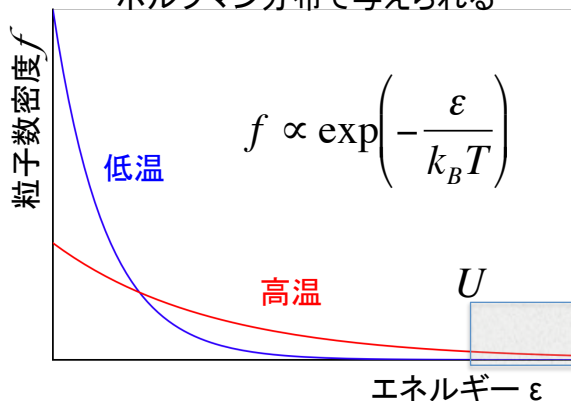
2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

アレニウス則の背景: 化学反応の経路に熱揺らぎに依存した熱活性機構が含まれている

$$v \propto \exp\left(-U/k_B T\right)$$

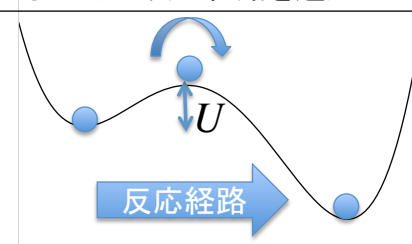
エネルギー ε を持つ粒子の割合は
ボルツマン分布で与えられる



熱揺らぎ:

物質の構成粒子のエネルギーは
温度に対応した分布を保ちながら
常に入れ替わって揺れ動いている

障壁Uより高いエネルギーを持つ
粒子だけが反応経路を通過



2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

冷却することの意義4: 熱揺らぎを小さくして物質本来の姿を研究する

絶対零度の世界は活性を失った死の世界か？

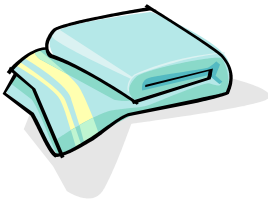
⇒ 答えがNoであることは次回以降の講義で学習するが、熱揺らぎに変わって量子力学的なぼやけ(量子揺らぎ)が見えてくる

どうやって絶対零度に近づくのか、、、

2A. 低温の歴史と技術

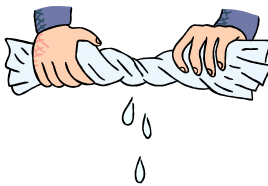
2A.1 低温開拓の歴史

冷却の基本原則1: 蒸発冷却



熱がある時に、タオルに水を含ませて頭に載せると、すっとする。

水が蒸発する時に潜熱(気化熱)を頭から奪っていくので、頭が冷える。



注射する時に、綿にアルコールを含ませて腕を拭くと、すっとする。

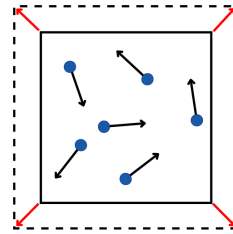
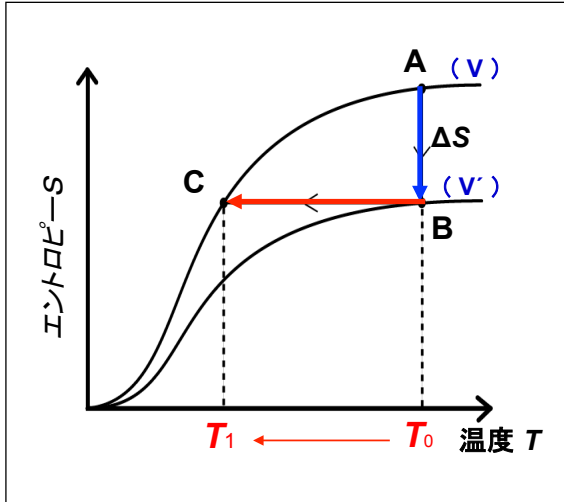
アルコールが蒸発する時に潜熱(気化熱)を腕から奪っていくので、腕が冷える。



2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

冷却の基本原則2: 断熱膨張



容器に閉じ込めた気体を膨張させると冷たくなる。

等温圧縮 (A→B)

温度を一定にして、加圧

$$\Delta Q = T_0 \Delta S (\text{発熱}) \rightarrow \text{熱浴へ}$$

断熱膨張 (B→C)

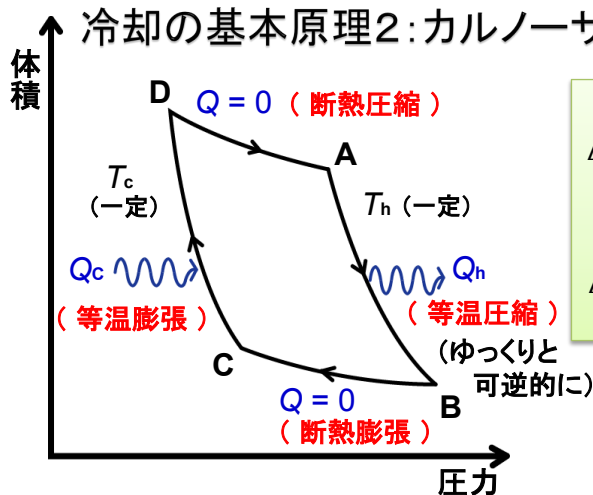
周囲からの熱の出入を断って膨張

$$\Delta S = 0 \quad T_0 \rightarrow T_1 (\text{冷却})$$

2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

冷却の基本原則2: カルノーサイクル (理想的熱機関)



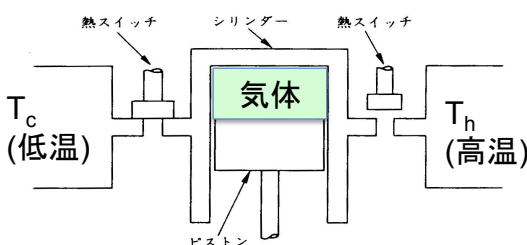
$$\begin{aligned} \Delta S_{A \rightarrow B} &= \frac{Q_h}{T_h} (Q_h < 0) & \Delta S_{B \rightarrow C} &= 0 \\ \Delta S_{C \rightarrow D} &= \frac{Q_c}{T_c} (Q_c > 0) & \Delta S_{D \rightarrow A} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= \Delta S_{A \rightarrow B} + \Delta S_{B \rightarrow C} \\ &\quad + \Delta S_{C \rightarrow D} + \Delta S_{D \rightarrow A} = 0 \end{aligned}$$

であるから

$$Q_c = -\frac{T_c}{T_h} Q_h$$

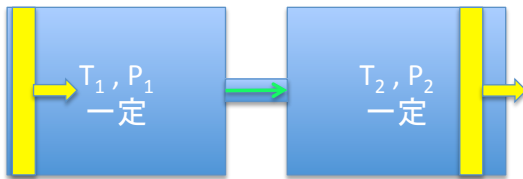
欠点: $T_c \rightarrow 0$ で $Q_c \rightarrow 0$



2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

冷却の基本原則2: 断熱自由膨張(ジュール・トムソン効果)

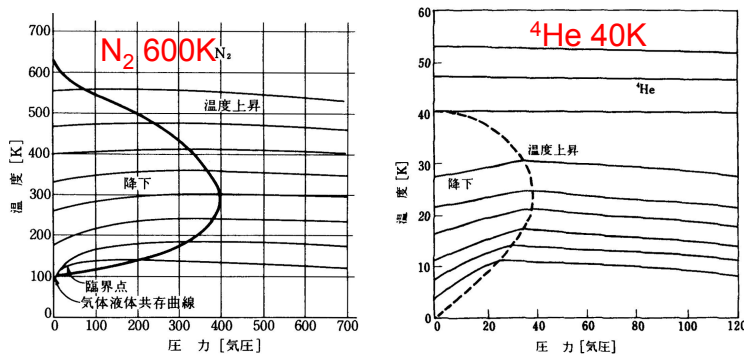


内部エネルギー変化＝気体のした仕事

$$U_2 - U_1 = P_1 V_1 - P_2 V_2$$

等エンタルピー($H=U+PV$)過程

理想気体では圧力変化にともなう温度変化はないが、実在気体では分子間相互作用のために、逆転温度以下では圧力降下で冷却する(詳しくは熱力学の教科書を参照してください)



2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

永久気体の液化:

19C初頭 気体を圧縮して液化できるようになったが

酸素や水素はこの方法では液化できなかった。

=> 永久気体と呼ばれた

1877 酸素の液化(90K=-183°C)に成功

Cailletet(フランス); 液化エチレン-110°Cで予冷

200気圧から膨張

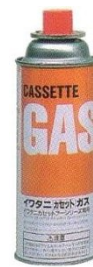
Pictet(スイス); 液化SO₂-10°C, 液化CO₂-80°C

の2段予冷

1883 液化酸素、窒素(77K=-196°C)の大量製造に成功

Wroblewski, Olczewski(ポーランド)

翌年、液化酸素予冷で水素の液化(20K)に成功



プロパンガス
(8.5気圧で液化)

2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

永久気体の液化:

1898 液化水素(20K)の大量製造に成功 Dewar(英)

予冷とJoule-Thomson冷却

1908 ヘリウムの液化(4.2K)に成功

オランダ ライデンのKamerlingh Onnes

1868 太陽光の分光によりヘリウムの存在発見

1895 ヘリウムが鉱石中より発見される

世界中の低温研究家が液化一番乗りを目指す

貨物船一杯の鉱石を買い求めて焼きつぶして

360リットルのヘリウムガスを作成したOnnesが

一番乗りだった(Dewarは不純物固化で詰まった)



2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

永久気体の液化:

Dewarのその他の業績

1891 液体酸素の磁性を発見

1892 デュワー瓶の発明

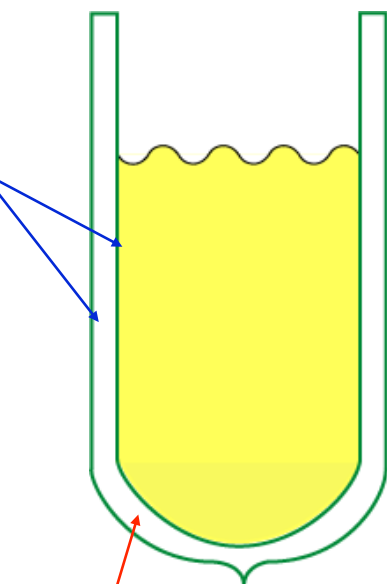
魔法瓶

二重壁真空ガラス瓶

1905 真空吸着剤(活性炭)の発見



ガラスの内面は銀メッキ(輻射を防ぐ)



真空(熱を伝える空気を抜く)

2A. 低温の歴史と技術

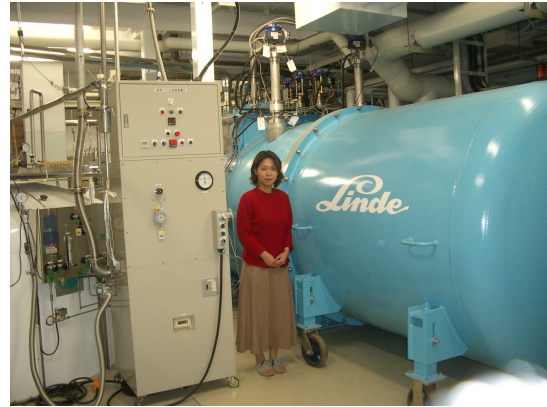
2A.1 低温開拓の歴史

永久気体の液化: 京都大学における液体ヘリウム供給

低温物質科学研究センター
国内最大級のHe液化機270L毎時(吉田) (+桂、宇治)

液体ヘリウム 20万L/年

液体窒素 20万L/年



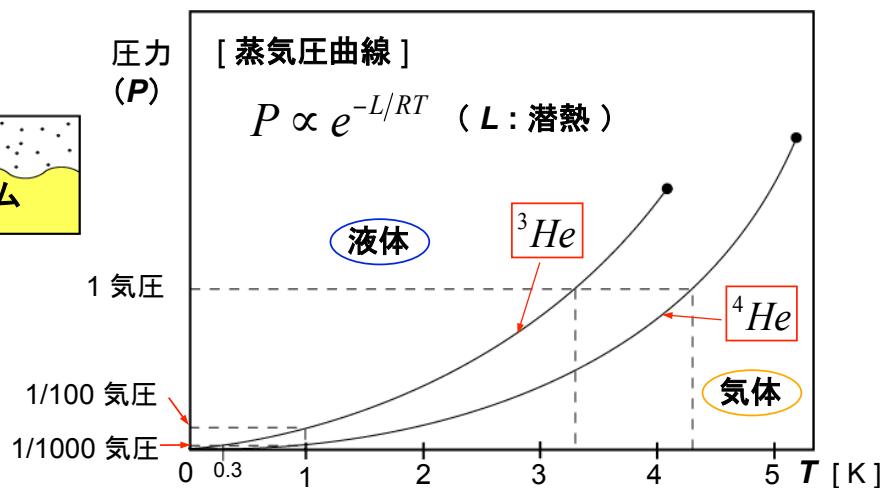
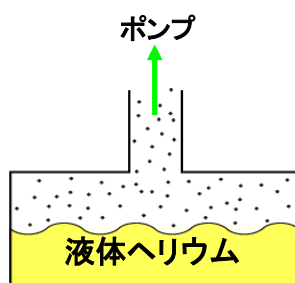
2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

永久気体の液化: 蒸発冷却により宇宙を越える!

1922 液体ヘリウムの蒸発冷却により1Kを突破 Onnes

蒸気圧のHeをポンプで強制蒸発させると
潜熱が奪われて、液体の温度が下がる



2A. 低温の歴史と技術

2A.1 低温開拓の歴史

1Kに到達したことによる発見：超流動・超伝導の発見

- 1911 Onnes 水銀の超伝導発見(1913ノーベル賞)
- 1938 Kapitza, Allen ヘリウムの超流動発見
 - F. London 超流動とボース凝縮の関連を指摘
 - Tisza 超流動二流体モデルの提案
- 1947 Landau 二流体モデルの完成(1962ノーベル賞)
- 1957 Bardeen, Cooper, Schrieffer 超伝導理論完成(1972ノーベル賞)

2A. 低温の歴史と技術

2A.2 絶対零度への挑戦

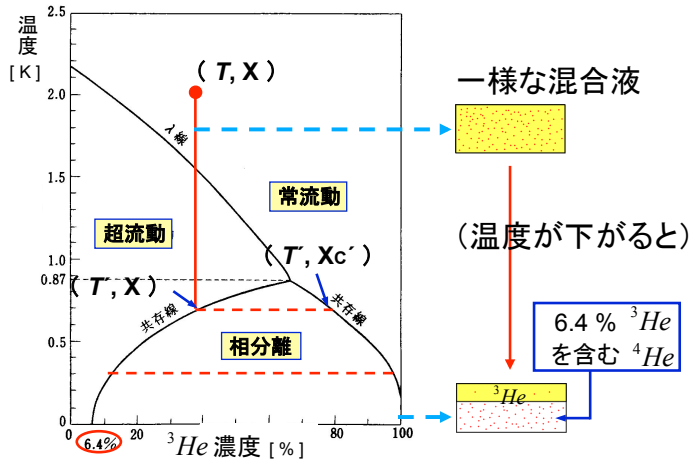
希釈冷凍：同位体 ^3He , ^4He の量子性の違いの利用

- 1933 安定同位体 ^3He の発見(0.1ppm)
 - 50年代後半から核開発の副産物として大量生産
 - ^3H の β 崩壊(半減期12.5年) $\gg$ ^3He
- 1951 H.London 希釈冷凍の原理を示唆
- 1962 H.London 希釈冷凍の詳細原理を提唱
- 1965 Taconis他 希釈冷凍機実現(0.22K)
- 1978 Frossatti ステップ熱交換器の発明 数mKに到達
- 1999 Lancaster大 最低温度1.5mK

2A. 低温の歴史と技術

2A.2 絶対零度への挑戦

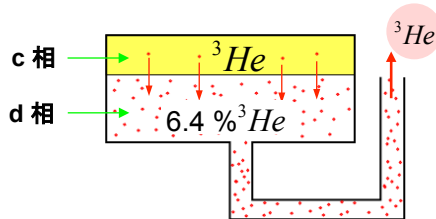
希釈冷凍: 同位体 ^3He , ^4He の
量子性の違いの利用



$T \sim 0 \text{ K}$ で 6.4 % ^3He を含む
 ^4He 液体は？

- ^4He は完全に超流動
→ Mechanical Vacuum (機械的真空)
- 6.4 % ^3He は希薄な気体 (Mechanical Vacuum 中に浮いている ^3He)

「希釈冷凍機の原理」



液体 ^3He から気体 ^3He に蒸発
(蒸気圧は 6.4 % ^3He で一定)

↓
冷却が起こる

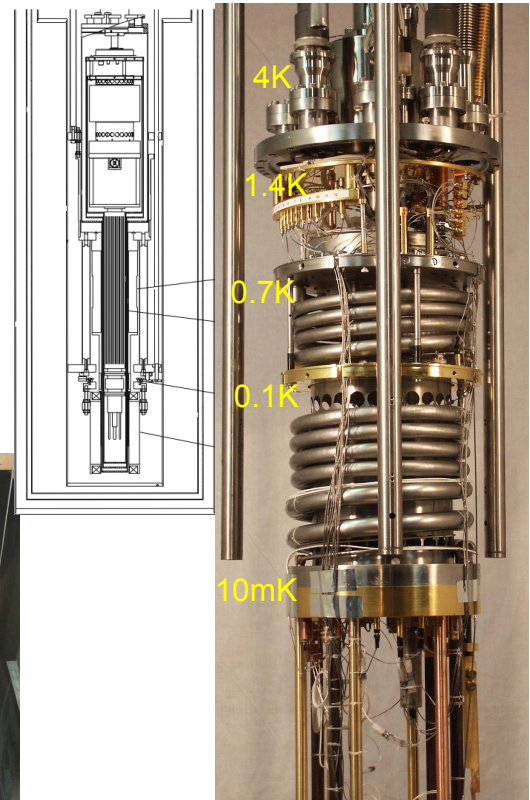
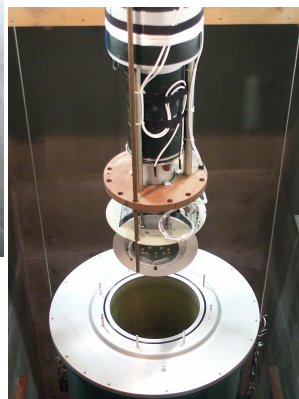
2A. 低温の歴史と技術

2A.2 絶対零度への挑戦

希釈冷凍機の実例: 京都大学



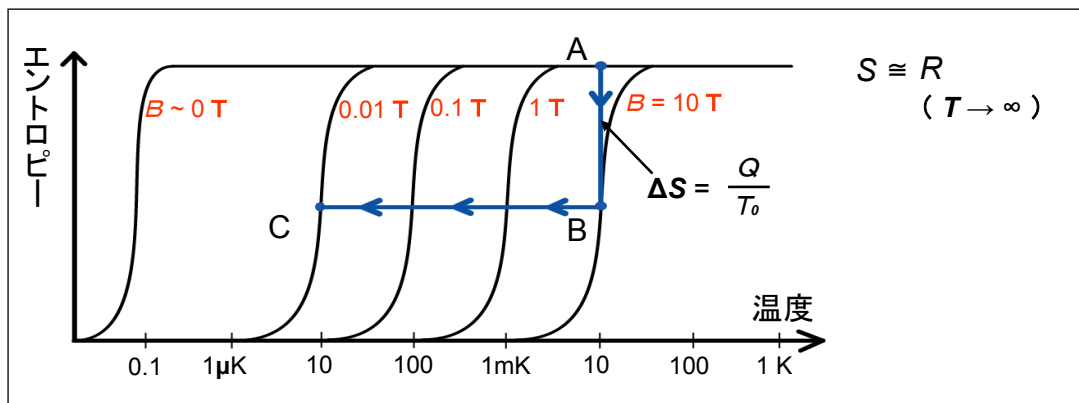
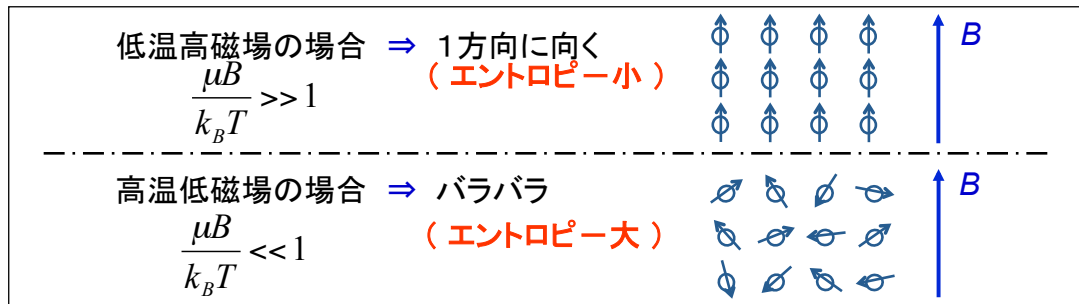
デュワー瓶⇒



2A. 低温の歴史と技術

断熱消磁：原子磁性の利用

2A.2 絶対零度への挑戦



2A. 低温の歴史と技術

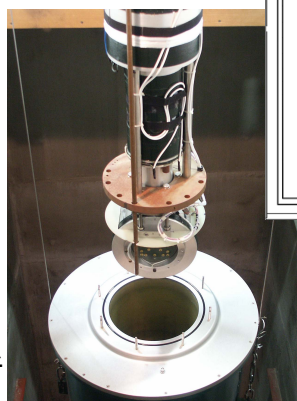
断熱消磁：
原子磁性の利用

2A.2 絶対零度への挑戦

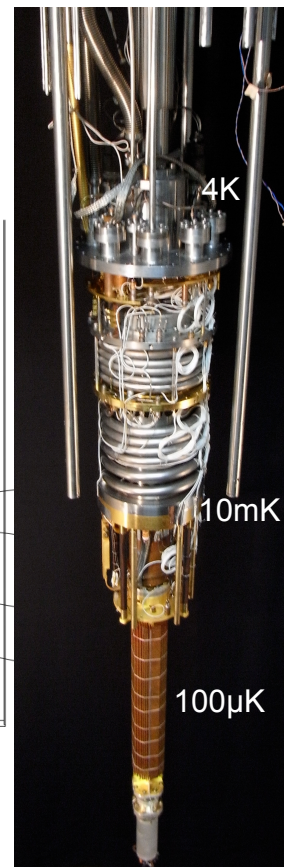
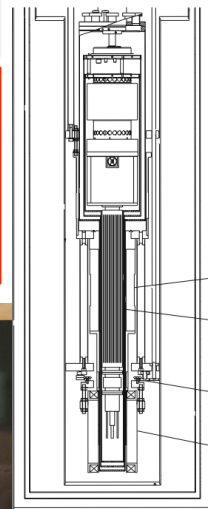
超低温MRI撮影装置 **世界唯一**
 (京都大学低温物質科学研究センター)



最低温度
 0.0003K
 (宇宙の温度の
 1万分の1)



国内8カ所、世界で22カ所



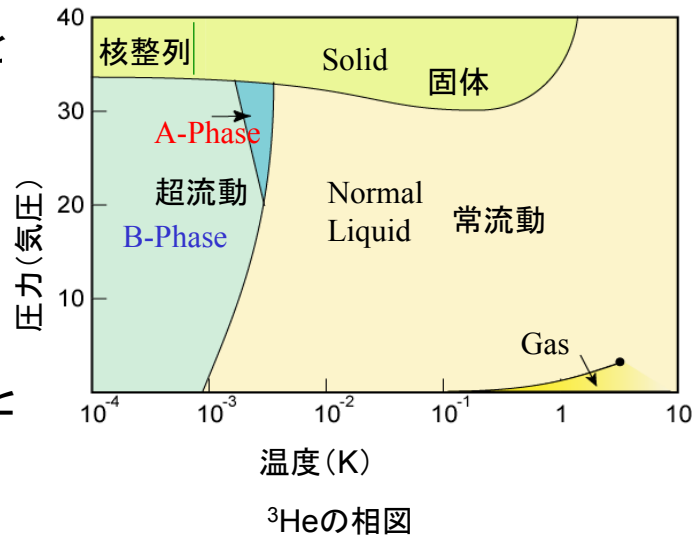
不思議な物質：固体ヘリウム3

圧縮することでやっと結晶化

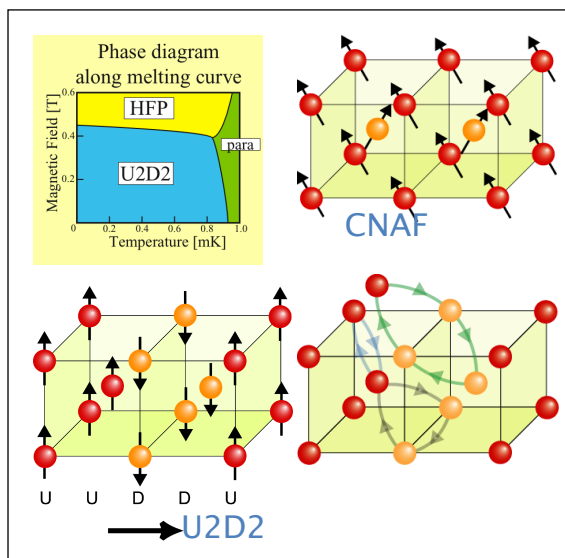
液体³Heはフェルミ縮退
($T < 0.3\text{K}$)によりエントロピー
を失うが、固体³Heはスピンの
自由度を反映した大きな
エントロピーを持つ

容器を圧縮して固体を作ると
冷える
(ポメランチュック冷却)

$$S_{\text{solid}} > S_{\text{liquid}} \rightarrow \frac{\partial P_M}{\partial T} < 0$$



量子揺らぎと直接多体交換相互作用



固体ヘリウムの結晶中で
量子揺らぎ(原子のぼやけ)のため
隣り合った複数個の原子が
場所を頻繁に入れ替わる

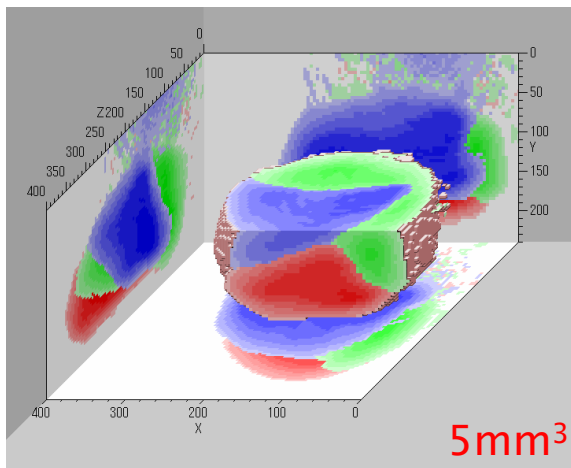
『直接多体交換』

⇒ $0.0009\text{K}(0.9\text{mK})$ 以下で
規則正しい磁気構造(反強磁性)

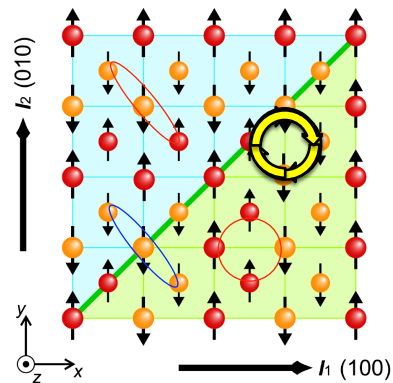
磁気共鳴(NMR)の共鳴周波数の違いから
U2D2の異方軸の向きを決めることができる

異なる異方軸を持つ3種類の部分(磁区)が共存

固体ヘリウム3 U2D2相のMRI像



T=500 μ K ; 世界一クールなMRI像！



境界面の方向は
4原子の交換により
安定となる向き

さいごに

1回生へのメッセージ

大学においてははじめに学習すること:教科書を順序よく学習するだけではなく、広範囲の知識をつまみ食いしてでも貪欲に得よ

科学する心、不思議を探究する心を失わないように

大学教員とのふれあいは講義の外でも可能
受け身にならずにアタックせよ！

レポート(石田・佐々木・池田):6月下旬にまとめて出す

参考文献: 低温技術(小林・大塚著、東京大学出版会)
低温「ふしぎ現象」小事典(講談社ブルーバックス)