

スピンの目で見える超低温のミクロの世界

MRI顕微鏡の開発とスピンの目で見える磁氣的構造

古典的世界（室温）から量子的世界（超低温）へ

京都大学 大学院理学研究科

低温物質科学研究センター

水崎 隆雄

目次

§1 古典力学と量子力学

§2 量子液体ヘリウムと超流動
(絶対零度でも凍らないヘリウム)

§3 絶対零度を目指して

§4 磁気共鳴とMRI顕微鏡について

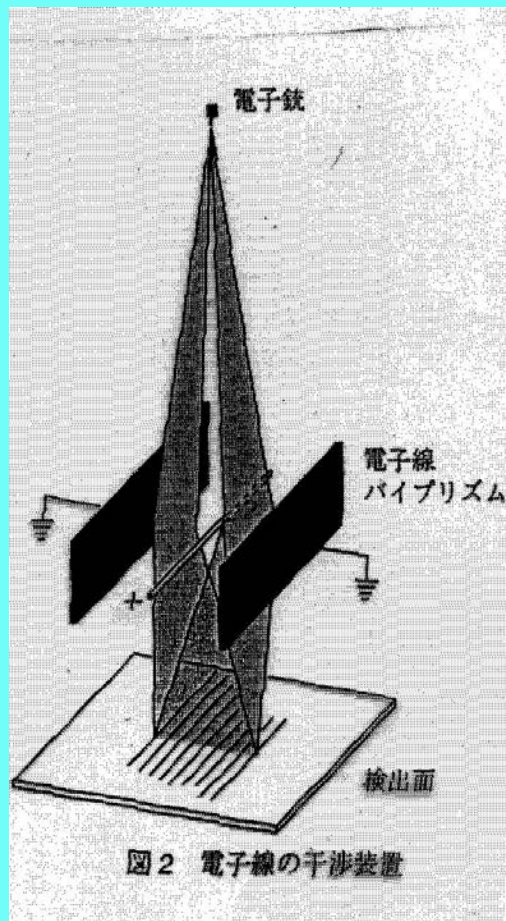
§5 超低温で見える量子の世界

§ 1 古典力学から量子力学へ

量子力学 1920年代

シュレディンガー、ハイゼンベルグ

粒子の波動性



粒子性:

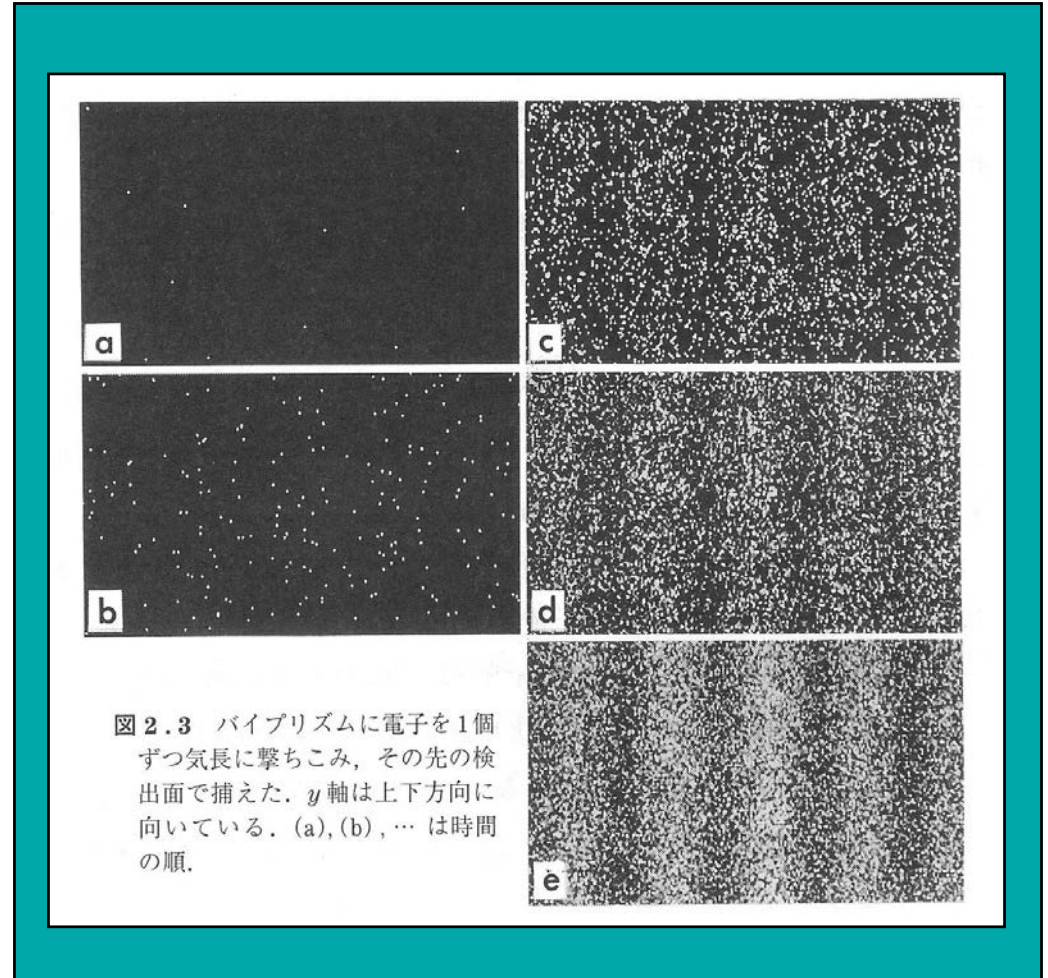
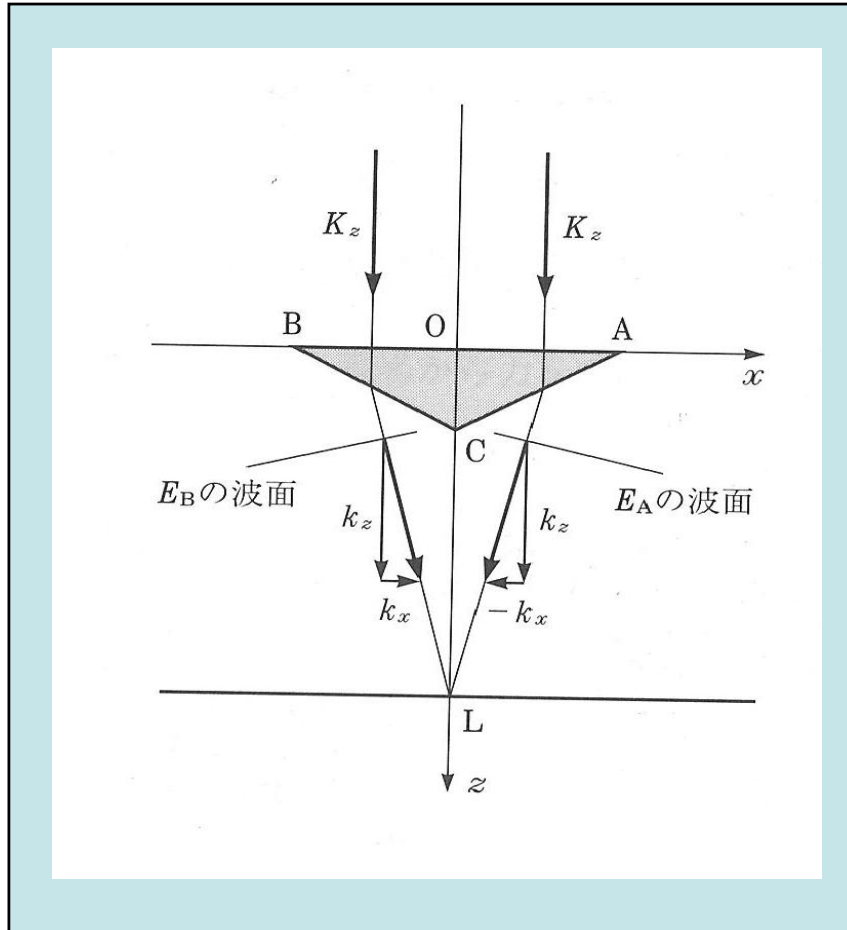
電子(質量= $9.1093897 \times 10^{-31}$ kg,

電荷= $1.60217733 \times 10^{-19}$ C)

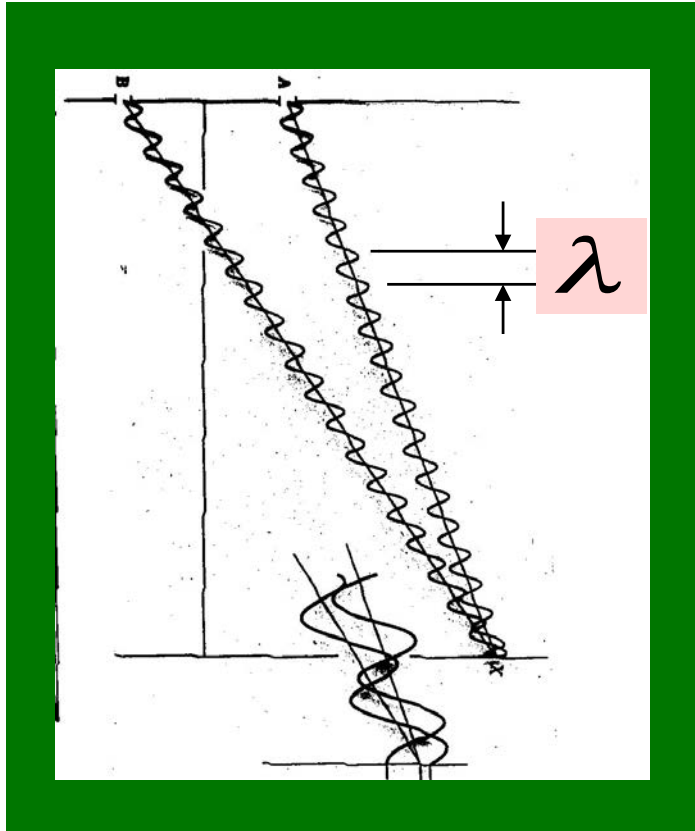
電子を1個、1個、独立に入射してみましよう。

(日立/外村)

電子ビームの干渉パターン



ド・ブロイの物質波 (電子の波長は)



$$\lambda = \frac{h}{p}$$

h : プランク定数 = $6.6 \times 10^{-34} J \cdot \text{sec}$
(量子力学の世界の定数)

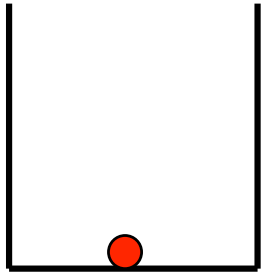
p : 運動量 ($\sqrt{2meV}$)

$p^2/2m = eV$, V : 加速電圧

(ド・ブロイ / 1929 年 ノーベル賞 / 電子の波動性の発見)

● 不確定原理 (ハイゼンベルグ)

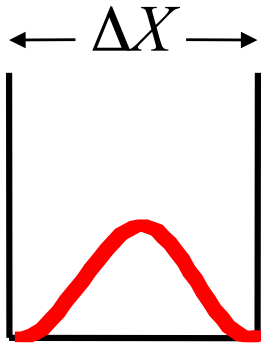
古典力学



$$X = 0$$

$$v = 0$$

量子力学 (波動性)

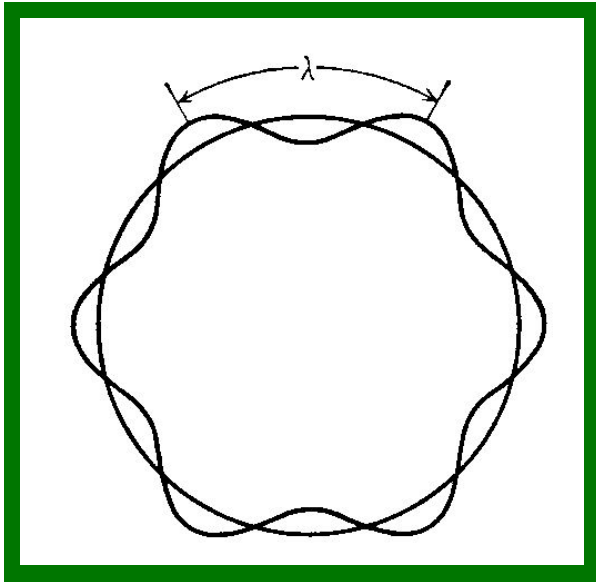


$$\psi(X) \propto \cos\left(\frac{2\pi X}{\Delta X}\right)$$

$$\Delta P = \frac{h}{\lambda} \Big|_{\lambda=\Delta X} = \frac{h}{\Delta X} \quad (\text{ド・ブロイ波長の式より})$$

$$\Delta P \cdot \Delta X = h \quad (\text{ハイゼンベルグの不確定原理})$$

● 量子化 (とり得る状態がとびとびになる)

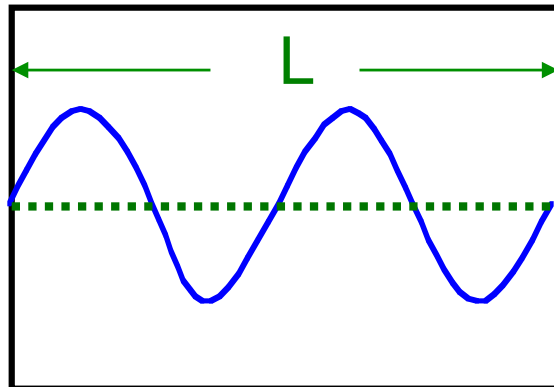


輪の上を伝わる波
 (波長は輪の長さの整数分の1
 でなければならない)

$$\lambda_n = \frac{L}{n} \quad , \quad \left(P = \frac{h}{\lambda} \right) \quad (\text{ド・ブROI波長})$$

$$P_n = \frac{n \cdot h}{L} \quad , \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

箱の中の粒子



(周期条件)

$$E_n = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{P^2}{2m} \quad , \quad (P = m v)$$

$$= \frac{h^2}{2mL^2} (n)^2$$

● 量子統計力学

同じ種類の(区別出来ない)粒子が多数個の系

2個の粒子の場合を考える

$$\begin{aligned}\psi(X_1, X_2) &= P \cdot \psi(X_2, X_1) \\ &= P \cdot P \psi(X_1, X_2) \\ &= P^2 \psi(X_1, X_2)\end{aligned}$$

$$P^2 = 1, \quad \boxed{P = \pm 1}$$

フェルミ粒子

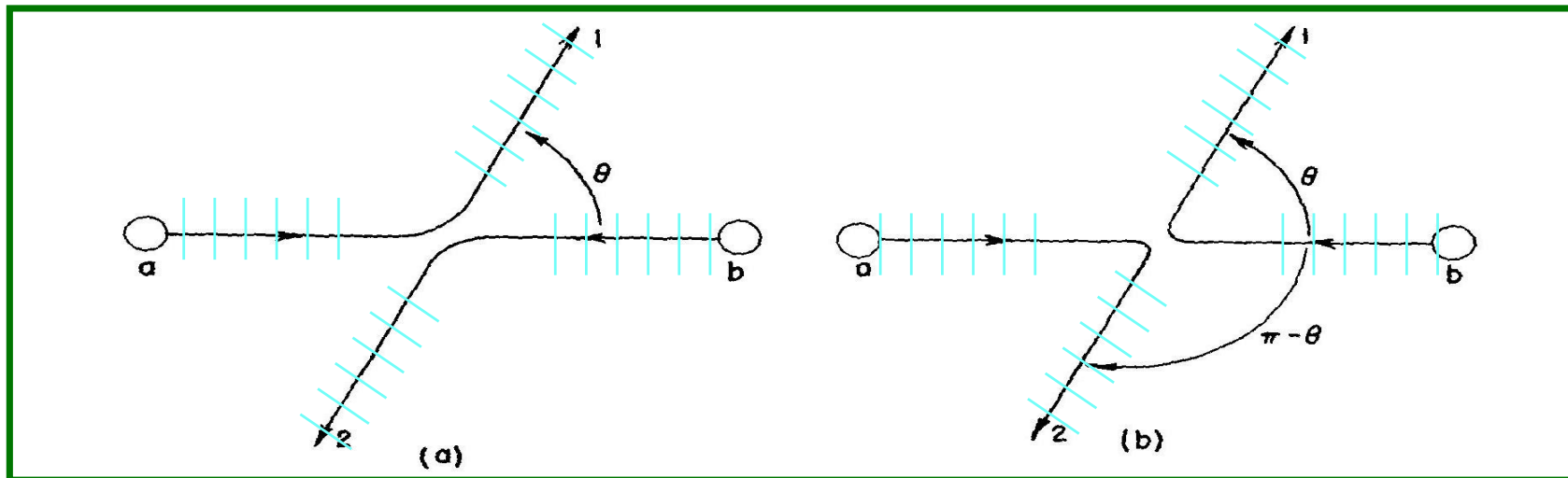
$$\psi(X_1, X_2) = -\psi(X_2, X_1)$$

ボーズ粒子

$$\psi(X_1, X_2) = \psi(X_2, X_1)$$

(この世の中には2種類しかない)

同じ種類の2個の粒子の衝突



$$\psi_a(1)\psi_b(2)$$

$$\psi_a(2)\psi_b(1)$$

粒子は波である \Rightarrow 波の性質：重ね合わせ

フェルミ粒子の場合

$$\begin{aligned}\psi_F(1, 2) &= -\psi_F(2, 1) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \psi_a(1)\psi_b(2) - \psi_a(2)\psi_b(1) \}\end{aligned}$$

ボーズ粒子の場合

$$\begin{aligned}\psi_B(1, 2) &= \psi_B(2, 1) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \psi_a(1)\psi_b(2) + \psi_a(2)\psi_b(1) \}\end{aligned}$$

今、同じ状態($a = b$)に粒子 1 と粒子 2 が同時に存在するとすると、

- **ボーズ粒子の場合、**

$$\psi_B(1, 2) = \sqrt{2}\psi_a(1)\psi_a(2)$$

(同じ状態に何個入っても良い)

- **フェルミ粒子の場合、**

$$\psi_F(1, 2) = 0$$

(同じ状態には2個入れない)

パウリの排他律

まとめ

粒子は波である(量子力学)

1) 不確定性原理-位置と運動量を同時に指定出来ない

2) エネルギー(運動量)はとびとびの値しか取れない

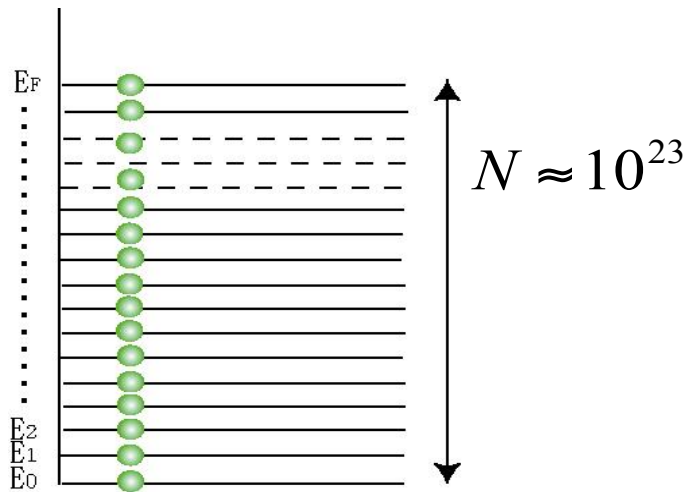
3) 量子統計

ボース粒子 → 同じエネルギーの状態に何個でも入れる

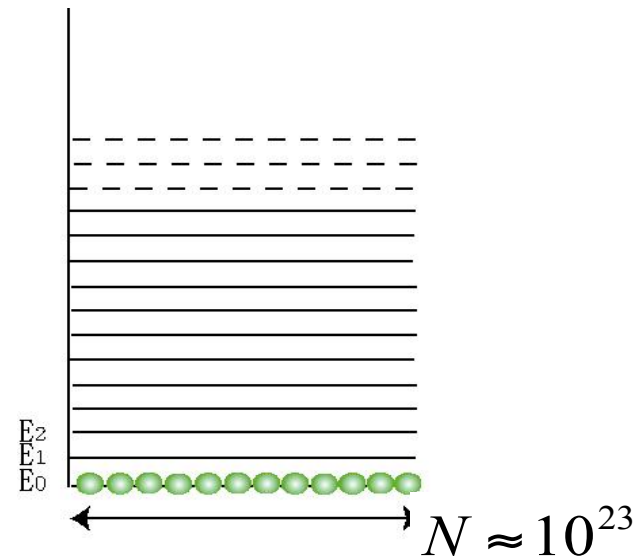
フェルミ粒子 → 同じエネルギーの状態には

1個しか入れない

$T = 0 \text{ K}$ では



フェルミ粒子
(パルリ排他律)



ボーズ粒子

「箱の中には **N 個の同じ粒子**がある」

- 箱の中に一様に分布 (粒子の波動性)
- エネルギー (運動量) がとびとびの値
- 量子統計

ボース粒子のBose-Einstein凝縮(BEC)

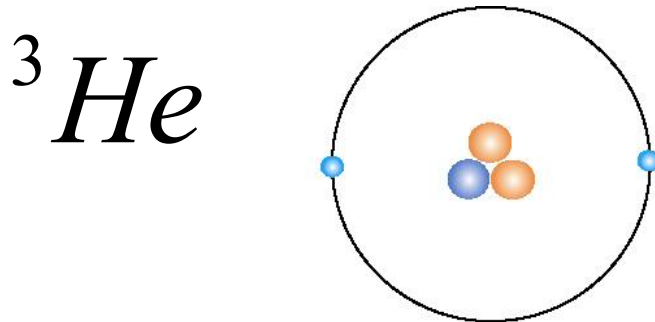
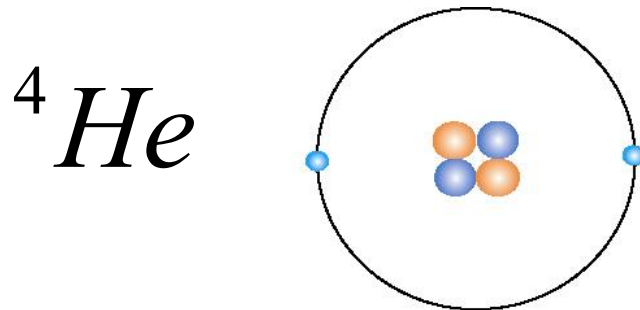
§ 2 液体ヘリウムと超流動

絶対に凍らないヘリウムに何が起こる

か？

2-1. ヘリウム (希ガス)

安定な同位体 ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$



陽子	2コ
中性子	2コ
電子	2コ

フェルミ粒子 6コ

${}^4\text{He}$ はボース粒子

陽子	2コ
中性子	1コ
電子	2コ

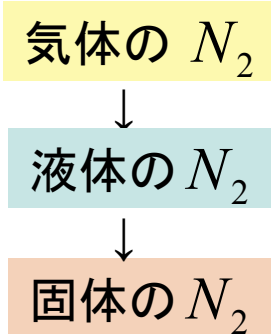
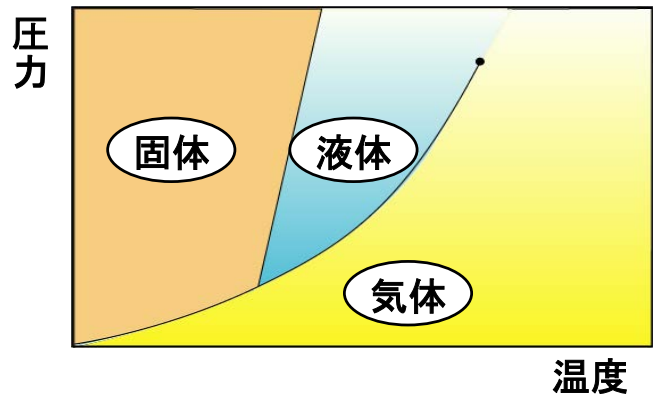
フェルミ粒子 5コ

${}^3\text{He}$ はフェルミ粒子

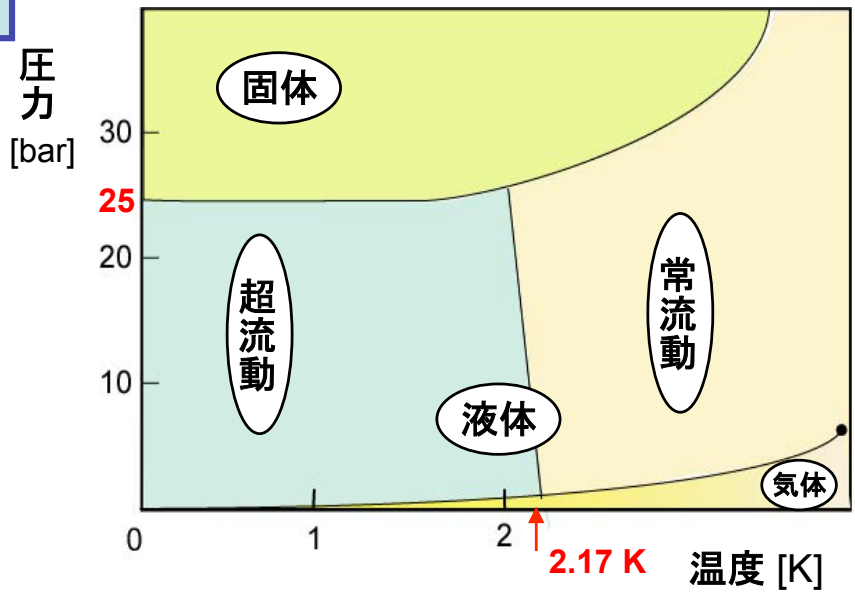
ボース粒子の例 : 光 フォトン (光子)
音 フォノン

He は $T = 0$ Kでも液体である(固体にならない)

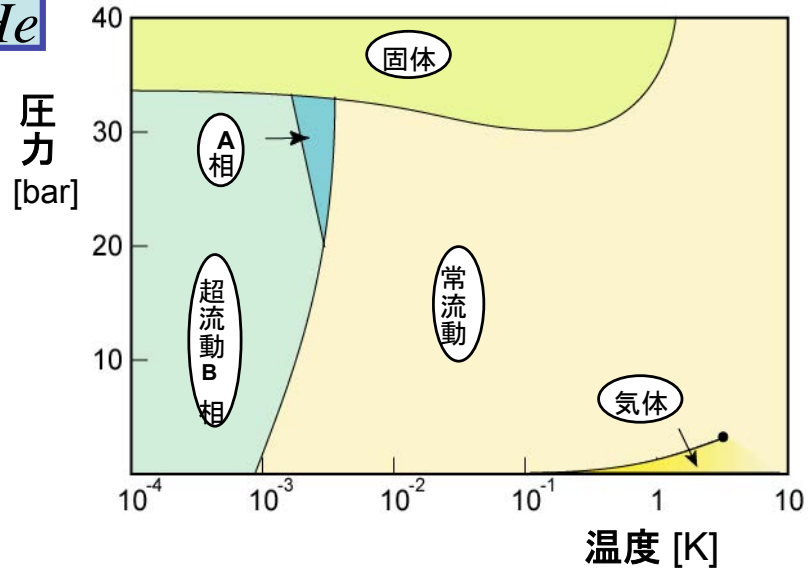
普通の物質



4He



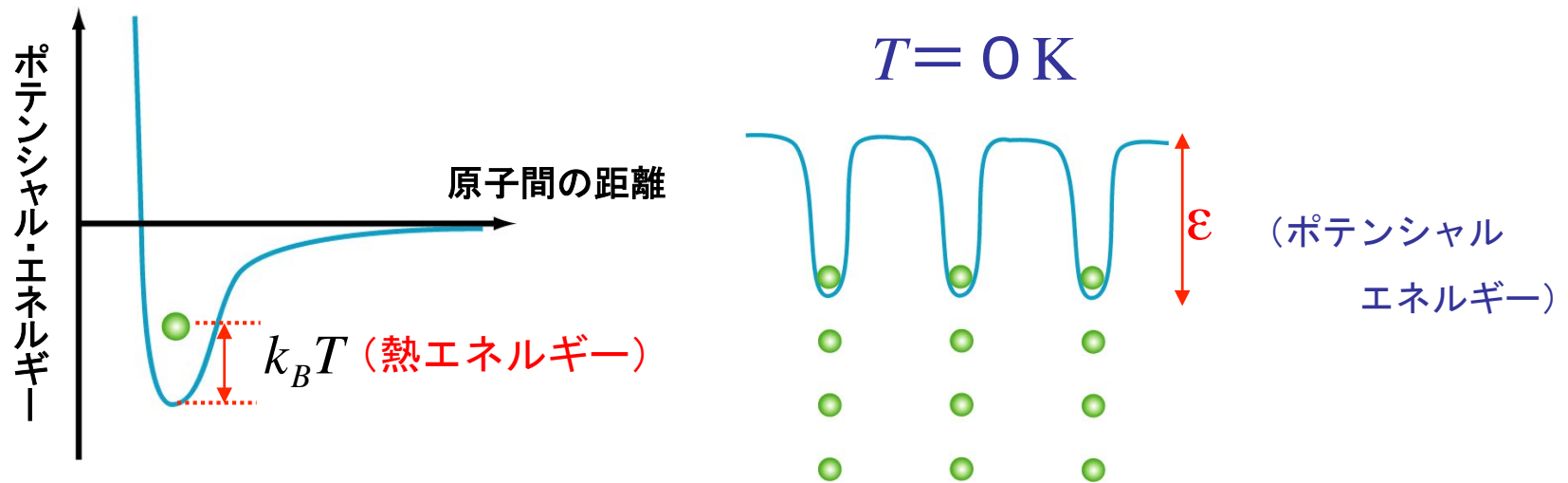
3He



4He は25気圧以下では $T = 0$ K まで液体である

2-2. He はなぜ絶対零度 ($T = 0 \text{ K}$) で液体なのか?

原子(分子)の間に働く力(相互作用)



全ての物質は低温で固体になる
(Heは例外)

(古典力学) \longleftrightarrow (粒子は衝突しない)

量子力学で融けている液体ヘリウム

量子力学 ⇒ 不確定性原理 $\Delta X \cdot \Delta P \sim \hbar$

粒子の位置が決まる

(ポテンシャルエネルギー最小)

運動量が不確定

$\Delta X \sim \sigma$ (液体 He の原子間距離)

$$\Delta P \sim \frac{\hbar}{\sigma}$$

$$E_0 = \frac{\Delta P^2}{2m} = \frac{1}{2m} \left(\frac{\hbar}{\sigma} \right)^2$$

$$\frac{\varepsilon}{E_0} \sim 1 \leftarrow H\theta \text{ の場合}$$

(量子力学の効果)

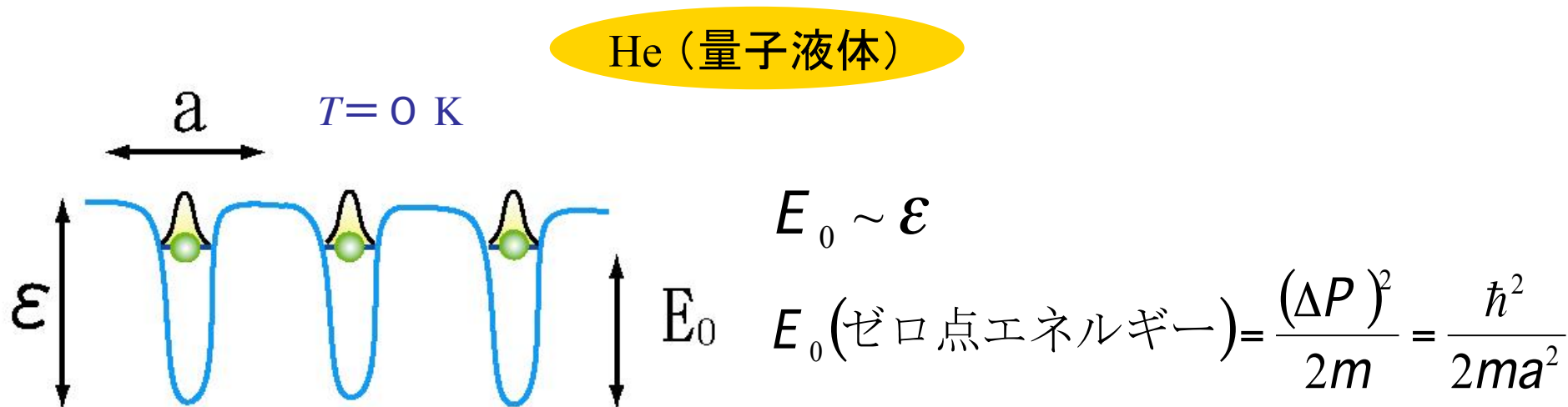
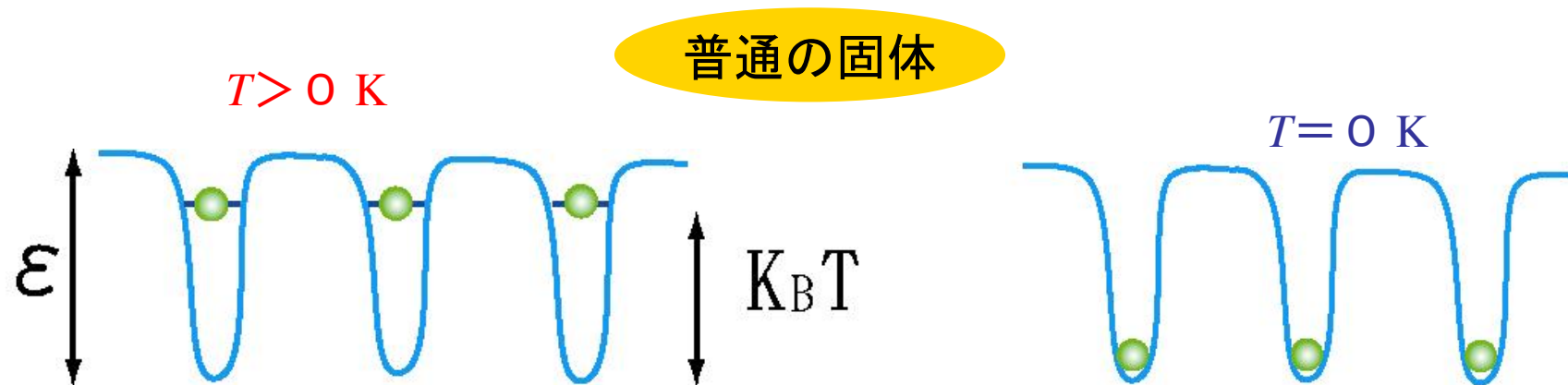
$$\frac{\varepsilon}{E_0} \gg 1 \leftarrow \text{普通の固体}$$

(古典力学)

E_0 (ゼロ点エネルギー) - 量子力学

$H\theta$ の場合は $\begin{cases} \varepsilon & \text{が小さい(希ガス)} \\ m & \text{が小さい} \end{cases}$

● 量子液体(ゼロ点エネルギーで融けている)



Heは(固化しない) 絶対零度でも液体 ← 量子効果で融解

${}^4\text{He}$ は $T = 0 \text{ K}$ まで液体である

2-3. 低温の液体—超流動 ^4He

$T = 0 \text{ K}$ で液体

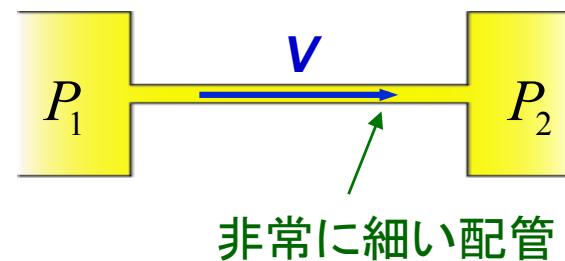
量子統計の脅威

Bose-Einstein凝縮(BEC)

超流動 ^4He の実験

1) $T < 2.17 \text{ K}$ で粘性がなくなる

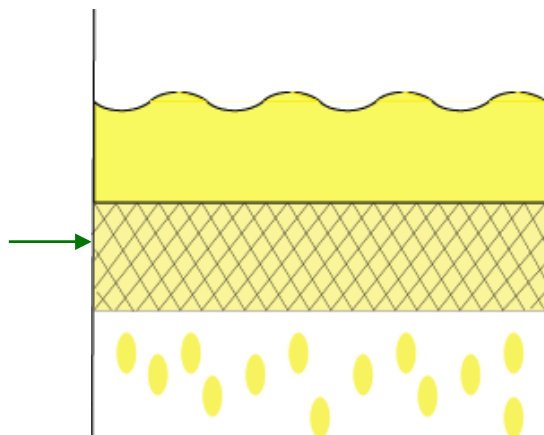
超流動



$$\Delta P = P_1 - P_2 = 0$$

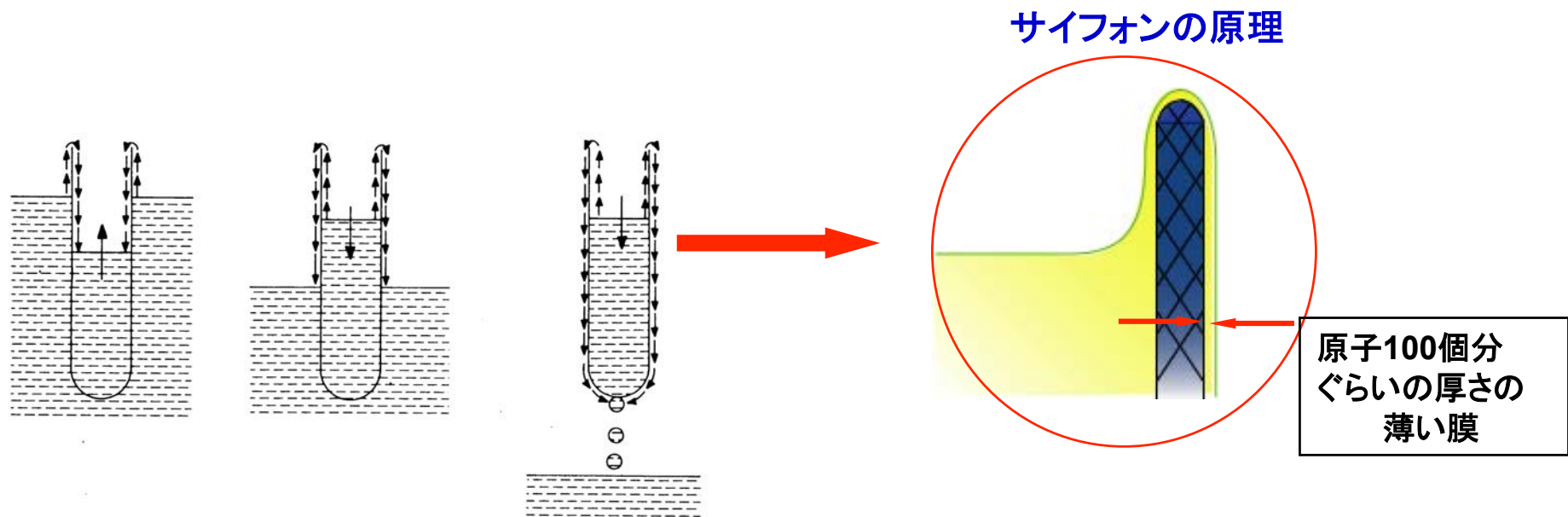
(圧力差なしに流れる)

非常に細い
粉を詰める
(スーパー・リーク)



- $T > 2.17 \text{ K}$
まったく流れない
- $T < 2.17 \text{ K}$
一気に流れ出る

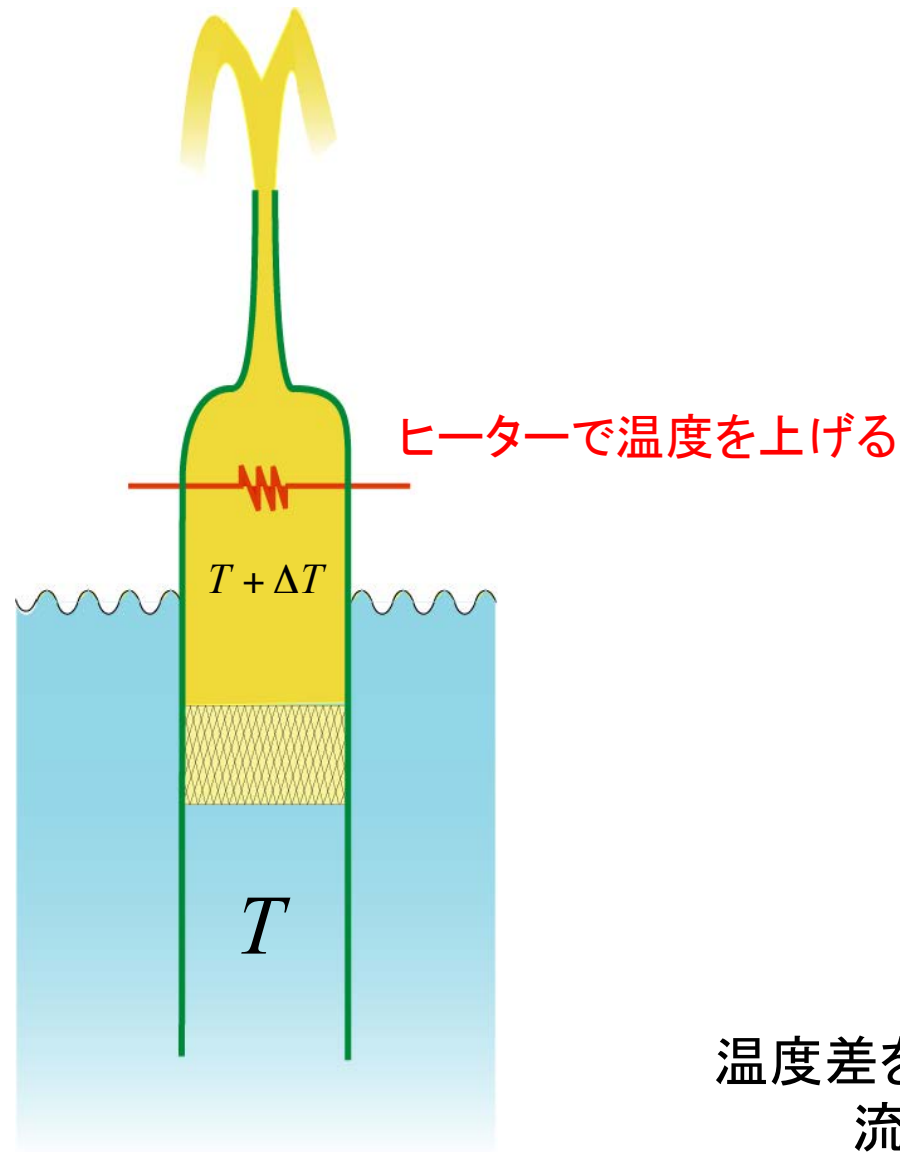
2) フィルム流の観測



薄い膜を通じて He がビーカーの外に流れ出てしまう。(粘性がない)

3) 噴水効果

(超流動は温度差を許さない)



温度差をつけると超流動が温度の高い方に流れ込み、勢いあまって上から噴出す

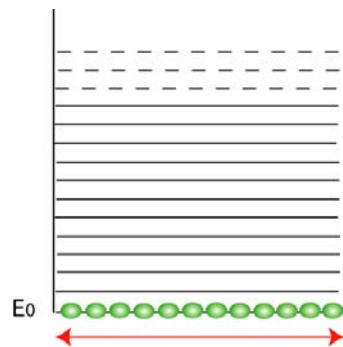
2-4. 超流動はなぜ起こる？

ボース粒子でのみ起こる(液体 ^3He では起こらない)

↓
量子統計の効果 (T=0でも液体であるので粒子交換)

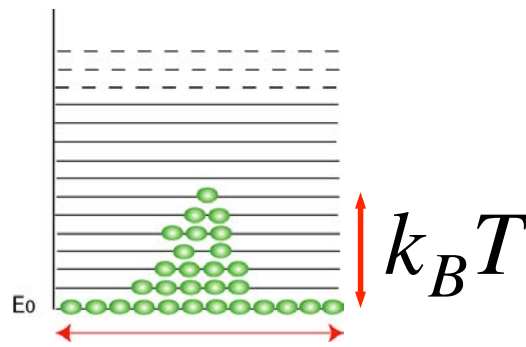
↓
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

$N (\sim 10^{23})$ 個の ^4He ボース粒子)



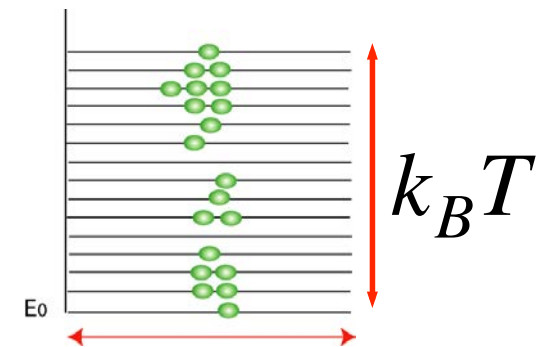
$$N_0 = N (\sim 10^{23})$$

$$T = 0$$



$$N_0 < N$$

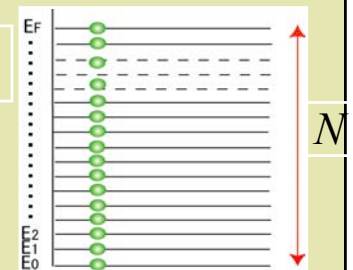
$$0 < T < T_C$$



$$N_0 \approx 0$$

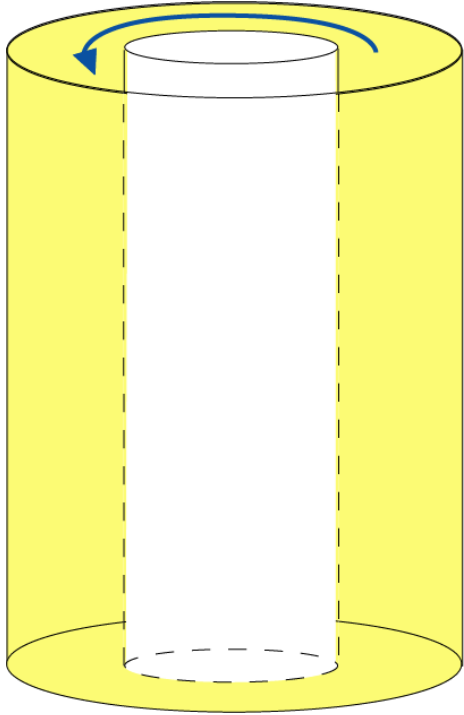
$$T_C < T$$

$N (\sim 10^{23})$ 個の ^3He (フェルミ粒子)



超流動とマクロ(巨視的)スケールでの量子化

超流動 ($T=0$ で考える)



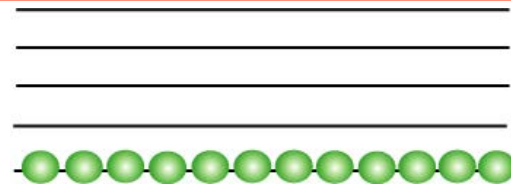
超流動を図のように流す
(回転させる)

ボース凝縮が完全に起こっている

$$N_0 = N$$

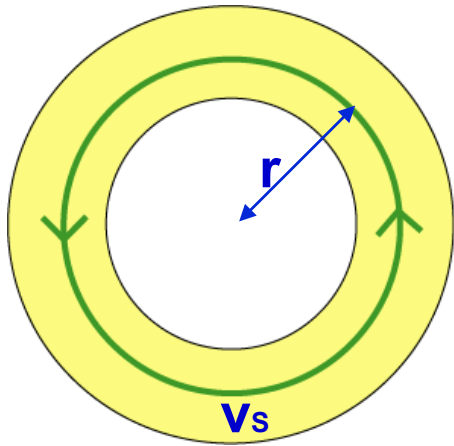


全部の粒子がエネルギーの最も
低い状態に落ち込んでいる



巨視的なスケールでの波動関数

$$\varphi = A e^{i\vec{P}\cdot\vec{r}/\hbar}$$

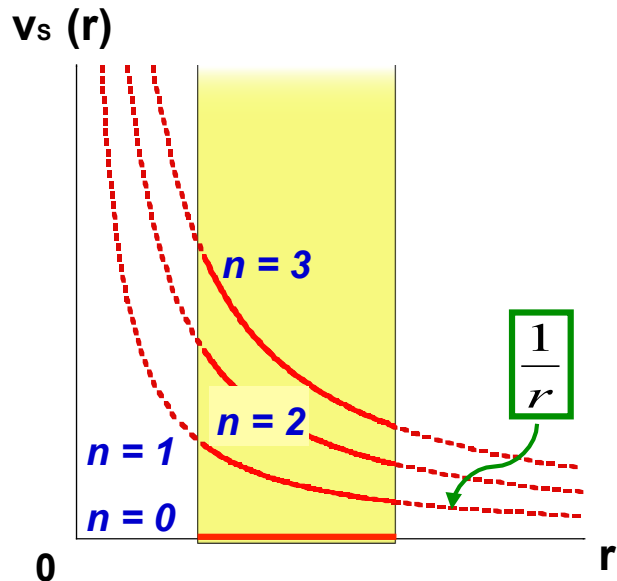


巨大な原子のような状態
(原子核のまわりを回る電子のようなもの)

$$P = \frac{h}{L} \cdot n = m v_s, \quad (\lambda = L/n, \quad L = 2\pi r)$$

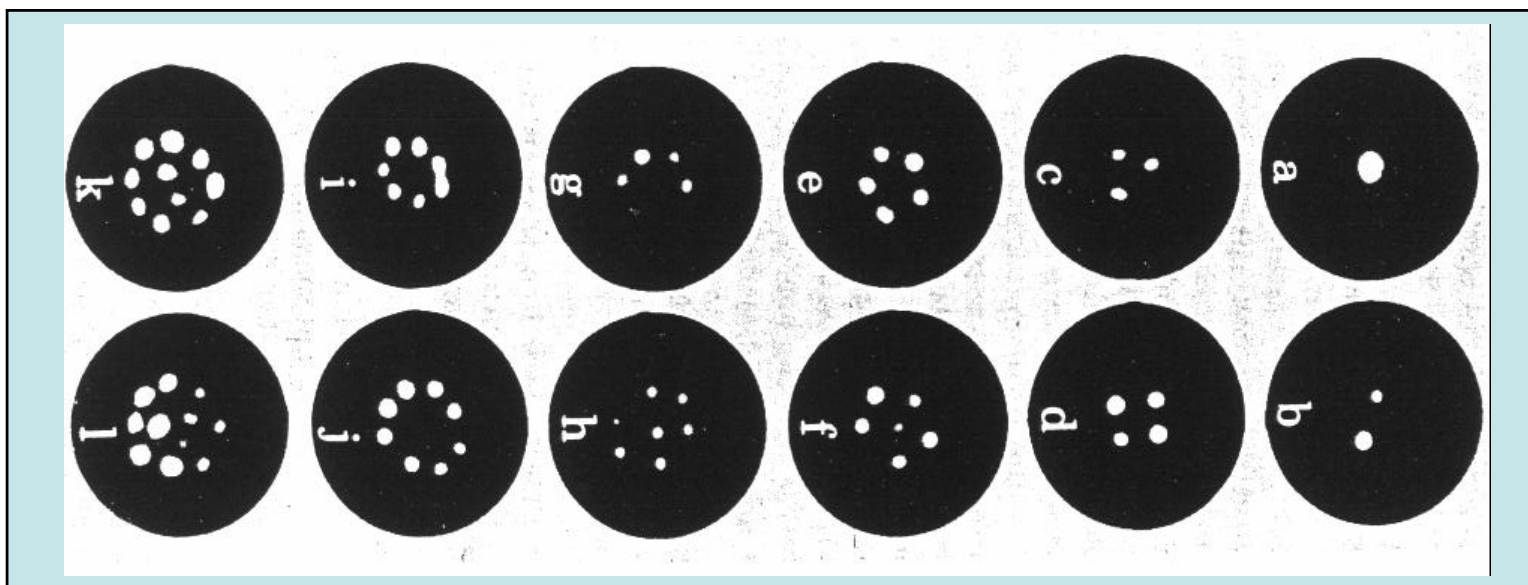
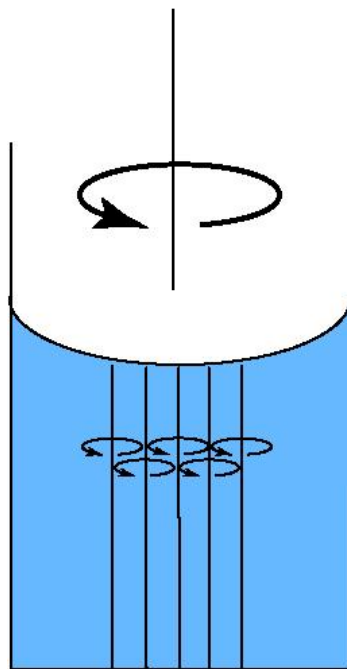
運動量の量子化

$$v_s = \left(\frac{h}{m} \right) \cdot \frac{1}{2\pi r} \cdot n \quad (n = 0 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \dots)$$



- ・巨視的な系でもこのような流れ方しかできない (量子化)
- ・ $n' = n - 1$ にはなかなか行けない
- ・ひとたび流れ出すと全部の粒子が揃って流れる (超流動)

超流動 ^4He の量子渦



Yarmuchuk *et al.* PRL(1978)

2-6. ^4He 以外の超流動

(液体ヘリウムは特殊な例ではありません)

- 金属中の電子(フェルミ粒子の気体)
電子対(クーパー対) (ボース粒子) —— 超伝導
BCS理論 (1972年 ノーベル賞) 高温超伝導体 (1987年 ノーベル賞)
- 液体 ^3He (フェルミ液体)
 ^3He がクーパー対を作る (電子対と同じ)
↓ $T_C \cong 1\text{mK}$
超流動 ^3He (1996年 ノーベル賞) 理論 (2003年 ノーベル賞)
- アルカリ原子の気体を レーザー冷却 (1997年 ノーベル賞)
↓
BEC (2001年ノーベル賞)
フェルミ原子が対を作って超流動(2004年)
- 中性子星
中性子(フェルミ粒子)が対を作る → 超流動星

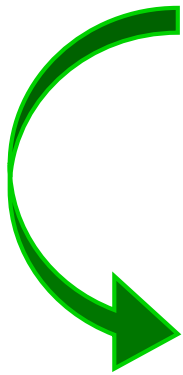
フェルミ粒子がクーパー対形成 ⇨ 超伝導

金属では伝導電子（自由電子）



自由電子はフェルミ粒子

2
段
構
え



電子間に引力が働き電子対（クーパー対）が出来る

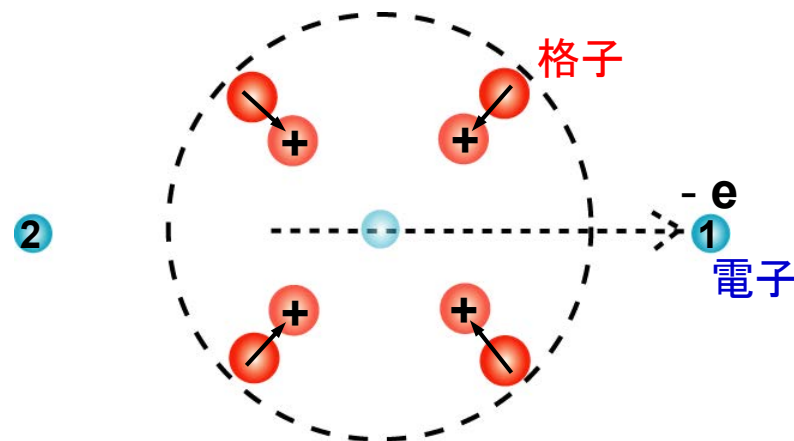
（BCS理論 / ノーベル賞）

電子対はボース粒子（フェルミ粒子が2個）

ボース凝縮

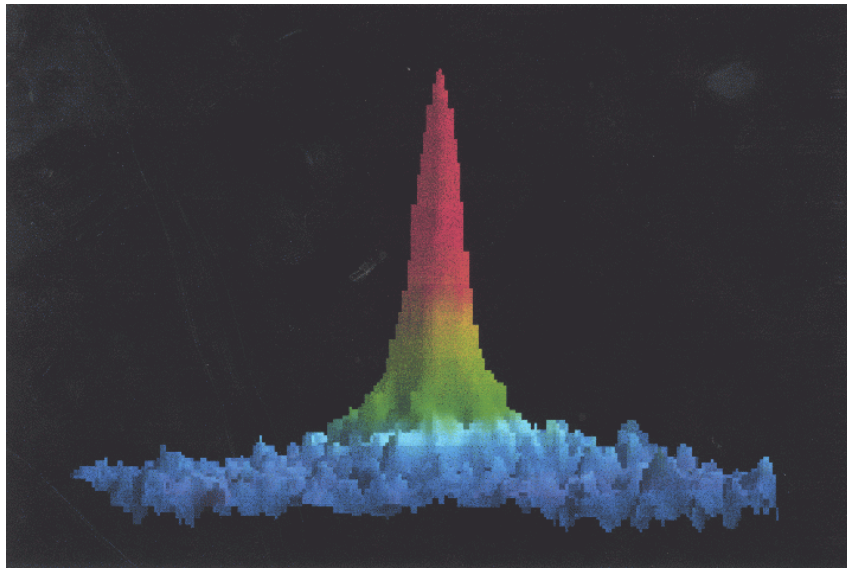
超流動 = 超伝導

電子対（クーパー対）



（注）真空中では電子間にはクーロン力（反発力）が働く

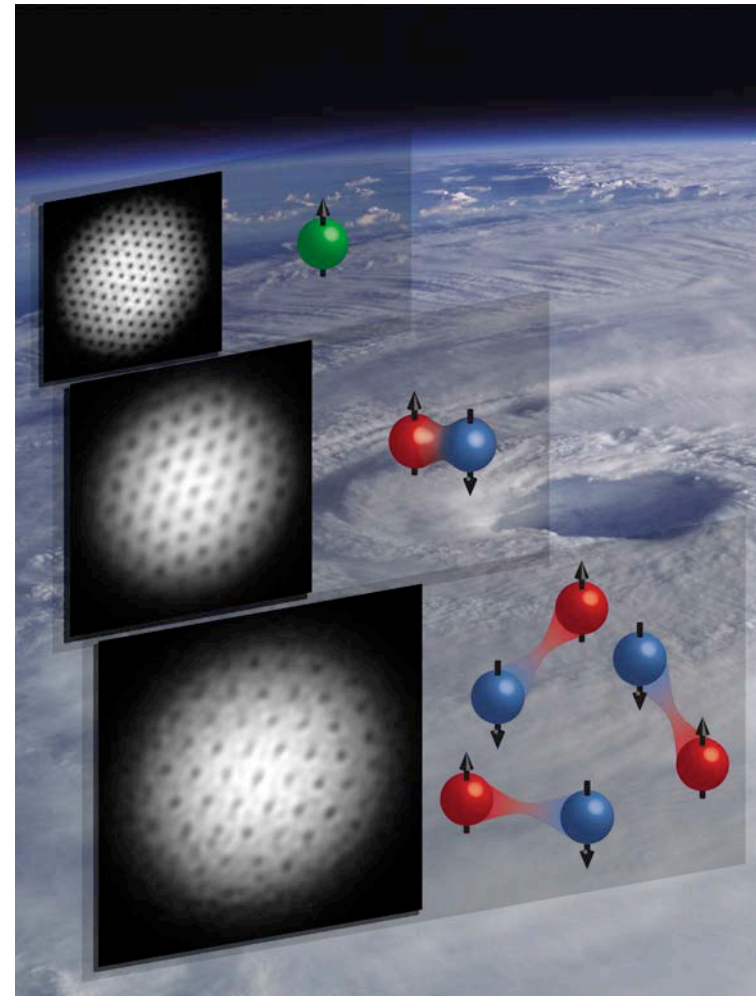
レーザー冷却された 超低温気体のBEC



京都大学 高橋グループ

^{87}Rb のBEC

(密度 対 運度量)



MIT-Ketterleグループ

種々の量子凝縮系を回転させた時
に出来るの量子渦

上から ^{21}Na (ボース粒子)、

^6Li - ^6Li 分子、 ^6Li -クーパー対

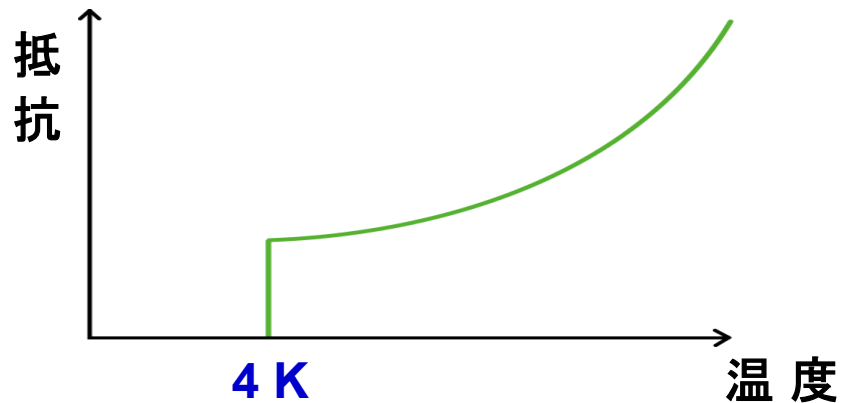
§3 絶対零度を目指して **ヘリウムの液化**

カマリン・オンネス (オランダ) 1908 年

^4He (4.2 K)



「水銀の抵抗の温度変化」 ポンプで引いて **~1 K 達成** 「 $T=0$ でも He は液体」



超伝導の発見

^4He の液化

1913 年 ノーベル賞 — 低温物理の幕開け
(4.2 K ~ 1 K)

1910年 ノーベル賞 ファン・デル・ワールス

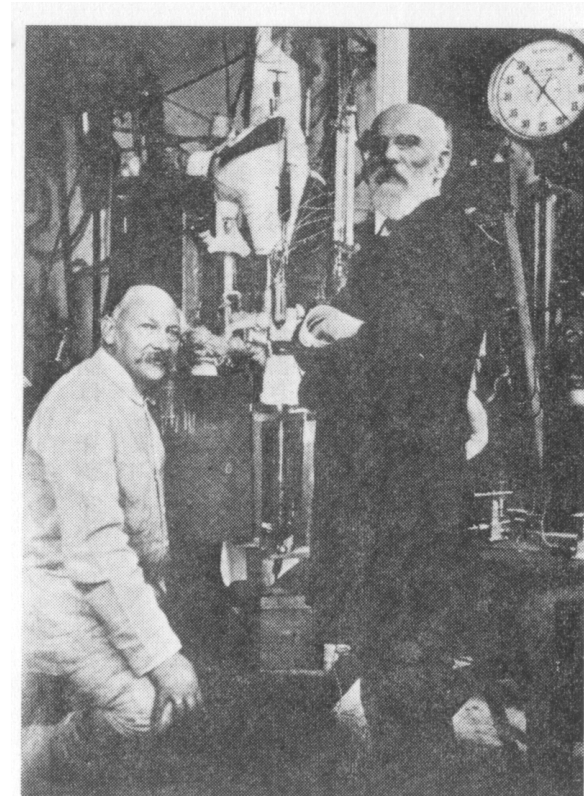


図24 ヘリウム液化機の前ファン・デル・ワールス(右)とカマリン・オンネス(左) (1911年)

引用 <http://th.physik.uni-frankfurt.de/~jr/gif/phys/waalsonnes.jpg>

日本最大のヘリウム液化機(吉田キャンパス)

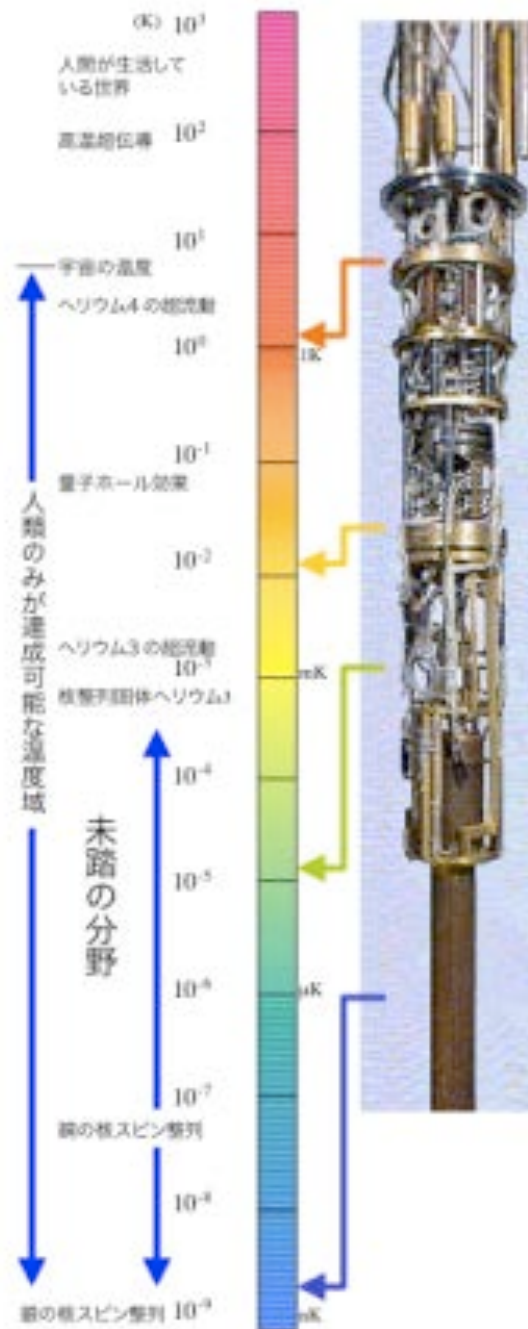
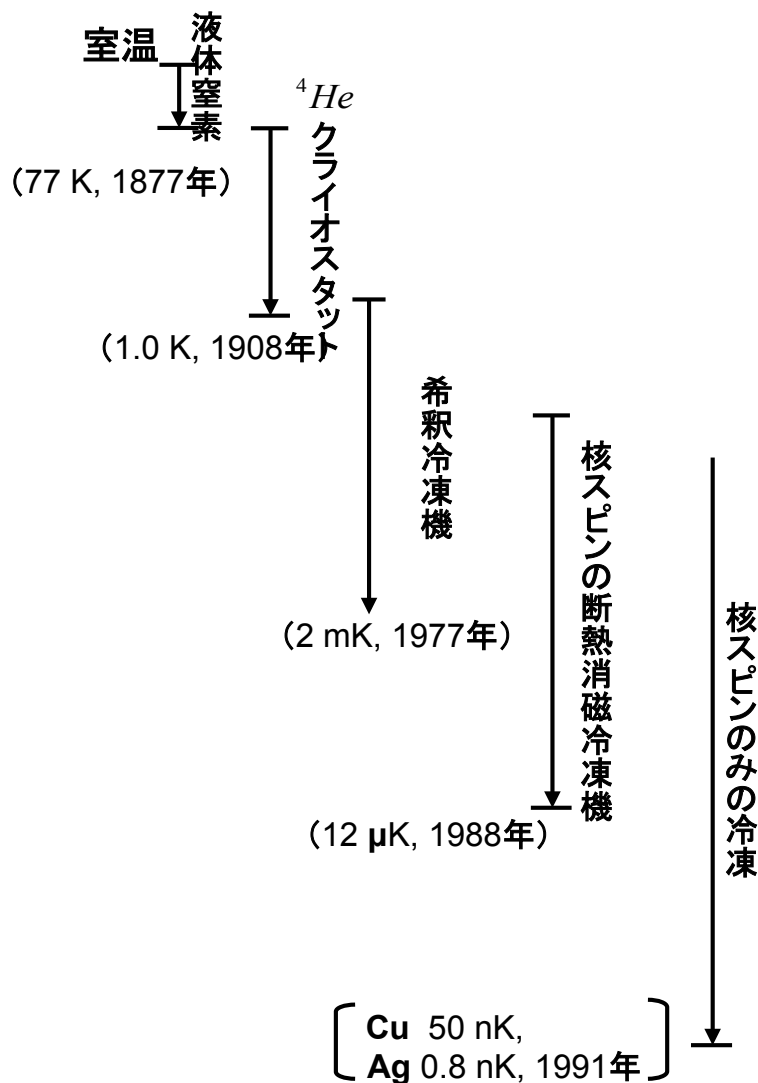
(液化量 270 リットル / 時)



京大のヘリウム液化機

吉田、宇治、桂キャンパス(H17年度建設中)

人類はどこまで絶対零度に近づいたか



§ 4. 極低温下の磁気共鳴映像法 (MRI) 顕微鏡の開発



The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2003

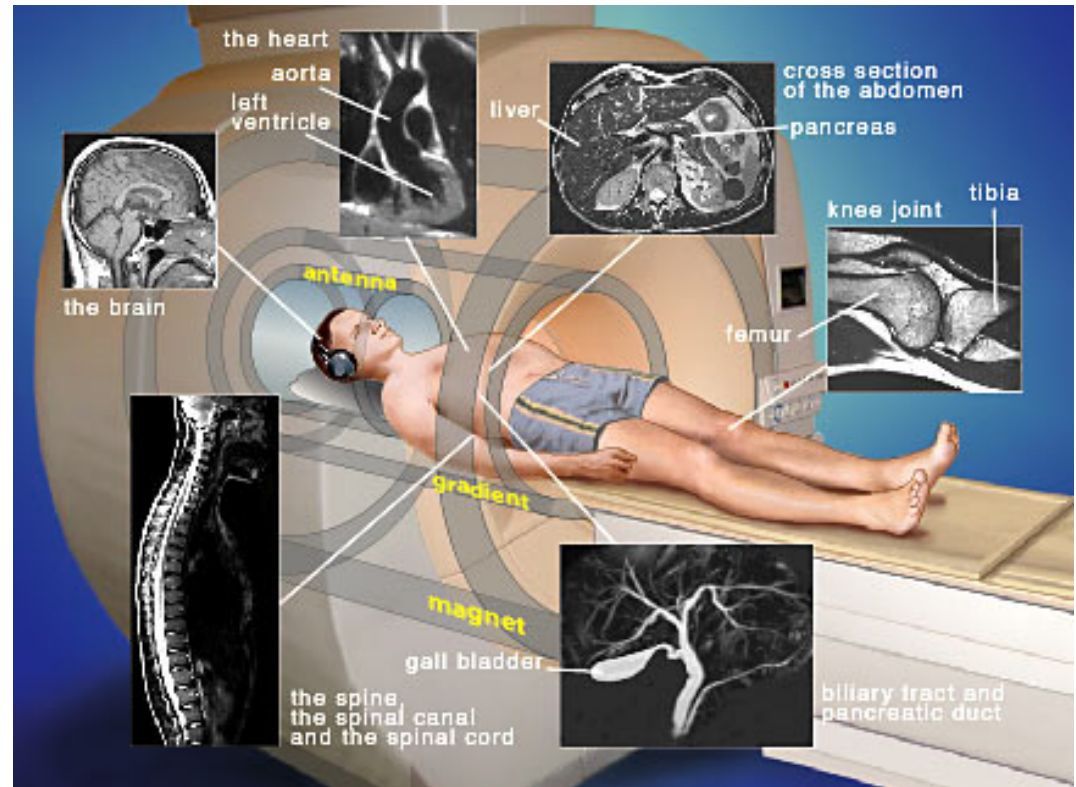
"for their discoveries concerning magnetic resonance imaging"



Paul C. Lauterbur



Sir Peter Mansfield



MRIの発見 / 2003年 ノーベル医学・生理学賞

出所 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2003/illpres/index.html

出所 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2003/lauterbur-bio.html

出所 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2003/mansfield-bio.html

NMRとMRIの原理

核磁気共鳴 (NMR)

原子核スピン I

核磁気モーメント $\vec{\mu} = \hbar\gamma \vec{I}$

磁化

$$M \propto \mu$$

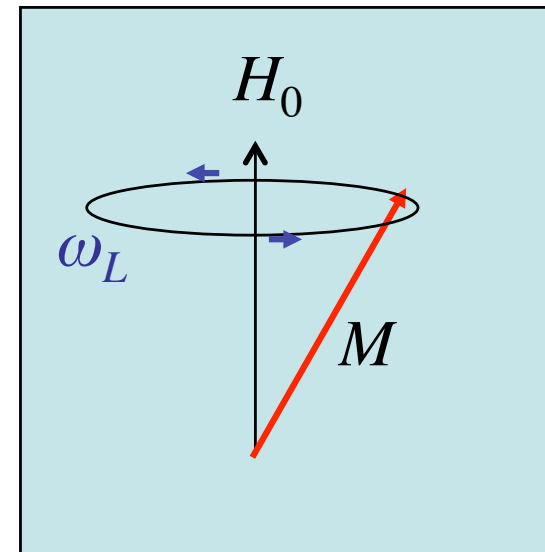
核磁気共鳴周波数 $\omega_L = \gamma \vec{H}_0$

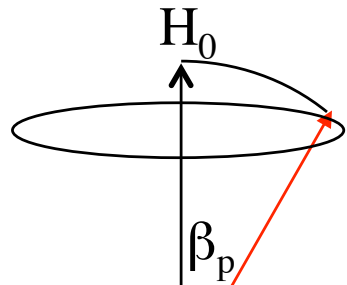
γ : 磁気回転比 (核種によって決まる)

$$\gamma(\text{H}) = 42.6 \text{ MHz/T}$$

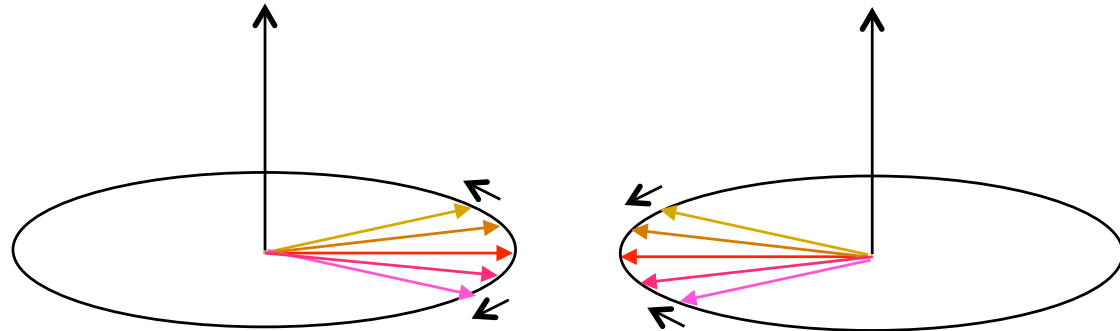
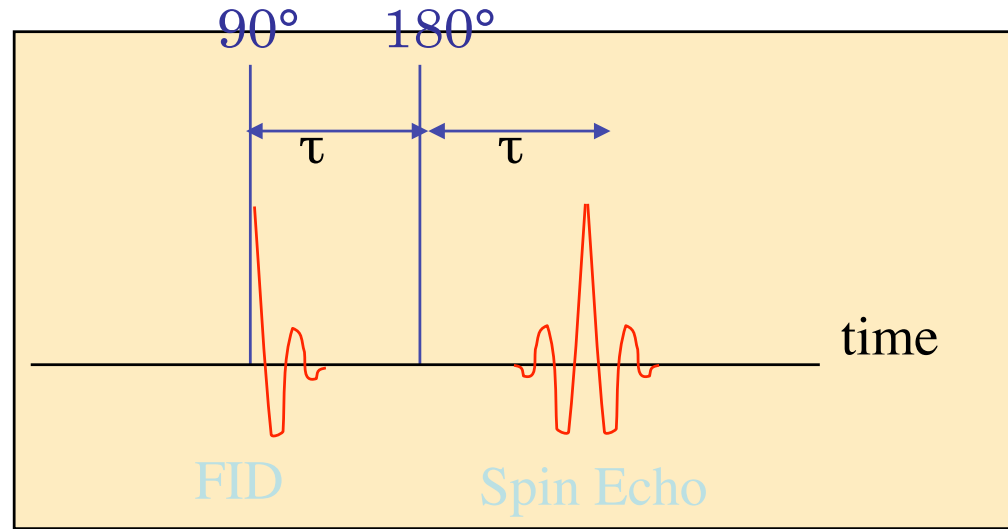
$$\gamma(^3\text{He}) = 32.4 \text{ MHz/T}$$

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma (\vec{M} \times \vec{H}_0)$$

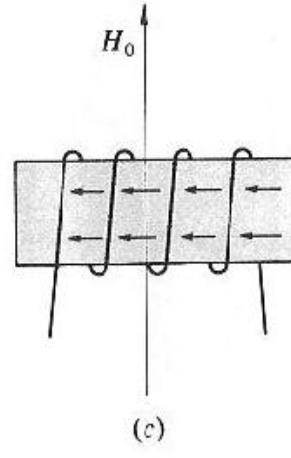
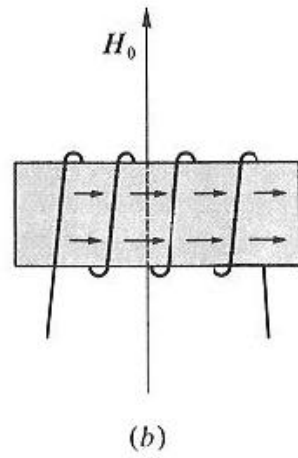
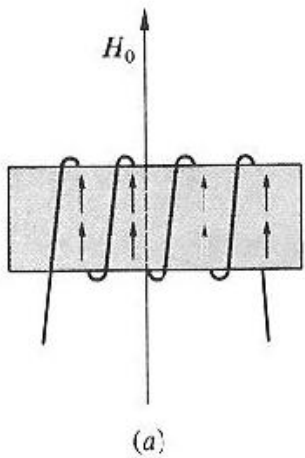




共鳴高周波パルス
(周波数 ω_L)



スピンエコーの原理



平衡状態 90°パルス後, Spinはx-y平面で回転 (FreeInductionSignal)

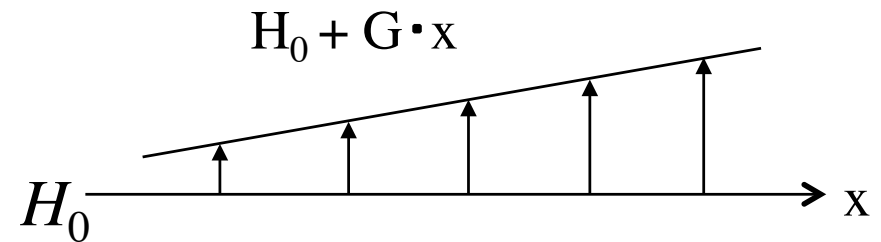
磁気共鳴映像法 (Magnetic Resonance Imaging)の原理

$$\omega(x) = \gamma H_z(x) = \gamma(H_0 + G \cdot x)$$

サンプル:

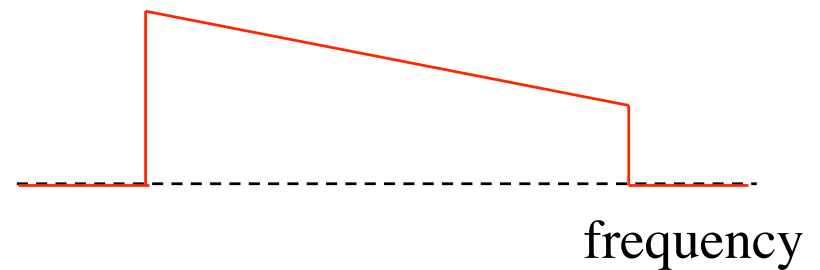


磁場勾配:

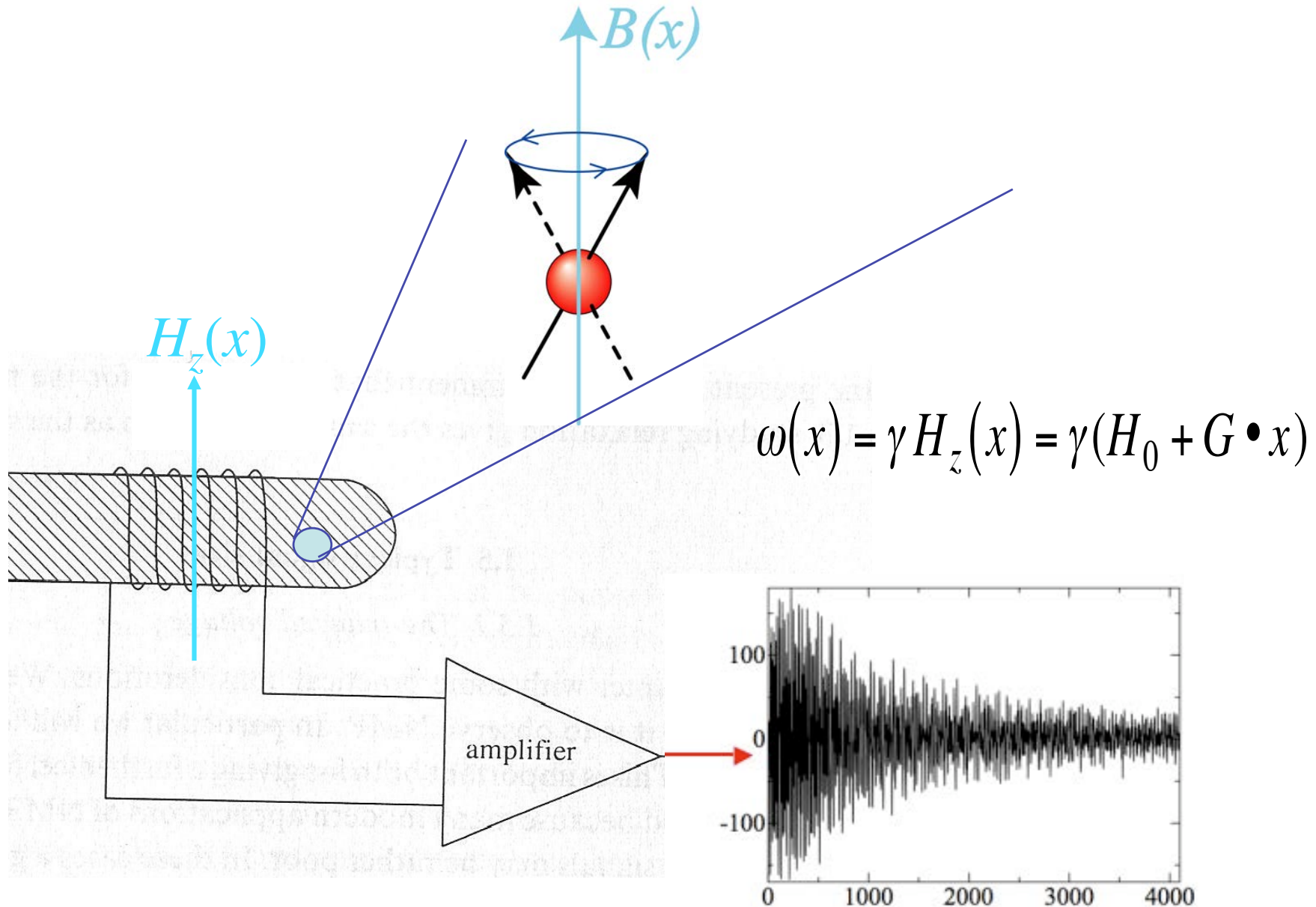


FID又は

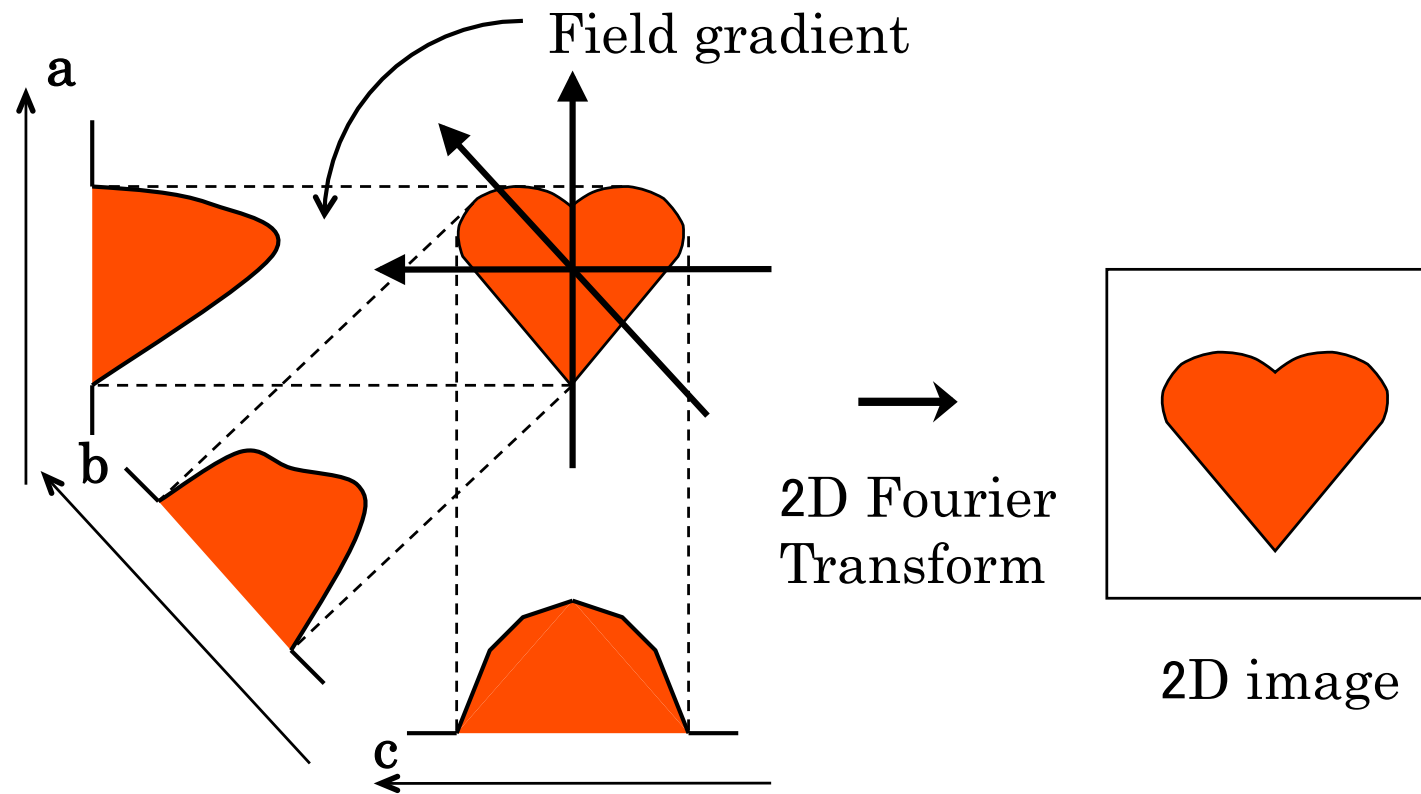
スピン・エコーのFFT:



スピンの目 (MRI 顕微鏡) で見たミクロの世界



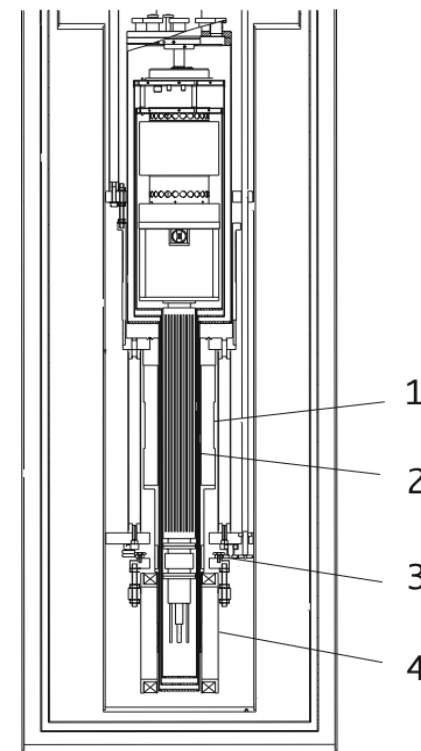
2次元MRIの方法 (画像の作り方)



京都大学 超低温MRI顕微鏡

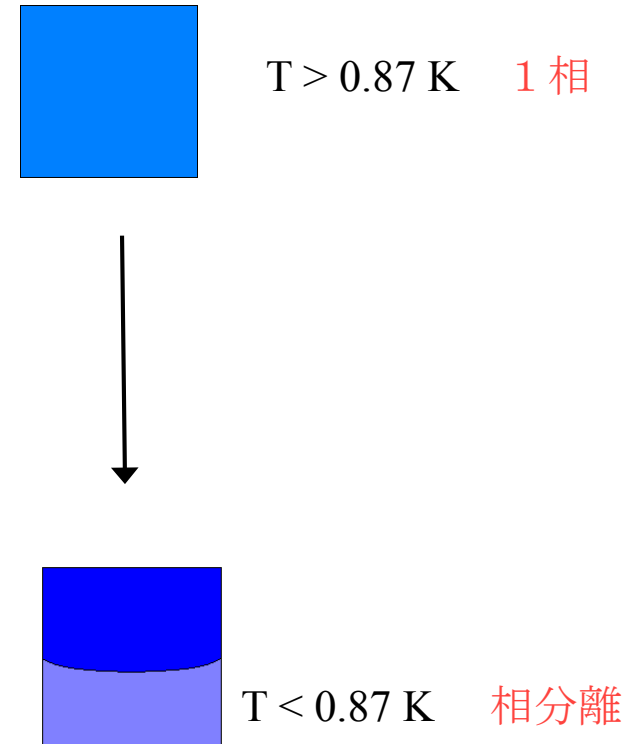
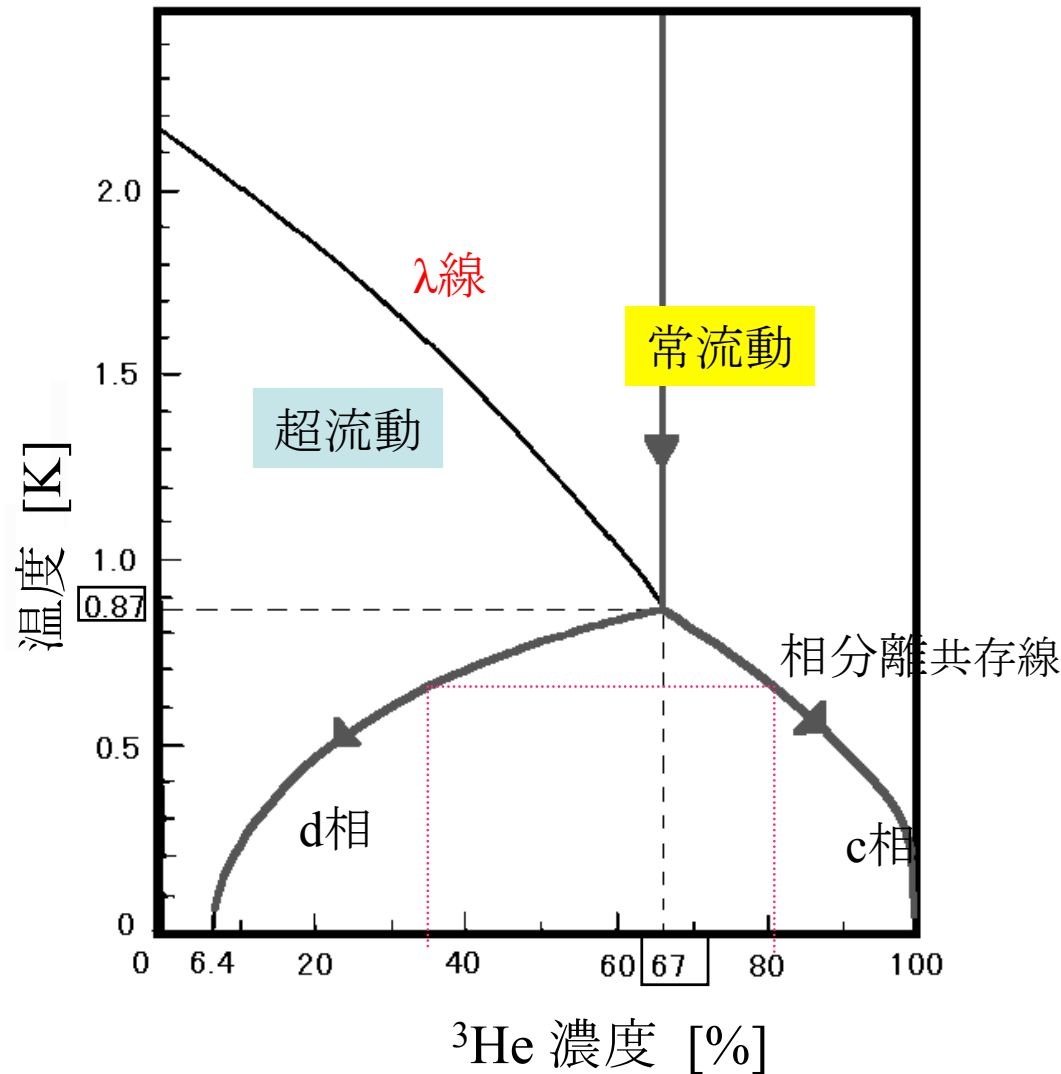
温度 100 μ K

分解能 10 μ m



§5 超低温で見える量子の世界

5-1. ^3He - ^4He 混合液体の相分離のMRI

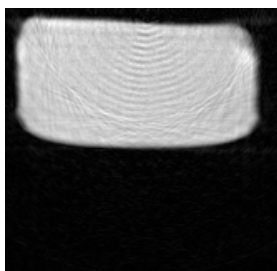


^3He 濃度67.5%の試料の相分離界面を共存線に沿って可視化

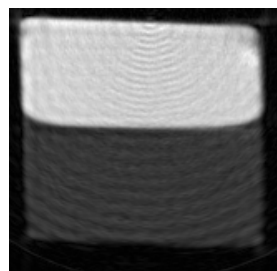
相分離界面のMRI画像

2 mm

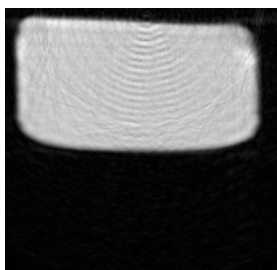
200 mK



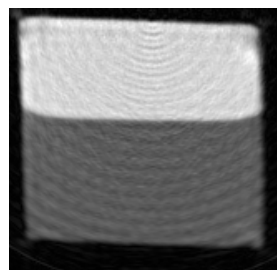
600 mK



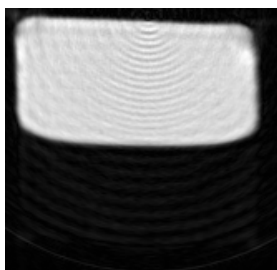
300 mK



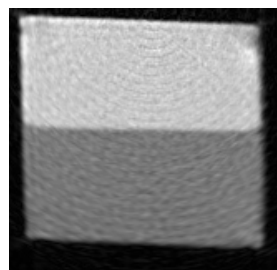
700 mK



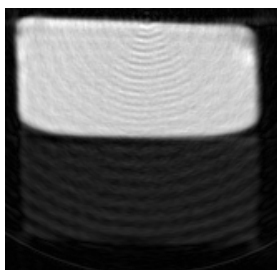
400 mK



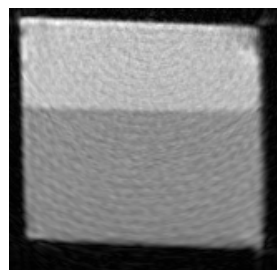
800 mK



500 mK



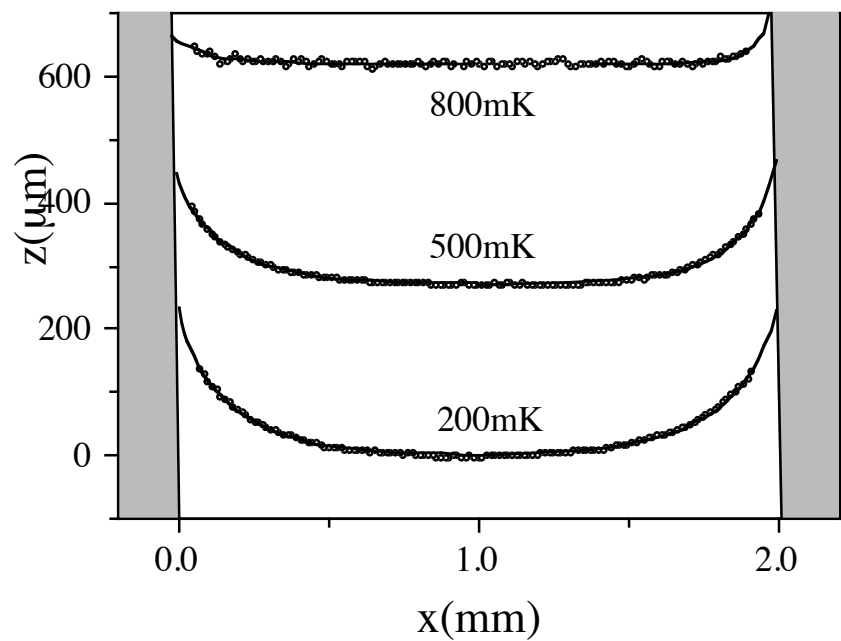
840 mK



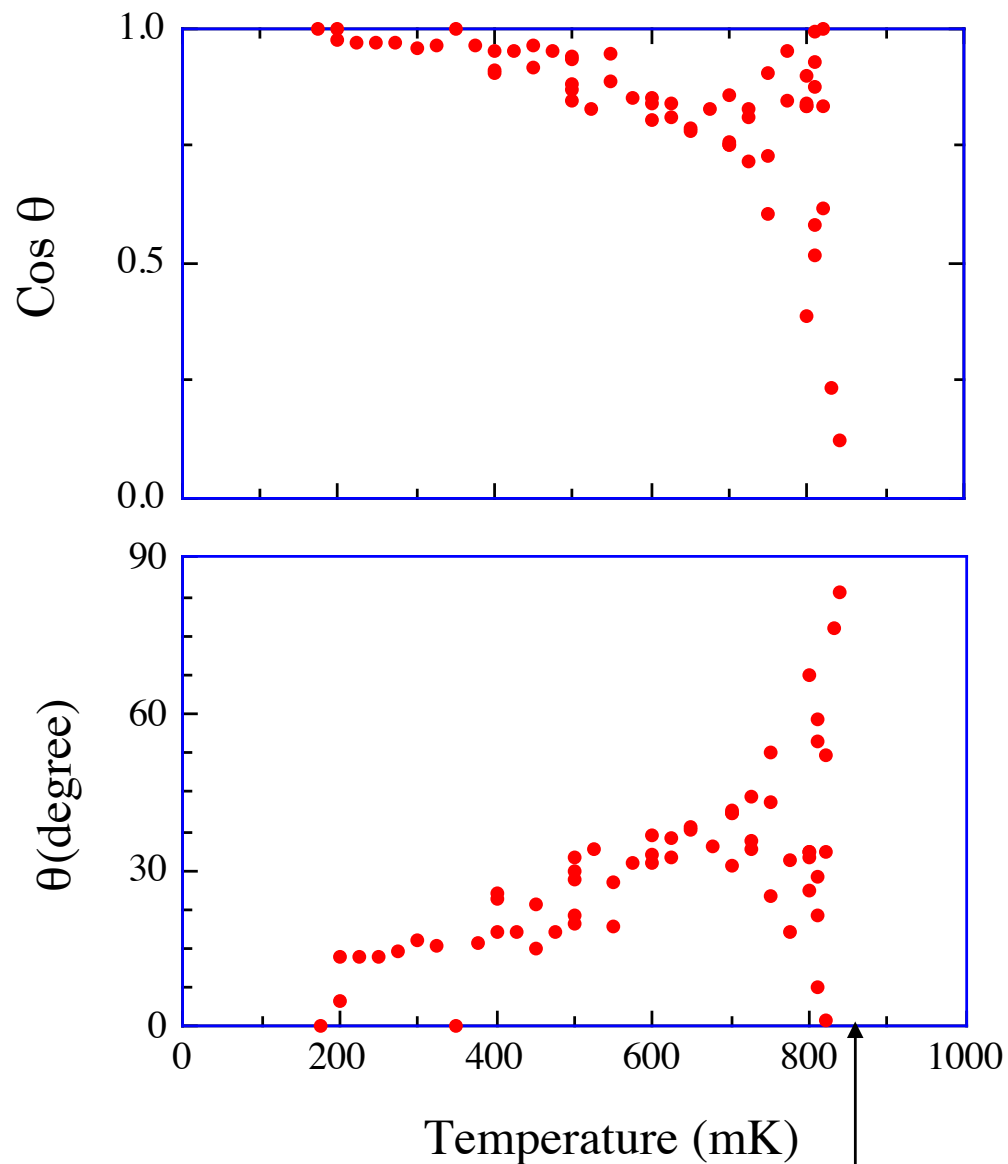
3重臨界点 (867mK) に近づくにつれ、コントラストが減少 (濃度差、スピン拡散係数の差)

界面の形が変化する領域 (healing長) の減少

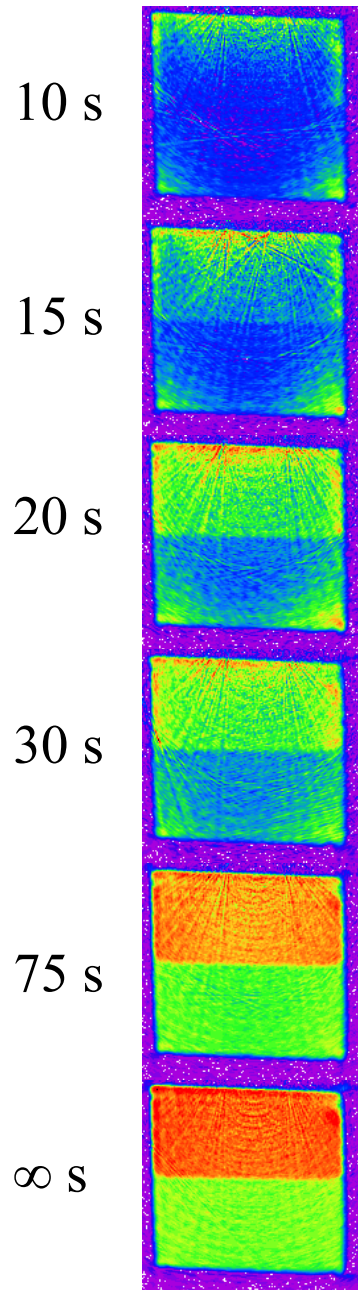
相分離界面の画像化



接触角度の温度依存性

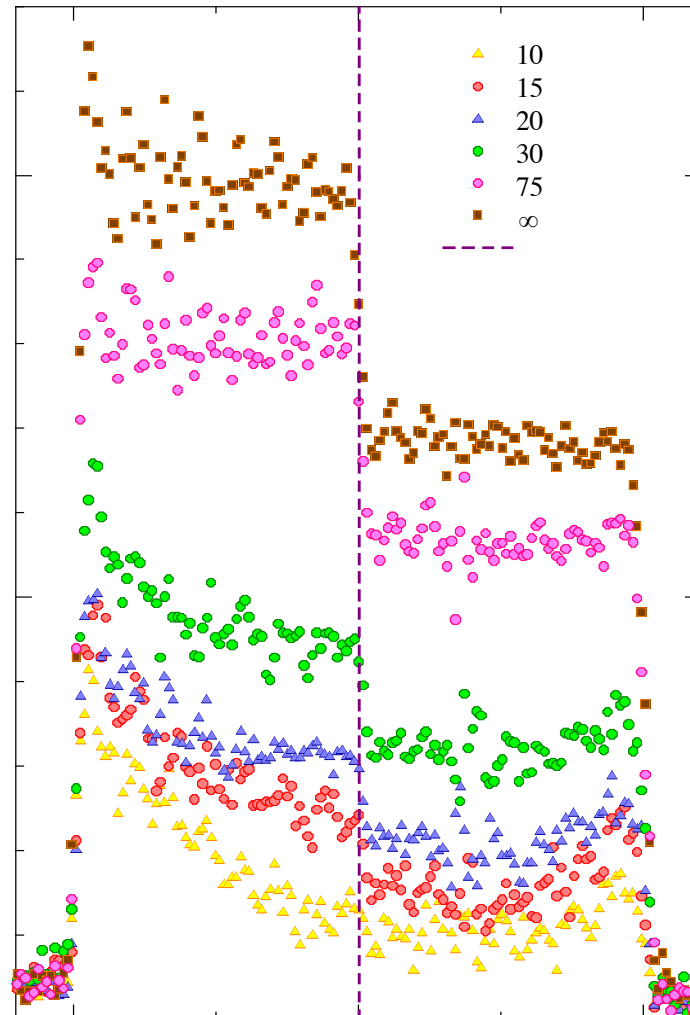


5-2. 縦磁化の回復の様子 (T_1 加重 MRI)



$T = 800$ mK

$t=0$ で磁化をなくし, τ 秒後に回復している磁化の画像化



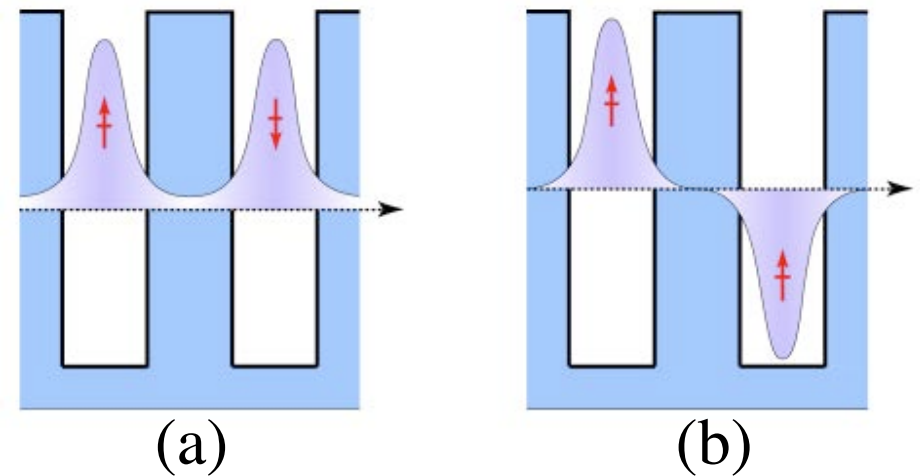
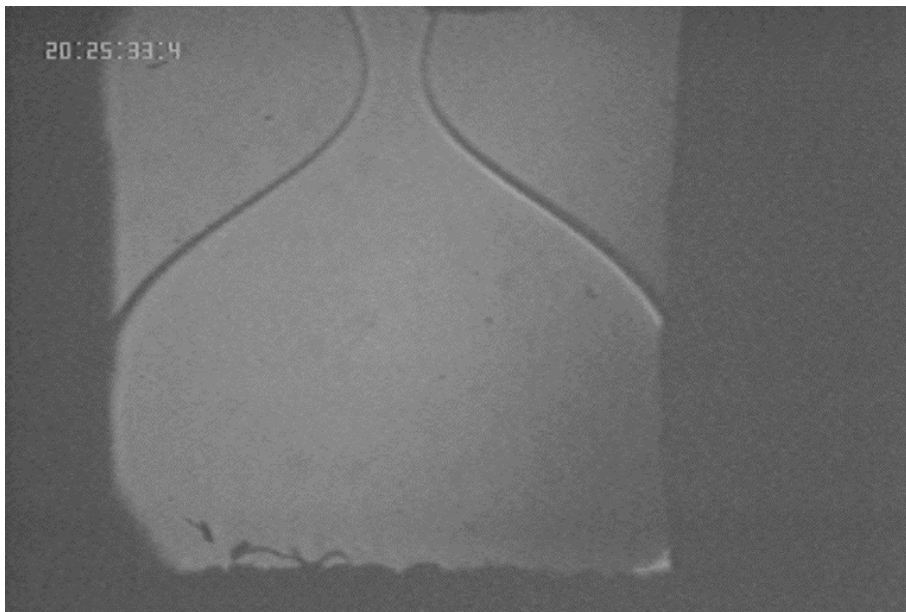
5-3. 量子固体 ^3He

^3He : フェルミ粒子

核スピン $I = 1/2$ (r, I)

液体 ^3He を加圧すると固体になる : **それでも波が重なる**

(量子固体)



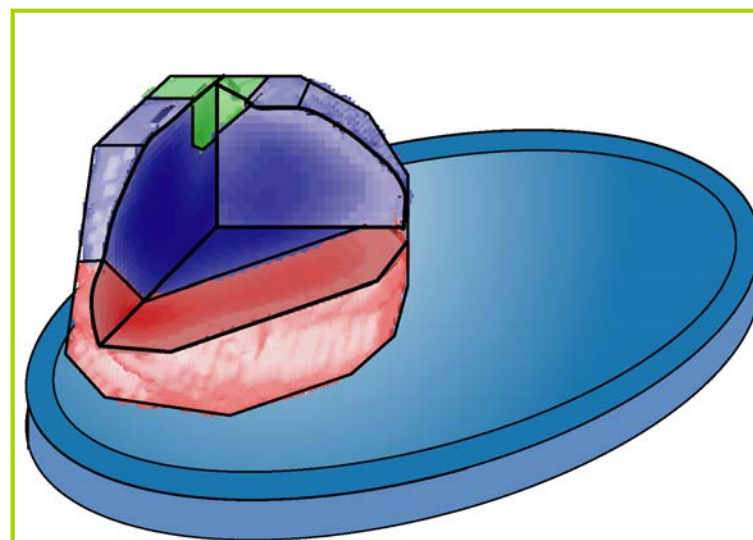
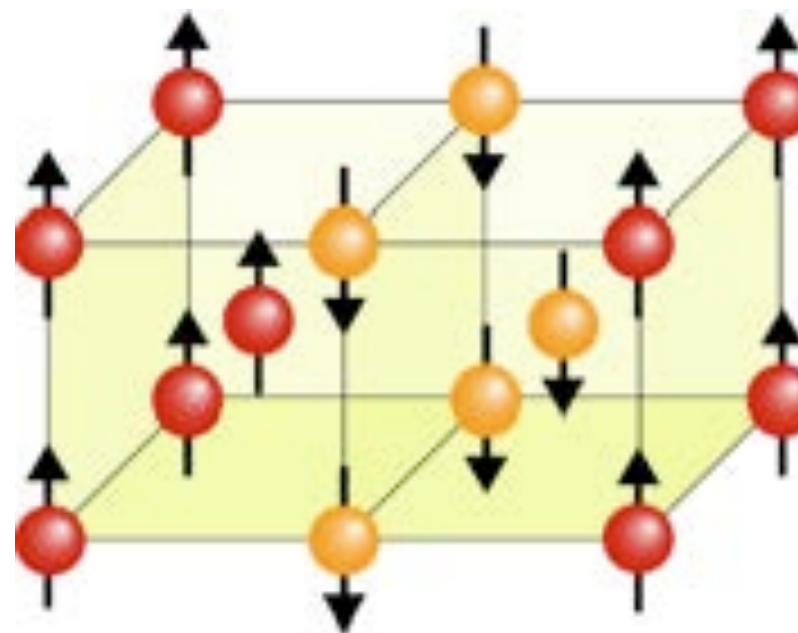
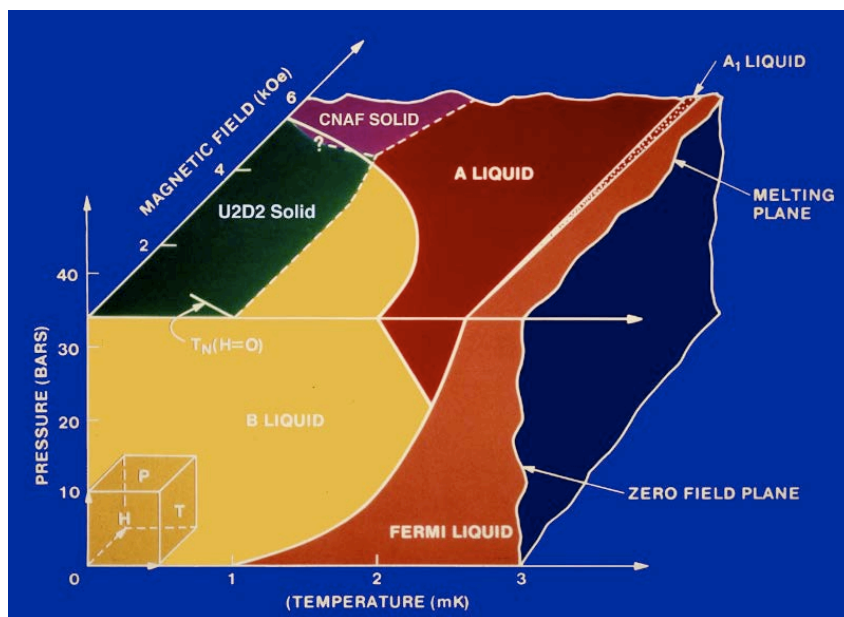
(a)の方がエネルギー低い

↓ 量子力学的力

スピンは ($\downarrow \uparrow$)

核整列固体 ^3He の磁区の構造

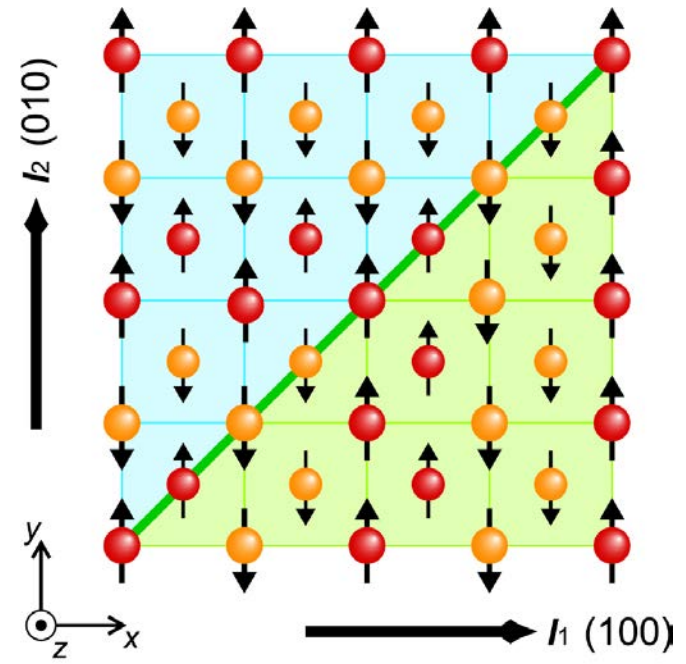
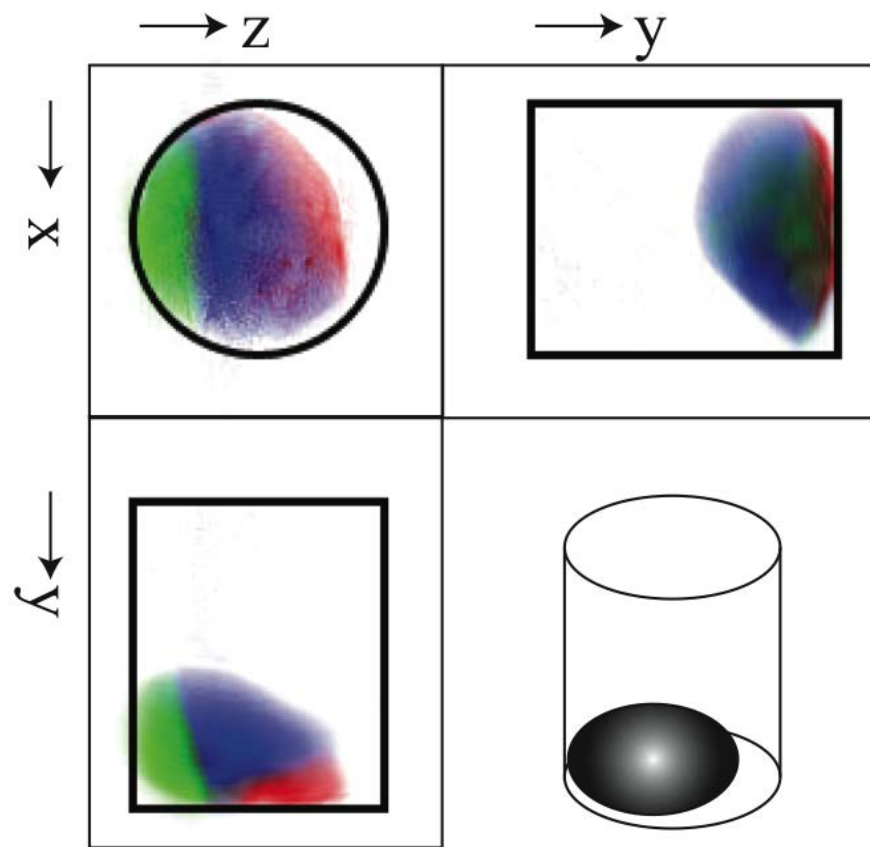
超低温 $T < 1 \text{ mK}$



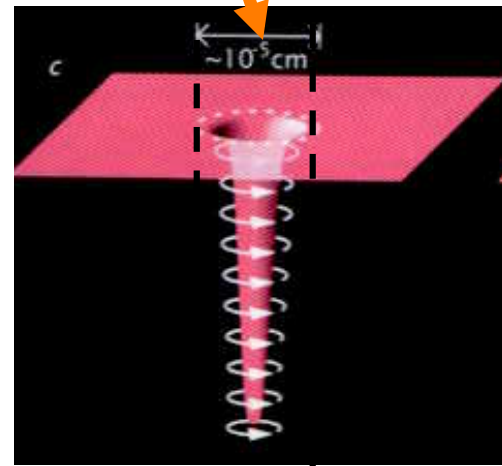
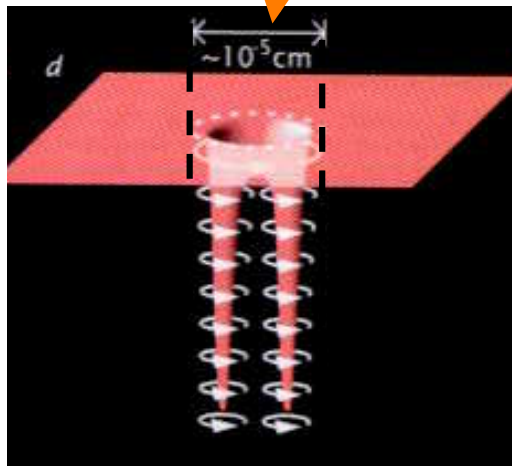
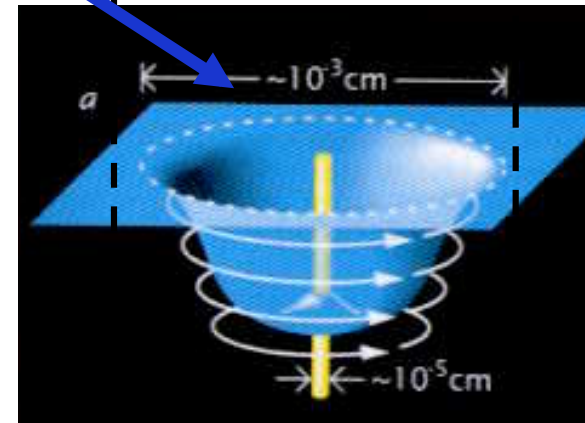
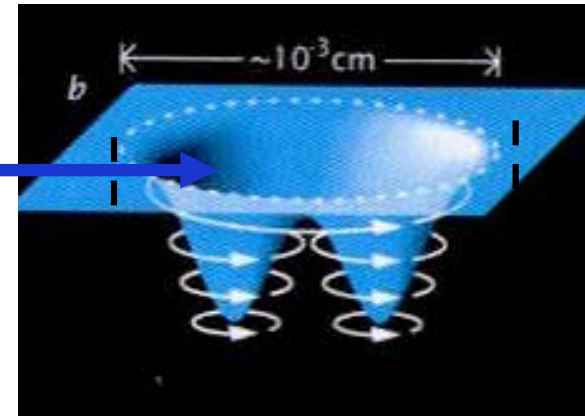
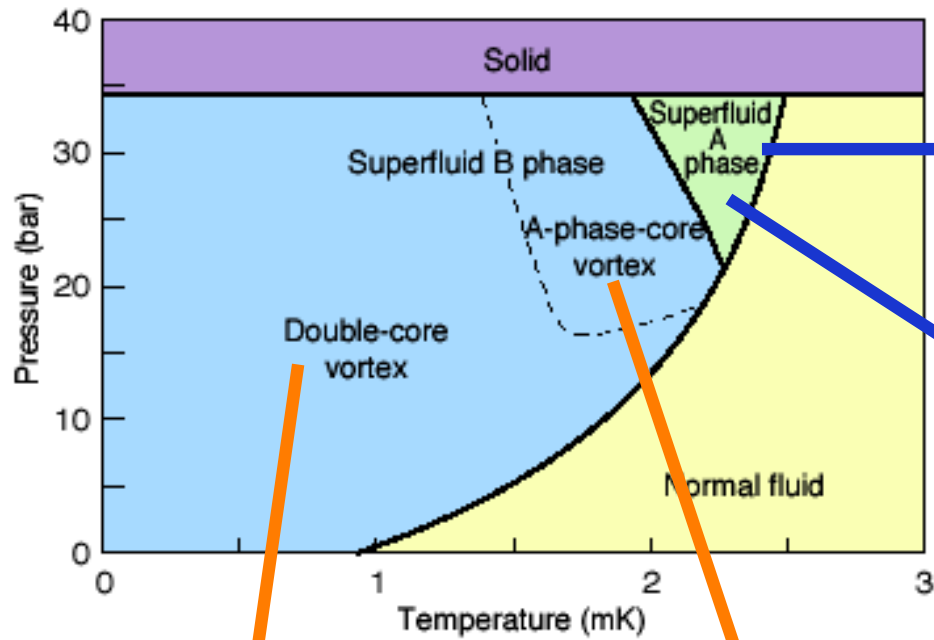
核スピン整列固体 ^3He

異方軸 (x), (y), (z)

3個の磁区から出来ている単結晶固体 ^3He のMRI写真



5-4. 超流動³Heの種々の渦

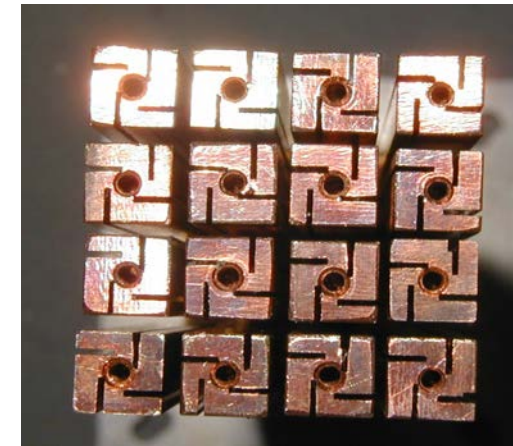
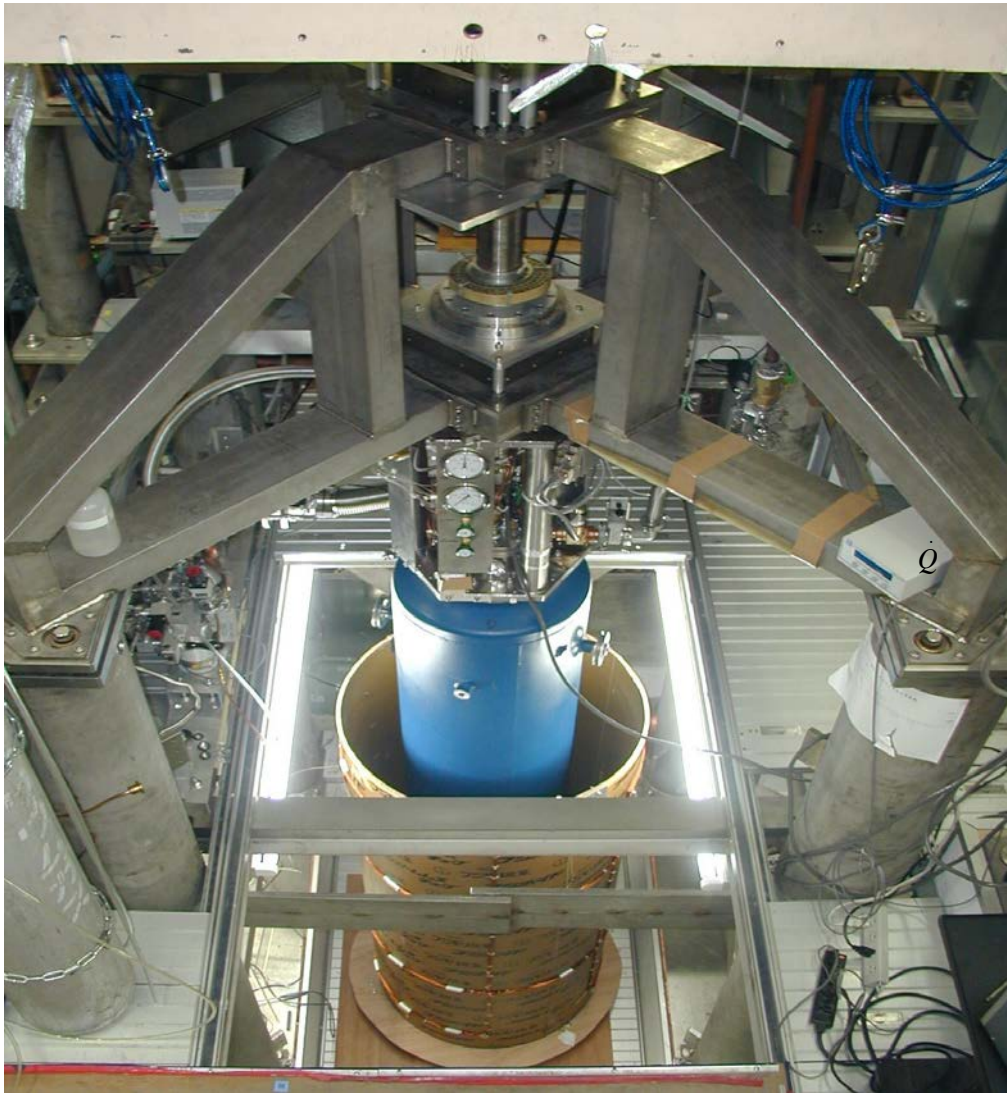


$\sim 10 \mu\text{m}$

A phase 4 types
B phase 3 types

\sim a few hundred nm

ISSP回転超低温冷凍機(世界最速回転)



核断熱消磁ステージ
銅の有効モル数=23mol

最低温度 : 300 μ K under 1 rot/sec

High Speed Rotation (1 rot/sec)

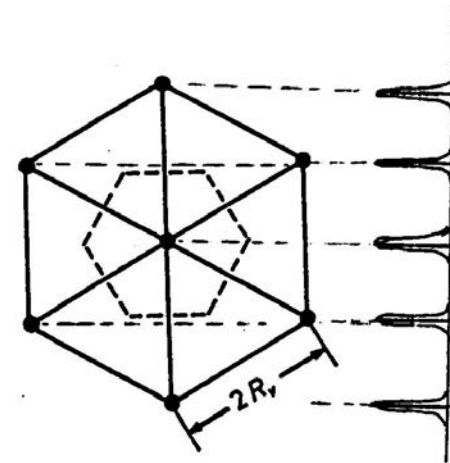
+

MRI の画像技術

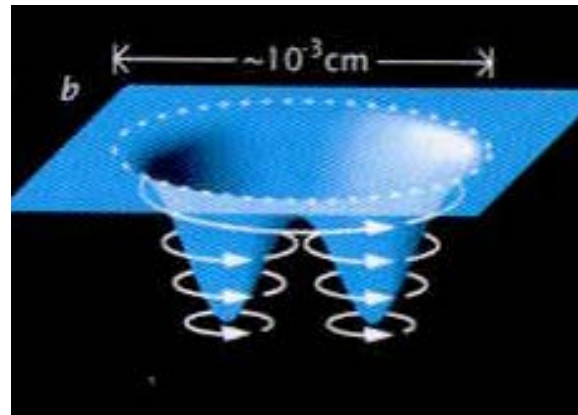
(1) 量子渦の格子 (異方的超流動 ^3He)

$$y/x = \sqrt{\rho_{s\parallel} / \rho_{s\perp}} = \sqrt{2}$$

40 % deformation



(2) 量子渦の構造



(3) 量子渦の運動

古典力学(マクロの法則)と量子力学(ミクロの法則)

$$\Delta P \cdot \Delta X = h \text{ (ハイゼンベルグの不確定原理)}$$

$$h : \text{プランク定数} = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$$

古典力学 $(X, P) = (X, mv)$ を同時に指定

量子力学 不確定性でどこまで (X, v) を同時に指定してよいか?

例1 $M = 1 \text{ Kg}$ (石ころ)、 $\Delta X = 1 \mu\text{m}$

$$\Delta P = 10^{-27} \text{ Kg m/sec} \quad \Rightarrow \quad \Delta v = 10^{-27} \text{ m/sec}$$

例2 $M = 10^{-30} \text{ Kg}$ (電子)

$$\begin{cases} \Delta X = 1 \mu\text{m} & \Delta P = 10^{-27} \text{ Kg m/sec} & \Rightarrow & \Delta v = 10^3 \text{ m/sec} \\ \Delta X = 1 \text{ nm} & \Delta P = 10^{-24} \text{ Kg m/sec} & \Rightarrow & \Delta v = 10^6 \text{ m/sec} \end{cases}$$

(原子の大きさ)

量子力学は原子等のミクロな世界の法則

$$\begin{array}{l} T \rightarrow 0 \quad S \rightarrow 0 \\ \text{量子統計} \end{array}$$



低温では量子力学が重要になる
マクロな世界に量子力学が現れる

ノーベル物理学賞のリスト

年	物理学賞
1901	W. C. Röntgen X線の発見
1902	H. A. Lorentz, P. Zeeman 放射に対する磁場の影響の研究
1903	H. A. Becquerel 放射能の発見 P. Curie, M. Curie 放射能の研究
1904	Lord Rayleigh 気体の密度に関する研究とアルゴンの発見
1905	P. E. A. Lenard 陰極線の研究
1906	J. J. Thomson 気体の電気伝導に関する理論的および実験的研究
1907	A. A. Michelson 干渉計の考案とそれによる分光学およびメートル原器に関する研究
1908	G. Lippmann 光の干渉を利用した天然色写真の研究
1909	G. Marconi, K. F. Braun 無線電信の開発に対する貢献
1910	J. D. van der Waals 気体および液体の状態方程式に関する研究
1911	W. Wien 熱放射に関する法則の発見
1912	N. G. Dalén 灯台用ガスアキュムレーターの自動調節機の発明
1913	H. Kamerlingh Onnes 液体ヘリウムの製造に関連する低温現象の研究
1914	M. von Laue 結晶によるX線回折現象の発見
1915	W. H. Bragg, W. L. Bragg X線による結晶構造解析に関する研究
1916	なし
1917	C. G. Barkla 元素の特性X線の発見
1918	M. Planck 量子論による物理学進歩への貢献
1919	J. Stark 陽極線のドップラー効果およびシュタルク効果の発見
1920	C. E. Guillaume アンバーの発見とそれによる精密測定の開発

年	物理学賞
1955	P. Kusch 電子の磁気モーメントに関する研究 W. E. Lamb 水素スペクトルの微細構造に関する発見
1956	W. Shockley, J. Bardeen, W. H. Brattain 半導体の研究とトランジスター効果の発見
1957	T.-D. Lee, C.-N. Yang パリティの非保存についての研究
1958	P. A. Cherenkov, I. E. Tamm, I. M. Frank チェレンコフ効果の発見とその解釈
1959	E. Segrè, O. Chamberlain 反陽子の発見
1960	D. A. Glaser 泡箱の発明
1961	R. Hofstadter 線形加速器による高エネルギー電子散乱の研究と核子の構造に関する発見 R. Mössbauer γ 線の共鳴吸収に関する研究とメスバウアー効果の発見
1962	L. D. Landau 凝集状態の物質とくに液体ヘリウムの理論的研究
1963	E. P. Wigner 原子核と素粒子の理論における対称性の発見と応用 M. G. Mayer, J. H. D. Jensen 原子核の殻構造に関する研究
1964	C. H. Townes, N. G. Basov, A. M. Prokhorov メーザー、レーザーの発明および量子エレクトロニクスの基礎的研究
1965	朝永振一郎, J. Schwinger, R. P. Feynman 量子電磁力学の分野における基礎的研究
1966	A. Kastler 原子内のヘルツ波共鳴の光学的方法(光ポンピング法)の発見と開発
1967	H. A. Bethe 核反応理論に対する貢献、とくに星におけるエネルギー発生に関する発見
1968	L. W. Alvarez 水素泡箱による素粒子の共鳴状態に関する研究
1969	M. Gell-Mann 素粒子の分類と相互作用に関する発見と研究

年	物理学賞
1970	H. Alfvén 電磁流体力学での基礎的研究 L. Néel 反強磁性と強磁性に関する基礎的研究
1971	D. Gabor ホログラフィーの発明とその後の発展に対する寄与
1972	J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer 超伝導現象の理論的解明(BCS理論)
1973	江崎玲於奈, I. Giaever 半導体におけるトンネル効果と超伝導体の実験的発見 B. Josephson ジョセフソン効果の理論的予測
1974	M. Ryle, A. Hewish 電波天文学における先駆的研究
1975	J. Rainwater, A. Bohr, B. R. Mottelson 原子核構造に関する研究
1976	S. C. C. Ting, B. Richter 重い素粒子(J/ ψ 粒子)の発見
1977	P. W. Anderson, J. H. van Vleck, N. F. Mott 磁性体と無秩序系の電子構造の理論的研究
1978	P. L. Kapitsa 低温物理学における基礎的研究 A. A. Penzias, R. W. Wilson 宇宙マイクロ波背景放射の発見
1979	S. L. Glashow, S. Weinberg, A. Salam 中性カレントの予言、電磁相互作用と弱い相互作用の統一理論への寄与
1980	J. W. Cronin, V. L. Fitch 中性K中間子崩壊における基本対称性の破れの発見
1981	N. Bloembergen, A. L. Schawlow レーザー分光学への寄与 K. Siegbahn 高分解能光電子分光法の開発
1982	K. G. Wilson 物質の相転移に関連した臨界現象に関する理論

年	物理学賞
1983	S. Chandrasekhar, W. A. Fowler 星の進化、構造を知るうえで重要な物理的過程の研究
1984	C. Rubbia, S. van der Meer 素粒子(W,Z粒子)の発見をもたらしたプロジェクトへの貢献
1985	K. von Klitzing 量子ホール効果の発見と物理定数の測定技術の開発
1986	E. Ruska 電子顕微鏡に関する基礎研究と開発 G. Binnig, H. Rohrer 走査型トンネル顕微鏡の開発
1987	J. G. Bednorz, K. A. Müller 酸化物高温超伝導体の発見
1988	L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger μ ニュートリノの発見とレプトンの2重構造の実証
1989	N. F. Ramsey, H. G. Delmit, W. Paul 高精度原子分光法の開発
1990	J. I. Friedman, H. W. Kendall, R. E. Taylor 陽子と重水素核による電子の深部非弾性散乱に関する研究
1991	G. de Gennes より複雑な高分子、液晶、超伝導性材料の相転移現象の数学的研究
1992	G. Charpak 素粒子実験用の多線式比例計数箱の開発
1993	R. A. Hulse, J. H. Taylor 連星パルサーの発見
1994	B. N. Brockhouse, C. G. Shull 高密度物質研究のための中性子散乱技術の開発
1995	M. L. Perl, F. Reines レプトン(軽粒子)物理学の先駆的実験
1996	D. M. Lee, R. C. Richardson, D. D. Osheroff ヘリウム3の超流動の発見
1997	S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. D. Phillips レーザーを用いて原子を極低温に冷却する技術の開発

ノーベル物理学賞のリスト(続き)

1998: R. B. Laughlin, H. L. Stormer and D. C. Tsui,
分数量子電荷の量子流体状態の研究

2001: E. A. Cornell, W. Ketterle, C. R. Wieman,
アルカリ原子のボーズ・アインシュタイン凝縮

2003年 ノーベル賞

(昨年は低温の当たり年 / 3部門とも低温絡み)

物理: A.A. Abrikosov, V. V. Ginzburg, A. J. Leggett,

超伝導と超流動の理論

化学: P. Agre: アクアポリオン膜の水チャンネル

(本学の極低温顕微鏡が重要な仕事をした)

R. MacKinnon: イオン・チャンネル

医学: P. C. Lauterbur and P. Mansfield,

MRIの開発 (超伝導マグネット)