

量子、素粒子、場

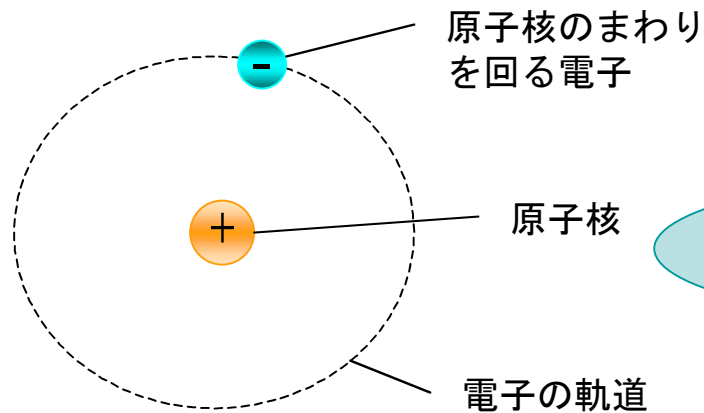
—量子力学入門—

産業技術総合研究所

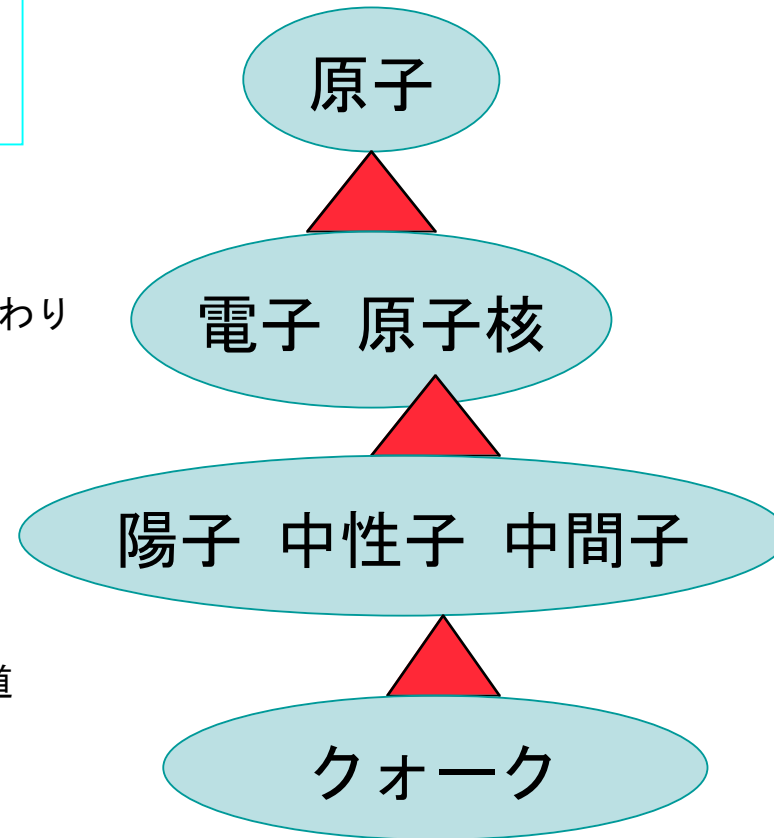
柳沢 孝

量子力学の世界

微視的世界の物理法則
= 量子力学



物質の構成要素



自然界に働く四つの力

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。

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

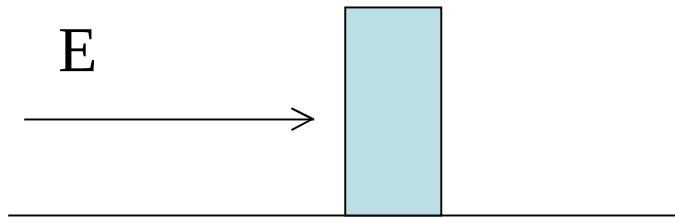
m : 質量

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 :

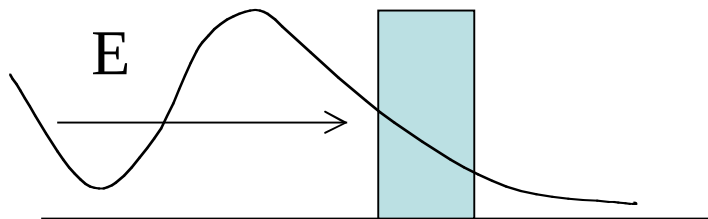
『量子力学的粒子は波である』 と考えている

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

=

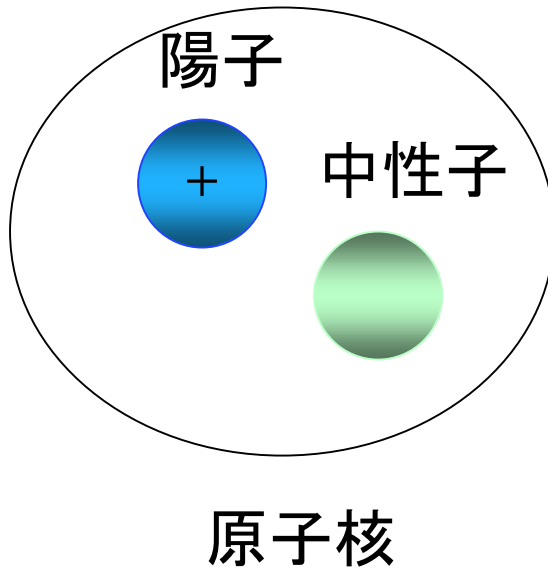
量子力学では物理量を**ある規則**に従った
演算子で表わす。

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—



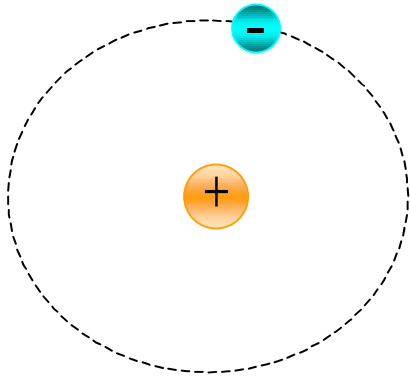
陽子と中性子間に働く力

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。

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?

電氣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

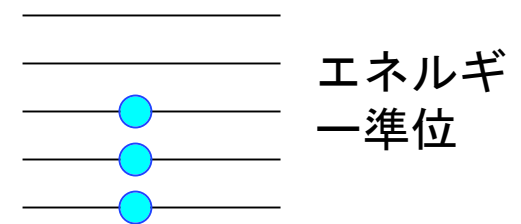
フェルミ粒子とボーズ粒子

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

${}^3\text{He}$

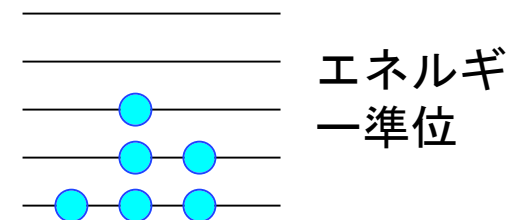


各準位を占めること
のできる電子は一つ

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

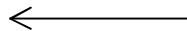
一朝永振一郎が考えたこと

ファインマン、シュウィンガーらと共に、
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

発散量を観測値
にくりこむ

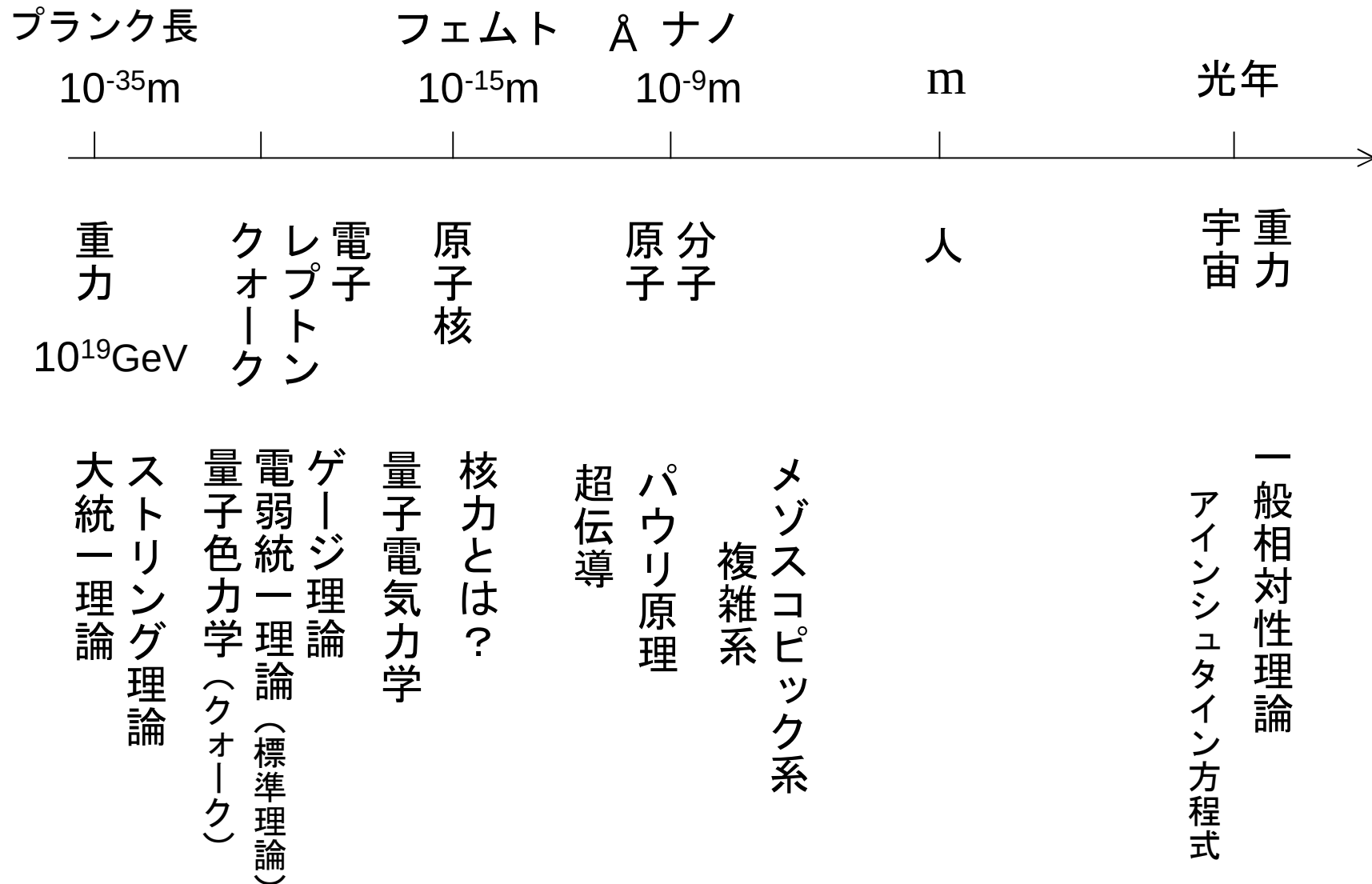


発散の問題

当時の物理学会
の大問題

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

自然界の多層構造



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 (スーパースtring)

素粒子はひも (弦) であると考えられる理論
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。

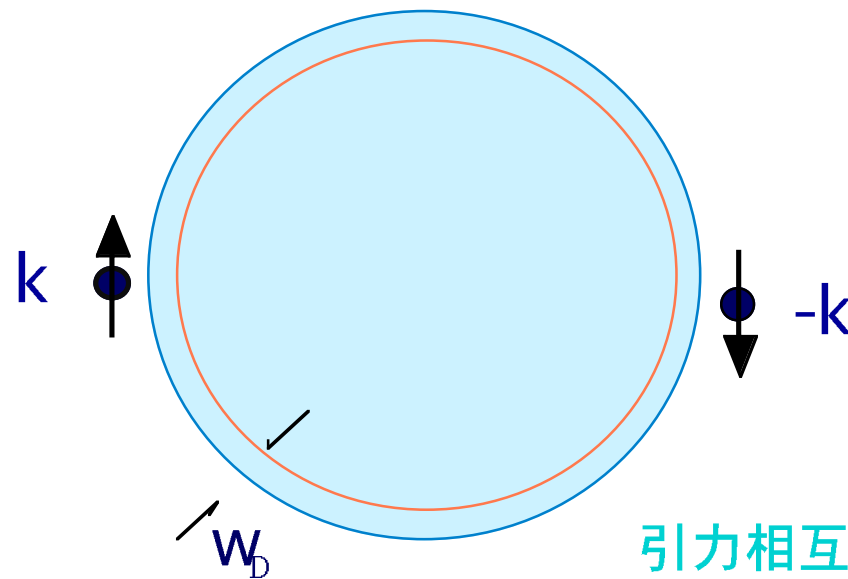
（自発的）対称性の破れ

宇宙は対称性の破れにより生じた。

超伝導も対称性の破れ

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。



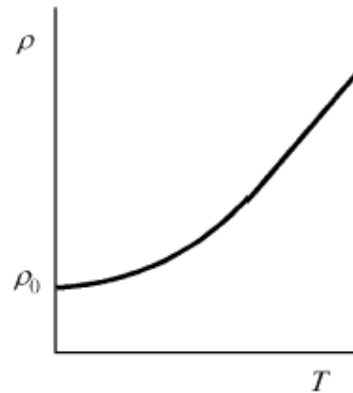
BCS理論

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

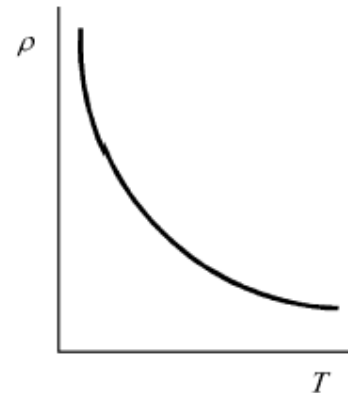
対称性の破れ

超伝導体の特徴

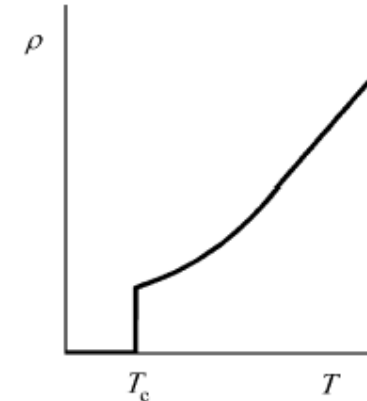
電気抵抗0



金属

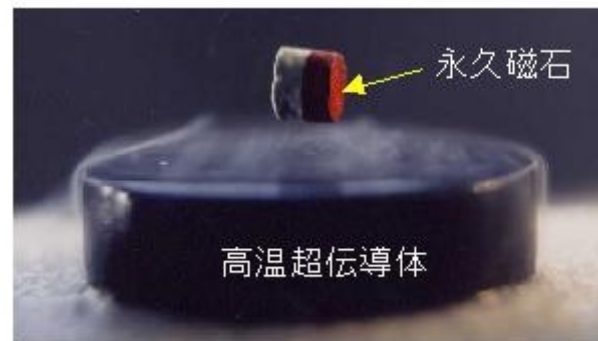


半導体



超伝導体

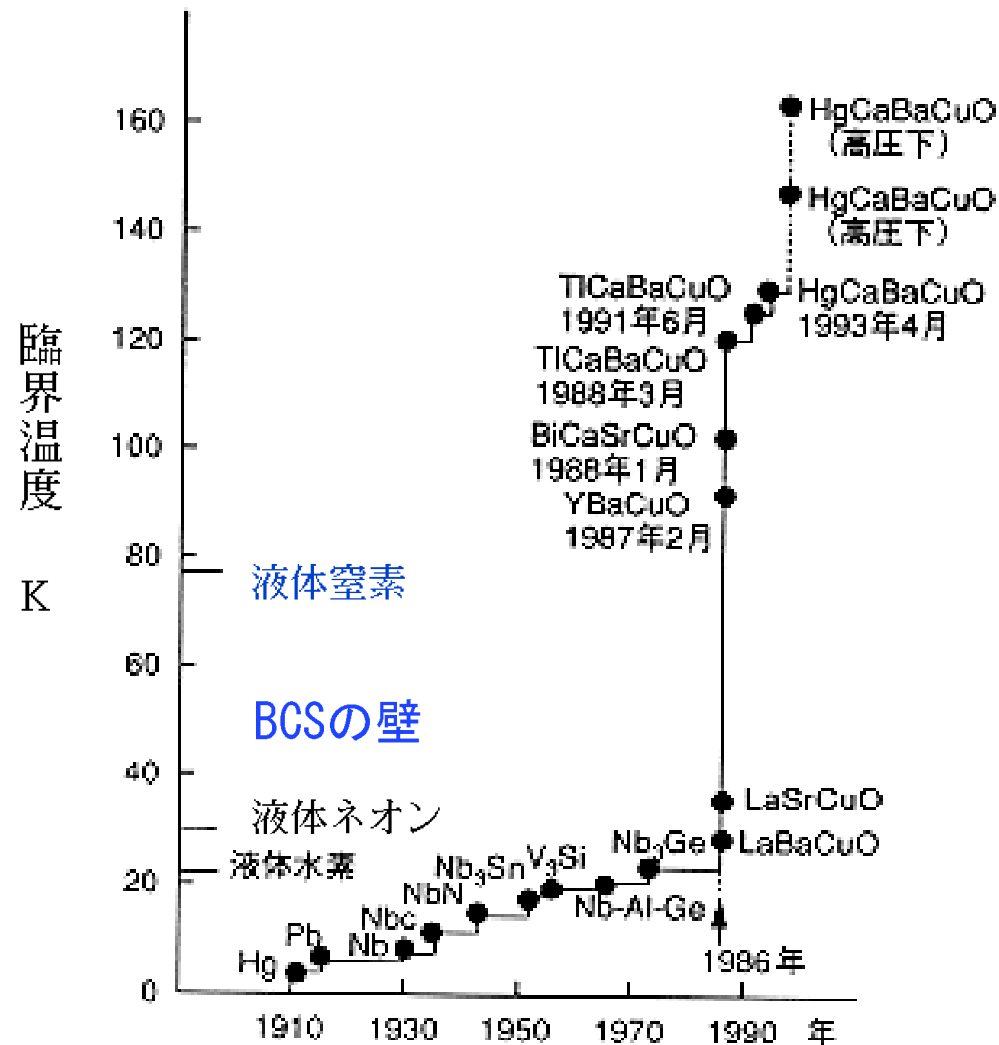
マイスナー効果



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
磁場が超伝導体から抜けだせず、磁石にくっつく。

高温超伝導の問題



高温超伝導はどうして
おこる？

このミステリーはまだ
解決されていないー

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？