

低温科学B：2008年度(全学共通B群科目)

(後期・金曜5コマ目 (16:30-18:00) , 理学部6号館401講義室)

物質の磁性・超伝導 (局在電子・遍歴電子から高温超伝導まで)

吉村一良 教授 (理学研究科) 10/3, 10/17, 10/24, 10/31, 12/5,
1/9, 1/23

超伝導応用Ⅰ (超伝導磁石：核磁気共鳴MRIへの応用)

竹腰清乃理 教授 (理学研究科) 10/10

超伝導応用Ⅱ (超伝導量子磁束計の地球物理学への応用)

福田洋一 教授 (理学研究科) 11/7, 11/14

超伝導応用Ⅲ (超伝導磁石：核磁気共鳴MRIへの応用2)

清水 禎 連携併任教授 (理学研究科) 11/28

超伝導応用Ⅳ (エネルギー貯蔵, 電力輸送, 超伝導発電など)

白井康之 准教授 (エネルギー科学研究科) 12/12, 12/19

磁性と超伝導

低温科学
(吉村一良)

元素周期表(長周期型)

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	1 H 水素															2 He ヘリウム		
2	3 Li リチウム	4 Be 9.008 ベリリウム																
3	11 Na 22.99 ナトリウム	12 Mg 24.305 マグネシウム																
4	19 K カリウム	20 Ca 40.078 カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti 47.88 チタン	23 V 50.942 バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 65.38 亜鉛	31 Ga 69.723 ガリウム	32 Ge 72.63 ゲルマニウム	33 As 74.922 ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビジウム	38 Sr 87.62 ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr 91.224 ジルコニウム	41 Nb 92.906 ニオブ	42 Mo 95.94 モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru 101.07 ルビジウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd 112.41 カドミウム	49 In 114.82 インジウム	50 Sn 118.71 スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	56 Ba 137.33 バリウム	57 La ランタン	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム	63 Eu ユウロピウム	64 Gd ガドリウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジスプロシウム	67 Ho ホルミウム	68 Er エルビウム	69 Tm テマリウム	70 Yb イットリウム	71 Lu ルテチウム	
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89 Ac アクチン	90 Th チウロウム	91 Pa プロトアクチン	92 U ウラン	93 Np ネプツニウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm カリフォルニウム	97 Bk バークリウム	98 Cf カリフォルニウム	99 Es エールビウム	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデルビウム	102 No ノーボリウム	103 Lr ローレンシウム	

ランタノイド	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム	63 Eu ユウロピウム	64 Gd ガドリウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジスプロシウム	67 Ho ホルミウム	68 Er エルビウム	69 Tm テマリウム	70 Yb イットリウム	71 Lu ルテチウム
アクチノイド	90 Th チウロウム	91 Pa プロトアクチン	92 U ウラン	93 Np ネプツニウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm カリフォルニウム	97 Bk バークリウム	98 Cf カリフォルニウム	99 Es エールビウム	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデルビウム	102 No ノーボリウム	103 Lr ローレンシウム

元素の超伝導

■：超伝導元素 ■：磁氣的(超伝導を示さない) ①：薄膜にすると超伝導 ②：圧力下で超伝導

周期表と超伝導

阪大 清水研のhomepageより



超伝導周期律表

単体元素固体の金属化・超伝導化の普遍性に迫る

金属水素の室温超伝導の可能性？

高圧でのみ超伝導

我々が発見したもの

A periodic table of elements. The first column (Group 1) is highlighted in red, containing ^1H , ^3Li , ^{11}Na , ^{19}K , ^{37}Rb , ^{55}Cs , and ^{87}Fr . The second column (Group 2) is highlighted in pink, containing ^4Be , ^{12}Mg , ^{20}Ca , ^{38}Sr , ^{56}Ba , and ^{88}Ra . The transition metal block (Groups 3-10) is highlighted in pink. The remaining elements (Groups 11-18) are highlighted in red. The element ^{26}Fe is highlighted with a blue border. A red box with the text "我々が発見したもの" (What we discovered) is placed above the transition metal block.

Li : K. Shimizu *et al.*, *Nature* **419** (2002)597.

Li : K. Shimizu *et al.*, *Nature* **419** (2002)597.
B : M. I. Eremets *et al.*, *Science* **293**(2001)272.



France の磁性物理学の巨人

Pierre Curie, Paul Langevin
Pierre Weiss, Leon Brillouin, Louis Neel

Curieの法則: $\chi = C/T$, $\chi = C/(T - \theta)$ (1895年頃)
強磁性転移点: キュリー温度の発見 (Fe, Co, Ni)

Langevin の理論 (1905年) 原子磁気モーメント M

$$-M \cdot H = -\mu H \cos \theta$$

$$M = N \frac{\int \mu H \cos \theta \exp(\mu H \cos \theta / k_B T) d\omega}{\int \exp(\mu H \cos \theta / k_B T) d\omega}$$

$$= N \mu \left[\coth\left(\frac{\mu H}{k_B T}\right) - \frac{1}{\left(\frac{\mu H}{k_B T}\right)} \right] = N \mu L\left(\frac{\mu H}{k_B T}\right)$$

$$\begin{cases} x \rightarrow \infty \rightarrow N\mu \\ x \ll 1 \rightarrow N\mu \frac{1}{3} \left(\frac{\mu H}{k_B T}\right) = \frac{N\mu^2 H}{3k_B T} \rightarrow \chi = \frac{C}{T}, \quad C = \frac{N\mu^2}{3k_B} \text{ キュリー則} \end{cases}$$

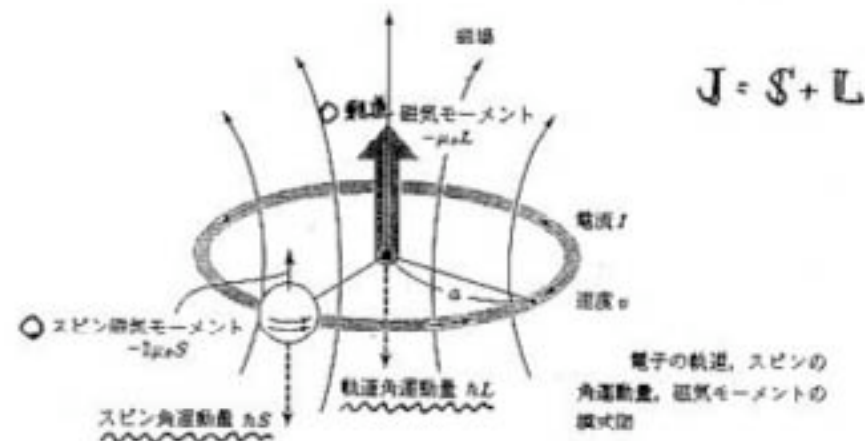
Weiss Langevin 理論を強磁性体に導入 (1907年)

分子磁場 AM $M = N\mu L\left(\frac{\mu(H+AM)}{k_B T}\right) \rightarrow N\mu L\left(\frac{\mu AM}{k_B T}\right)$

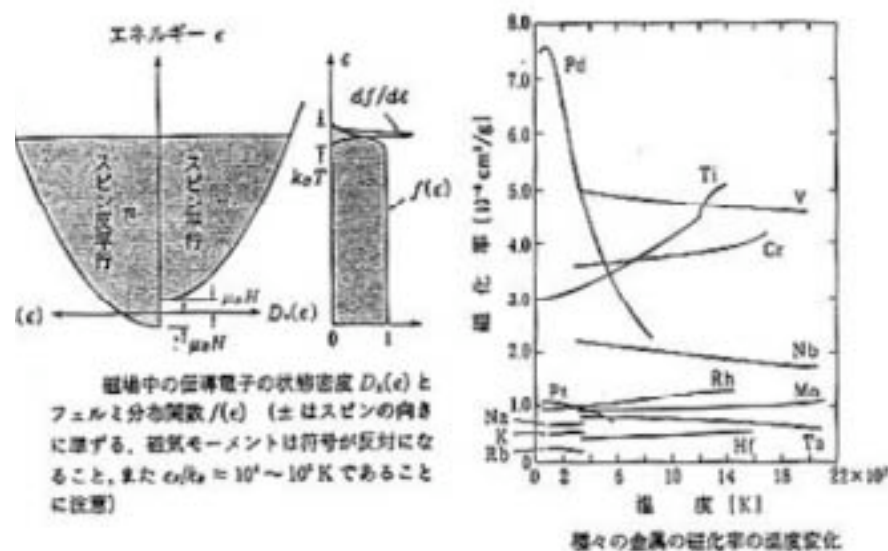
$$\chi = \frac{\mu AM}{k_B T}, \quad M = N\mu L(x), \quad M = \frac{k_B T}{\mu A} \chi$$

$$k_B T_C = \frac{1}{3} N\mu^2 A, \quad T > T_C: \chi = C/(T - T_C) \text{ キュリー・ワイス則}$$

原子の磁気モーメント ... 電子



金属の磁性 ... Pauli 常磁性





International Conference on Magnetism

**August 20-25, 2006
Kyoto, Japan**

**Kyoto International
Conference Hall**

<http://icm2006.com/>

Categories

1. Strongly Correlated Electrons
2. Quantum Spin Systems
3. Random Magnets
4. Magnetic Structure and Dynamics
5. Spin Electronics and Magneto-transport
6. Nano-structure, Surfaces, and Interfaces
7. Soft and Hard Magnetic Materials
8. Magnetic Recording and Memories
9. Measuring Techniques and Instruments
10. Applications
(MEMS, Actuators, Sensors, Magnetic refrigeration, etc.)
11. Interdisciplinary Topics
(Biomagnetism, Magnetism in medicine, etc.)

Executive committee

H. Yasuoka	(Chair: JAERI)
S. Maekawa	(Chair: Tohoku Univ.)
K. Takanashi	(Secretary: Tohoku Univ.)
K. Ueda	(Program: Univ. of Tokyo)
Y. Onuki	(Program: Osaka Univ.)
M. Takigawa	(Program: Univ. of Tokyo)
E. Torikai	(Program: Univ. of Yamaguchi)
K. Miyake	(Publication: Osaka Univ.)
Y. Kitaoka	(Publication: Osaka Univ.)
K. Mibu	(Treasurer: Nagoya Inst. of Tech.)
T. Miyazaki	(Industrial Support: Tohoku Univ.)
K. Yoshimura	(Exhibitor: Kyoto Univ.)
T. Shingo	(Local: IAS)
Y. Maeno	(Local: Kyoto Univ.)
T. Oho	(Local: Kyoto Univ.)

Calendar

Call for papers	November 1 (Tue.), 2005
Abstract deadline	January 18 (Wed.), 2006
Deadline for contributed papers	May 24 (Wed.), 2006
Deadline for advance registration	June 1 (Thu.), 2006

Satellites

- 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2006)
August 15-18, 2006, Sendai
<http://icmfs2006.apph.tohoku.ac.jp/>
- 4th International Conference on Physics and Application of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-N)
August 15-18, 2006, Sendai
http://www.ksl.tohoku.ac.jp/~mmlab/PASPS4/tyer_PASPS.pdf
- Yamada Conference LX on Research in High Magnetic Fields
August 16-18, 2006, Sendai
<http://www-lab.mr.tohoku.ac.jp/~rht/index.html>
- Highly Frustrated Magnetism 2006
August 15-18, 2006, Osaka
<http://www.kobe-u.ac.jp/hfm2006/>
- Novel Pressure-Induced Phenomena in Condensed Matter Systems
August 27-29, 2006, Fukuoka
<http://physlrm.kyushu-u.ac.jp/psmi/fukuoka2006/index.html>
- Advances in Neutron, SR, μ SR and NMR Researches
complementary probes for magnetism
August 28-30, 2006, Tokyo
<http://trial.nsl.jp/tokyo.ac.jp/w/2006/>

Sponsors

The Science Council of Japan
The Physical Society of Japan
The Magnetics Society of Japan
The Japan Society of Applied Physics
The Japan Institute of Metals

Contact

Academic Contact
Secretary: Prof. K. Takanashi (Tohoku Univ.)
E-mail: kan2006@ipc.tohoku.ac.jp

Conference Secretariat
via JRS Communications, Inc.
1070001 2071st St., D-202, Utsunomiya, Osaka 555-0001, Japan
Tel: +81-6-6545-1391 Fax: +81-6-6545-4105
E-mail: kan2006@jrscom.co.jp

第18回磁性国際会議
ICM2006 Kyoto

日本:磁性大国!

ICM-1965
ICM-1982
ICM-2006

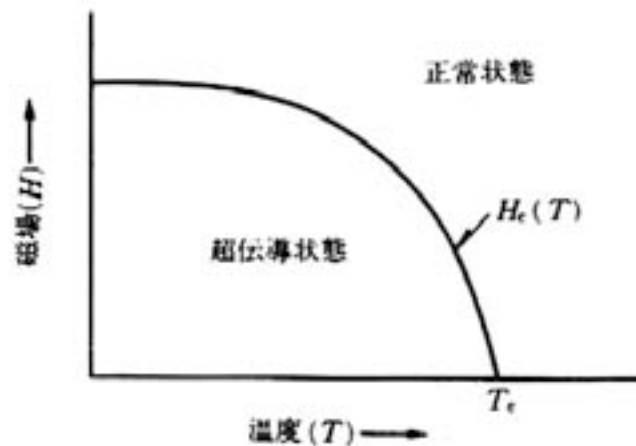


日本、京都で!

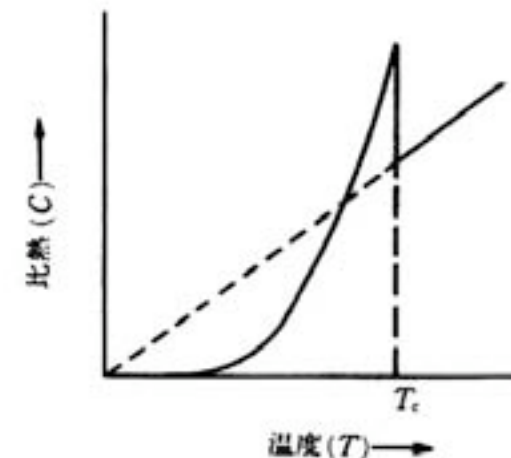
物性 $\Leftrightarrow$ 相転移 (Phase Transition)

相転移現象

秩序変数
(order parameter) : ψ



超伝導体の磁場と温度の関係 (相図)

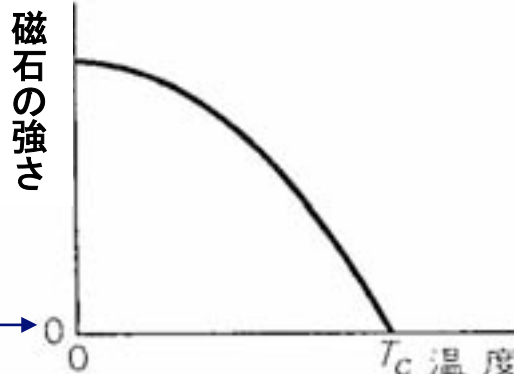


超伝導体の比熱の温度変化

強磁性転移

$T = 0 \text{ K}$

↑ ↑ ↑ ↑
↑ ↑ ↑ ↑
(完全にそろう)

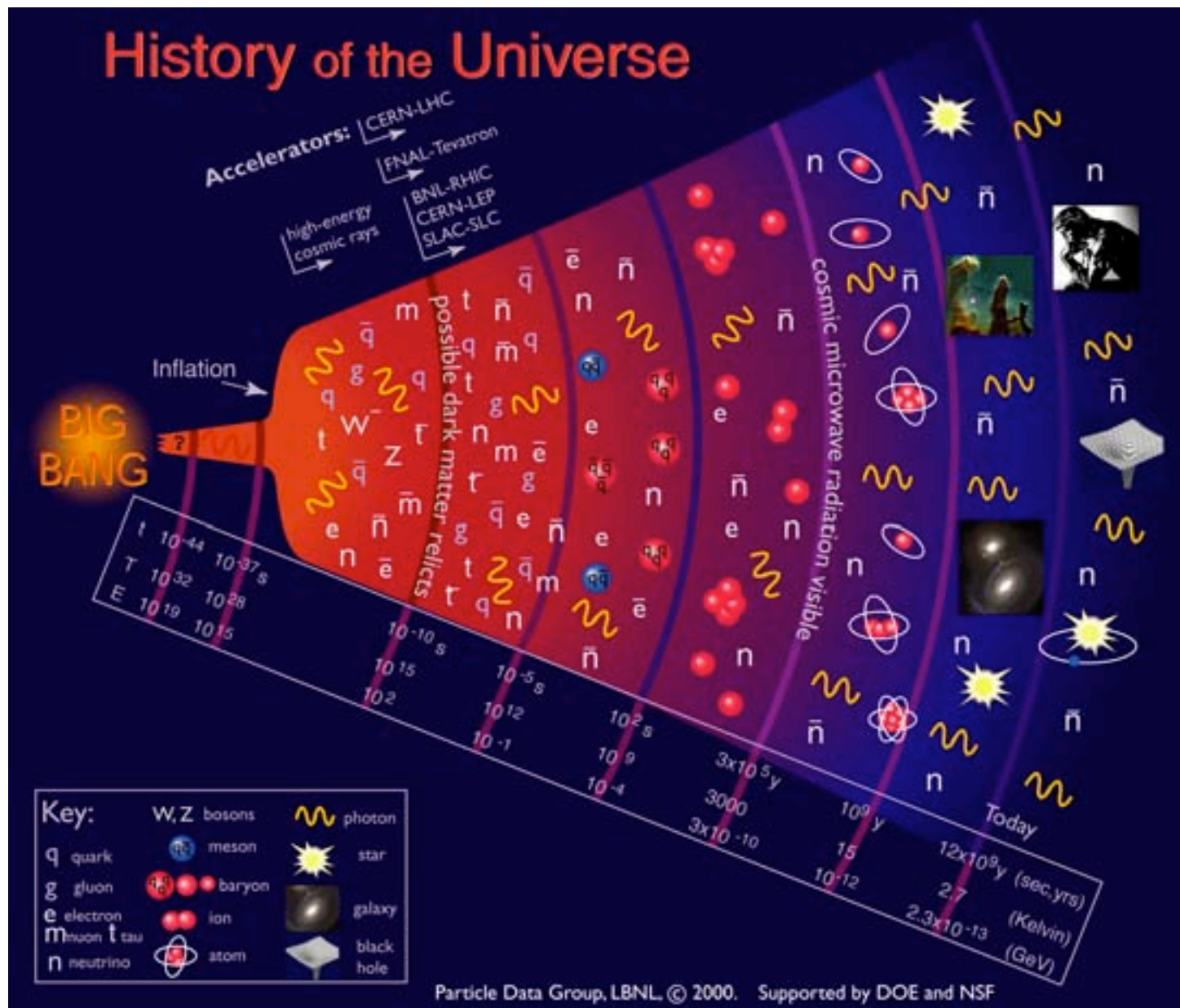


$T = \infty$

↑ ↻ ↻ ↻
↻ ↻ ↻ ↻
(バラバラ)

$$T_C = \frac{J}{k_B}$$

(磁石になる温度)



出所 http://www.particleadventure.org/frameless/chart_cutouts/universe_original.jpg

相転移→自発的対称性の破れ

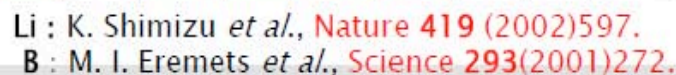
出所 http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/

電子：質量、電荷、スピン

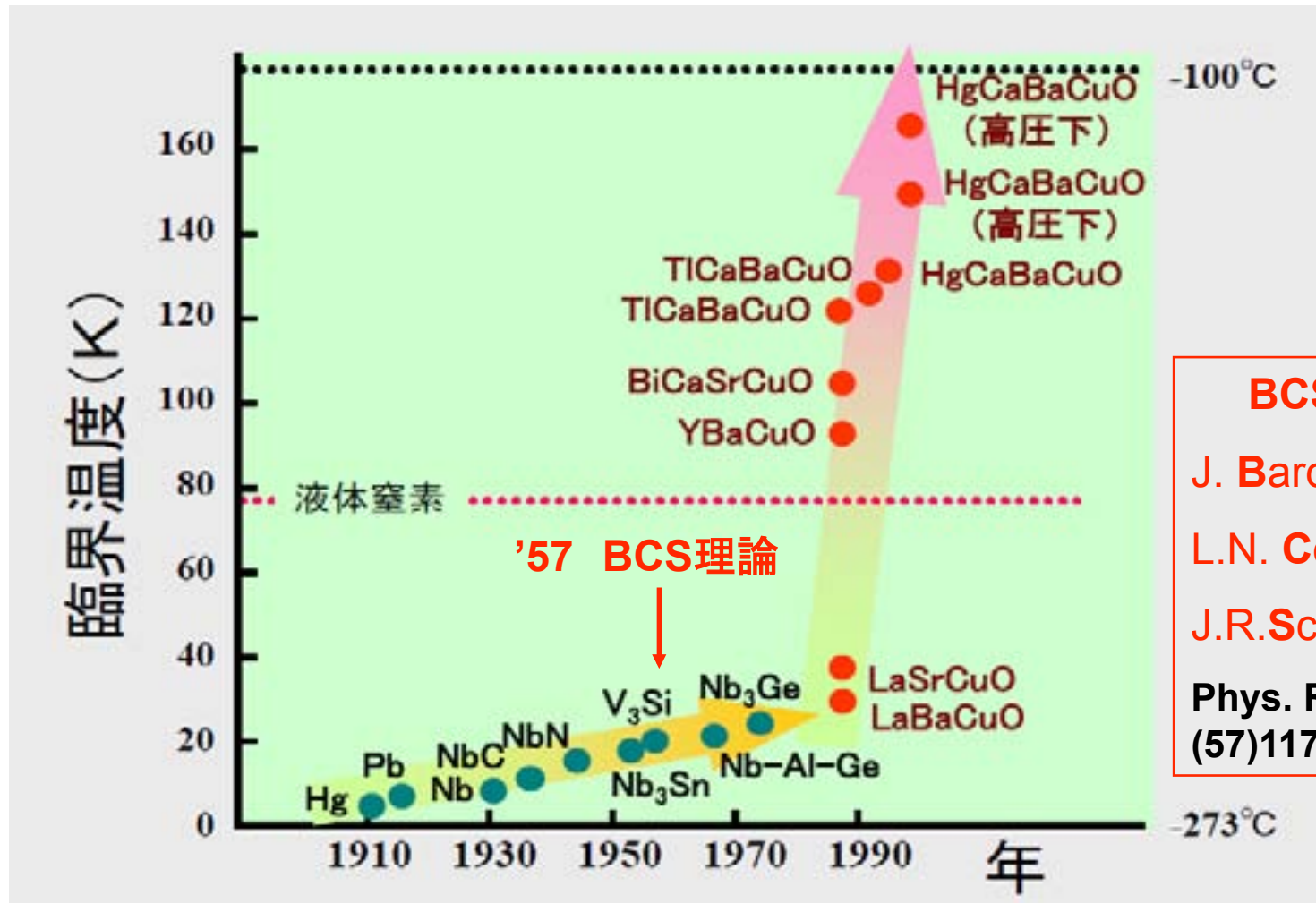
← 電荷

← スピン

超伝導



超伝導転移温度の歴史



1911年 Hgの超伝導発見

1957年 BCS 理論

1972年 ³Heの超流動

1979年 CeCu₂Si₂の超伝導

1987年 銅酸化物高温超伝導

(赤: ノーベル賞受賞)

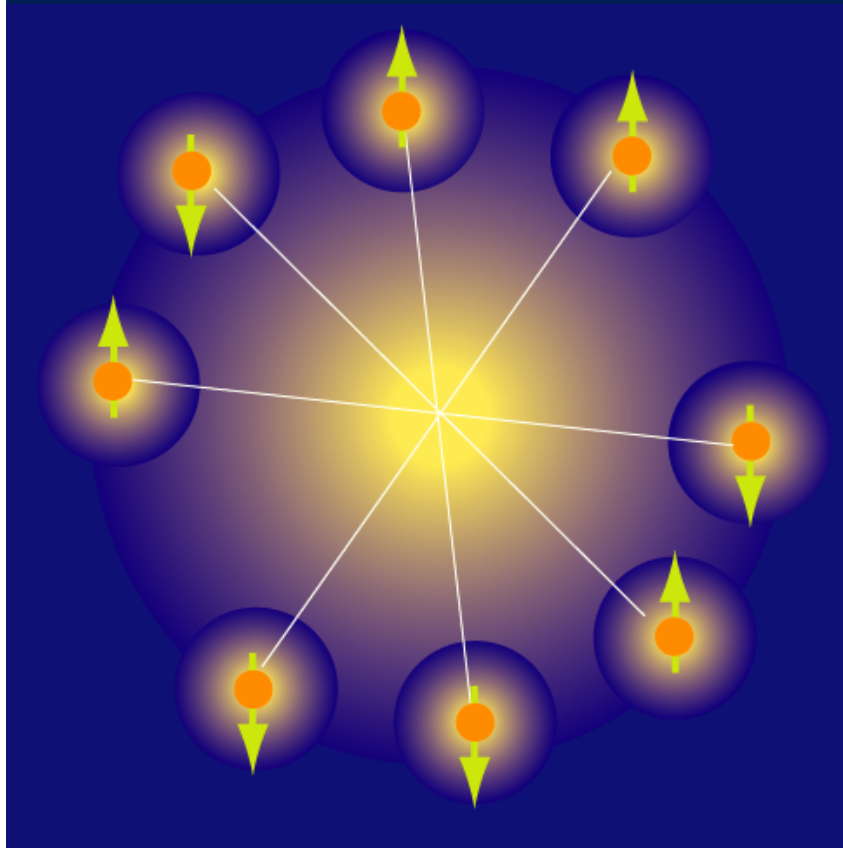
超伝導理論

BCS理論



Bardeen Cooper Schrieffer

出所 http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1972/



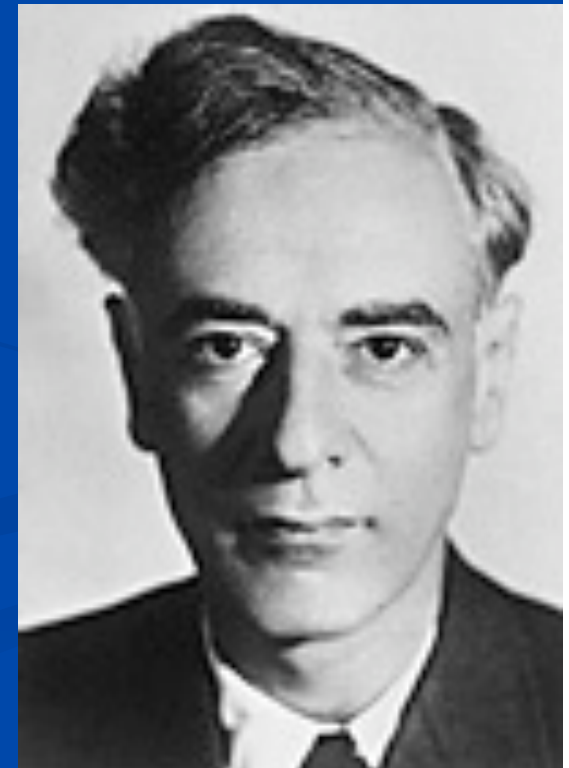
GL理論

大Landau

相転移現象論

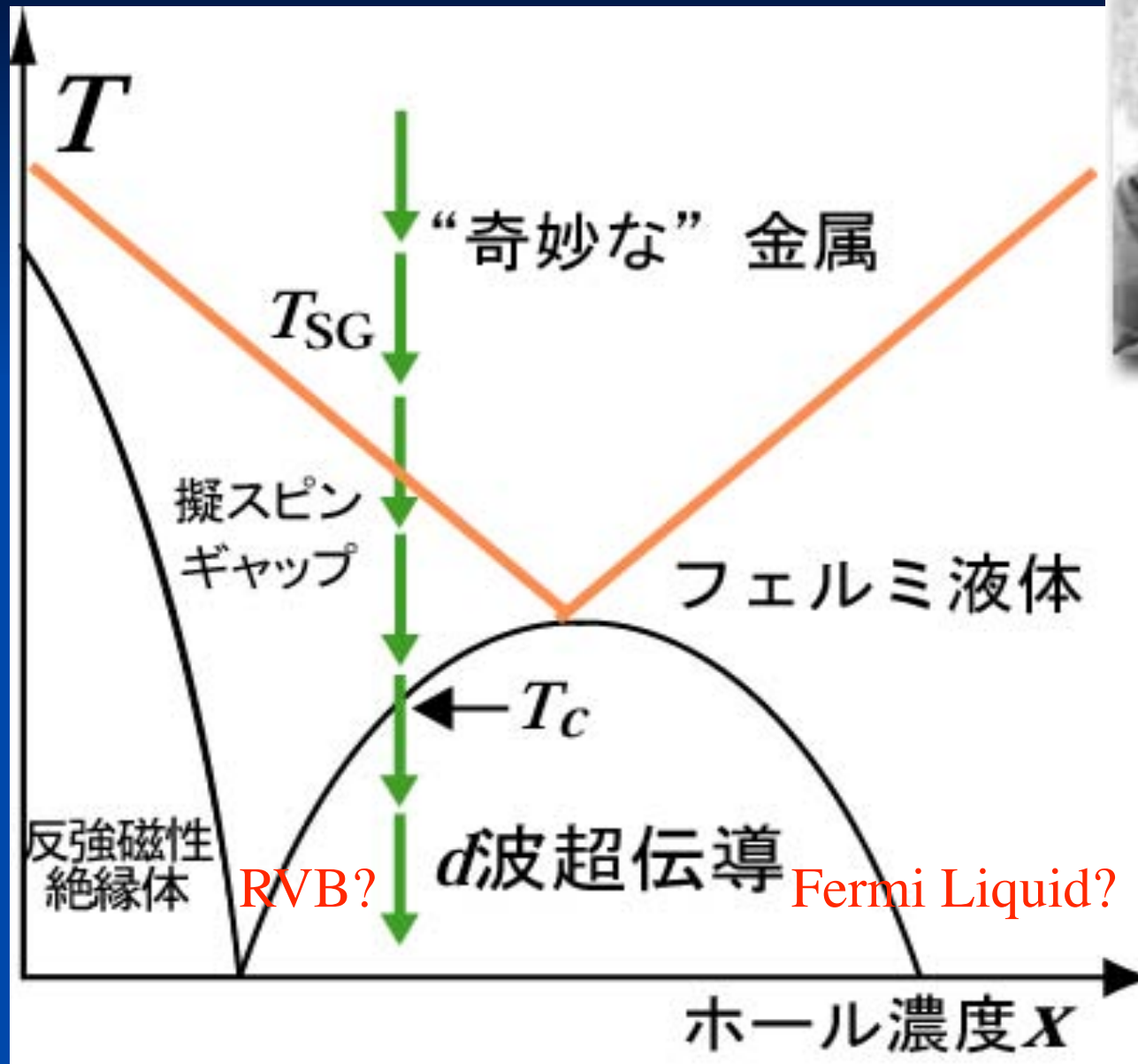
$$\langle \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ k \end{array} \begin{array}{c} \downarrow \\ \bullet \\ -k \end{array} \rangle = \psi$$

秩序パラメータ



出所 http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1962/

高温超伝導体電子相図



P.W.Anderson

RVBか?

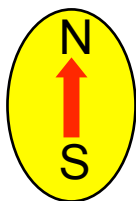
FermiLiquidか?

エントロピー:

S (秩序・無秩序)

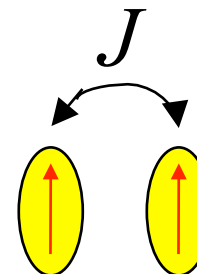
原子のもつ磁石(スピン)を例に考える

(磁性 / 磁石)



スピンの間に力(J)が働き、

交換相互作用



同じ方向に向く

スピンの熱運動エネルギー: $\sim k_B T$

スピンをそろえるエネルギー: J

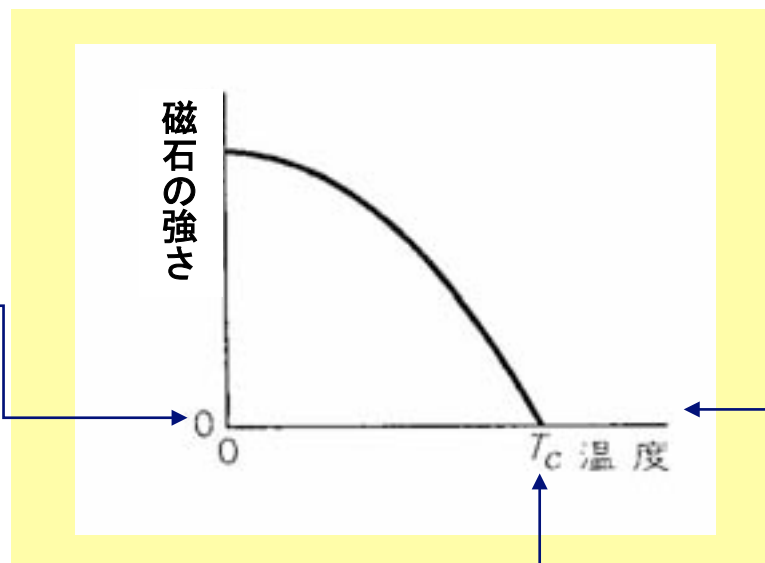
- $k_B T \langle J \Rightarrow$ スピンがそろう
- $k_B T \rangle J \Rightarrow$ スピンがバラバラ(熱的にかく乱されている)

$$k_B T_C = J \quad (\text{臨界温度 } T_C)$$

相転移現象

$T = 0 \text{ K}$

↑ ↑ ↑ ↑
↑ ↑ ↑ ↑
(完全にそろう)



強磁性転移

$T = \infty$

↑ ↺ ↻ ↻
↻ ↻ ↻ ↻
(バラバラ)

$$T_C = \frac{J}{k_B} \quad (\text{磁石になる温度})$$

無秩序さの度合い = エントロピー : S

$$S \equiv k_B \ln W \quad (\text{ボルツマンの式})$$

スピンの場合で↑と↓の場合しかないとする

$$\text{高温の場合} \quad W = (2)^N \quad (k_B T \gg J) \quad \Longrightarrow \quad S = Nk_B \ln 2 = R \ln 2$$

$$T = 0 \text{ の場合} \quad W = 1 \quad (\text{全部上向きの状態})$$

$$S = 0$$

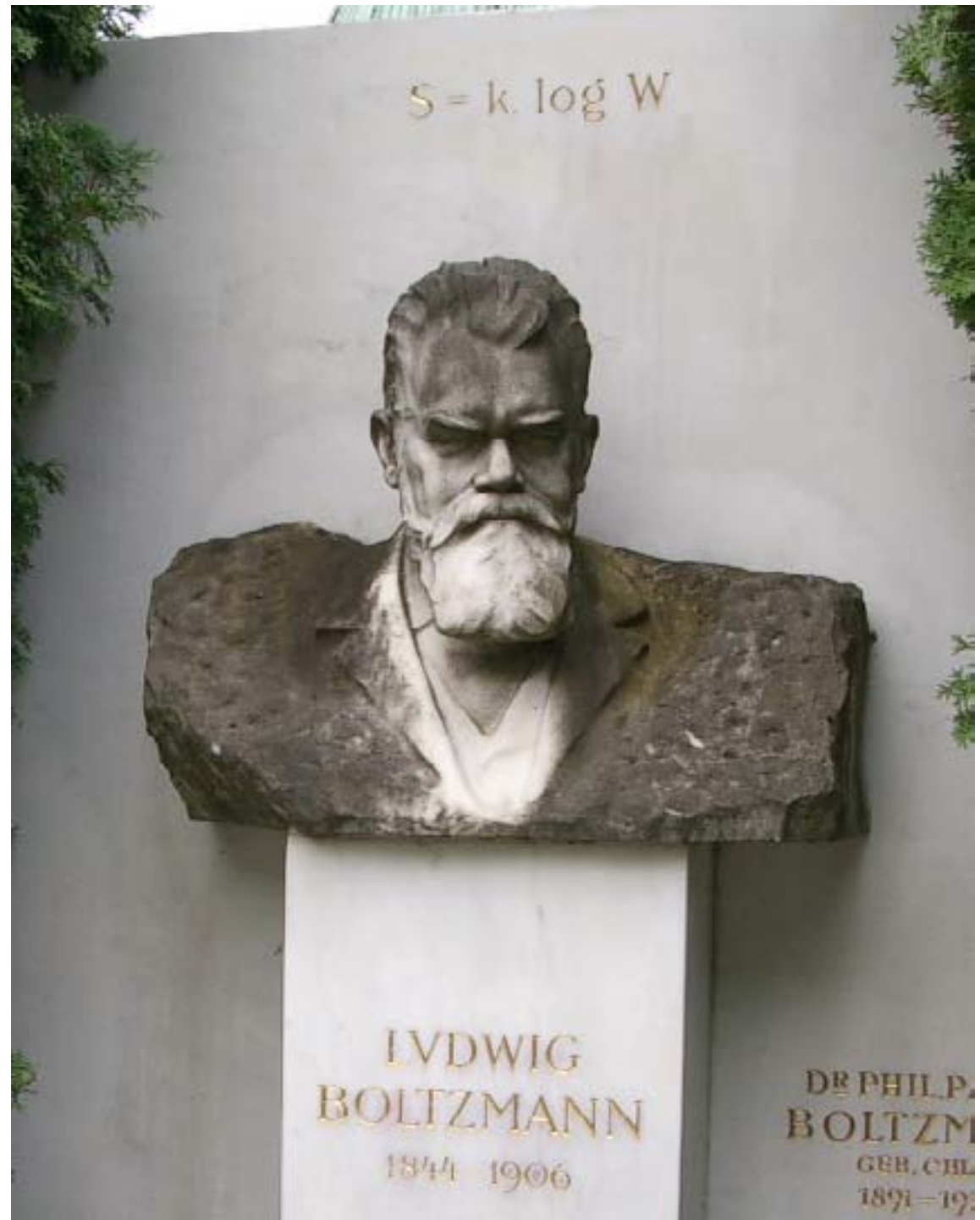
熱力学第3法則

統計物理学の祖
Ludwig Boltzmann
Universität Wien

$$S = k_B \log_e W = k_B \ln W$$

Boltzmannの公式

Boltzmannの墓碑銘



熱力学の法則

- 第1法則

エネルギー保存則(仕事とエネルギーの等価性)

- 第2法則

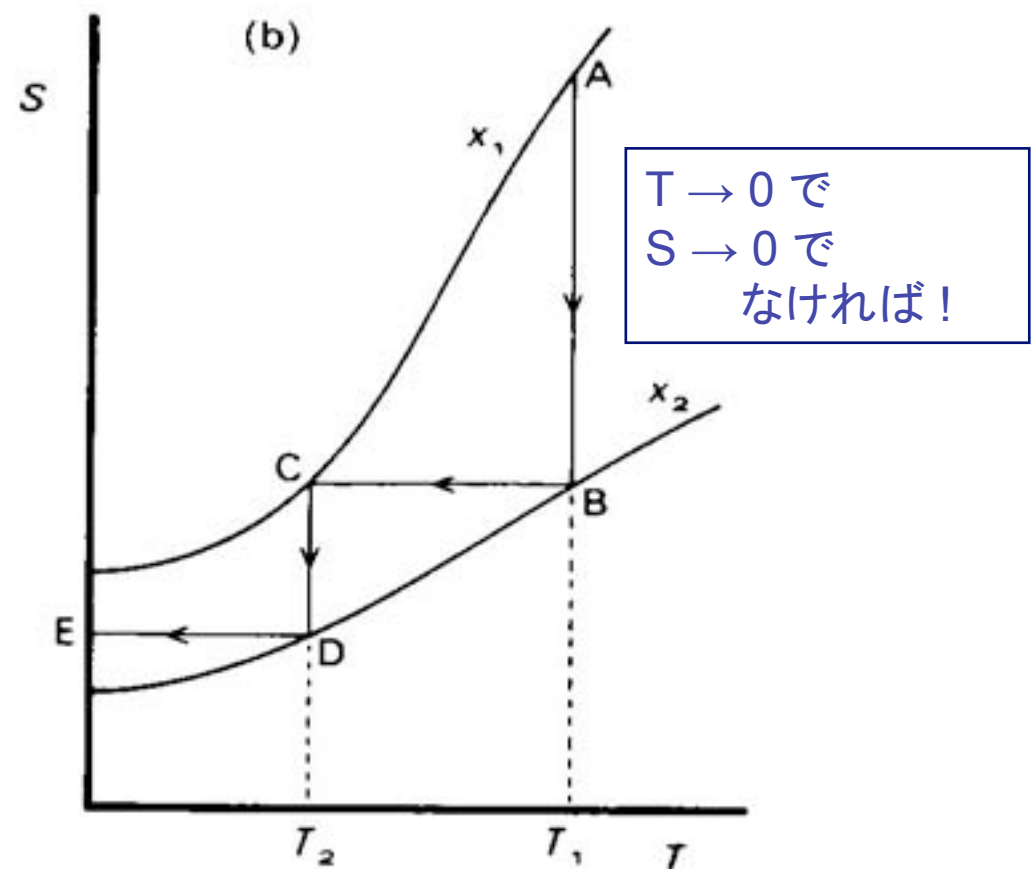
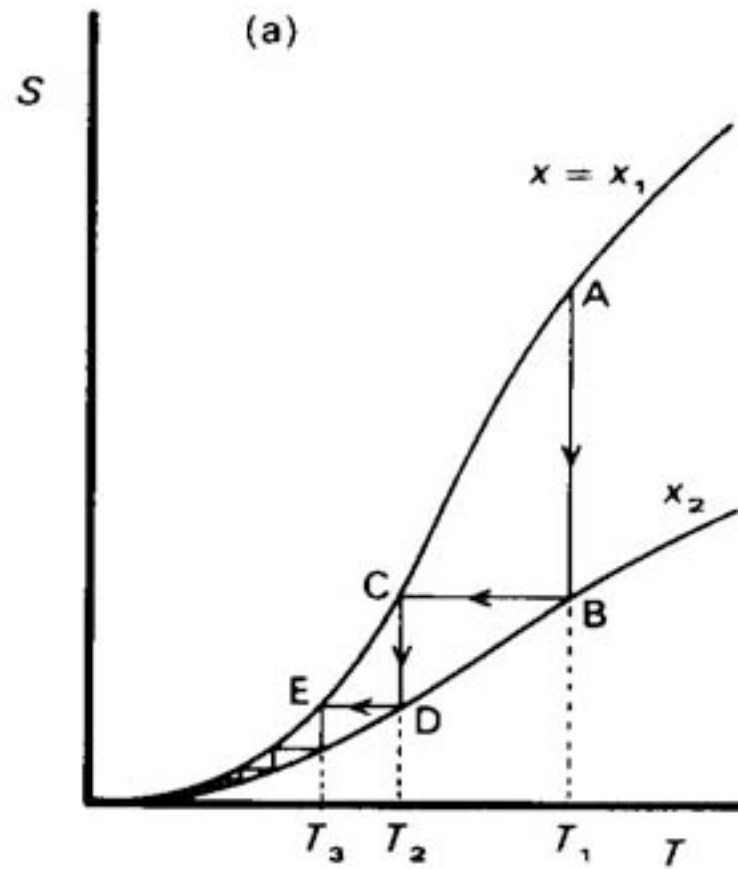
自然に放置すればエントロピー S
が増大する方向に変化が起こる

熱は高温から低温に流れる。
低温の生成 (低温部から熱をとって高温部に運ぶ)

(注) 宇宙の温度 $\sim 3\text{ K}$ (背景輻射)
高圧、高磁場、高温は存在するが 3 K 以下の低温は存在しない

- 第3法則

$$S = 0 \quad , \quad T = 0$$



(絶対零度には到達できない)

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

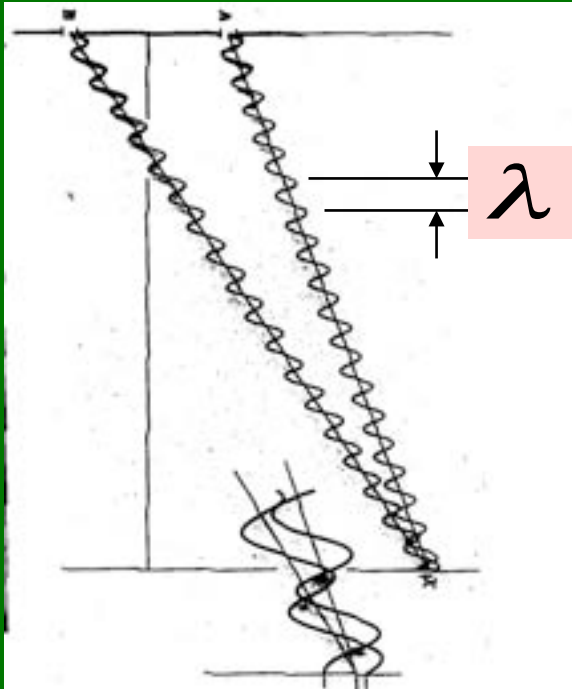
断熱変化

$$\Delta S = 0$$



ド・ブロイの物質波 (電子の波長は)

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$



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

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

p : 運動量 ($\sqrt{2meV}$)

波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \hbar k = \frac{h}{\lambda} = p$

(ド・ブロイ / 1929 年 ノーベル賞 / 電子の波動性の発見)

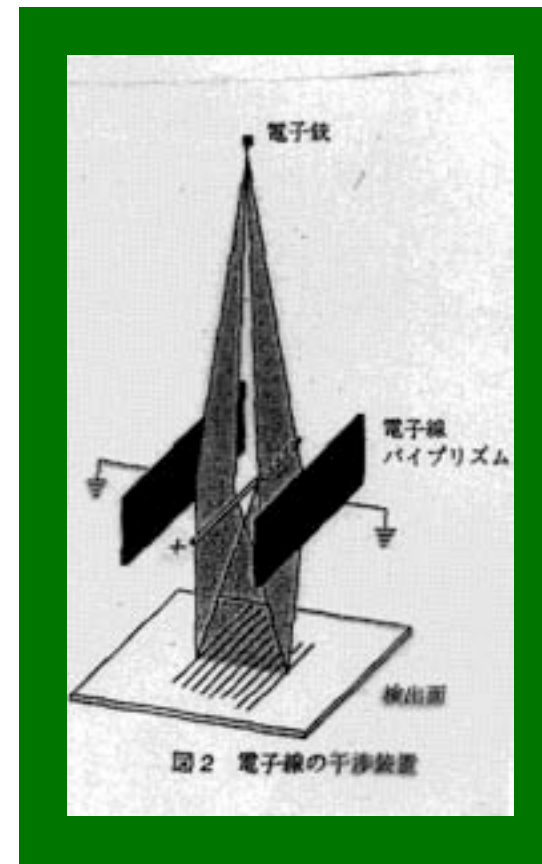
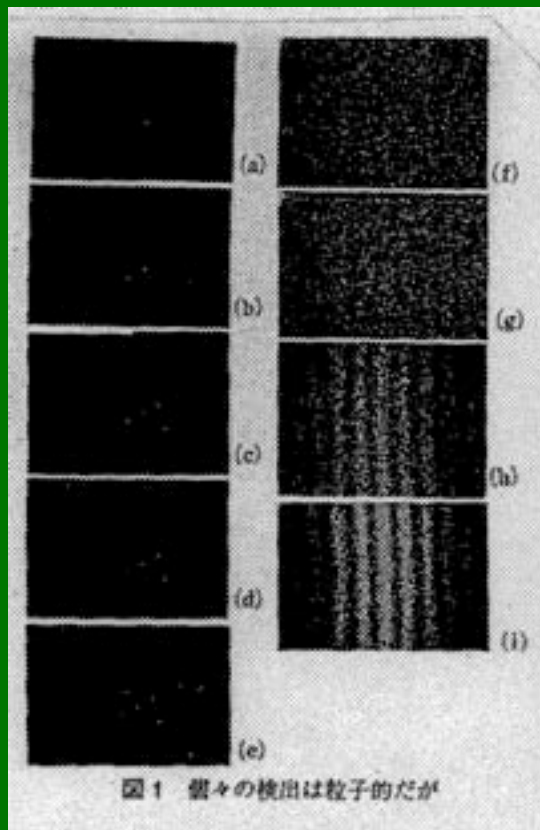
古典から量子の世界へ

(高温) (低温)

量子力学… (ミクロな世界の法則)

1920年代 シュレディンガー、ハイゼンベルグ

粒子の波動性: 電子

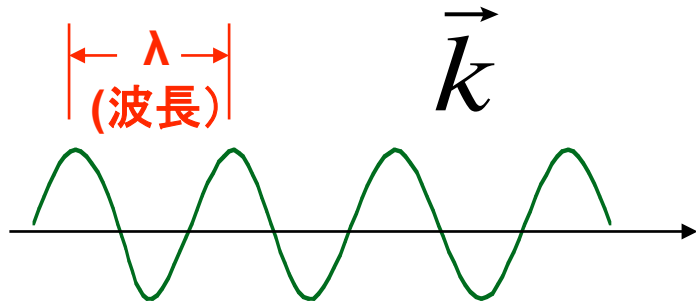


・古典論

$$m \bullet \xrightarrow{\vec{v}} \quad \vec{p} = m\vec{v} \quad \Leftrightarrow \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

・量子論 — 粒子は波である (二重人格) → 波動関数: $\psi(x)$

(注) $|\psi(x)|^2$: 粒子の存在確率



$$\begin{aligned} \psi(x) &= e^{i(2\pi x / \lambda)} = e^{i(2\pi p \cdot x / h)} \\ &= \sin(2\pi x / \lambda) = \sin(2\pi p x / h) \end{aligned}$$

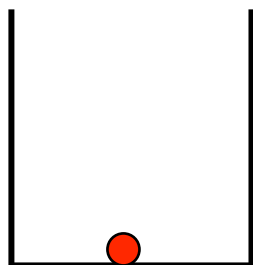
$$e^{i(2\pi p \cdot x / h)} = e^{i(2\pi p (x + \lambda) / h)} \quad \longrightarrow \quad e^{i(2\pi p \cdot \lambda / h)} = 1$$

$$\frac{P\lambda}{h} = 1 \quad \text{or} \quad P = h / \lambda$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{p}{\hbar} \quad \text{: 波数ベクトル}$$

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

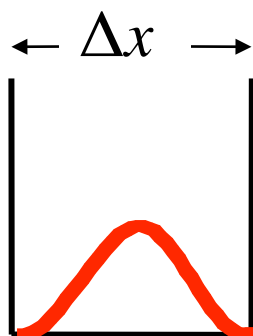
● 不確定原理 (ハイゼンベルグ)



古典力学

$$x = 0$$

$$v = 0$$



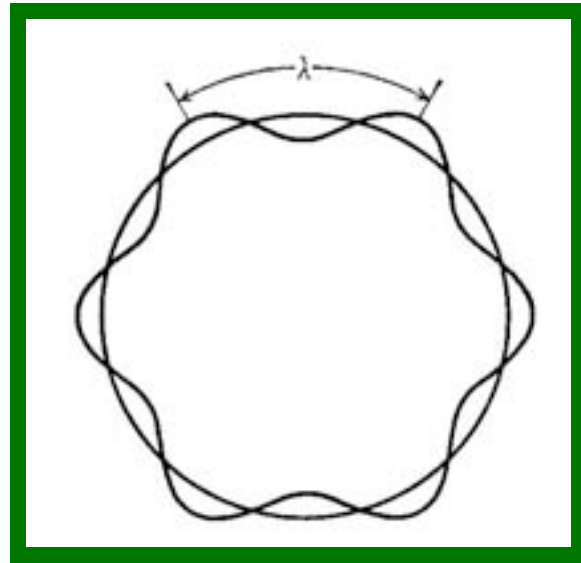
量子力学 (波動性)

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

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

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

● 量子化 (とり得る状態がとびとびになる)



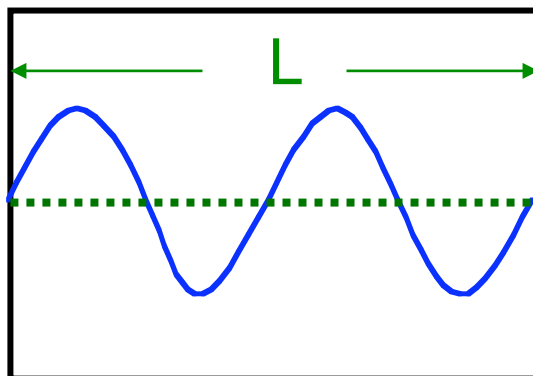
輪の上を伝わる波
(波長は輪の長さの整数分の1
でなければならない)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{p}{\hbar}$$

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

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

箱の中の粒子



(周期条件)

$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{P^2}{2m} \quad , \quad (P = mv)$$
$$= \frac{h^2}{2mL^2}(n)^2$$

- 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

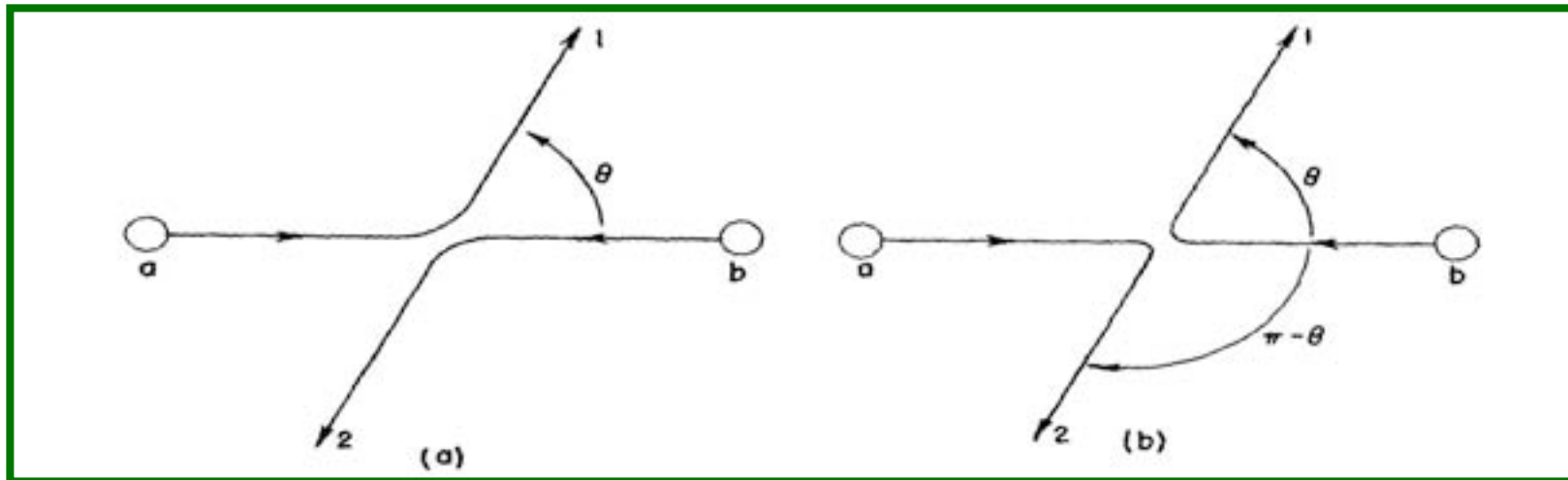
$$\psi(X_1, X_2) = -\psi(X_2, X_1)$$

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、同じ状態に (**a = b**) 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、**

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

(同じ状態に何個入っても良い)

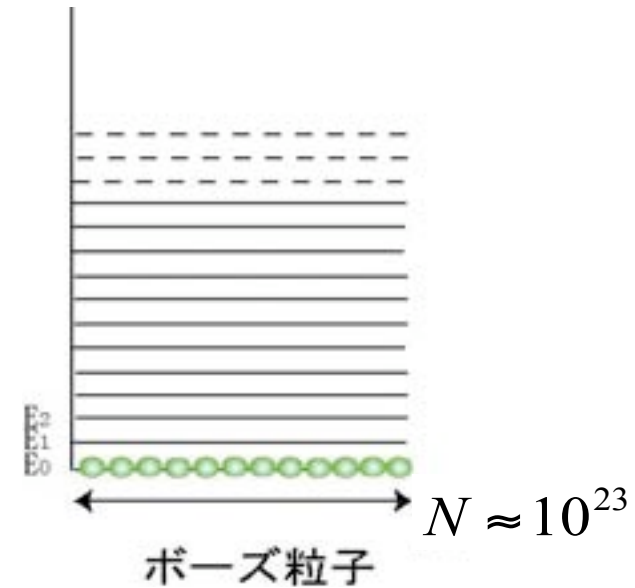
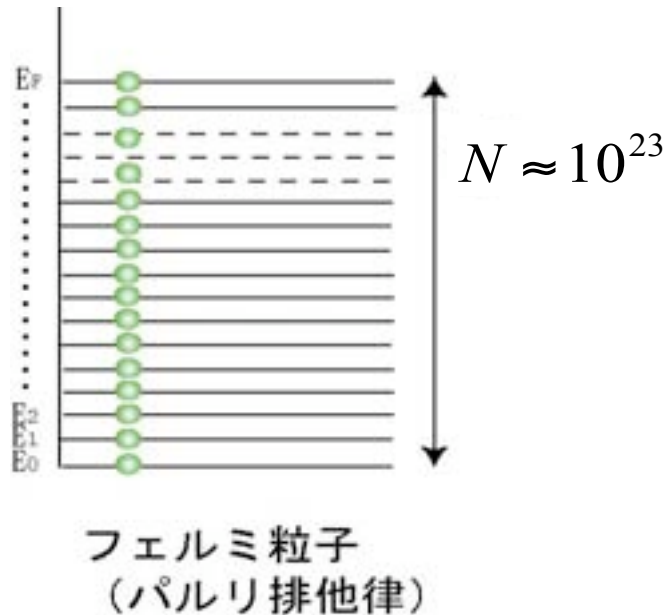
- **フェルミ粒子の場合、**

$$\psi_F(1,2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \psi_a(1)\psi_a(2) - \psi_a(2)\psi_a(1) \} = 0$$

(同じ状態には2個入れない)

パウリの排他律 !!

$T = 0 \text{ K}$ では



「箱の中には N 個の粒子がある」

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

対凝縮の相転移

電子：
フェルミ粒子 (Fermion)
 $S = n/2$ (半整数)

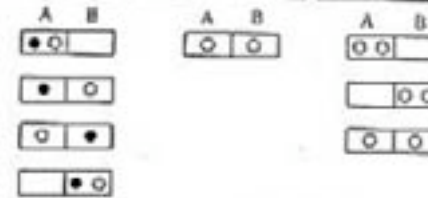
↓ ↑

ボーズ粒子 (Boson)
 $S = m$ (整数)

量子統計: Fermi-Dirac
Bose-Einstein
PauliとDirac

一般に熱平衡状態では、ある系がエネルギー ϵ の状態に存在する確率はボルツマン因子 $\exp(-\epsilon/k_B T)$ に比例する (k_B : ボルツマン定数), $f(\epsilon)$

(a) ボルツマン分布 (b) フェルミ・ディラック分布 (c) ボース・アインシュタイン分布

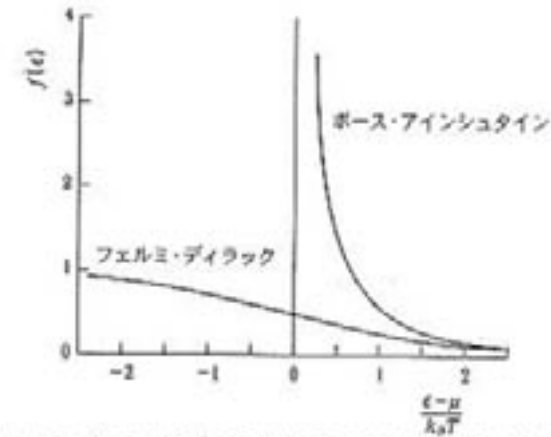


$$f(\epsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\epsilon - \mu}{k_B T}\right) \pm 1}$$

不確定性原理

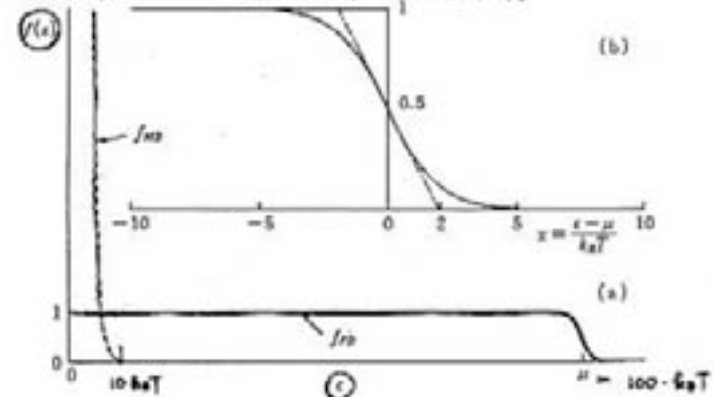
パウリの排他原理 (フェルミ粒子)

種々の統計分布



フェルミ・ディラック分布関数とボース・アインシュタイン分布関数の比較

図17-10 温度 T における粒子のエネルギーの分布



(a) フェルミ分布関数 $f_{FD}(k_B T / \mu = 10^{-2})$ の場合とマクスウェル・ボルツマン分布関数 f_{MB} (破線)

(b) フェルミ分布関数を $x = (\epsilon - \mu) / k_B T$ の関数として示す。

フェルミ面

フェルミエネルギー →
~1万度(K)



フェルミ気体
フェルミ液体