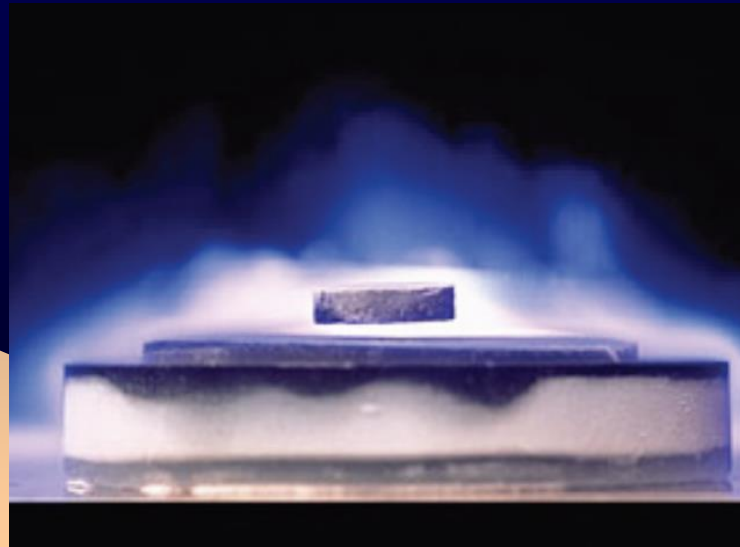
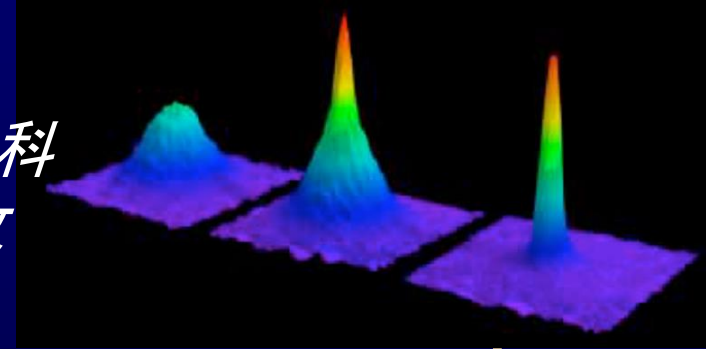


超伝導の物理

松田祐司

京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻
物理学第一教室



講義：非従来型超伝導

講義内容

超伝導現象

BCS理論

非従来型超伝導

高温超伝導体

鉄ヒ素系超伝導体

重い電子系超伝導体

エキゾチック超伝導状態

大

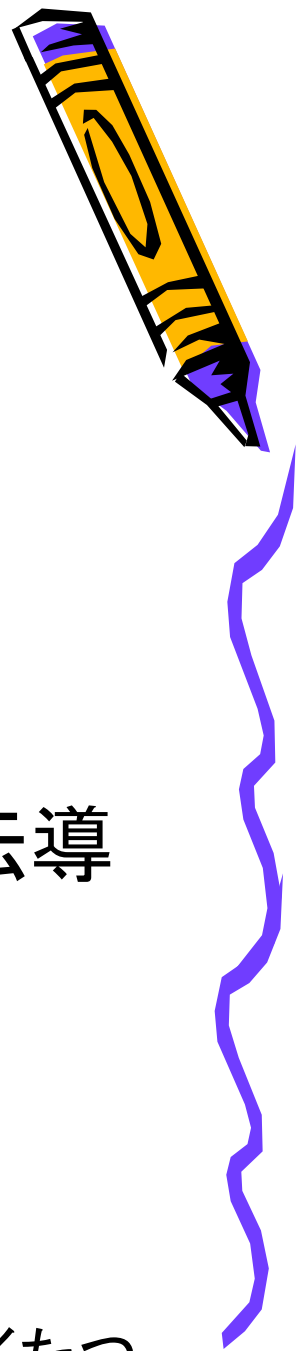


内容

1. 原子と電子を支配する法則
2. 極低温で何が起こるか
3. 宇宙に存在する最も単純な粒子の集団
4. 物理学における最も劇的な現象
超伝導と超流動、特に超伝導
5. 従来とは異なる超伝導物質
6. 21世紀の最先端科学技術としての超伝導

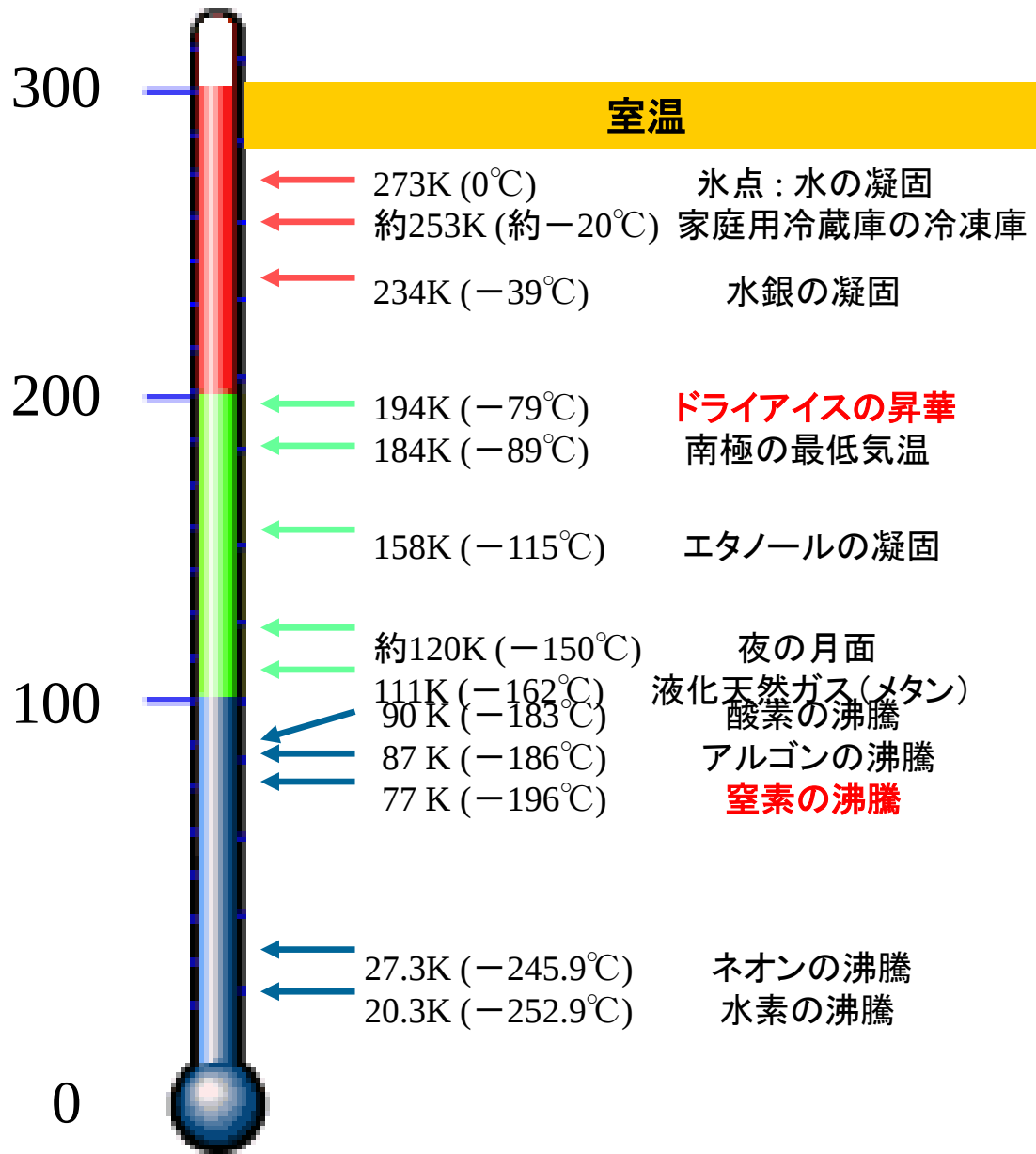


超伝導：
発見されて100年近かつ



19世紀 酸素の液化に成功して以来、各国で気体を液化する競争がはじまり、19世紀末には水素の液化に成功した。

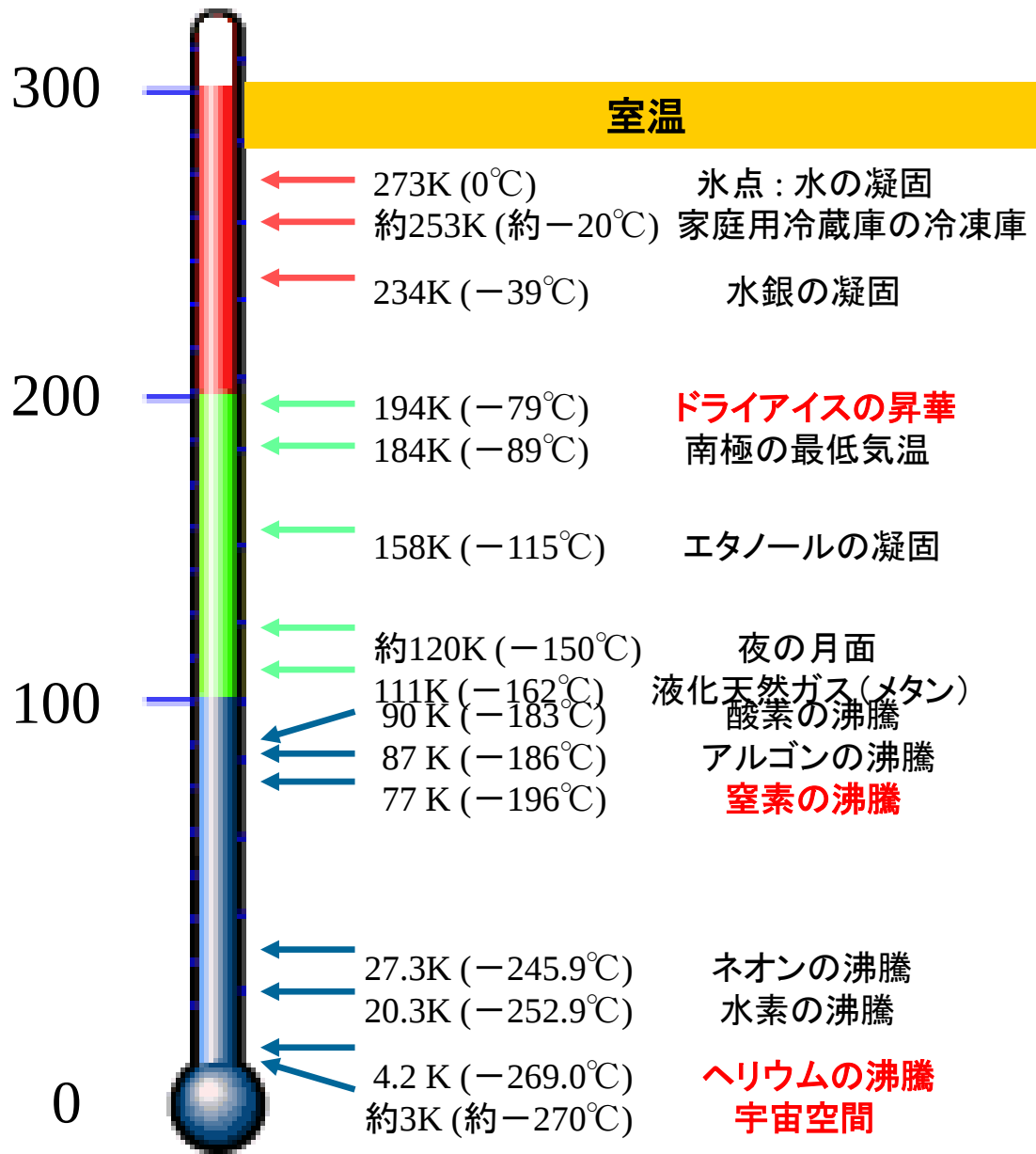
絶対温度
(単位「ケルビン」)



19世紀 酸素の液化に成功して以来、各国で気体を液化する競争がはじまり、19世紀末には水素の液化に成功した。

20世紀 ヘリウムも、ついに液化された。

絶対温度
(単位「ケルビン」)



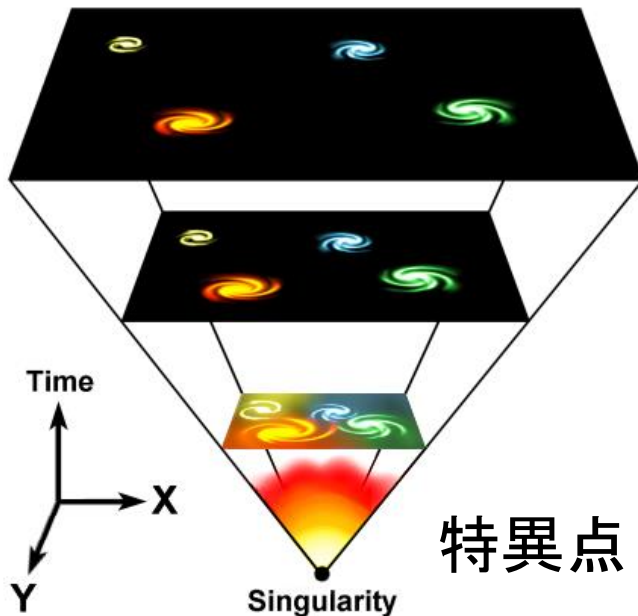
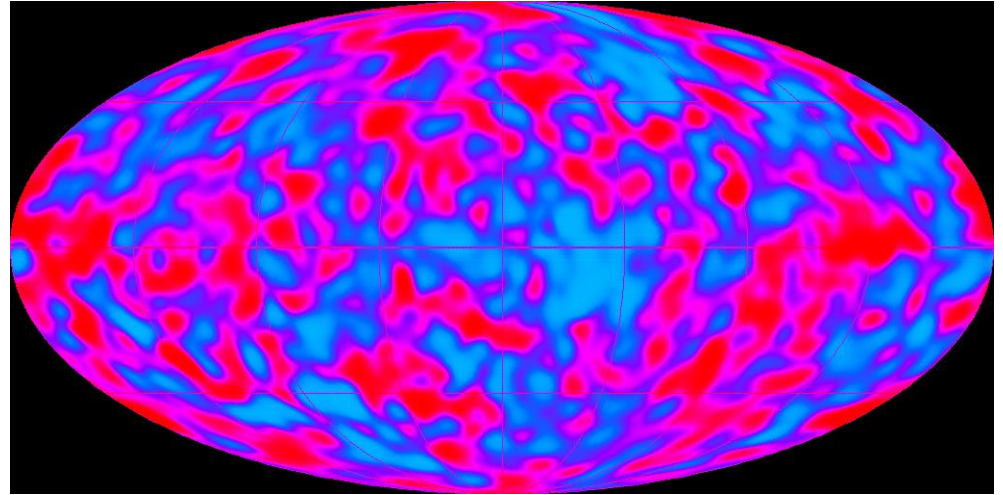
広い宇宙でも3Kより低い温度は人工的なもので、人類はすでにマイクロケルビンの領域に到達しています。

我々の住む世界はどうやってできたのか

宇宙望遠鏡



宇宙背景放射のゆらぎ



世界は大爆発から始まった

超高温から徐々に冷えていった

絶対零度 (Absolute zero)

-273.15°C 0° K

絶対零度 (Absolute zero)

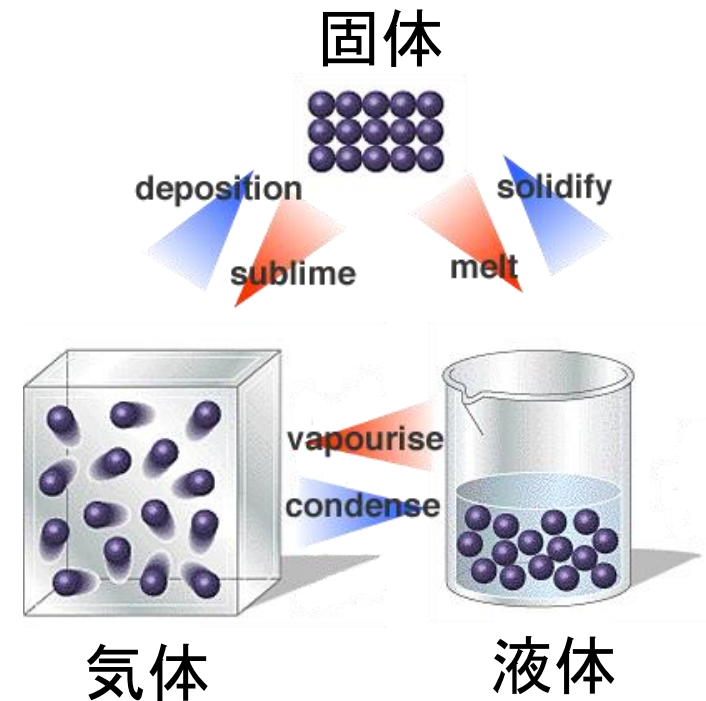
-273.15°C 0° K

これ以上低い温度は存在しない

運動エネルギーがゼロになる

すべてのものは固
まって凍り付く

だから物質を冷却しても
何も起こらない??



19世紀 酸素の液化に成功して以来、各国で気体を液化する競争がはじまり、19世紀末には水素の液化に成功した。

20世紀 ヘリウムも、ついに液化された。

その後の実験で、絶対零度付近で全く信じられない奇妙な現象が次々と報告された。金属の電気は永久に流れ続け、鉛の玉が空中に浮き、ヘリウムの液体は容器の壁をはい上がってきたのである。

絶対零度への挑戦—低温の世界
を求めた科学のドラマ
メンデルスゾーン

原子核

原子

金属

中性子星

に共通する
ものは何か

“When fermions become bosons”:
Carlos Sa de Melo, Physics Today
(2008)

川口由紀 パリティ(2009)

学部学生(1,2年生)

学部学生(3,4年生)

大学院生

中性子、陽子、クォーク、
電子でできている

構成粒子がフェルミオン
フェルミ縮退

超流動性と呼ばれ
る集団的・巨視的な
性質を持つ

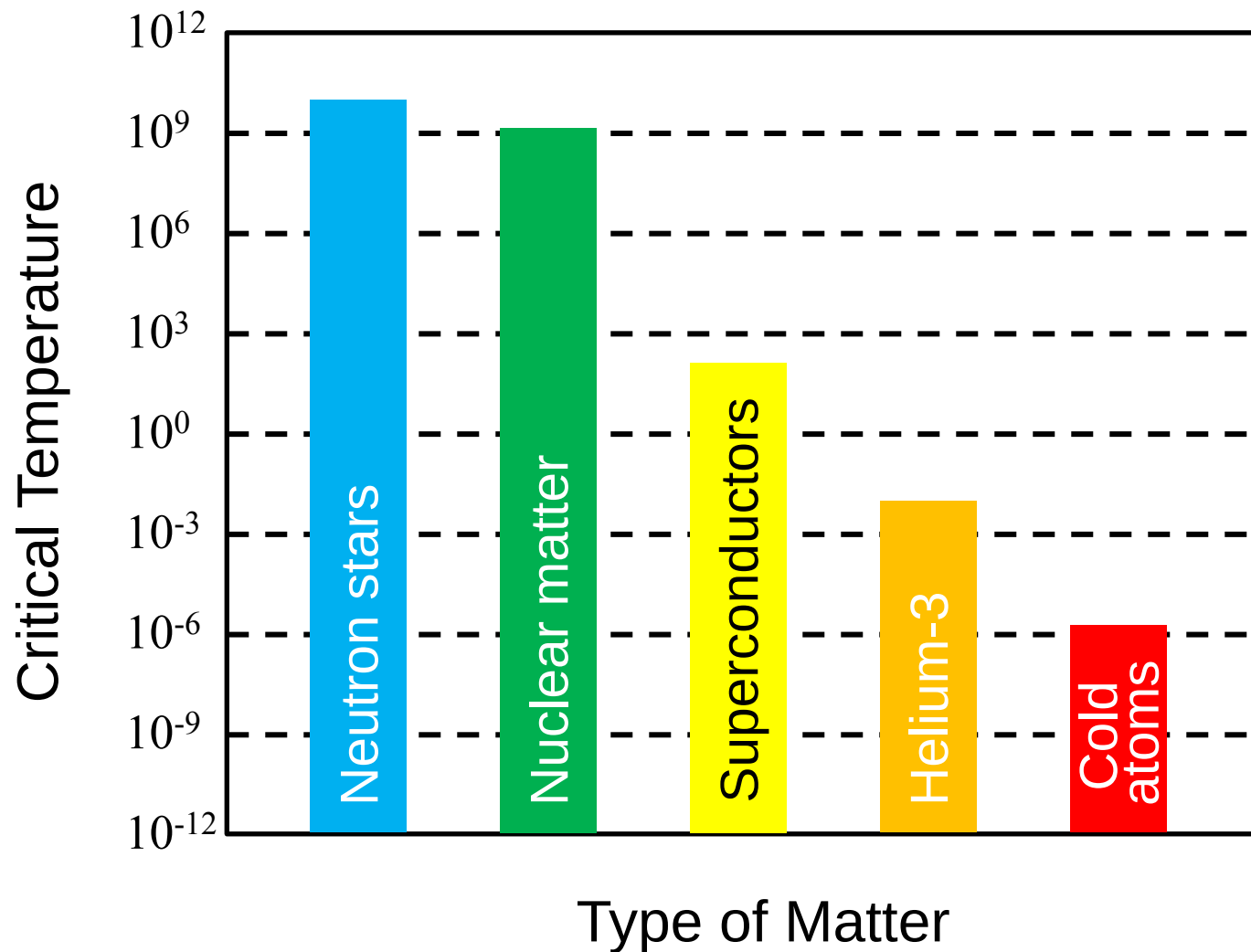
超伝導

超流動

ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)

物理学における最も劇的な現象の一つ

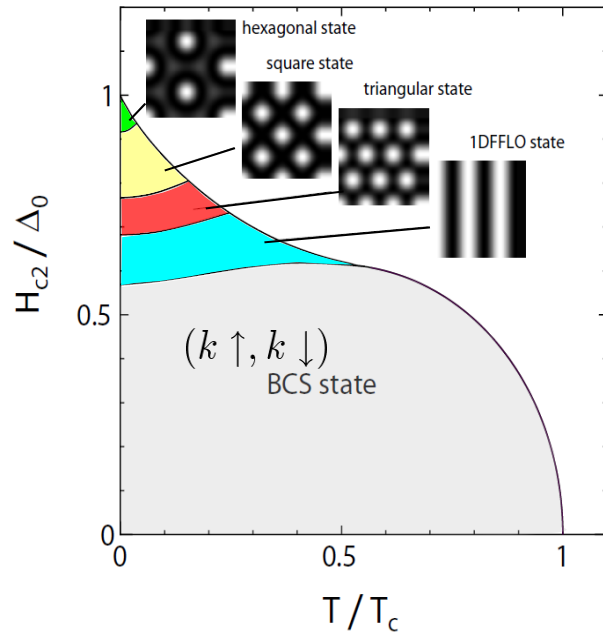
フェルミオンの超流動



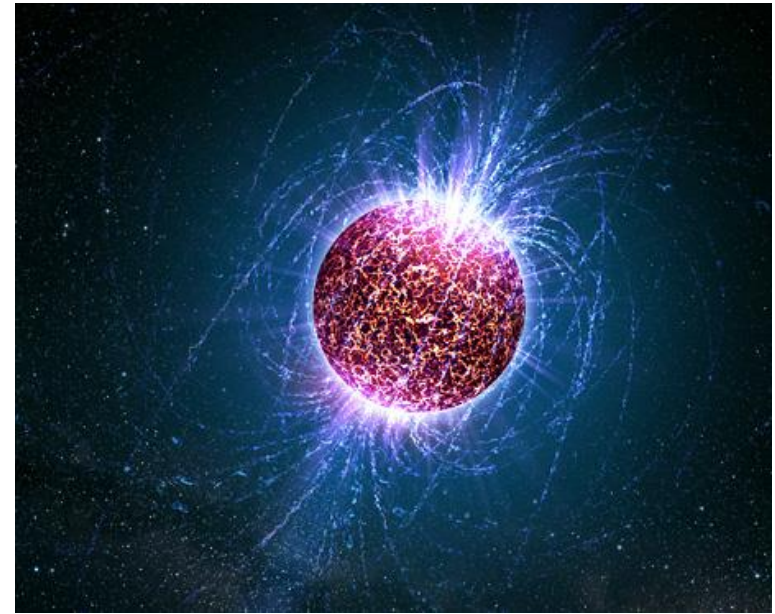
超伝導は最もバラエティにとび、最もよく研究されている

中性子星

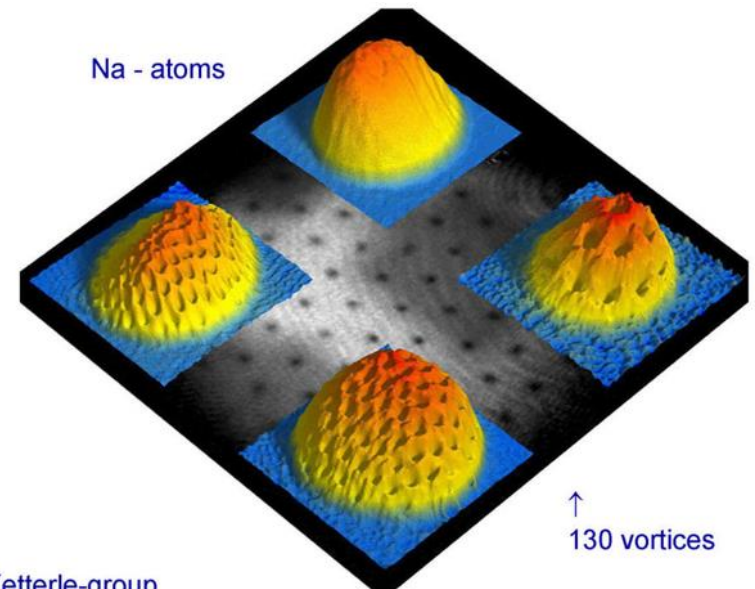
FFLO 状態



$$\Delta \sim \cos \vec{q} \cdot \vec{r}$$



Rotating Bose-Einstein-Condensate



Ketterle-group
MIT, 2001

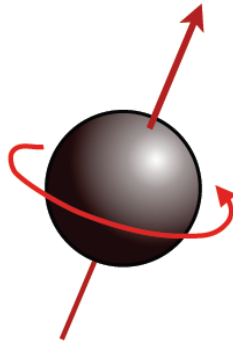
→ 60μm ←

原子や電子のマクロな数の集団(10^{23} 個)

電子ガス
液体ヘリウム

宇宙に存在する系で最も
純粹、単純、等方的な粒子の集まり

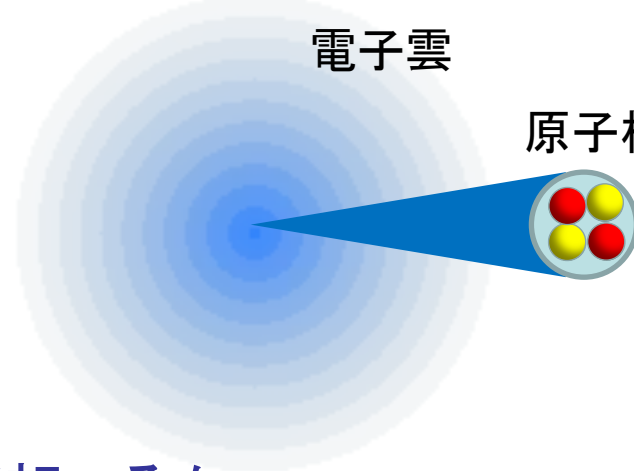
電子



ヘリウム原子

電子雲

原子核



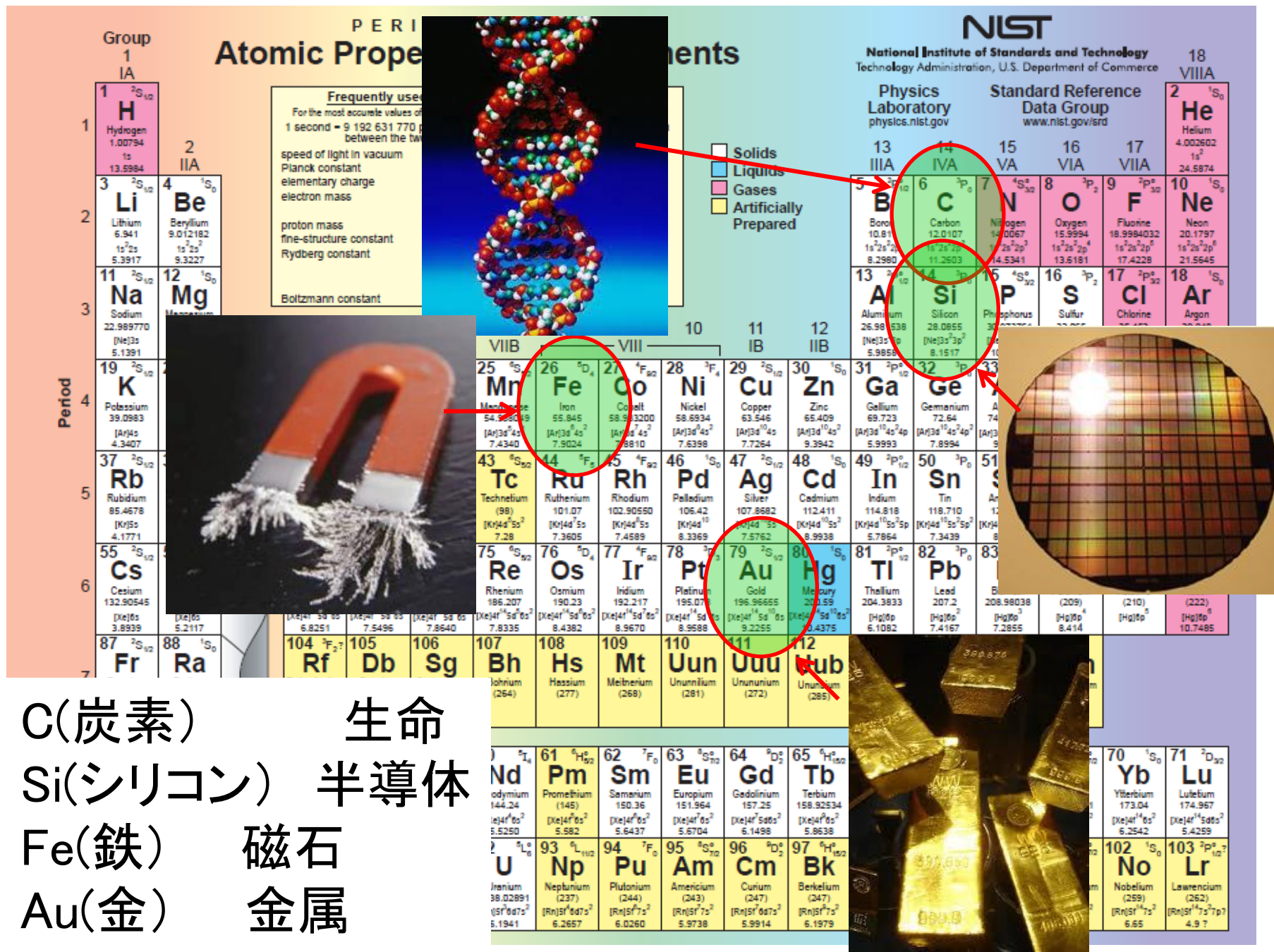
これらを極低温に冷却すると何が起こるか

超伝導、超流動、ボーズ・アインシュタイン凝縮

物理学でもっとも劇的な現象

我々の想像を超えた不思議な状態の出現

全く個性のない粒子の集団が劇的な個性の集団に変化する



PERIODIC TABLE

Atomic Properties of the Elements

NIST

National Institute of Standards and Technology
Technology Administration, U.S. Department of Commerce

18
VIII A

Frequently used fundamental physical constants
For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium-133 atom

speed of light in vacuum	c	299 792 458 m/s
Planck constant	h	6.626×10^{-34} J·s
elementary charge	e	1.602×10^{-19} C
electron mass	m_e	9.109×10^{-31} kg
proton mass	m_p	1.672×10^{-27} kg
fine-structure constant	α	$1/137.036$
Rydberg constant	R_∞	$10 973 732$ m ⁻¹
	$R_\infty c$	$3.289 842 \times 10^{15}$ s ⁻¹
	$R_\infty hc$	13.6057 eV
Boltzmann constant	k	1.3807×10^{-23} J/K



Physics Laboratory physics.nist.gov		Standard Reference Data Group www.nist.gov/srd			
13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIII A
5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.0067	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797
11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.3050	13 Al Aluminum 26.981538	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973761	16 S Sulfur 32.065
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955910	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.9055	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.24
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891
101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)
107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (277)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Uun Ununnilium (281)	111 Uuu Unununium (272)	112 Uub Ununbium (285)
113 Nh Nihonium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)

Group	1 IA	2 IIA
1	1 H Hydrogen 1.00794	
2	3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182
3	11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.3050
4	19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078
5	37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62
6	55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)

Atomic Number	Ground-state Level
58	¹ G ₄
Symbol	Ce
Name	Cerium
Atomic Weight	140.116
Ground-state Configuration	[Xe]4f ¹ 5d ¹ 6s ²
Ionization Energy (eV)	5.5387

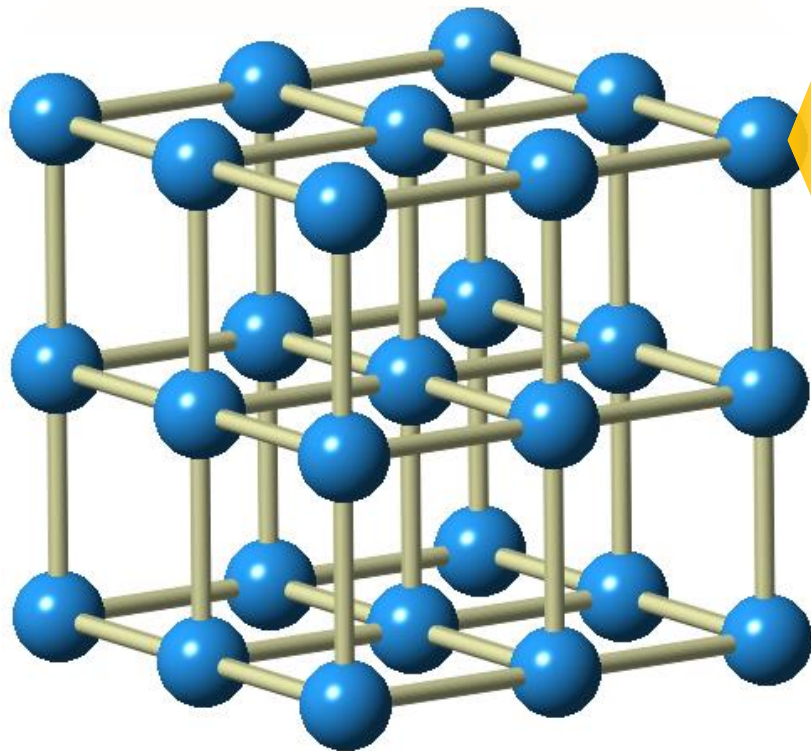
57 La Lanthanum 138.9055	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

アルミニウム(原子番号13)



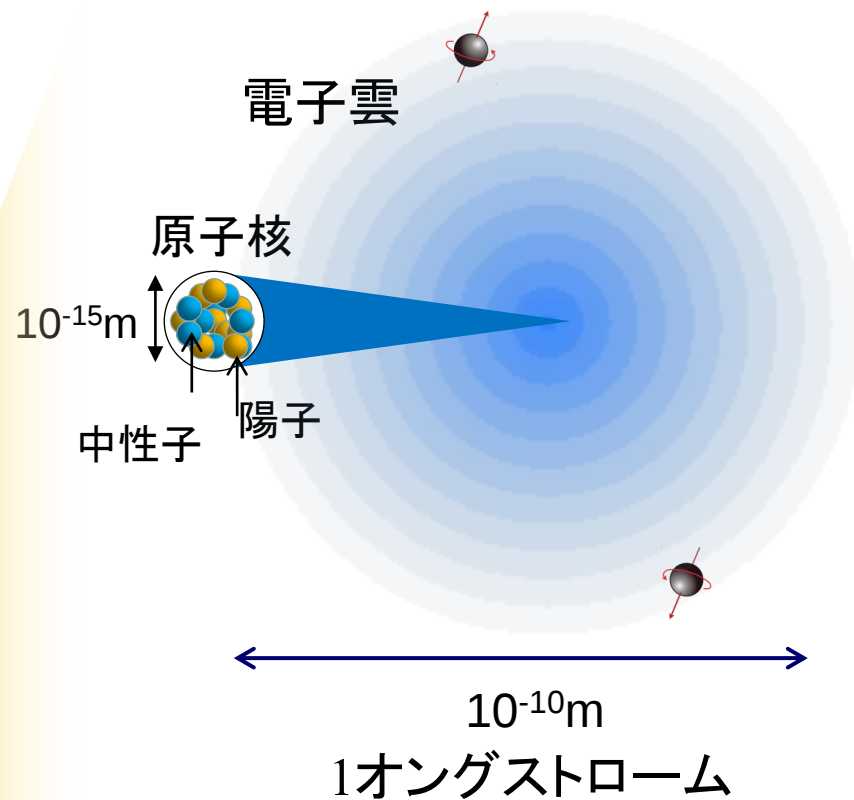
結晶

$3 \times 10^{-10} \text{m}$

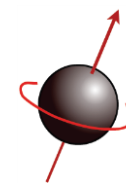


原子

13個の電子

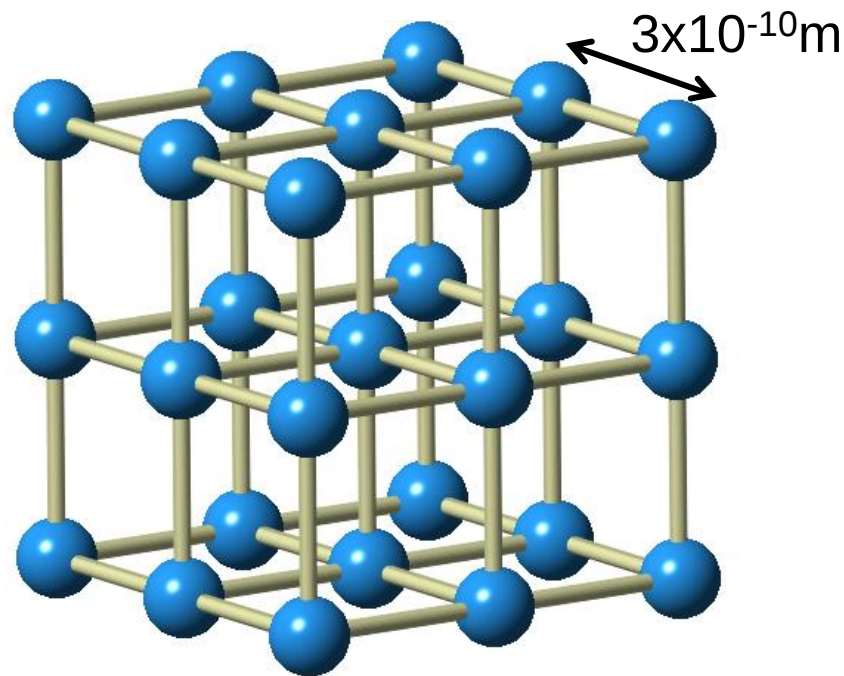
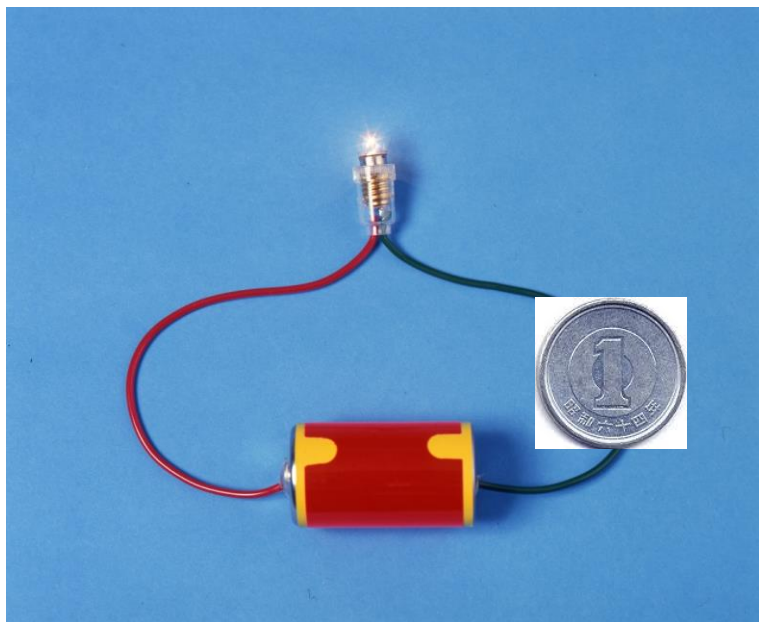


電子



電子はスピンを持つ

アルミニウムは電気を流す



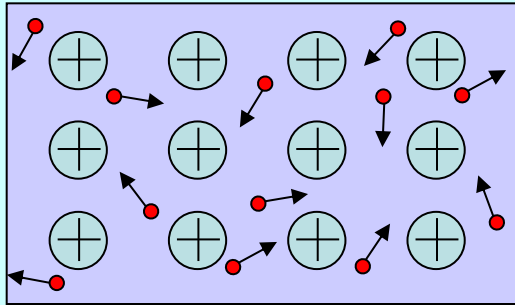
クイズ このとき一円玉の中を動いている電子の速さは

- ~~1. 人が歩くよりも遅い~~
- ~~2. 人が歩くよりも速いがジョット機(音速: マッハ1)よりも遅い~~
- 3. ジョット機よりも速い

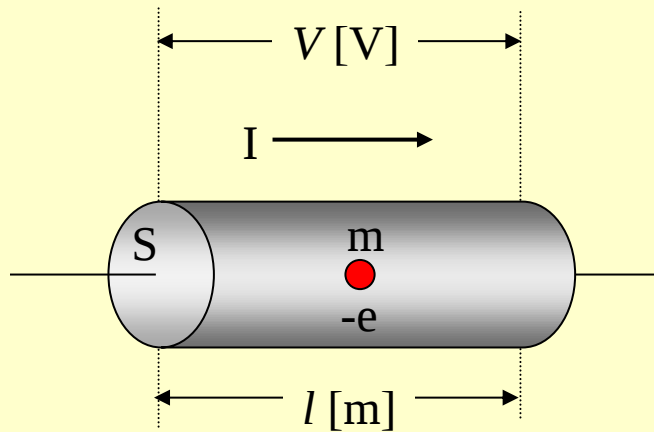
ずっとずっと

光速の1/100(秒速3000 km, マッハ1000) 一秒で日本列島縦断!!

・金属中の自由電子



原子が正イオンとなって
規則正しく並び、その間を
自由電子が動き回る。



オームの法則

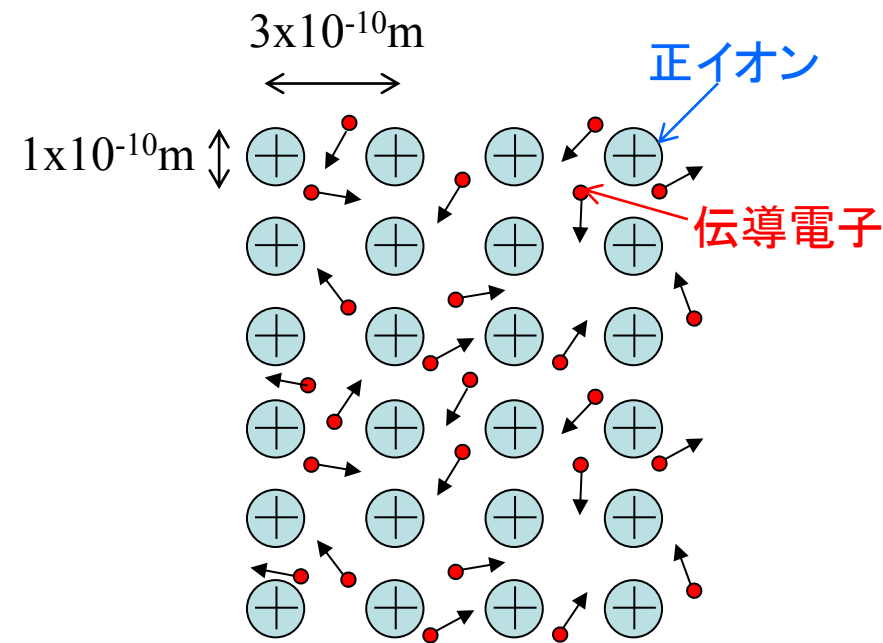
$$V=RI$$

抵抗 R は電子の
衝突頻度

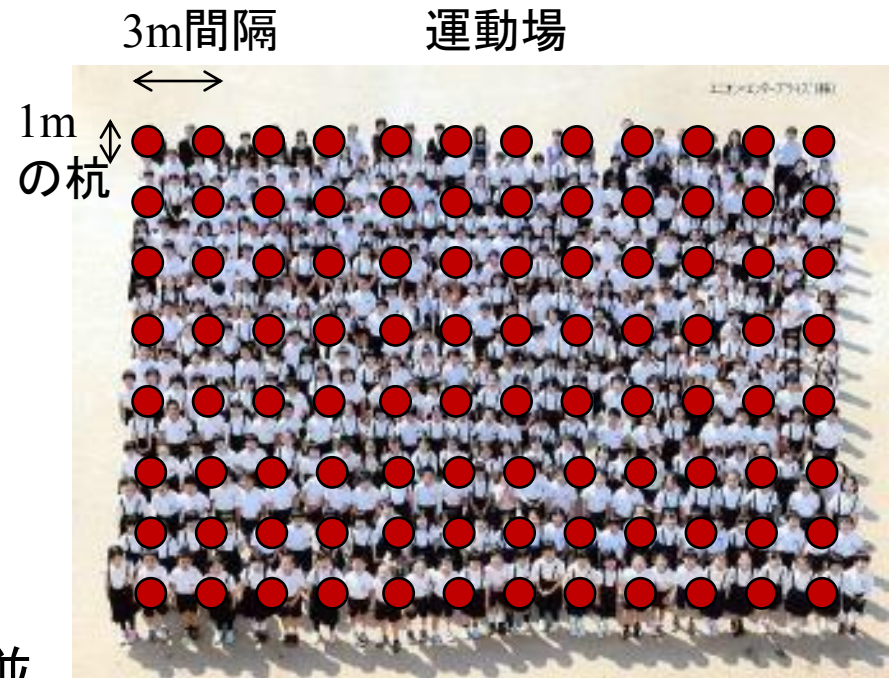
金属の不思議: どうして電子は衝突しない?

量子力学的効果

金属アルミニウム中の電子（電子のガス状態）



日常スケールに置き換えてみる($\times 10^{10}$)



原子が正イオンとなって規則正しく並び、その間を電子(伝導電子)が動き回り電気を伝える。

電子とイオン、電子と電子の間には強い力が働く

子供達が動こうとしても

杭にぶつかるか

隣の子供にぶつかるかして

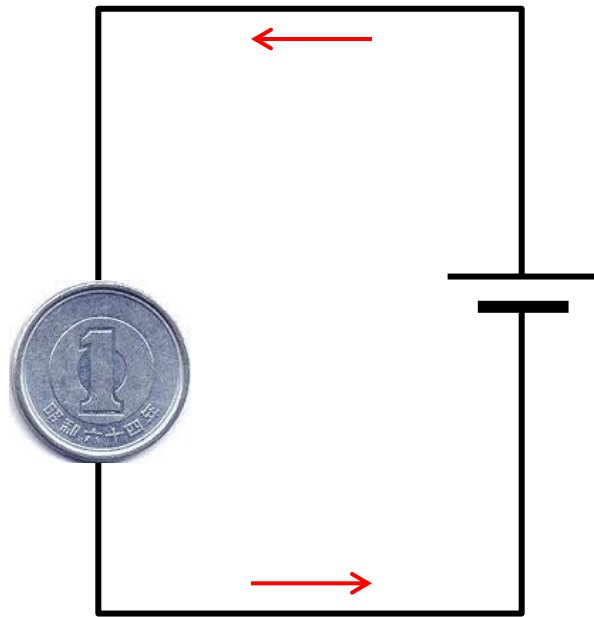
ほとんど動けないだろう

金属の不思議: 電子はほとんど自由に動き回っている!!?

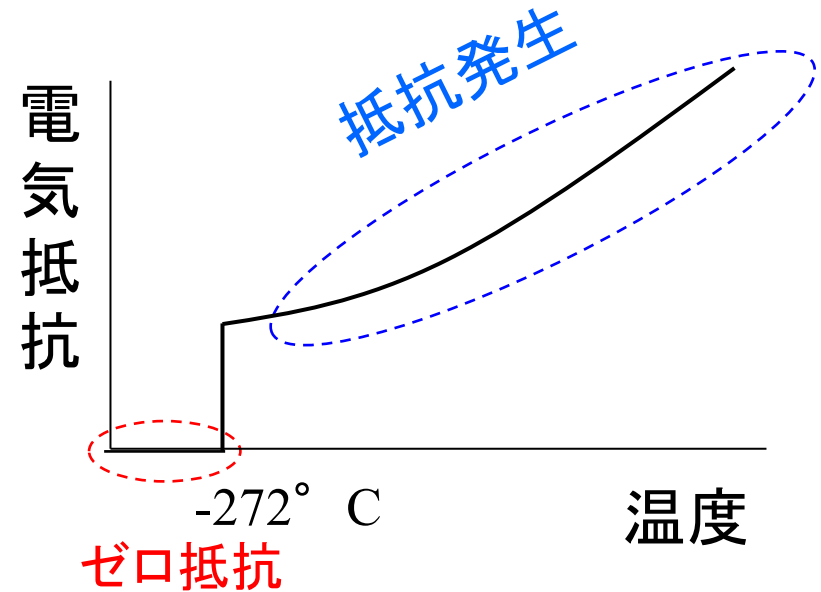
場合によっては1mm動けることもある。

これは右図で1万キロメートル(日本列島の5倍!!)に対応

一円玉(アルミニウム)を -272°C まで冷やす



電流は全く減衰すること無しに宇宙の年齢より長く流れ続ける!!



もし穴をあけてリングを作り
電気を流したら



永久電流

この現象を利用して

普通の磁石より100倍強い超強力な磁石
地球一周させても電力損失ゼロの送電線

一円玉(アルミニウム)を -272°C まで冷やす

もう一つの一円玉を弱く押しつける

直流を流すと電磁波が発生

その周波数は正確に



超伝導(Superconductivity)

中国人とインド人の人口を最後の一人まで正確に数える！！！！

この効果を使って

超高感度磁気測定

脳の中を流れる電流を検出する。

超高速コンピューター

現在のスーパーコンピューターで10万年かかる計算を1秒でやってのける。しかも消費電力はゼロに近い。

Standards and Technology
on, U.S. Department of Commerce

Standard Reference
Data Group
www.nist.gov/srd

At High Pressure

Superconducting Elements

Technology Administration, U.S. Department of Commerce
Standard Reference Data Group
www.nist.gov/srd

Physics Laboratory
NIST.gov

In Bulk at Ambient Pressure

At High Pressure

Legend:
 Solids (White)
 Liquids (Blue)
 Gases (Pink)
 Artificially Prepared (Yellow)

Physical Constants for ^{133}Cs
 For the two hyperfine levels of the ground state of ^{133}Cs
 speed of light $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ (exact)
 Planck constant $h = 6.6261 \times 10^{-34}\text{ J s}$ (exact)
 $(h = h/2\pi)$
 proton mass $m_p = 1.672621 \times 10^{-27}\text{ kg}$
 fine-structure constant $\alpha = 1/137.036$
 Rydberg constant $R_\infty = 10\,973\,732\text{ m}^{-1}$
 $R_\infty c = 3.289\,842 \times 10^{15}\text{ Hz}$
 $R_\infty hc = 13.6057\text{ eV}$
 Boltzmann constant $k = 1.3807 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$

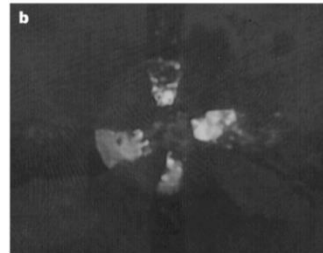
Callout for Cerium (Ce):
 Atomic Number: 58
 Ground-state Level: 1^1G_4
 Symbol: Ce
 Name: Cerium
 Atomic Weight: 140.116
 Ground-state Configuration: $[\text{Xe}]4f5d6s^2$
 Ionization Energy (eV): 5.5387

At pressures of around 100 GPa, solid oxygen becomes superconducting, with T_c of 0.6 K.

40GPa



60GPa



120GPa

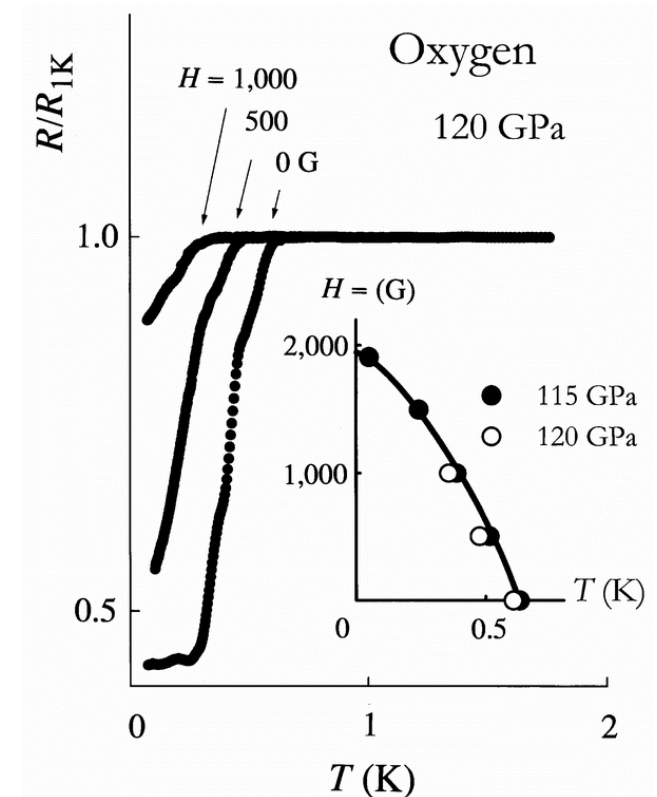
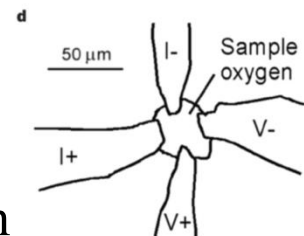


*Solid Oxygen
becomes shiny at high
pressure (metallic
color)*

1 GPa = 10 kbar = 10,000 atm

cf. 1 atm ~ 10 m water depth

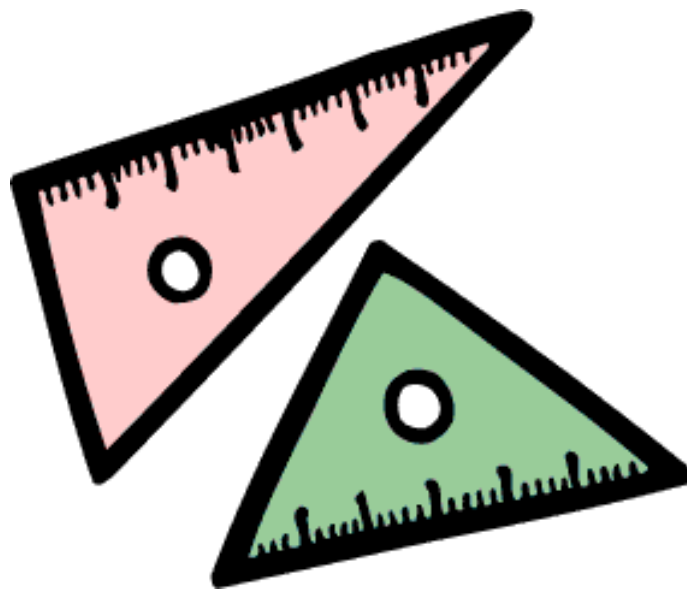
10,000 atm ~ 100 km water depth



K. Shimizu et al. Nature (1998)

なぜこんな不思議なことが起こるのか

原子の世界の長さのスケール



Classical Physics 古典物理



10^{-6}
Micron
ミクロン

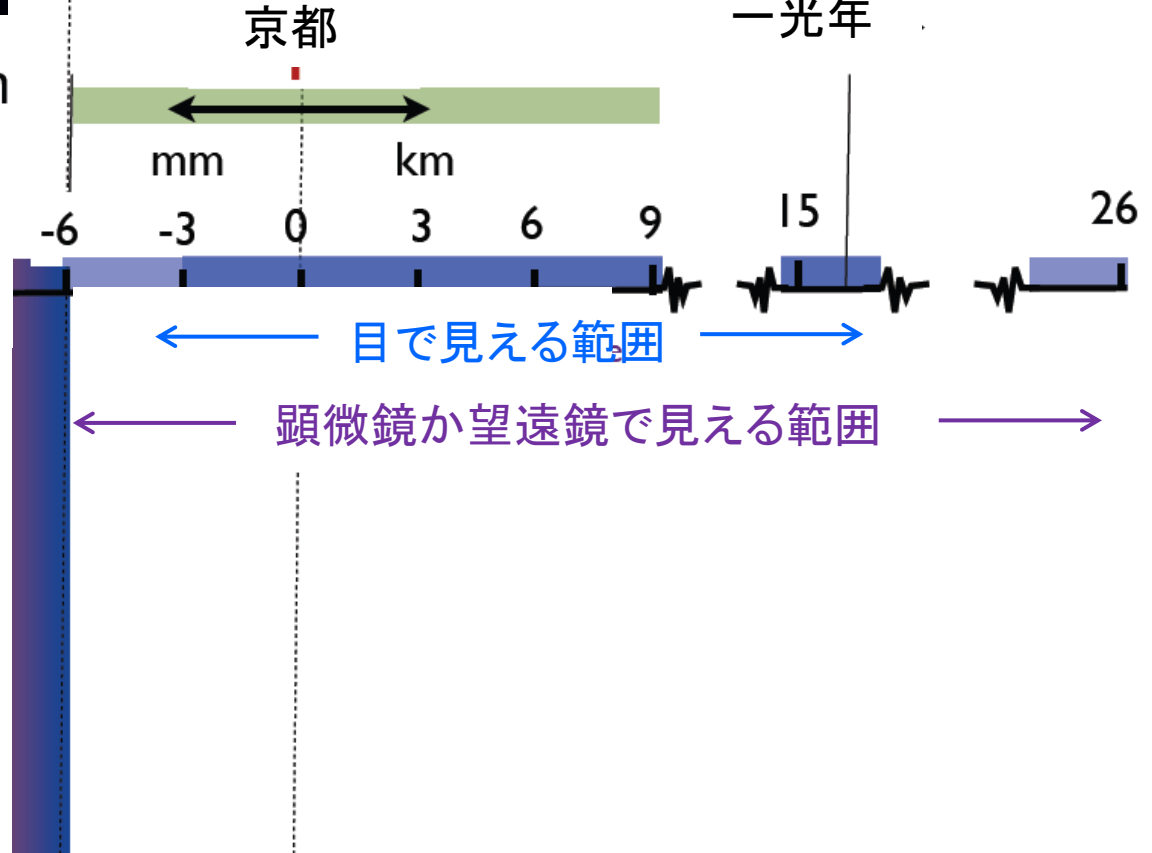
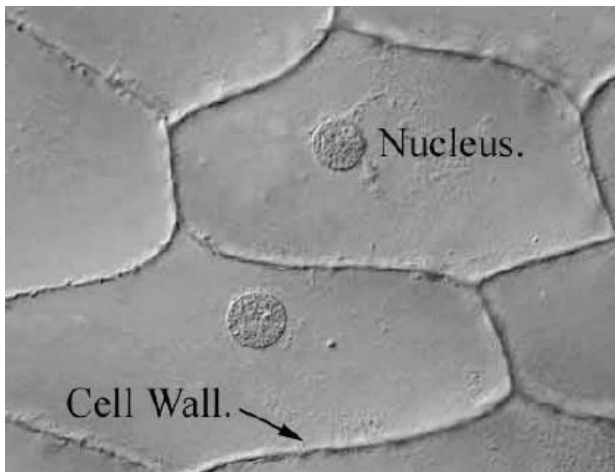
10^{26}
宇宙の半径

$$1 \text{ micron} = 1/1000 \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$1 \text{ m} = 10^0 \text{ m}$$

$$1 \text{ km} = 1000 \text{ m} = 10^3 \text{ m}$$



Quantum World

量子の世界

Classical Physics

古典物理

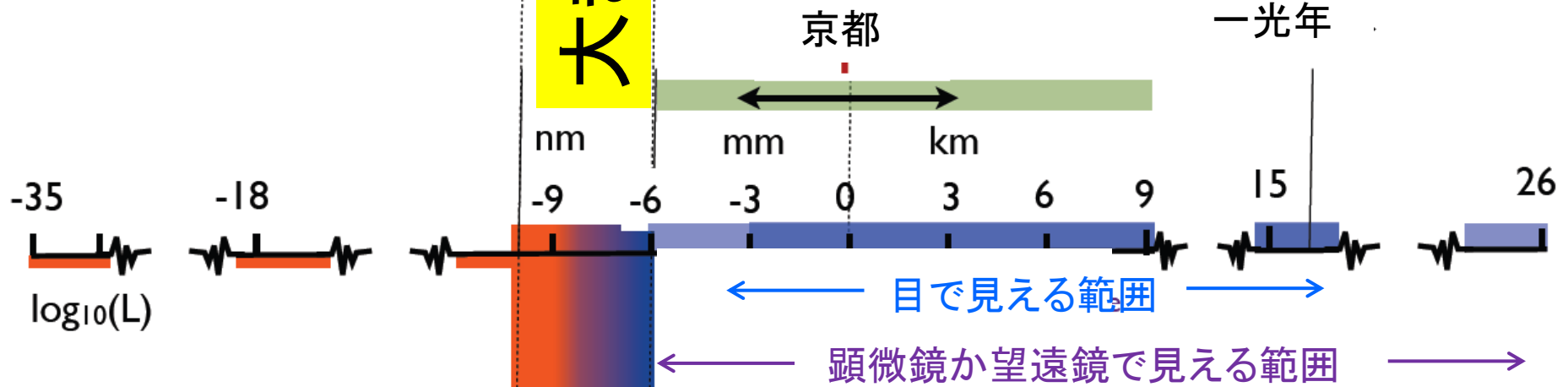
10^{-35}
プランク長

10^{-10}
Angstrom
オングストローム

10^{-6}
micron
マイクロン

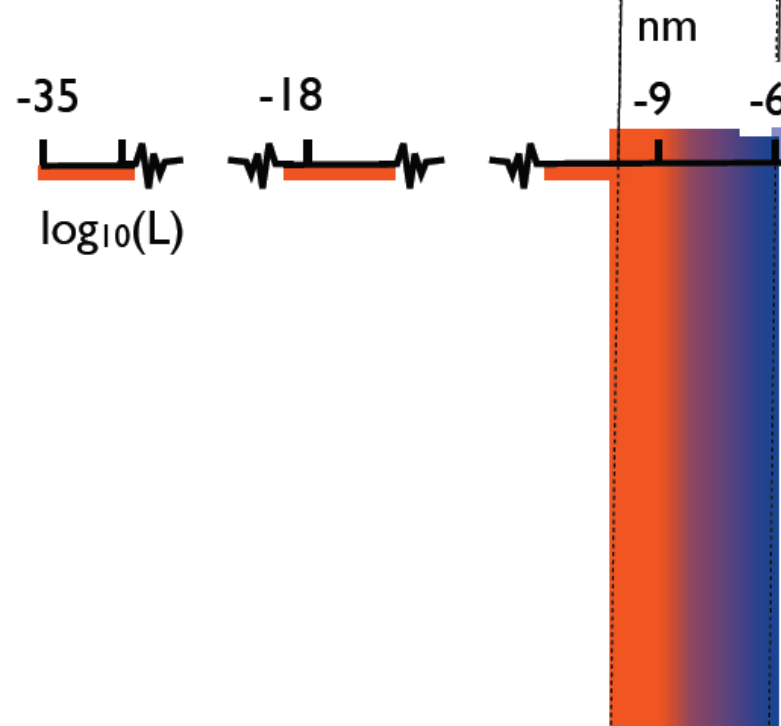
10^{26}
宇宙の半径

大きな隔たり

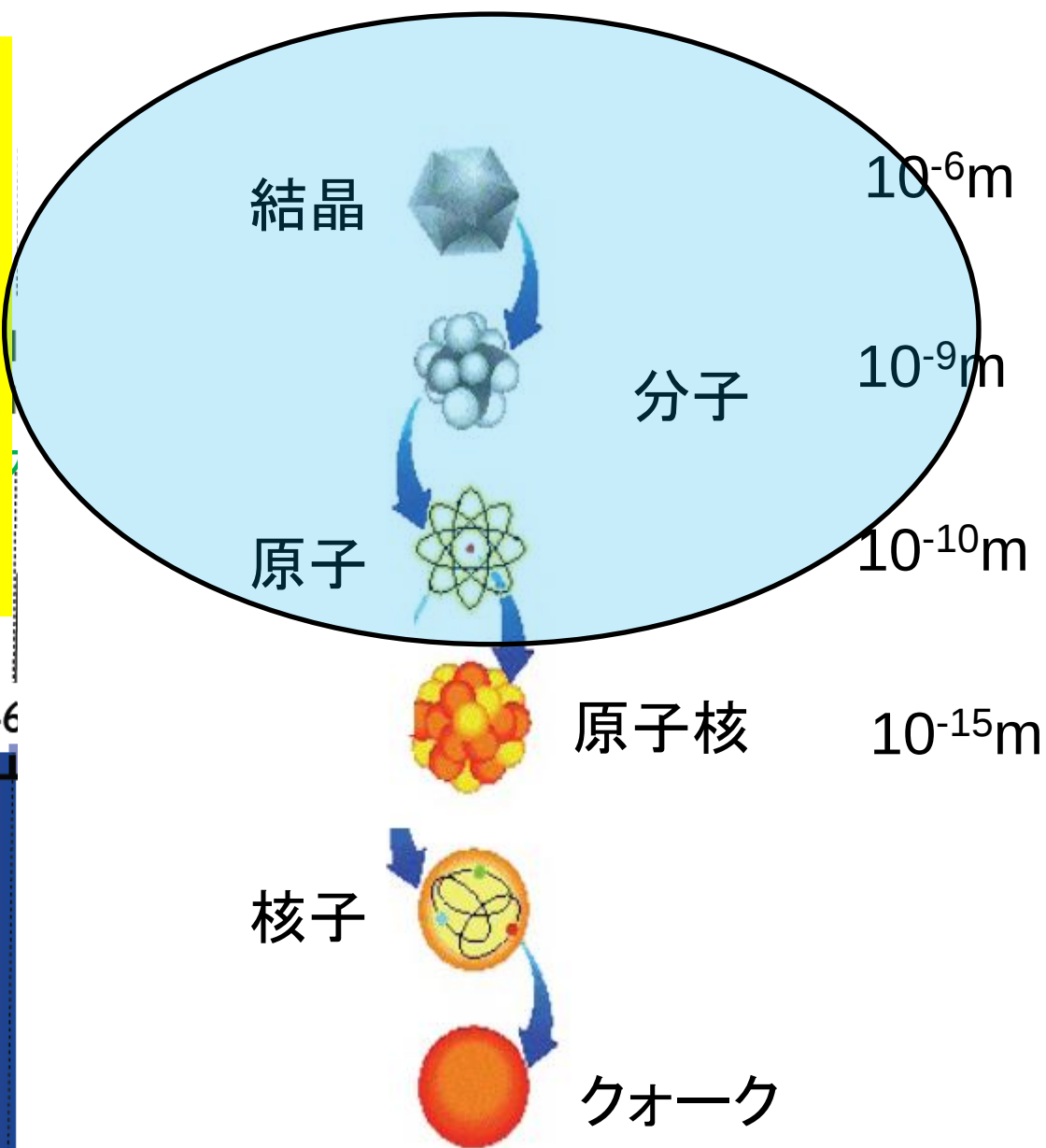


Quantum 量子の世界 World

10^{-35}
プランク長
 10^{-10}
Angstrom
オングストローム



大きな隔たり

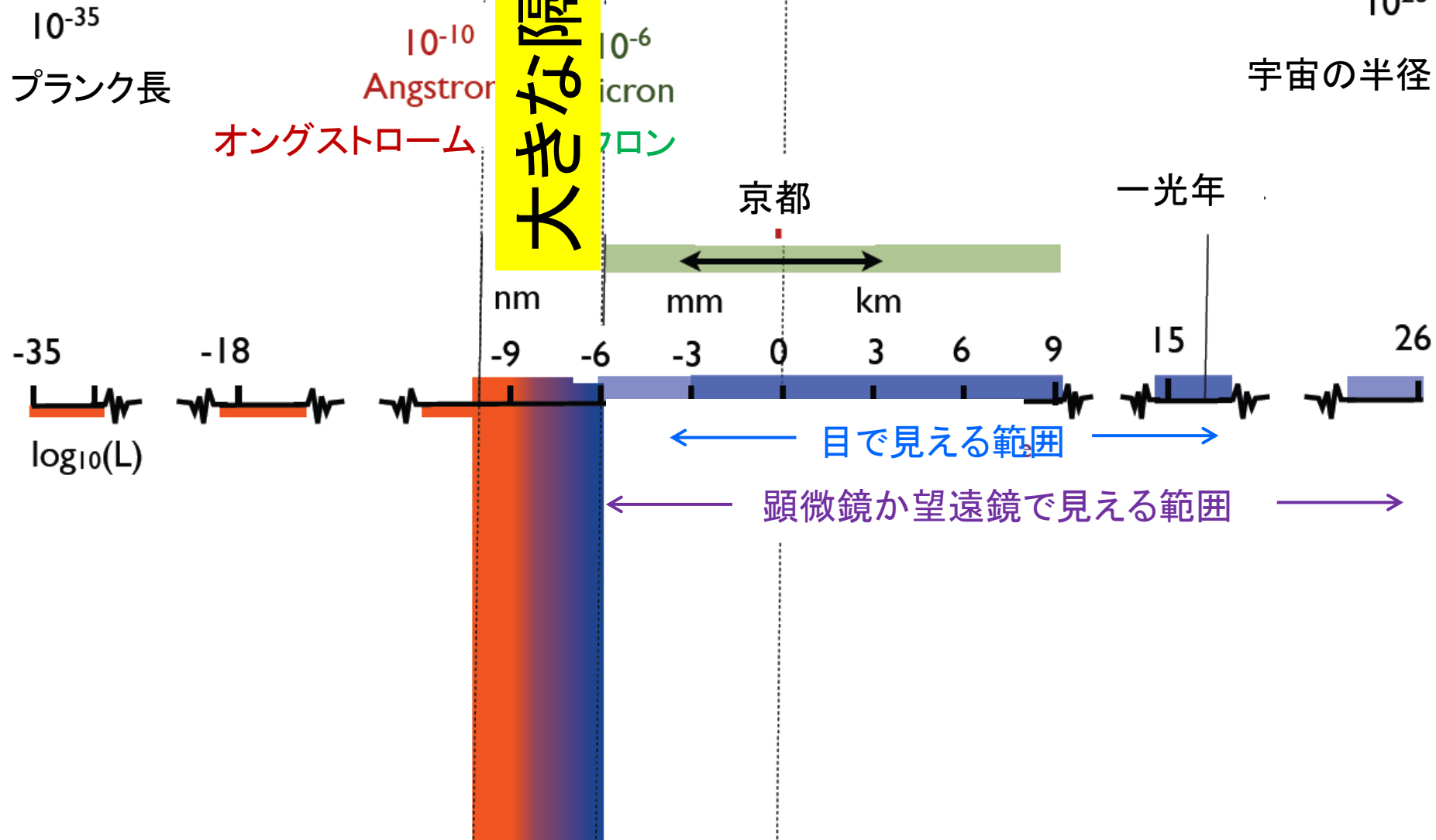


Quantum

量子の世界 World

Classical

Physics 古典物理



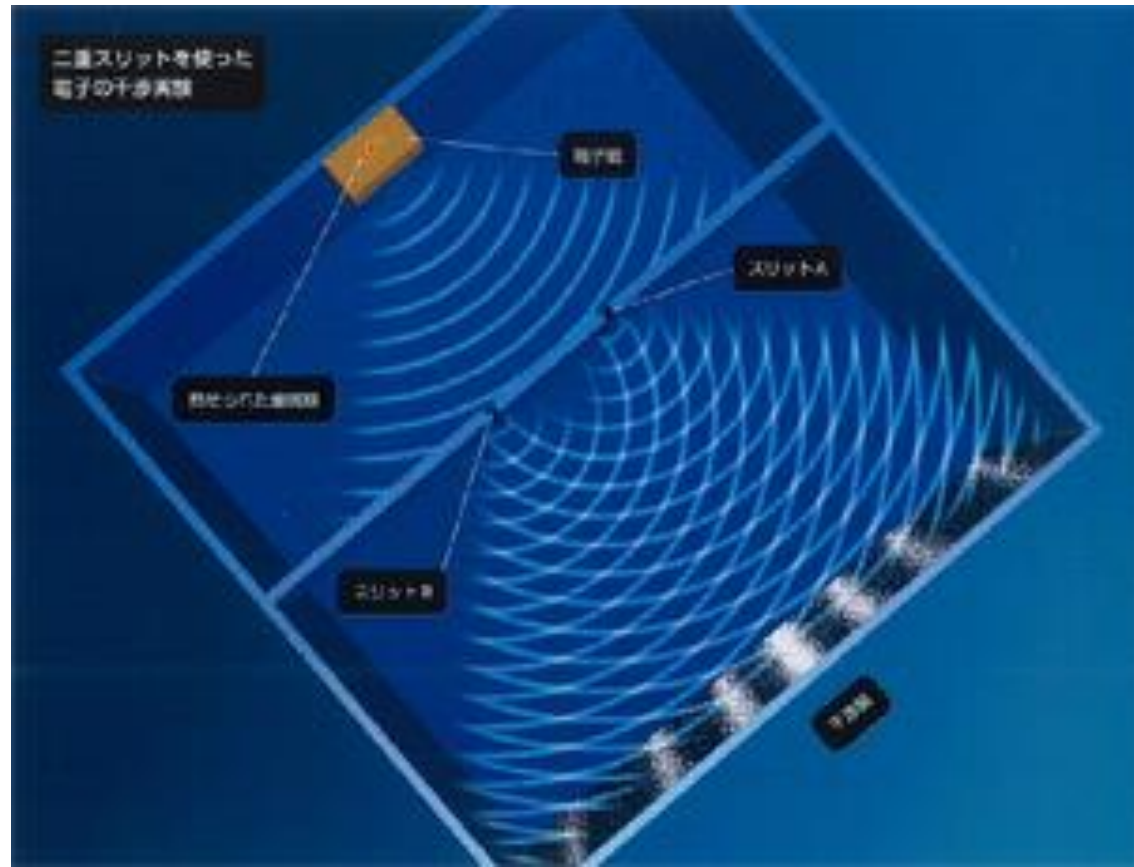
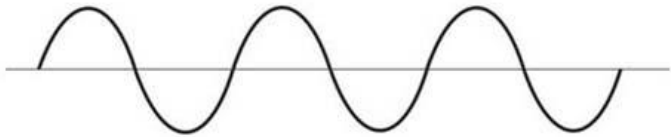
量子の世界

電子は粒子であると同時に波である

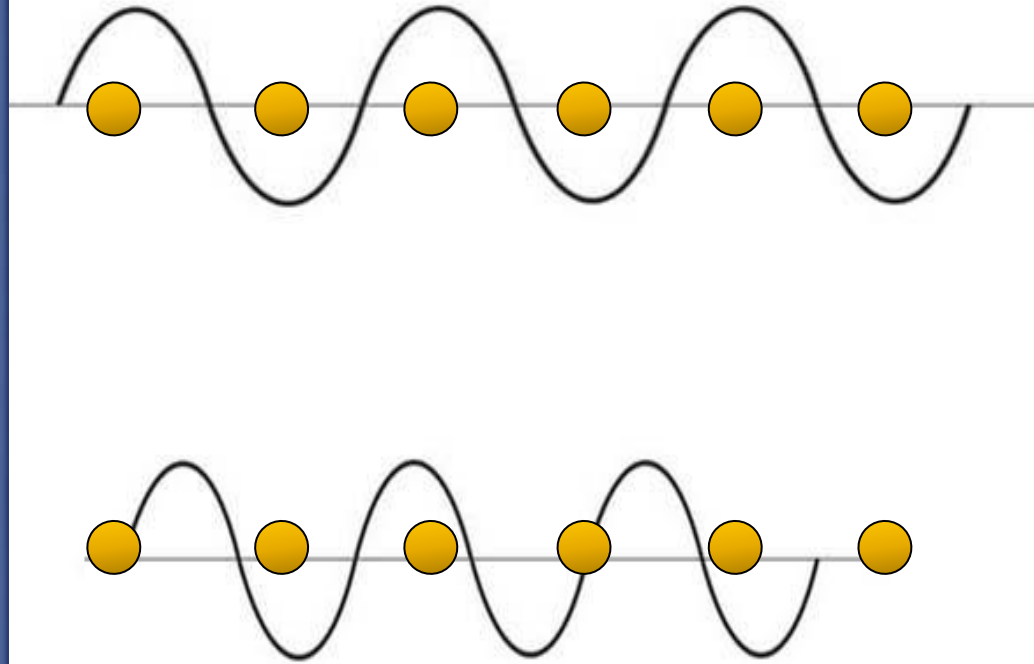
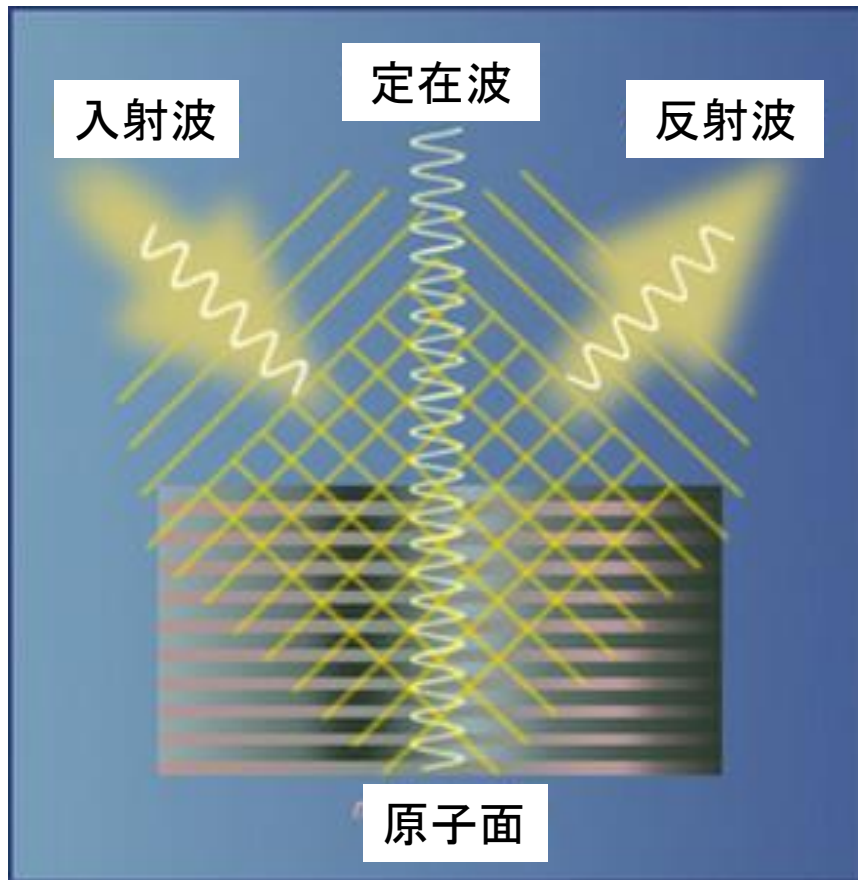
粒子



波動



電子の波は原子の周期と一致したものだけ強く散乱される



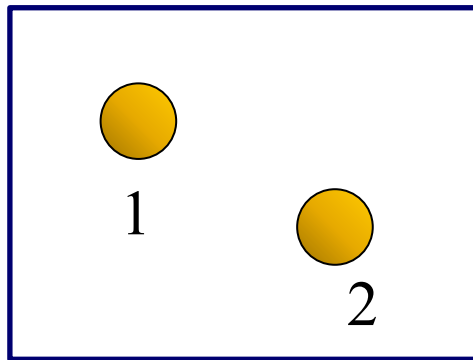
電子は周期的に並んだ原子とはほとんどぶつからない

量子の世界の不思議

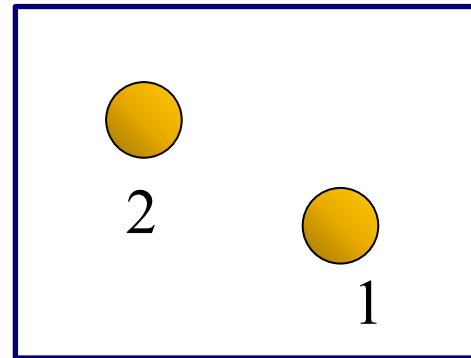
原子や電子には「個性」がない

同じ状態にある同種粒子は「本質的」に区別できない

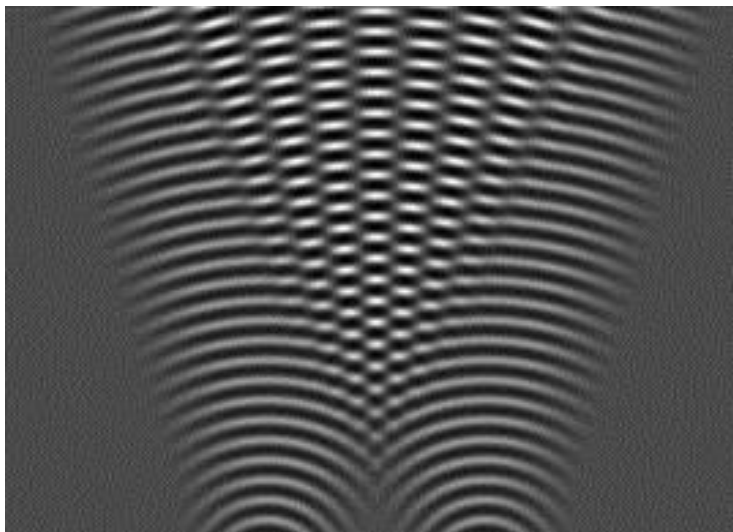
同じ粒子(原子、電子)が2個以上ある状態を考える



と



は同じ状態!!??



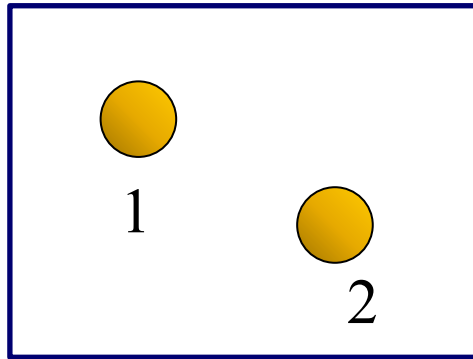
波の性質から来る

量子の世界の不思議

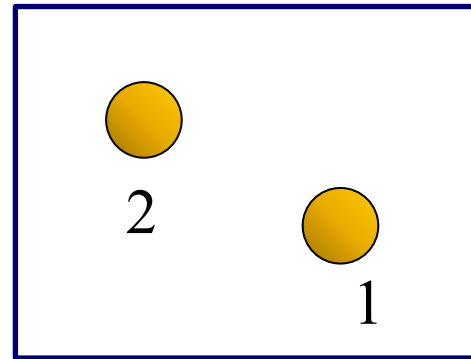
原子や電子には「個性」がない

同じ状態にある同種粒子は「本質的」に区別できない

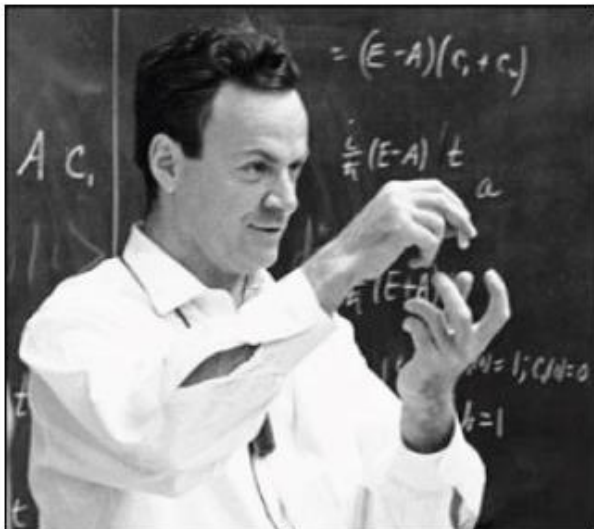
同じ粒子(原子、電子)が2個以上ある状態を考える



と



は同じ状態!!??



"I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics."

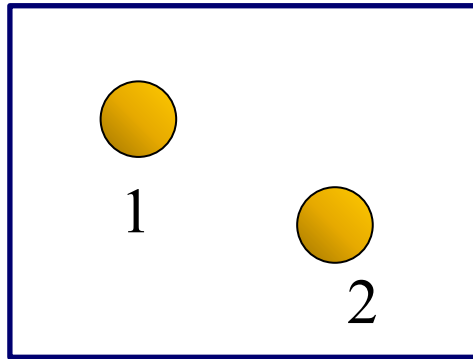
Richard Feynman (1965).

量子の世界の不思議

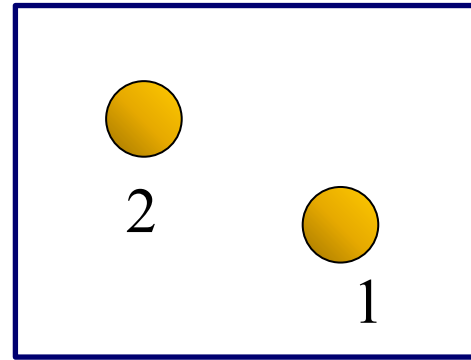
原子や電子には「個性」がない

同じ状態にある同種粒子は「本質的」に区別できない

同じ粒子(原子、電子)が2個以上ある状態を考える



と



は同じ状態!!??

$$\varphi(1,2) = x \varphi(2,1)$$

2つの粒子の名前を入れ替える

$$\varphi(1,2) = x^2 \varphi(1,2)$$

もう一度入れ替える
(元に戻る)

$$x^2=1 \text{ したがって } x = \pm 1$$

自然界に存在する粒子は $x=+1$ と $x=-1$ の2種類ある

2種類の粒子は全く異なった振る舞いを示す

$x=1$ ボース粒子(ボゾン)

光子
中間子

ヘリウム原子



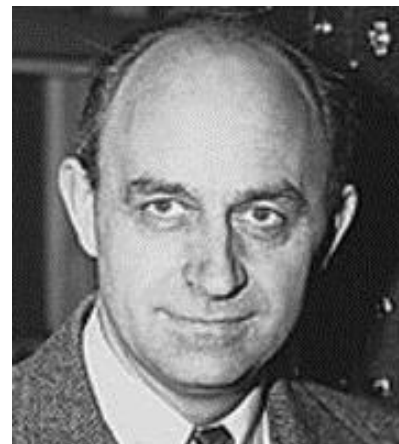
ボース



アインシュタイン

$x=-1$ フェルミ粒子(フェルミオン)

電子
ニュートリノ
陽子
中性子
クォーク

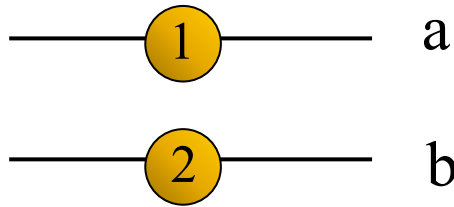


フェルミ



ディラック

ボース粒子とフェルミ粒子 粒子の入れ替え

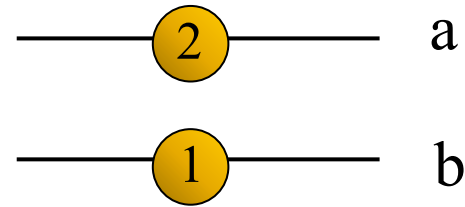


ボース粒子

$$\varphi(1,2) = \varphi(2,1)$$

$$\varphi(1,2) = \phi_a(1) \phi_b(2) + \phi_a(2) \phi_b(1)$$

$a=b$ のとき $\varphi(1,2) \neq 0$



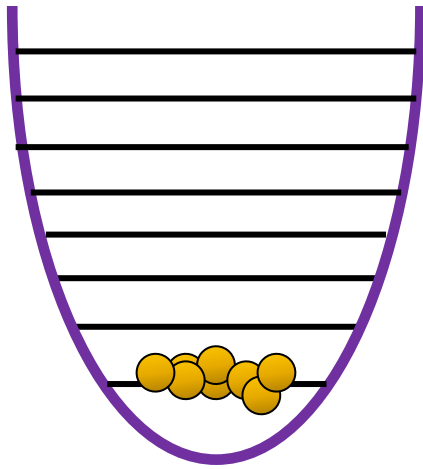
フェルミ粒子

$$\varphi(1,2) = -\varphi(2,1)$$

$$\varphi(1,2) = \phi_a(1) \phi_b(2) - \phi_a(2) \phi_b(1)$$

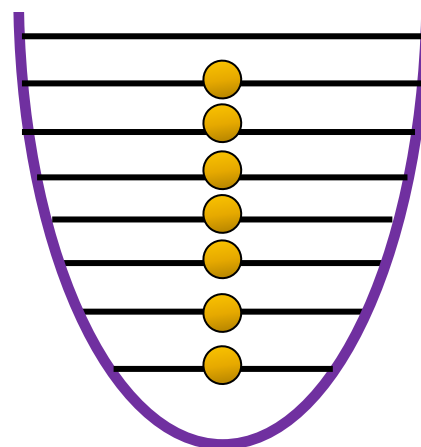
$a=b$ のとき $\varphi(1,2) = 0$

ボース粒子



何個の粒子
でも同じ状態
を取ることが
出来る

フェルミ粒子

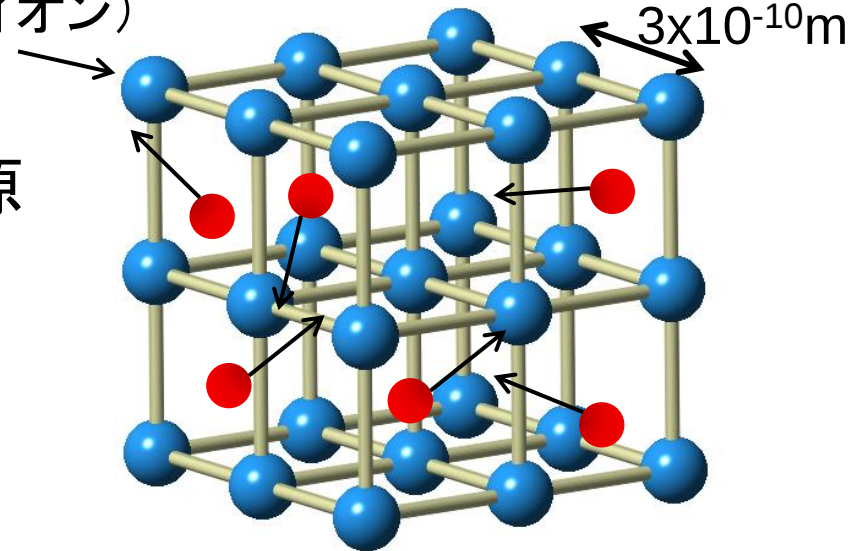


フェルミエネルギー

2個の粒子
が同じ状態
を取ることが
出来ない

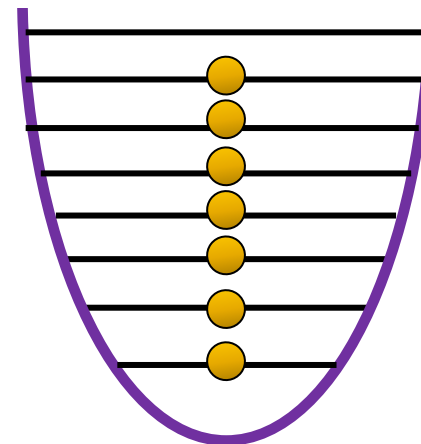
なぜアルミニウム(金属)の電子は自由に動けるのか

原子(イオン)



1. 波の性質により規則正しく並んだ原子(イオン)とはほとんどぶつからない

フェルミ粒子



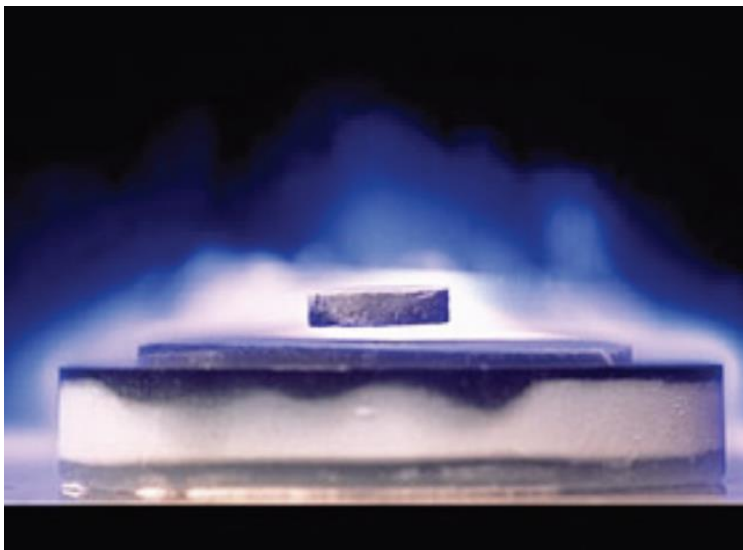
フェルミエネルギー

2個の粒子
が同じ状態
を取ることは
出来ない

2. 電子はフェルミ粒子であるため
電子同士はまれにしかぶつからない

超伝導を理解する準備が出来た

なぜ超伝導になるのか

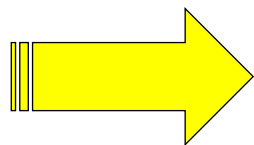


超伝導では二つの電子がペアを組む

金属



超伝導

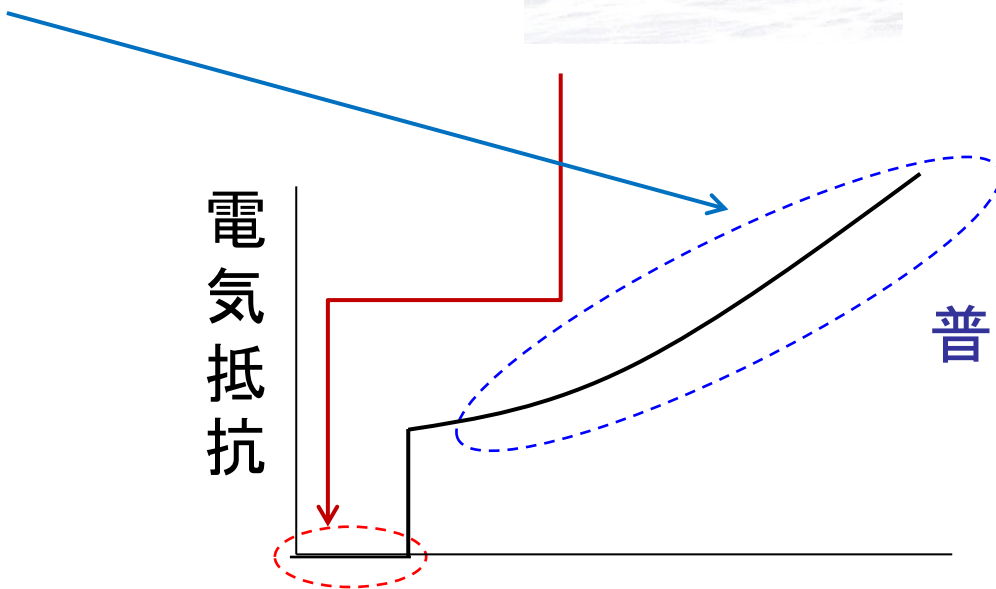


電気抵抗

普通の金属の状態

超伝導状態

温度

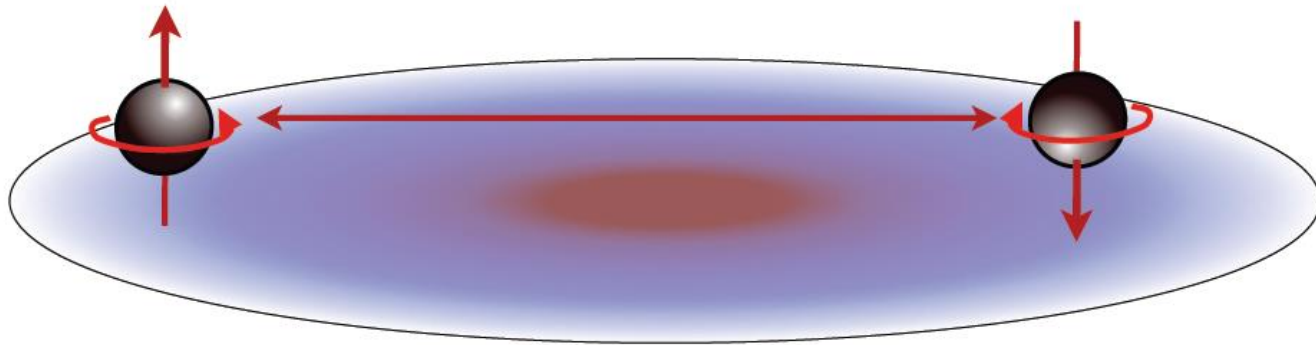
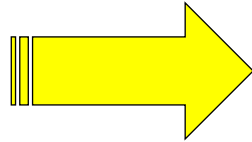


超伝導 二つの電子がペアを組むことにより起こる

金属



超伝導

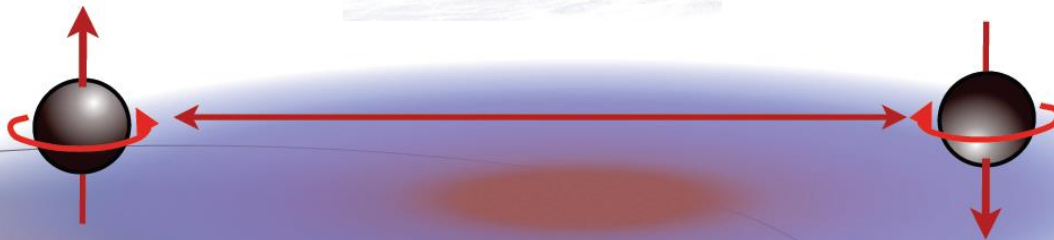
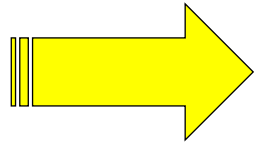


超伝導 二つの電子がペアを組むことにより起こる

金属

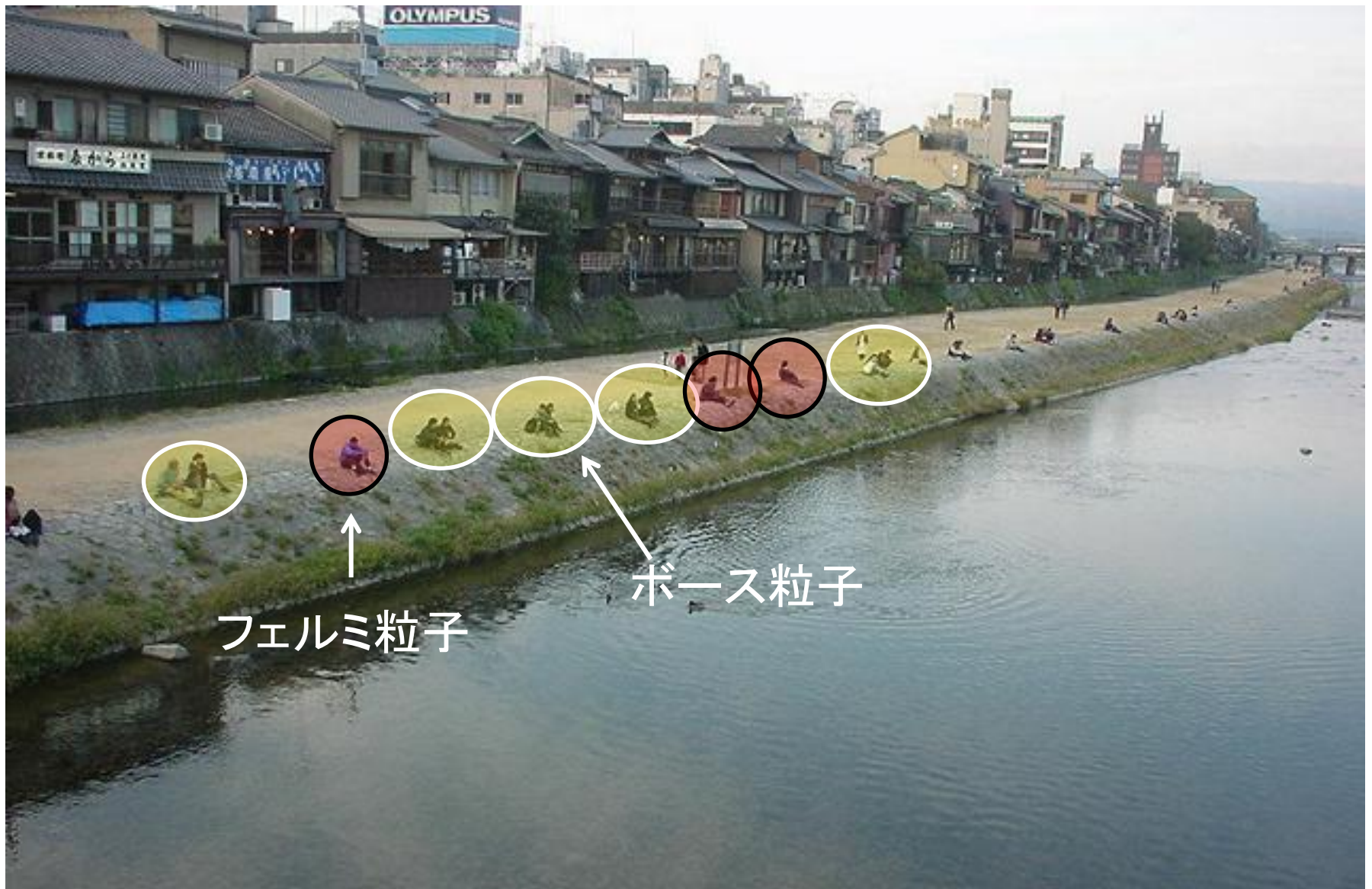


超伝導

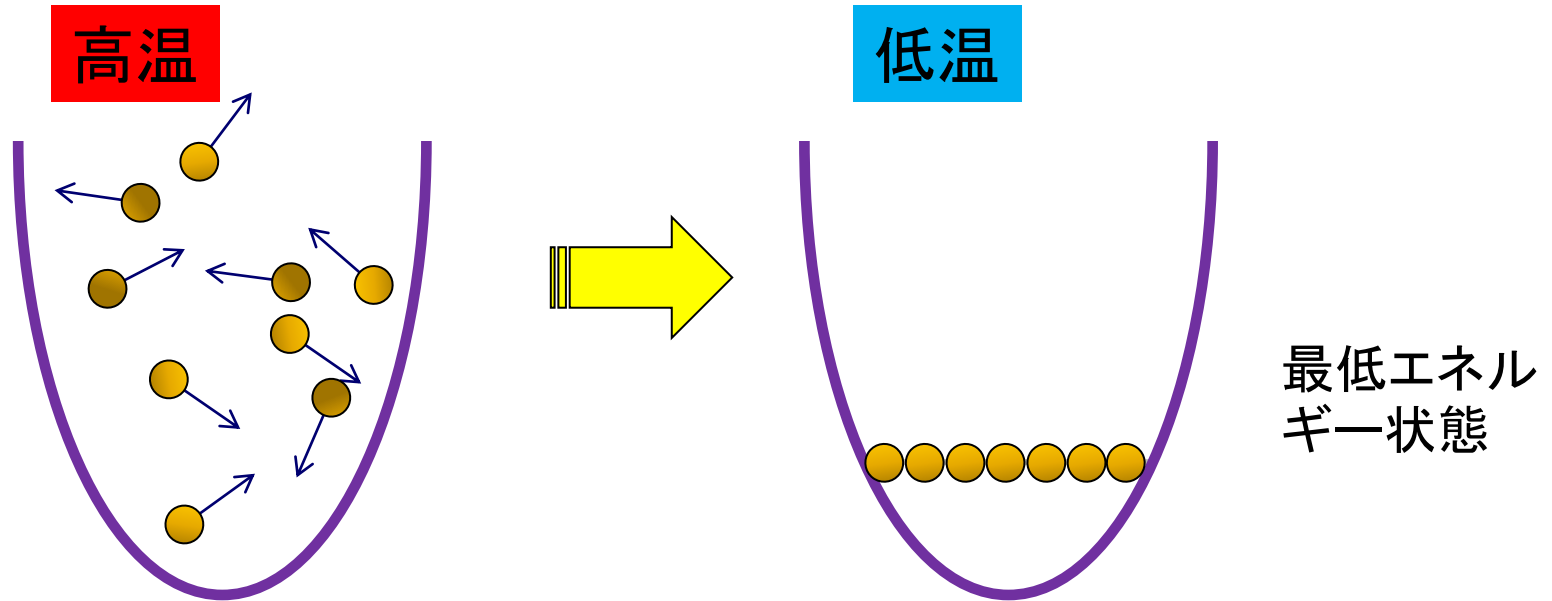


一個の電子 フェルミ粒子
ペアを組んだ電子 ボース粒子

鴨川沿い

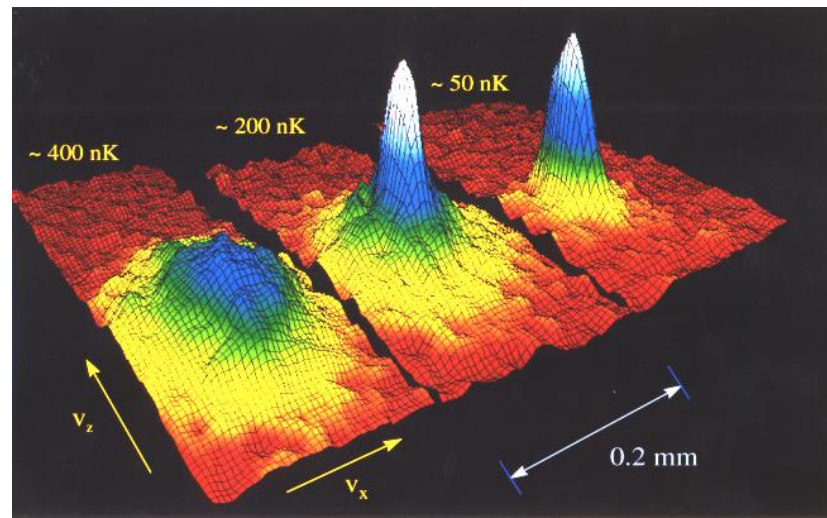


ボース・アインシュタイン凝縮



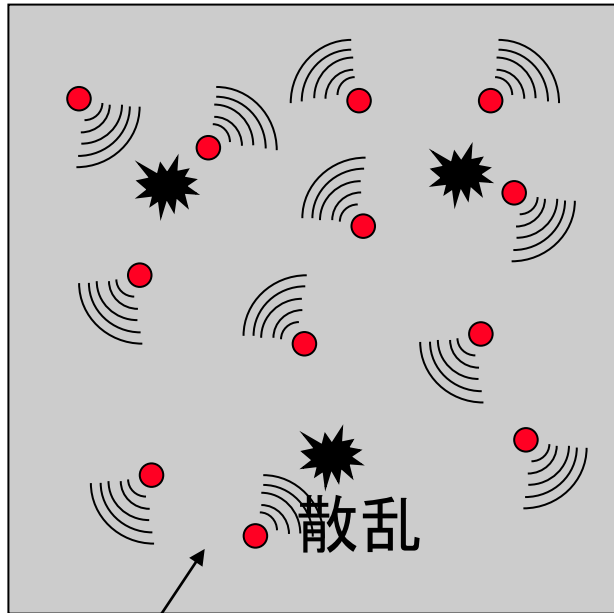
粒子はでたらめな熱運動状態

マクロな数の粒子が同じ状態
みんながそろって同じ運動をし始める



超伝導のメカニズム(ボース・アインシュタイン凝縮)

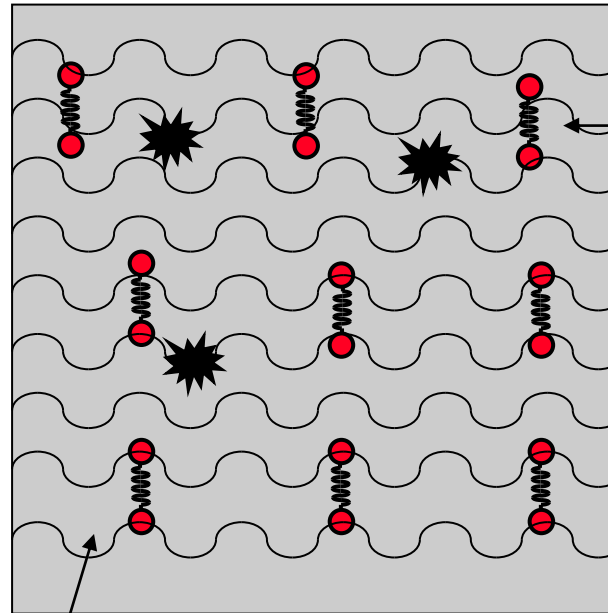
金属



電子の波はバラバラ
→ 電気抵抗が発生する



超伝導



2つの電子が
ペアを組む
(ボース粒子の
ように振る舞う)

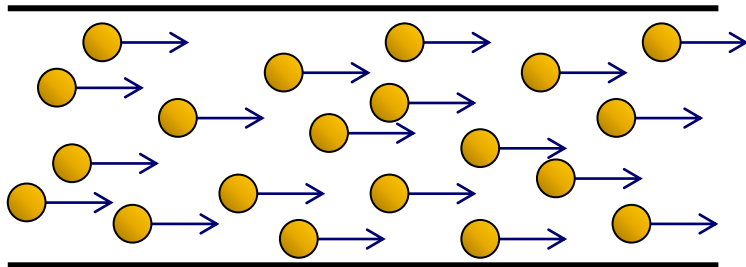
電子はペアを組んで揃った波となる
(コヒーレントな波) → 電気抵抗ゼロ



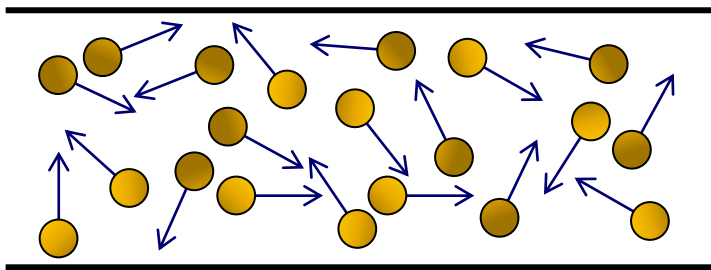
岩礁があると波は少しは乱されるが、全体で見るとほとんど影響を受けない



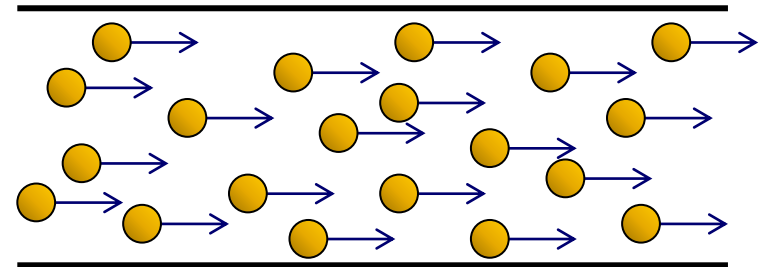
普通の流体



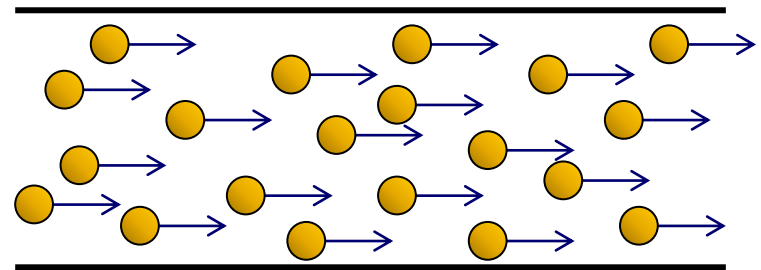
はじめ同じ速度で流れていた粒子は、壁に衝突して向きを変えたり、粒子同士衝突したりして乱雑な運動に変わり、やがて流れは止まってしまう。



超流動、超伝導

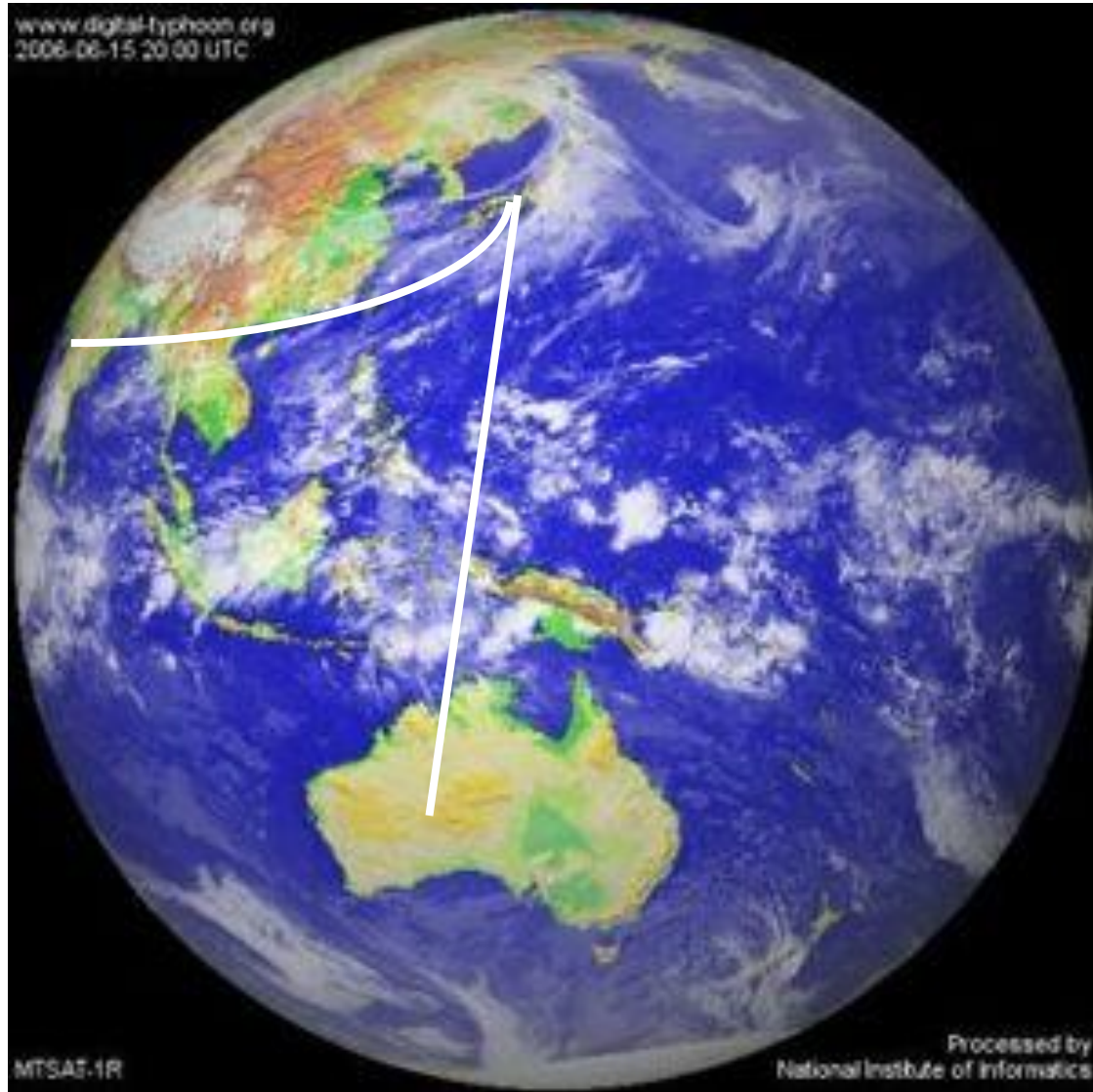


粒子が壁に衝突しても、粒子同士が衝突しても、流れは止まらない



超伝導(電気抵抗ゼロ)

超伝導で出来た送電線は電力損失が全く「ゼロ」



超流動ヘリウム

超流動も基本的には超伝導と同じ現象

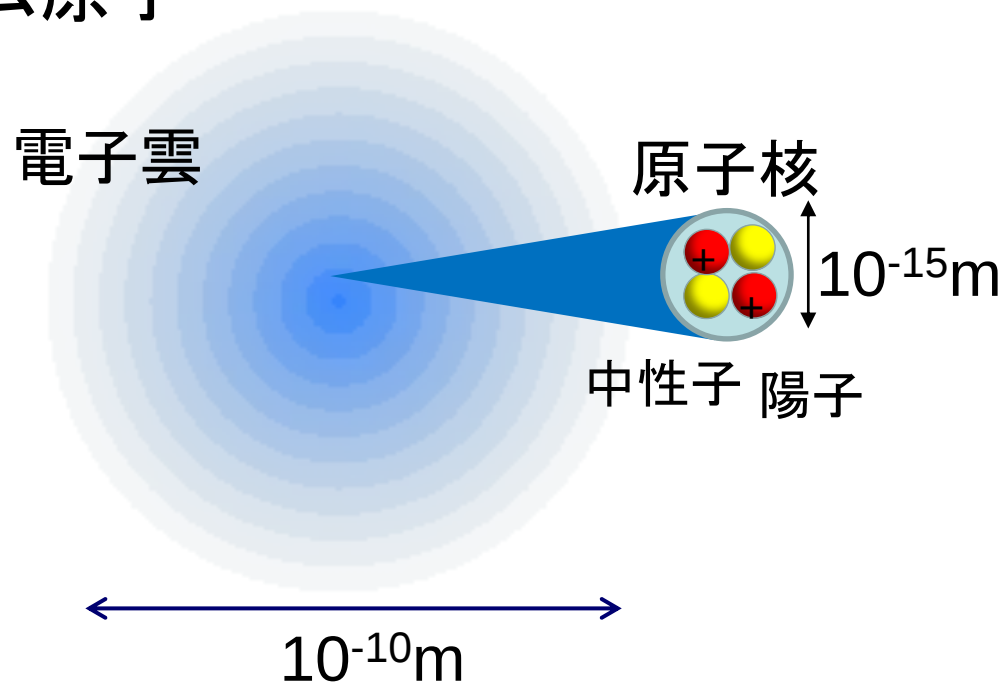
ヘリウムは絶対零度でも液体のまま

4.2 Kで液体になる

2.17 Kで粘性のない超流体

ヘリウムはボース粒子

ヘリウム原子



超流動液体ヘリウムの実験



超伝導: 対称性の破れ

巨視的波動関数: すべての電子が同じ状態に落ち込む

$$\psi(r) = \sqrt{n_s} e^{i\theta(r)}$$

2次相転移

対称性の破れ

ゲージ変換

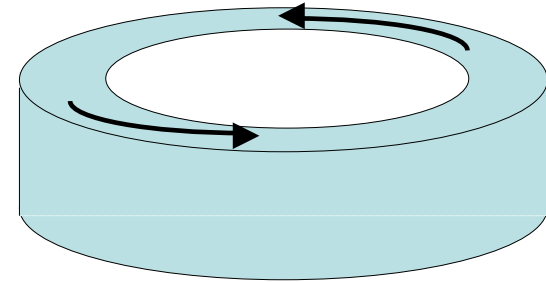
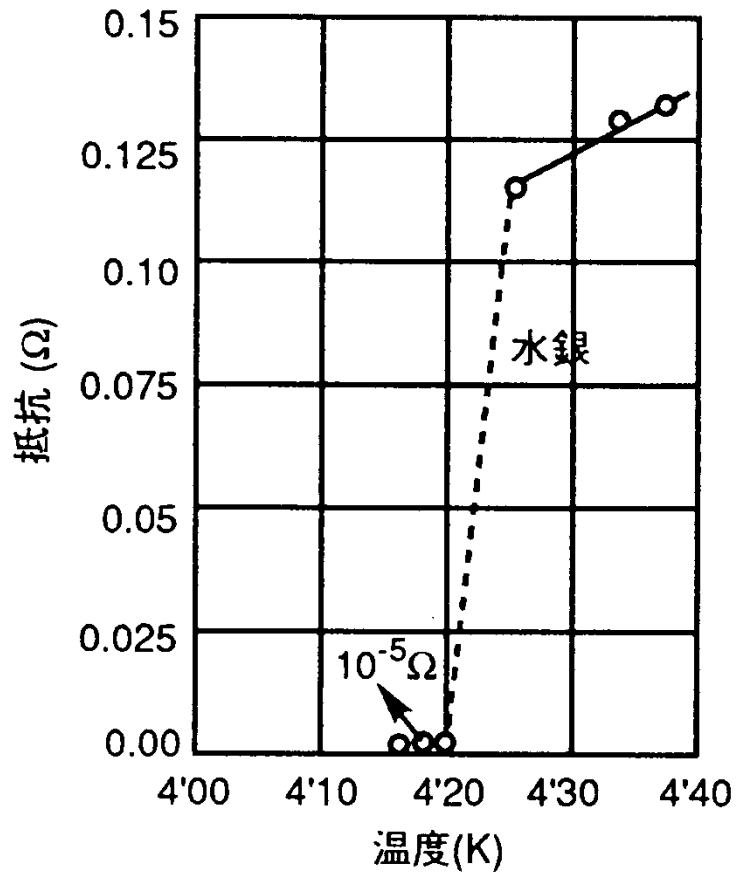
$$\psi \rightarrow e^{i\theta} \psi \quad \psi^\dagger \rightarrow e^{-i\theta} \psi^\dagger$$

秩序変数

$$\Delta \sim \langle \psi\psi \rangle \rightarrow \Delta e^{2i\theta}$$

$U(1)$ ゲージ対称性の破れ

超伝導(電気抵抗ゼロ)

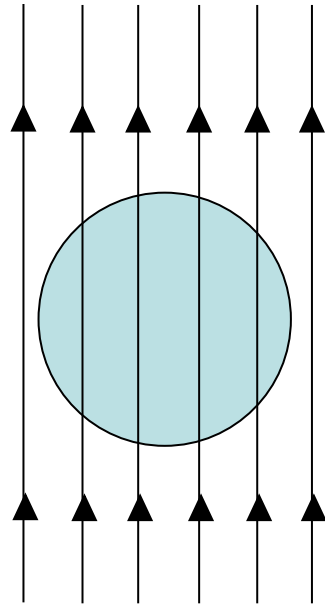


永久電流

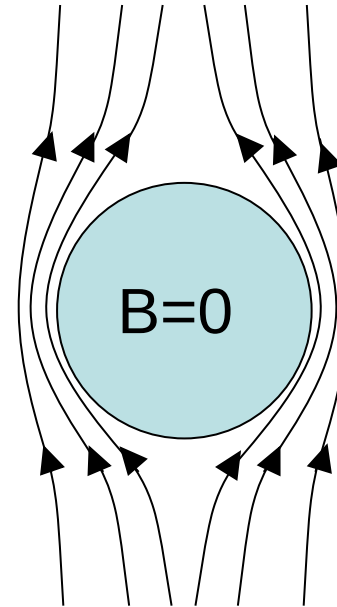
宇宙の年齢より長い！！

超伝導の磁場効果

完全反磁性(マイスナー効果)



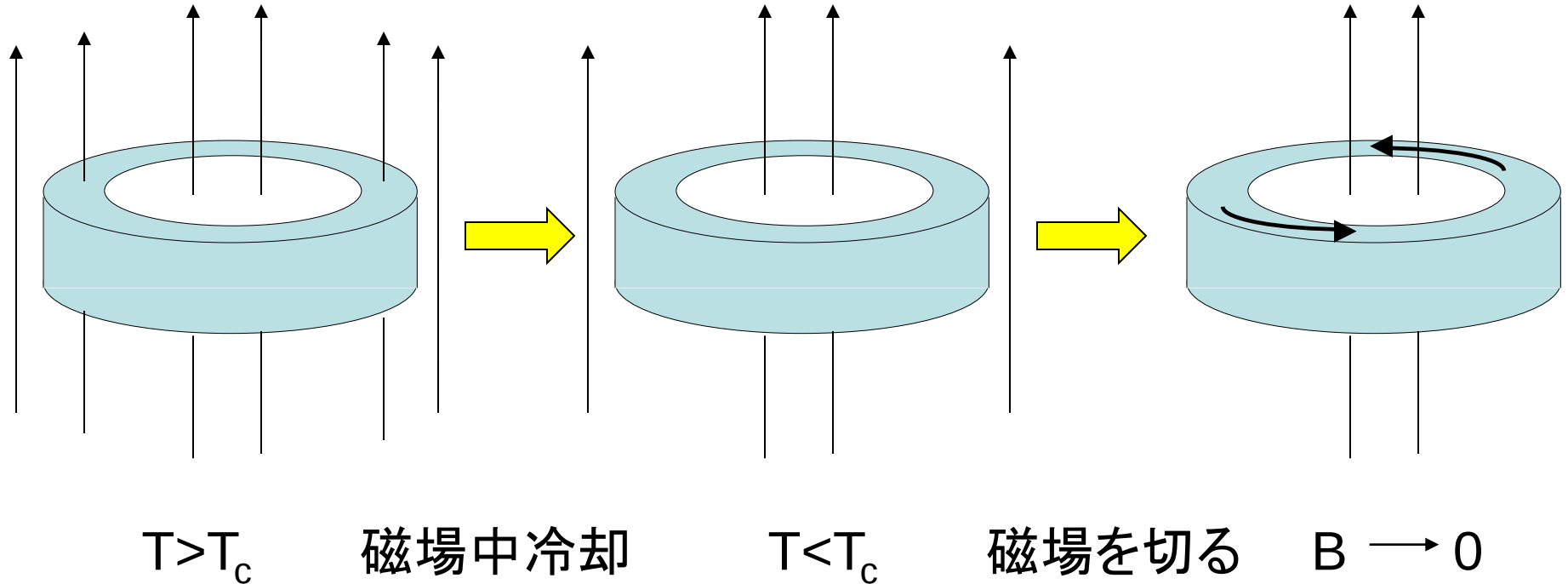
$T > T_c$



$T < T_c$

超伝導体の中では磁場は排除される

磁束の量子化

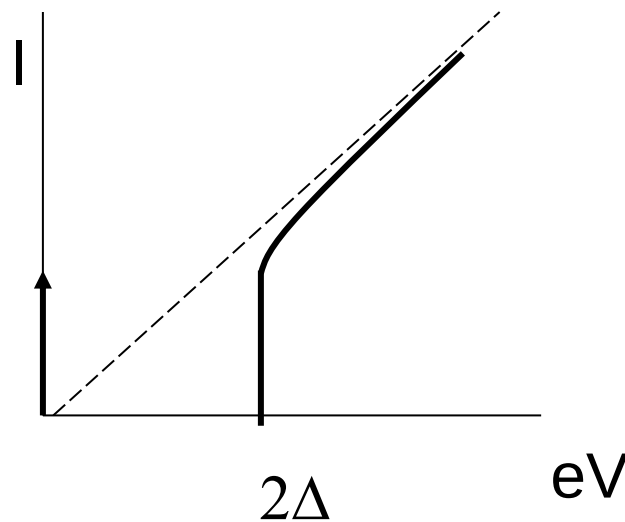
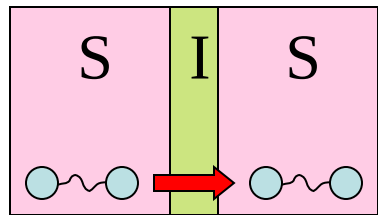
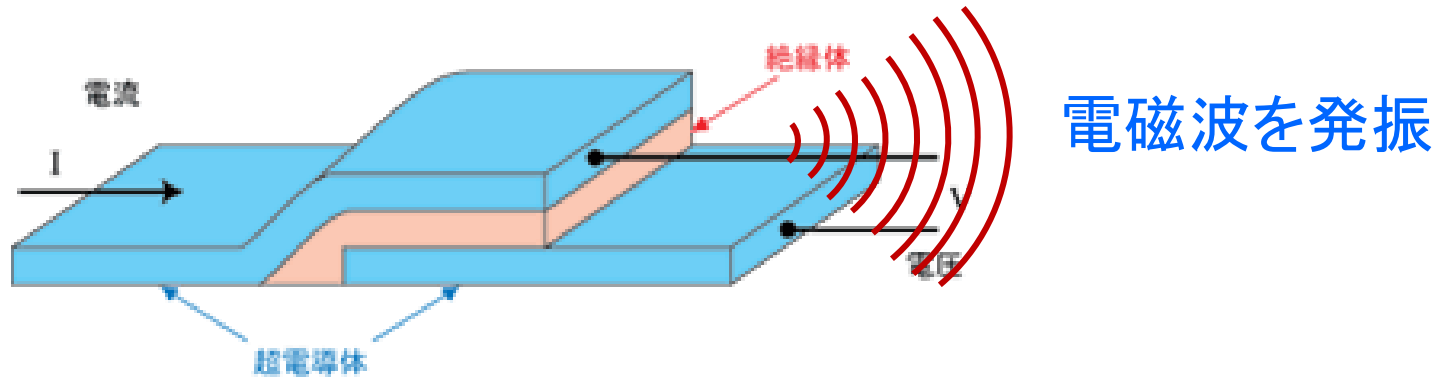


この時捕獲された磁場は $\Phi_0 = hc/2e = 2.07 \times 10^{-7} \text{Oe} \cdot \text{cm}^2$ の整数倍にしかない

プランク定数 量子力学

超伝導メソスコピックリングの実験

超伝導トンネル効果(ジョセフソン効果)



$$f = \omega_J / 2\pi = eV / \pi\hbar$$
$$= 483593.420 \text{ GHz/V}$$

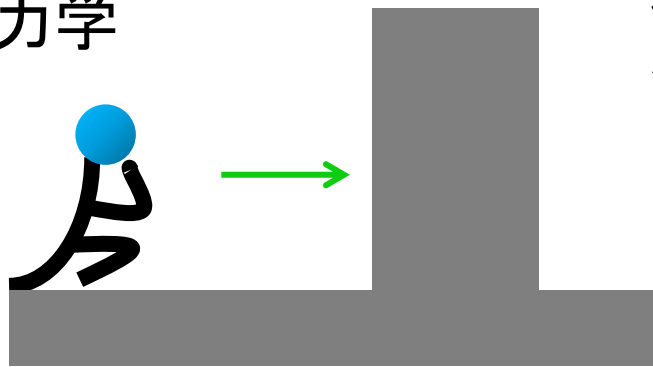
10桁

中国人の人口！！！！

電気を流さない絶縁体(抵抗無限大)が超伝導(抵抗ゼロ)になる
高速スイッチング

トンネル効果

古典力学

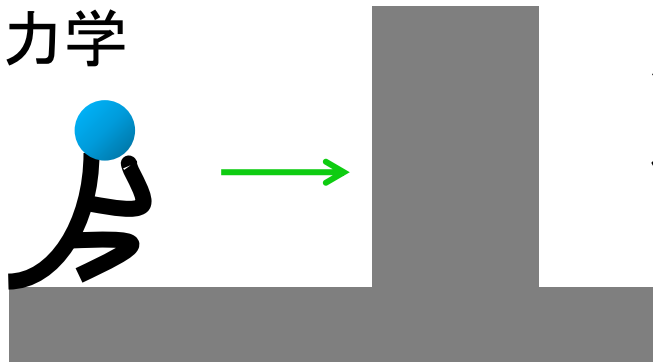


粒子は「100%」
壁にはね返される

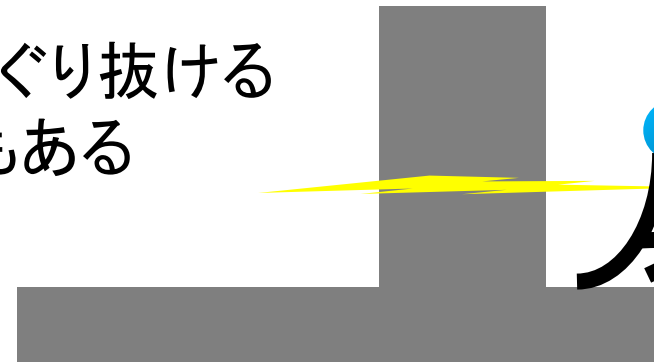


くぐり抜ける確率
 $P=0$

量子力学



壁をくぐり抜ける
粒子もある



$P_1 > 0$

超伝導トンネル効果



粒子はペアを組
んで壁をくぐり抜
ける



$P_2 \gg P_1 > 0$

Bardeen



Josephson



2度ノーベル賞を受賞

21歳で超伝導量子干渉効果を予言

Bardeen



Josephson

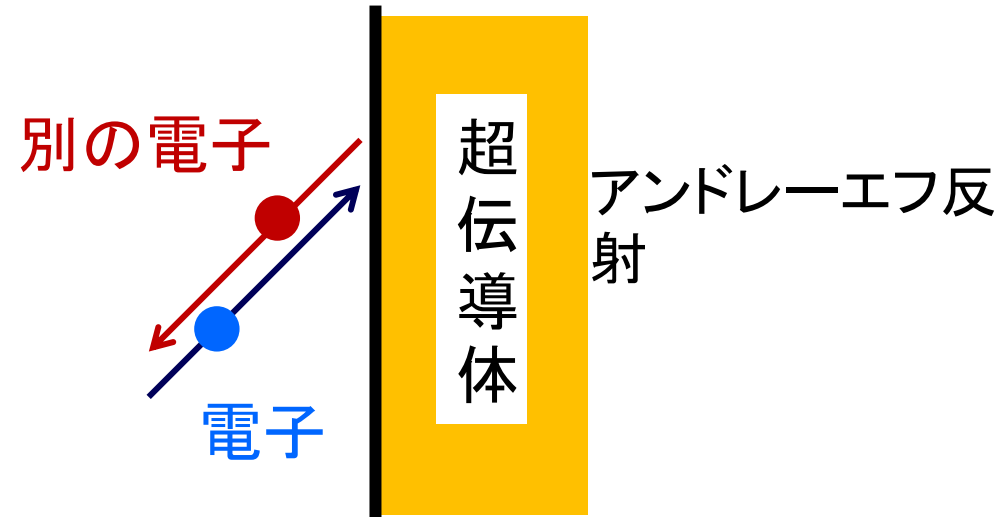
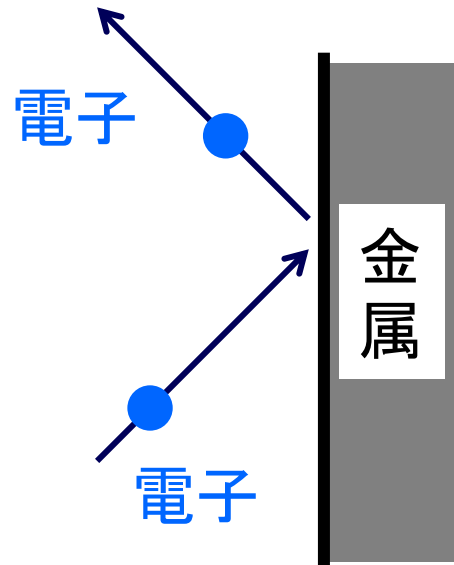


2度ノーベル賞を受賞

21歳で超伝導量子干渉効果を予言

現在超能力を研究中

魔法の鏡

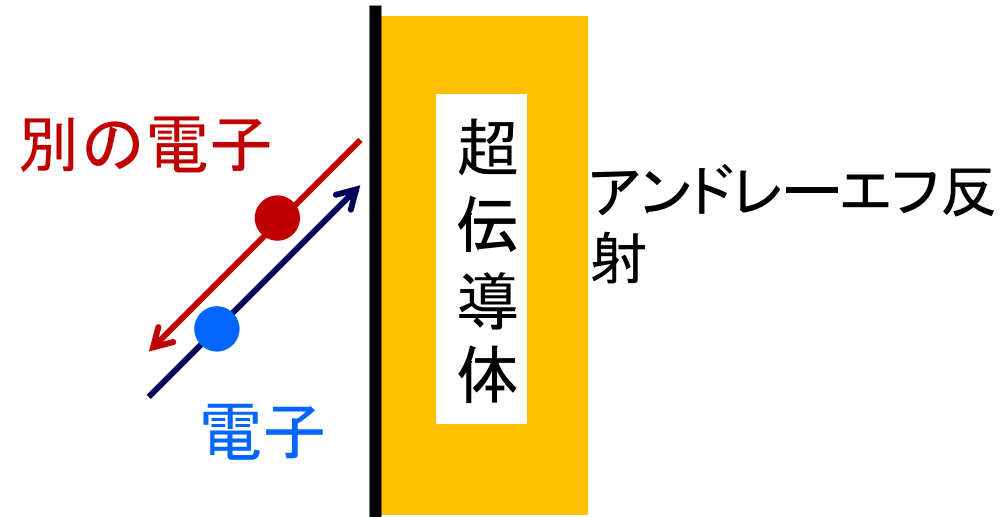
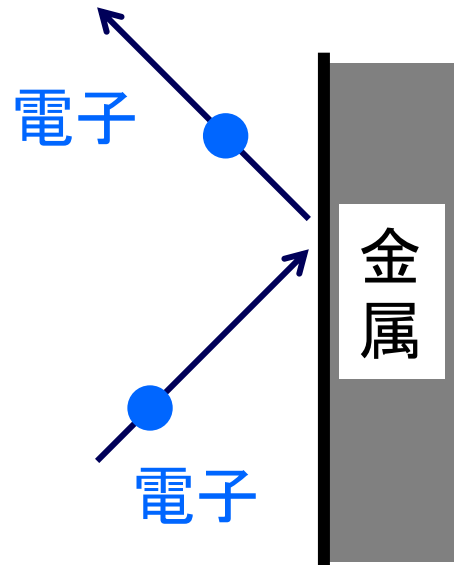


金属の鏡



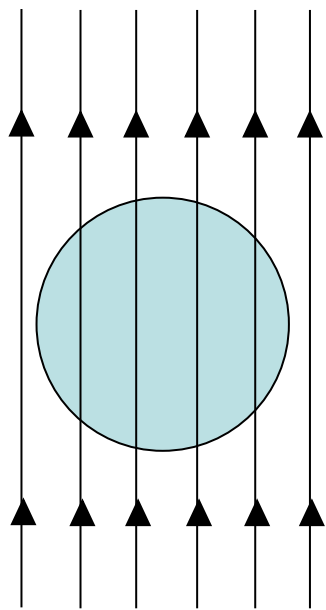
超伝導の鏡

魔法の鏡

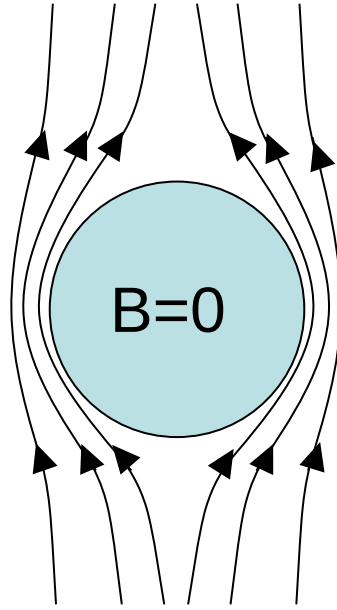


本物のアンドレーエフの反射

Superconductivity is destroyed by the strong magnetic field

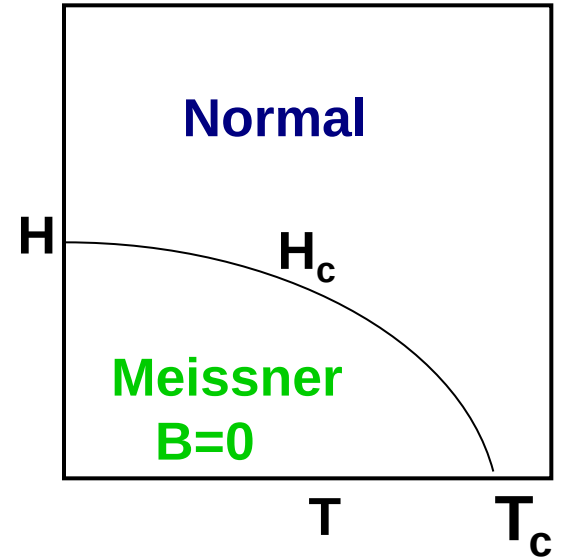


$T > T_c$

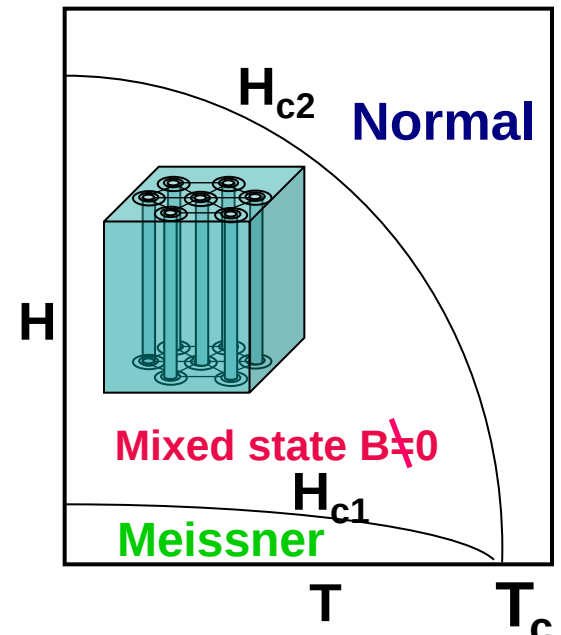


$T < T_c$

Type I



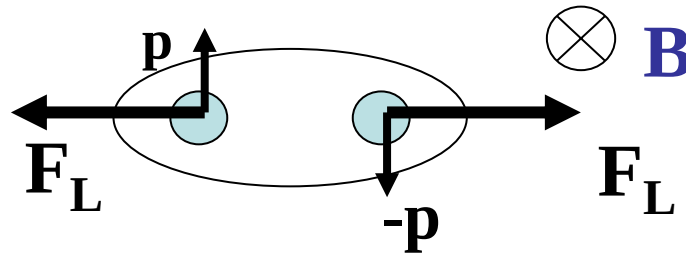
Type II



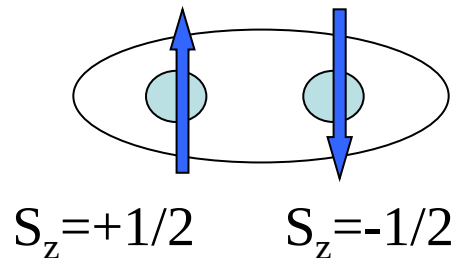
Superconductivity is destroyed by magnetic field

(breakdown of Cooper pairs by magnetic field)

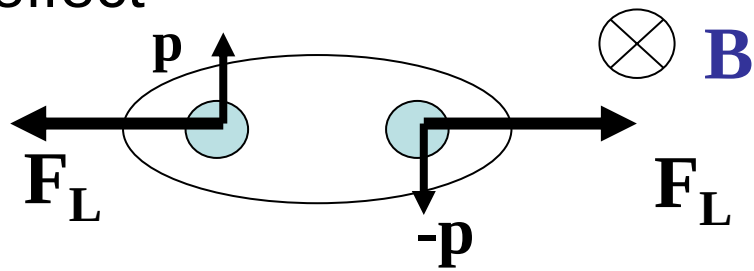
Orbital effect (Lorentz force)

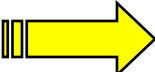


Zeeman effect of spin (Pauli paramagnetism)



Orbital effect



 **Vortex**



Typhoon

July 16, 2007 Japan

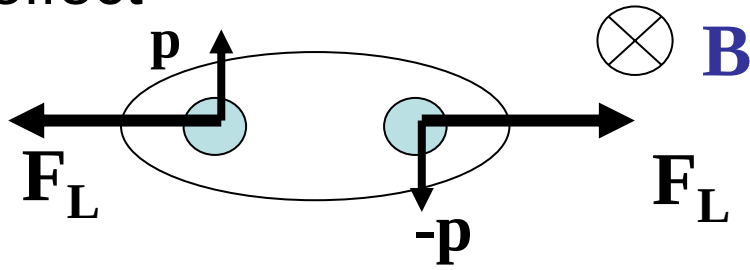
eye of a typhoon
(vortex core)

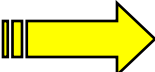
Tokyo
Kyoto
Nagoya
Kumano city

台風4号が通過中の三重県熊野市の七里御浜海岸で15日朝、雨雲の間に青空が出現した。
(読売新聞2007年7月16日)

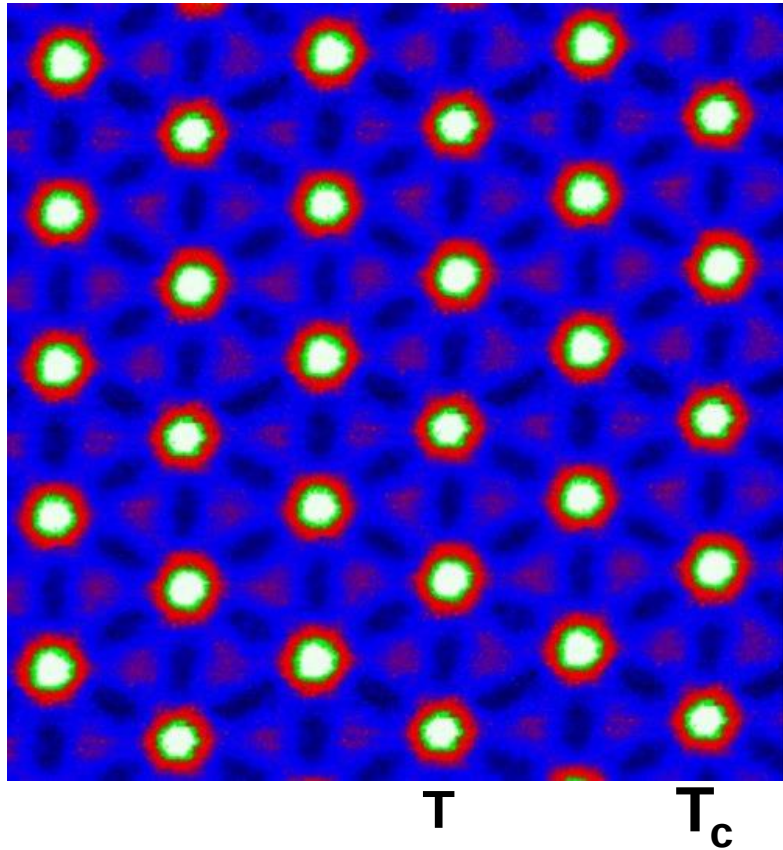


Orbital effect

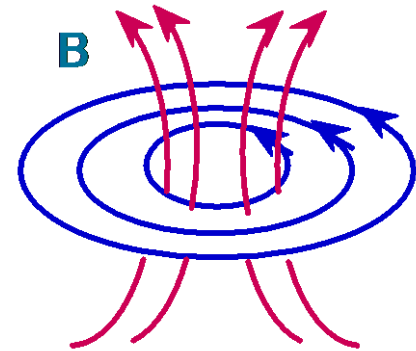


 **Vortex**

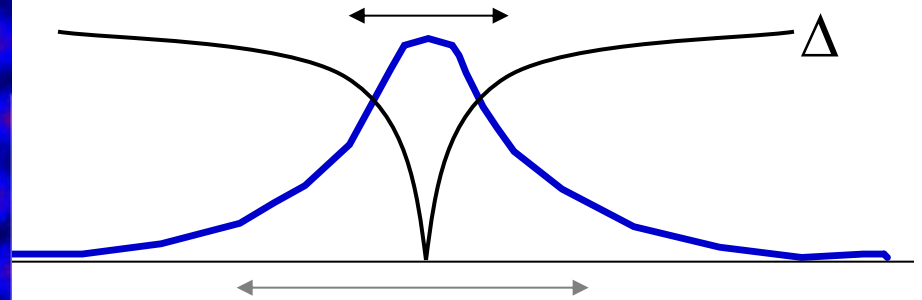
Flux quantum



Vortex lattice in NbSe₂
(STM)



ξ (coherence length)

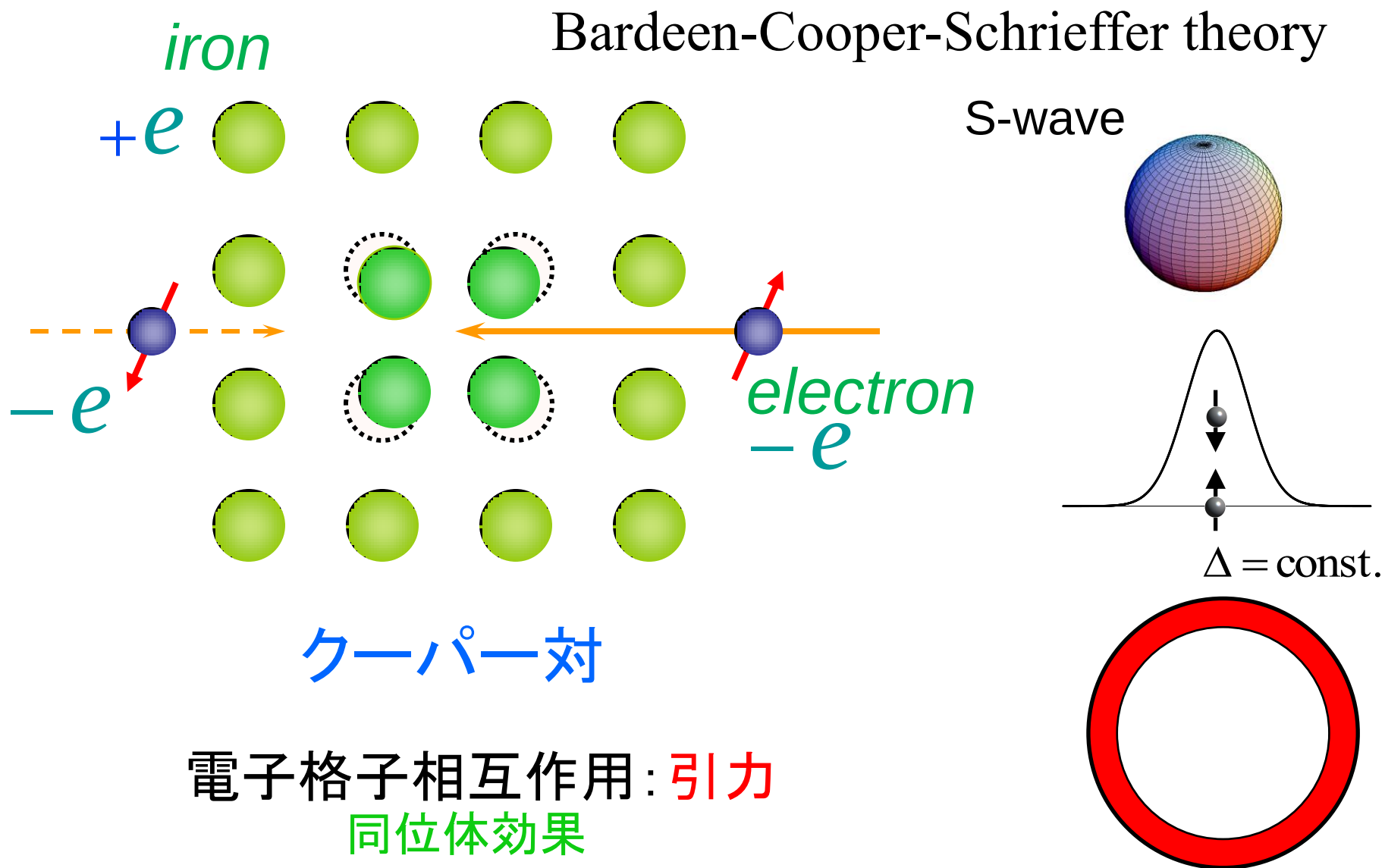


λ (penetration length)

$$\Phi_0 = hc/2e = 2.07 \times 10^{-7} \text{ Oe} \cdot \text{cm}^2$$

従来型超伝導と非従来型超伝導

従来型超伝導



MgB_2 ($T_c = 39 \text{ K}$)

J. Nagamatsu *et al.*, Nature (2001)

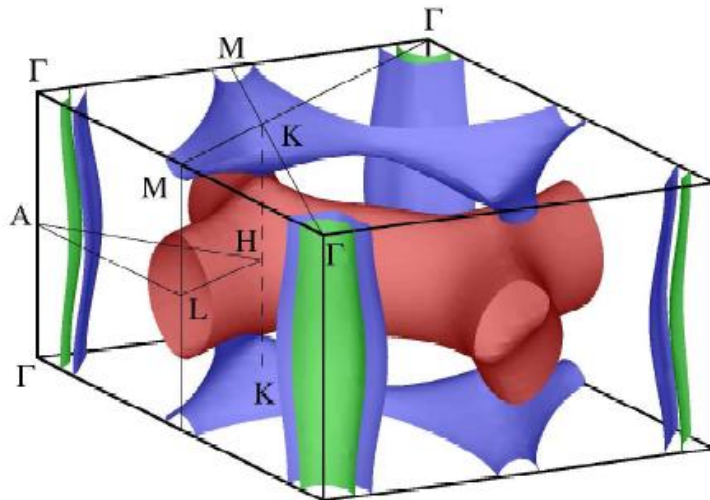
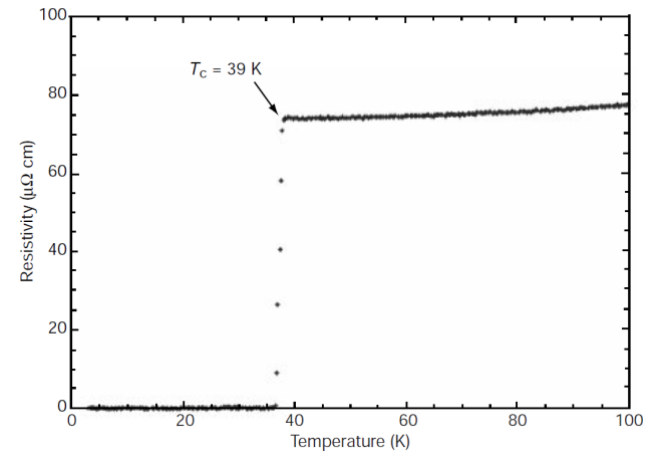
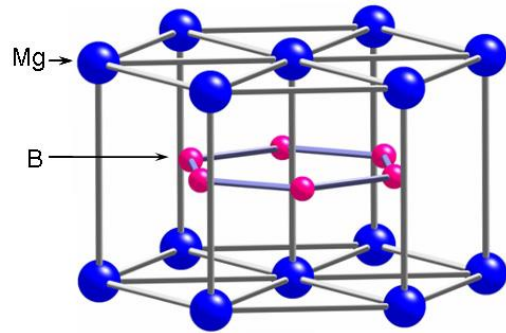
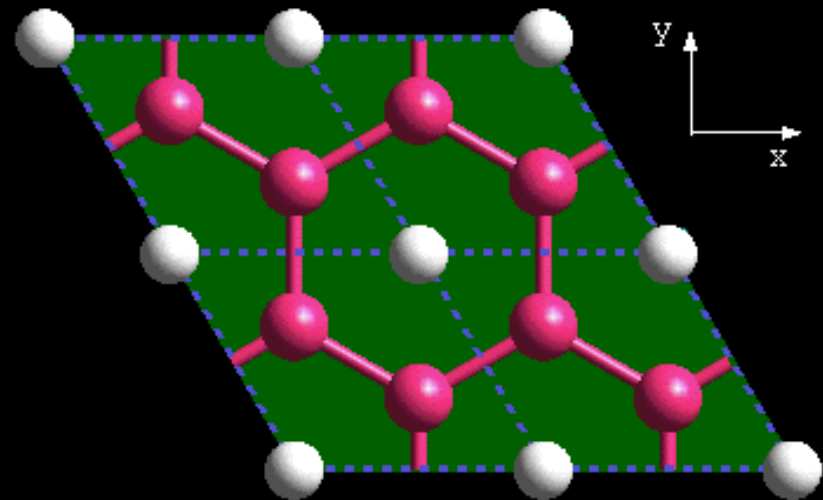


FIG. 1. Fermi surface of MgB_2 . The figure is taken from Ref. [5]. Holes in the σ -band form cylinders around the ΓA -line. The π -band has electron and hole pockets located near the H - and K -points, respectively.



Anharmonic E_{2g} mode $\sim 70 \text{ meV}$

非従来型超伝導体

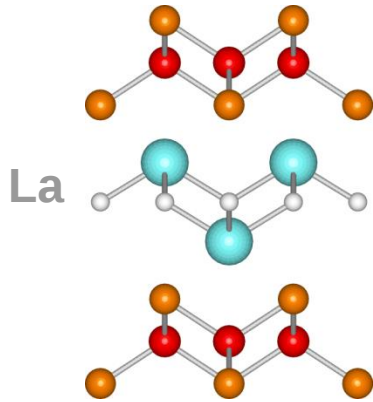
重い電子系

銅酸化物

鉄ヒ素系化合物

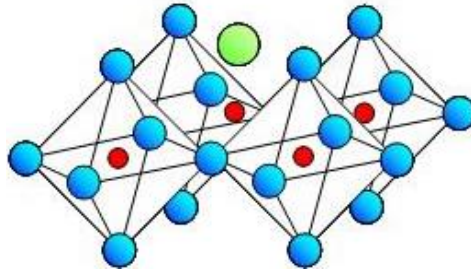
Three families of unconventional superconductor

Iron pnictide (Fe)



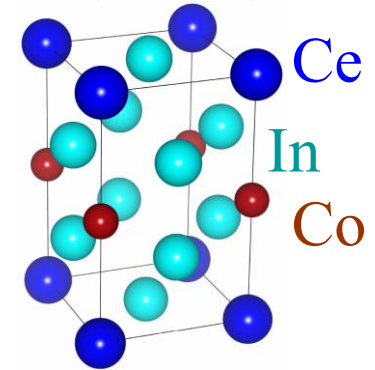
Weakly localized
 $3d$ -electrons

Cuprate (Cu)



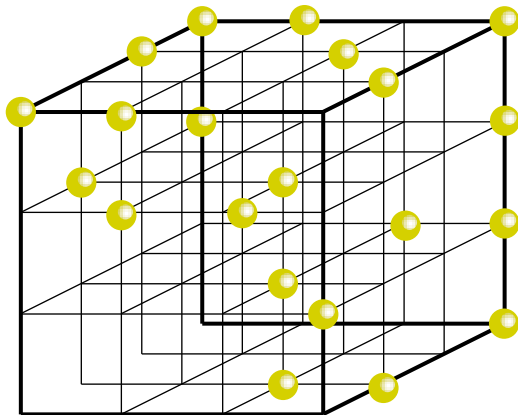
Strongly localized
 $3d$ -electrons

Heavy fermion compound
(Ce, U)

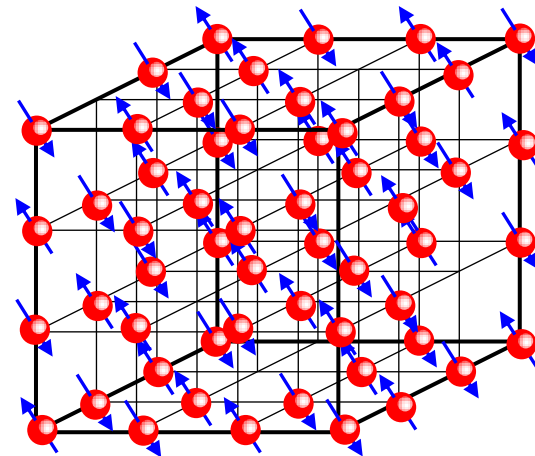


Very strongly localized $4f$,
 $5f$ electrons

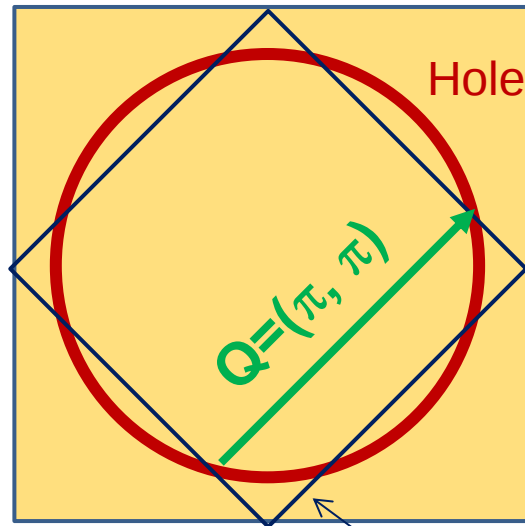
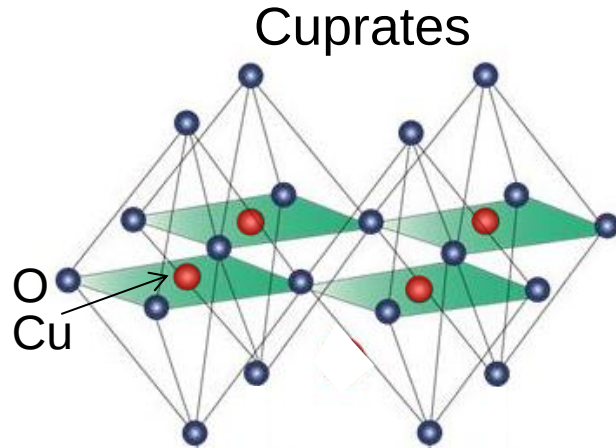
Weak correlation



Strong correlation

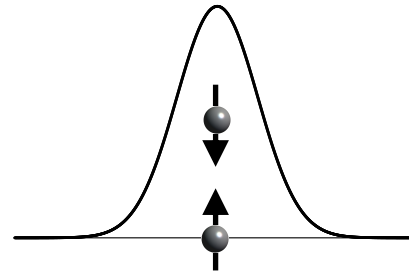
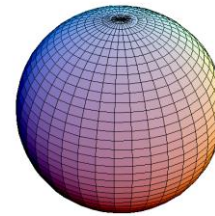


斥力による超伝導

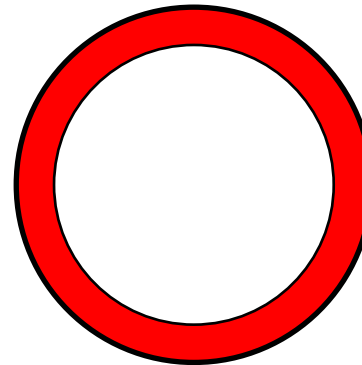


AF Brillouin zone

s-wave

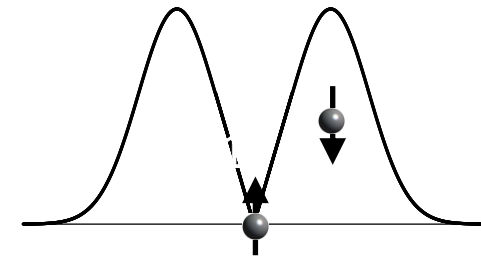
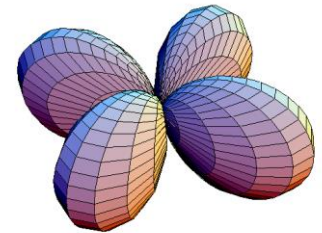


Attractive

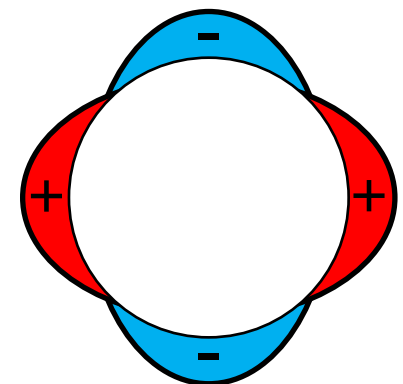


$\Delta = \text{const.}$

d-wave



Onsite repulsive



超伝導: 2次相転移

対称性の破れ オーダーパラメーター

$U(1)$ ゲージ対称性の破れ

異方的超伝導

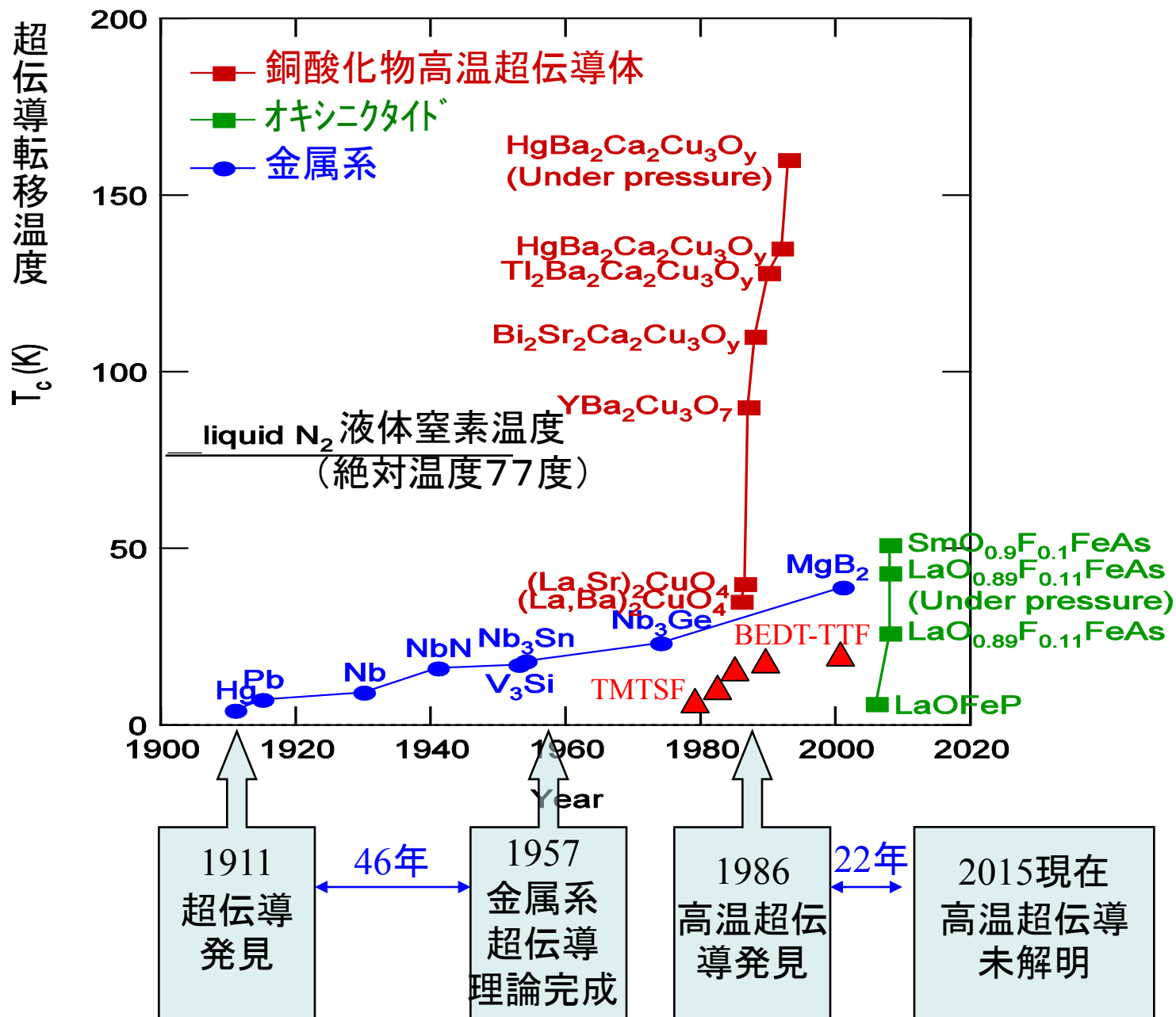
Full symmetry group $\mathbf{G}$

$$\mathbf{G} = U(1) \times \mathbf{G} \times SU(2) \times T$$

$U(1)$	ゲージ対称性
$\mathbf{G}$	結晶の対称性
$SU(2)$	スピン空間の対称性
T	時間反転対称性

$U(1)$ 対称性以外にどれか一つあるいは複数の対称性が破れる

超伝導転移温度の歴史



銅酸化物高温超伝導体

J. G. Bednorz and K.A. Müller, Zeitschrift für Physik B 6

Possible High T_c Superconductivity
in the Ba – La – Cu – O System

J.G. Bednorz and K.A. Müller

IBM Zürich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland

Received April 17, 1986

Metallic, oxygen-deficient compounds in the Ba – La – Cu – O system, with the composition $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{CuO}_{5-y}$ have been prepared in polycrystalline form. Samples with

発見の僅か1年後にノーベル賞受賞!

increase, interpreted as a beginning of localization. Finally an abrupt decrease by up to three orders of magnitude occurs, reminiscent of the onset of percolative superconductivity. The highest onset temperature is observed in the 30 K range. It is markedly reduced by high current densities. Thus, it results partially from the percolative nature, but possibly also from 2D superconducting fluctuations of double perovskite layers of one of the phases present.

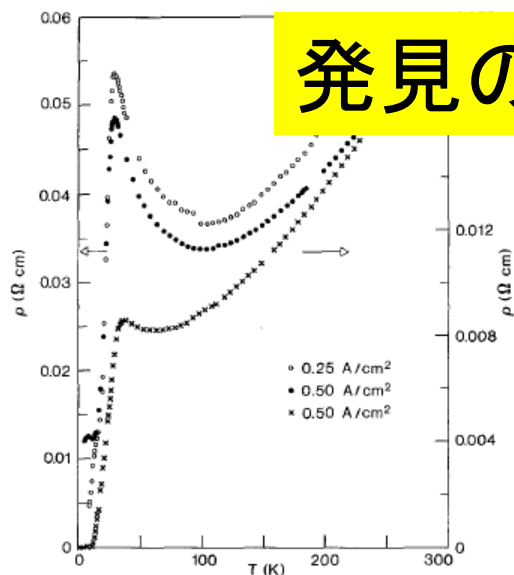
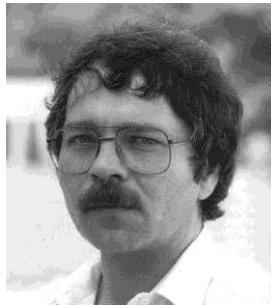
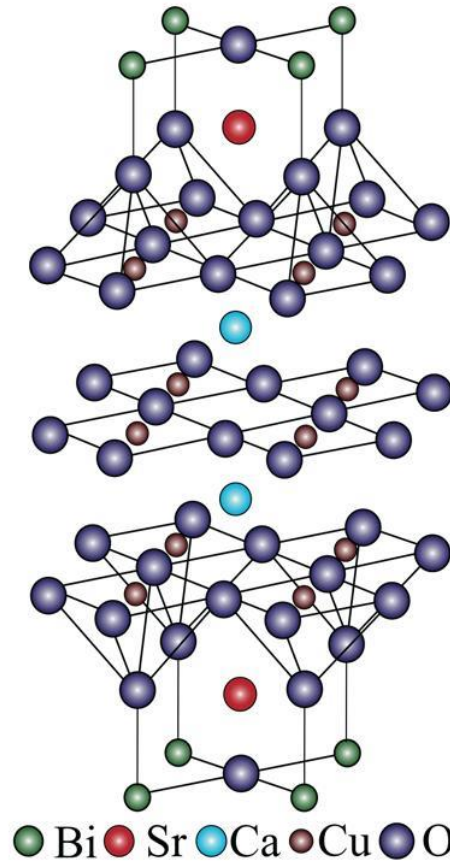
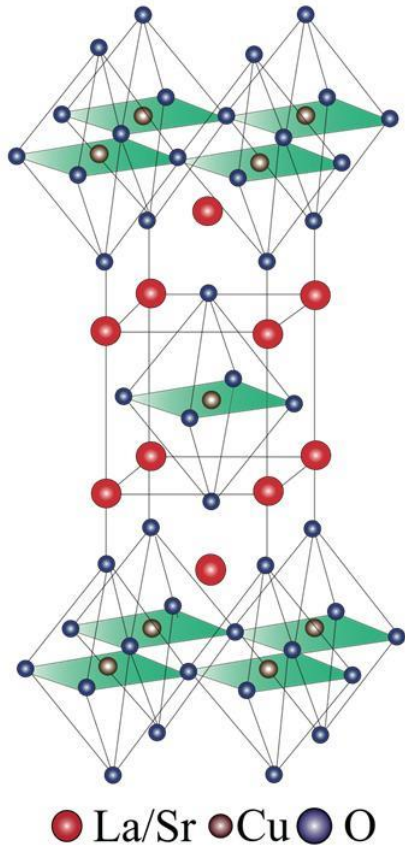


Fig. 1. Temperature dependence of resistivity in $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{CuO}_{5-y}$ for samples with $x(\text{Ba})=1$ (upper curves, left scale) and $x(\text{Ba})=0.75$ (lower curve, right scale). The first two cases also show the influence of current density

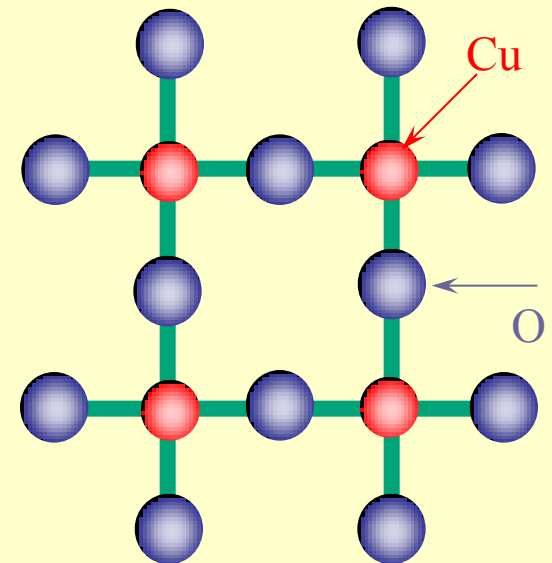


全ての銅酸化物高温超伝導体に共通な構造

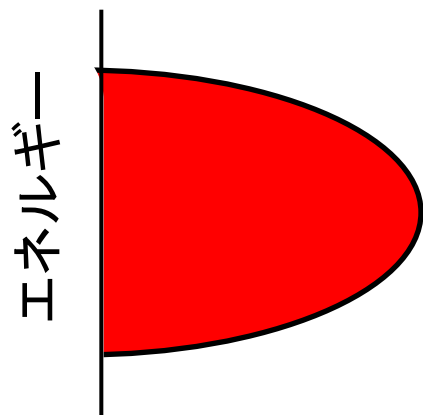
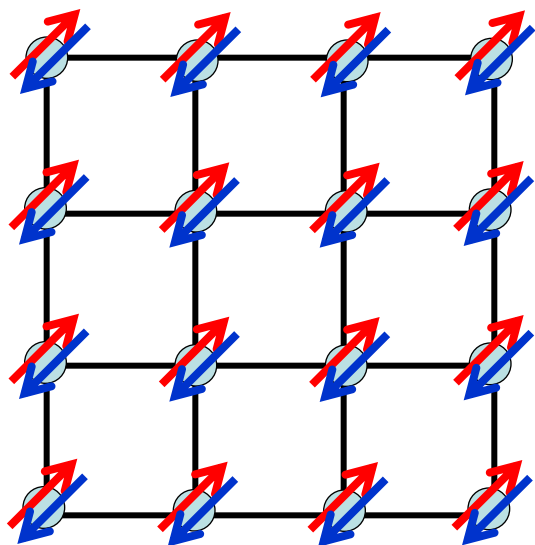


CuO₂面の多層構造

2次元CuO₂面が
超伝導を担う

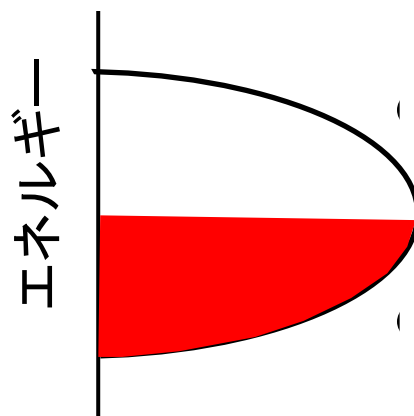
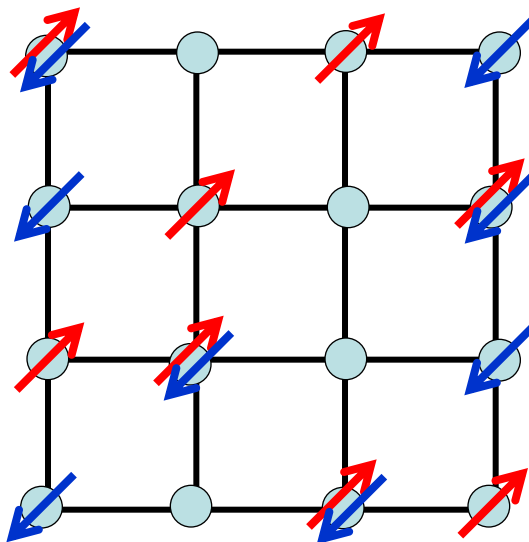


バンド絶縁体



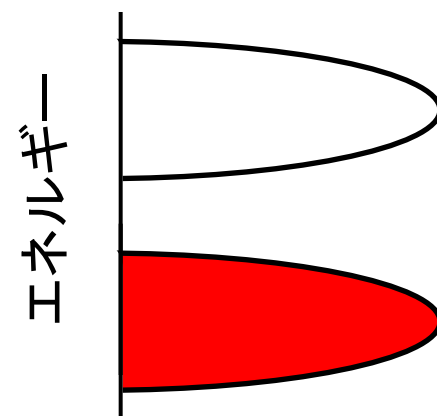
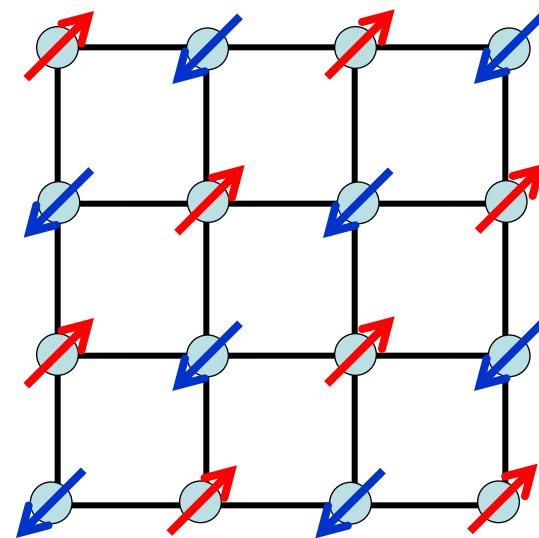
各サイトあたり電子
が2個ずつでバンドは
埋められる。

金属



各サイトあたり電子
が1個ずつではバンド
は半分しか埋められ
ていない。

モット絶縁体

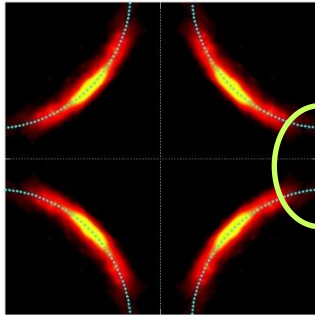


電子が1個でも同じサイ
トに2つ電子がいるとき
のクーロン反発力が大き
いと、電子は身動きで
きなくなる。

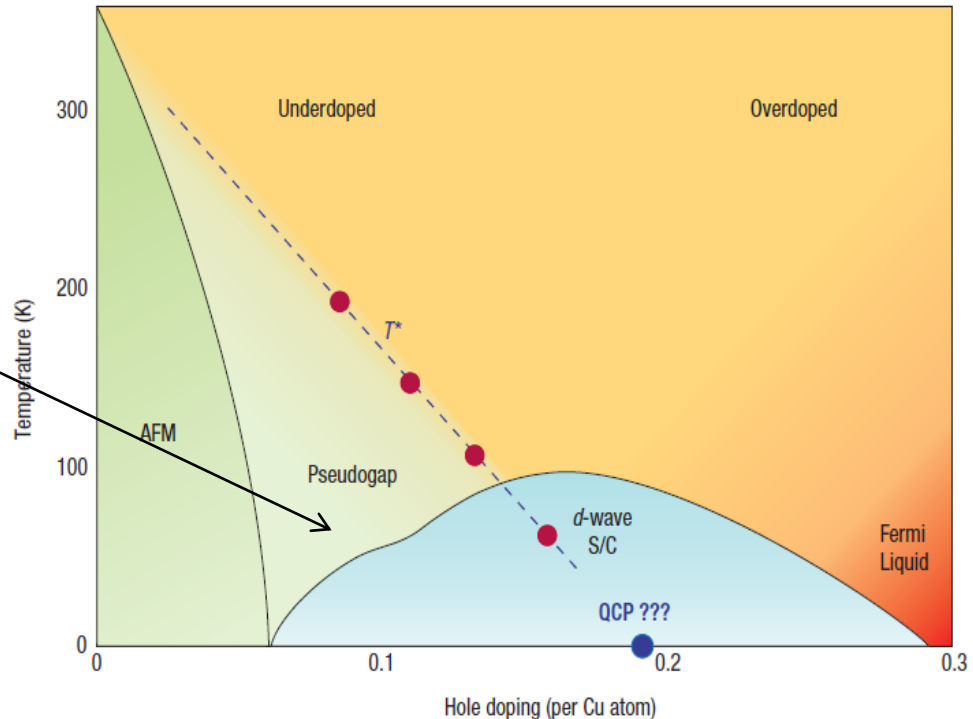
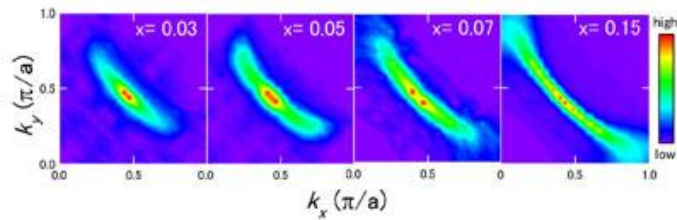
銅酸化物高温超伝導体最大の謎

擬ギャップ

フェルミアーク



エネルギー
ギャップ



擬ギャップの起源

クロスオーバー

相転移

超伝導ゆらぎ

超伝導と競合する何らかの秩序

フェルミ面の再構成

電荷ストライプ相(並進対称性の破れ)

軌道電流反磁性(時間反転対称性の破れ)

High- T_c superconductors

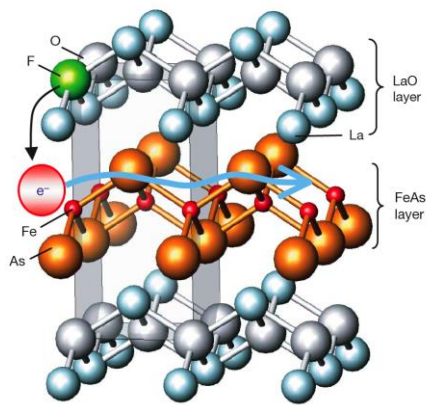
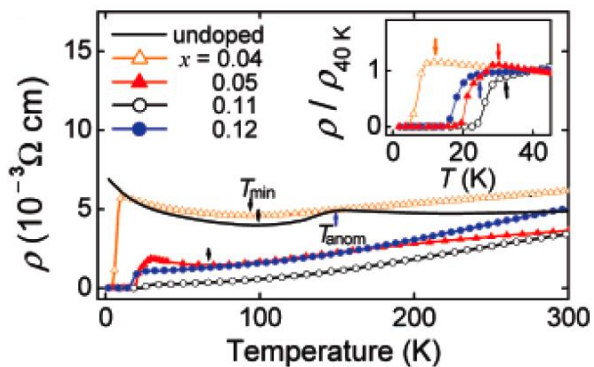
J|A|C|S
COMMUNICATIONS

Published on Web 02/23/2008

Iron-Based Layered Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05\text{--}0.12$) with $T_c = 26\text{ K}$

Yoichi Kamihara,^{*,†} Takumi Watanabe,[‡] Masahiro Hirano,^{†,§} and Hideo Hosono^{†,‡,§}

ERATO-SORST, JST, Frontier Research Center, Tokyo Institute of Technology, Mail Box S2-13, Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Mail Box R3-1, and Frontier Research Center, Tokyo Institute of Technology, Mail Box S2-13, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan



Y. Kamihara *et al.*, JACS, **130**, 3296 (2008).

High- T_c superconductors

Hosono's group was not looking for superconductor, but trying to create new kind of transparent semiconductors for flat-panel display.

LaFePO $T_c=4$ K

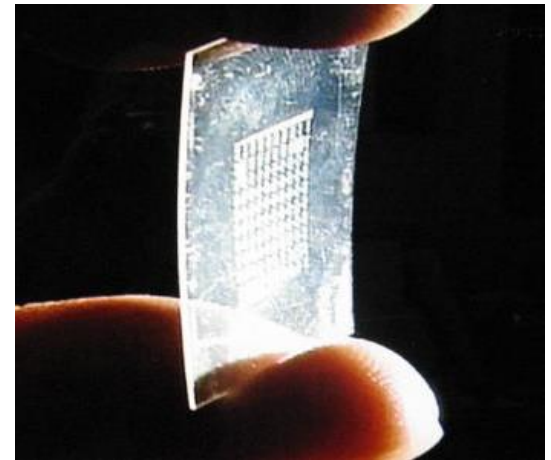
LaFeP(O,F) $T_c=7$ K

LaFeAs(O,F) $T_c=26$ K

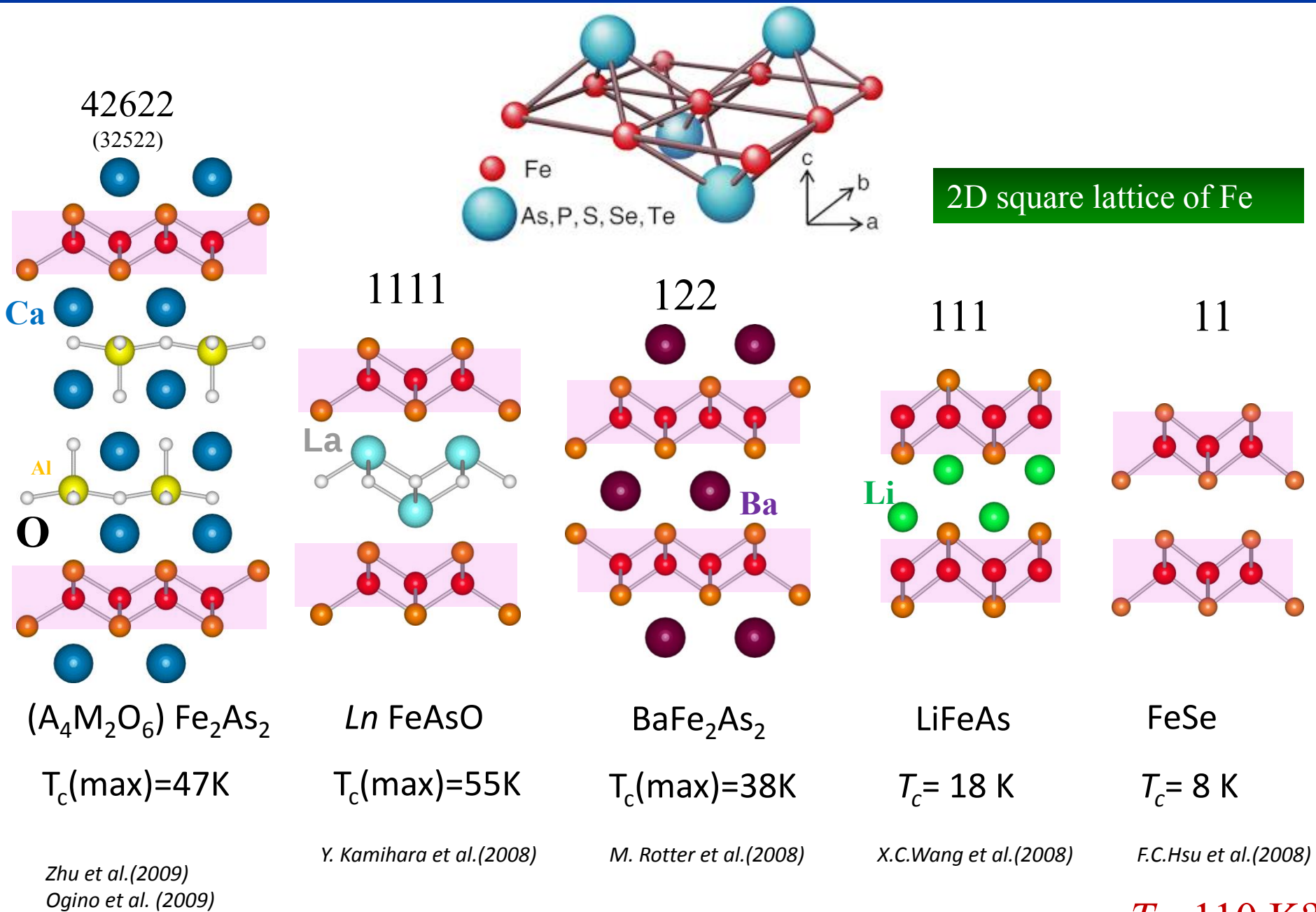
SmFeAs(O,F) $T_c=56$ K



Only two months!



Fe-based high- T_c superconductors



鉄ニクタイド高温超伝導体

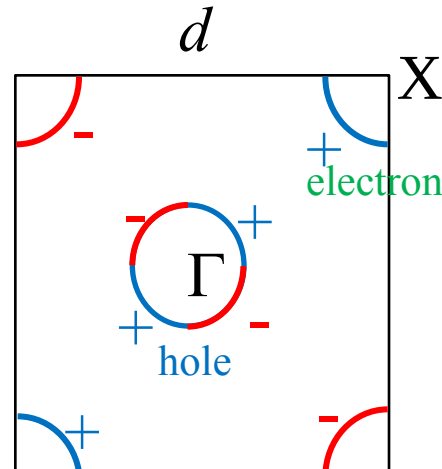
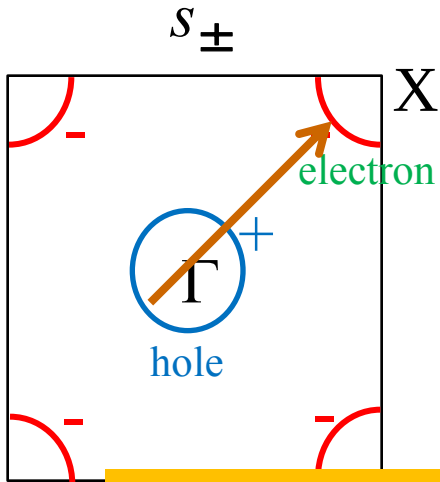
2D

Nodeless

Nodal

Large $\chi(q)$

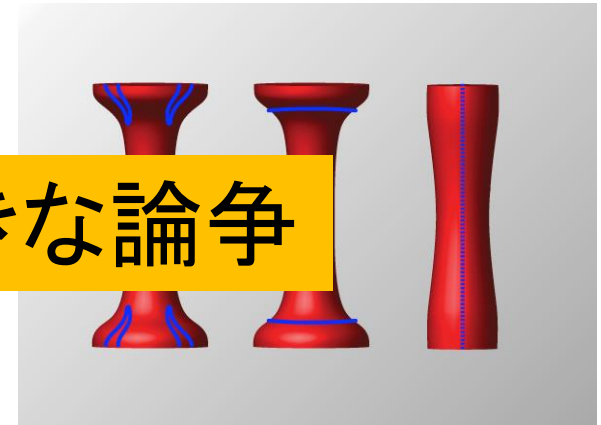
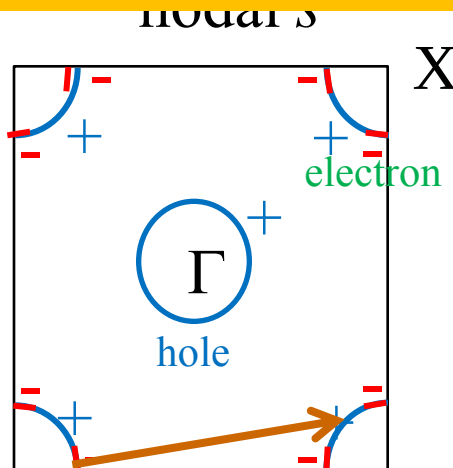
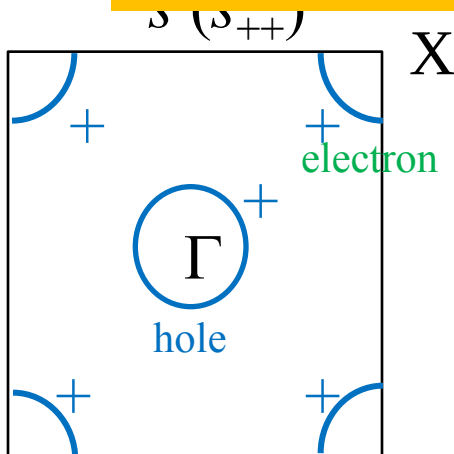
$\Delta(k+q)\Delta(k) < 0$
Sign change



3D

Node in hole band

超伝導ギャップ関数は大きな論争



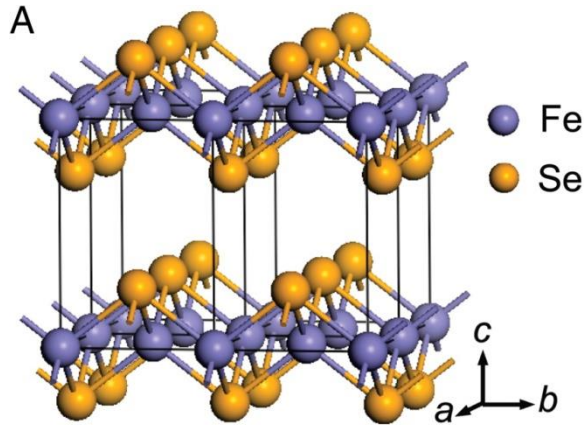
Node in electron band



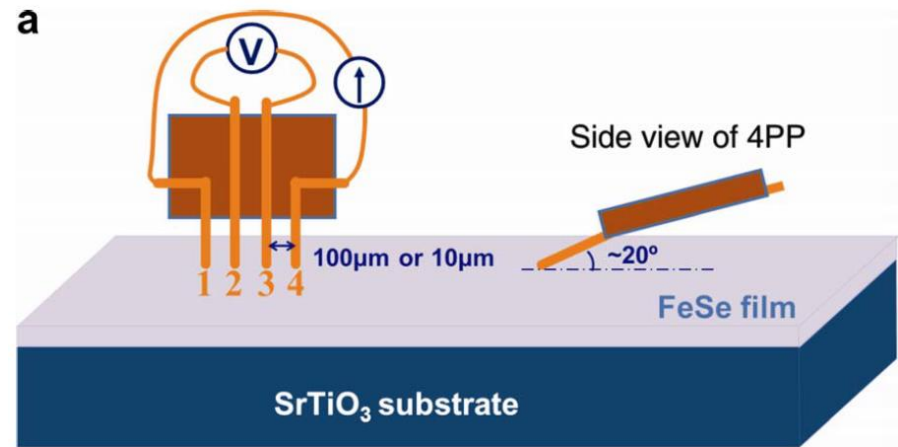
High- T_c superconductivity in FeSe

Superconductivity in single-layer films of FeSe with a transition temperature above 100 K

Jian-Feng Ge¹, Zhi-Long Liu¹, Canhua Liu^{1*}, Chun-Lei Gao¹, Dong Qian¹, Qi-Kun Xue^{2*}, Ying Liu^{1,3}, Jin-Feng Jia^{1*}



F.-C. Hsu *et al.*,
PNAS **105**, 14262 (2008).



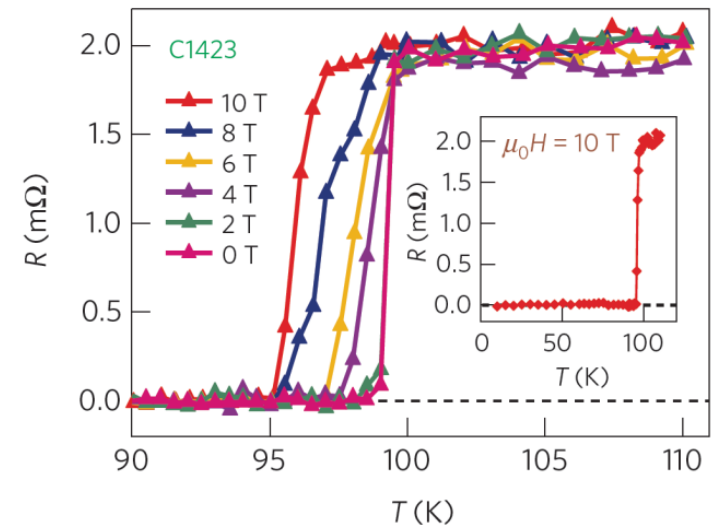
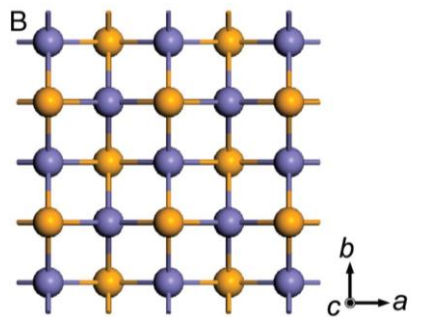
FeSe/SrTiO₃

One monolayer

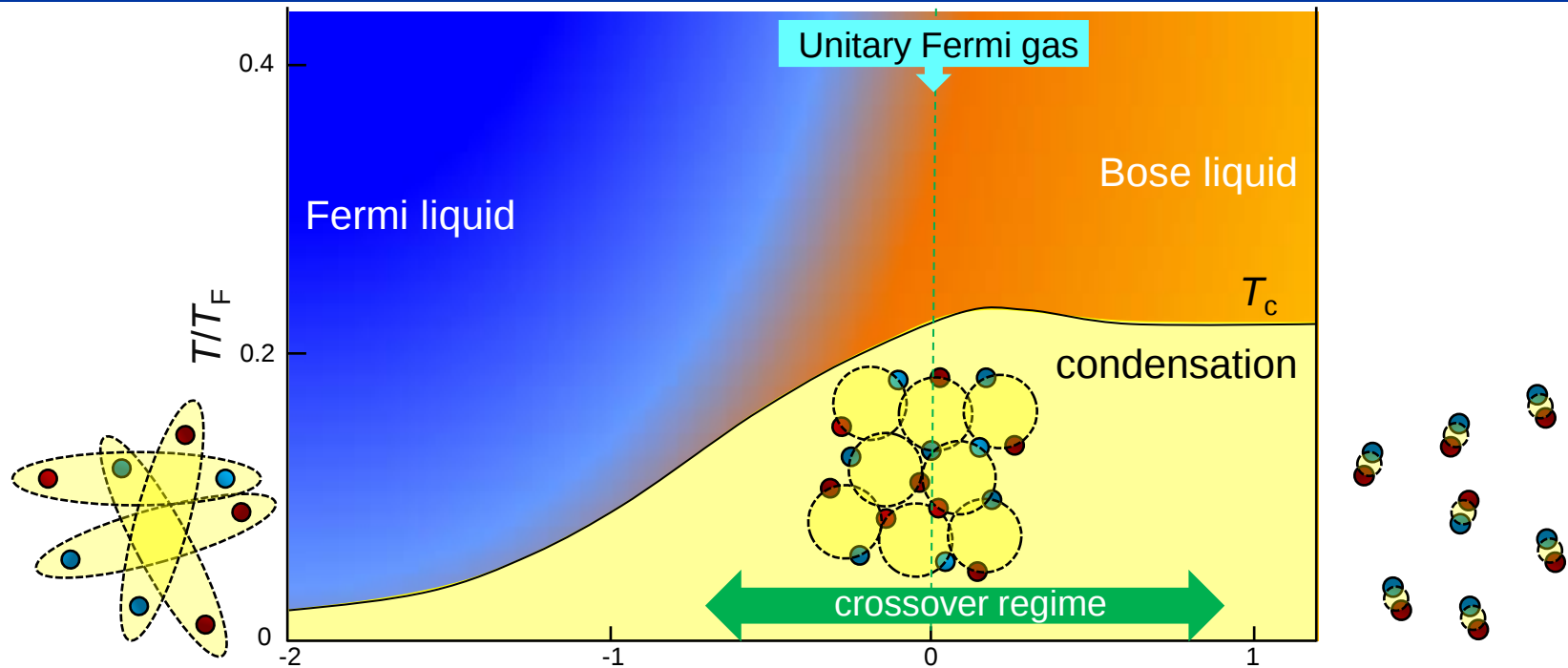
$T_c > 100$ K

J.-F. Ge *et al.*

Nature Mat. (2014)



BCS-BEC crossover



← BCS

- cooperative Cooper pairing

Conventional superconductors

$$\Delta/\varepsilon_F \sim 10^{-3} - 10^{-4}$$

High- T_c cuprates

$$\Delta/\varepsilon_F \sim 10^{-1} - 10^{-3}$$

FeSe

strongly interacting pairs

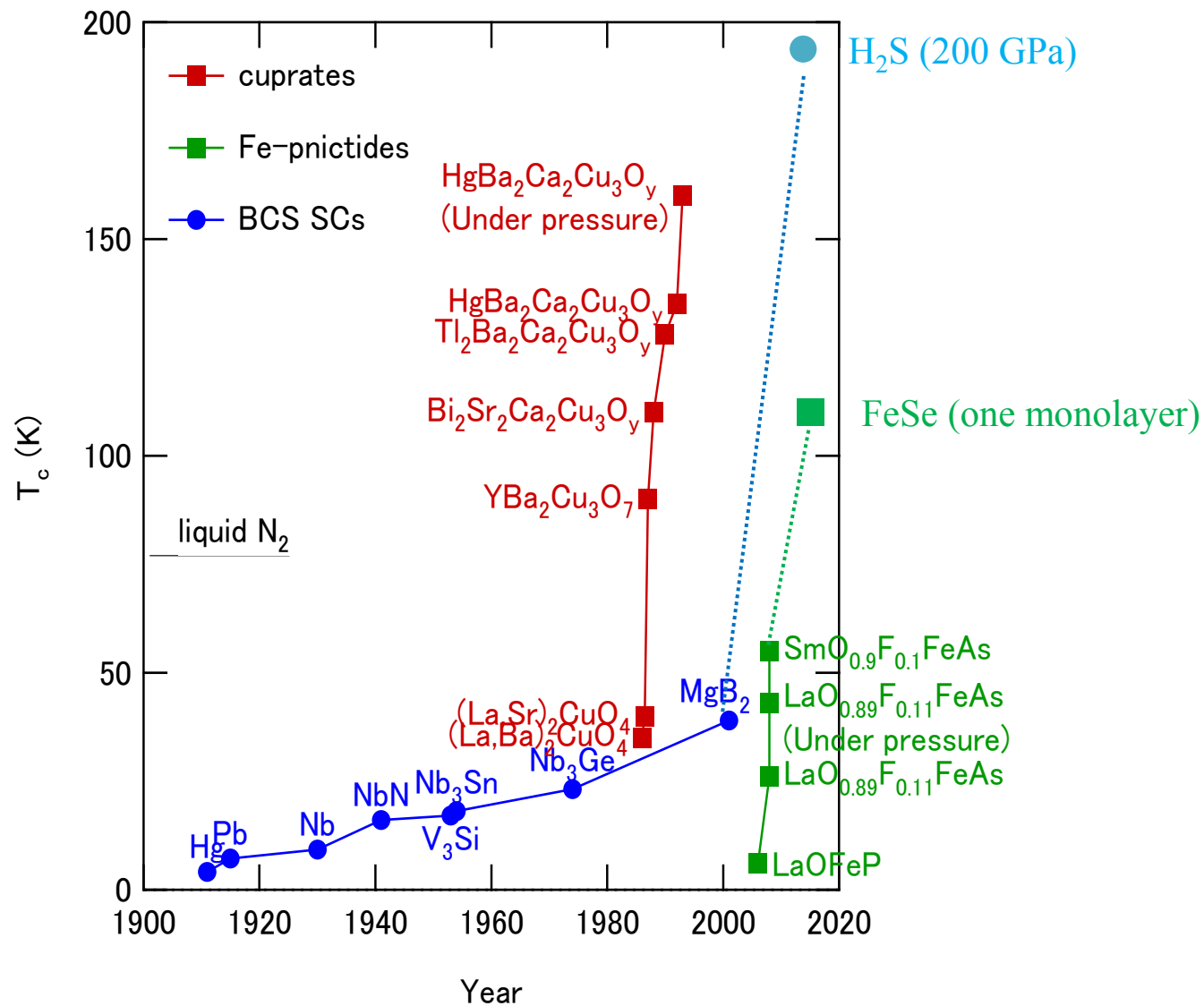
$$\text{pair size} \sim k_F^{-1}$$

$$k_F \xi \sim 1$$

$$\frac{\Delta}{\varepsilon_F} \sim \frac{T_c}{T_F} \sim \frac{1}{\xi k_F}$$

BEC →

- tightly bound molecules
- pair size $\ll k_F^{-1}$
 $k_F \xi \ll 1$



高温超伝導体

膨大な研究がなされたが、そのメカニズムは未だに解明されていない

従来の超伝導体とは決定的に異なっている

重い電子系

最初の強相関電子系超伝導 (CeCu_2Si_2)^{Ce}

Superconductivity in the Presence of Strong Pauli Paramagnetism: CeCu_2Si_2

F. Steglich

Institut für Festkörperphysik, Technische Hochschule Darmstadt, D-6100 Darmstadt, West Germany

and

J. Aarts, C. D. Bredl, W. Lieke, D. Meschede, and W. Franz

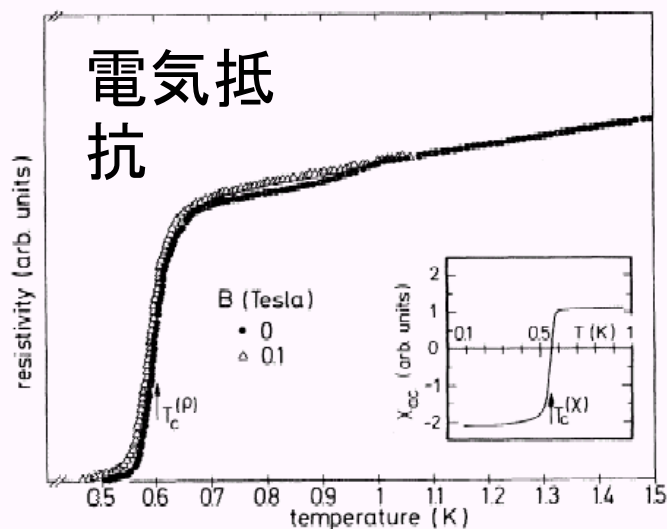
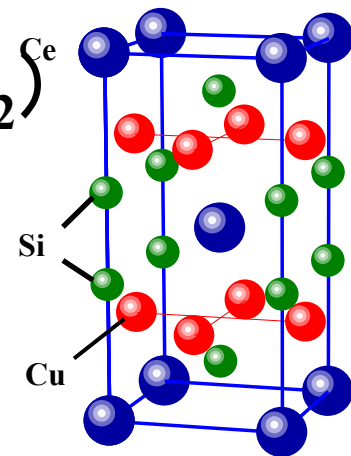
II, Physikalisches Institut, Universität zu Köln, D-5000 Köln 41, West Germany

and

H. Schäfer

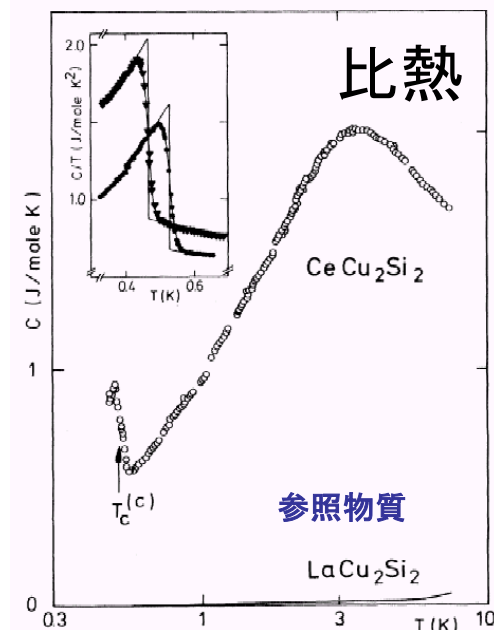
Eduard-Zintl-Institut, Technische Hochschule Darmstadt, D-6100 Darmstadt, West Germany

F. Steglich *et al.*, Physical Review Letters **43**, 1892 (1979).



T_c で比熱に大きなとび

強相関効果によって
「重く」なった電子による
超伝導

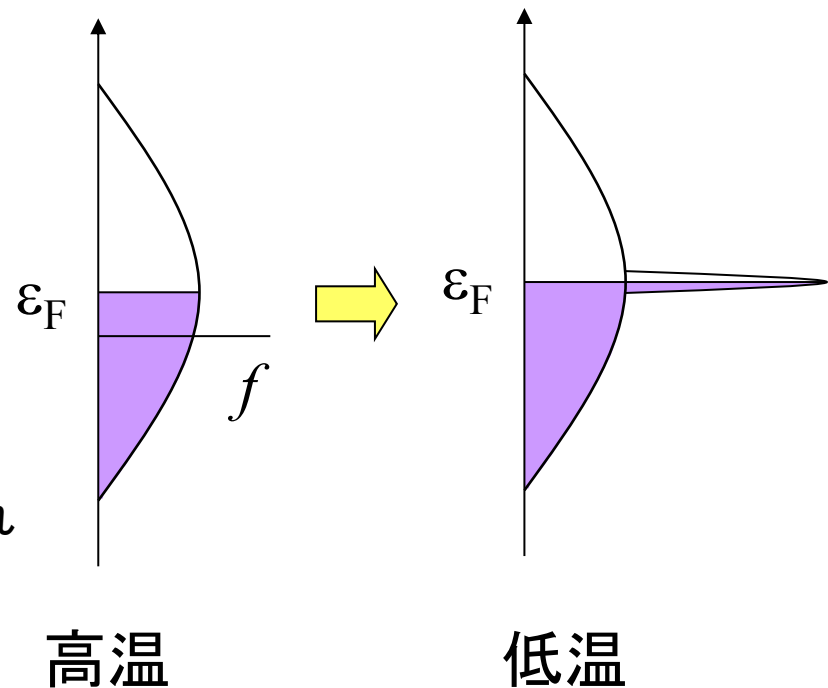
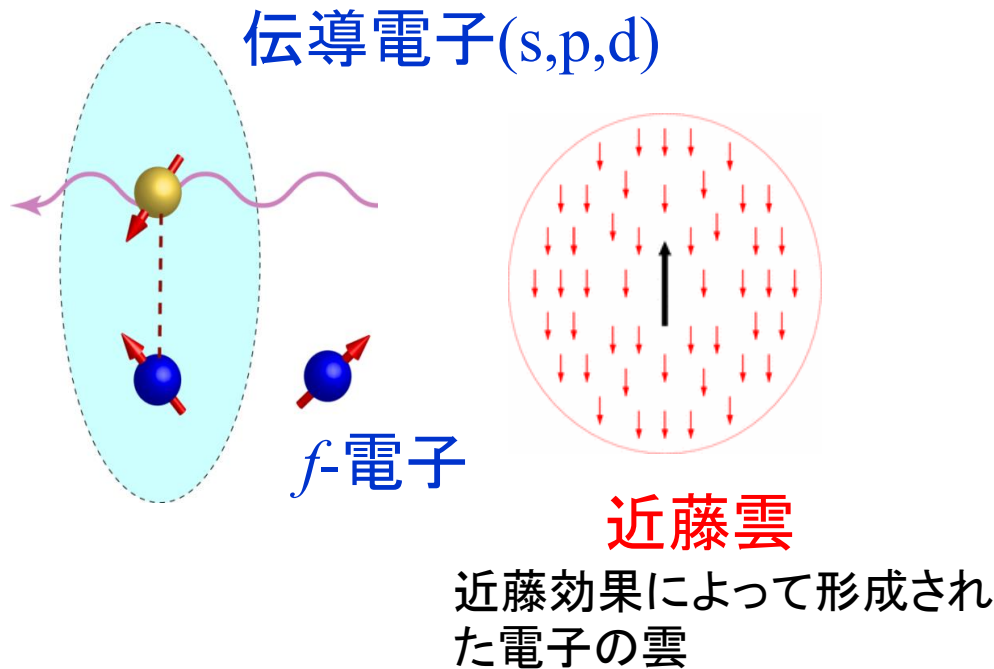


自然界で最も重い伝導電子

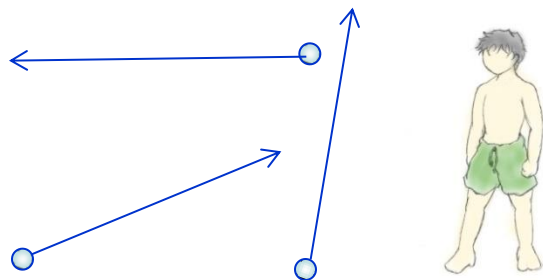
Ce(4f)系、U(5f)系化合物

有効質量が裸の電子の1000倍！ 近くなる

なぜ重くなるのか
近藤効果



自然界で最も重い伝導電子

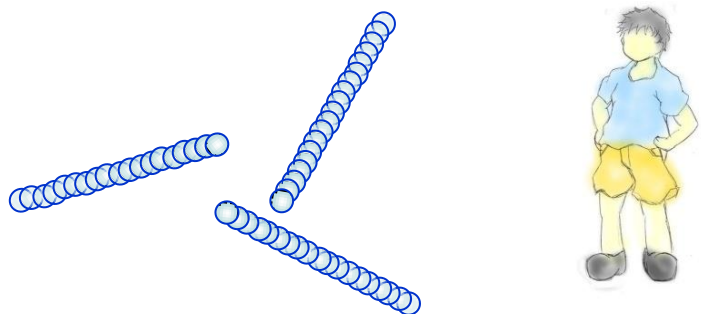


真空中の電子(質量= m_e)

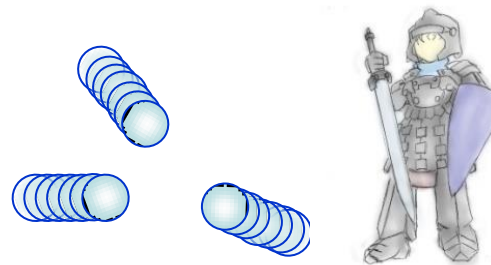
半導体中の電子

質量 (GaAs) = $0.067 m_e$

高い移動度



金属中の電子(質量= $1\sim 10 m_e$)



重い電子化合物

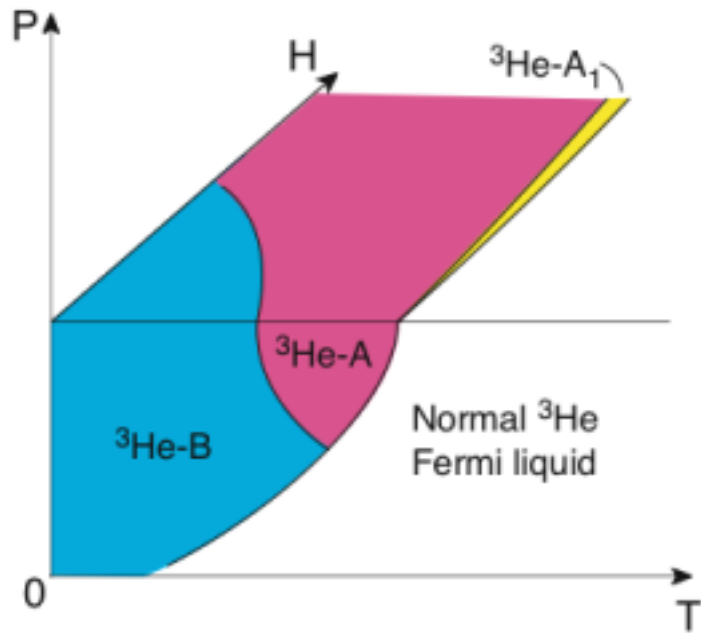
質量= $10\sim 1000 m_e$

Ce(4f)、U(5f)

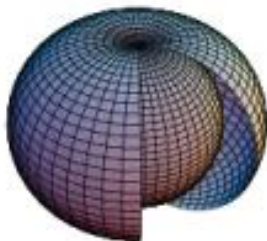
電子相関効果のために重くなる

多重超伝導相

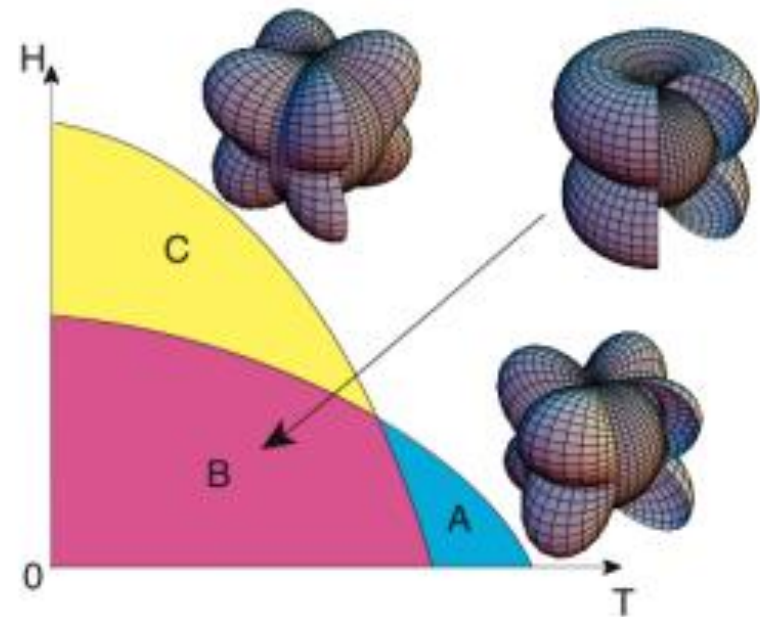
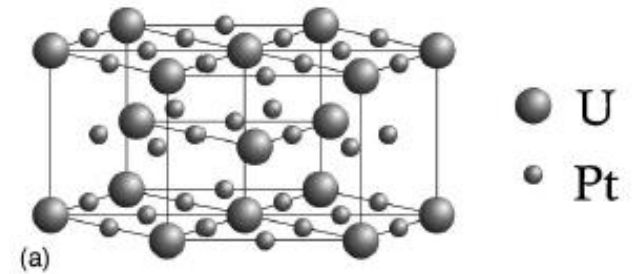
Superfluid ^3He



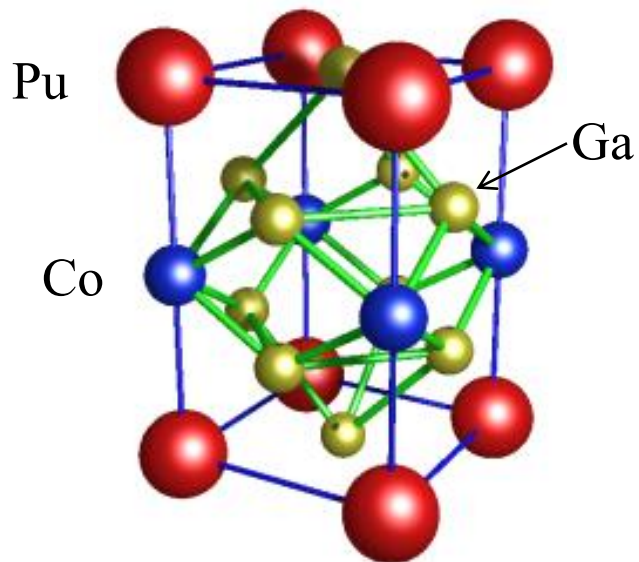
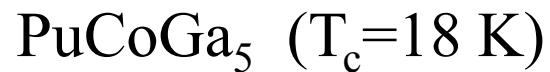
A- and A_1 - phases



Heavy fermion UPt_3



重い電子の高温超伝導



Periodic Table of the Elements

1 H	2 He																					18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Uun
--------	---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----------	---------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

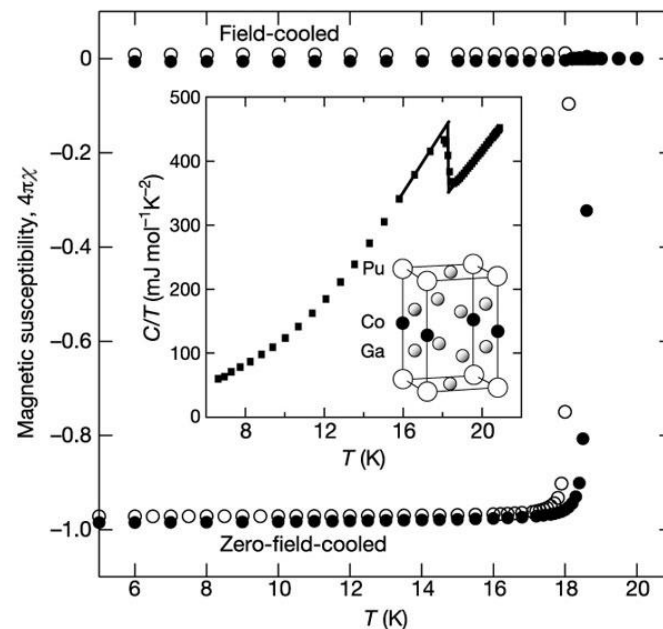
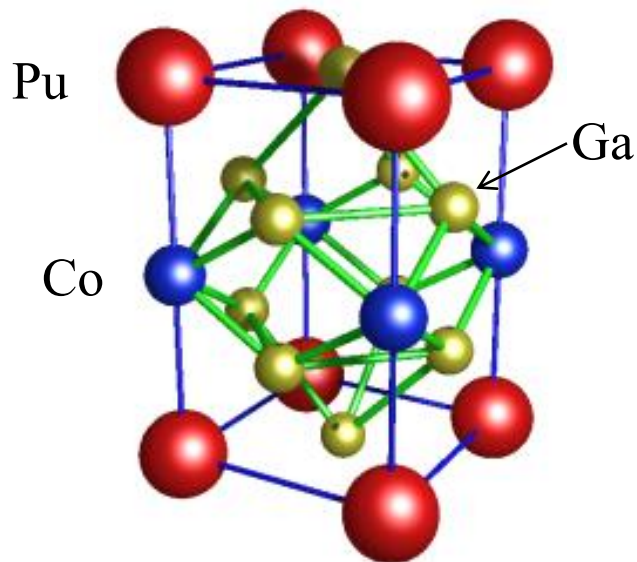
Legend:

- hydrogen (black)
- alkali metals (yellow)
- alkali earth metals (red)
- transition metals (purple)
- poor metals (green)
- nonmetals (blue)
- noble gases (pink)
- rare earth metals (teal)



重い電子の高温超伝導

PuCoGa_5 ($T_c=18$ K)



人類史上最も危険な超伝導体
絶対にさわってはいけない!!

重い電子の超伝導状態はなぜ面白いのか

多種多様なエキゾチック超伝導状態

超伝導凝縮エネルギー

磁性

結晶場

多重極相互作用

の励起エネルギーとしばしば同程度

強相関超伝導と他秩序の競合と共存

磁気、電荷、多重極揺らぎ等を媒介とした様々な電子対の形成機構

他秩序との共存

反強磁性

CeIn_3 , CeMIn_5 ($\text{M}=\text{Co}, \text{Rh}, \text{Ir}$), CePd_2Si_2 , $\text{UPd}_2\text{Al}_3 \cdots$

強磁性

UGe_2 , URhGe , UCoGe

隠れた秩序

URu_2Si_2

4重極秩序近傍

$\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

多重超伝導相 (H-T) UPt_3 , UBe_{13} , (p-T) CeCu_2Si_2 , CeIrIn_5

強いパウリ常磁性, FFLO CeCoIn_5 , NpPd_5Al_2

空間反転対称性の破れ CePt_3Si , CeIrSi_3 , CeRhSi_3 , UIr

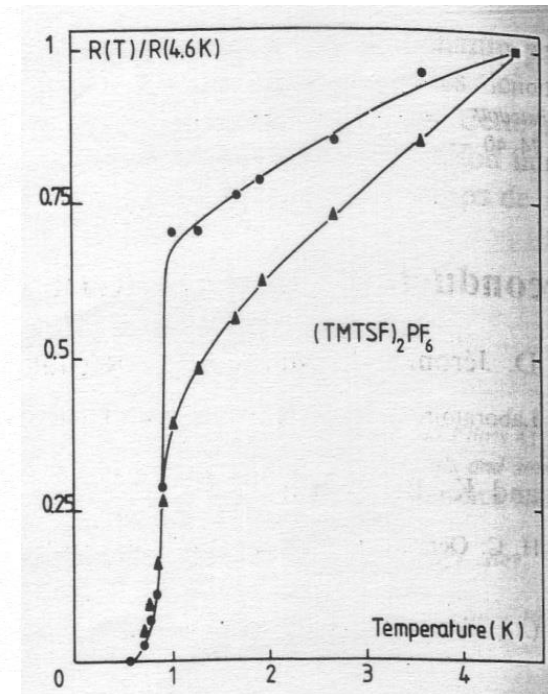
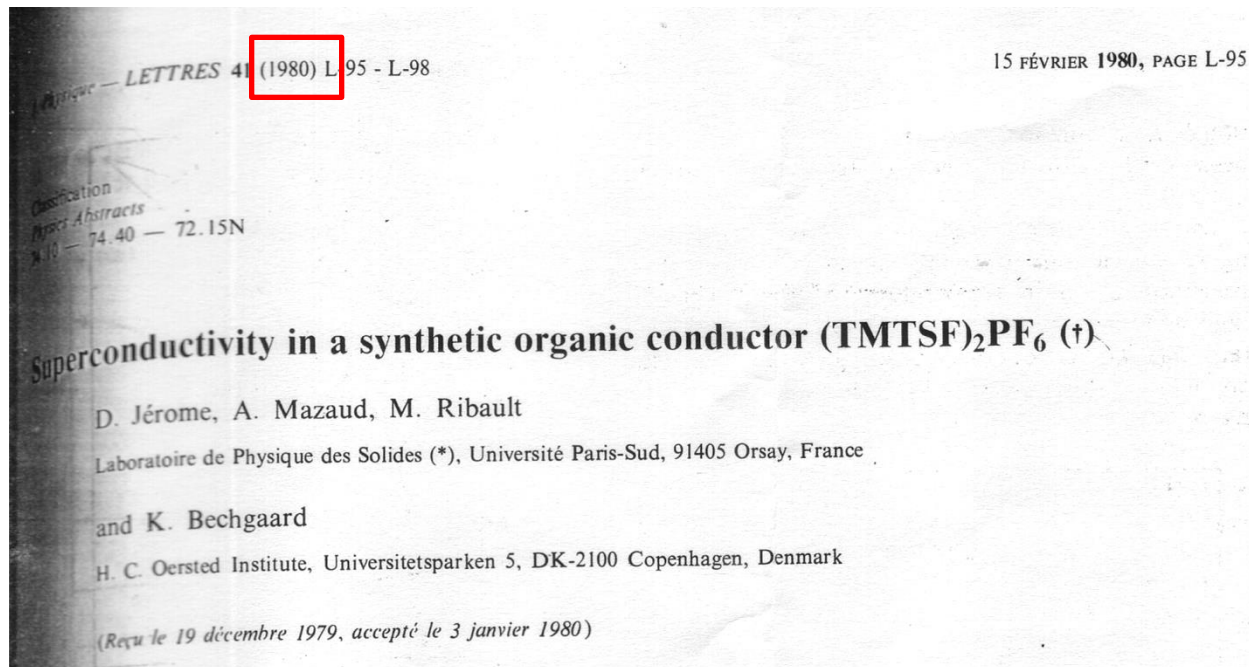
重い電子の高温超伝導 PuCoGa_5

有機物超伝導体

有機物の結晶 $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ が
超伝導になることを発見

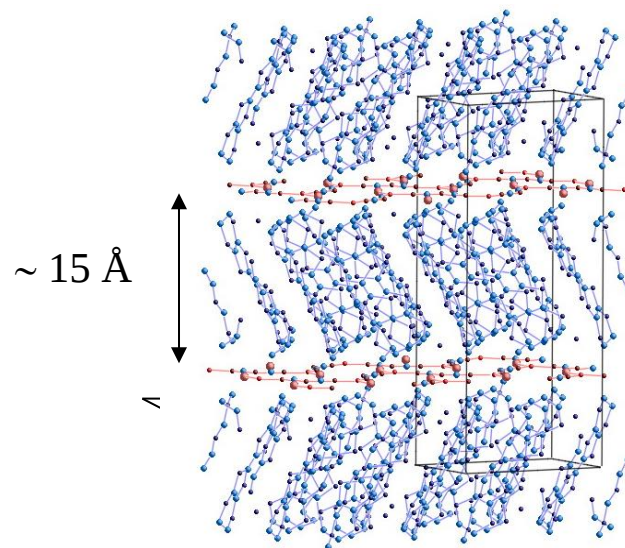
D. Jerome *et al.*, *Journal de Physique Letter* **41**, L95 (1980).

D. Jerome K. Bechgaard



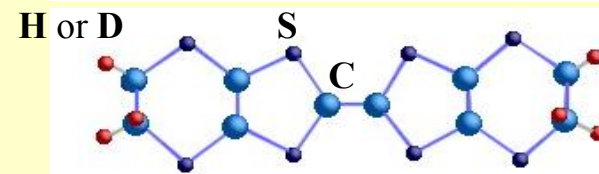
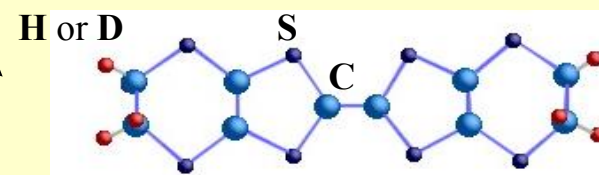
Organic superconductor

κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ ($T_c=10.4\text{K}$)

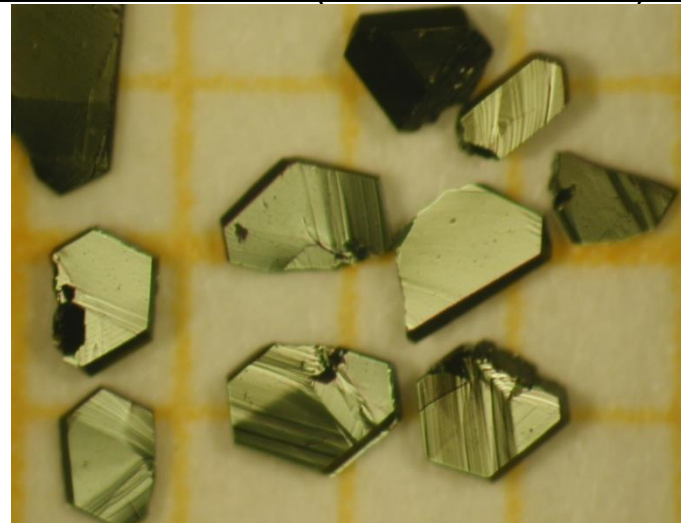
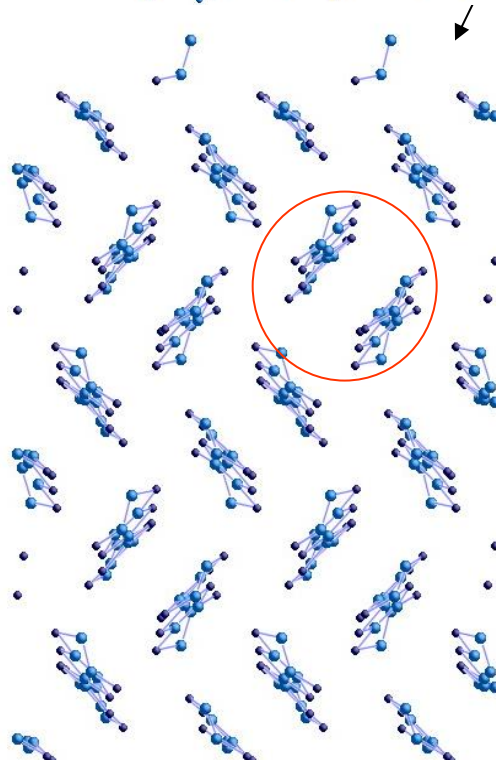


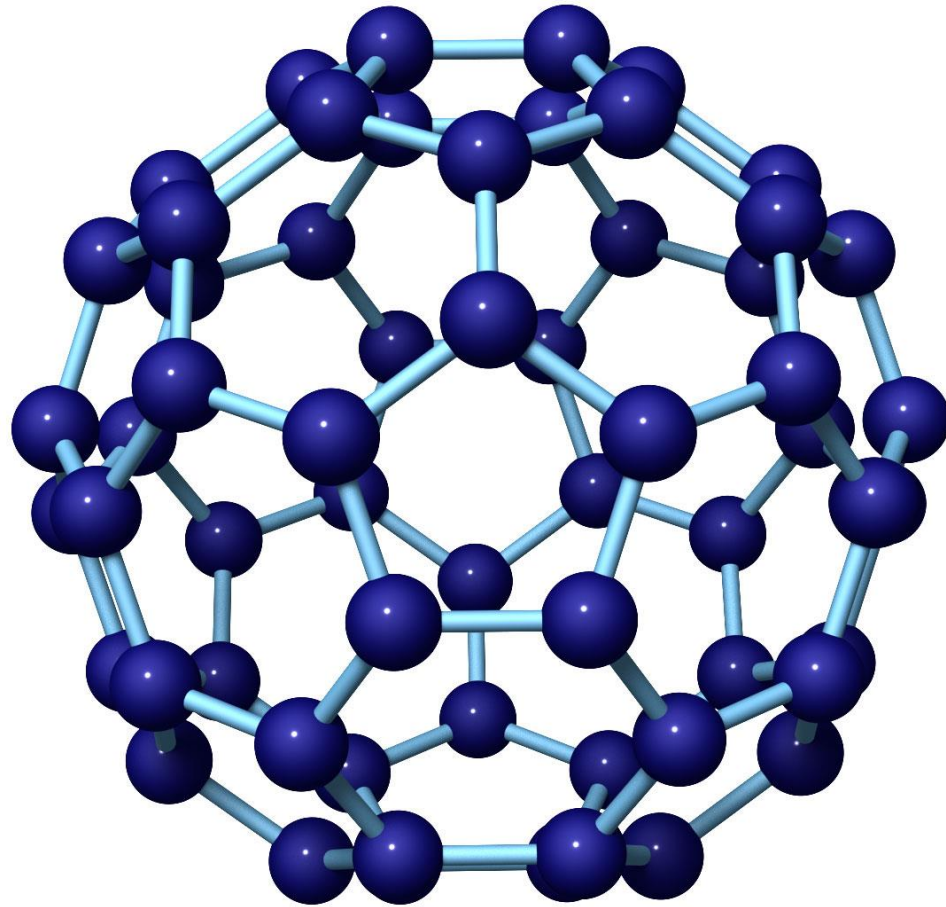
Cu[N(CN)₂]Br layer

BEDT-TTF layer



BEDT-TTF (donor molecule)





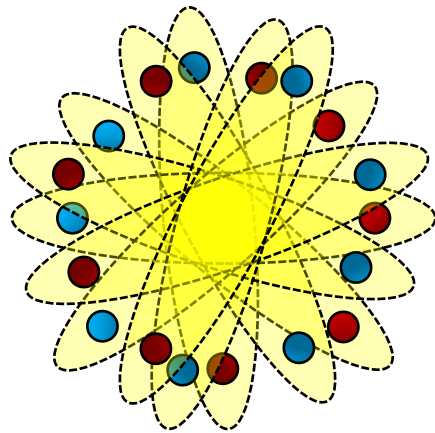
フラーレン C_{60}

サッカーボールの超伝導

エキゾチック超伝導状態

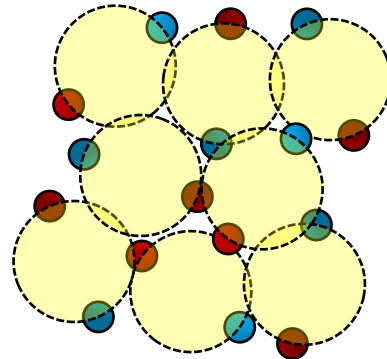
新奇超伝導状態

BCS-BEC クロスオーバー

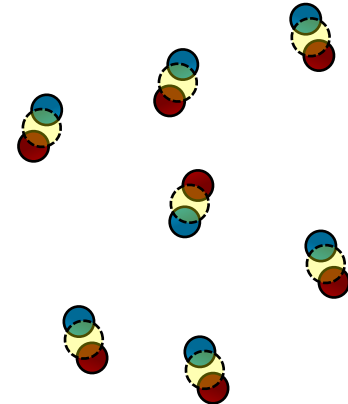


BCS

弱結合



ユニタリーフェルミガス



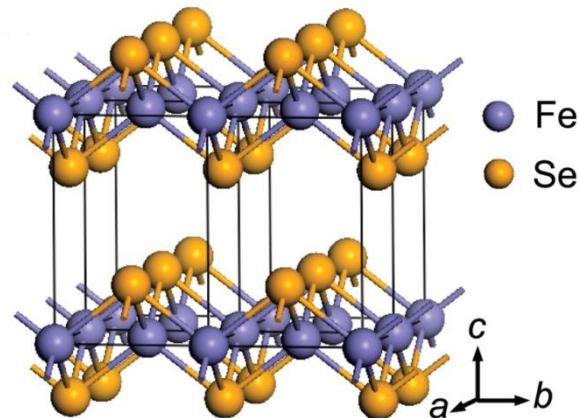
BEC

強結合



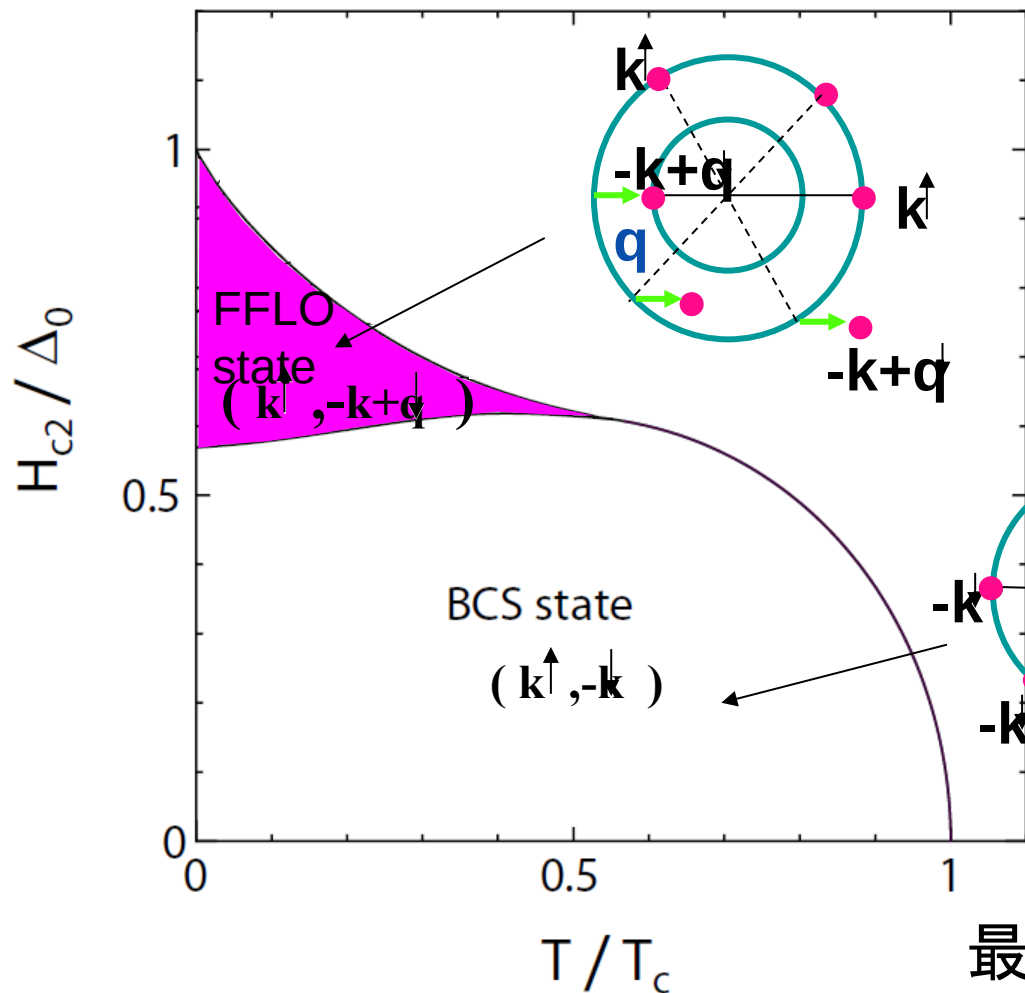
冷却原子

Feshbach 共鳴

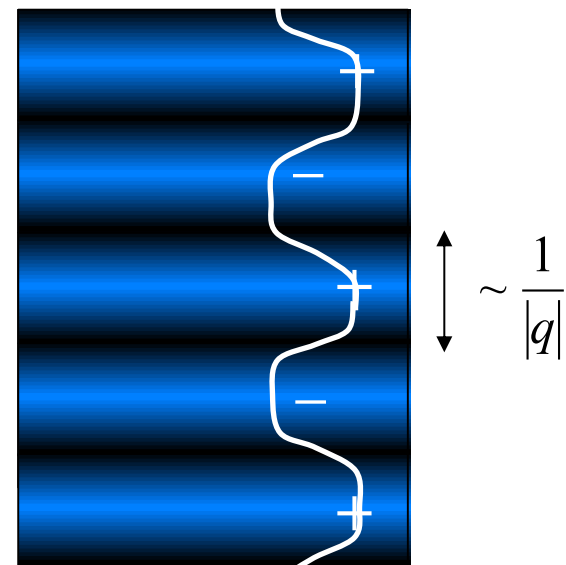


FeSeで実現

空間的に振動する超伝導状態 (FFLO状態)



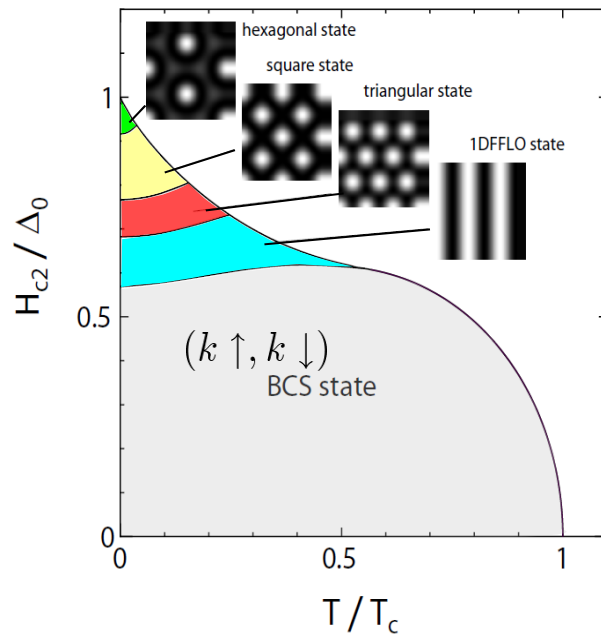
$$\Delta(\mathbf{r}) = \Delta_0 \cos(\mathbf{q} \cdot \mathbf{r})$$



最近重い電子系化合物で実現
アルカリ原子のBEC
中性子星内部もFFLO状態？

新奇超伝導状態

FFLO 状態



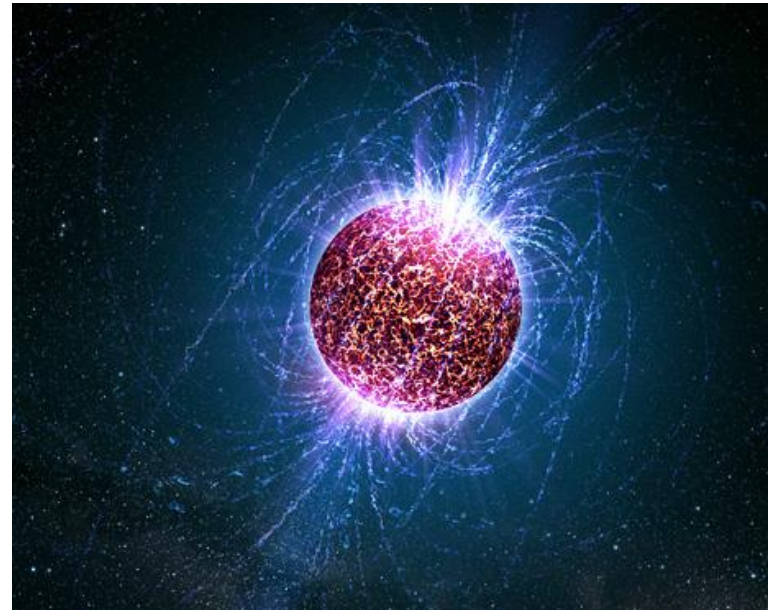
$$\Delta \sim \cos \vec{q} \cdot \vec{r}$$

中性子星

温度 1億度

密度 角砂糖一個の大きさと数億トン

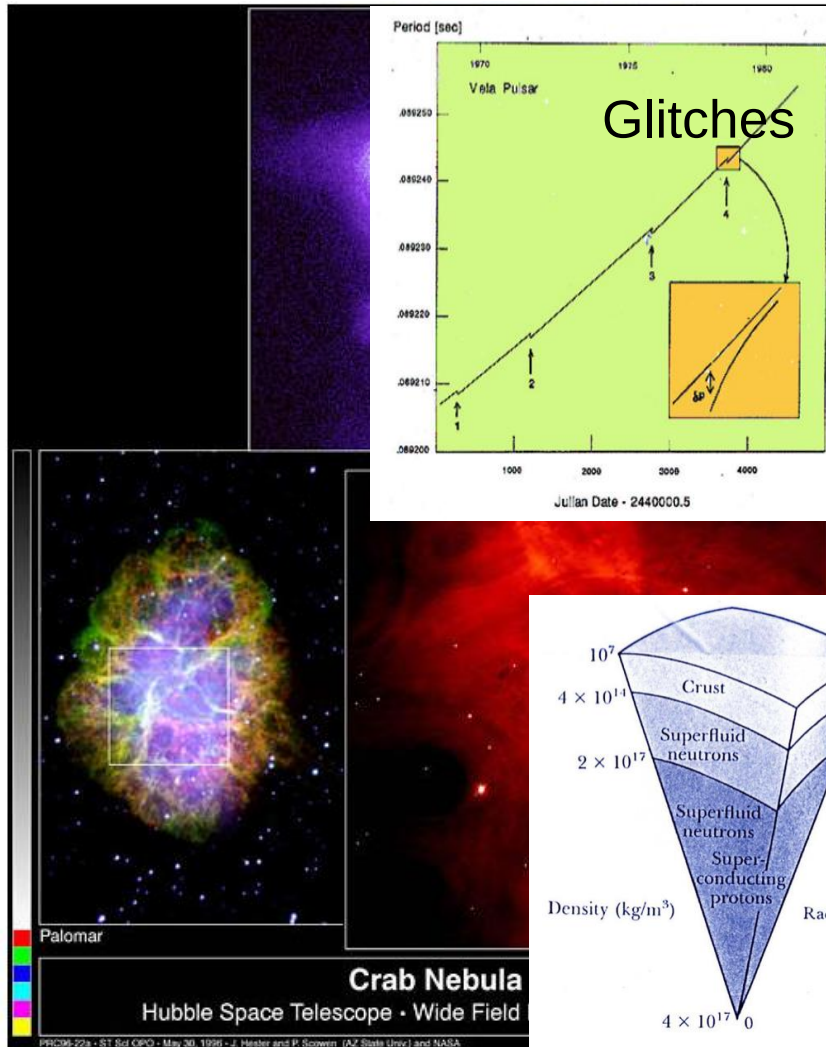
極低温状態にあると見なせる



FFLO State in Neutron Star

Color superconductivity

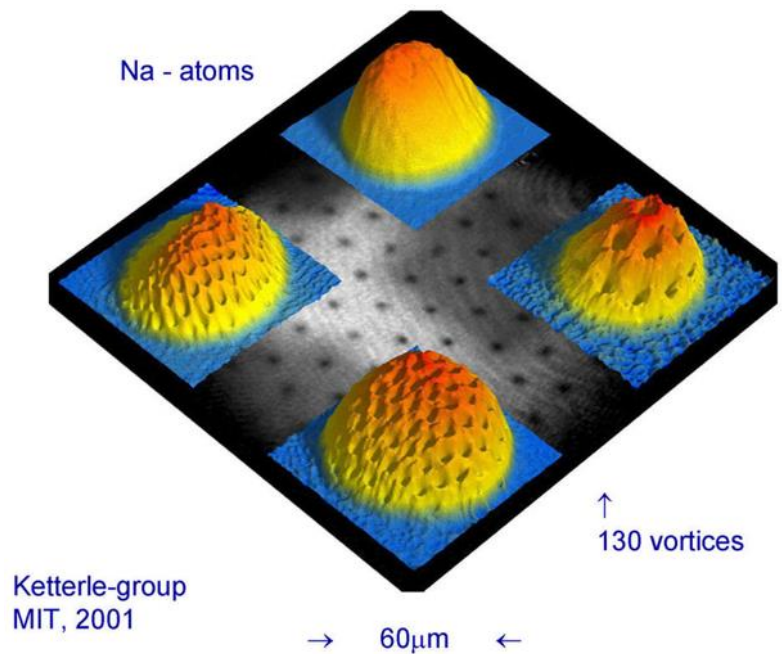
R.Casalbuoni and G.Nardulli
Rev. Mod. Phys. (2004)



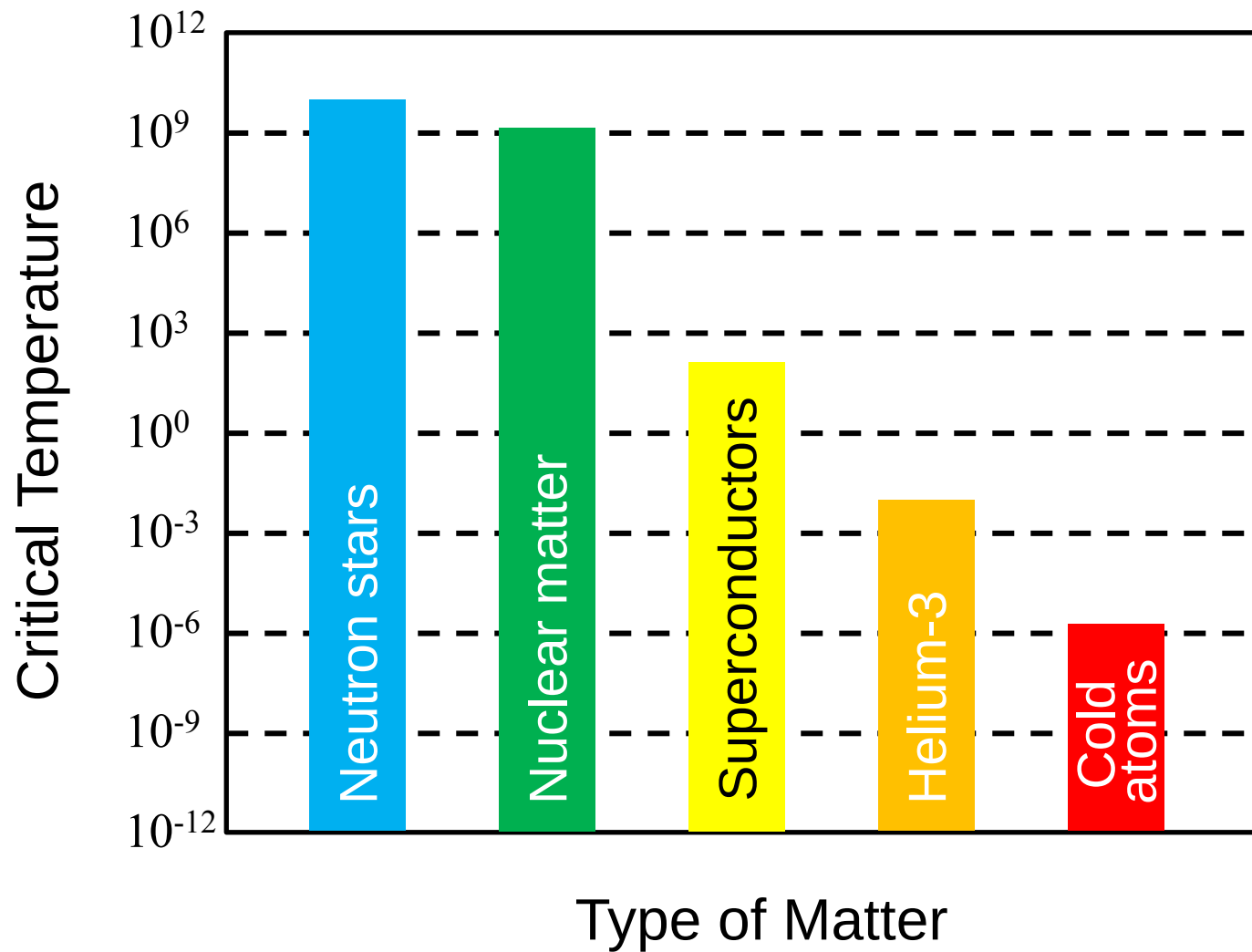
FFLO State in Rotating

Bose-Einstein-Condensate

(No observation so far)



フェルミオンの超流動

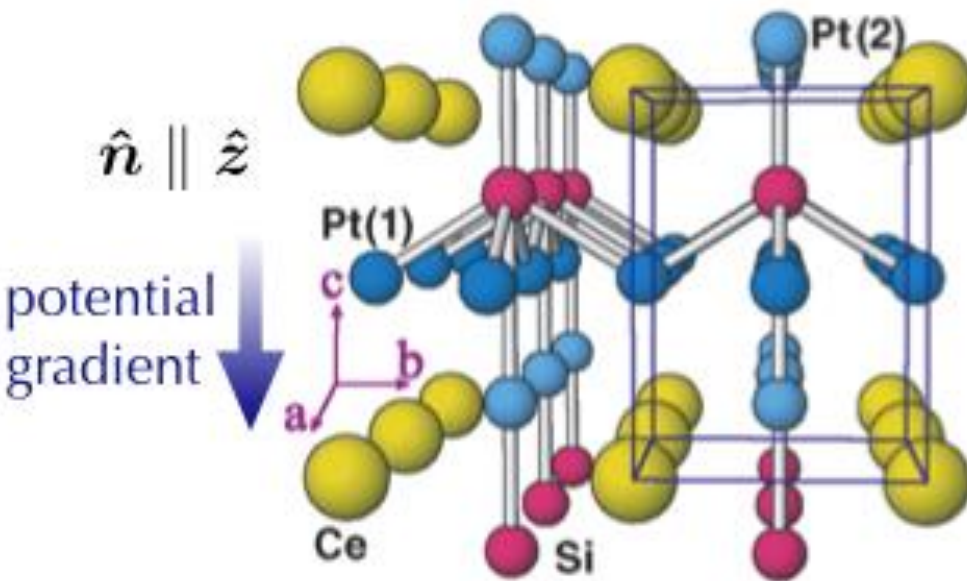


超伝導は最もバラエティにとび、最もよく研究されている

空間反転対称性のない超伝導

CePt₃Si

$$\hat{\Delta}(p) = \Delta_s(p)i\sigma_y + \Delta_t(p)(\vec{p} \times \vec{n}) \cdot \vec{\sigma}i\sigma_y$$

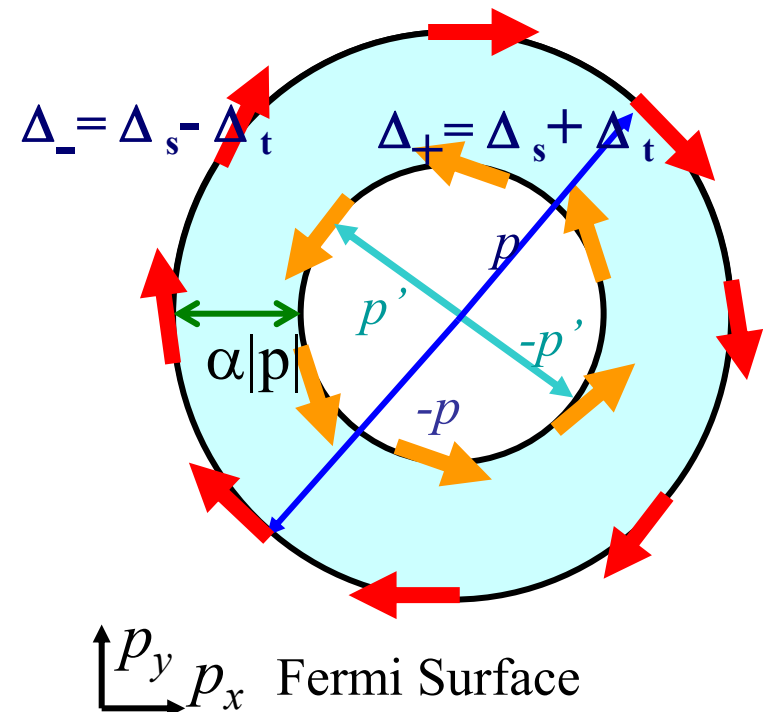


$$E_{p\sigma\sigma'} = \varepsilon_p + \alpha(\vec{p} \times \vec{n}) \cdot \vec{\sigma}_{\sigma\sigma'}$$

$$\vec{n} = (0, 0, 1)$$

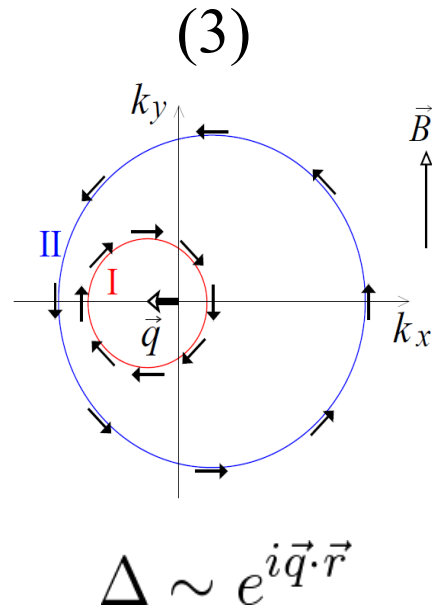
$$\varepsilon_{p\pm} = \varepsilon_p \pm \alpha|p|$$

$$\Delta \ll \alpha|p|$$

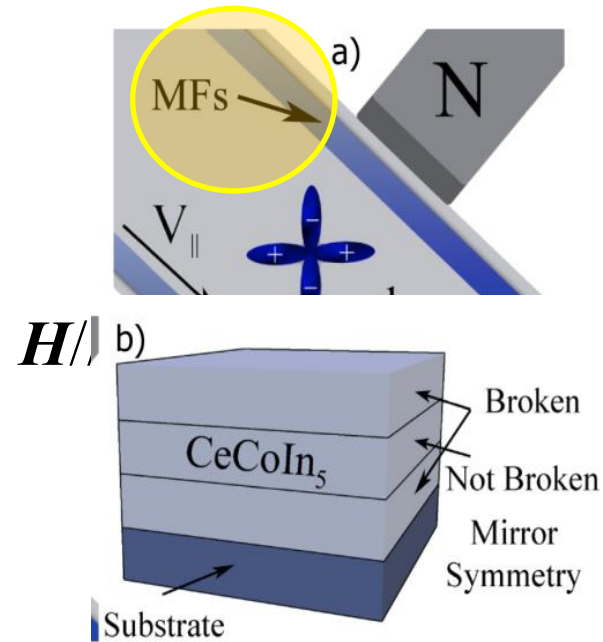


新奇超伝導状態

ヘリカル超伝導



マヨラナフェルミオンの検出 (2)(3)



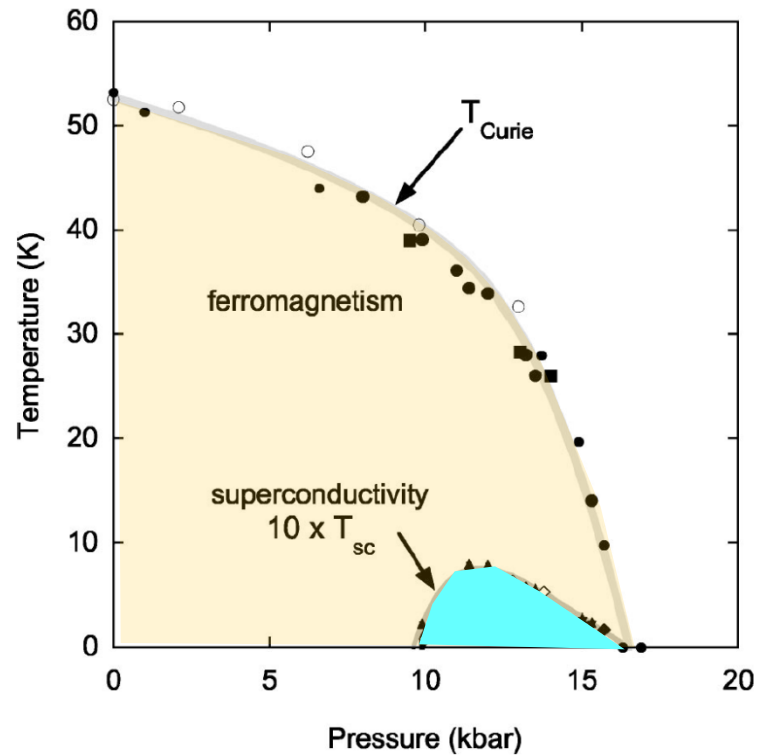
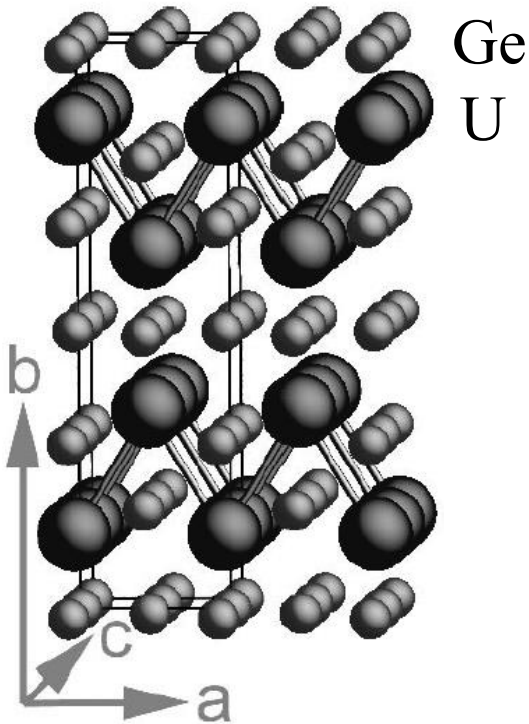
$$C\Psi = \Psi^*$$

強磁性超伝導

UGe₂, URhGe, UCoGe

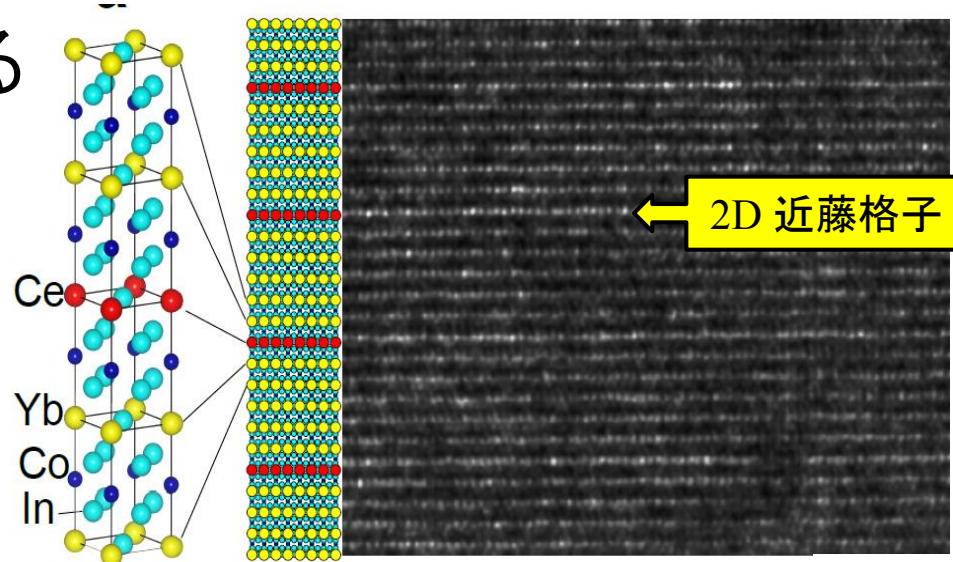
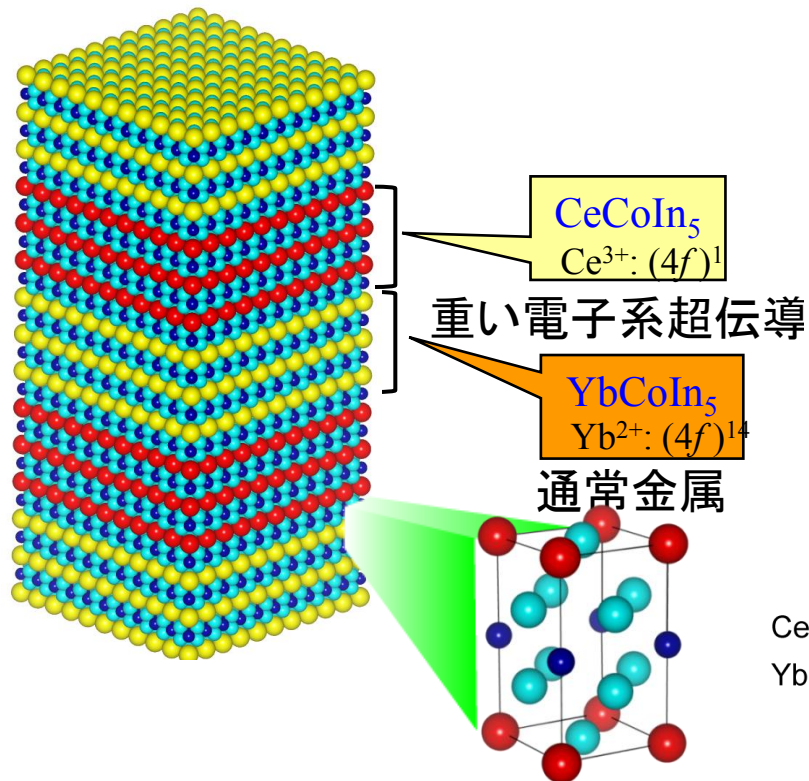
超伝導になる磁石

スピントリプレット



S.S. Saxena *et al.* Nature (2000)

重い電子を2次元に閉じこめる



ウェブ | 登録サイト | 画像 | 動画 | ブログ | 辞書 | 知恵袋 | 地図 | 商品

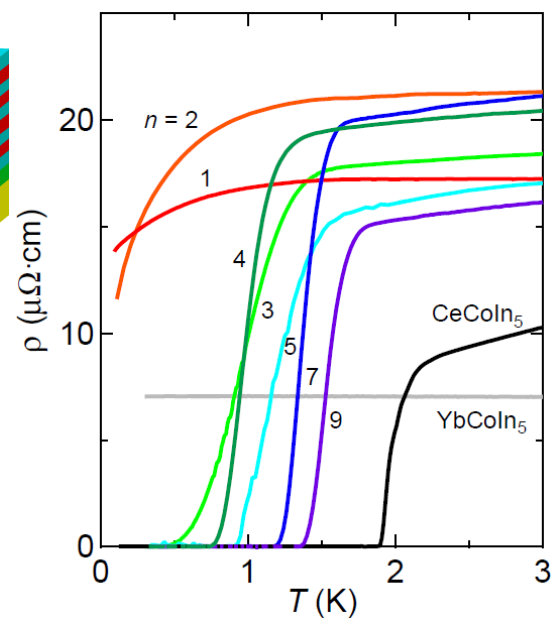
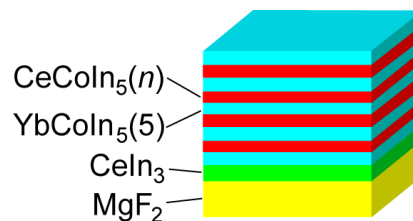
バンクーバーオリンピック特集 3000円から始められる、ヤフーの広告掲載

トピックス 経済 エンタメ スポーツ その他

14時38分更新

高橋が銅 日本男子初の快挙
あたご事故2年 悲しみ癒えず
GS証券社員ら 20億円申告漏れ
イランが核弾頭開発か IAEA
モノレール社長公募に270人
京大「世界一重い」電子作る
惨敗の岡崎朋美、次にも意欲

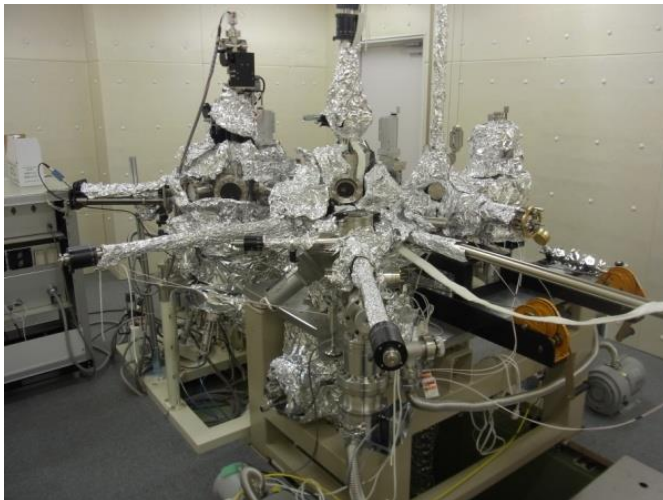
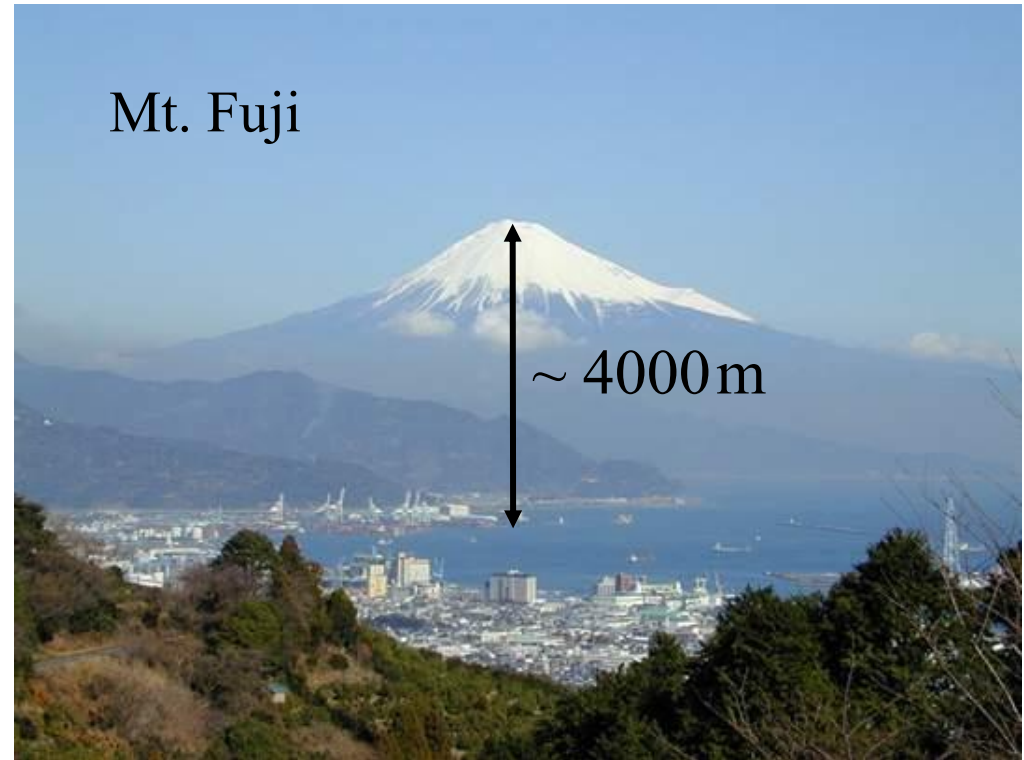
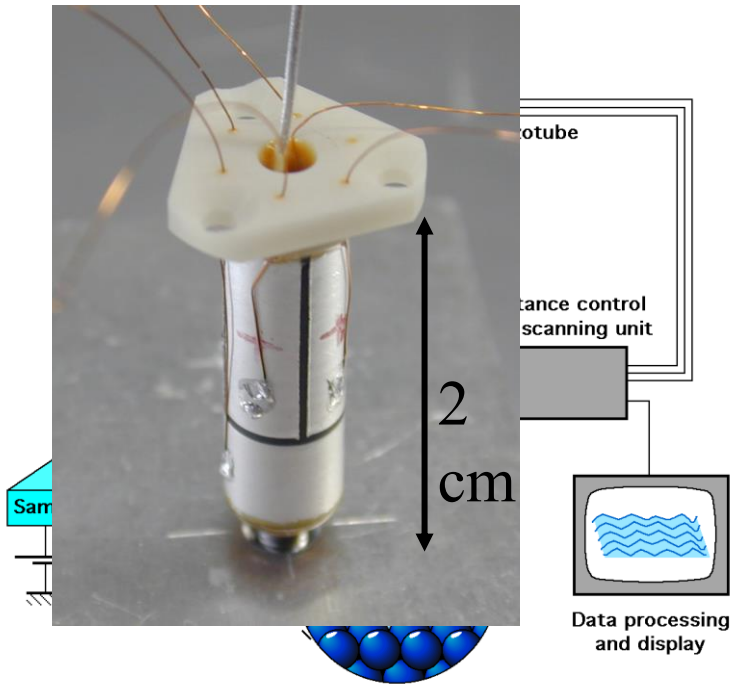
踊るトレーダー
2月19日12時44分配信
AFP=時事



H.Shishido *et al.* Science (2010)
Y. Mizukami *et al.* Nature Phys. (2011)

超伝導電子の可視化

最先端技術で超伝導を可視化する



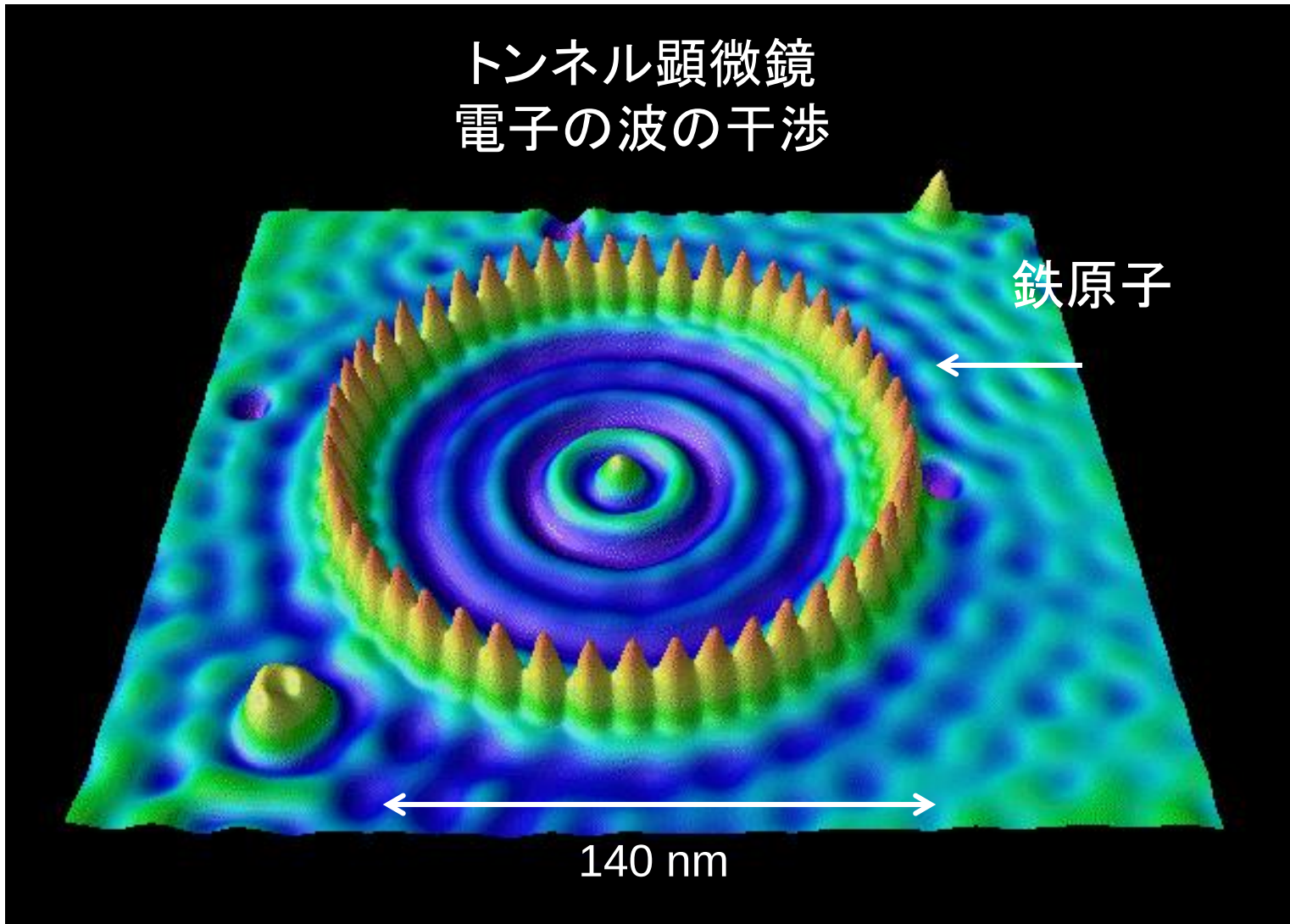
$$\begin{aligned} & 0.5 \text{ nm} / 2 \text{ cm} \\ &= 0.1 \text{ nm} / 4000 \text{ m} \end{aligned}$$

最先端技術を用いた超伝導状態の研究

トンネル顕微鏡
電子の波の干渉

鉄原子

140 nm

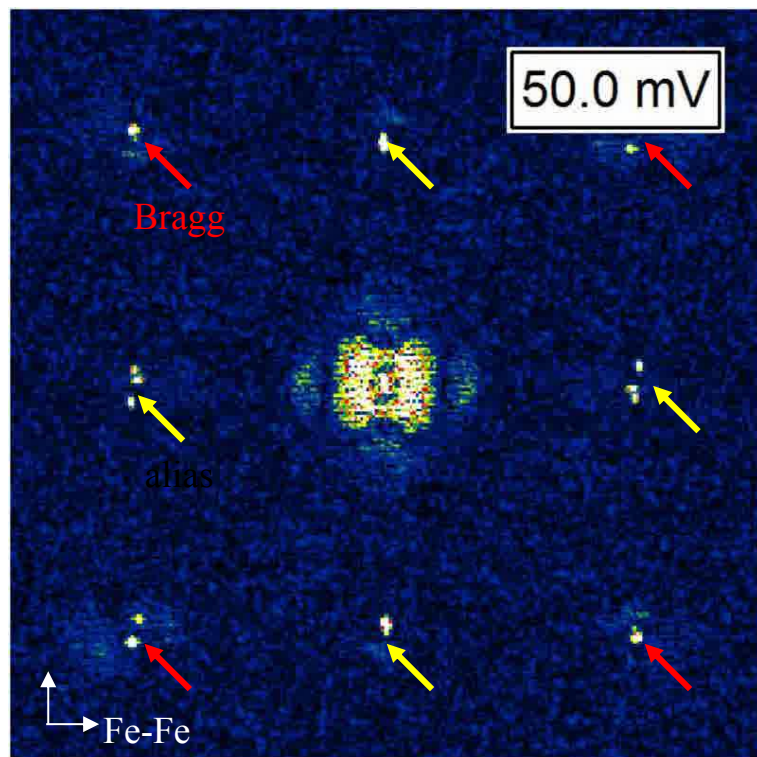


最先端技術を用いた超伝導状態の研究

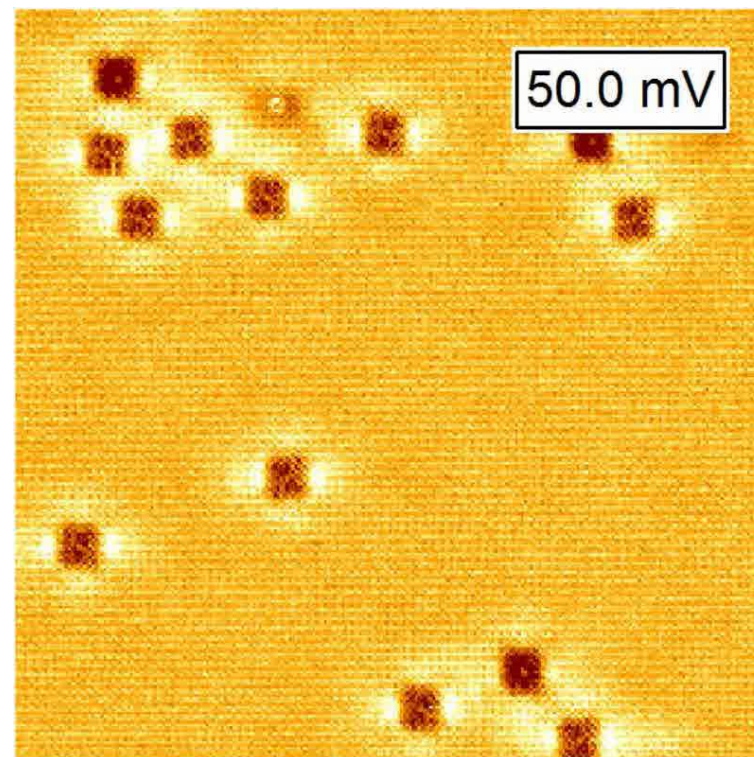
超伝導準粒子干渉効果 (Fe系高温超伝導体)

Topograph

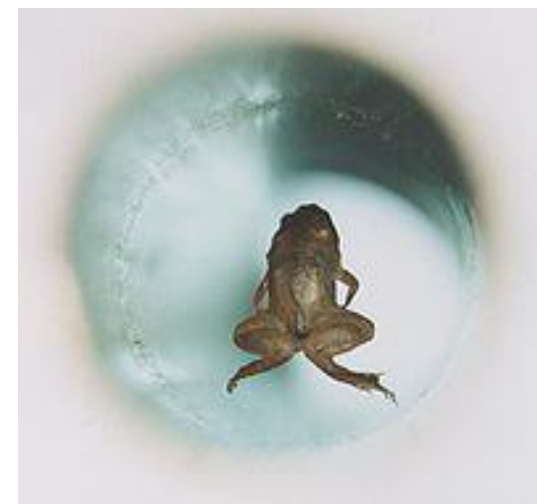
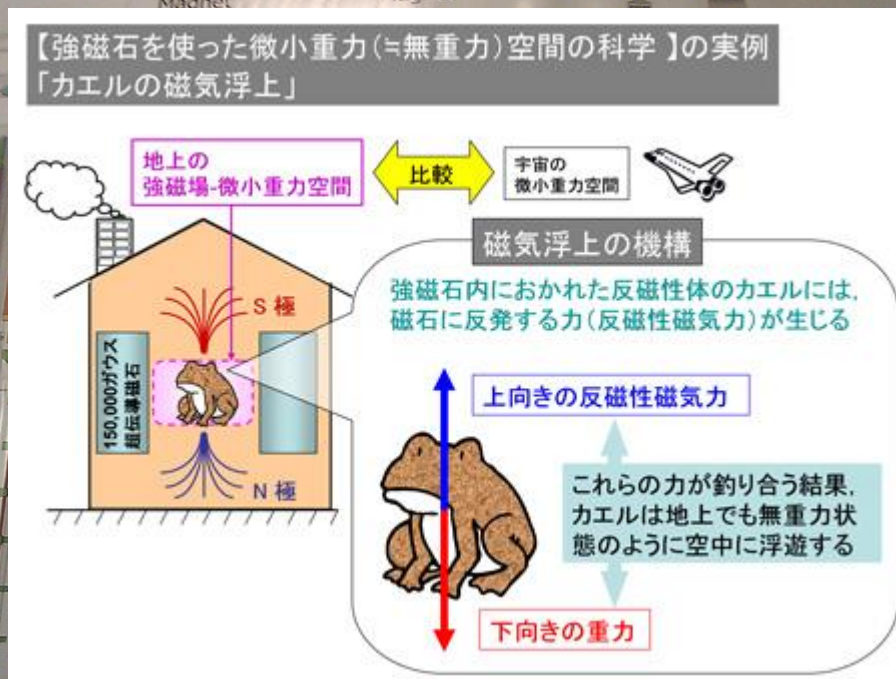
FT- $dI/dV/(I/V)$



$dI/dV/(I/V)$



世界最強の磁場(45T) (フロリダUSA)



カエルの磁気浮上
2000年イグノーベル賞

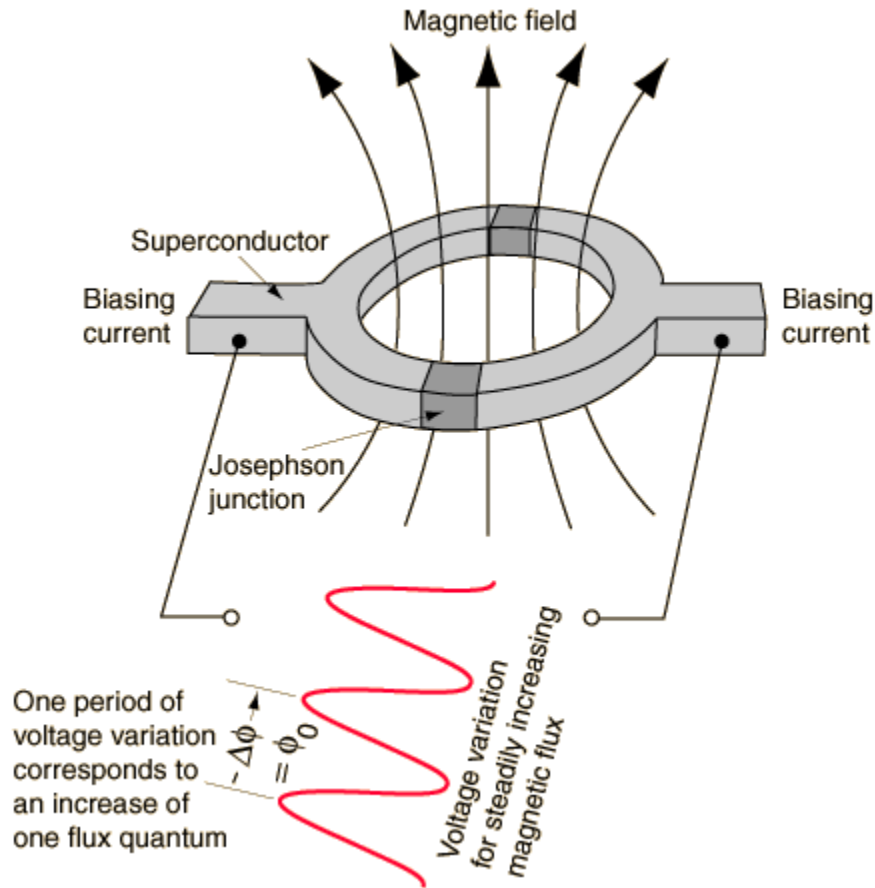
MRI



ジョセフソン効果の応用

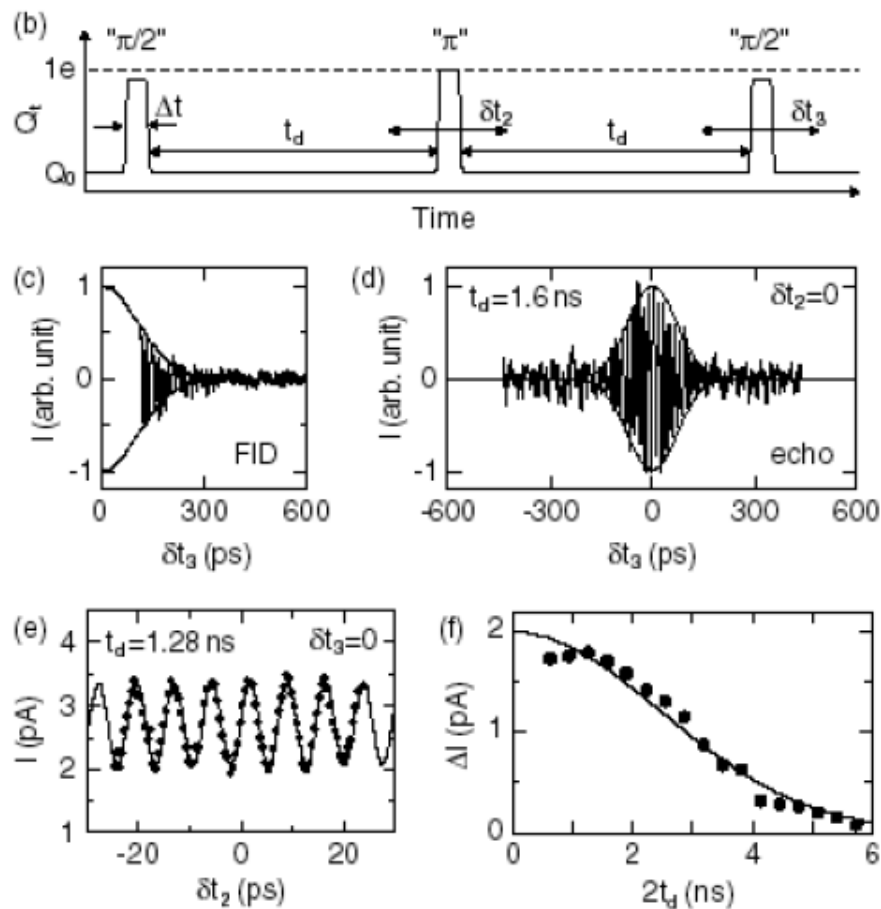
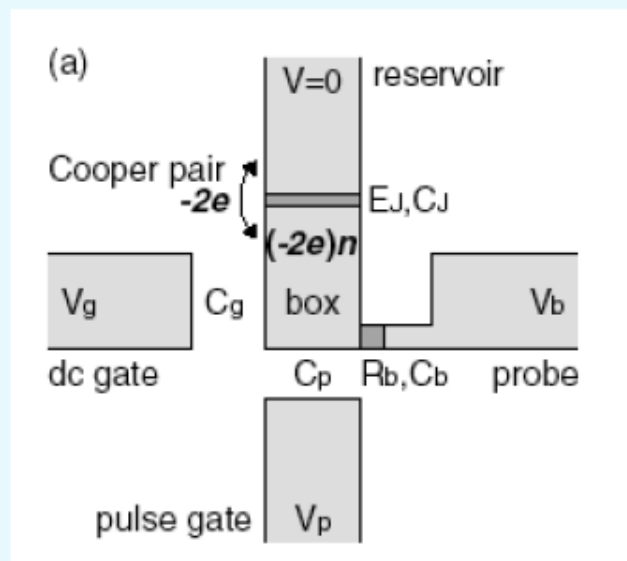
超伝導量子干渉計

SQUID(Superconducting QUantum Interference Device)



超高感度磁束検出装置

クーパー対箱を用いた量子ビット



Qビット ➡

量子コンピューター

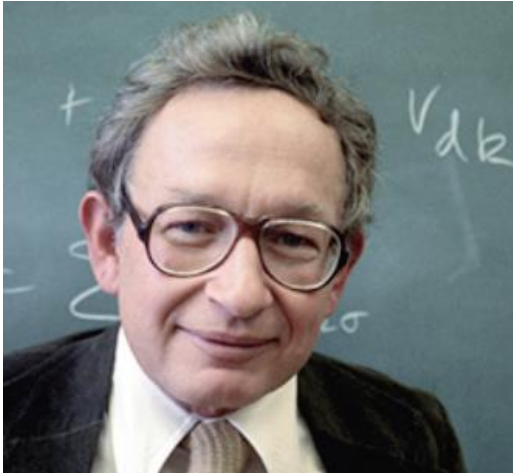
高速フーリエ変換 10万年

量子フーリエ変換

1マイクロ秒！！



The fundamental laws necessary for the mathematical treatment of a large part of physics and the whole of chemistry are thus completely known, and the difficulty lies only in the fact that application of these laws leads to equations that are too complex to be solved. Paul A. M. Dirac 1929



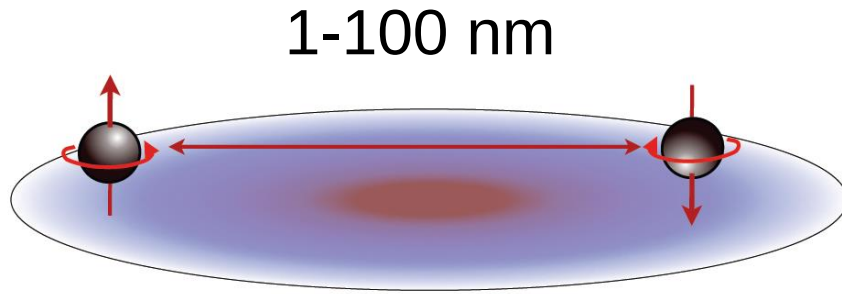
自然の階層構造

``The behavior of large and complex aggregations of elementary particles, it turns out, is not to be understood in terms of a simple extrapolation of the properties of a few particles. Instead, at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other.'

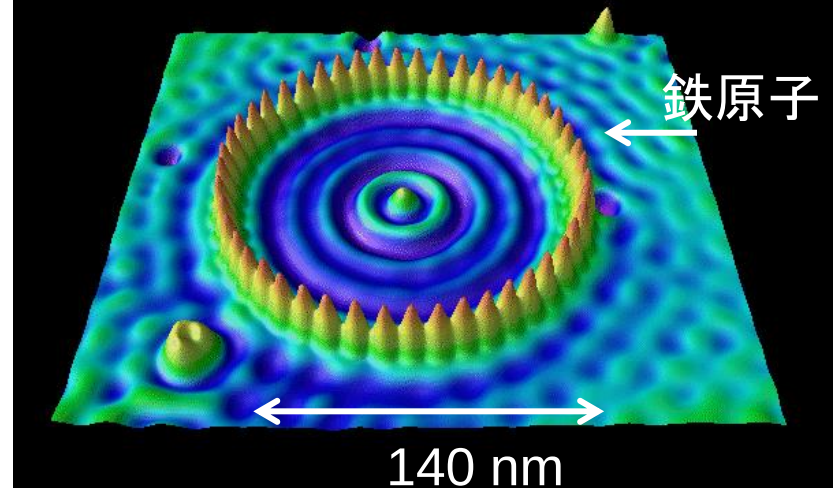
P.W.Anderson ``More is Different" .

Science 4 August 1972:

超伝導電子対

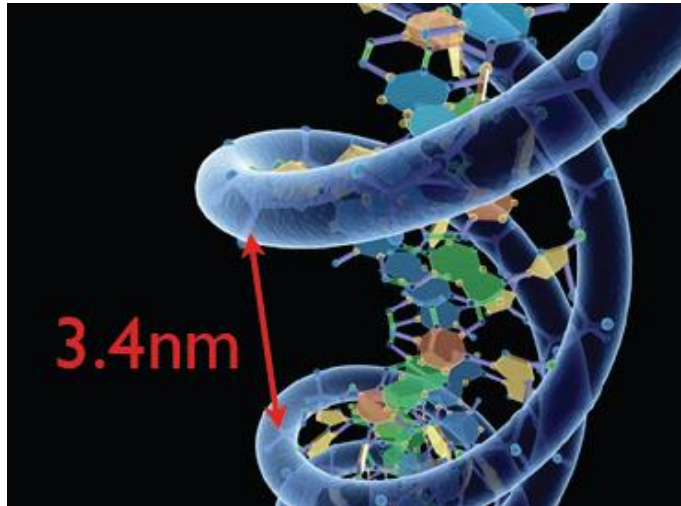


電子の波

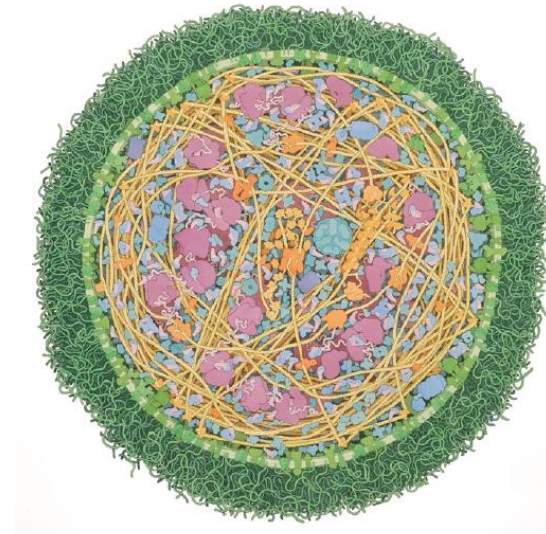


100 nmのスケールまでの物理はかなり理解できている

DNA



バクテリア



250nm

しかし同じスケールの生命現象はほとんど理解されていない

原子や電子のマクロな数の集団(10^{23} 個)

電子ガス
液体ヘリウム

宇宙に存在する系で最も
純粹、単純、等方的、均一な粒子

これらを極低温に冷却すると何が起こるか

超伝導、超流動、ボーズ・アインシュタイン凝縮

物理学におけるもっとも劇的な現象
我々の想像を超えた不思議な状態

全く個性のない粒子の集団が劇的な個性の集団に変化する

一個一個の電子や原子の性質やお互いの相互作用が「完全に」
わかっててもその集団の示す状態は予想できない

自然は階層構造を持っている
More is different

超伝導は最先端科学技術にも直結している

現代科学文明を支えているものは何か

20世紀の産業革命はトランジスタにより起こった



半導体中の電子の運動を予測する

電磁気学
量子力学
統計力学

バンド理論

もう限界に来ている

21世紀

超伝導(ボーズアインシュタイン凝縮)の時代

19世紀 酸素の液化に成功して以来、各国で気体を液化する競争がはじまり、19世紀末には水素の液化に成功した。

20世紀 ヘリウムも、ついに液化された。その後の実験で、絶対零度付近で全く信じられない奇妙な現象が次々と報告された。金属の電気は永久に流れ続け、鉛の玉が空中に浮き、ヘリウムの液体は容器の壁をはい上がってきたのである。

そして21世紀

我々は超伝導(ボーズ・アインシュタイン凝縮)を利用した革命的な量子デバイスの時代を迎えるかもしれない

21世紀の科学技術としての超伝導

超伝導は最先端科学技術にも直結している

20世紀科学文明の基礎



半導体中の電子の運動を予測する

電磁気学
量子力学
統計力学

バンド理論

21世紀はボース・アインシュタイン凝縮(超伝導)を用いた新しい
画期的なデバイスができるかもしれない