

2008ノーベル賞 について

南部・小林・益川は、
何をやったのか？

琉球大学理学部

物質地球科学科

物理系 出前講座

前野昌弘、辺土正人、眞榮平孝裕



The Nobel Prize in Physics 2008

“for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics”

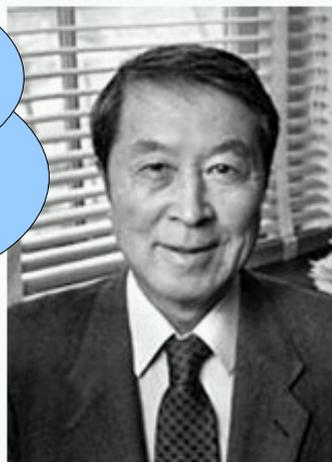


Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu

🕒 1/2 of the prize

USA

Enrico Fermi Institute,
University of Chicago
Chicago, IL, USA

b. 1921
(in Tokyo, Japan)

“for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature”



Photo: KEK

Makoto Kobayashi

🕒 1/4 of the prize

Japan

High Energy Accelerator
Research Organization (KEK)
Tsukuba, Japan

b. 1944



Photo: Kyoto University

Toshihide Maskawa

🕒 1/4 of the prize

Japan

Kyoto Sangyo University;
Yukawa Institute for
Theoretical Physics (YITP),
Kyoto University
Kyoto, Japan

b. 1940

↑ ノーベル財団ホームページより引用

キーワードは「対称性」

物理における対称性

小林・益川は
こっちの話

南部先生は
こっちの話

不連続な対称性

- P** パリティ変換(鏡像変換)
- C** 電荷変換(粒子 \leftrightarrow 反粒子)
- T** 時間反転

この二つを
まとめたのがCP変換

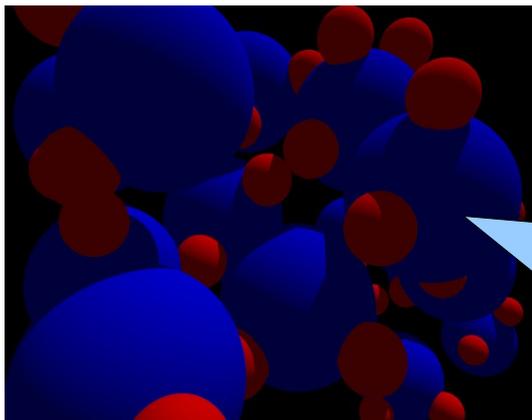
連続的な対称性

- 空間並進
- 時間並進
- 空間回転
- ローレンツ変換
- 位相変換(電磁気)
- SU(2)変換(弱い相互作用)
- SU(3)変換(強い相互作用)
- 一般座標変換(重力)

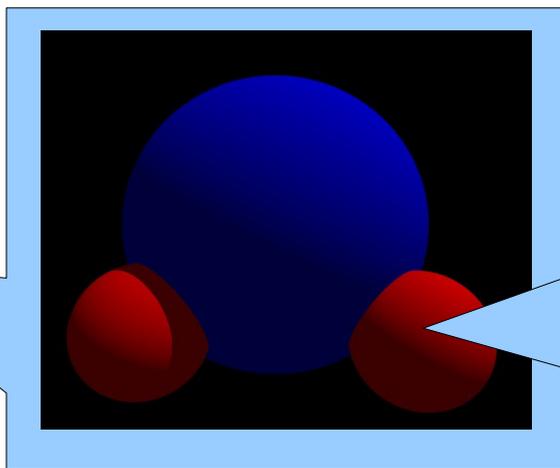
この世界には、破れている対称性と破れていない対称性がある。
破れている対称性はいかにして破れたのか、その理由を探るというのが、
今回ノーベル賞を与えられた研究の共通点。



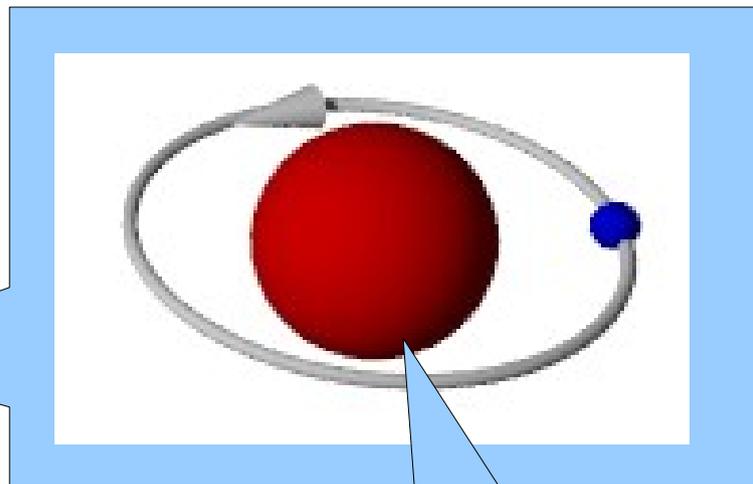
そもそも素粒子物理って何??



水の中には、、、



水分子があって、、、

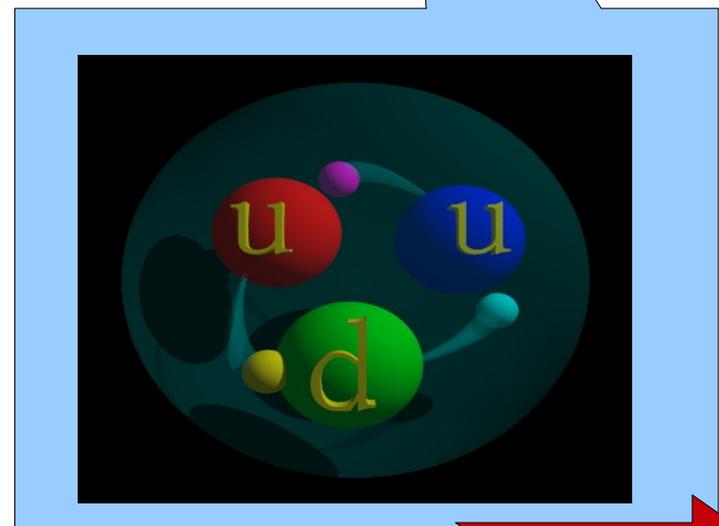


水素原子があって、、

分子・原子を作っている
粒子の「素」になる
粒子の「相互作用」を
考える物理です。

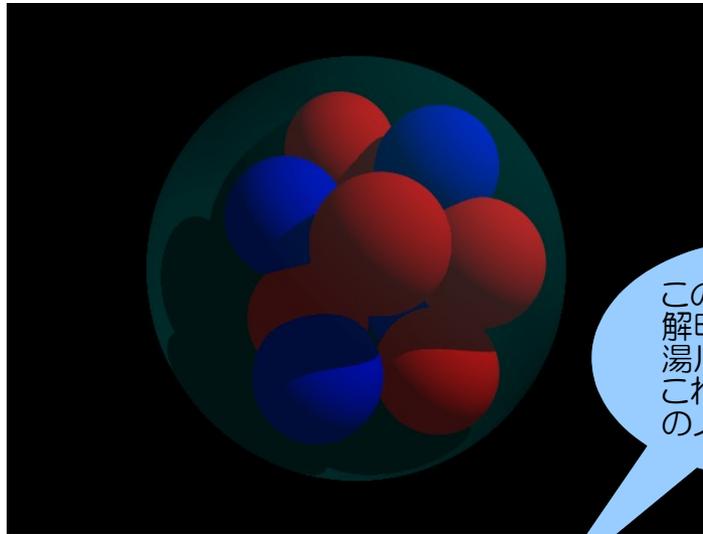
陽子があって、
その中には
クォークがある

こんなふうに、より小さい
ところ、より基本的なところ
へと、考えていきます。



原子核に見える対称性

陽子の質量 $1.67262158 \times 10^{-27} \text{kg}$
中性子の質量 $1.67492616 \times 10^{-27} \text{kg}$



この力の謎を
解明したのが
湯川秀樹で、
これが日本初
のノーベル賞

原子核内に働く「核力」という力を調べてみると、

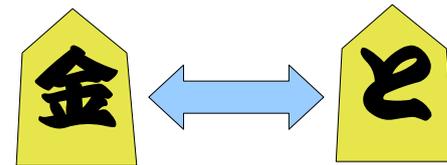
陽子と陽子の間に働く核力
中性子と中性子の間に働く核力

は、ほぼ同じである。

ここにも何らかの
対称性がある。

陽子と中性子はよく似
ている。違いは電荷が
あるかないかと、少しだ
け中性子が重いこと。

これはあたかも、陽子と中性
子が元々同じ粒子の「表」と
「裏」であるかのようだ。。。。



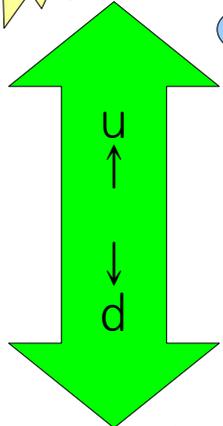
似ているのに、
ちょっとだけ違う。

なぜえ???

「架空の世界」の上下対称性

大胆な
考え

架空の空間の中で、
↑を向いているのが陽子、
↓を向いているのが中性子
…なんじゃないかな？



あくまでも
数学的な
「架空の空間」
です。

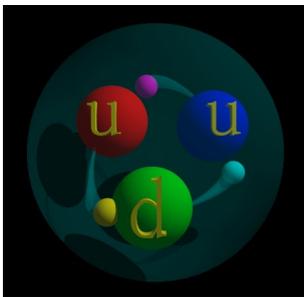
陽子と中性子が
似ているけど違う問題

クォーク理論
でも問題は
解決しない。

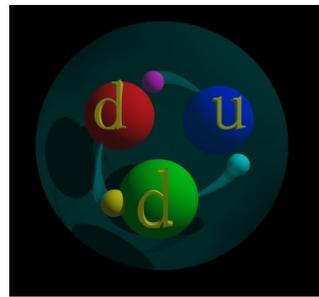
Upクォークとdownクォークが
似ているけど違う問題

この考え方は、その後たくさん見つかっていった粒
子を分類する時、とても役に立った。

後に、陽子と中性子は3つのクォークでできていることがわかつたが、この「上向き」「下向き」という考え方は、クォークの名前に残っている。



陽子。up,up,downの
3つのクォークででき
ている。



中性子。up,down,downの
3つのクォークででき
ている。

【謎】

Upクォークとdownクォークには
対称性がある。
しかし、その対称性は破れている

最初から対称性がなければ
悩まなくて済むし、
逆に対称性が保たれたままなら
不思議なこともないのだが、..

どうしてこうなるのか？
この謎を解きたいのだ！！



南部先生は何をしたのか？

対称性の自発的破れ

素粒子物理

一個～数個の粒子の反応、
相互作用を考える

物性物理

たくさんの粒子
が集まって物質を作った時の
物理を考える

物性物理(名前の通り、物質の性質を考える物理)の世界で起こっている超伝導現象が、「対称性の自発的破れ」として出現しているという考え方を示し、さらに「対称性の自発的破れ」という現象は素粒子物理でも起こり得ると考えた

後の素粒子物理の中で、まさに対称性の自発的破れによって起こっていると思われる現象が次々と見つかった。

カイラル対称性の破れ
ワインバーグ・サラムの電弱統一理論
大統一理論
万物理論？

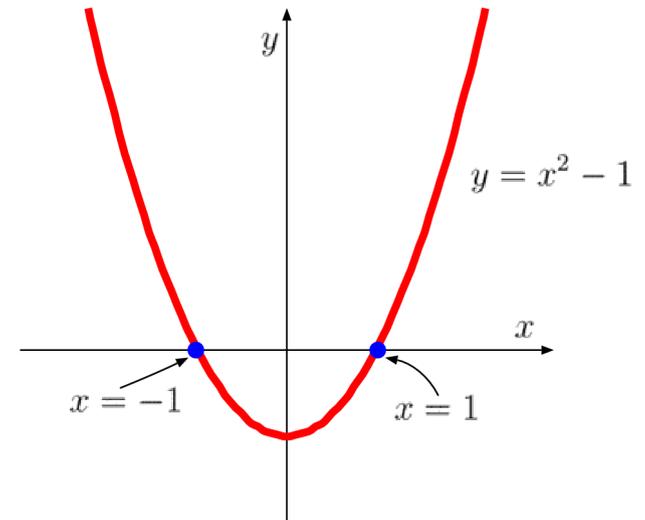
この理論が
素粒子の対称性の
破れの謎を解くこ
とになりました。



「自発的に破れる」とは？

$x^2 = 1$ という方程式は $x \rightarrow -x$ という変換(いわばグラフの鏡像変換)に対して対称である。しかし、その二つの解

$$x = 1 \quad \text{と} \quad x = -1$$



それぞれは、左右対称ではない。

これが、
自発的破れ

方程式を作った時点では対称性があったのに、解を一つ選んだことで、対称性がなくなってしまった。

対称性が自発的に破れた時は、方程式の対称性は残っている。

対称性の名残を残しつつ、破ることができるのである。



物理の世界で、 対称性が「自発的に」破れる、とは？

素粒子物理では、
素粒子の運動方程式を
立てて、その方程式から
まず、
「最低エネルギー状態」
を探します。

運動方程式に対応する
「場の方程式」は対称性を破っていないとしても、
真空（最低エネルギー状態）が対称性を破ってい
るということもある。
それが「自発的な破れ」です。

(昔の) 素粒子
物理屋の常識

真空は「何もない」状態なのだ
から、対称性がいいはずだ！！

しかし物性理論では、
エネルギーが低い状態が
対称性を破ることも
知られていたんだよ。。。

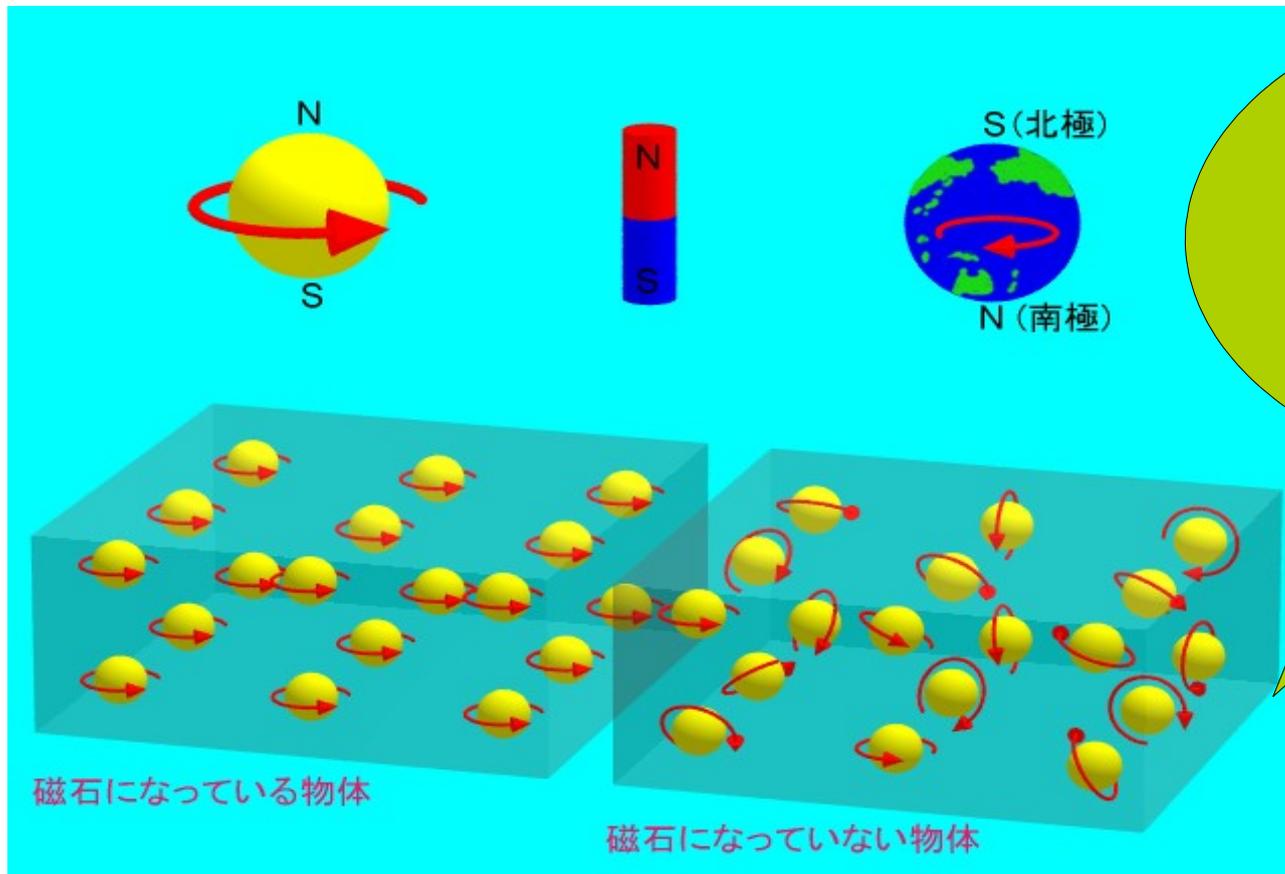


物性における対称性の自発的破れ(1)

最低エネルギーの状態に対称性がなし | 例.....
(割とその辺で目にする例です)

強磁性
(例：鉄が磁石になること)

鉄はなぜ磁石になるのか??????

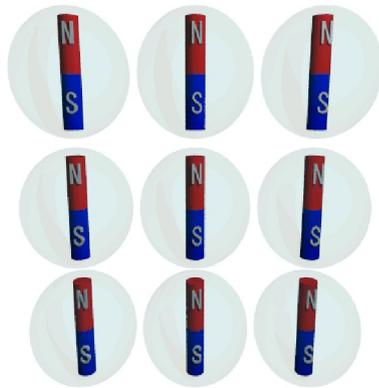


Fe原子は、原子一個一個が磁石である。しかし、その原子がきれいに整列していなければ、全体としては磁石にならない。



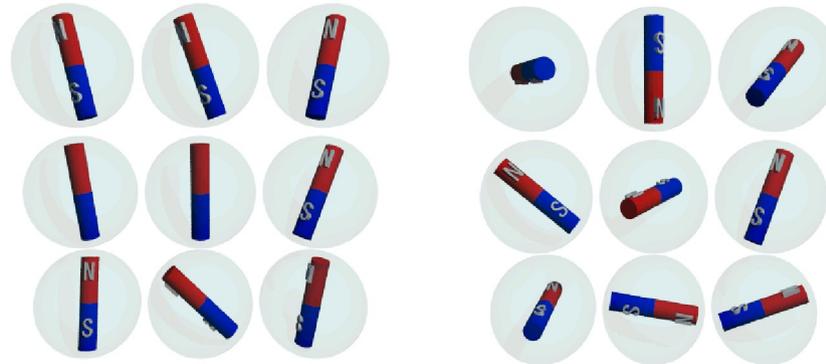
温度と対称性の破れ

低温



←エネルギー低い
←乱雑性低い

高温



エネルギー高い→
乱雑性高い→

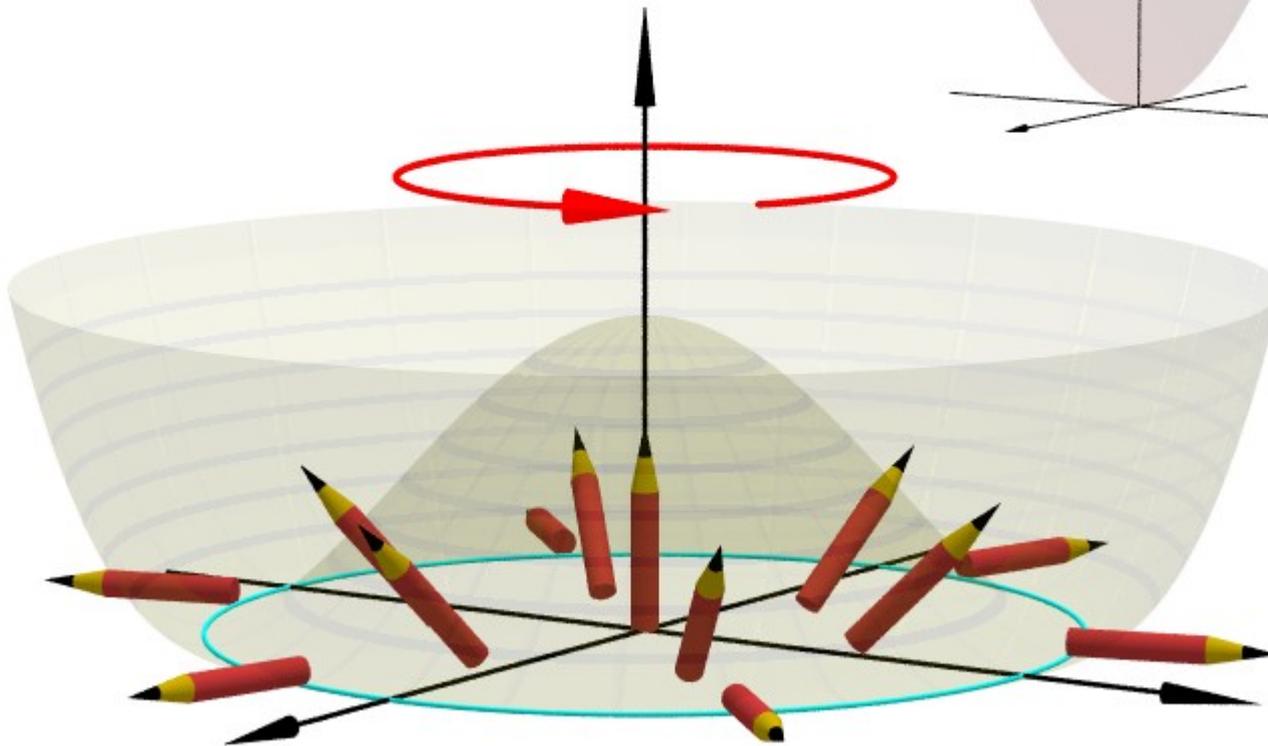
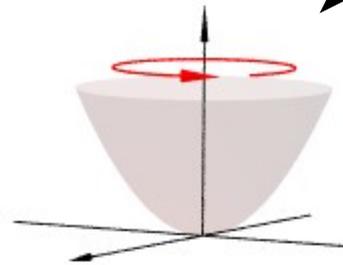
試してみよう!

鉄が磁石になっている状態というのは、特定の方向ができていますので「回転に対する対称性が破れている」状態だと言える。つまり、対称性の低い(対称性が破れた)状態の方がエネルギーが低く、それゆえに実現するということが有り得るのだ!!



自発的対称性の破れのイメージ

エネルギーがこんなグラフなら、最低エネルギーは対称性がいい。



原点(突っ立った鉛筆)はz軸周りの回転に対して対称性がいい。
しかし、エネルギーが高い。

倒れてしまった鉛筆は対称性が悪いが、エネルギーが低い。



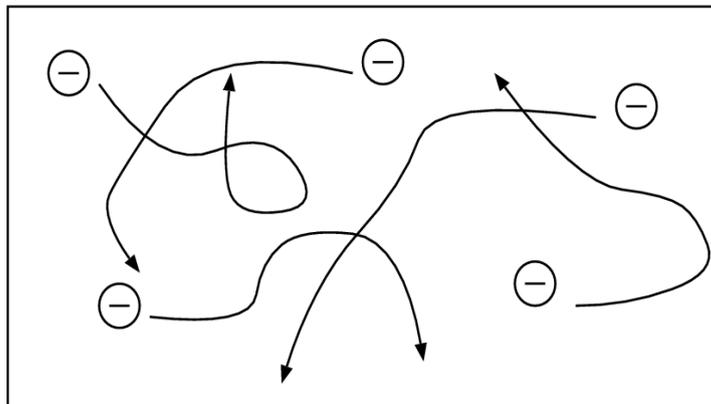
物性における対称性の自発的破れ(2)

超伝導

一部の物質は、低温にすると**電気抵抗が消失**するという「**超伝導状態**」になる。

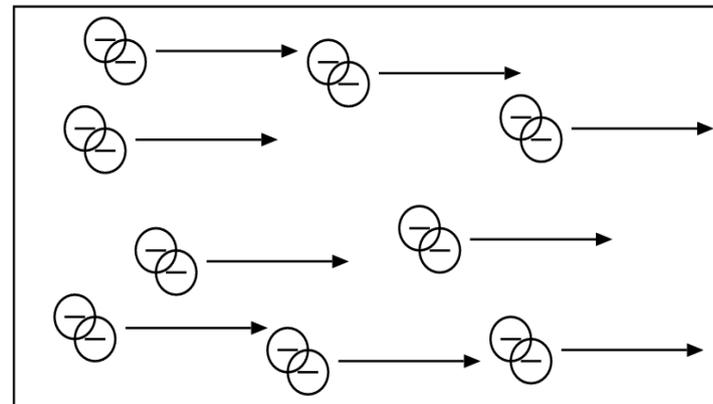
バーディーン、クーパー、シュリーファアの3人はこの現象は「**クーパー対**」と呼ばれる「**電子2個が結合した状態**」が物質内に凝縮している状況によって起こされているといういわゆるBCS理論を考えた。

通常物質



電子が互いや原子にぶつかりあいながら動いている

超伝導体の中



電子が2個くっついたもの(クーパー対)が、抵抗を受けずに集団運動している

ぎっしりつまったクーパー対は(大学で習う量子力学でわかる現象により、...)周りの原子の抵抗を受けずにいっせいに動くことができる(これが電気抵抗ゼロの理由)。



クーパー対と対称性

常伝導状態:クーパー対がない → $\psi = 0$

←対称性が破れていない

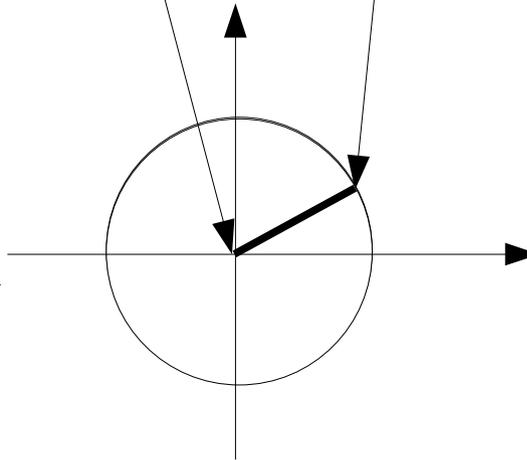
超伝導状態:クーパー対の波動関数が、ある複素数の値 ψ を取る。

←対称性が破れている

クーパー対というものの存在確率のようなもの
これが何なのかは、大学で勉強してね！

どんな対称性かというと、

ψ のグラフ→



$$\psi \rightarrow \psi e^{i\theta}$$

位相変換

(この辺はちょっと難しいかも。。。)

南部先生が気づいたこと:

超伝導は、クーパー対が凝縮することによる位相変換の不変性の破れと考えることができる。

対称性の高い $\psi = 0$ より、対称性が崩れた状態の方がエネルギーが低い。

ここでも、低温にしてエネルギーが低い状態で対称性が破れることに注意！！



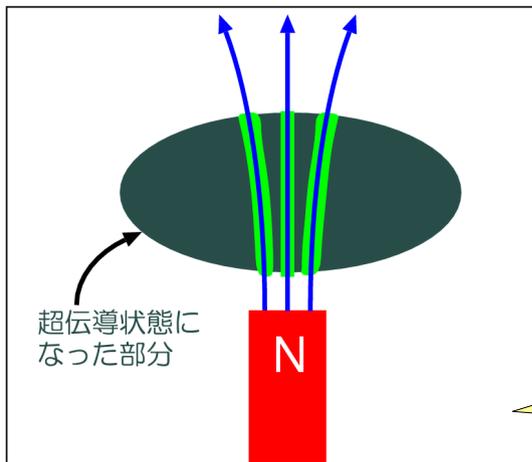
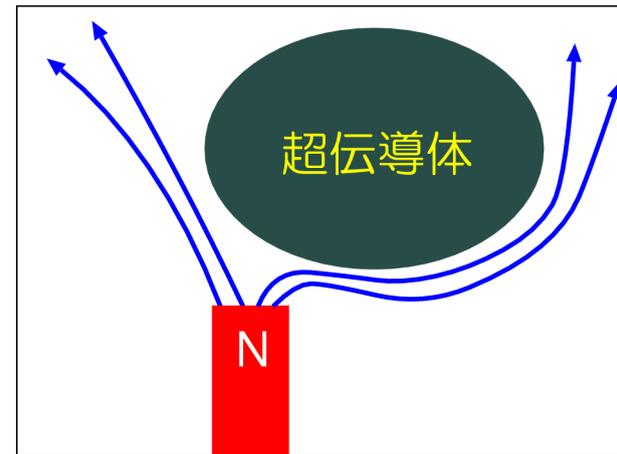
超伝導体で起こる現象

ごめんなさい、これはお
おざっぱな説明です。
ちゃんとした説明は
大学で勉強してね。

超伝導状態で、抵抗なしに動きまわる電荷があると、その場所には磁場が侵入できない。

電磁誘導の法則で、磁場の変化を妨げるように“永久電流”が流れる……と思えばよい。

逆に磁場のある場所で物質を超伝導状態にすると、磁力線をその場所で動かなくすることができる(これを「ピン止め」と言う)。



常伝導体内は自由に動き回れる磁力線が、超伝導状態では動けなくなってしまう。。

実はこの「自由に動けない」ということは、「(対応する)粒子が質量を持つ」ということと同じです。対称性の破れは粒子の質量のあるなしと関係しています。



ここで実験た~~~~いむ

特に！！
超伝導状態の物質の中では、
磁力線が自由に動けなくなってしまう

いわば、
「磁力線が重くなってしまう」
ということを感じてください。

超伝導体は、
磁力線を
捕まえてしまう！！

超伝導現象を体験して、
「対称性の自発的破れ」
を実感しよう。



超伝導と素粒子物理を比較しよう

超伝導状態

- ・電気抵抗が0になる
- ・位相変換不変性がない
- ・クーパー対が凝縮
- ・磁力線が動けない
(これは光子が質量を持つということ)

←低温

常伝導状態

- ・電気抵抗は0ではない
- ・位相変換で不変
- ・クーパー対はいない
- ・磁力線が動ける
(これは光子の質量が0だということ)

高温→

今の「真空」

- ・「 $u \leftrightarrow d$ 」の不変性がない
- ・ヒッグス粒子が凝縮
- ・W粒子、Z粒子が質量を持つ
- ・クォーク・レプトンも質量を持つ

宇宙初期の「真空」

- ・「 $u \leftrightarrow d$ 」の不変性がある
- ・ヒッグス粒子はいない
- ・W粒子、Z粒子の質量はゼロ
- ・クォーク、レプトンも質量はゼロ



「対称性の自発的破れ」という概念 がくれたもの

今の素粒子物理の世界では

真空 = 何か(ヒッグス粒子)がつまった、対称性が破れた世界
になった。

真空にも「状態」がある！！

今の宇宙において、
対称性が破れてしまっている
理由を見つけることが
できました。

ヒッグス粒子が
真空につまっているという
証拠を見つけるための
実験が、LHCという
巨大加速器です
(来春いよいよ稼働開始)

宇宙の始まりの超高温の
状態で何が起こったのかを、
考えることができる
ようになりました。

ここまでが、南部先生の業績についてのお話。。。。



では続けて小林・益川の業績について

昔、物理法則は

C反転: 粒子と反粒子をひっくりかえす変換

P反転: 鏡に映すように、左右をひっくりかえす変換

の両方で対称になっていると思われていました。

ところが、まずP反転で不変でないことがわかります。

しかし、C反転とP反転をいっしょに行うと不変だと思われてました。

ところが、CP反転で不変でない現象も見つかりました。

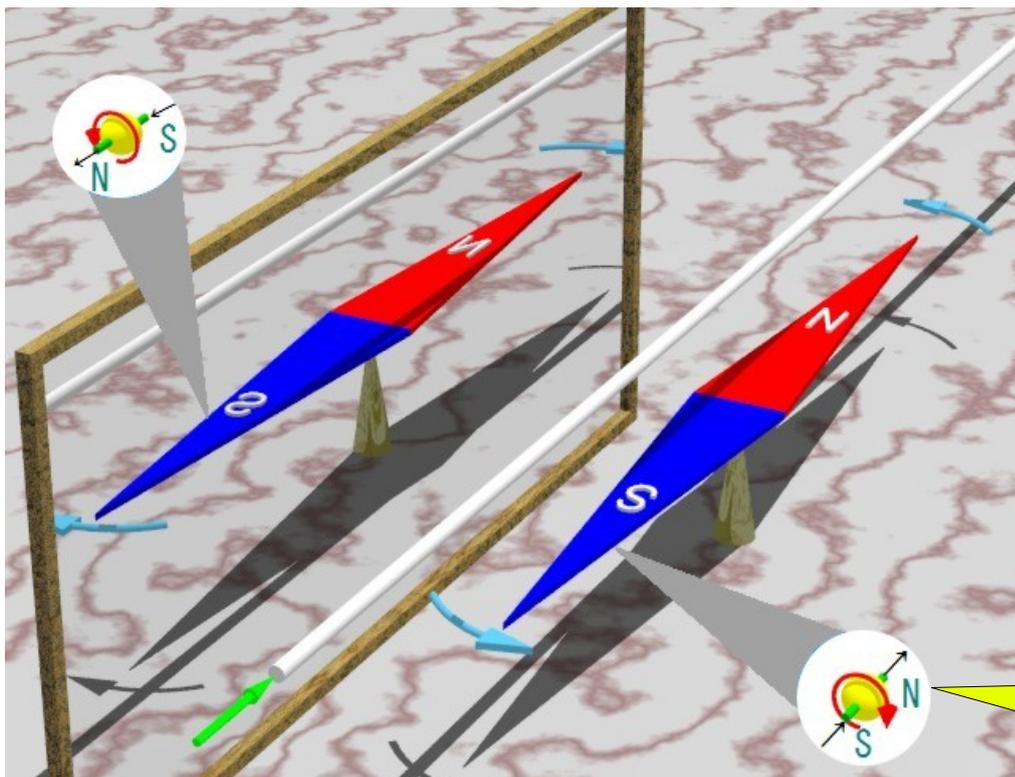
小林・益川理論は、CP反転に対する対称性が破れているのは、「クォークが6つ以上あるからだ」という説を唱えました。それが後に実証されるのです。。。。

時間がない場合



CP不変性とその破れ まずP不変性とは？

鏡の中でも、同じ物理法則が成立する。



昔アンペールは、電流と方位磁石の間の力が、鏡の中では逆になることに悩んだと言う。

しかし、実は方位磁石を方位磁石にしているのは、磁石の中の原子に流れる電流であり、鏡の中では電流も逆になる、ということを考えれば、物理法則は変更されていない。

鏡の中ではN極はS極に、S極はN極になる（それが物理的に正しい！）

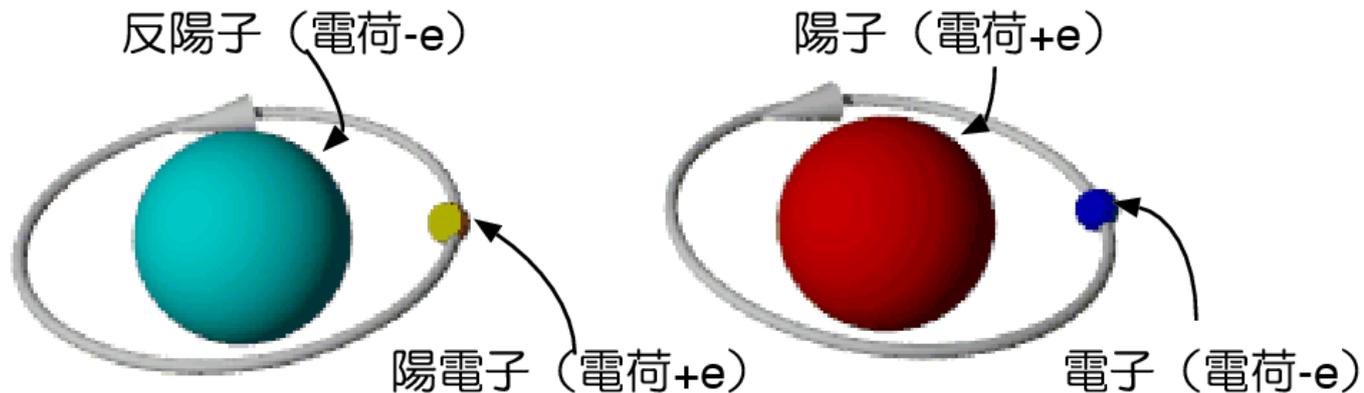


C不変性とは？

粒子と反粒子を取り替えても、物理は同じ。

反水素

水素



同じように、酸素に対応する反酸素もあるし、反窒素も反ウラニウムも、もちろん存在可能。

だが、この世には反物質は圧倒的に少なく、物質がやたらと多いようだ。。。。



CP不変性の破れの重要性

P反転の不変性の破れは、1957年に、ウーの実験(コバルト原子核)で発見された。

この時はCP反転の不変性はあると考えられていたが、1964年のフィッチとクローニンの実験(K中間子)でCP反転で不変でない現象が見つかってしまった。。。。

CP不変性が破れているのは、素粒子の運動方程式にCP不変でないところがあるからである。。。。
(この破れは今のところ「自発的」なものとは考えられていない)

では、いったいどこにそれがあるのか??

CP不変性が破れている事は、この宇宙に粒子が多くて反粒子が少ないことの理由になっているのかもしれない。

CP不変性が破れる理由を探さなくては!!!

CP不変性はいかにして破れるか？

小林・益川両先生が考えたこと

素粒子の運動方程式
の中に、複素数が入れ
ば、CPは破れる。
これでどうだ？

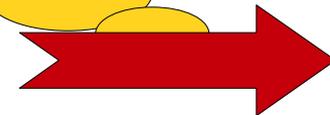
しかし、
素粒子の運動を表す関数には

$$\psi \rightarrow \psi e^{i\theta}$$

という変換しても変わらない
という不変性もある

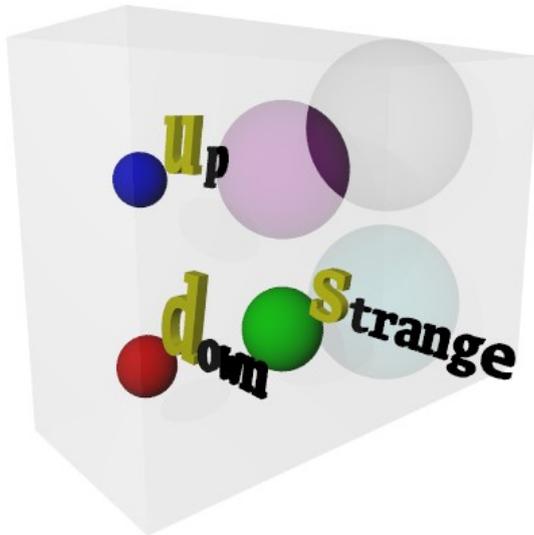
うわあ、その不変性使ったら、
せっかくCPを破ろうとして
入れた複素数が、全部実数に
なっちゃった！！

せっかく入れた複素数が
消えてしまうのは、クォークの
数が足りないからだっ！！



クォークが6ついる理由

クォークの運動方程式の中に、下の段の粒子を混ぜ合わせる行列が入っていた。
(この行列はクォークの種類の変化を表す部分に入ってます)



この2×2行列には、複素数が入らない

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

3×3行列なら、複素数が入る余地がある。

この行列を、「小林・益川行列」と言います。

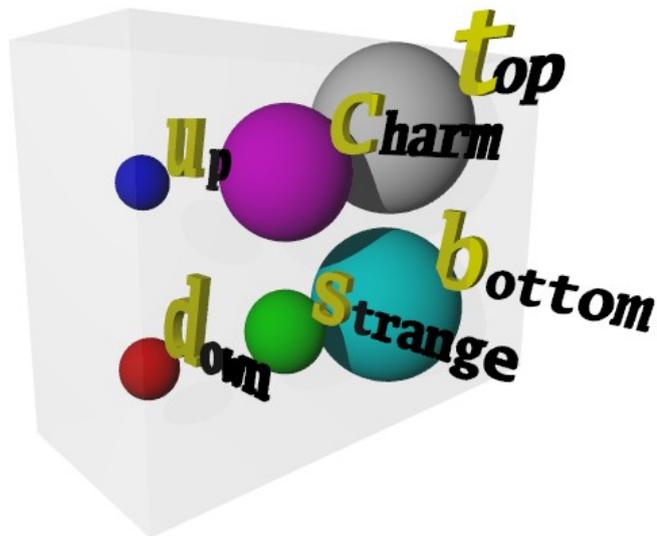
クォークが6個あると、この行列は3×3行列になり、複素数の入る余地が出てきた！
(小林先生と益川先生は、いかにしてCP不変性を破るか考え続けて、ついにこの可能性に気づいたのでした)

当時発見されていたクォークは3つ。up,downの後にもう一個見つかったので、strangeという苦しい名前をつけました。
4つめも「あるんじゃないか？」と言われていました。

当時は大胆な発想だった「クォークは6つ」だったが、その後の実験の結果は小林・益川の予想を裏付けるものだった。。。。。



その後のクォークたち



bottomクォークをbeauty
topクォークをtruth
と呼ぼうとしていた人もいたが、
なぜか定着せず。

次があったら、たぶん、
high & low
またはhate & love??

小林・益川論文の頃。
upとdownと、どちらでもない「変なの」が見つ
かったので、strange。

strangeの「逆」が出てきたので
「チャーミング」ってことで、charm。

1974年発見。

さらにもう一つ見つかったが、名前の付け
方に困って、、、bottom。

1977年発見。

bottomの反対は、もちろん、top。

見つかるにはだいぶかかりました。

1995年発見

小林・益川行列は、これらのクォークの相
相互作用の研究に使われ、その正しさが証
明されました。

次でまとめ

まとめ

今年のノーベル賞は、素粒子物理における「対称性の破れ」に関係する研究をした日本人3人に与えられました。

これらの研究は、この宇宙にどのような対称性があり、どのようにそれが破れてきたのか、を深く考えていく事で為されたものです。

いろんな現象を深く考えていくことで、思いも寄らなかつた法則が見つかることがあります。3人の日本人研究者の業績は、そのことを教えてくれます。

我らの大先輩は、とてもがんばったのです。君達も続こう！



おしまい

大学で物理を勉強すれば、
もっともっと現代物理に近づく
ことができます。

興味のある人は是非来てね。
一緒に勉強しましょう！

