

量子、素粒子、場

—量子力学入門—

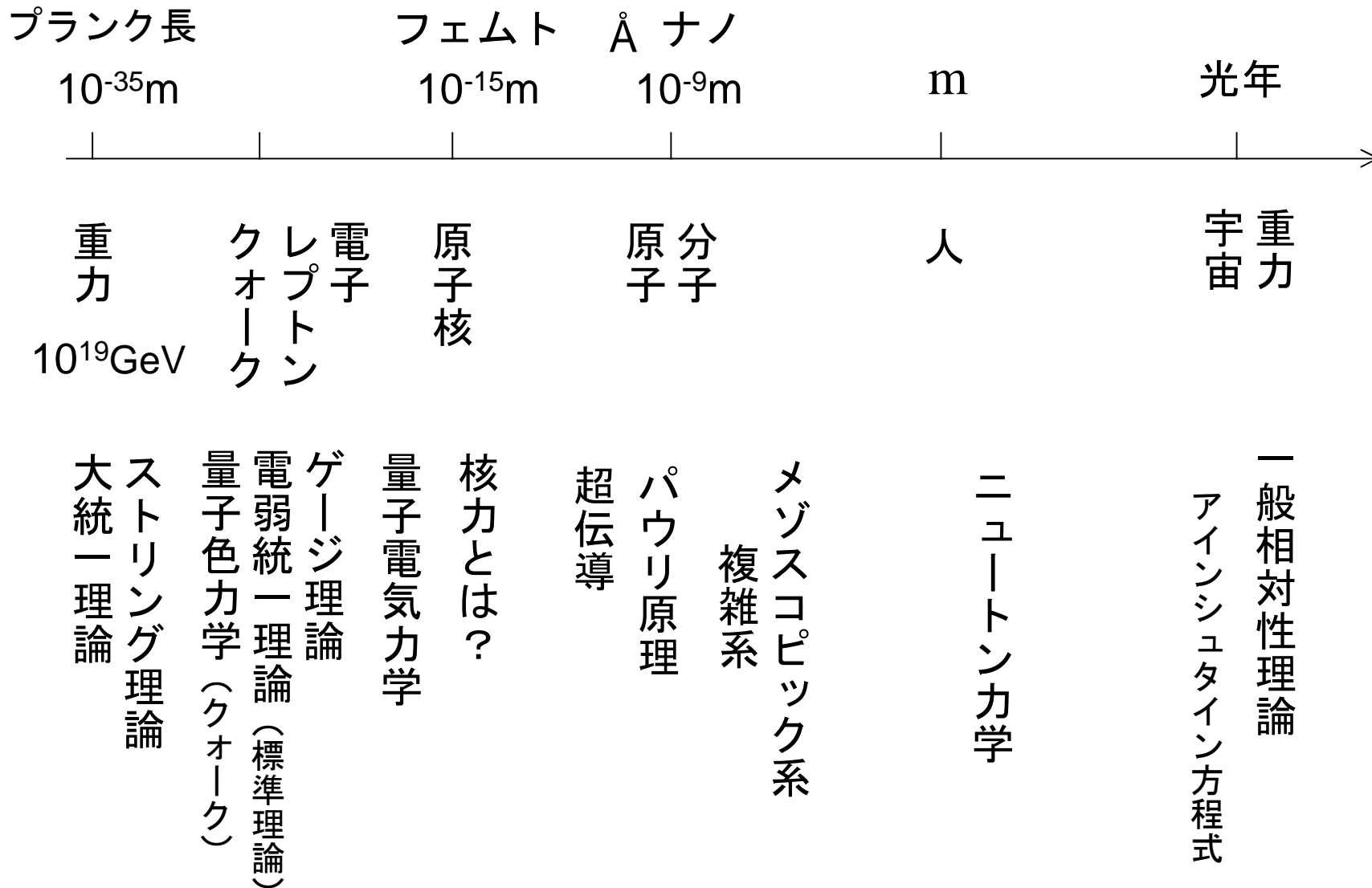
産業技術総合研究所
柳沢 孝

自然現象の法則性

自然界のいろいろな現象はかってに起こっているようであるが、ある法則に従っている。複雑に見える現象もいくつかの本質的な法則によって説明することができる。

この自然法則を見つけ出すことが、物理学という学問の一つの目的である。

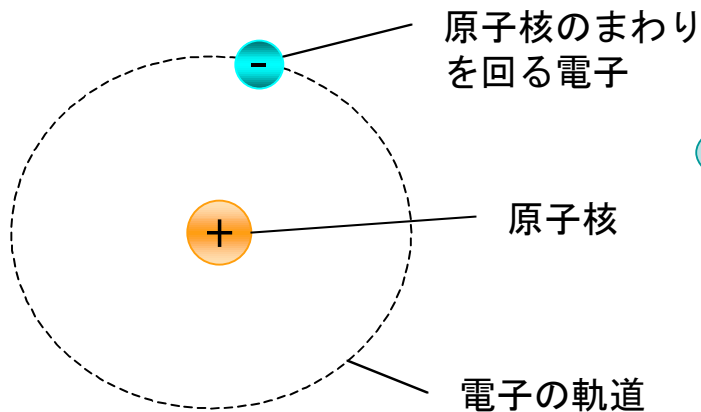
自然界の階層構造



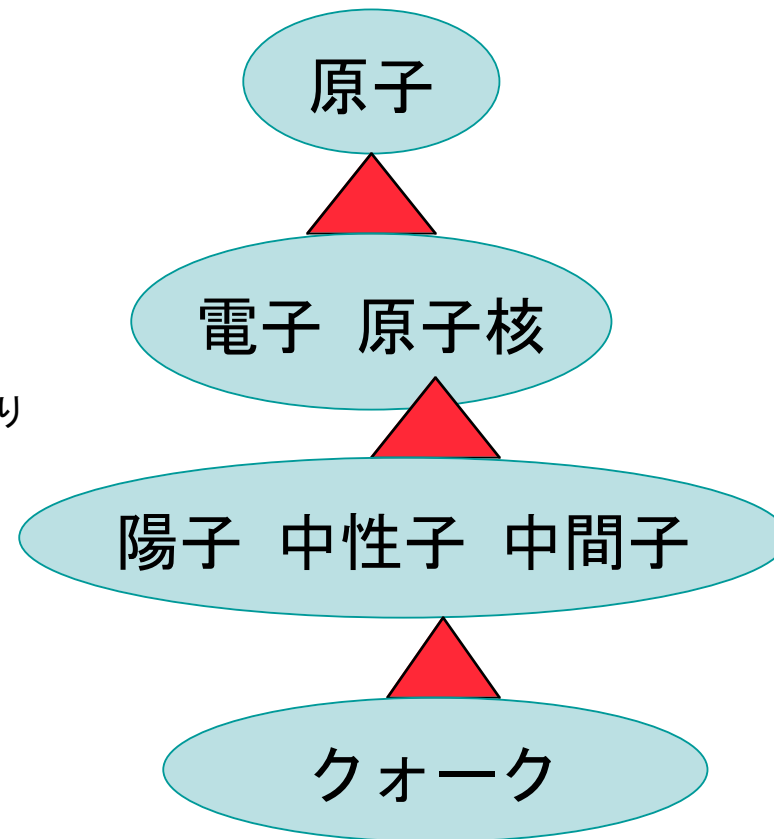
極微の世界

微視的世界には微視的
世界特有の物理法則が
ある

その法則が **量子力学**



物質の構成要素



量子の発見

20世紀の物理学における最大の発見

原子や電子のような小さな世界は、日常経験する法則とは異なる法則によって支配されている。
その自然法則が**量子力学**である。

すべての物体はそれ以上分けられない原子から成り立っているように、エネルギーもいくらでも小さく分けられるような連続量ではなく、エネルギーの単位というべき**エネルギー量子**がある。

粒子・波動の二重性

量子力学的粒子は波としての性質も示す

光の二重性 干渉・回折・屈折 → 光は波である (ホイヘンス)

光電効果 光を金属にあてると電子が飛び出す

電子のエネルギーは光の強さでなく振動数による

電子の個数は光の強さによる

→ 光量子仮説 (アインシュタイン)

光は粒子である

振動数 ν の光はエネルギー $h\nu$ をもった粒子である

粒子も波動性をもつ ド・ブロイ 電子も回折・干渉効果を示す

干渉 二つの波を重ね合わせると、山の部分が重なると波は強くなるが、山と谷が重ね合わさると打ち消しあう。

シュレーディンガー方程式

波動関数 $\Psi(x,y,z,t)$ 空間座標 x,y,z 時間 t の関数

量子力学的粒子は波動関数 Ψ により表わされる

Ψ の方程式： **シュレーディンガー方程式**

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi + V\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

\hbar : プランク定数

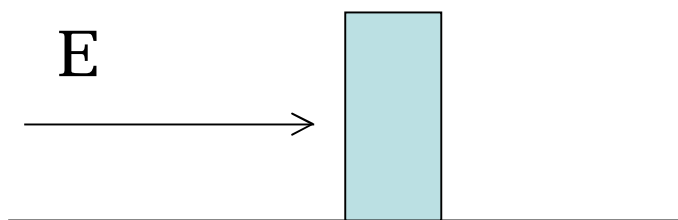
m : 質量

V : ポテンシャル項 (位置エネルギー)

波動的描像に立脚している :

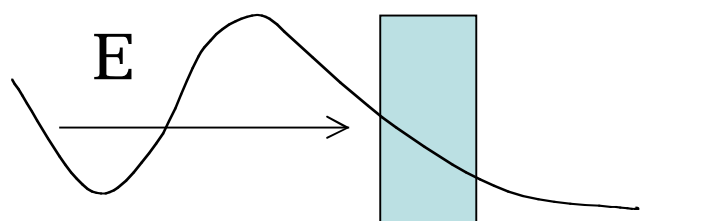
『量子力学的粒子は波である』と考えている

トンネル効果



古典的粒子（ニュートン力学）

エネルギーが小さければ
障壁をこえることができない。



量子力学的粒子

障壁を越えることができる
波動関数が壁の外までしみ出る

トンネル効果

← 波動

超伝導: ジョセフソン効果

半導体: エサキダイオード

量子力学的粒子と波動関数—”場”

(むずかしい概念なのでとばしてもいいです)

波動から粒子へ

波動関数のような空間座標の関数を**場**の量という。

波動関数 Ψ は波の性質を表わしている。

波動関数 Ψ を**量子化**すると粒子像が現われる。

粒子像と
波動像の統一

量子化

=

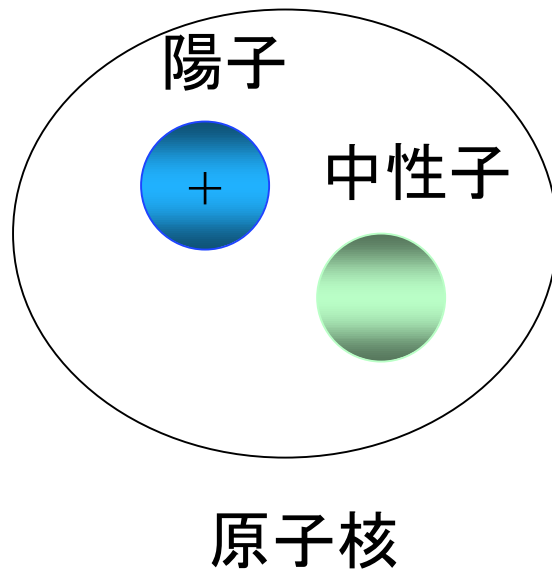
量子力学では物理量を**ある規則**に従った
演算子で表わす。

量子力学的粒子とは量子化された場である

量子力学的粒子 フェルミ粒子
 ボーズ粒子

粒子から場へ

—湯川秀樹が考えたこと—



陽子と中性子間に働く力

力を媒介する粒子（中間子）
すなわち、新しい場（波動
関数）を考えた。

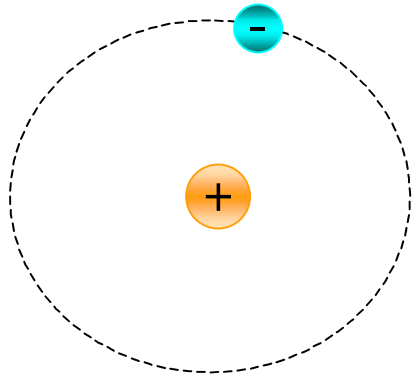
中間子を予言

陽子、中性子、中間子の三つの場
の相互作用により引力が生じる

湯川型相互作用

エネルギー準位の量子化

ボーアの原子模型



(1) 原子はとびとびの値のエネルギーをもった状態のみで存在する。
エネルギー準位は整数 ($n=0, 1, \dots$) により特徴づけられる。

エネルギー準位の量子化

(2) 原子の状態が異なる状態にジャンプする時、光を吸収 (または放出) する。

$$h\nu = E_1 - E_2$$

E_1, E_2 は二つの状態のエネルギー準位

原子はなぜ安定に存在するか?

電気的力で原子核と引き合う電子はなぜ原子核に落ち込まないか

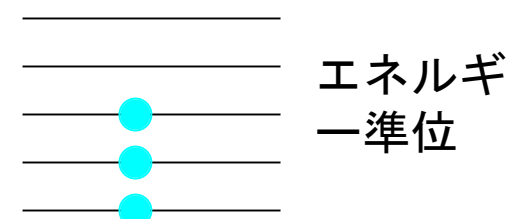
フェルミ粒子とボーズ粒子

量子力学には二種類の粒子が存在する。

フェルミ粒子（フェルミオン）

電子、陽子、中性子

${}^3\text{He}$

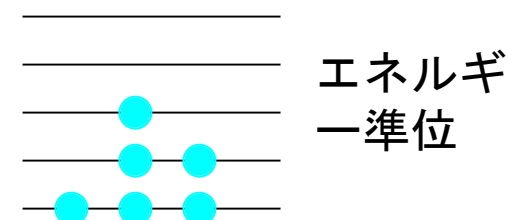


各準位を占めること
のできる電子は一つ

ボーズ粒子（ボソン）

光（光子）

一つの準位にいくつ
もの粒子が入ること
ができる



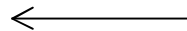
電磁気学から量子電気力学へ

一朝永振一郎が考えたこと

ファインマン、シュウインガーらと共に、
独立に量子力学的な電磁気学を完成させた。

特殊相対論的、量子力学的電気力学

超多時間理論
くりこみ理論



発散の問題

当時の物理学会
の大問題

発散量を観測値
にくりこむ

ラムシフトの計算
水素原子のエネルギー
準位の微細補正

自然界を構成する四つの力

重力 相互作用の強さ 10^{-38} 力の到達距離 ∞
一番なじみ深い力。万有引力。質量のある粒子間に働く。

電磁相互作用 10^{-2} ∞
磁石、電流に働く力。クーロン力。光と電子の相互作用。

強い相互作用 1 10^{-15}m
ハドロン（陽子、中性子）、クォーク間に働く力。

弱い相互作用 10^{-5} 10^{-17}m
レプトン（電子、ニュートリノ）、ハドロンに働く力。

力の統一理論

四つの力の統一

ゲージ理論

量子電気力学 (QED) 一番簡単なゲージ理論

電弱統一理論 (標準モデル) ワインバーグ・サラム
非可換ゲージ理論

大統一理論 (強い相互作用を含めた理論)

重力を含めた統一理論は難しい

超弦理論 (スーパーstring)

素粒子はひも (弦) である と考える

ひもにはいろいろの振動モードがあり、それらが
素粒子に対応していると考えられる。

重力を含めた理論の候補として研究されている。

どうして自然界が構成されたか

—対称性の破れから始まった—

物理法則は空間内の変換で不変：対称性をもっている
並進（平行移動）、回転で不変

しかし、

宇宙、自然界は並進、回転で不変ではない。

（物質の密度は一様ではない。）

固体はそのような対称性をもっていない。

物理法則はある対称性をもっているが、現実の
状態はその対称性をもっていない。

（自発的）対称性の破れ

宇宙は対称性の破れにより生じた。

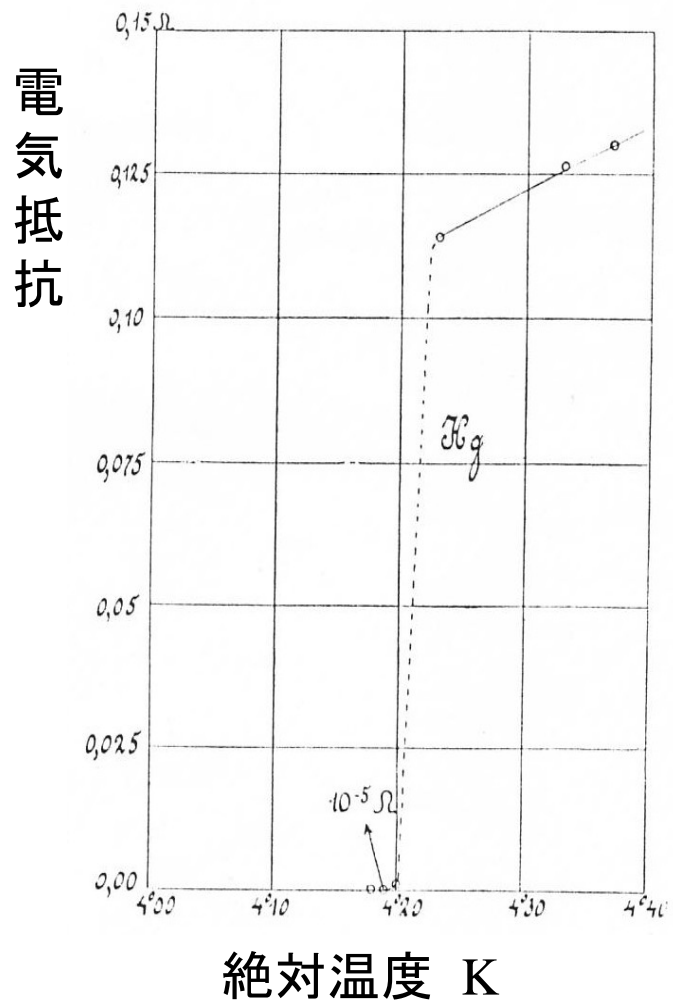
いろいろな量子現象

原子、分子、固体中の様々な現象は量子力学の法則に従っておきている。

強磁性	磁石、コンピューターのメモリー
半導体	現代のエレクトロニクスの基礎
トランジスター	
ダイオード	発光素子
超伝導	電気抵抗がゼロ
	巨視的な世界で起こる量子現象
量子ホール効果	微細構造定数の精密測定
近藤効果	
アハラノフ・ボーム効果	

超伝導の発見

1911 カマリン・オネス



超伝導になる元素

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Ac 89	Ru 104	Ha 105	Unh 106	Uns 107	Uno 108	Une 109									
Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71				
Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103				



冷やすと超伝導になる



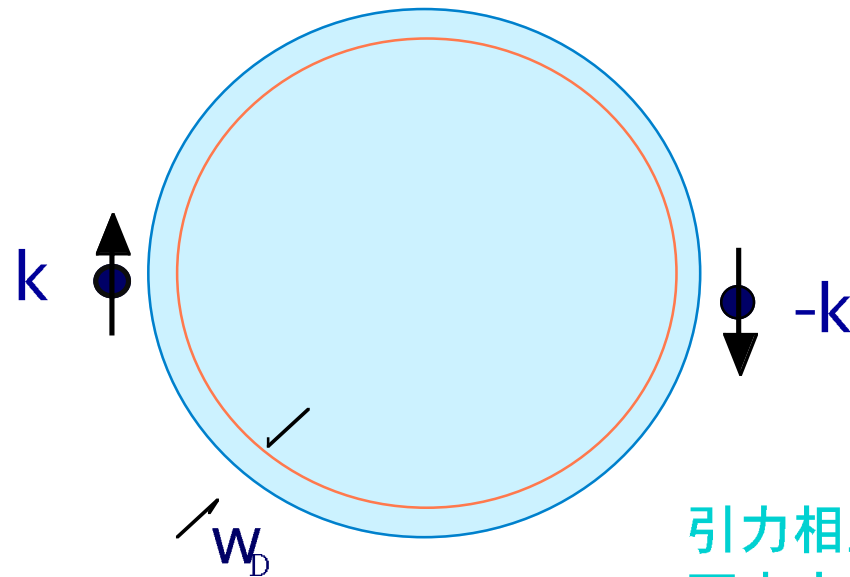
圧力をかけると初めて超伝導になる

超伝導

—巨視的な量子現象—

k と $-k$ の電子がペアをつくり、ゲージ（位相）不変性が破れた状態

電子には位相という仮想的空間内での回転の自由度があり、勝手な方向を向いている。が、超伝導状態ではすべての電子ペアが同じ方向を向いている。



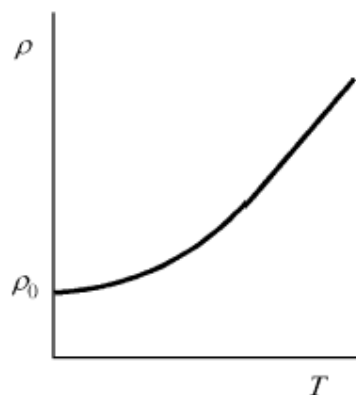
対称性の破れ

BCS理論

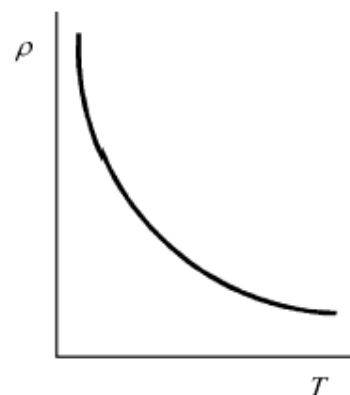
引力相互作用によるフェルミ面の不安定性によって超伝導が引き起こされる

超伝導体の特徴

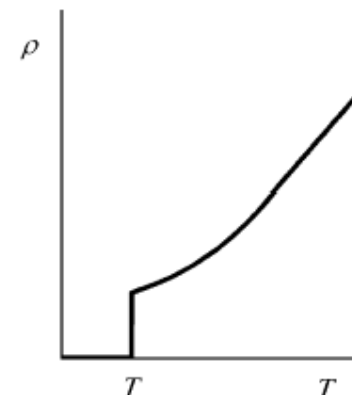
電気抵抗 0



金属

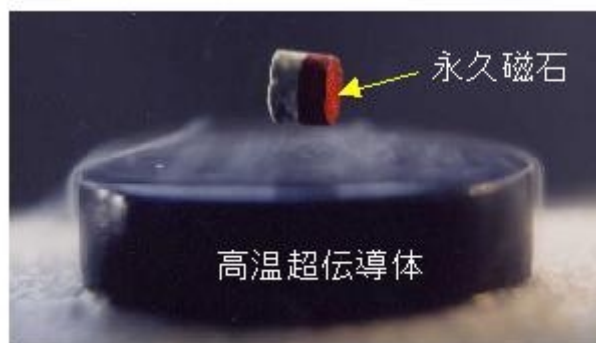


半導体



超伝導体

マイスナー効果

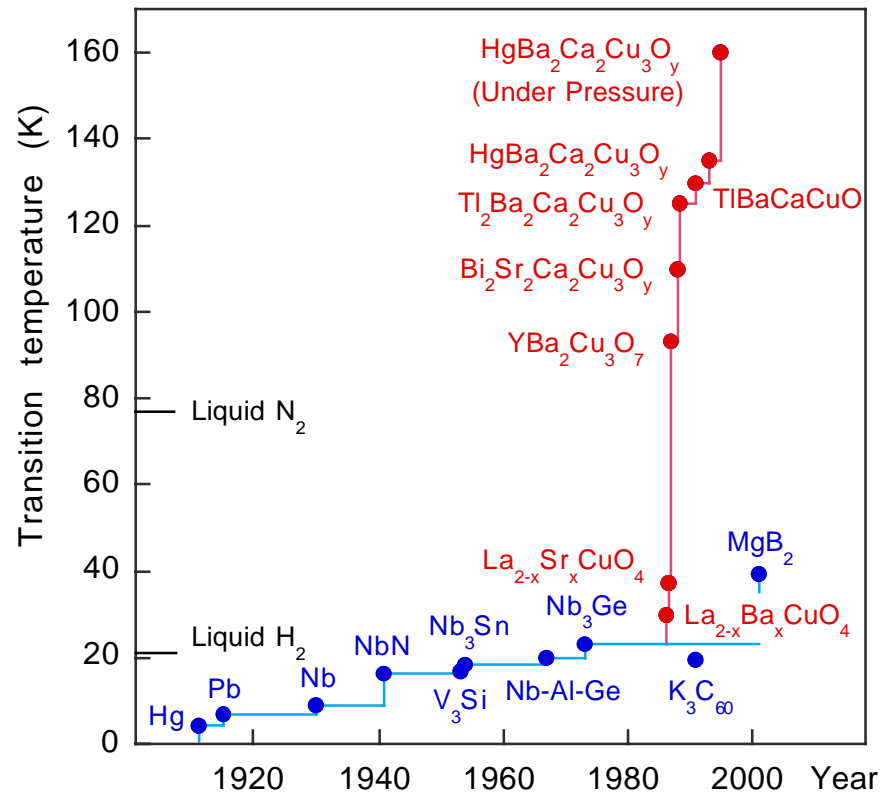


磁場は超伝導体に入り込むことができない

フッシング効果

超伝導体に磁石を近付けておいて冷やすと超伝導体内部に入り込んだ磁場により（第2種超伝導体）、つりあげることができる。

高温超伝導の発見



高温超伝導はどうして
おこる？

このミステリーはまだ
解決されていない！

電子のペアができ
巨視的に量子論的な
位相がそろった状態
になるメカニズムは
何か。

より高い臨界温度の
超伝導体は？

超流動

ヘリウム 4 は絶対温度2.17Kで粘性のない超流動状態になる。

1937年 カピツァが発見した。

超流動も量子効果が巨視的に現われる現象である。

超流動状態になると、粘性抵抗が消失していて、液体が容器の壁をよじのぼったり、非常に小さい隙間からも流れでたりする。

超流動状態はボーズ粒子がボーズ・アインシュタイン凝縮を起した状態であると考えられる。この状態では多数のボーズ粒子が一つの量子準位（最低エネルギー準位）に集中している。