

絶対零度への道とその風景

東京大学 大学院理学系研究科・低温センター
福山 寛

講義内容

1. 絶対零度と熱力学温度
2. さまざまな冷却手段
3. 超流動と超伝導
4. 超低温物理学の最前線
5. 負の温度

参考文献

「極低温の世界」
長岡洋介 著
(科学ライブラリ、岩波書店)

「極低温の世界」
ユージン・M・リフシッツ 著
(現代物理の世界-V、講談社)

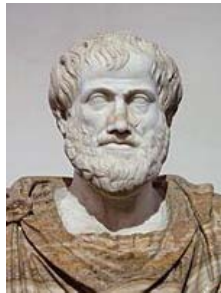
「超低温の獲得と物理」
福山 寛 著
(物理の世界・第67巻、岩波書店：近刊)



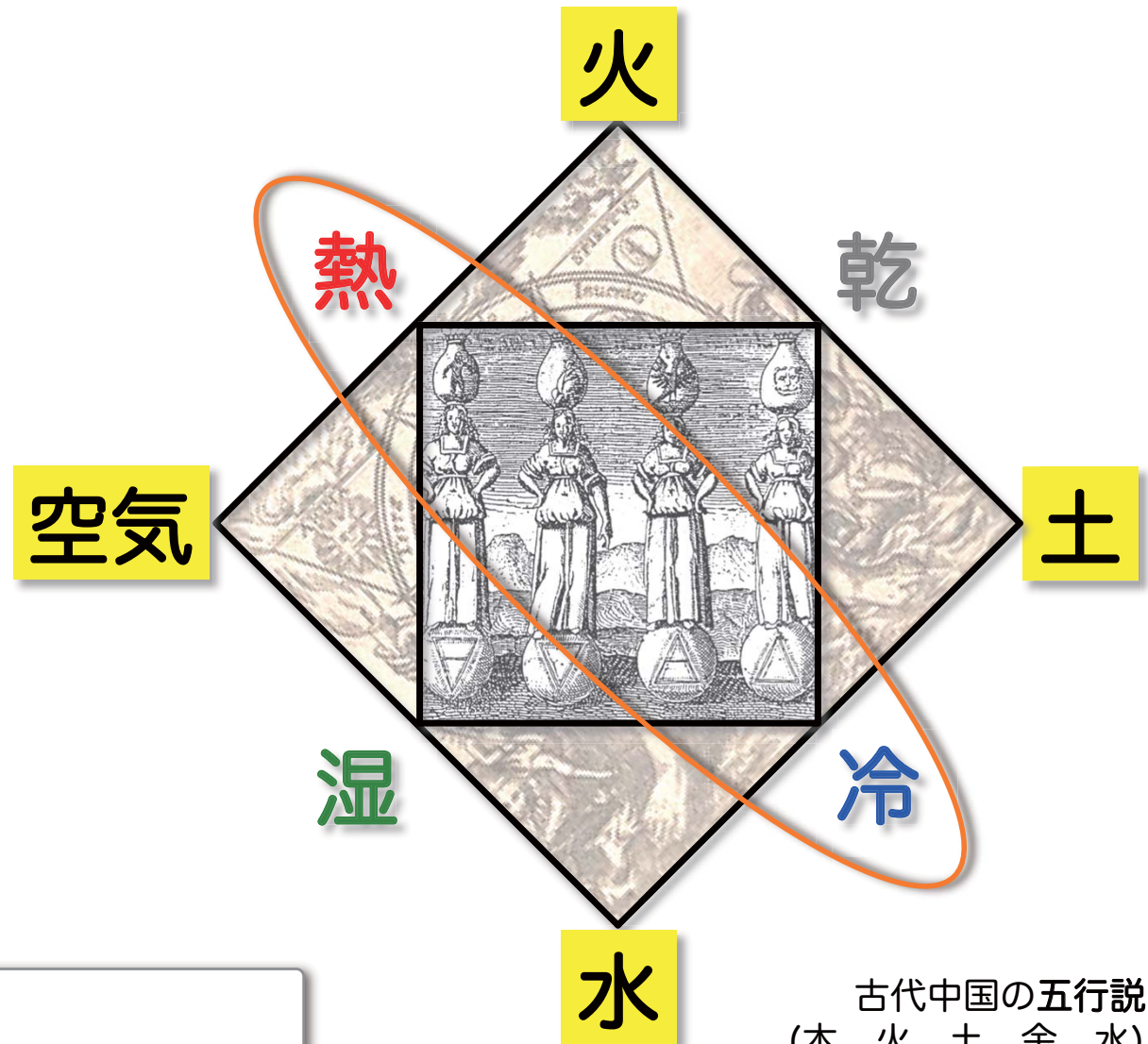
冷熱は古代からもっとも基本的な性質

古代ギリシャの四大元素説

万物は、
四大元素 (火、空気、水、土)
から成り立ち、それらは、
四大性質 (熱、冷、湿、乾)
の組み合わせから成り立つ



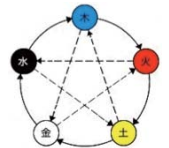
アリストテレス
(BC384~BC322)



現代物理学の基本物理量：

質量、長さ、時間、電流、温度、物質量、光度

古代中国の五行説
(木、火、土、金、水)



熱力学の第1法則

熱量 Q と仕事 W は等価

熱の仕事等量：

$$J = W/Q = 4.186 \text{ J/cal}$$



ジェームス P. ジュール
(1818-1889)

U ：内部エネルギー (物質内部のミクロな運動や状態のエネルギーの総和)

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta Q + \Delta W \\ &= T\Delta S + \Delta W \end{aligned}$$

$\Delta W = -P\Delta V$ (気体、液体),
 $-M\Delta H$ (磁性体), etc.

S ：エントロピー (ミクロな状態数の対数 \propto 対応する状態が実現する確率)

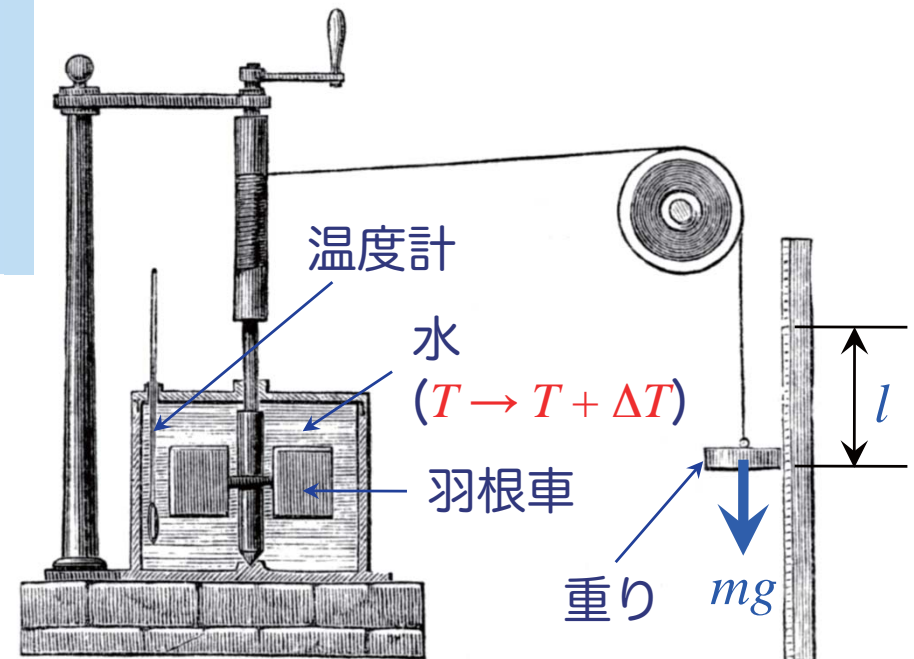
T ：熱力学温度

$$W = mgl$$

m ：重りの質量
 g ：重力加速度

$$Q = C\Delta T$$

C ：水の熱容量
 ΔT ：水温の上昇



熱の本質はエントロピー

- 二つの物体を接触させると、熱量 Q は高温の物体から低温の物体に向かって流れ、やがて両者の温度は同じになる (熱平衡状態の存在：熱力学第0法則)。

$$\begin{aligned} \text{温度} &\Leftrightarrow \text{圧力 (示強変数)} \\ \text{エントロピー} &\Leftrightarrow \text{体積 (示量変数)} \end{aligned}$$



- この過程で、系の全エントロピー (S) は増大する (熱力学第2法則 ← 経験則)。

$$\Delta S \geq \frac{\Delta Q}{T}$$

※等号は準静的な可逆過程
(無限小温度差) のときのみ

- 熱平衡状態にある孤立したマクロな物体では、ミクロな状態は全て同じ確率で実現し (等重率の原理)、その状態数 W が最大の状態が実現する (エントロピー最大)。

$$S = k_B \ln W$$

k_B : **ボルツマン定数** ($= 1.380\,6488(13) \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$)

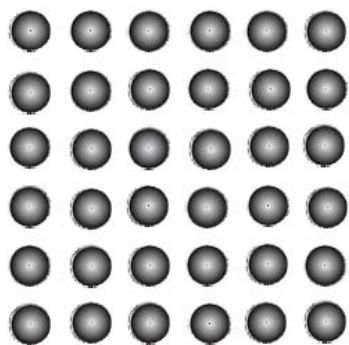
※ \ln は底が $e (= 2.718\dots)$ の対数 (\log_e)



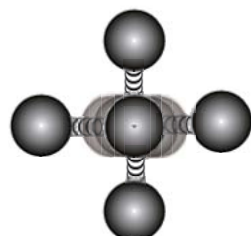
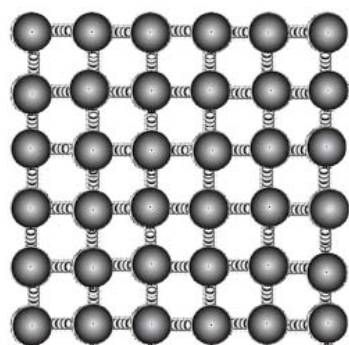
ルートヴィヒ E. ボルツマン
(1844-1906)

熱の本質は粒子の乱雑な運動

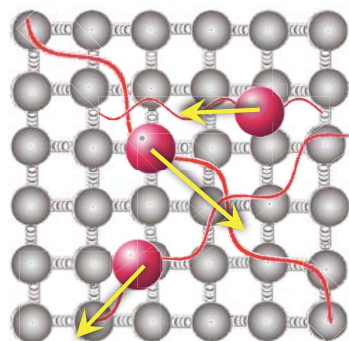
$T = 0$ 固体 $T \neq 0$



絶対零度は格子振動が全て止まった最低エネルギー状態と思われる

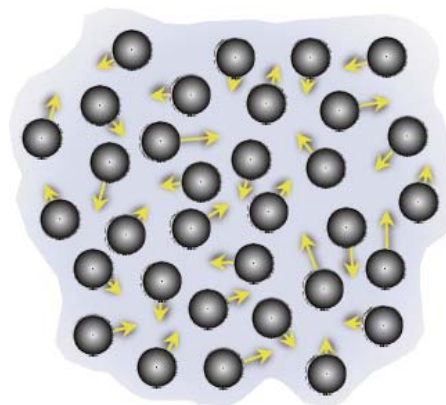


格子振動

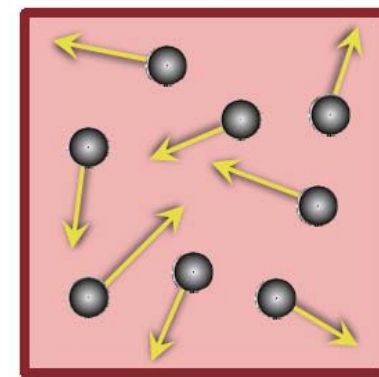


格子振動の波が多数立っており、それを量子化した粒子 (フォノン) の気体状態と見なせる。

液体



気体



理想気体の温度 T はその内部エネルギー K (分子の運動エネルギー) と比例関係にある。

$$K = \frac{3}{2} k_B T$$

$\overline{v^2}$: 分子速度の2乗平均
 m : 分子質量

気体分子運動論より
$$K = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$$

➡ 理想気体は温度計に使える

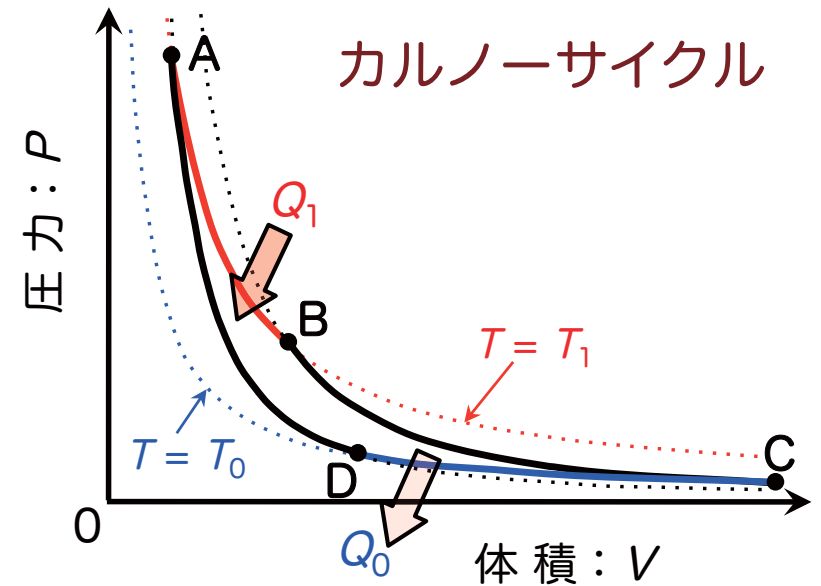
熱力学温度目盛の決め方

熱力学温度 (絶対温度) 目盛は、**可逆カルノーサイクル**において次式で定義される温度目盛：

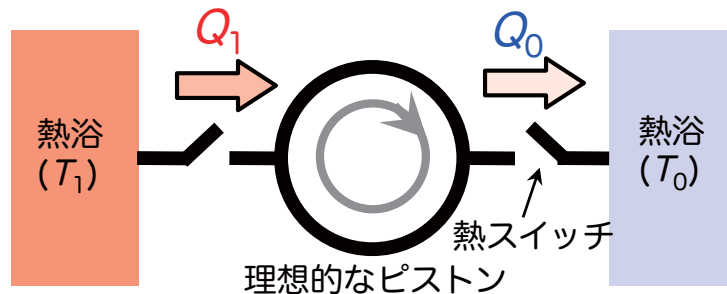
$$\frac{Q_0}{T_0} + \frac{Q_1}{T_1} = 0$$

T_0 : 基準温度 / 温度定点 (例. 水の3重点)

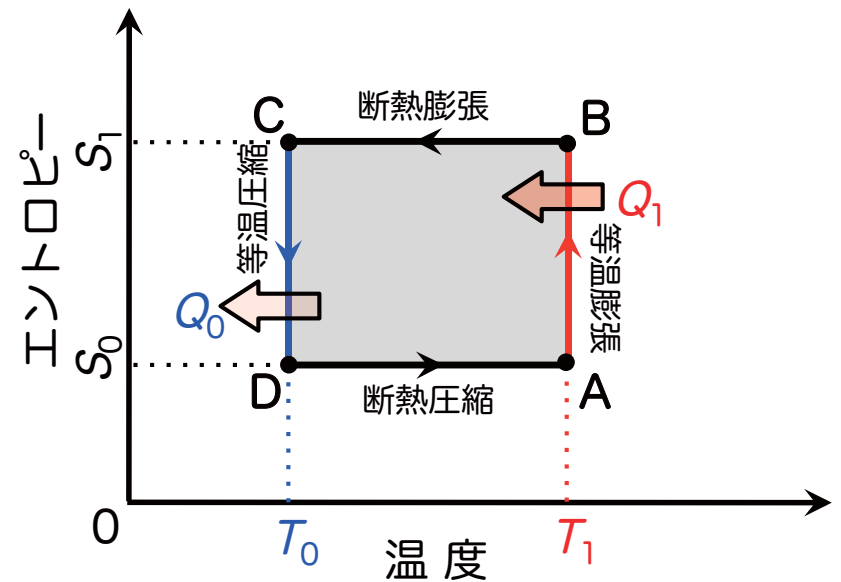
Q_0, Q_1 : 外界とやり取りする熱量 (観測値)



理想気体を作業物質とする
可逆カルノーサイクル



ニコラ L. S. カルノー
(1796-1832)



絶対零度と温度目盛

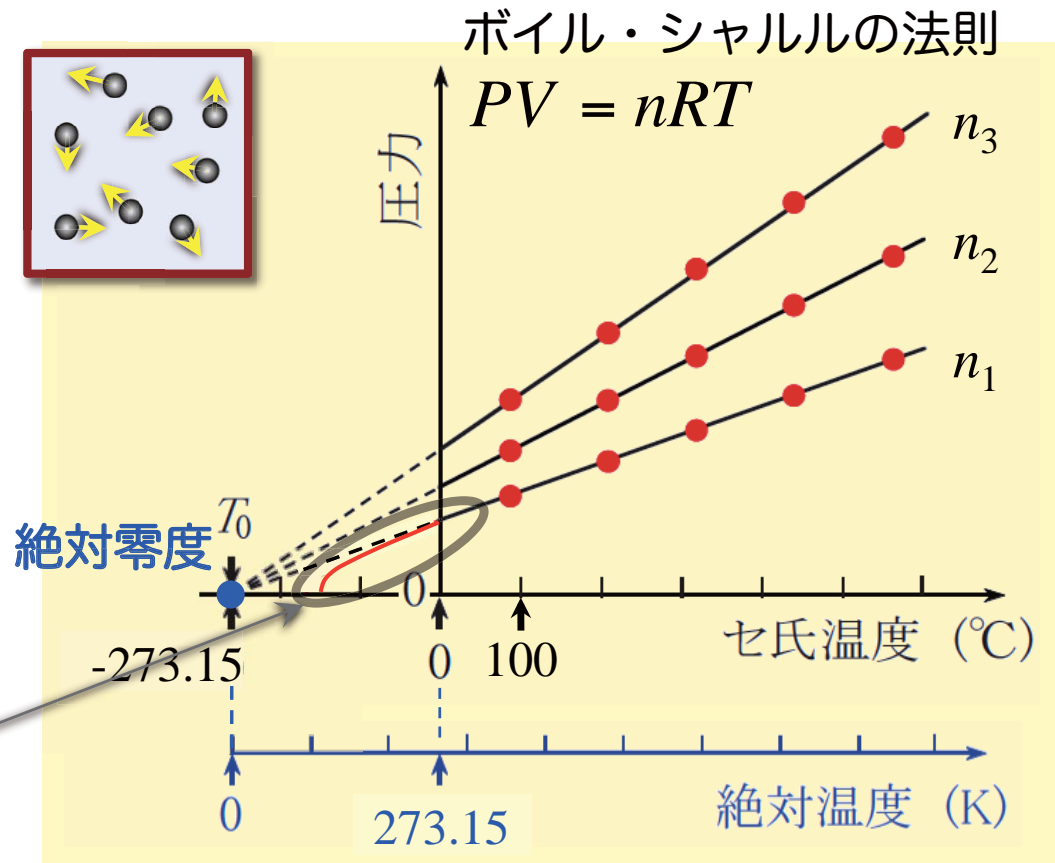
気体温度計 (ヘリウム)

- 一定体積の容器に閉じ込めたさまざまなモル数の理想気体の圧力は、同じ一つの温度でゼロになるよう振る舞う。

→ 絶対零度の存在

- 実在気体は低温で直線からずれる。

→ 分子間相互作用の存在



セ氏温度目盛 (°C) : 水の氷点を0、沸点を100°Cとする

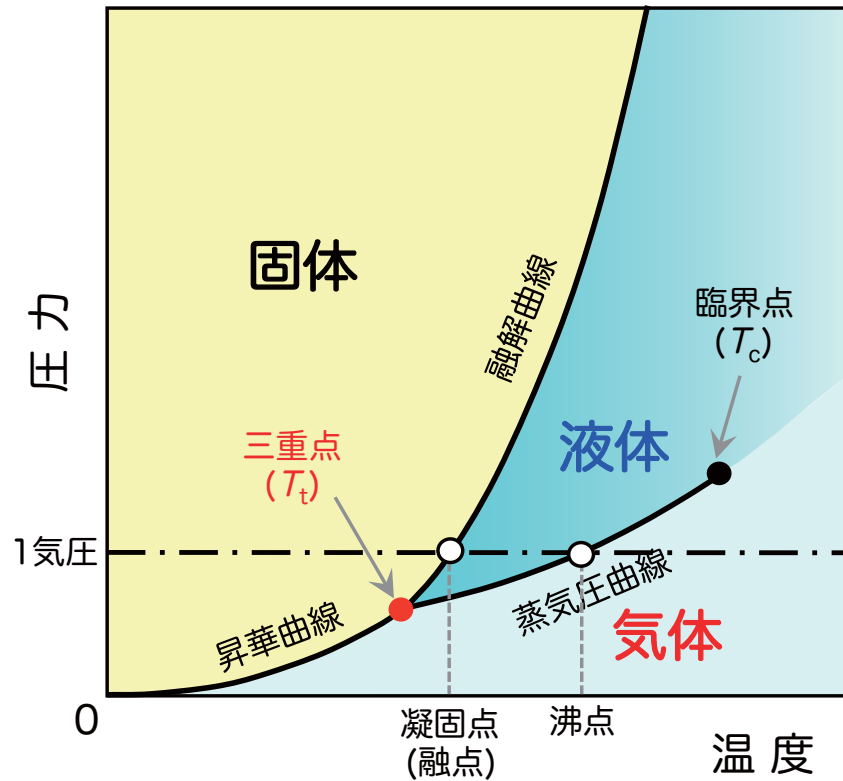
絶対温度目盛 (K) : 絶対零度を0、水の三重点を273.16Kとする

$$\Delta T = 1^\circ\text{C} = 1 \text{ K}$$

ただし、 $\Delta T = 1^\circ\text{F}$ (華氏温度) = $5/9 \text{ K}$

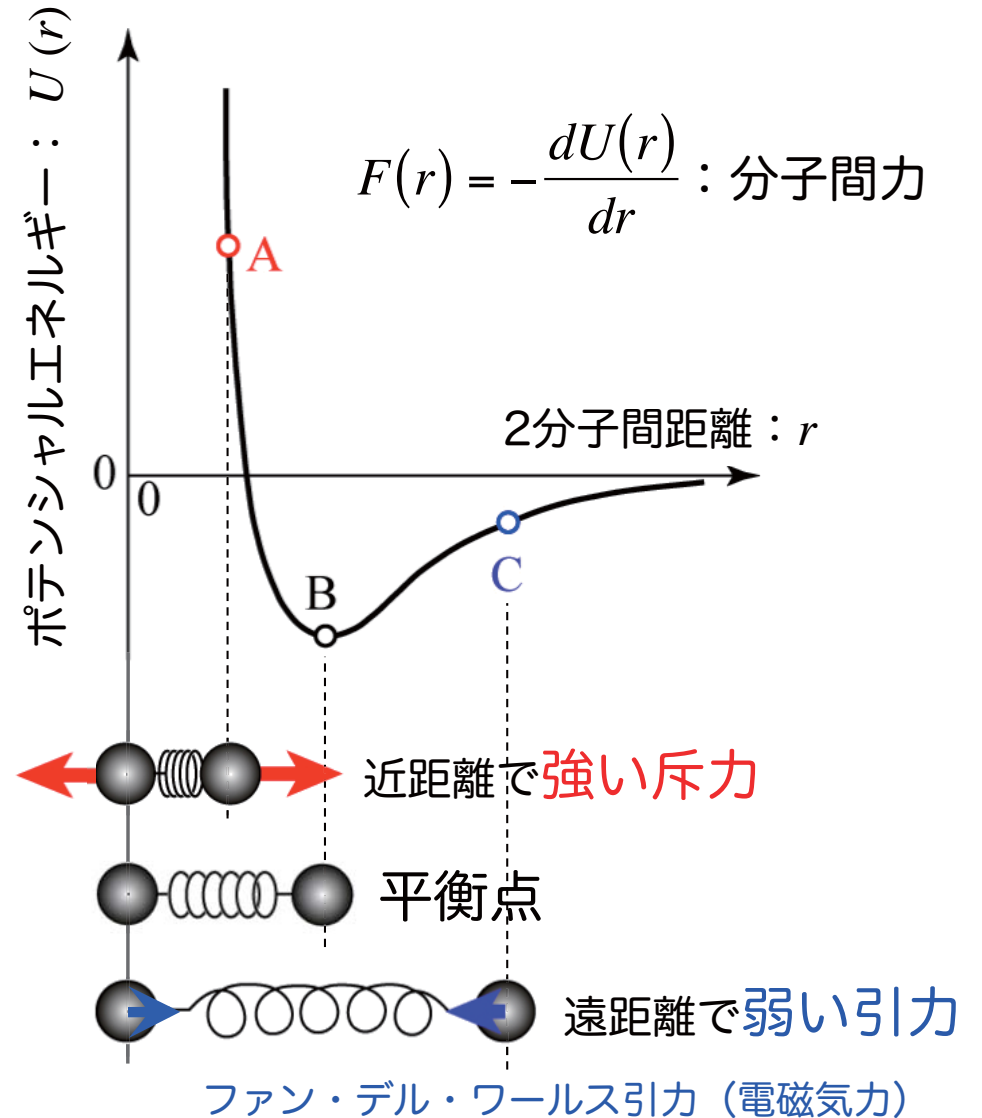
相転移：低温にすると物質はその状態を変える

物質の状態相図



分子間引力のため、温度を下げると
気体→**液体**→**固体**と相転移する。

分子 (原子) 同士は引き合っている

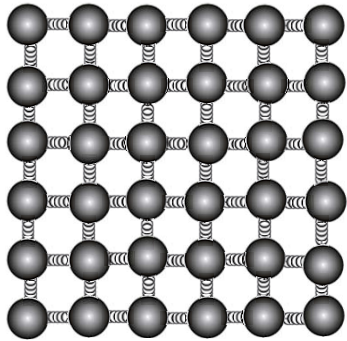


状態 (相) の違いは**対称性**で区別する

眺める角度によって違って見える

→(並進)**対称性**が破れている

固体

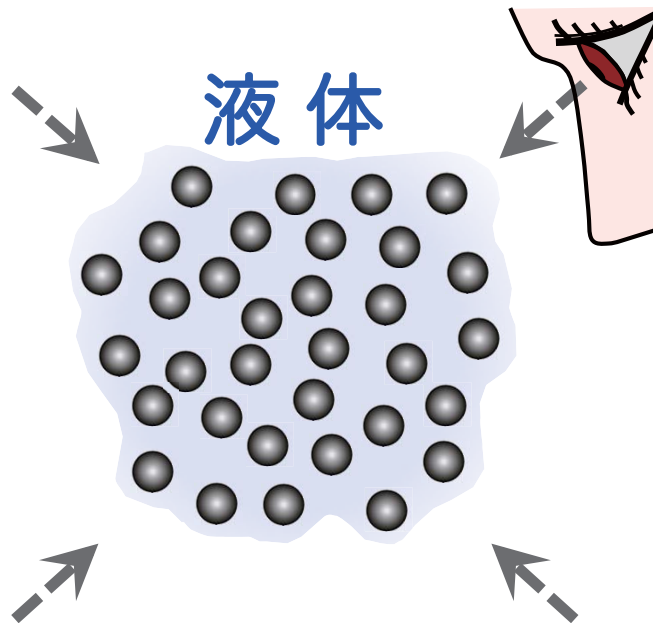


※この場合、4回対称性をもつ

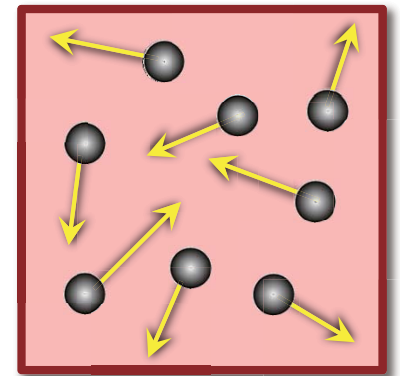
どこから眺めても同じに見える

→(並進)**対称性**が破れていない

液体



気体



気体と液体の**対称性**は同じ
違いは密度 (自己凝集するかしないか)

対称性が低い

対称性が高い

実在気体の状態方程式

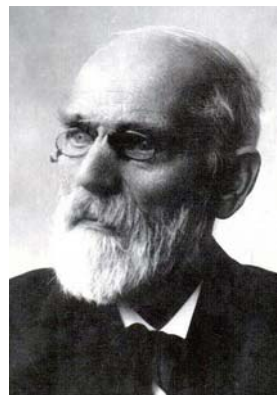
理想気体の状態方程式： $P = \frac{k_B T}{V}$

に分子間に働く引力と斥力を取り入れると
実在気体の気-液相転移をうまく説明できる。

ファン・デル・ワールスの状態方程式

$$P = \frac{k_B T}{V - b} - \frac{a}{V^2}$$

$a \propto \epsilon \sigma^3$: 引力項
 $b \propto \sigma^3$: 斥力項



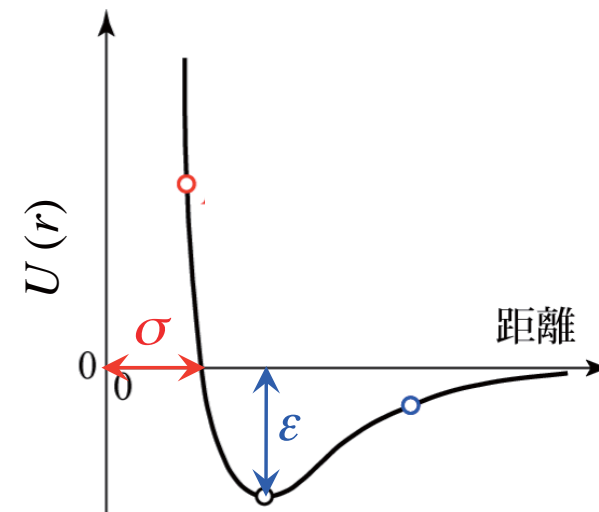
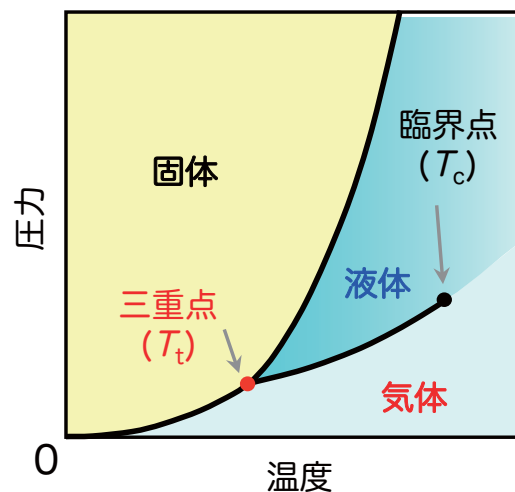
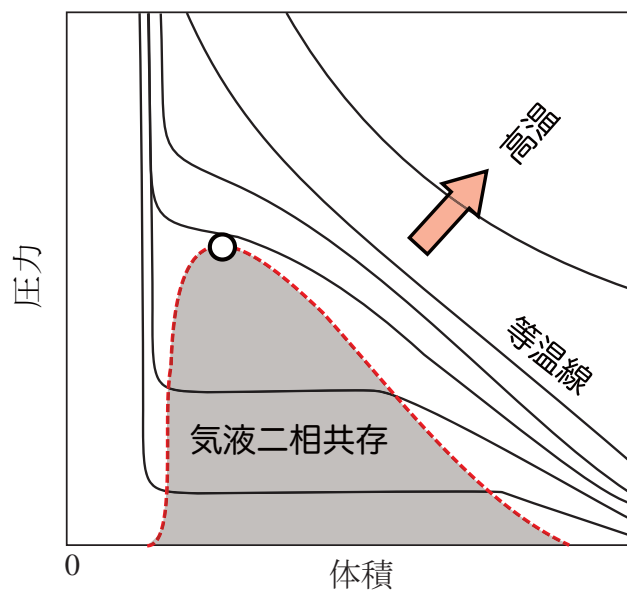
ヨハネス D. ファン・デル・ワールス
(1837-1923)



ノーベル物理学賞
(1910)

「気体と液体の状態方程式
の研究に対して」

ヘリウムすら液化できるはず...

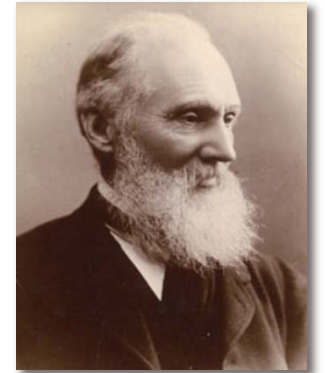


冷却法① ジュール-トムソン冷却 (ガスの液化)

AB両空間の熱平衡を保ちながら、多孔体を通して**実在気体**をAからBへ準静的に膨張させると($P_A > P_B$)、両空間の気体に温度差 ($T_A \neq T_B$) がつく

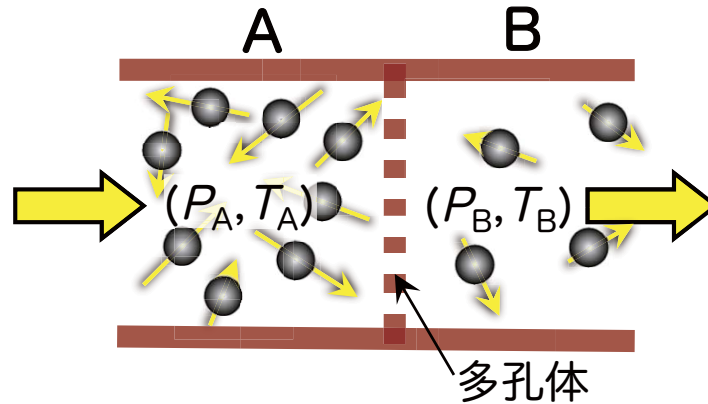


ジェームス P. ジュール (1818-1889)



ウィリアム トムソン (ケルビン卿) (1824-1907)

ジュール-
トムソン効果
(1861)

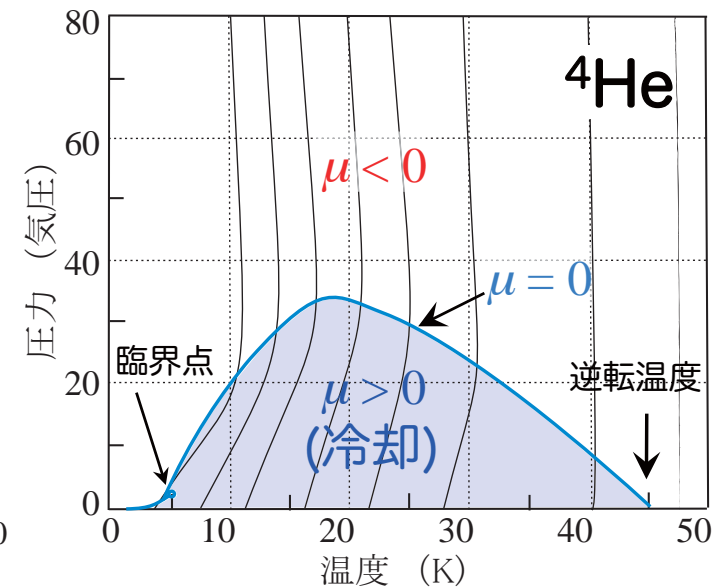
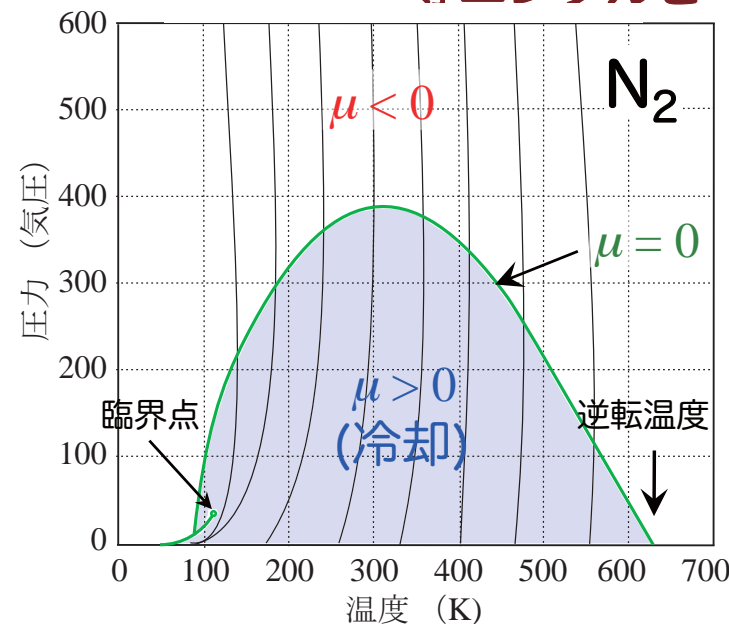


等エンタルピー線と逆転曲線

$$\mu \equiv \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H : \text{ジュール-トムソン係数}$$

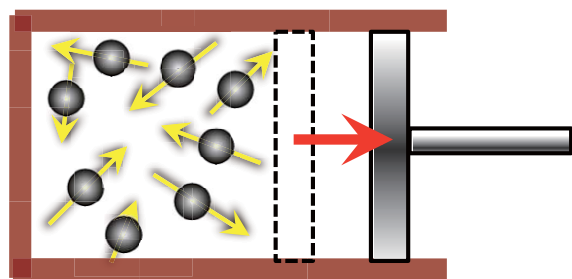
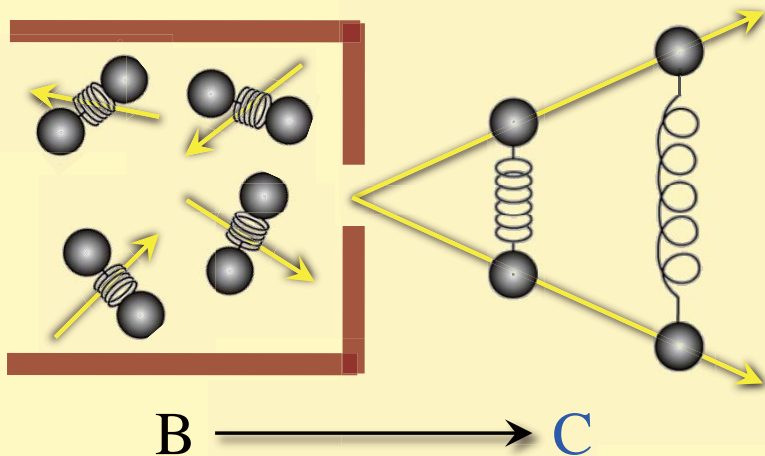
$$= \left(\frac{V}{C_P} \right) \{ \alpha T - 1 \}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \equiv \left(\frac{1}{V} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P : \text{膨張率} \\ C_P = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P : \text{定圧比熱} \end{array} \right.$$



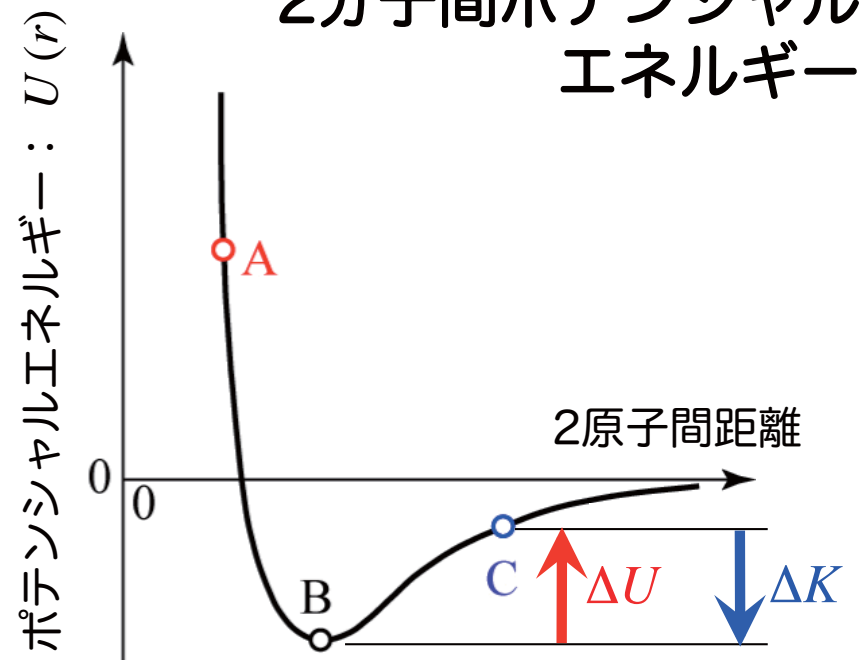
ジュール-トムソン効果の仕組み

分子間力に対して仕事をして
温度が下がる



ピストンに対し仕事をして
気体が膨張冷却するのと同じ

2分子間ポテンシャル
エネルギー



全エネルギー ($U + K$) が保存
するためには:

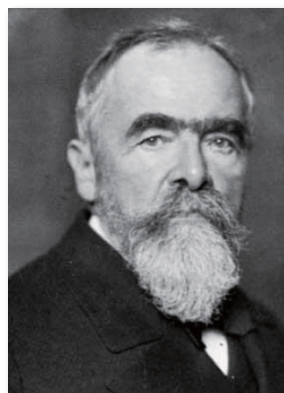
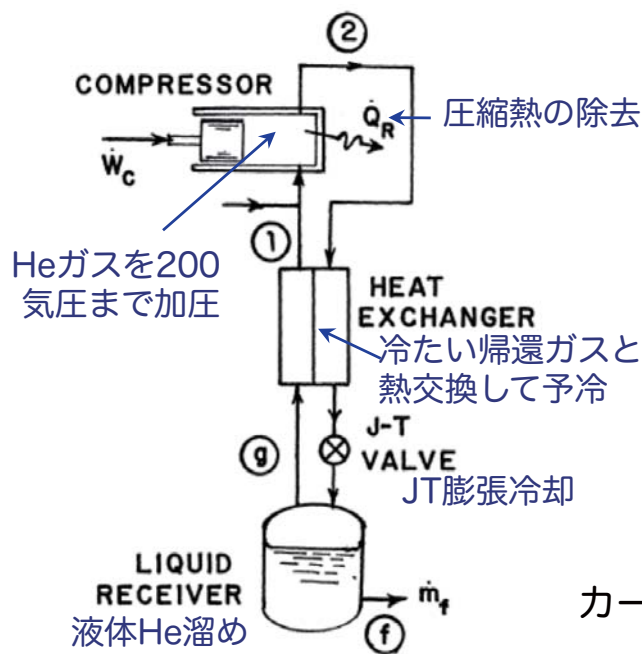
$$\Delta U = -\Delta K$$

$$K \approx \frac{3}{2} k_B T : \text{内部エネルギー}$$

空気・水素の液化

1885年 リンデ (ドイツ) が**空気**の工業的液化に成功

ジュール・トムソン弁とカウンターフロー式熱交換器の組み合わせ



カール・フォン・リンデ (1842-1934)

1898年 デュワー(英国)が**水素**の大量液化に成功

多段の熱交換器と膨張エンジンを追加したクロード型液化機

デュワー瓶

銀メッキしたガラスの断熱真空二重容器



ジェームス デュワー (1842~1923)

液体酸素(O₂)の沸点 90 K (-183°C)
液体窒素(N₂)の沸点 77 K (-196°C)

液体水素(H₂)の沸点 20 K (-253°C)

液化ガスのさまざまな応用

製鉄

大量の酸素ガス



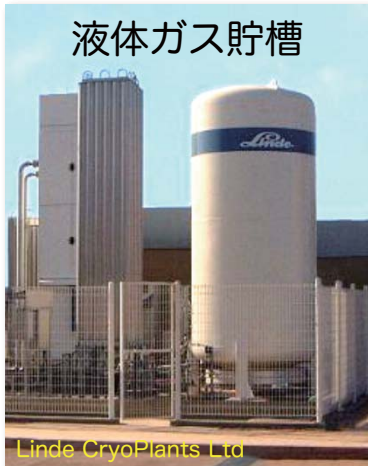
不純物 (C, P) の酸化除去脱



医療



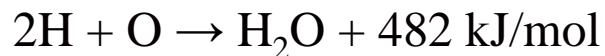
酸素人工呼吸



液体ガス貯槽

宇宙産業

液体酸素・水素燃料



冷凍保存

生体・食品・粉砕



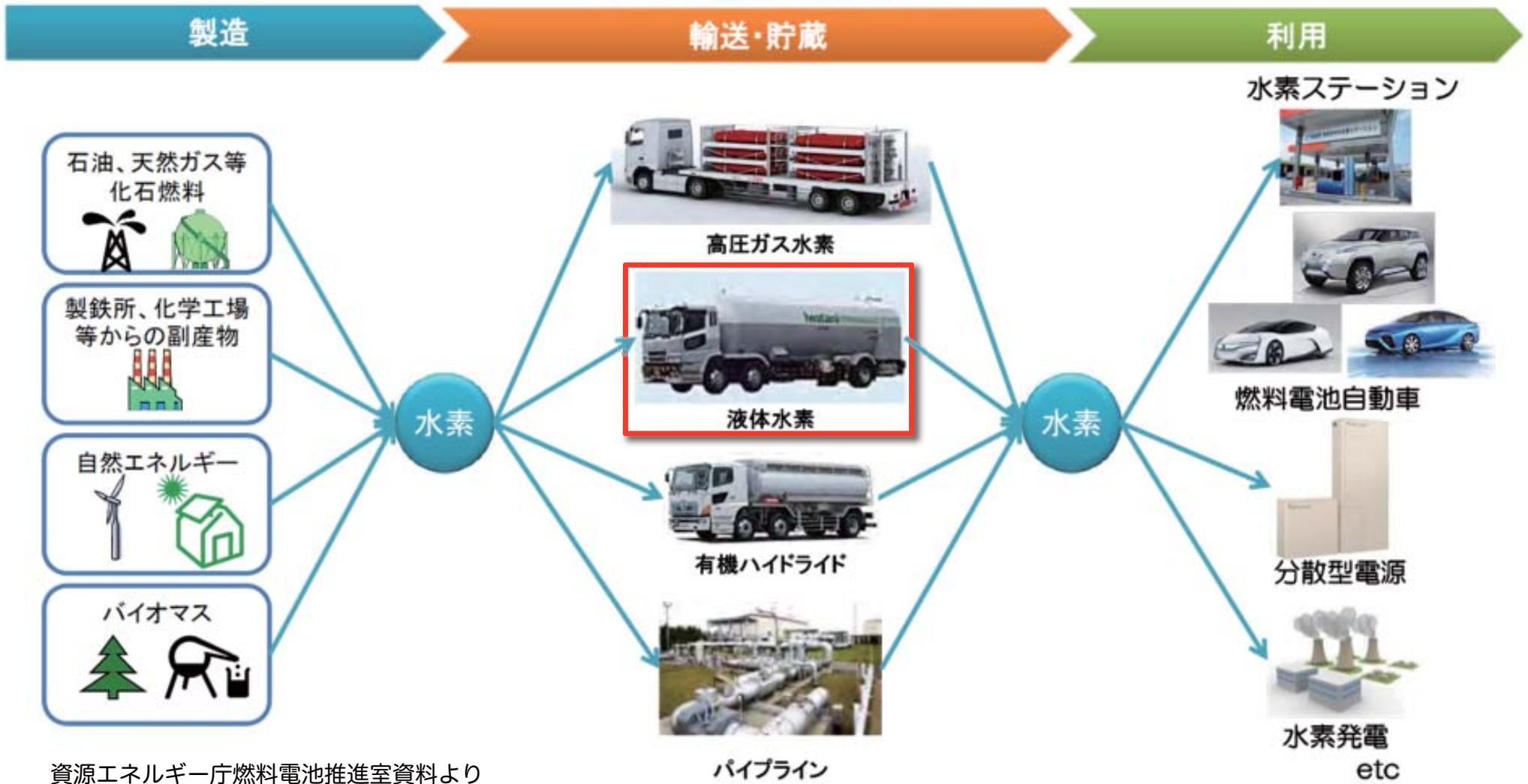
広範な自然科学の実験

理学・工学・農学・薬学・医学...

(H26年度 本郷地区キャンパス 液体窒素使用量 47万リットル)

水素社会の到来?

水素の輸送・貯蔵方法



資源エネルギー庁燃料電池推進室資料より

液化水素は大量輸送・大量貯蔵に適する

ヘリウムの液化

カマリン・オネス (ライデン大学)が、1908年7月10日に5段階の予冷プロセスを経て

ヘリウムの液化に成功

1. クロロメタン (-90°C)
2. エチレン (-145°C)
3. 空気 (-183°C)
4. 水素 (-253°C)
5. ヘリウム (-269°C)



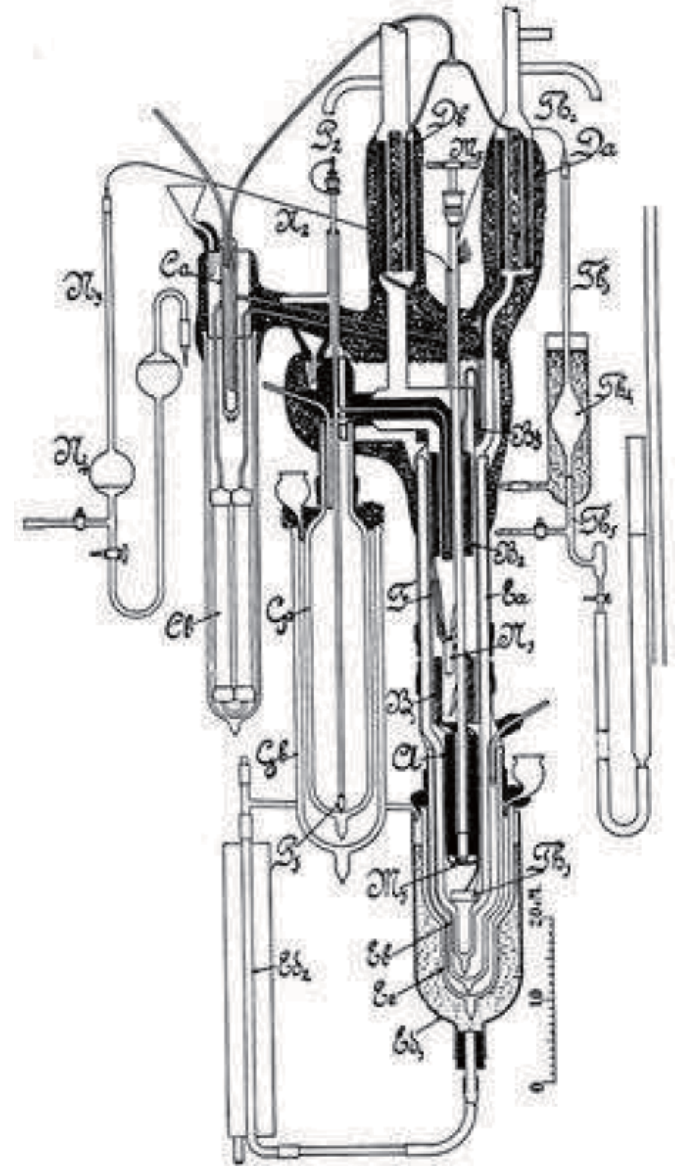
ハイク・カマリン・オネス
(1853-1926)



ノーベル物理学賞 (1913年)

「低温における物質の性質に関する研究、とりわけ液体ヘリウムの生成に対して」

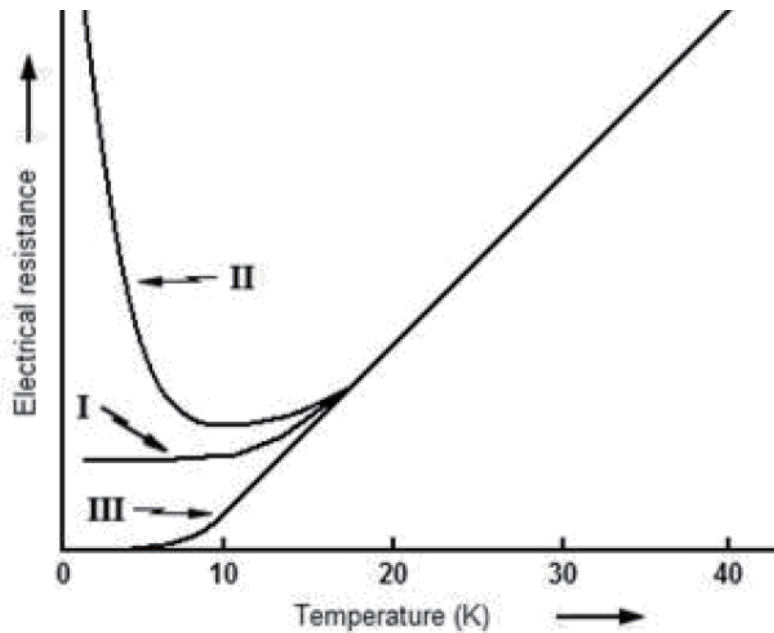
液体ヘリウム(He)の沸点 4.2 K (-269°C)



H. Kamerlingh Onnes, Commun. Phys. Lab. Univ. of Leiden **108**, 3 (1908)

現代低温物理学の幕開け

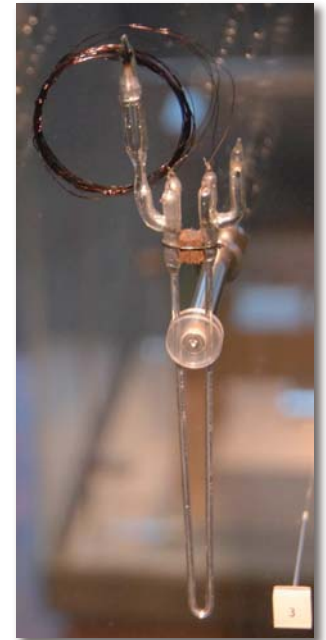
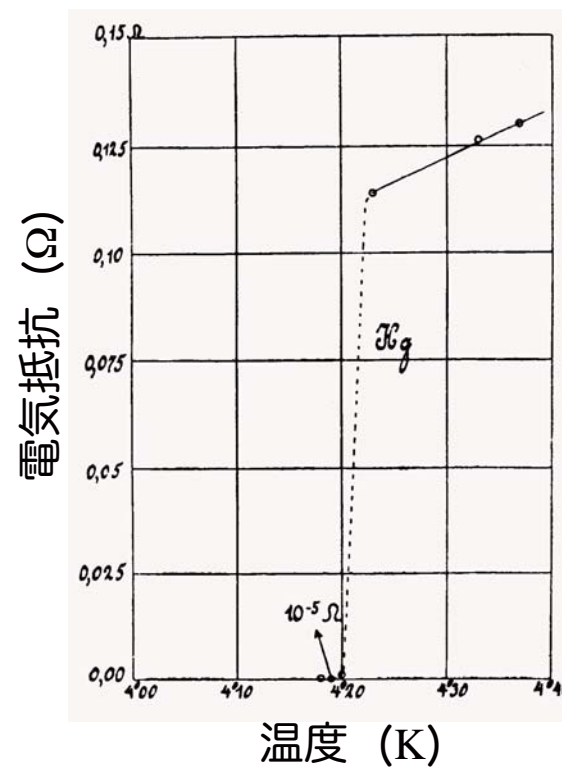
金属の電気抵抗に関する異なる理論予想



- I 不純物で決まる残留抵抗
- II 極小点をもち、絶対零度では発散
- III ゼロに近づく

超伝導の発見 (1911年4月)

水銀試料を使って、 $T_c = 4\text{ K}$ でオネスが発見



絶対零度は死の世界か...？

古典力学に基づく予想

☞ 絶対零度は、すべての粒子の運動が止まる静寂の世界

量子力学が拓いた新たな自然観

☞ 絶対零度は動的な世界

ハイゼンベルクの不確定性関係：

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$$

のため、絶対零度でも粒子は静止しない

$h = 2\pi\hbar$: プランク定数
(= 6.626 069 57(29) × 10⁻³⁴ J·s)



ヴェルナー K. ハイゼンベルク
(1901~1976)

ノーベル物理学賞 (1932)



量子力学の構築とその
応用とくに水素の同素
体発見につながった研
究に対して

量子力学的 零点振動

粒子は絶対零度でも、不確定性関係由来の運動エネルギー (零点振動エネルギー) K をもつ

$$K \approx \frac{\Delta p^2}{2m} \approx \frac{\hbar^2}{2m\Delta x^2}$$

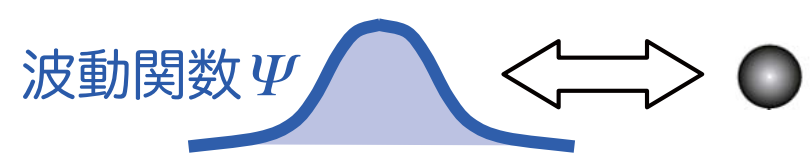
$\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$

粒子質量 m が小さいほど量子効果大

世界 (粒子の運動) は確率論的にしか定まらない。

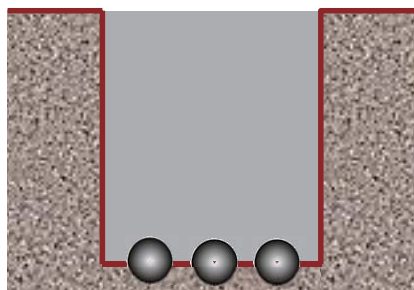
シュレーディンガー方程式：
$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V\Psi$$

粒子と波の二面性

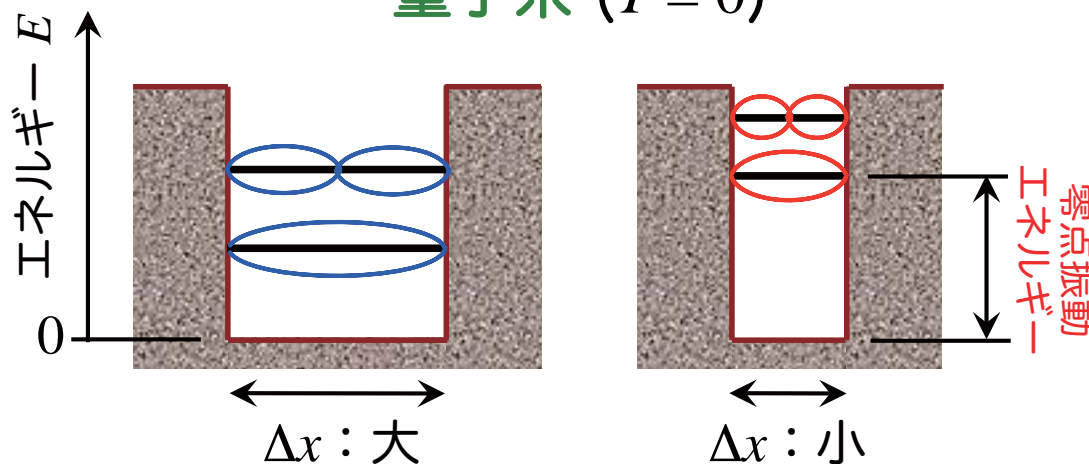


波動関数の絶対値 $\Psi(r)\Psi^*(r) = |\Psi|^2$ が粒子を位置 r に見出す確率に比例

古典系 ($T = 0$)



量子系 ($T = 0$)



極微の世界から飛び出した量子効果

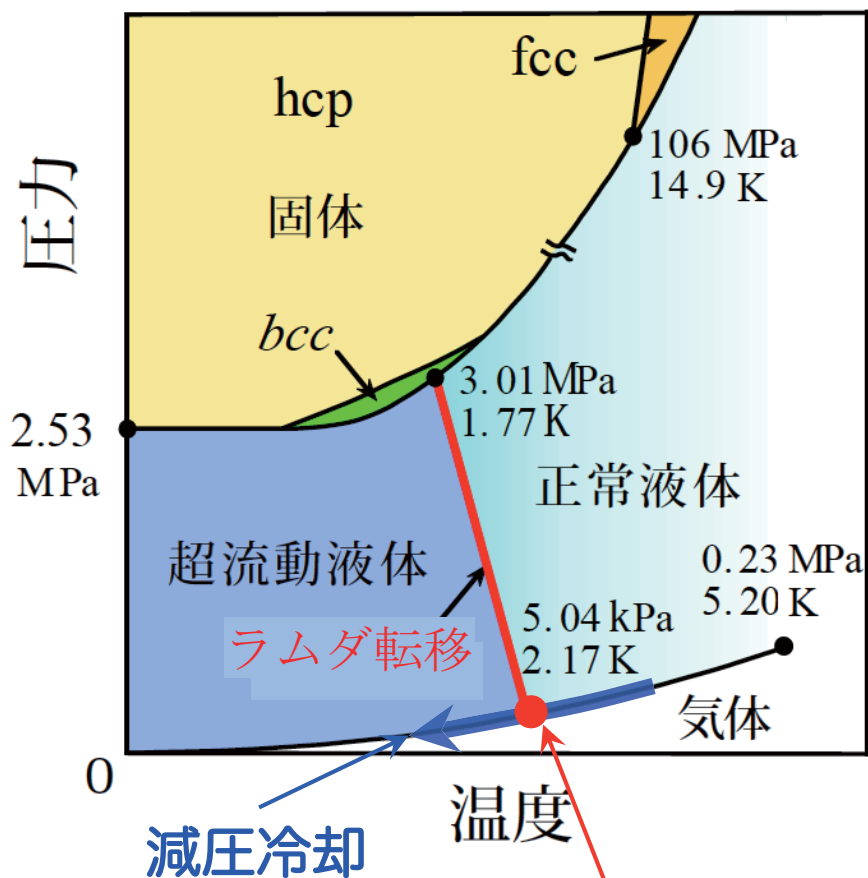
マクロな物質を低温にすると、波動性がより劇的な姿で現れることがある：

それが、**超流動**、**超伝導** 現象

そして、これらは本質的に同じ現象

液体ヘリウム4の性質

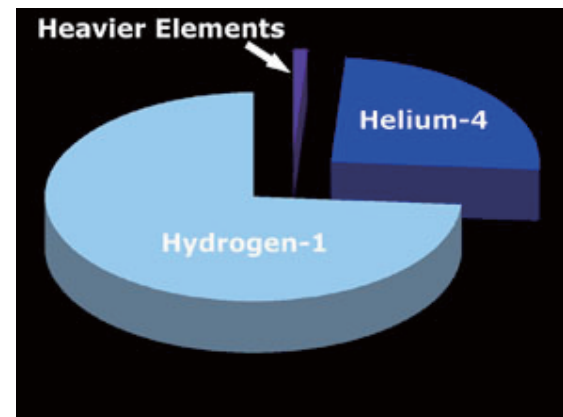
ヘリウム(^4He)の状態相図



ラムダ点($T_\lambda = 2.17 \text{ K}$)
で超流動転移

実験室で扱える最も純粋で単純な物質

- 宇宙で2番目に大きな存在比



- 不純物は全て容器底に沈殿する

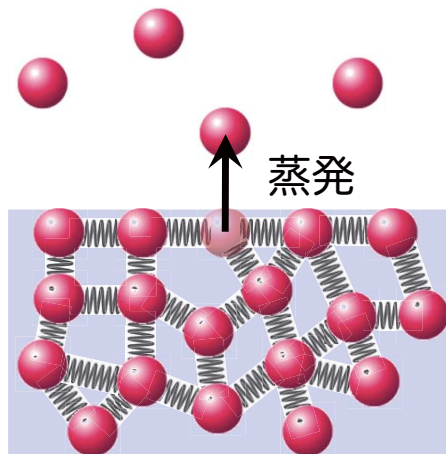
大きな量子性

- 零点振動が大きく、絶対零度でも固化しない (三重点の消失)
- 超低温で多彩な量子物性を示す

冷却法② 断熱蒸発冷却

- 蒸発の潜熱 ($L_0 = \Delta Q = T\Delta S$) を奪うことで冷却

分子がより高密度の液相から、より低密度の気相へ蒸発する際、分子間引力に対して仕事をする事で内部エネルギーが下がり、温度が下がる。



- 低温になると指数関数的に急に冷却力を失う

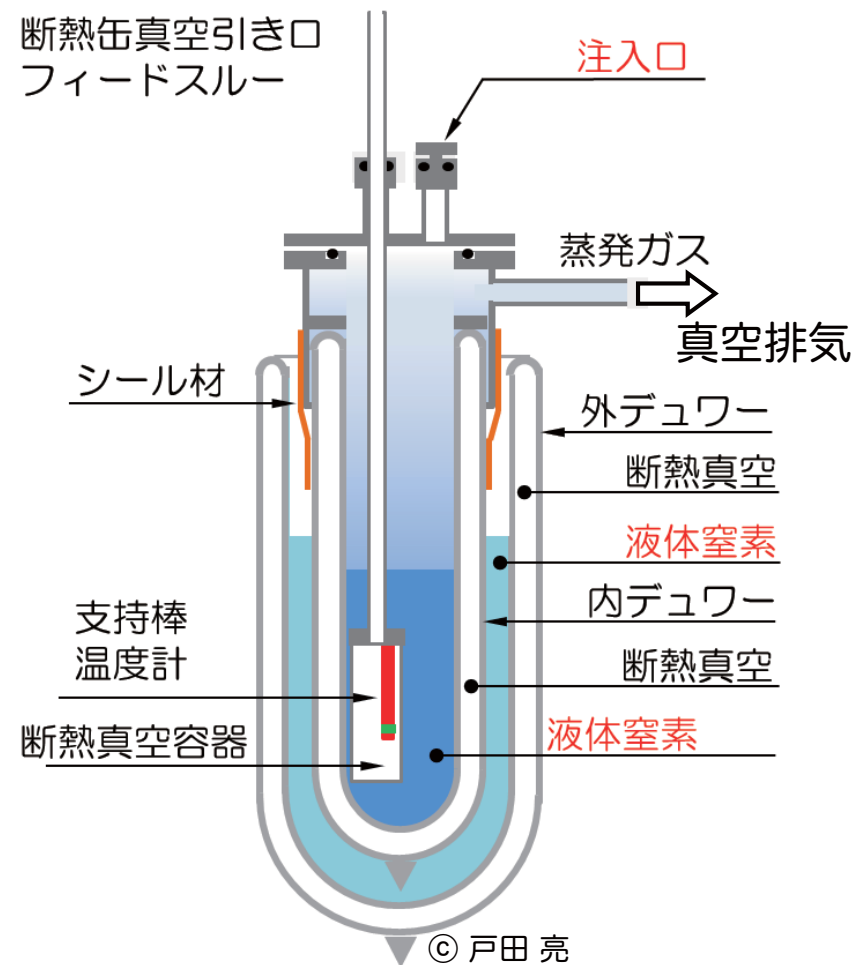
冷却力： $\dot{Q} = \dot{n}L_0 \propto P(T)L_0$

\dot{n} : 短時間当たりの蒸発量

L_0 : 蒸発の潜熱 \approx 一定

$P(T)$: 蒸気圧曲線 $\propto \exp(-L_0/RT)$

$$\therefore \dot{Q} \propto L_0 \exp\left(-\frac{L_0}{RT}\right)$$



^4He クライオスタット
($T_{\min} \approx 1.2 \text{ K}$)

超流動の二流体モデル

1938年にティザが提唱

ρ_s : 超流動密度 (散逸がない, エントロピーゼロ)

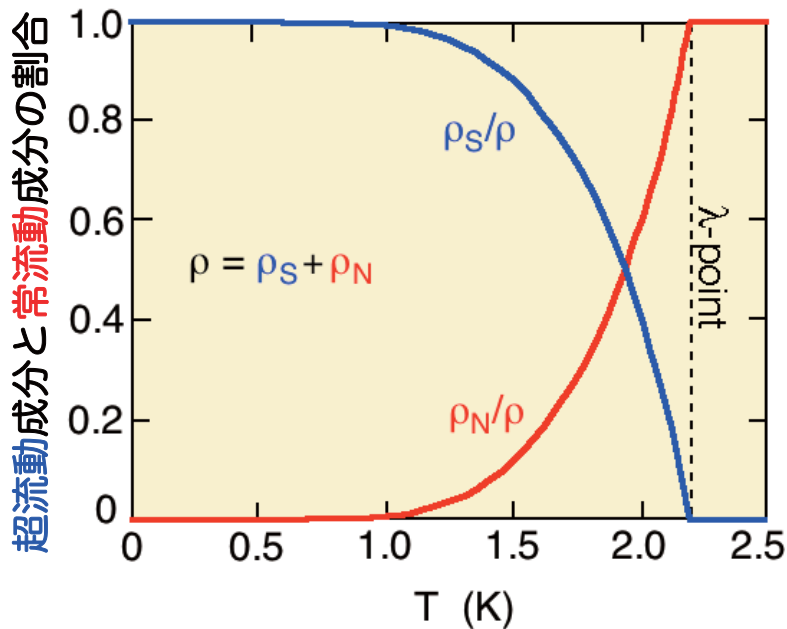
ρ_n : 常流動密度 (摩擦あり, 有限エントロピー)

$\rho = \rho_s + \rho_n$: 全密度は常に一定

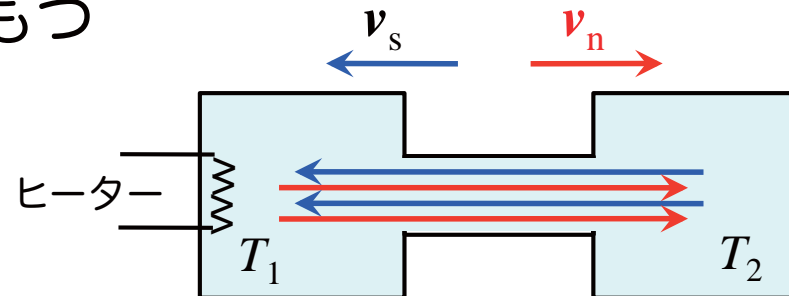
$j = \rho_s v_s + \rho_n v_n$: 二流体は別々の早さをもち得る
二流体間の相互摩擦はゼロ



ラズロ ティザ
(1907-2009)

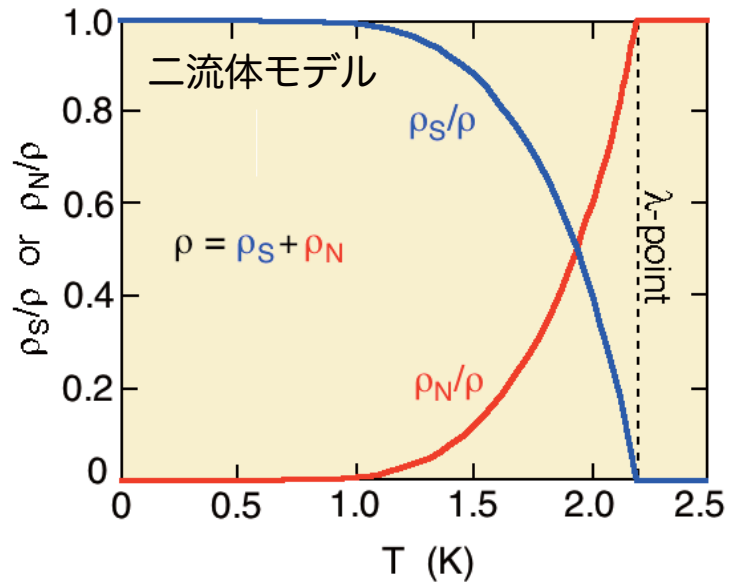


熱対向流 ($j = 0$)は桁違いに高い熱伝導性をもつ



容器内に温度差をつけることが事実上不可能 ($T_1 \approx T_2$)

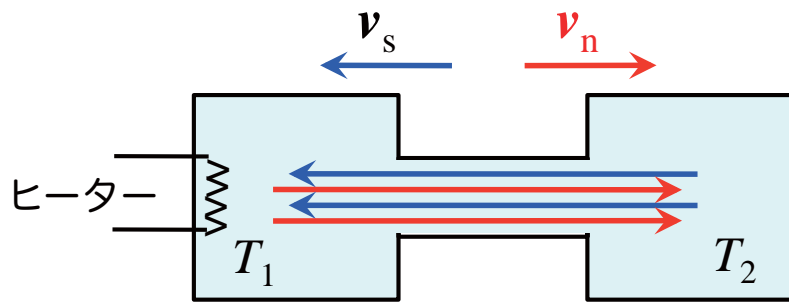
超流動現象と二流体モデル



ρ_s : 超流動密度 (散逸なし, エントロピーゼロ)

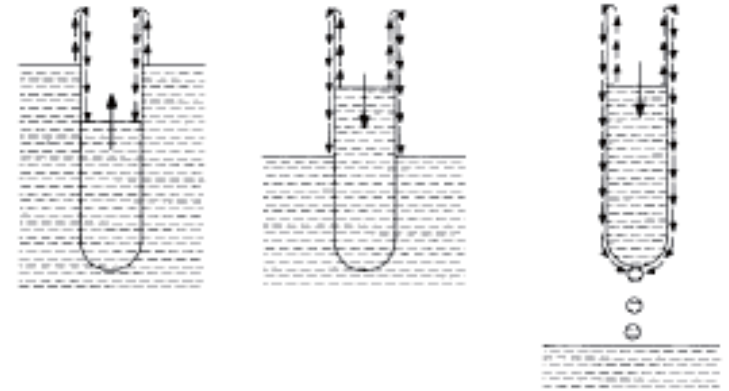
ρ_n : 常流動密度 (摩擦あり, 有限エントロピー)

2 流体間に相互摩擦はない。

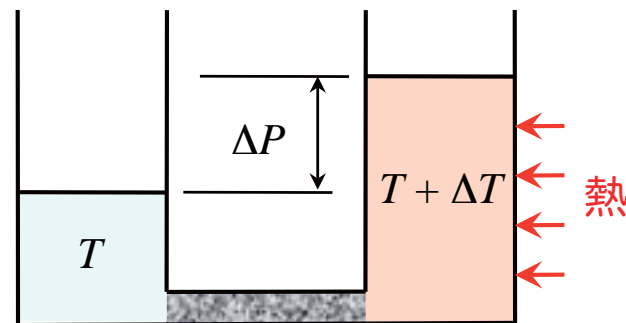


理想的な熱対向流 ($T_1 \approx T_2$)

フィルムフロー



噴水効果 (熱機械効果)



$$\Delta\mu = \rho^{-1}\Delta P - S\Delta T + \dots$$

$$\Delta P = \rho S\Delta T$$

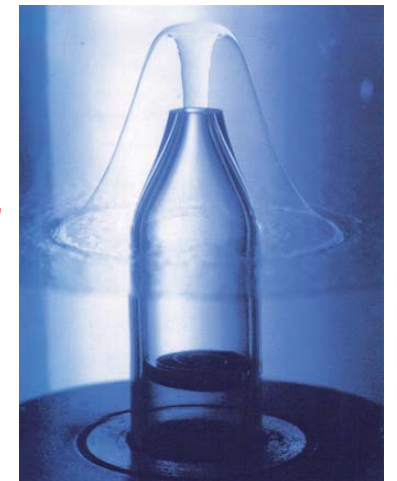


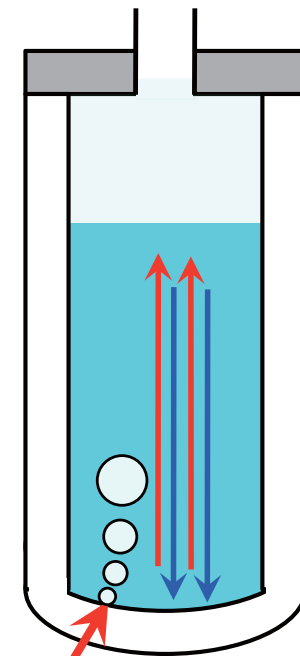
Photo by J.F. Allen (1971)

液体 ^4He の超流動転移 ($T = 2.17 \text{ K}$)

ラムダ転移 (超流動転移)

熱伝導が異常に高く、
突沸が止む

熱対抗流が温度のゆらぎを
速やかに除去する



温度のゆらぎによる突沸

超流動 ^4He のスーパーリーク



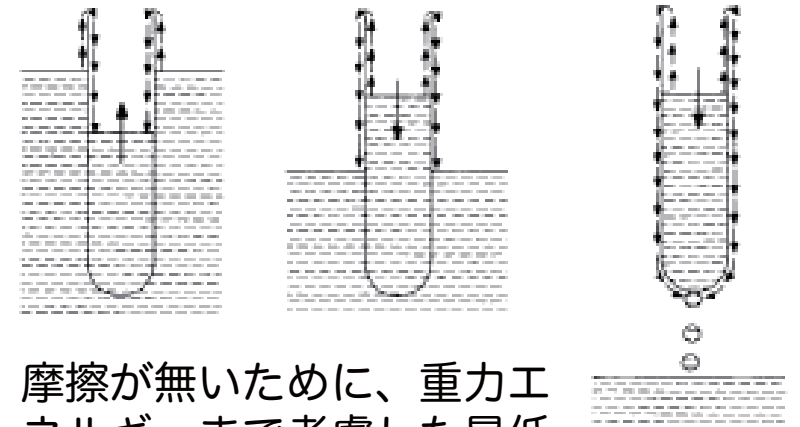
粘性なく、チョークの粉の非常に狭い隙間を流れる

超流動成分のみ流れ落ちるので、ガラス容器内の液体の温度は上昇する (二流体モデル)

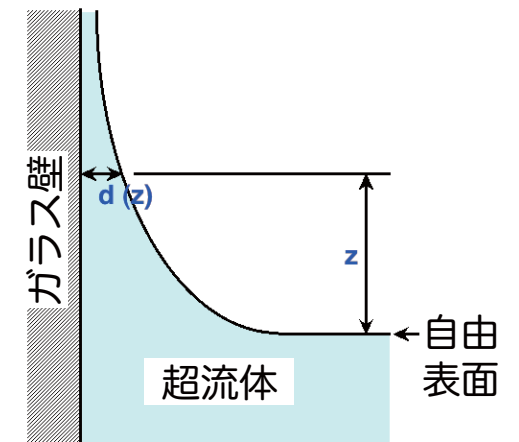
超流動⁴Heのフィルムフロー



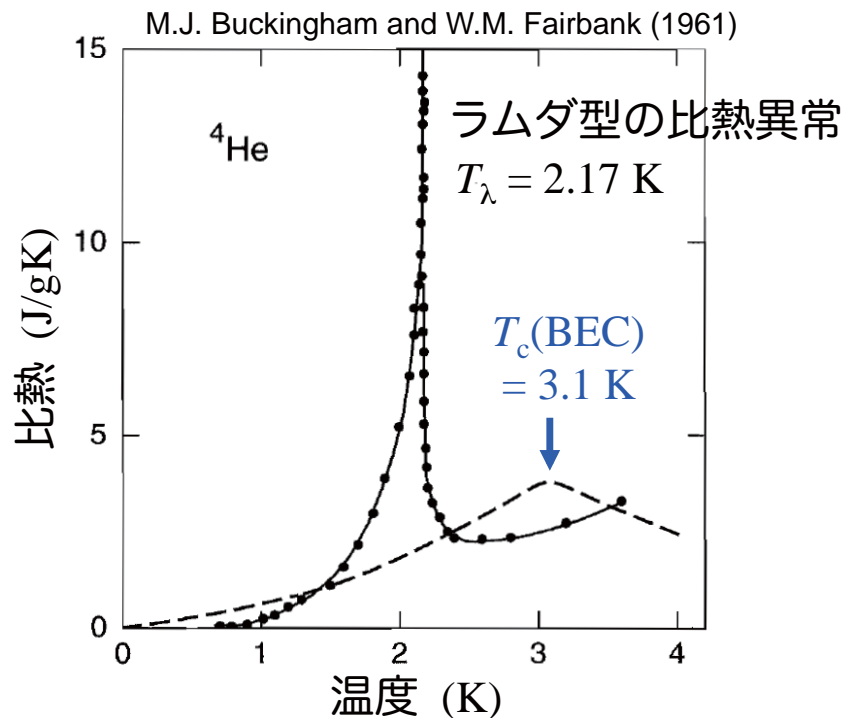
容器内の液体が超流動の薄膜となって壁を這い上がって外に出てしまう



摩擦が無いために、重力エネルギーまで考慮した最低エネルギー状態に向かうことができる



超流動現象の理解



ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)との関連を指摘 (1938)

フリッツ ロンドン
(1900-1954)



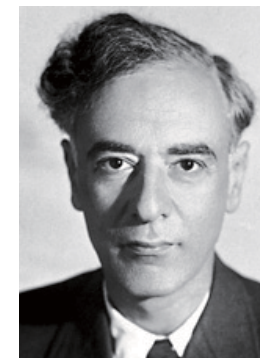
微視的理論

(フォノン-ロトン分散関係)

ノーベル物理学賞 (1962)



凝縮系とくに液体ヘリウムの先駆的な理論に対して



レフ D. ランダウ
(1908-1968)

超流動性の実験的発見

(平行平板間の流れの実験 1938)

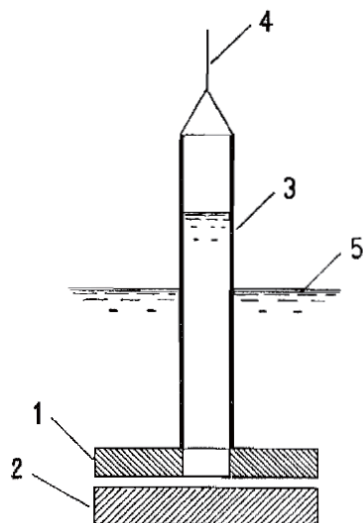
ノーベル物理学賞 (1978)



低温物理学における基礎的な発明と発見に対して



ピョートル カピッツァ
(1894-1984)



P. Kapitza, Nature 141, 74 (1938)

ボース統計とフェルミ統計

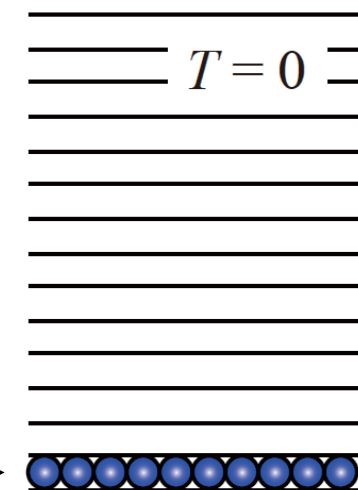
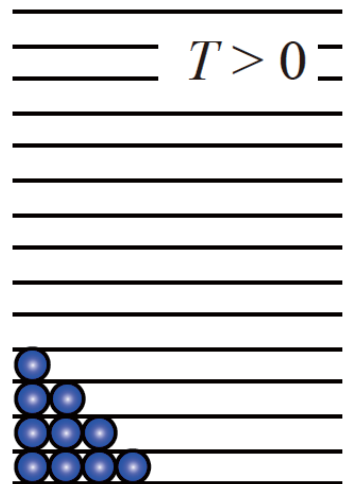
ボース粒子

^4He



核スピン0

H, H₂, Ne, CO₂,
⁸⁷Rb, ...

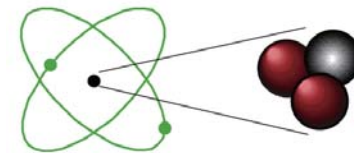


ボース・アインシュタイン
凝縮 (BEC) → 超流動

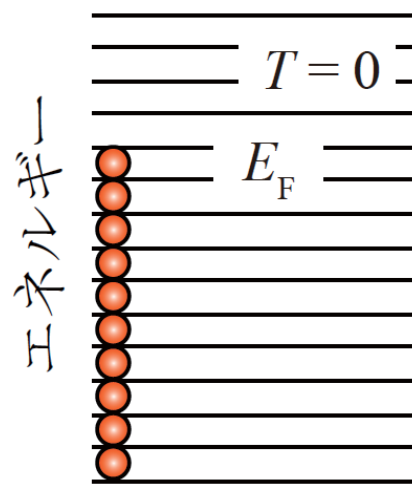
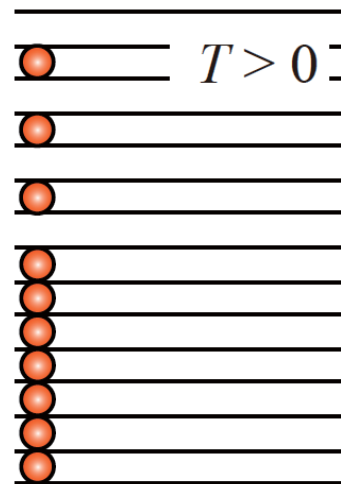
凝縮体
(運動量 = 0)

フェルミ粒子

^3He



核スピン1/2



エネルギー

粒子数

フェルミ縮退
← パウリの排他律

ボース統計とフェルミ統計

ボース粒子

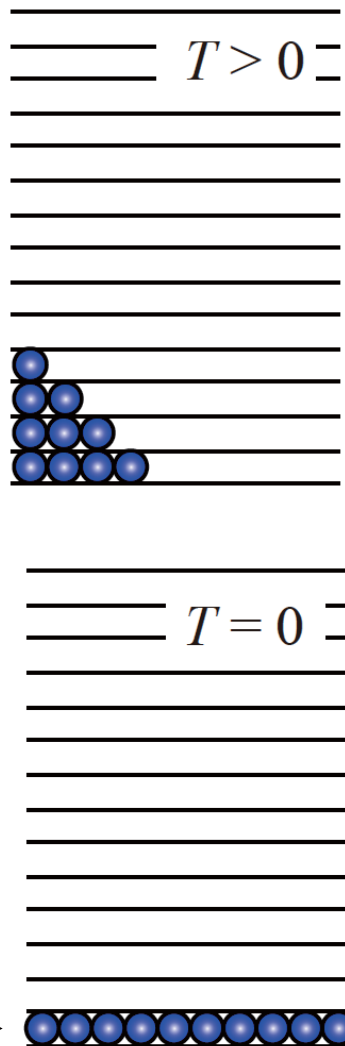
^4He



核スピン0

H, H₂, Ne, CO₂,

⁸⁷Rb, ...



ボース・アインシュタイン
凝縮 (BEC) → 超流動

凝縮体
(運動量 = 0)

物質波 (ド・ブロイ波) : $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$

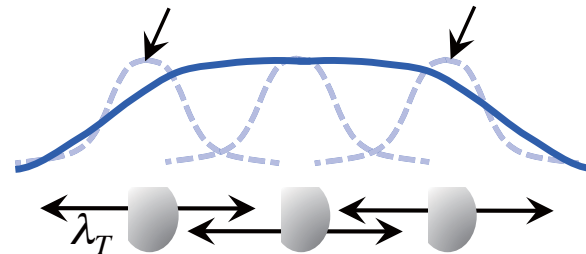
温度 T のときの平均運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$$

∴ 熱的ド・ブロイ波長: $\lambda_T \approx \frac{h}{(2mk_B T)^{1/2}}$

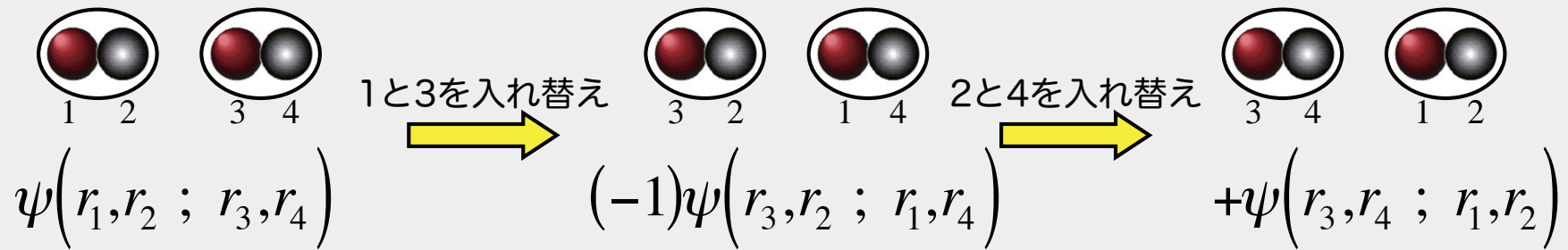
熱的ド・ブロイ波長が平均粒子間距離と同程度になると、個々の粒子の物質波の位相が揃い(マクロなコヒーレンスが生まれる)、巨大な一つの波動関数が形成されてBEC転移 (超流動転移) する。

個々の物質波 マクロな波動関数



複合粒子の統計性

2種類のフェルミ粒子2個 (1と3、2と4が同種) からなる複合粒子同士の入れ替えを考える。



つまり、この複合粒子はボース粒子のように振る舞う。

原子の構成粒子はすべてフェルミ粒子なので： ● 陽子 ● 中性子 ● 電子

複合ボース粒子

偶数個のフェルミ粒子からなる

${}^4\text{He}$, H, H_2 , Ne, CO_2 , ${}^{87}\text{Ru}$, ...

複合フェルミ粒子

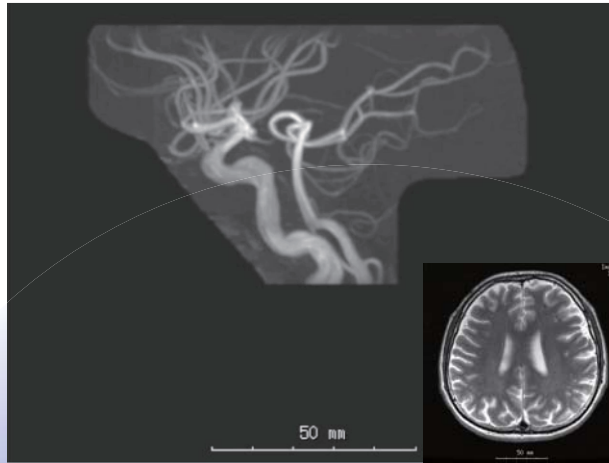
奇数個のフェルミ粒子からなる

${}^3\text{He}$, D, HD, ${}^6\text{Li}$, ${}^{40}\text{K}$, ...

超伝導の応用



核磁気共鳴イメージング (MRI)



from QD社

超伝導量子干渉磁束計 (SQUID)

超伝導マグネット



from Varian社



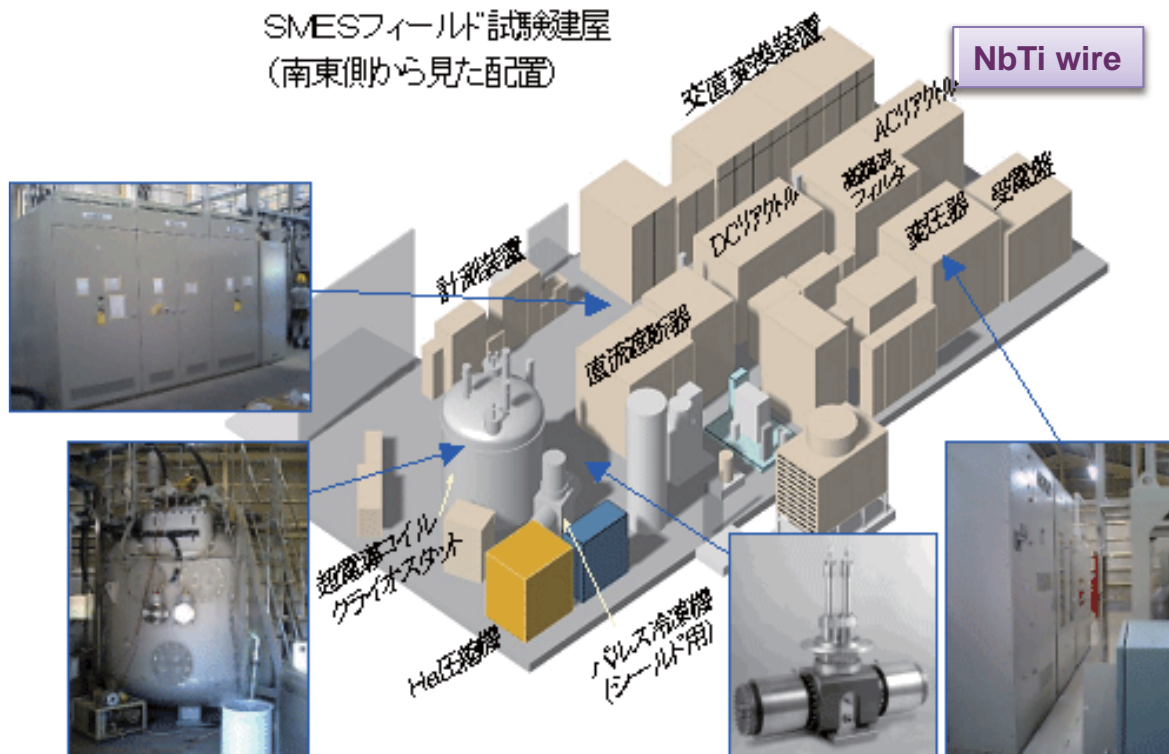
NMR分析器



リニアモーターカー

超伝導磁気エネルギー貯蔵

(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage)の実証実験



貯蔵エネルギー
= $(1/2)LI^2$

L : マグネットの
インダクタンス

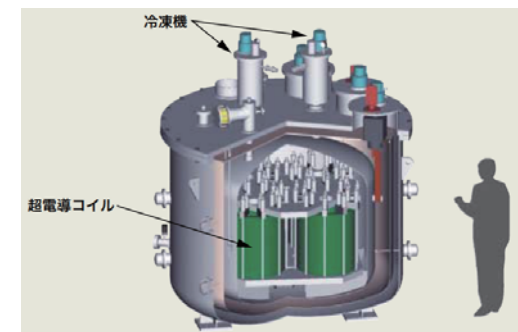
I : 電流

瞬低補償SMES

(10 MVA)

NbTi wire

東芝、中部電力: 2003



SMES実証試験 @ (株)古河日光発電・細尾発電所
(古河電工、中部電力: June 2007 -)

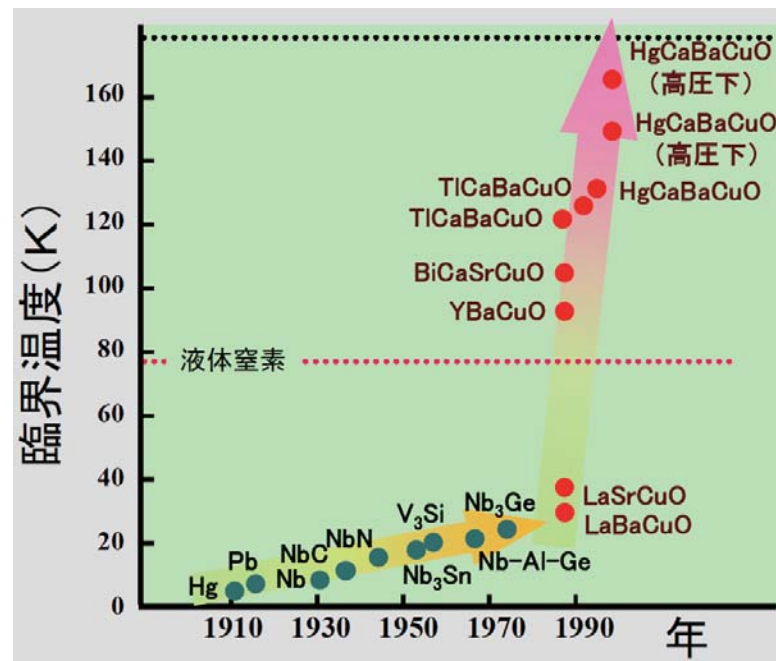
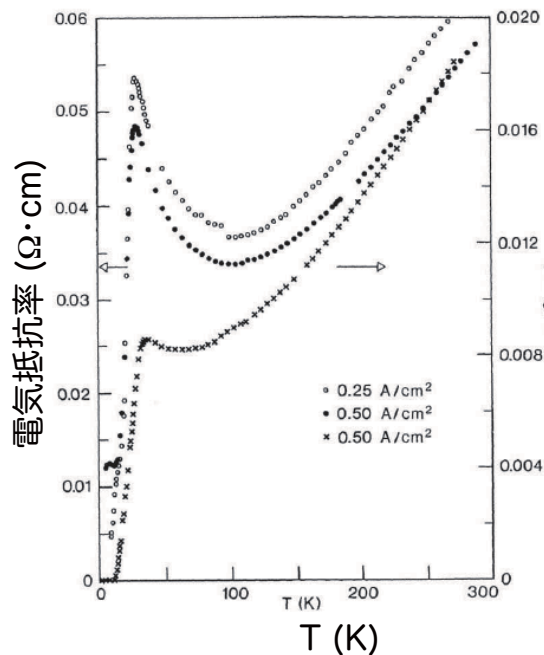
貯蔵エネルギー = 19 MJ

$I = 1,350 \text{ A}$, $B = 4.4 \text{ T}$, $V = 1.1 \text{ kV}$

高温超伝導の発見

高温超伝導の発見 (1986年)

- ・ La系の銅酸化物で、 $T_c \approx 30$ Kでベトノルツとミュラーが発見。
- ・ その後、転移温度(T_c)が90 K以上の超伝導体が見つかり、液体窒素温度(77 K)を超える。



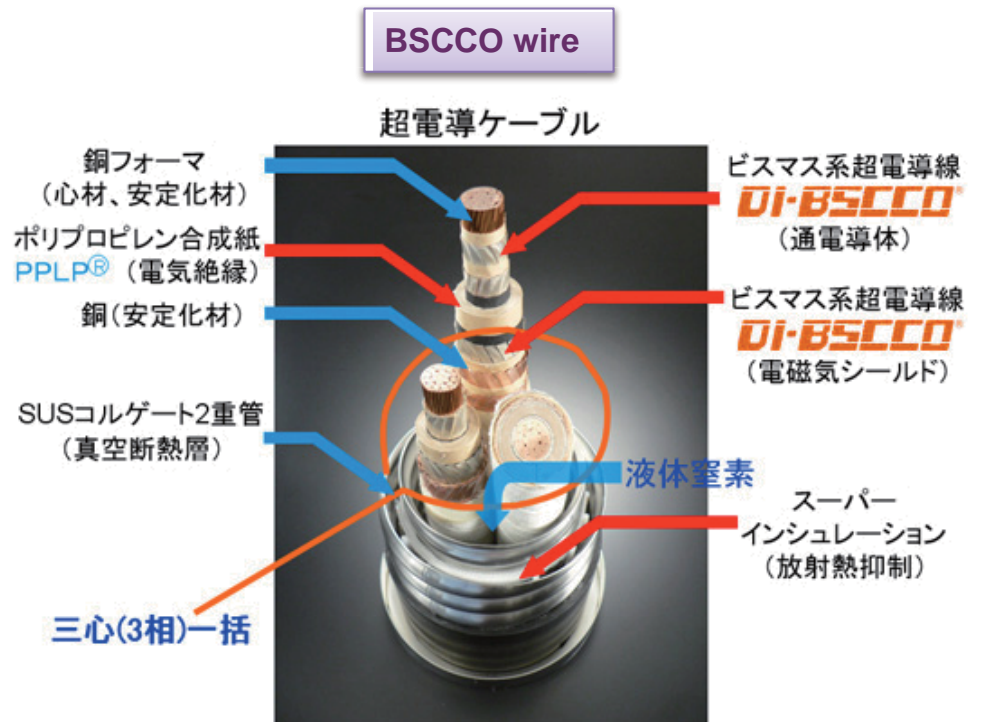
高温超伝導送電線技術 実証実験



アルバニー・プロジェクト

@ Albany, NY, USA (July 2006 - April 2008)

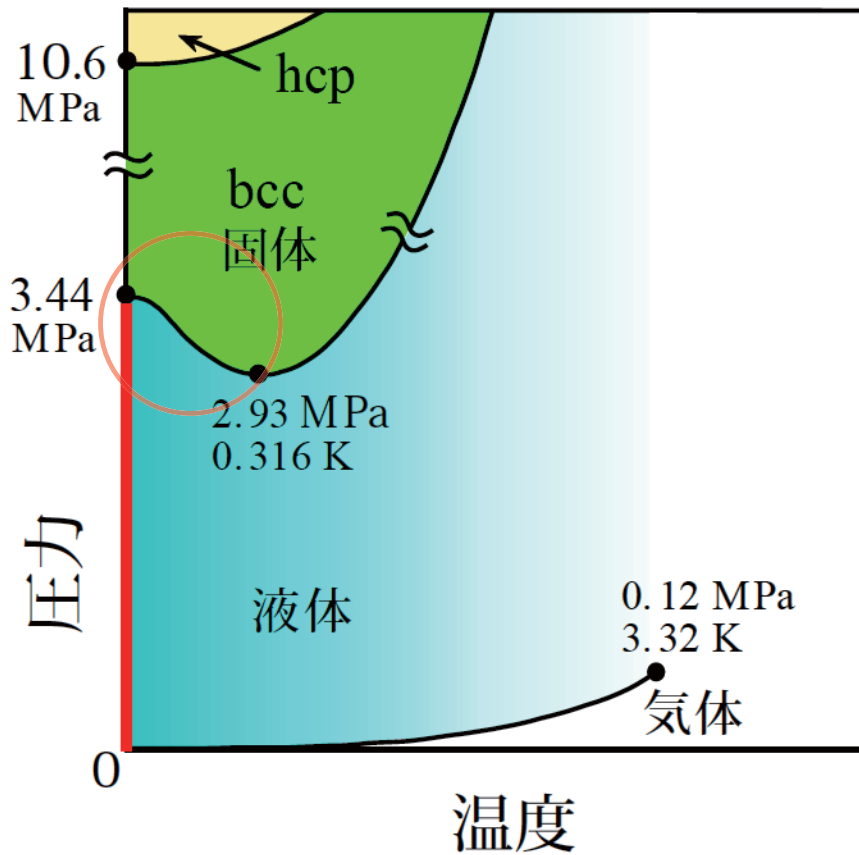
7万戸の電力をまかなうことに成功
送電ロス は 常伝導線の1/2-1/3



(注) 安定化材: 事故時の電流分担

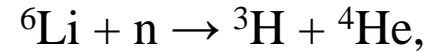
ヘリウム3を使った冷却法

^3He (フェルミ粒子) の状態相図



安定な同位体：

- ・原子炉で人工的に製造



ν_e : 電子ニュートリノ

量子性がさらに大

- ・融解圧のさらなる上昇 (2.5 -> 3.4 MPa)
- ・低圧でBCC相が安定

融解曲線の傾きが負

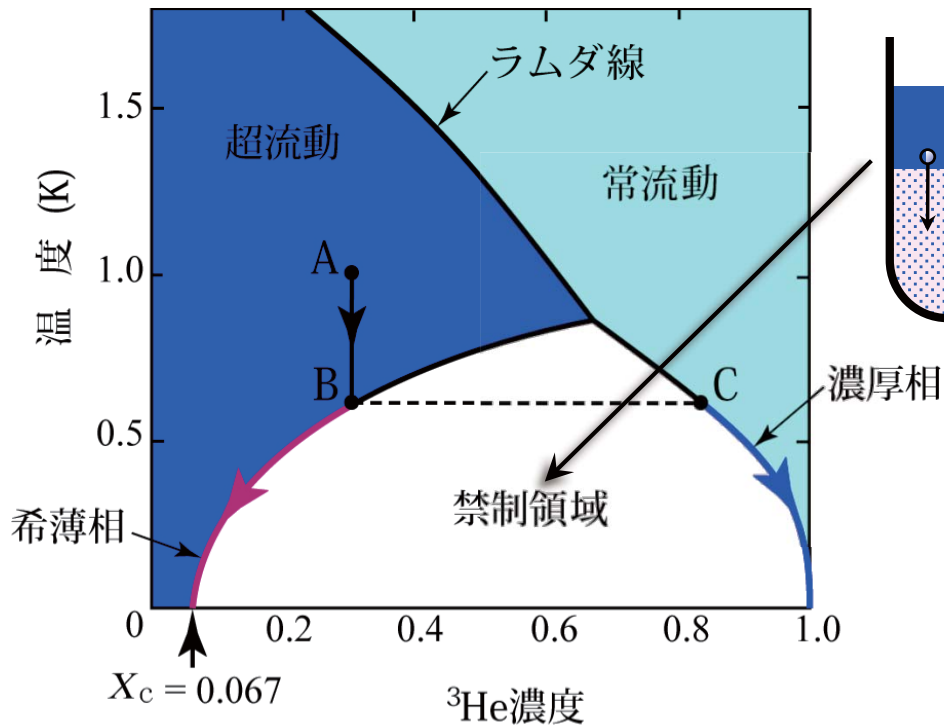
- ・ $dP/dT < 0$ at $T < 0.3$ K

非常に低い超流動転移温度

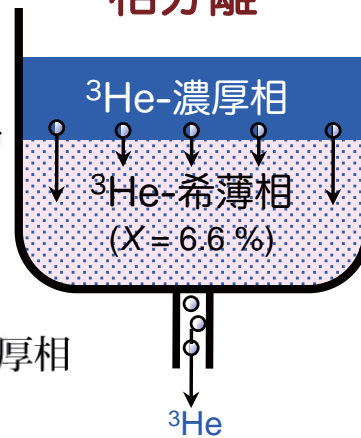
- ・ $T_c \approx 2$ mK

冷却法③ ^3He - ^4He 希釈冷凍 ($10 \leq T \leq 700 \text{ mK}$)

^3He - ^4He 混合液の相図



相分離



原理の提案

H. London et al., Phys. Rev. **128**, 1992 (1962)

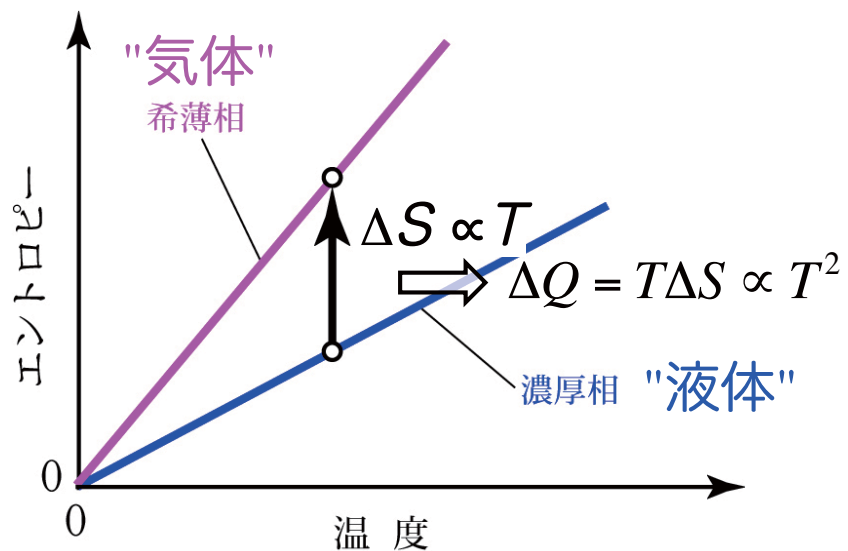
実用化

H.E. Hall, P.J. Ford and K. Thomson, Cryogenic **6**, 80 (1966) : $T_{\text{min.}} \approx 200 \text{ mK}$

B.S. Neganov, N.S. Borisov and M.Yu. Liburg, Zh. Exp. Teor. Fiz. **50**, 1445 (1966): $T_{\text{min.}} = 50 \text{ mK}$

原理

- ^3He が濃厚相から希薄相へ溶け込む (蒸発するときのエントロピー差 (蒸発の潜熱) を利用。
- ^3He を選択的に排気する工夫 (蒸留器の存在)。

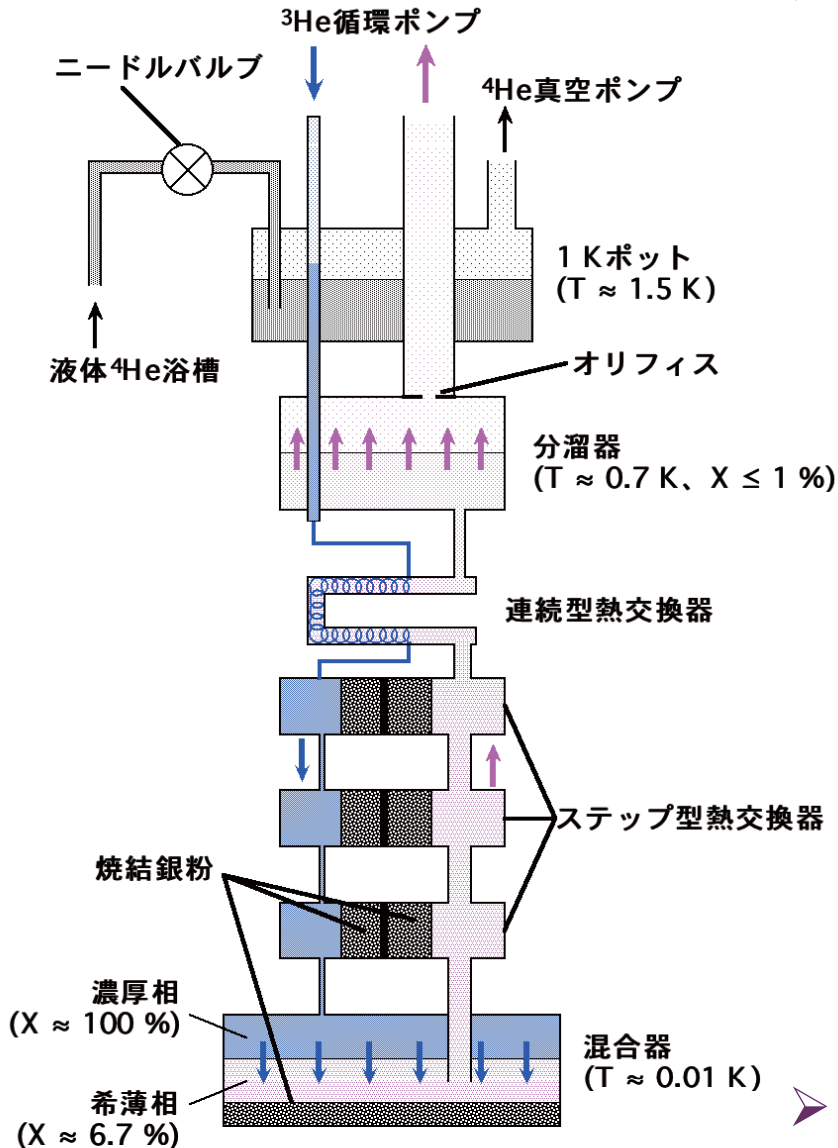


特徴

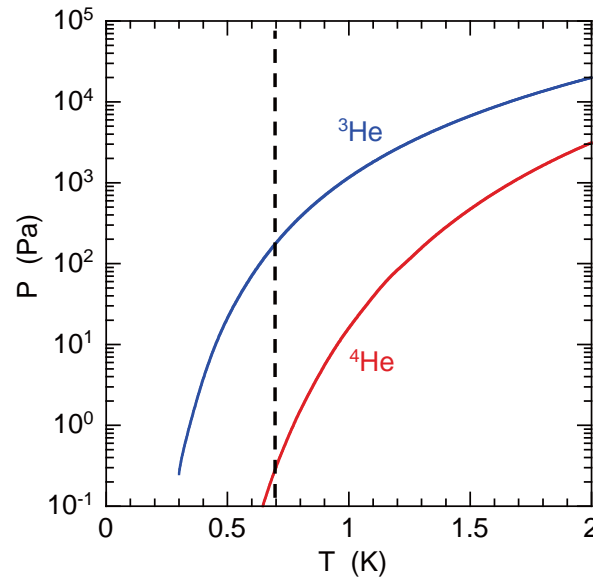
- $T = 0$ でも希薄相の ^3He 濃度 (実効的な“蒸気圧”) が有限に止まる (6.6%) ため、低温でも大きな冷却力 ($dQ/dt \propto T^2$) をもつ。
- 連続的に $T \approx 10 \text{ mK}$ の低温を維持できる (数ヶ月間以上)。

^3He - ^4He 希釈冷凍機の実際

➤ ^3He を選択的に排気する工夫 (蒸留器)



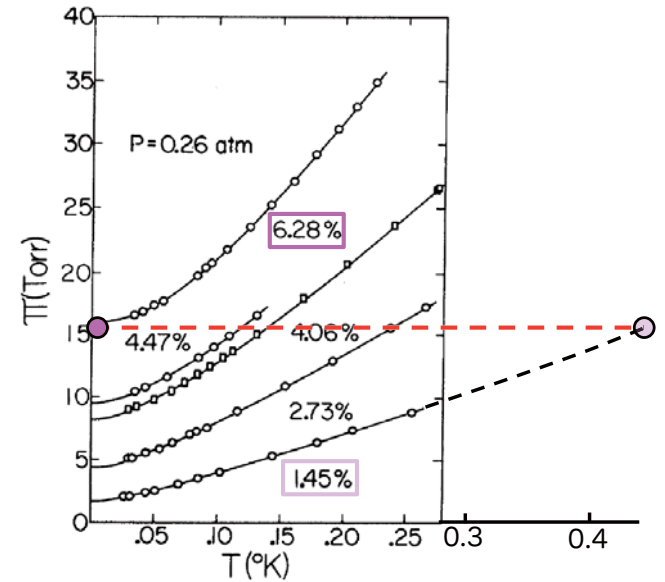
^3He と ^4He の飽和蒸気圧曲線



H. Preston-Thomas, metrologia 27, 3 (1990)

蒸留器($T \approx 0.7$ K)では選択的に ^3He が排気される。

^3He - ^4He 希薄混合液の ^3He 浸透圧



J. Landau, Phys. Rev. A 2, 2472 (1970)

蒸留器($T \approx 0.7$ K)内は $X \leq 1\%$

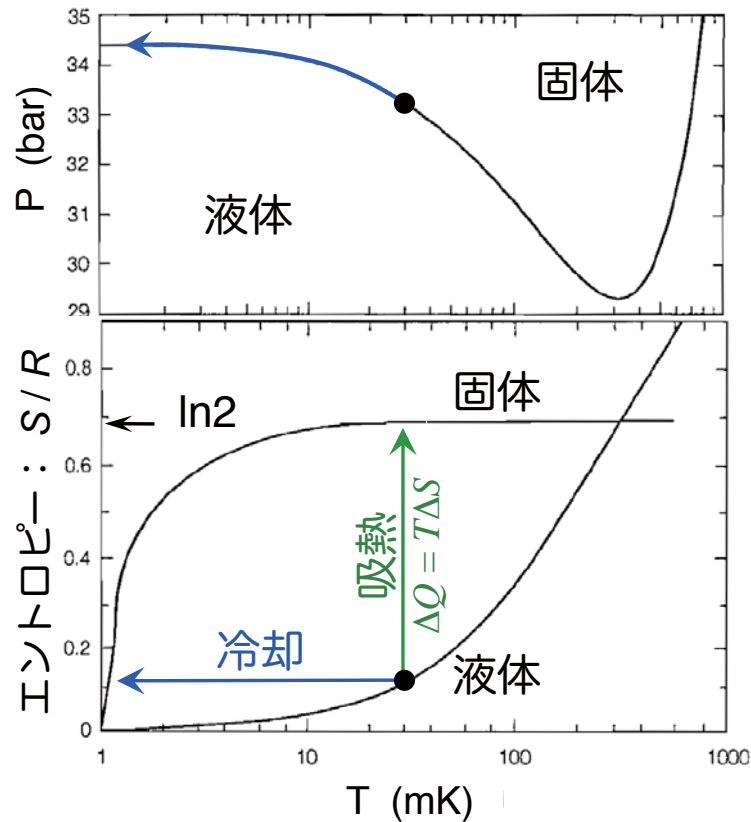
➤ 連続的に $T \approx 10$ mKの低温を維持できる (数ヶ月間以上)。

冷却法④ ポメランチュク冷却と超流動³Heの発見

ポメランチュク冷却

($0.9 \leq T \leq 30 \text{ mK}$)

³Heの液相と固相の大きなエントロピー差を利用した断熱固化(圧縮)冷却法



液体-固体共存³He試料の加圧冷却過程で二つの相転移を発見

超流動³Heの発見 (1972)

ノーベル物理学賞 (1996)



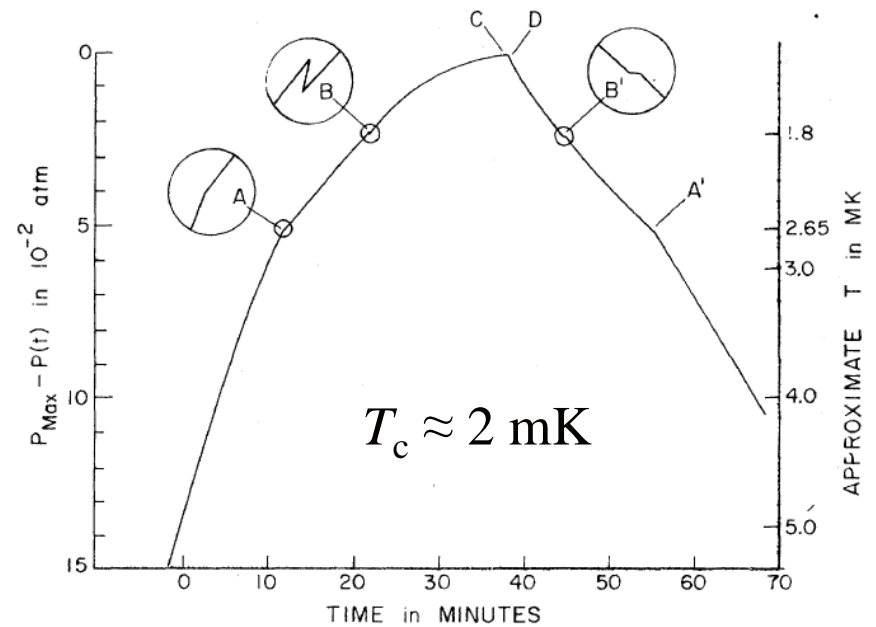
デビッド M. リー



ダグラス D. オシェロフ

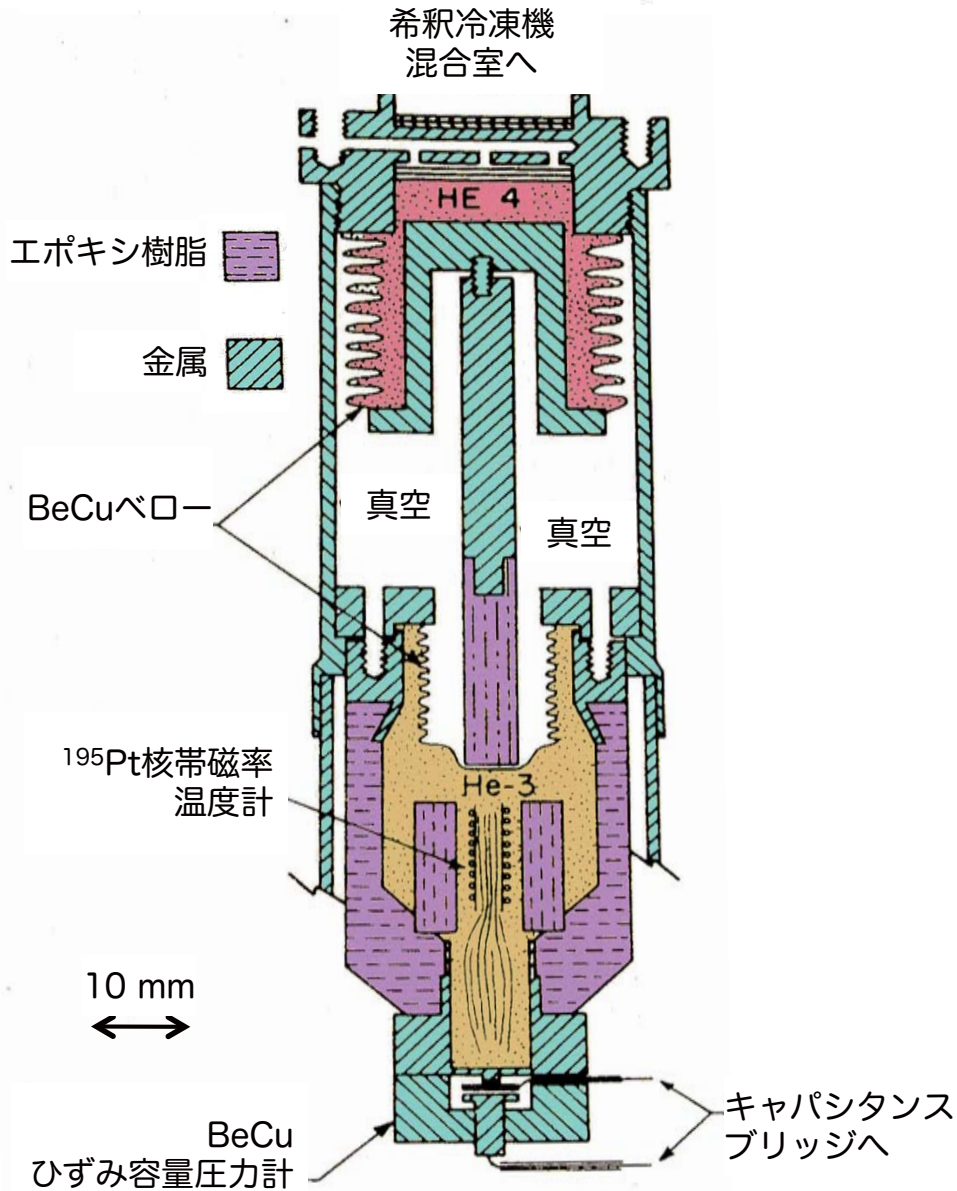


ロバート C. リチャードソン



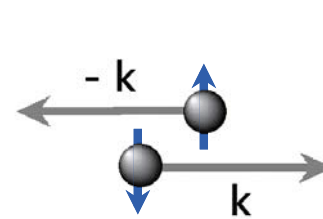
D.D. Osheroff, R.C. Richardson and D.M. Lee, Phys. Rev. Lett. **28**, 885 (1972)

オシエロフのポメランチュク冷却装置 (1971)

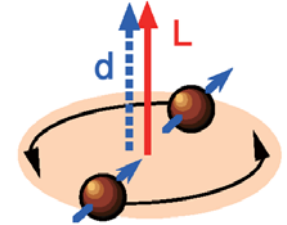


異方的な超流動相

BCS機構：フェルミ粒子2個がクーパー対を作ってボース・アインシュタイン凝縮する。

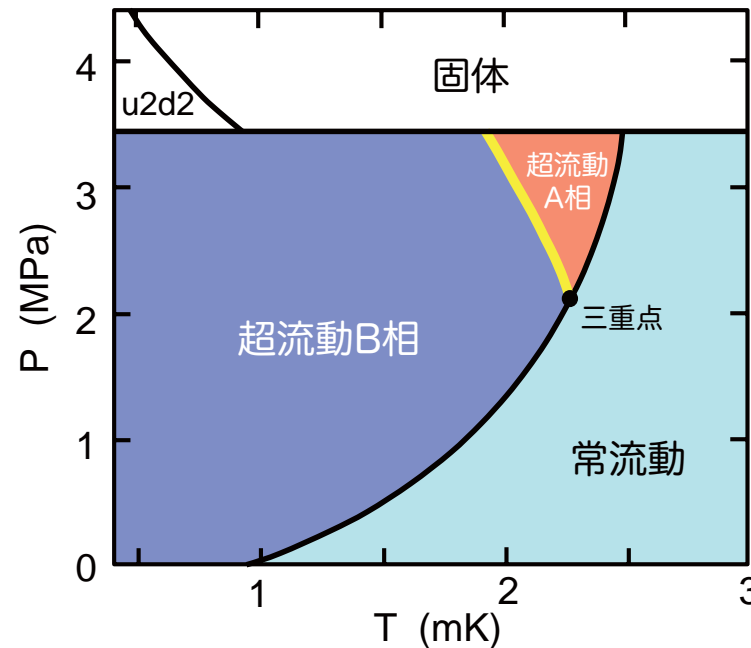


通常超伝導のクーパー対 (等方的)



$^3\text{He-A}$ 相のクーパー対 (異方的: $L=1, S=1$)

超流動 ^3He の相図



2003

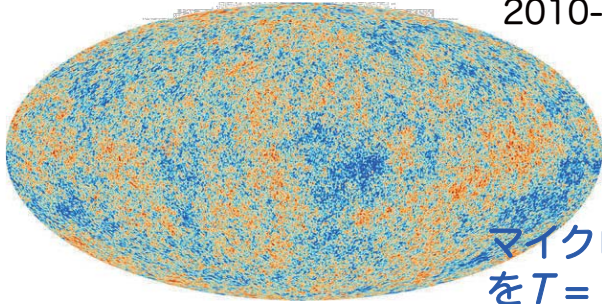


アンソニー J. レゲット

希釈冷凍機の応用例

宇宙マイクロ波背景放射検出器 (PLANCK衛星)

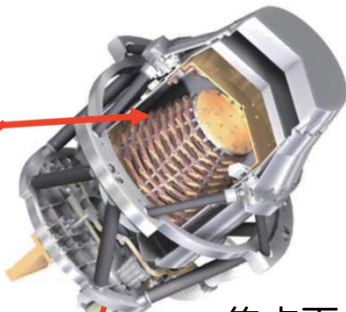
ヨーロッパ宇宙機関 (ESA)
2010-2013



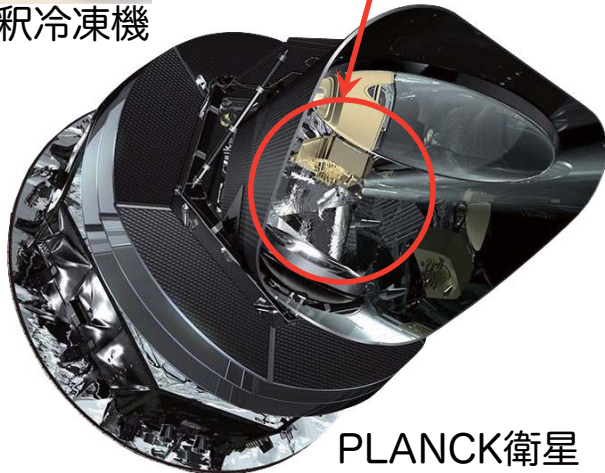
マイクロ波検出の心臓部
を $T = 100 \text{ mK}$ まで冷却



希釈冷凍機



焦点面ユニット

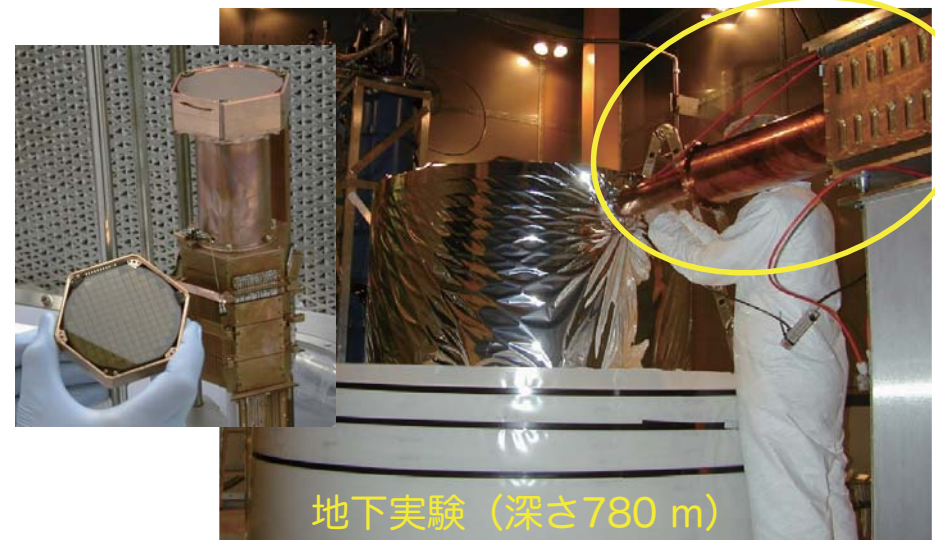
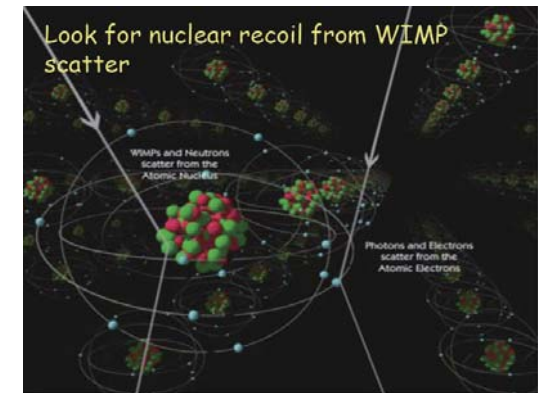
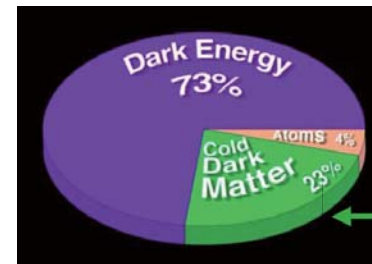


PLANCK衛星

暗黒物質検出器(CDMS)

米国ミネソタ大学・Soudan地下実験施設研究所

$T = 80 \text{ mK}$ まで冷却した半導体熱容量検出器(超伝導ボロメータ式)でWIMP (weakly interacting massive particles) による原子核反跳を観測する。



地下実験 (深さ780 m)

^3He が手に入らない!?

- ・ 米国エネルギー省 (DOE)が、水爆用の ^3H を製造する際の副産物である ^3He を安定供給



世界規模の ^3He 供給危機

1988— ^3H の製造停止

1989—冷戦の終結 (ベルリンの壁崩壊)

2001—9.11同時多発テロ

- ・ 米国国土安全保障省 (DHS)がテロ対策として中性子検出器用 ^3He ガスを大量に使用し始める。

2007
まで—2~3万円/L, 年間供給量6-8万L

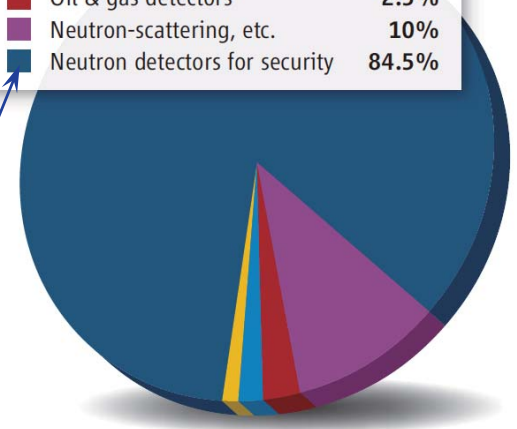
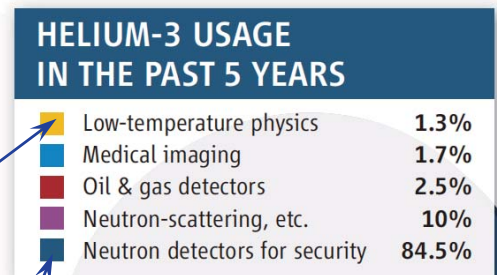
2009—年間供給量3.5万L (需要は21.3万L)

2010—50~60万円/L

- ・ 入手がかなり困難 (特に米国以外では)。
- ・ 米国議会下院科学技術委員会小委員会にて、 ^3He 供給問題の科学者ヒアリング (2010年4月)

低温物理の必要量は年間
0.3-0.5万L (^3He - ^4He 希釈
冷凍機、 ^3He 冷凍機)

代替中性子検出器の開発
が急がれる (BF₃ガス、
シンチレータ、...)

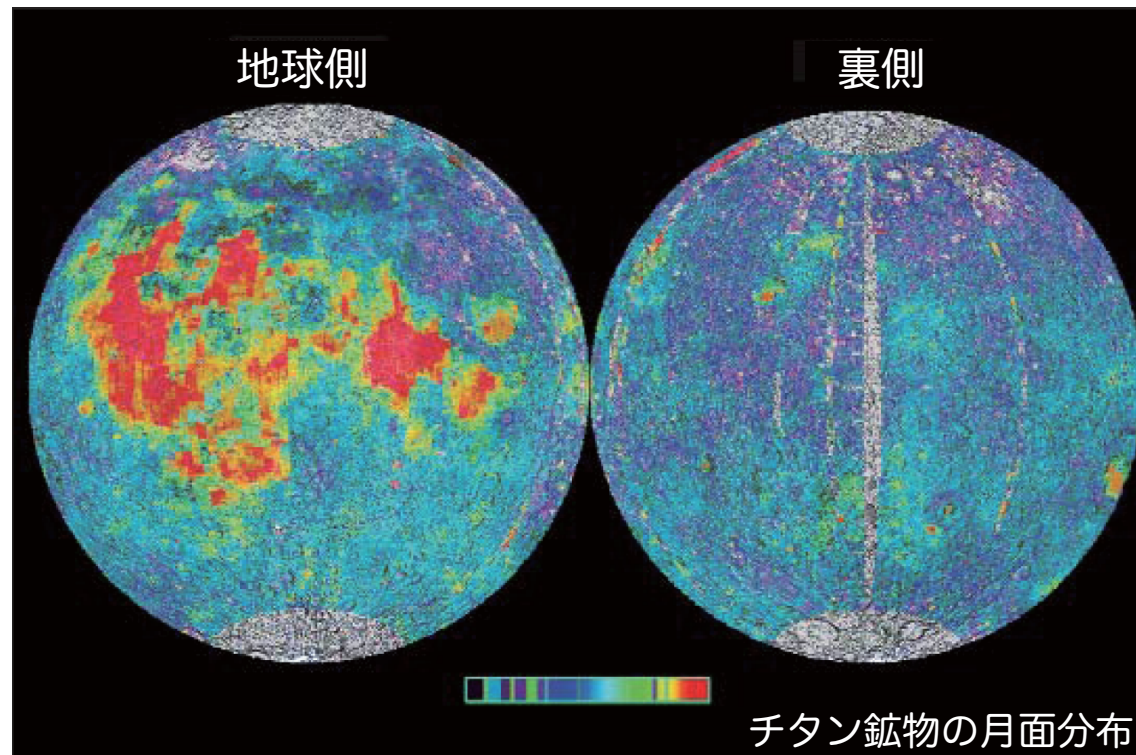


Science 326, 778 (2009)



月には大量の ^3He ガスが埋蔵されている !?

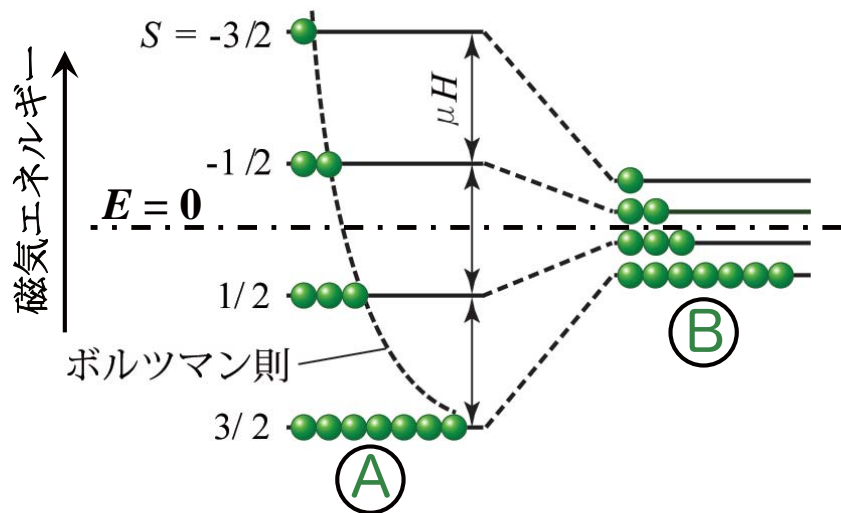
- 太陽風に含まれる ^3He が、数十億年の間、月の裏側の地表近くに大量に吸着されているはず。
- 将来、月面基地でこれを原料に核融合発電したり、地球に持ち帰る。



- ガス(He , O_2)を高効率で吸着するチタン鉱物は月の裏面には少ない。
- 含有量はせいぜい 10^{-8} (重量比)? ←核融合には十分?

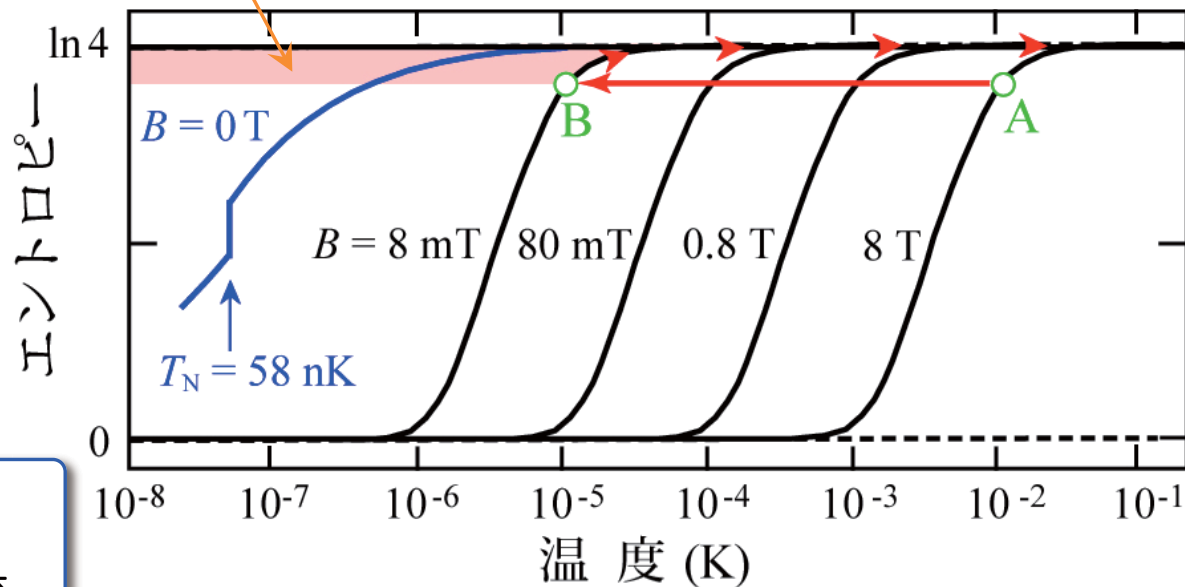
冷却法⑤ 断熱消磁冷却

スピン量子数3/2のゼーマン分裂



銅核スピン(スピン量子数3/2)のエントロピー

$$\Delta Q = \int_{S_f}^{\ln 4} T dS : \text{昇温過程での吸熱量}$$



A → Bへの断熱消磁過程で：

- エントロピーつまり分布 n_i や磁化 M は不変
 - 磁気エネルギー (ポテンシャルエネルギー) は増加
- $$E = \sum_{i=1}^{2S+1} n_i (i - S - 1) \mu H$$
- エネルギー保存則より内部エネルギーは減少つまり温度は下がる。

→ スピンが磁場に対して仕事をした

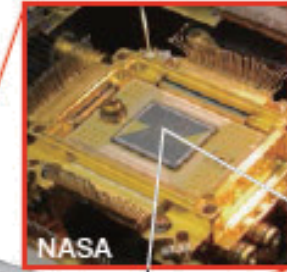
- 断熱過程 (S 一定) では $x = \mu H / k_B T$ が一定 (S は x のみの関数)
- いかに初期条件をよくするか ($\mu H_i / k_B T_i \gg 1$)
- 最終磁場を下げれば最低温度も下がるが、昇温も早い

眼を超低温に冷やすと遠くがよく見える

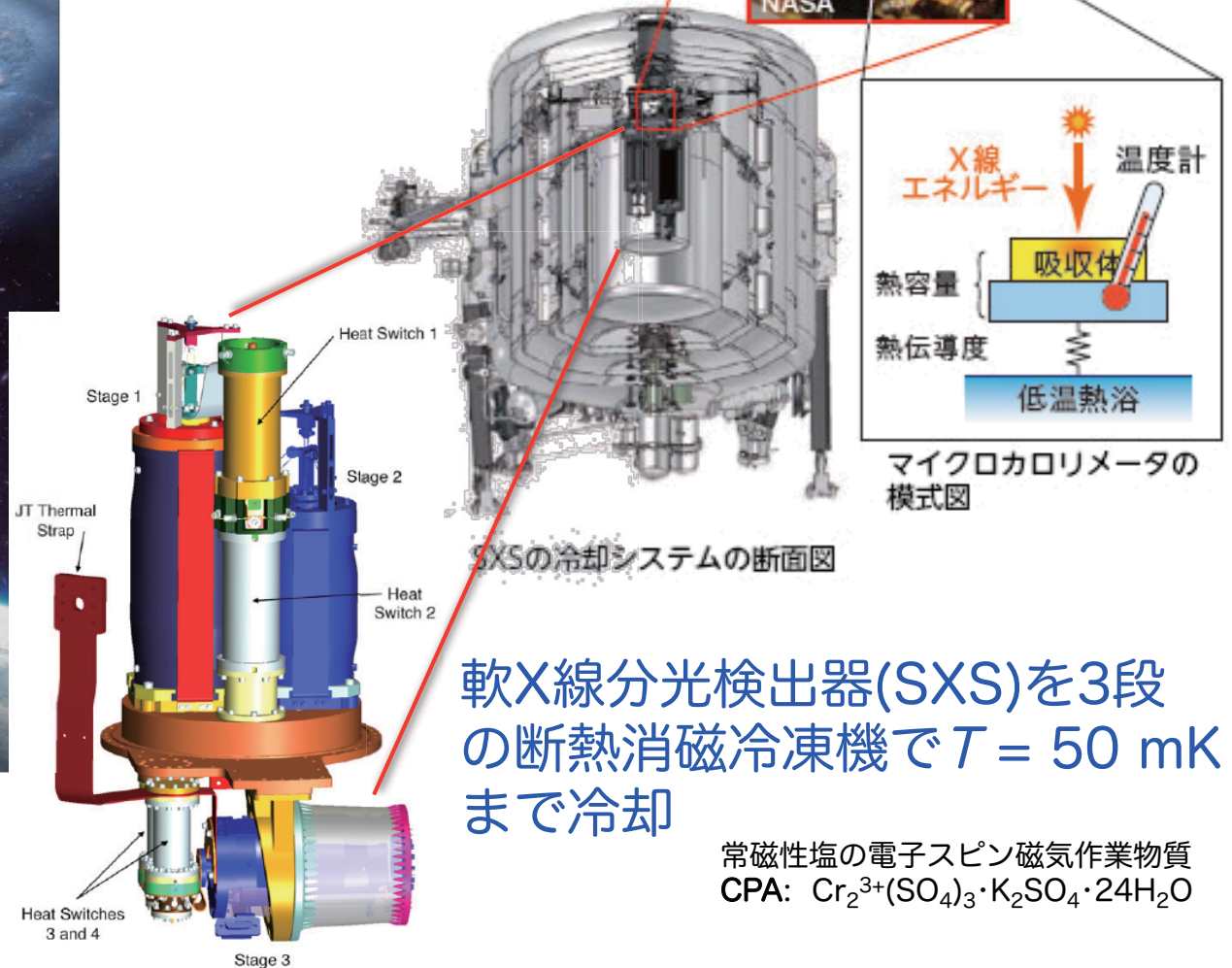


ガンバレ! ひとみ

SXSのマイクロカロリメータのセンサー部分



ASTRO-Hプレスキットより



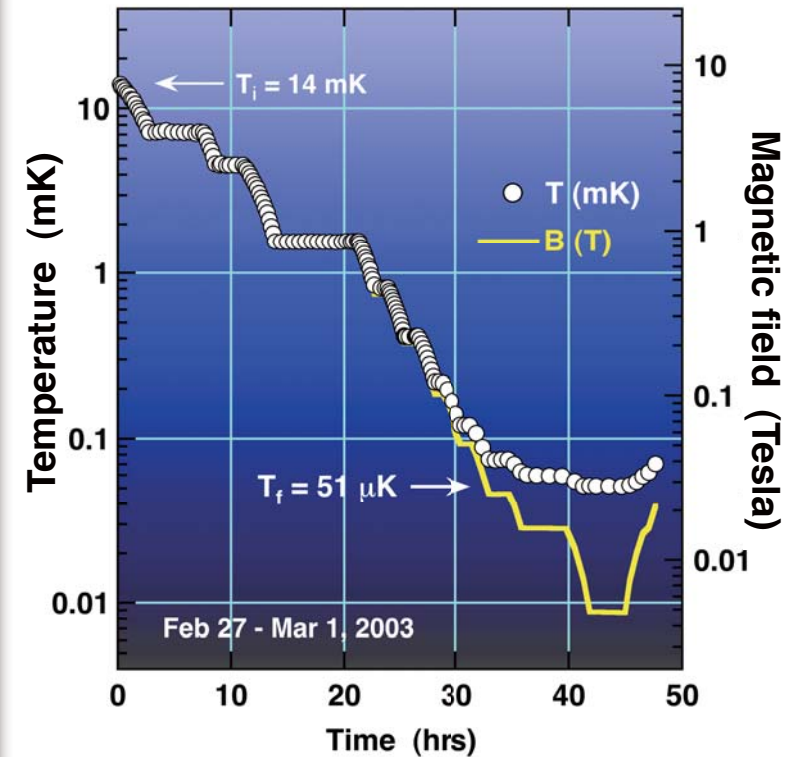
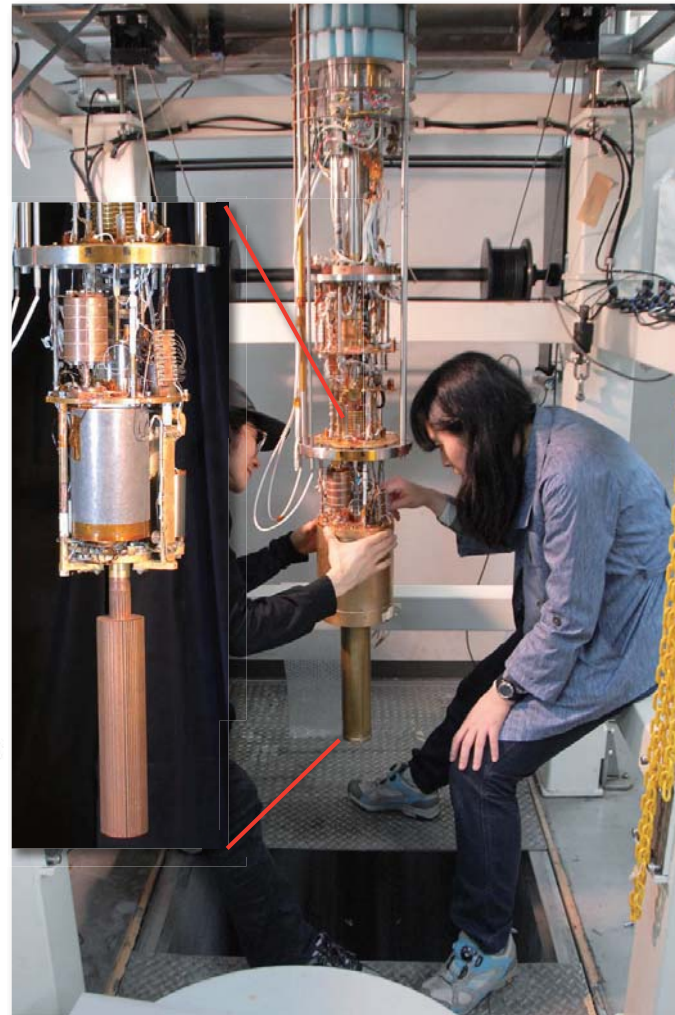
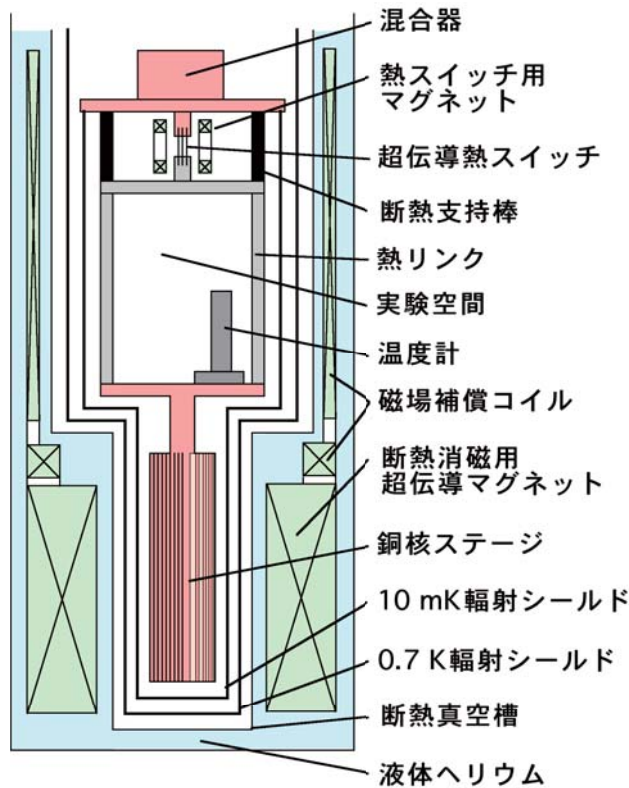
東大理学部の核断熱消磁冷凍機

$B_i = 8 \text{ T}$ (超伝導マグネット)

$T_i = 11 \text{ mK}$ (^3He - ^4He 希釈冷凍機)

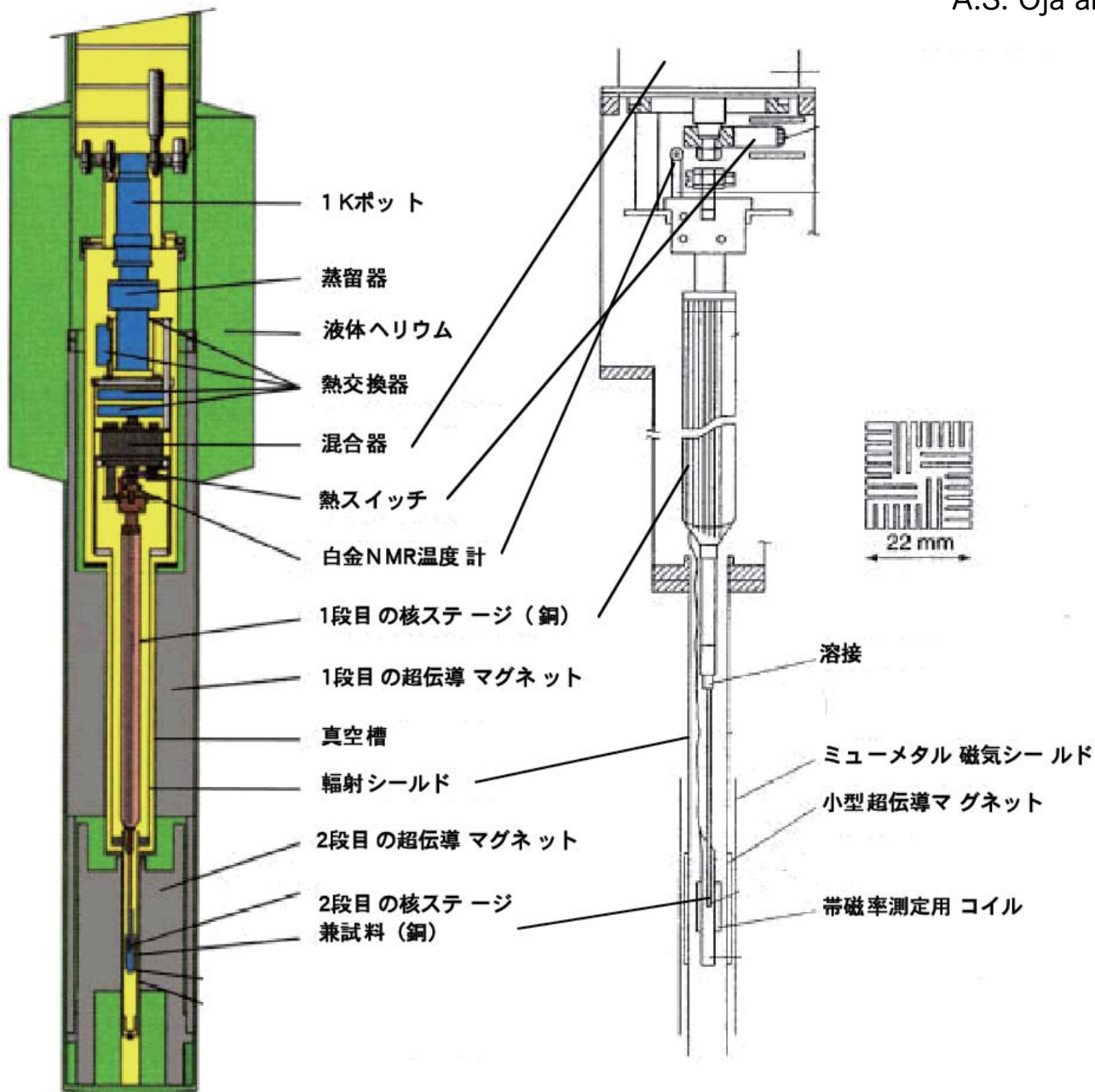
Y. Matsumoto et al., J. Low Temp. Phys. **134**, 61 (2004); Physica B **329-333**, 146 (2003)

最低到達温度 $T_f = 51 \mu\text{K}$
 $T \leq 200 \mu\text{K}$ を1週間保持



2 段核断熱消磁冷凍機

A.S. Oja and O.V. Lounasmaa; Rev. Mod. Phys. 69, 1 (1997)



ステップ1 :

1 段目ステージ (銅10モル) を
 $B_{1i} = 8 \text{ T}$ 、 $T_{1i} = 11 \text{ mK}$
 から断熱消磁して、2 段目ステージ
 (銅0.04モル) を
 $B_{2i} = 7.3 \text{ T}$ 、 $T_{2i} = 0.2 \text{ mK}$
 まで予冷する。

ステップ2 :

1 段目ステージをさらに消磁して、
 $B_{1f} = 20 \text{ mT}$ 、 $T_{2f} = 50\text{-}100 \text{ }\mu\text{K}$
 まで下げて、 τ_1 を長くし、2 段目ステー
 ジを種々の B_{2f} まで消磁する。

人類が作り出した最も (絶対値が) 低い温度

金属ロジウム (Rh) の核スピン温度

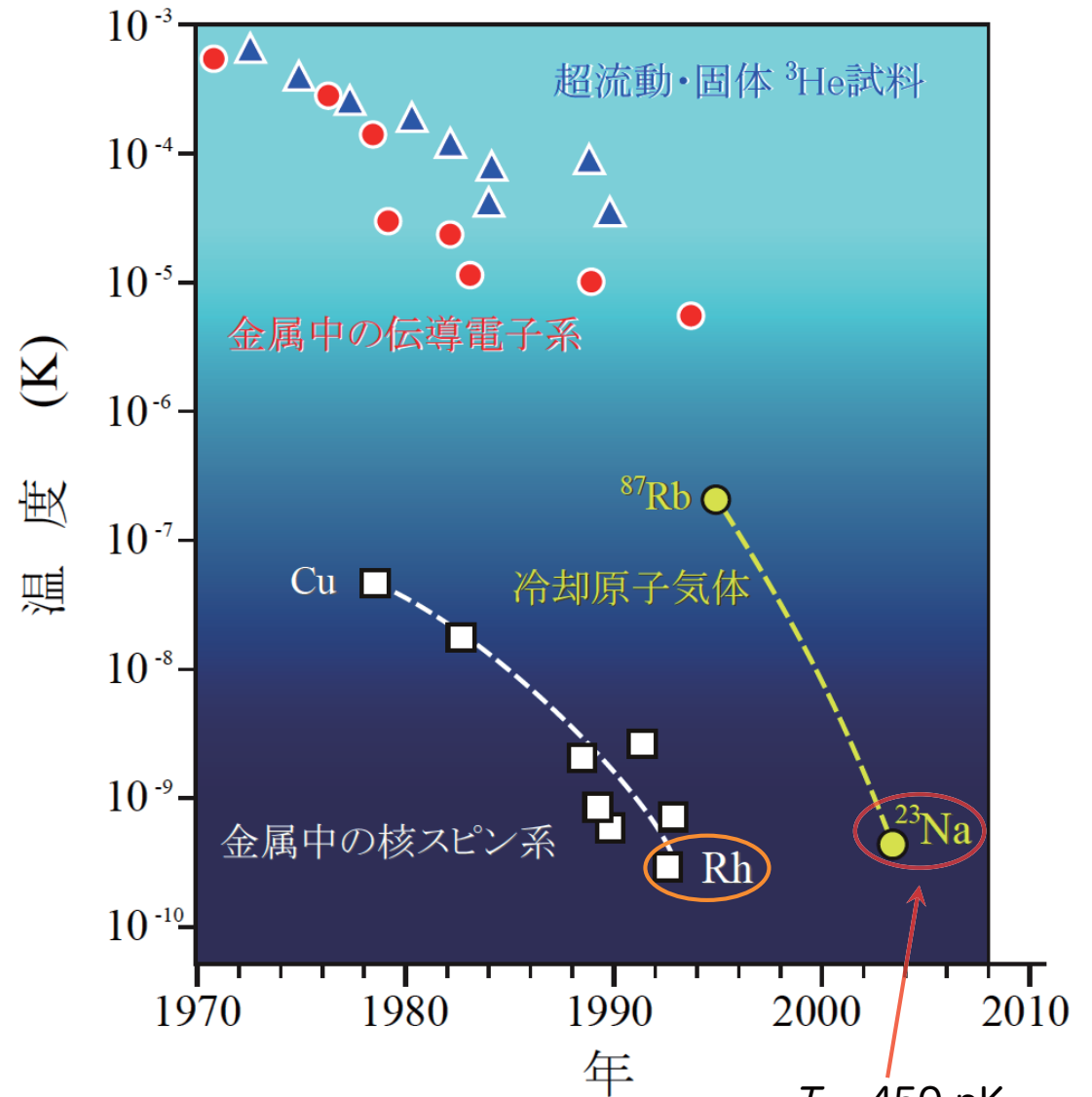
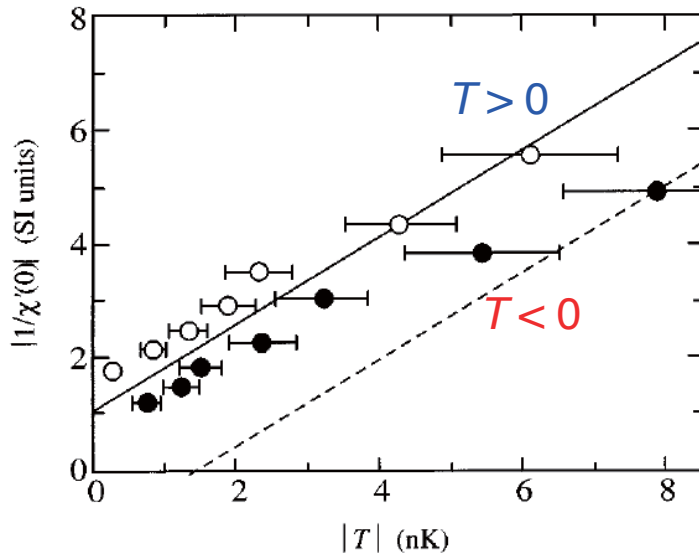
で達成:

P.J. Kakonen et al., Phys. Rev. Lett.
70, 2818 (1993)

$T_{\text{lowest}} = 280 \text{ pK}$ (正の温度)

$T_{\text{highest}} = -750 \text{ pK}$ (負の温度)

Rhの核帯磁率の温度変化



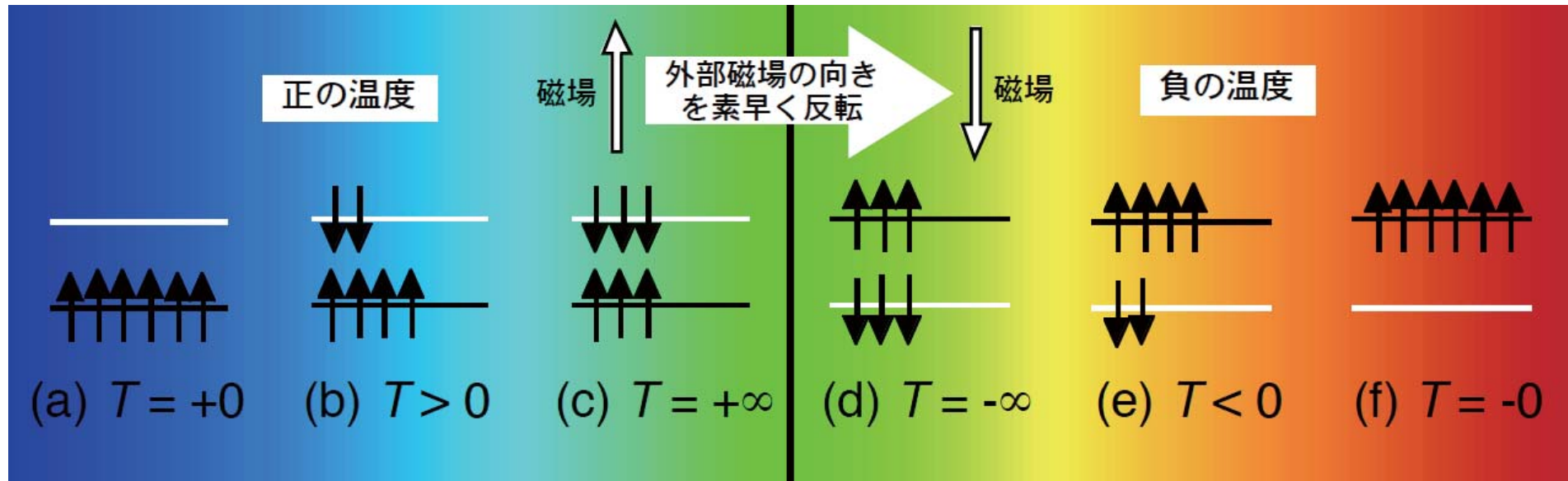
$T = 450 \text{ pK}$
(for 80 s)

Leanhardt et al.,
Science 301, 1513 (2003)

負の温度

作成方法：非常に短時間 (\ll スピン-スピン緩和時間 τ_2) のうちに外部磁場の方向を反転させる。

- τ_2 より短い時間内では、熱力学的に安定。
- 負の温度での絶対零度はエネルギーが最大（エントロピーはやはりゼロ）

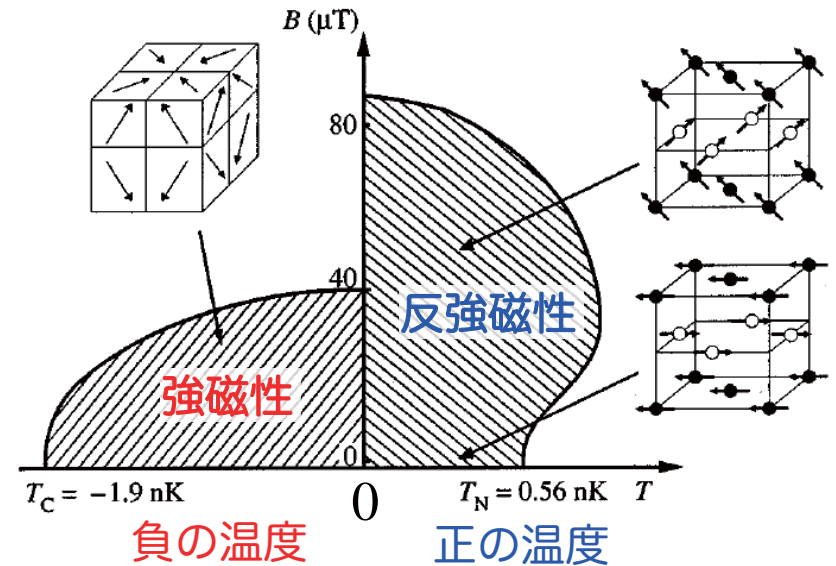


負の温度は別世界

銀の核スピン磁性は正負の温度で異なる

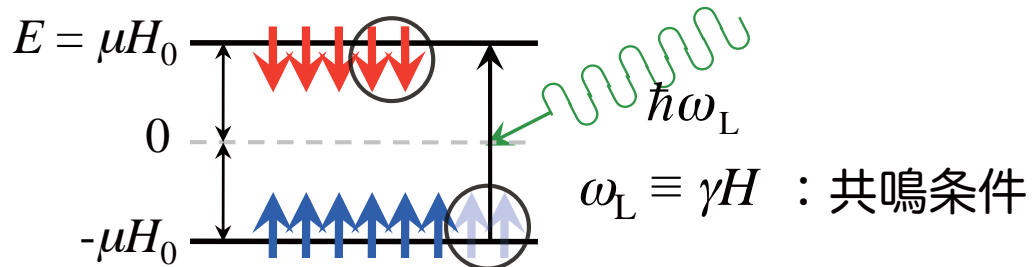
正の温度では、0.56 nKで反強磁性秩序

負の温度では、-1.9 nKで強磁性秩序



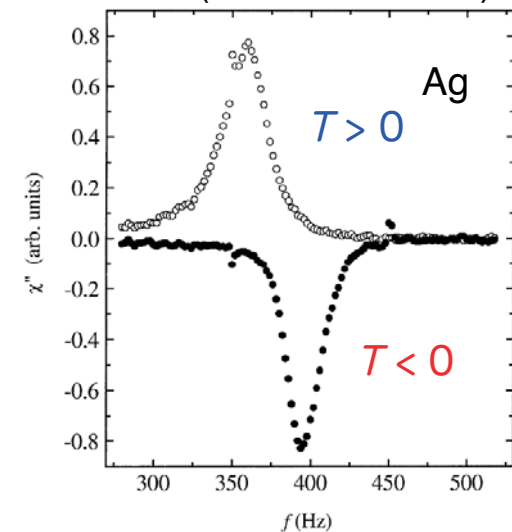
負の温度を下げるにはエネルギーを供給する必要がある

スピン系にエネルギー $\hbar\omega_L$ の電磁波を照射すると、共鳴吸収が起こり、upスピン状態からdownスピン状態に励起される。



$T > 0$ (核磁気共鳴吸収)

$T < 0$ (核磁気共鳴放出)



温度 (エネルギー) スケールでみた自然界

低温環境の応用

- ・ 熱擾乱の低減 (エネルギー・空間分解能の向上)
- ・ 超高真空環境の獲得
- ・ 超伝導の応用

低温物理学

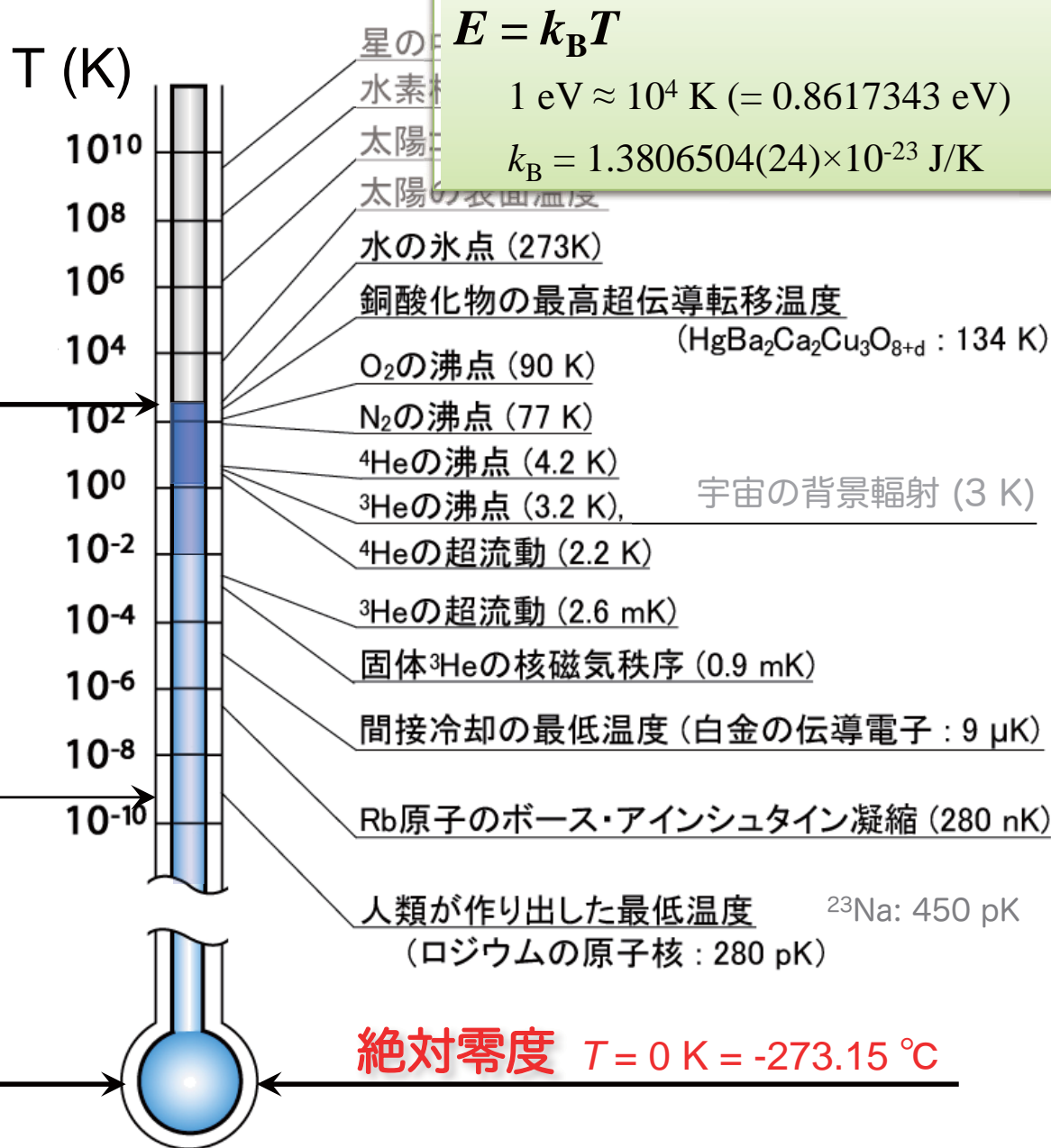
室温

低温 ($0.3 \leq T \leq 77 \text{ K}$)

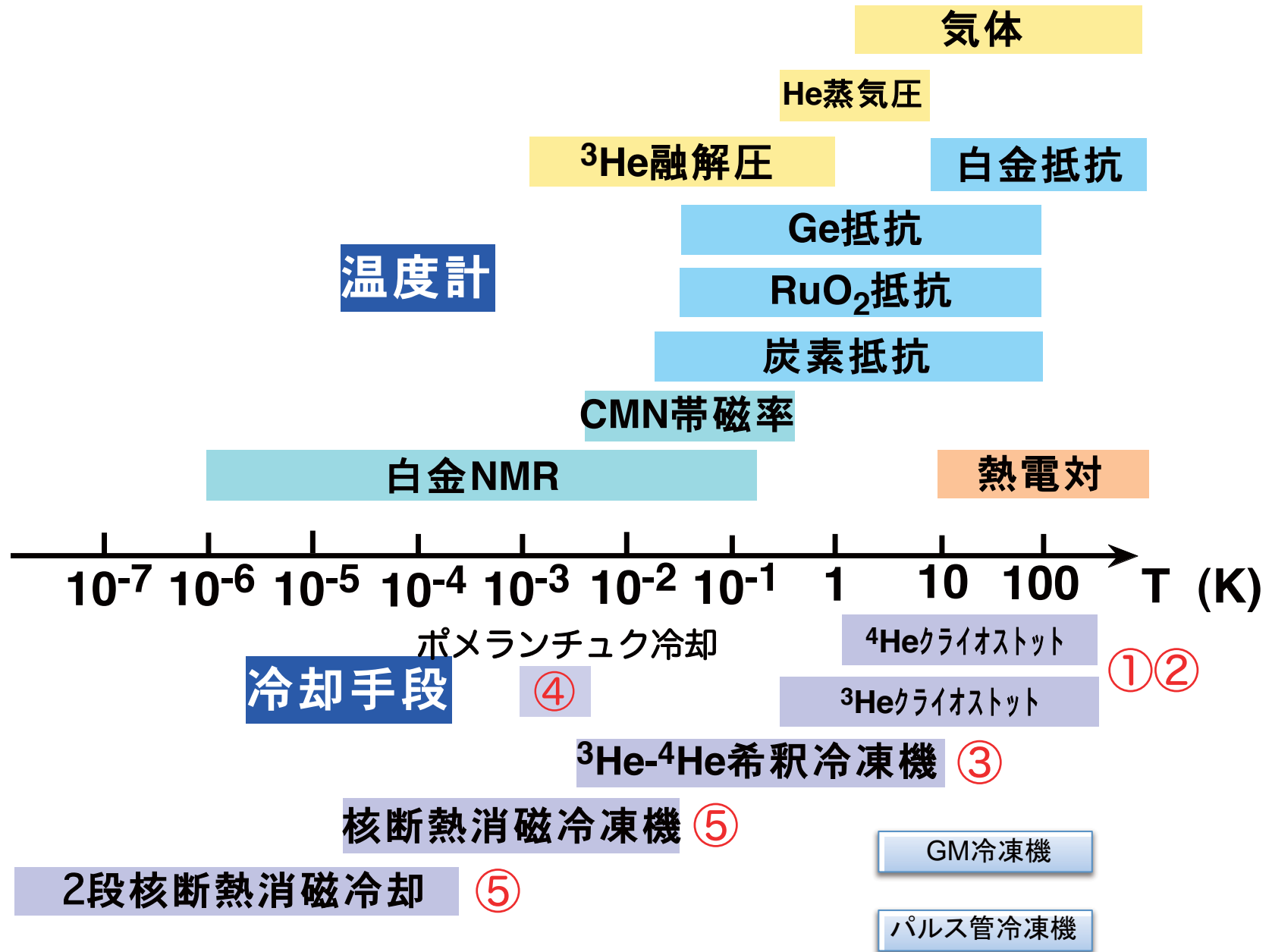
極低温 ($5 \leq T \leq 300 \text{ mK}$)

超低温 ($T \leq 5 \text{ mK}$)

(到達不能)

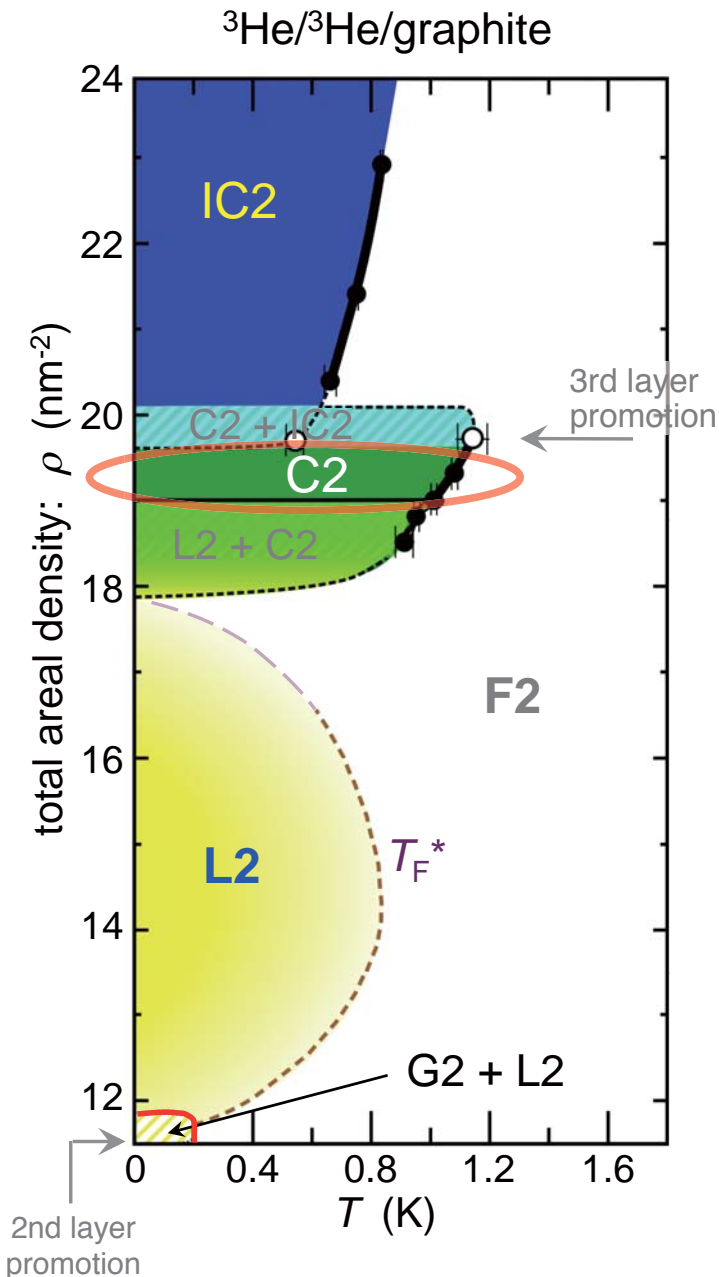


種々の冷却手段と温度計



最新の研究 1 : 二次元 ^3He と ^4He で量子液晶相を見出す

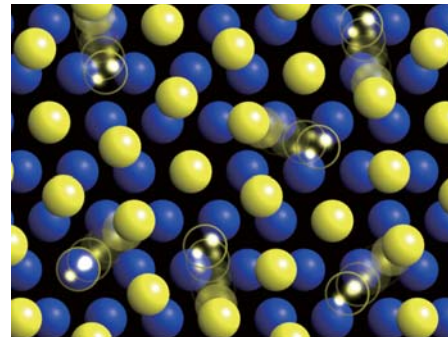
S. Nakamura et al., arXiv:1406.4388v2



$^3\text{He-C2}$ phase

量子液晶

2. commensurate solid with **zero-point defectons**

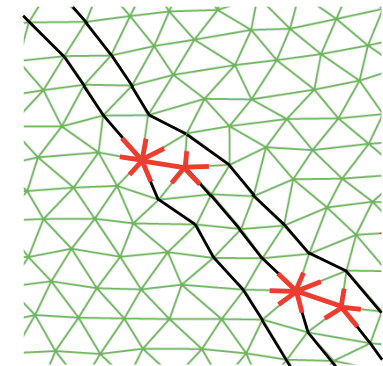


with **translational LRO**

localized spin models are applicable?

3. **quantum hexatic phase**

5-fold and 7-fold disclination pairs



OR

: spontaneous creation of mobile 5-fold and 7-fold disclination pairs, i.e., free dislocations, at $T = 0$.

cf) K. Mullen et al., PRL **72**, 4013 (1994).
V. Apaja and M. Saarela, Europhys. Lett. **84**, 40003 (2008).

without **translational LRO**

(orientational quasi LRO)

super-heavy Fermi liquid?

超固体の探索研究

1969年に理論予測された
物質の新しい状態

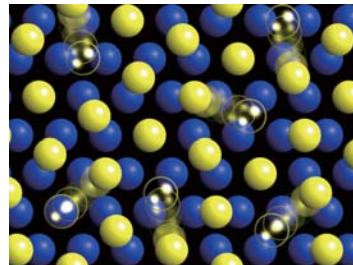
A.F. Andreev and I.M. Lifshitz, Sov. Phys. JETP **29**, 1107 (1969)



Alexander F. Andreev



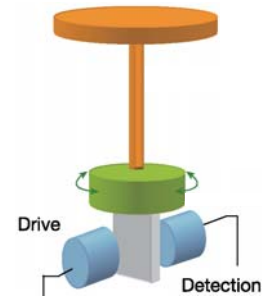
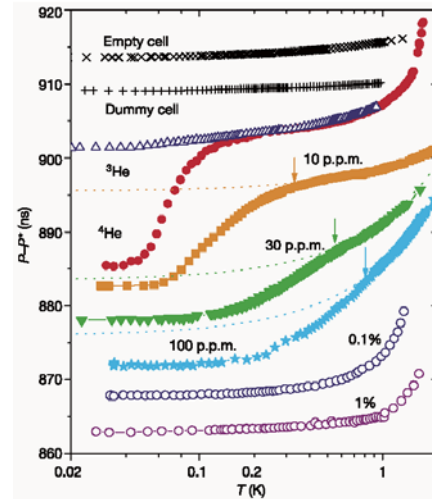
Ilya M. Lifshitz



ボース固体中の
零点空格子点のBEC

Born in 2004 (hcp ^4He)

E. Kim and M.H.W. Chan, Nature **427**, 225 (2004);
Science **305**, 1941 (2004)



torsional oscillator



Died (?) in 2012

Kim and M.H.W. Chan, PRL **109**,
「超固体」に関する発表論文数 (12)

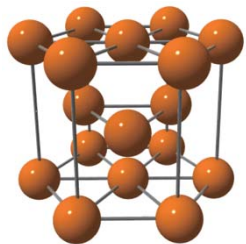


Chan

並進対称性の破れ

+

ゲージ対称性の破れ



結晶の周期性

超固体

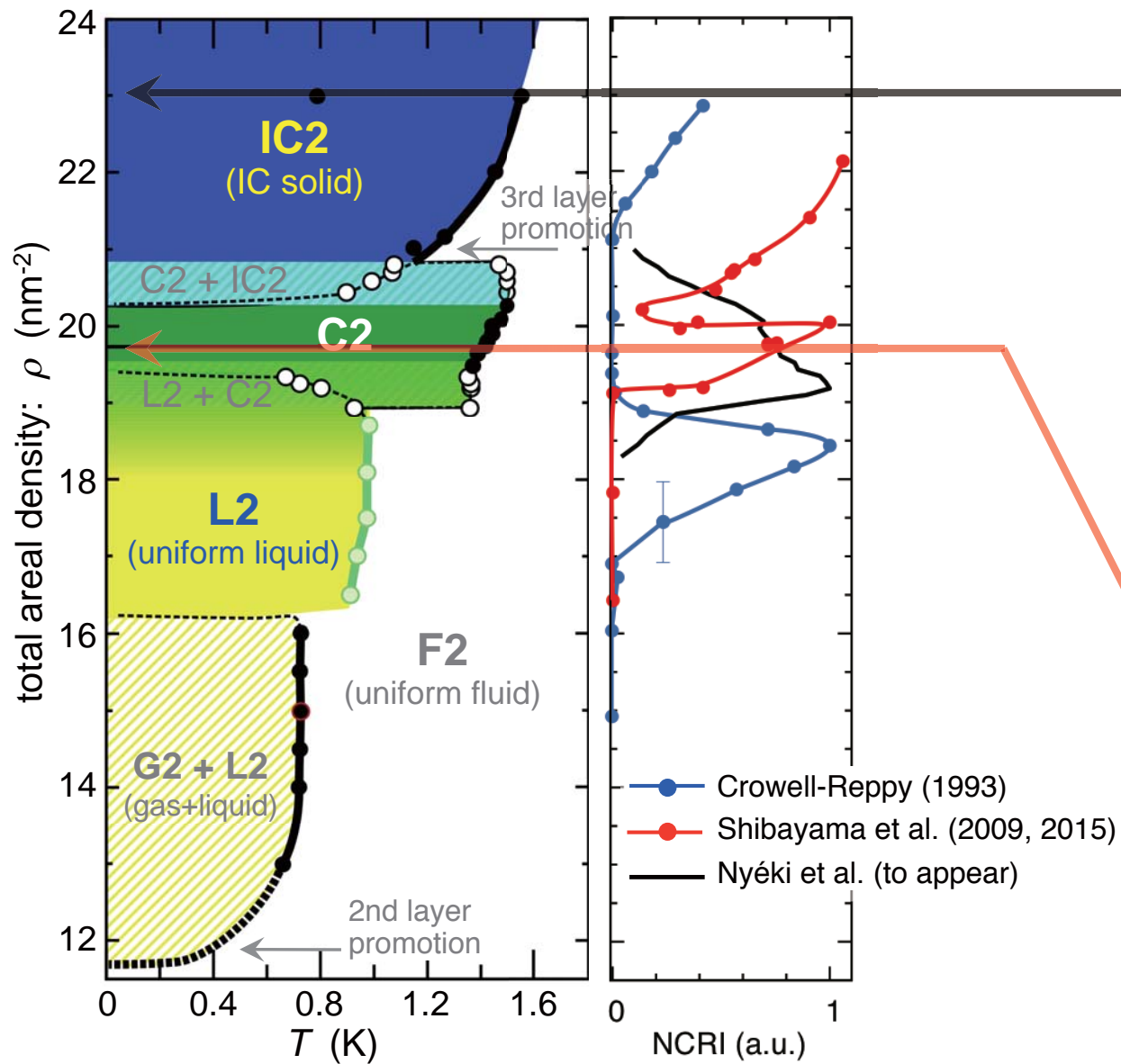


超流動性

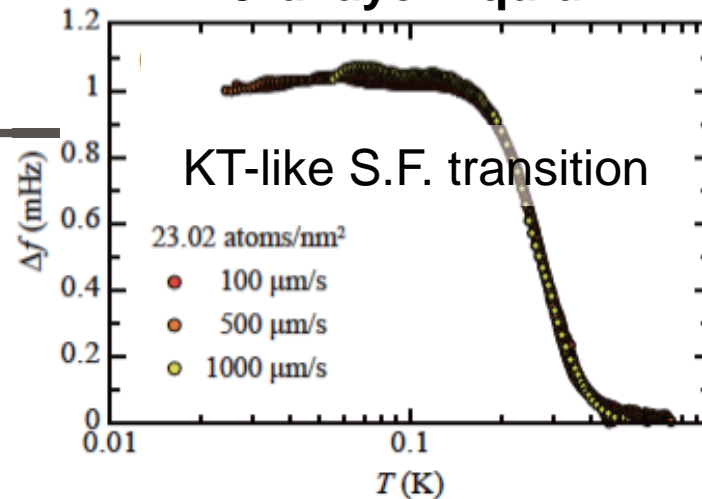
1. 気体
2. 液体
3. 固体
4. 超流体
5. 超固体

2次元⁴Heの量子液晶相で超固体現象を観測しつつある

NCRI
(TO exp. with Grafoil)

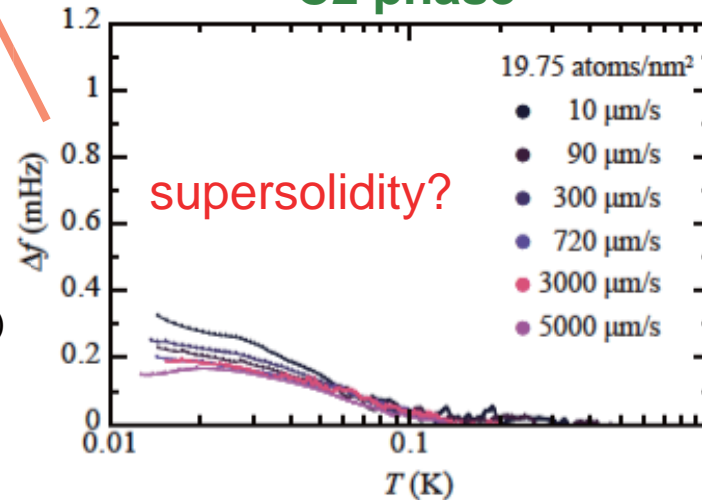


3rd layer liquid



Y. Shibayama et al. (2015)

C2 phase



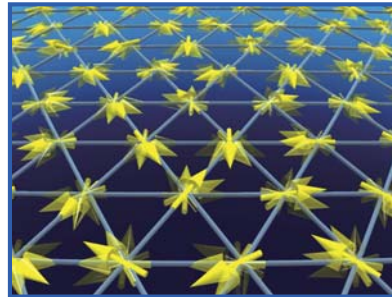
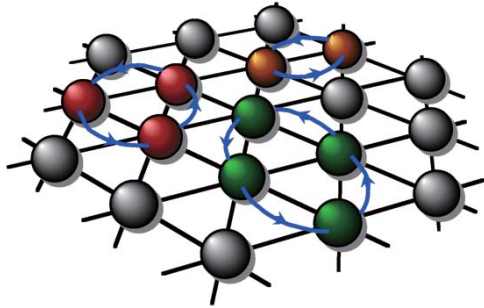
$\Delta\rho_s/\rho \approx 0.01$ (too small?)

低密度2次元固体³Heの量子スピン液体状態

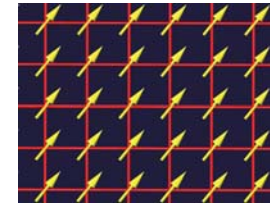
多体リング交換
 + 2次元三角格子
 + 量子スピン($S=1/2$)



極度にフラストレートした新奇な磁気基底状態

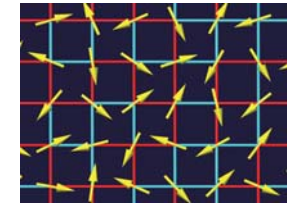


ギャップレス量子スピン液体



スピン固体(反強磁性/強磁性)

磁気素励起は
 マグノン(ボソン)

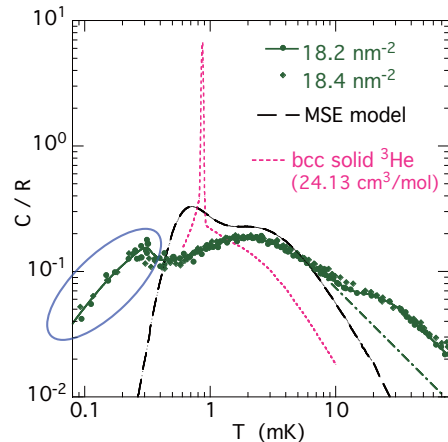


スピングラス

残留エントロピー

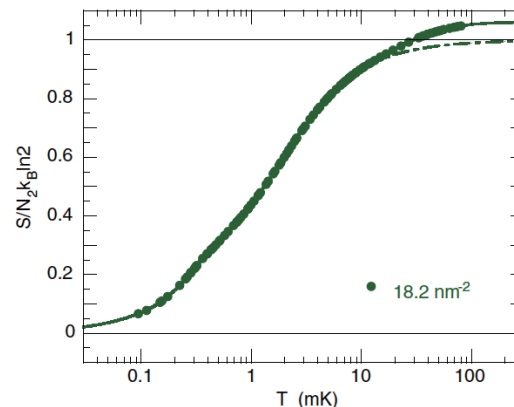
磁気比熱測定ではじめて発見 (1997)

- **ダブルピーク**
- 励起がギャップレス ($C \propto T$)



K. Ishida et al., PRL 79, 3451 (1997)

全エントロピー変化
 $\Delta S \approx N_2 k_B \ln 2$

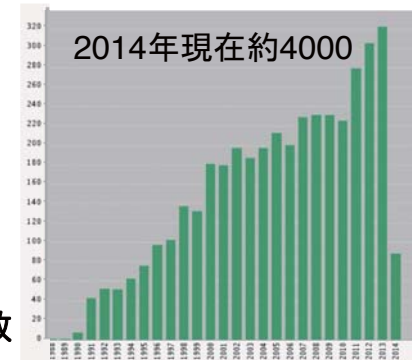


量子スピン液体とは？

絶対零度でも
 各サイトのスピンの期待値がゼロ
 (スピン座標の量子液体)

その後、有機物、遷移金属酸化物の電子スピン系でも同様の量子スピン液体状態の実験報告が相次ぐ。

「量子スピン液体」に関する発表論文数



低温極限で本当に $C \propto T$ なのか？