

低温科学A H30 (2018)年度 前期

低温科学A 前期木曜4限 402室 (低温科学全般)

1. 低温科学入門、超伝導現象 (石田)

4/12、4/19、4/26、5/10

2. 超流動現象、**低温の歴史と技術** (佐々木)

5/17、5/24、5/31 * 5/18 理物 ローレンツ祭

3. 低温科学と量子力学 (金属中の電子、超伝導、超流動) (柳瀬)

6/7、6/14、6/21

4. 低温分光 (レーザー冷却など) (高橋)

6/28、7/5、7/12 * 7/19 実験室見学

低温科学B 後期金曜5限 201室 (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. 物質の超伝導(有機超伝導) (前里)

3. 超伝導応用I (超伝導磁石・核磁気共鳴MRIへの応用) (竹腰)

4. 超伝導応用II (エネルギー貯蔵、電力輸送、発電への応用) (白井)

5. 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)

6. 磁性I (強磁場と低温物性) (植田)

7. 磁性II (鉄の強磁性の起源と磁性体のデバイス応用) (中村)

3. 低温の歴史と技術

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:075-753-3755)

sasaki@scphys.kyoto-u.ac.jp

3. 低温の歴史と技術

3.1 低温開拓の歴史

3.2 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。復習にご利用下さい。

3. 低温の歴史と技術

3.1 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)



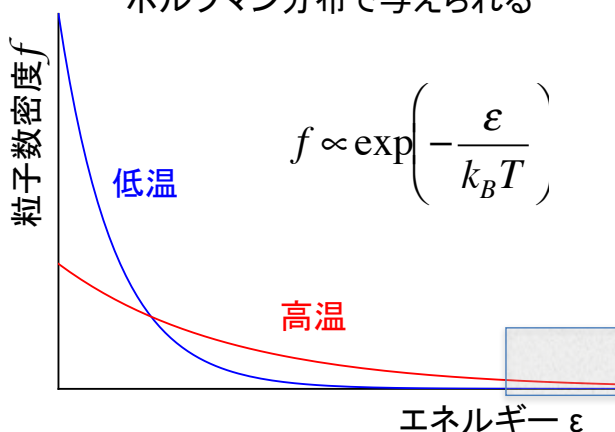
3. 低温の歴史と技術

3.1 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

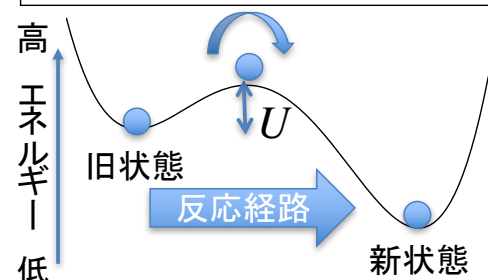
$$v \propto \exp\left(-\frac{U}{k_B T}\right)$$

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



3. 低温の歴史と技術

3.1 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？

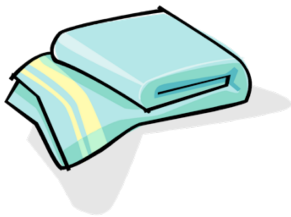
⇒ 答えがNoであることは今後の講義で学習するが、熱揺らぎに変わって量子力学的なぼやけ(量子揺らぎ)が見えてくる

どうやって絶対零度に近づくのか、、、

3. 低温の歴史と技術

3.1 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。

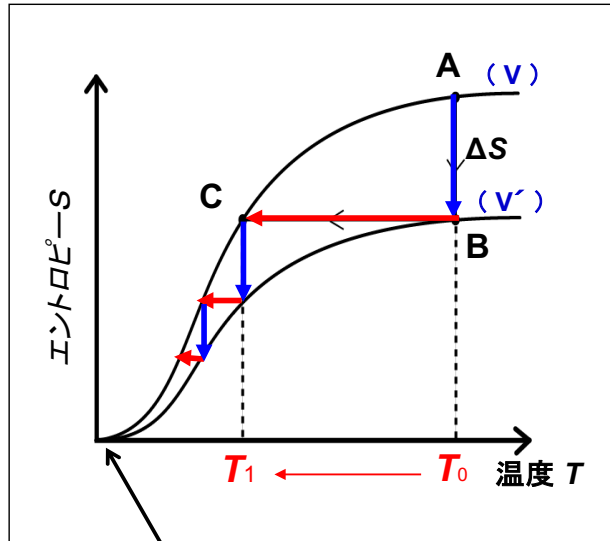
アルコールが蒸発する時に潜熱(気化熱)を腕から奪っていくので、腕が冷える。



3. 低温の歴史と技術

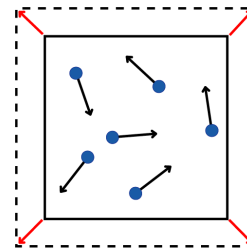
3.1 低温開拓の歴史

冷却の基本原則2: 断熱膨張



熱力学第3法則により $T=0$ で $S=0$

$T=0$ に近づけるが到達することはない



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)

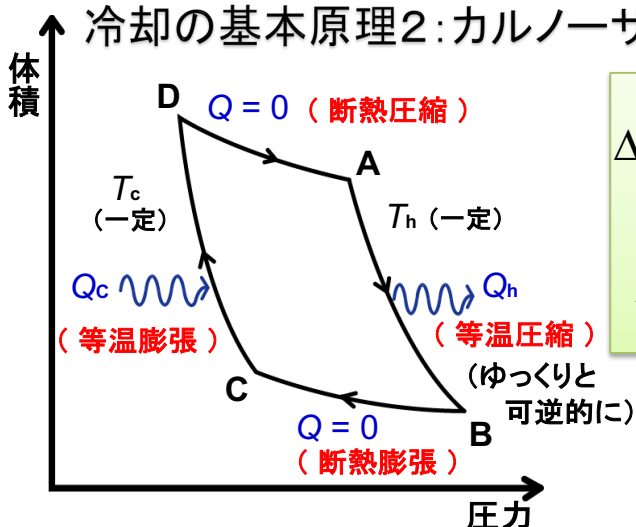
周囲からの熱の出入を断って膨張

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

3. 低温の歴史と技術

3.1 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)



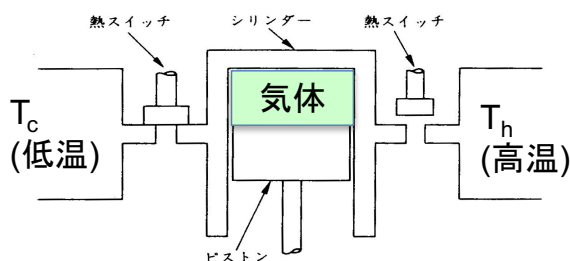
$$\begin{aligned} \Delta S_{A \rightarrow B} &= \frac{-Q_h}{T_h} (Q_h > 0) & \Delta S_{B \rightarrow C} &= 0 \\ \Delta S_{C \rightarrow D} &= \frac{Q_c}{T_c} (Q_c > 0) & \Delta S_{D \rightarrow A} &= 0 \end{aligned}$$

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

であるから

$$Q_c = \frac{T_c}{T_h} Q_h \text{ の冷凍力を発揮}$$

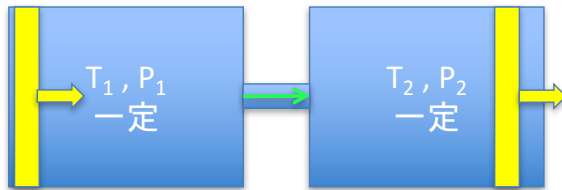
欠点: $T_c \rightarrow 0$ で $Q_c \rightarrow 0$



3. 低温の歴史と技術

3.1 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)

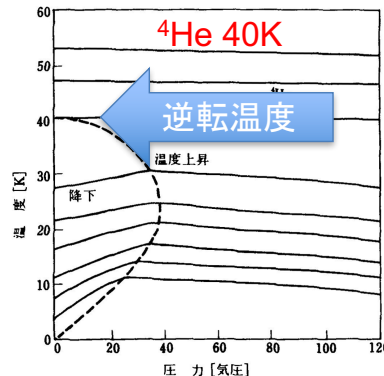
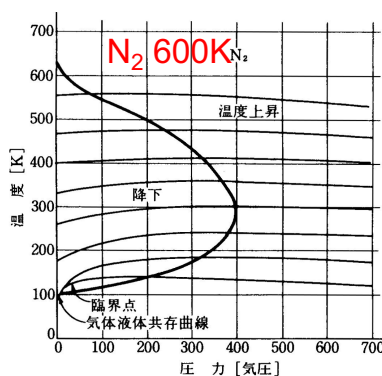


内部エネルギー変化=気体のした仕事

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

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)



3. 低温の歴史と技術

3.1 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℃)に成功

Cailletet(フランス); 液化エチレン-110℃で予冷

200気圧から膨張

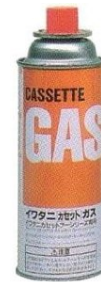
Pictet(スイス); 液化SO₂-10℃, 液化CO₂-80℃

の2段予冷

1883 液化酸素、窒素(77K=-196℃)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
(室温でも
8.5気圧で液化)

液化天然ガス
(メタンガス)
111K=-162℃

3. 低温の歴史と技術

3.1 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)



3. 低温の歴史と技術

3.1 低温開拓の歴史

永久気体の液化:

Dewarのその他の業績

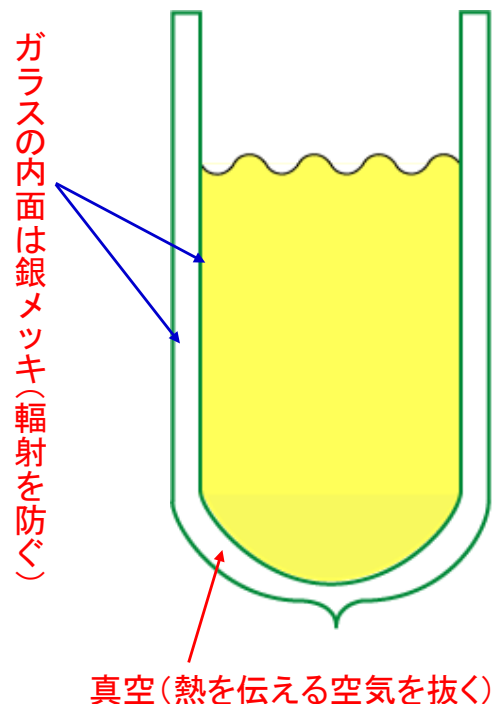
1891 液体酸素の磁性を発見

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



3. 低温の歴史と技術

3.1 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

環境安全保健機構 低温物質管理部門
(旧 低温物質科学研究センター)
国内最大級のHe液化機300L毎時
(吉田) (+桂、宇治)

液体ヘリウム 20万L／年

液体窒素 40万L／年



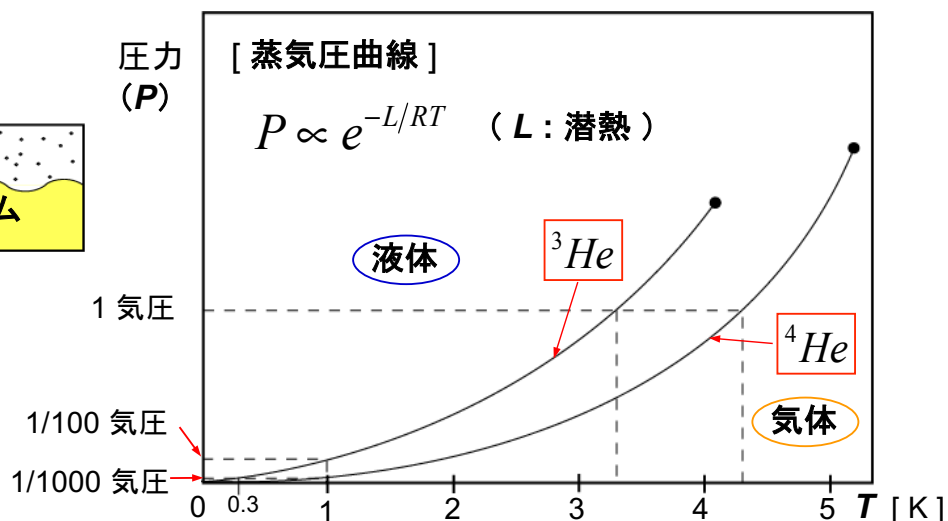
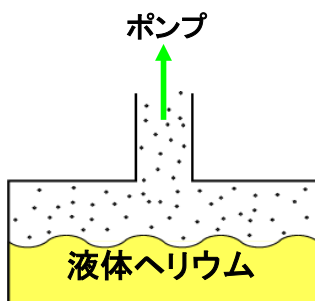
3. 低温の歴史と技術

3.1 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



3. 低温の歴史と技術

3.1 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

- 1908 Onnes 蒸発冷却で超流動ヘリウムを作ったが発見せず
- 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)

3. 低温の歴史と技術

3.2 絶対零度への挑戦

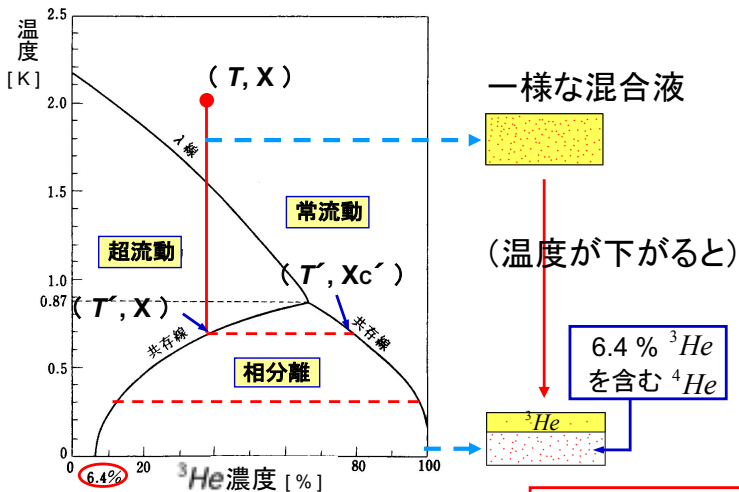
希釈冷凍: 同位体 ^3He , ^4He の量子性の違いの利用

- 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

3. 低温の歴史と技術

3.2 絶対零度への挑戦

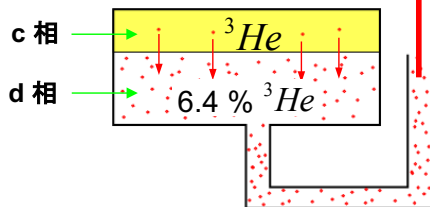
希釈冷凍: 同位体 ^3He , ^4He の量子性の違いの利用



$T \sim 0 \text{ K}$ 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」



1Kで蒸発させると ^3He だけが蒸発

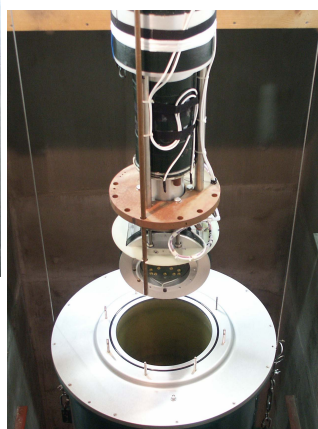
液体 ^3He から気体 ^3He に蒸発
(蒸気圧は 6.4 % ^3He に相当)

冷却が起こる(希釈冷凍)

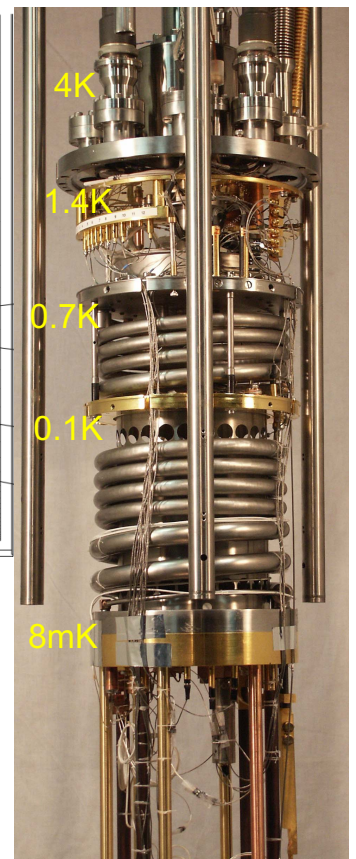
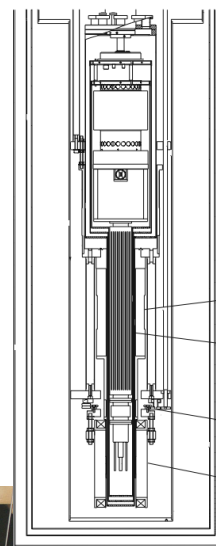
3. 低温の歴史と技術

3.2 絶対零度への挑戦

希釈冷凍機の実例: 京都大学



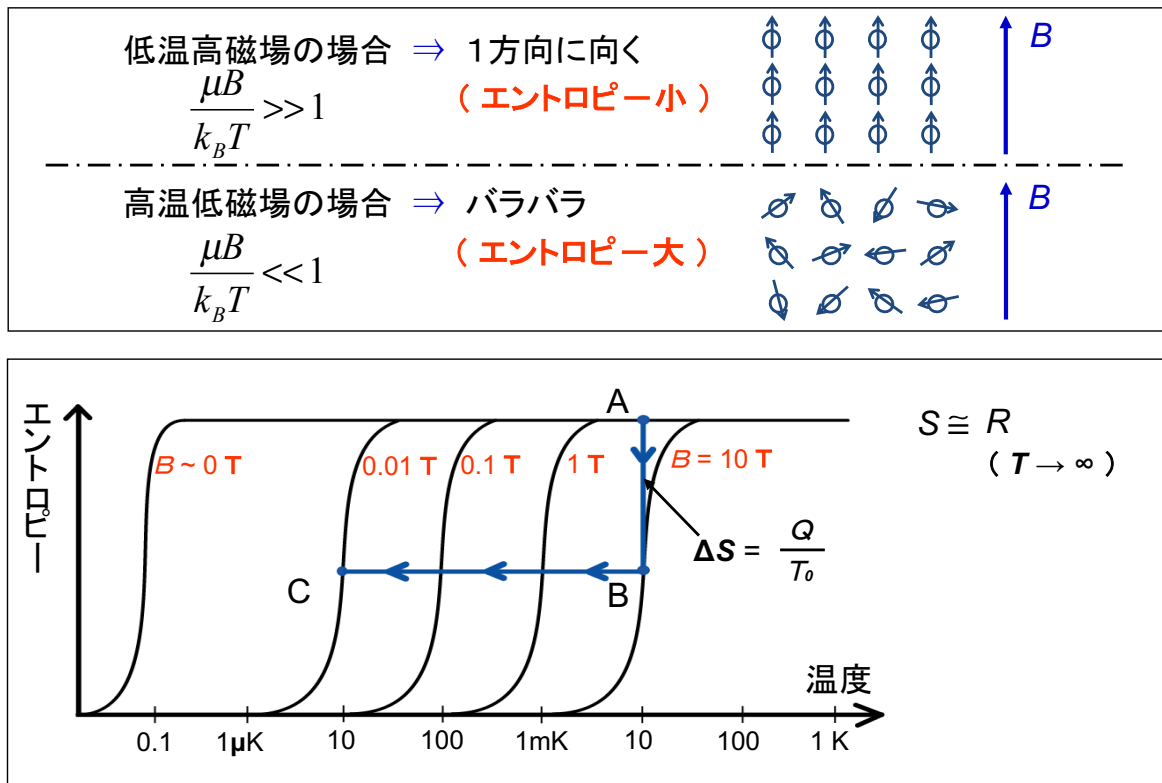
デュワー瓶⇒



3. 低温の歴史と技術

断熱消磁: 原子磁性の利用

3.2 絶対零度への挑戦



3. 低温の歴史と技術

断熱消磁:
原子磁性の利用

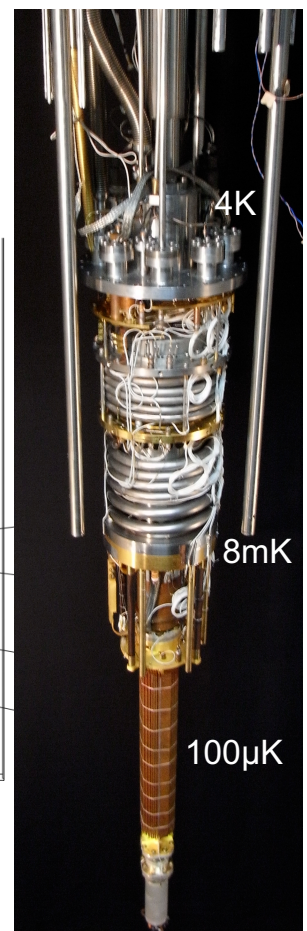
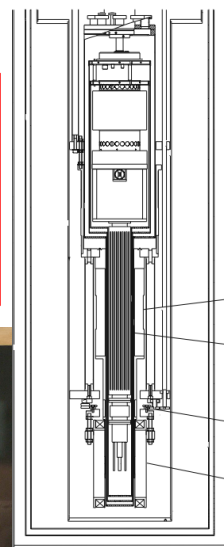
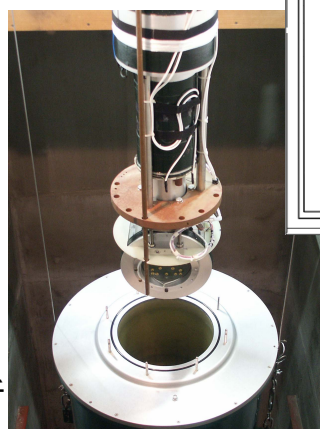
3.2 絶対零度への挑戦

超低温MRI撮影装置 **世界唯一**
(京都大学 低温物理学研究室)



国内8力所、世界で22力所

最低温度
0.0001 K
(宇宙の温度の
3万分の1)

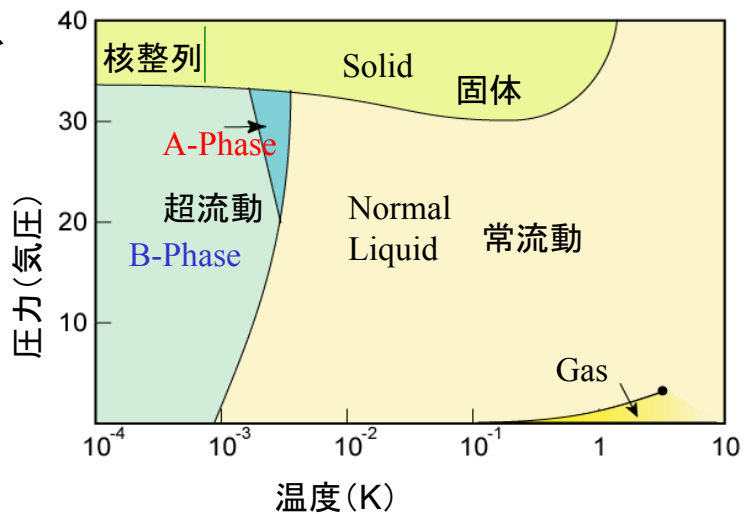


不思議な物質：ヘリウム3

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

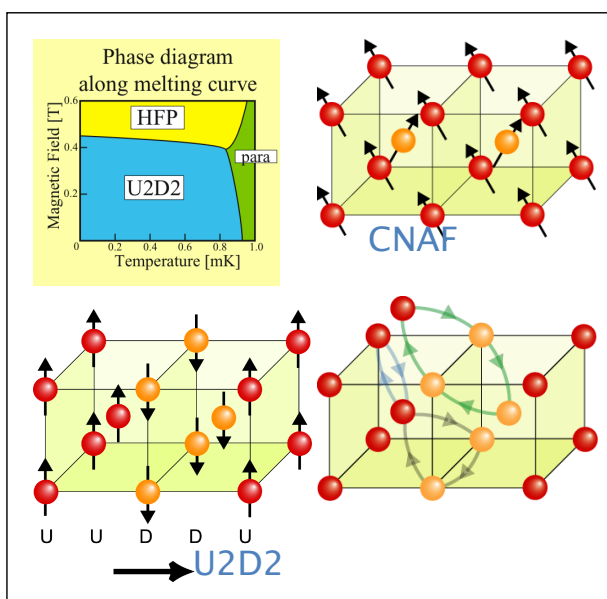
容器を圧縮して固体を作ると冷える
(ポメランチュック冷却)



³Heの相図

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

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

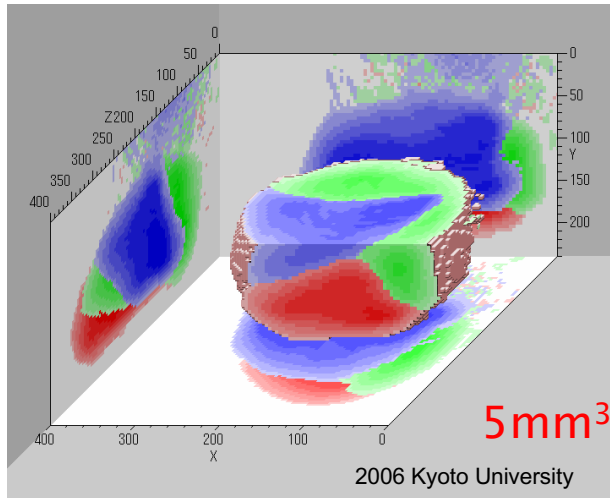
『直接多体交換』

⇒0.0009K(0.9mK)以下で
規則正しい磁気構造(反強磁性)

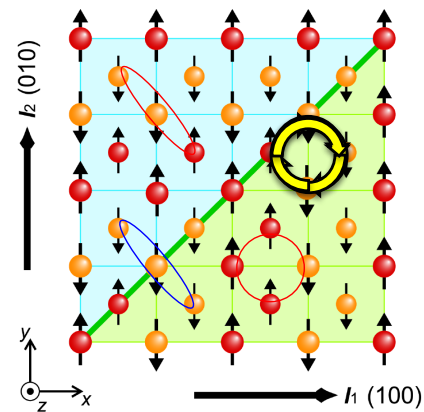
磁気共鳴(NMR)の共鳴周波数の違いから
U2D2の異方軸の向きを決めることができる

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



$T=500\mu\text{K}$; 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

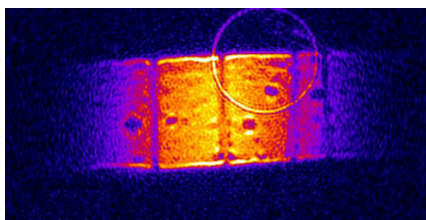
超流動ヘリウム3中のカイラルドメイン

SAPS physics

Synopsis: Imaging Domains in Superfluid Helium

May 17, 2018

An MRI imaging technique reveals a structure of chiral domains in a slab of superfluid helium-3.



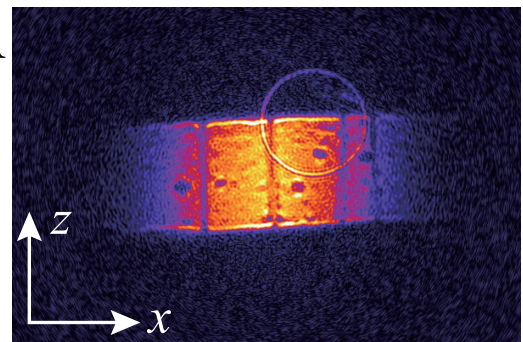
J. Kasai et al., Phys. Rev. Lett. (2018)

Magnetic resonance imaging (MRI) is best known as a medical imaging tool, but it can also be applied to visualize microscopic features of quantum materials like superfluids and superconductors. A high-resolution MRI technique has now allowed Yutaka Sasaki of Kyoto University, Japan, and colleagues to uncover a previously hidden structure of chiral domains in superfluid helium-3 (^3He). The result suggests that MRI might be used to visualize vortices and other topological structures in a variety of quantum materials.

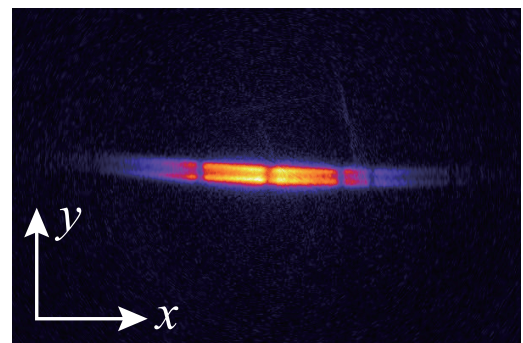
When ^3He is cooled below a few millikelvin, it becomes a superfluid—a fluid that can flow with zero viscosity. Previous experiments have led physicists to suspect that as ^3He enters this phase, it breaks up into macroscopic domains. Each domain contains superfluid atoms with a common angular momentum, so that there is a handedness, or chirality associated with the domain. No one had yet seen these domains, but doing so would help physicists test their theoretical understanding of not only superfluidity but also related forms of superconductivity.

Sasaki's team investigated a thin film of superfluid ^3He at 2 mK with an MRI technique that they previously developed to acquire images of ultracold quantum condensates with $10\text{ }\mu\text{m}$ spatial resolution. Analysis of the MRI data showed that the sample was divided into two or more

A



B



Kasai 他(京都大学)の大成果
PHYSICAL REVIEW LETTERS
120, 205301 (2018)

さいごに

特に1回生の皆さんへのメッセージ

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！

チャンス

理・物理 ローレンツ祭：来年5月17日（金）晩は懇親会
& 実験室見学（当講義7月19日に開催予定）

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）