

首都大学オープンユニバーシティ



2009年5月30日

素粒子物理学へのいざない

第三回

小林・益川理論とCPの破れ

このスライドのファイルは以下に置いてあります：

<http://musashi.phys.metro-u.ac.jp/~yasuda/ou2009-3.pdf>

首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論サブグループ 安田修

対称性

- 対称性とは、何かの変換をして状態が変わらない性質
- 変換には主として2種類がある：

➤ 連続的な変換：

例：ゲージ変換（(複素数の)位相の変更）

$$f(x, y, z, t) \rightarrow e^{i\theta} f(x, y, z, t)$$

➤ 不連続な変換：

例：空間反転 (Parity transformation)

$$x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$$

荷電共役 (Charge conjugation)

粒子→反粒子

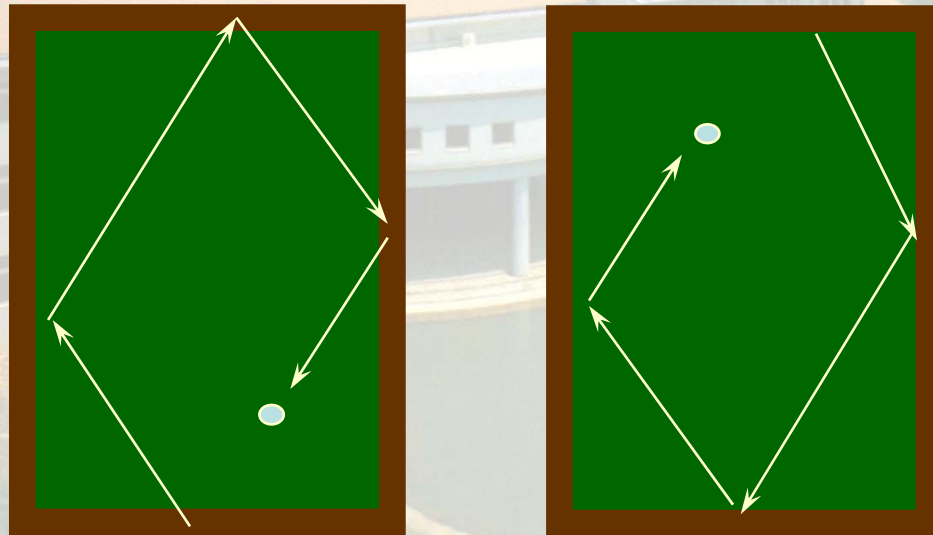
時間反転 (Time reversal)

$$t \rightarrow -t$$

空間反転 (Parity transformation)

空間における位置がひっくりかえる

$$x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$$

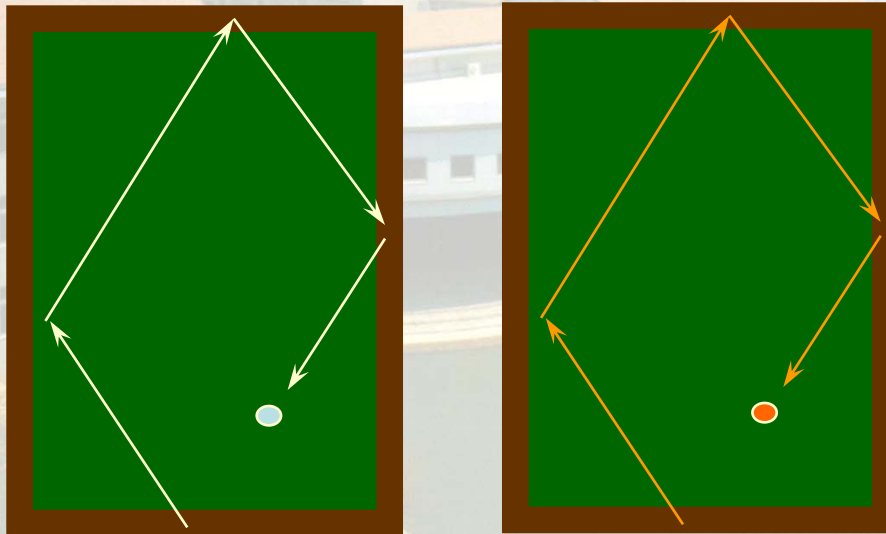


空間反転を二回施すと元に戻る : $P^2 =$

荷電共役 (Charge conjugation)

粒子が反粒子、反粒子が粒子に入れ替わる

粒子→反粒子

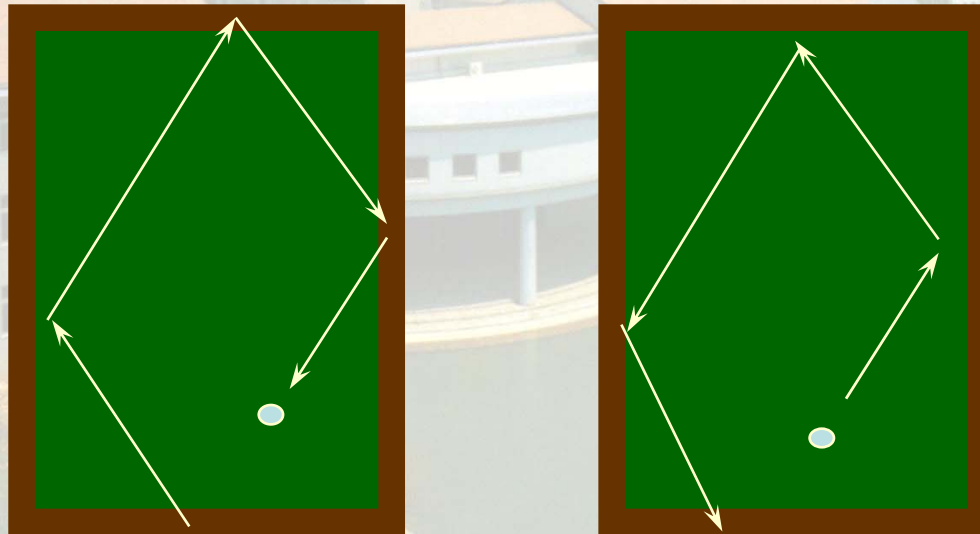


荷電共役を二回施すと元に戻る : $C^2 =$

時間反転 (Time reversal)

時間が反転 (ビデオの逆回し)

$$t \rightarrow -t$$



時間反転を二回施すと元に戻る : $T^2 =$

素粒子の相互作用は空間反転 P 、荷電共役 C 、時間反転 T に対して不変か？

- 古典力学（ニュートン力学）は P と T について不変（ C は反粒子の概念が元々がなかったので定義されてなかったが、あるとしたら不変

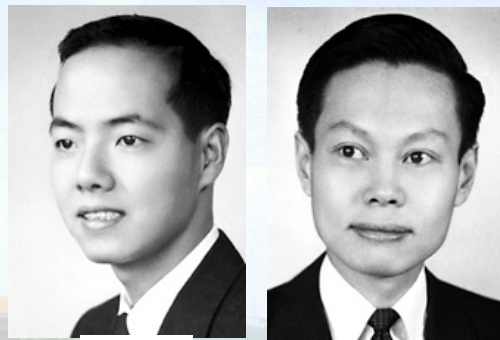
- 場の量子論（電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用）も P 、 C 、 T について不変であろう、というのが 1956 年までの物理屋の予想だった

（通常右側にあるものに演算させて行くので） T 変換を施して、次に P 変換、最後に C 変換を施すという意味（順序は重要ではない）

- P 、 C 、 T 全てを組み合わせた変換 CPT は、ローレンツ変換と呼ばれるものと同じであることが知られており、 CPT の組み合わせに関しては、いかなる相互作用も不変であると考えられている

ところが、弱い相互作用は空間反転P(パリティ変換)に関して不変ではなかった(パリティを保存しない)

1956年:パリティ非保存の理論的予言



リー

ヤン

電子

1957年:パリティ非保存の実験的発見

^{60}Co のベータ崩壊



(基本的に中性子の崩壊



と同じ)で、原子核の磁石を固定し、電子の出てくる角度依存性を見た



ウー

コバルト
60の原
子核



磁石:上向き

結果は上向きよりも下向きに電子が多く放射されることがわかった

スピン(角運動量)と呼ばれるもので、P変換に対して不変であることが知られている

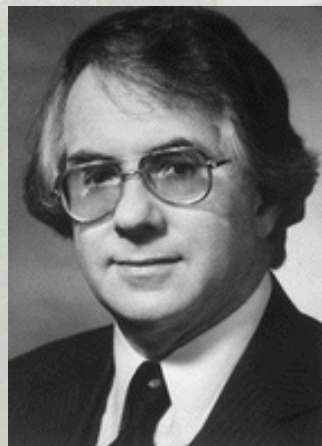
弱い相互作用は空間反転の対称性を破る!

磁石は空間反転で不変だが、電子の放射方向は空間反転で逆転

弱い相互作用のパリティ非保存の性質は非常に
ショッキングではあったが、以後、弱い相互作用
の理論は、パリティが非保存となるように構築さ
れるようになった



ワインバーグ・サラムの理論も、パリティは非保存となるように
作られているので、パリティ非保存は標準理論にとって、問題
ではない(ただしその起源の根源的な理解はできていない)



グラショウ



サラム



ワインバーグ

さらに、弱い相互作用はCP変換に関しても不変ではなかった

中性K中間子には K_L と K_S の2種類があり($K^0 = (d\bar{s})$ と $\bar{K}^0 = (s\bar{d})$ の組み合わせ)、CP対称性が保存されれば

$K_S \rightarrow \pi\pi$ 、 $K_L \rightarrow \pi\pi\pi$ にのみ崩壊する。

ところが、実際に実験をしてみると、CP対称性から許されない崩壊も若干観測された

1964年：中性K中間子でのCP非保存の実験的発見

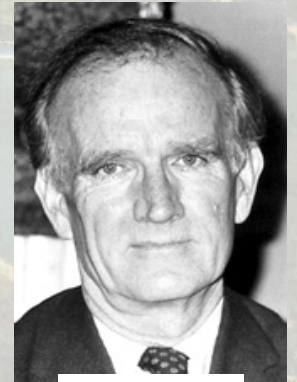
$$\frac{K_L \rightarrow \pi\pi}{K_L \rightarrow \pi\pi\pi} = \frac{2.2}{1000}$$



弱い相互作用はCPの対称性も破る！！

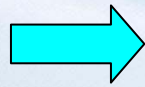


クローニン



フィッチ

なぜそんなにCP対称性にこだわるかと言うと



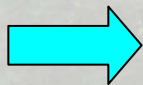
宇宙における物質・反物質の非対称性を宇宙論＋素粒子論で説明できるかもしれないから

宇宙論

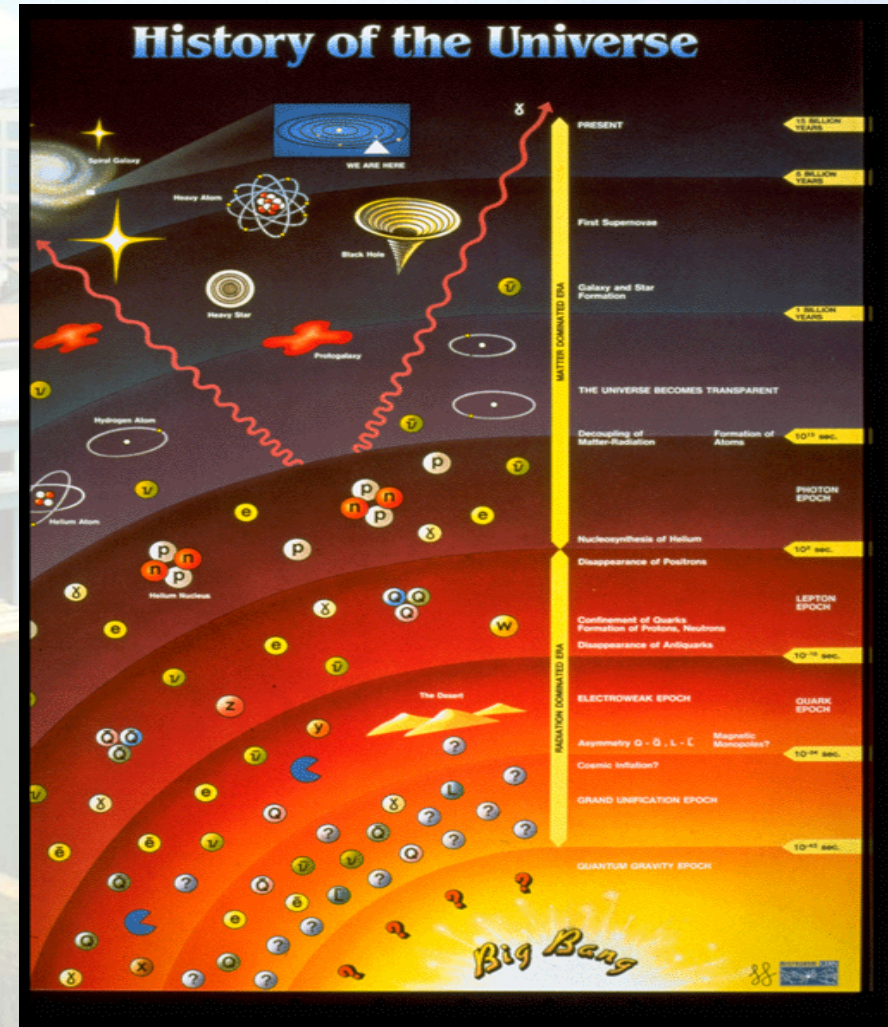
- 宇宙はビッグバンで誕生した
- 宇宙誕生初期、粒子と反粒子は同じ数だけ創られた(光子もほぼ同じ数だけあった)
→物質・反物質は同数だけあるはず

宇宙観測

- 実際には現在の宇宙は**粒子(物質)の世界**であることが知られている
- 宇宙の観測よりバリオン/光子 = 約 10^{-9} 程度



- ある時期に、粒子と反粒子の非対称性が作られたに違いない!



●宇宙誕生初期、粒子と反粒子は同じ数だけ創られた(光子も同じ数だけあった)はず

→粒子と反粒子の対消滅がなかったら、現在の宇宙全体の光子・粒子・反粒子の数はおおざっぱに見積もると、次のようになっているはず:

光子数 $N_\gamma = 10^{87}$
 物質数 $N = 10^{87}$
 反物質数 $\bar{N} = 10^{87}$



光子数 $N_\gamma = 10^{87}$
 物質数 $N = 10^{87} + 10^{78}$
 反物質数 $\bar{N} = 10^{87}$

●ある時期に、粒子と反粒子の非対称性が微量だけ作られたとする:

●さらに、粒子と反粒子の対消滅が可能な限り起こったとする:

光子数 $N_\gamma = 10^{87}$
 物質数 $N = 10^{87} + 10^{78}$
 反物質数 $\bar{N} = 10^{87}$

 およそ 光子 $10^{87} +$ 物質 10^{78}



●すると、物質(バリオン)と光子の比は 10^{-9} となり、うまく行きそう:

物質と反物質間のほんのわずかなズレ

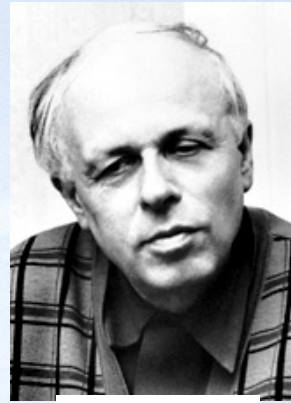
$$\frac{N-\bar{N}}{N_\gamma} = \frac{N-\bar{N}}{N+N} = \frac{10^{87} + 10^{78} - 10^{87}}{10^{87} + 10^{78} + 10^{87}} = 10^{-9}$$

物質世界が出来る条件


1967年 サハロフ

粒子の世界が出来るための3条件

- 1) バリオン数非保存の相互作用がある(標準理論にはない)
(例えば陽子 \rightarrow 陽電子 $+$ π^0 (\rightarrow 第四回目の講義))
- 2) C対称性・CP対称性がともに破れている
(粒子と反粒子の世界で相互作用に違いがある)
- 3) 非平衡
(出来たバリオン数が残るために必要)



サハロフ

 宇宙における物質・反物質の非対称性の議論には
CP対称性の破れの研究が重要

若干脇道にそれますが。。。

反物質は作れるか？



答：作れるが、技術的にごく微量のみ可能

1995年 反水素原子(11個)の生成
CERNでの研究



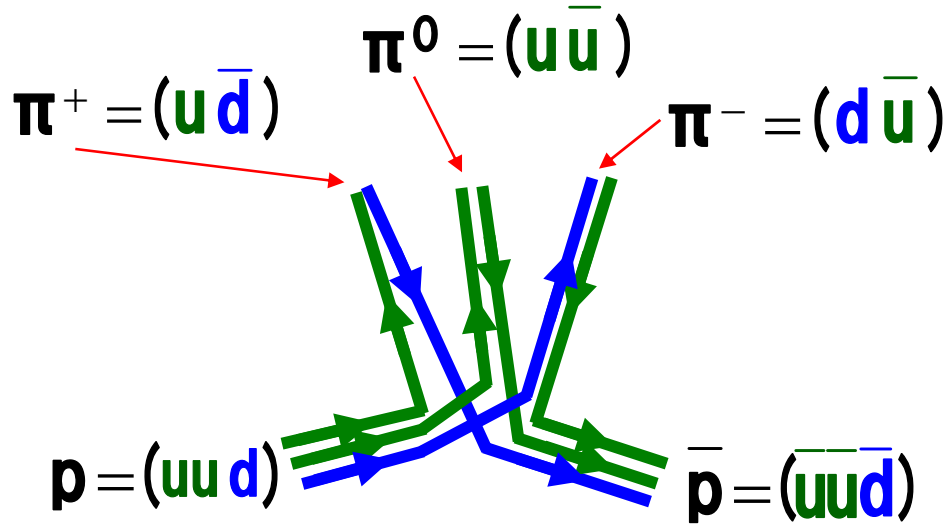
エラート

2001年 (準静止状態の)反水素原子の生成
(約50000個)
CERNでの研究



早野龍五

0.25gの反物質が物質と対消滅すると？



0.25gの反物質は同じ量(0.25g)の物質と対消滅するので、全体のエネルギーはアインシュタインの公式 $E = mc^2$ において $m = 0.25g \times 2 = 0.5g$ とおいて $E = 0.5g \times (3 \times 10^8 m/s)^2 = 4.5 \times 10^{13} J$ (ジュール) = 広島型原爆と同じエネルギー

→ 映画の設定の0.25gという数値は正しい

物理学者とともに読む

東京大学教授 早野龍五

「天使と悪魔」の虚と実 50のポイント

CERN研究所における反物質研究グループのリーダー
<http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/hayano/>

本サイト公開後の追記はこちら。



「天使と悪魔」上巻に登場する主な科学者
 ロバート・ラングドン
 ハーヴァード大学教授 宗教象徴学専門
 マクシミリアン・コーラー
 セルン（欧州原子核研究機構）所長
 レオナルド・ヴェトラ
 セルンの科学者 カトリック司祭
 ヴァットリリア・ヴェトラ
 セルンの科学者 レオナルドの娘

In collaboration with

角川文庫 14276, 14277, 14278 準拠

ソニーピクチャーズ 2009.5.15封切

上巻扉の直後には、CERN研究所が反物質の生成に成功し、新型の反陽子減速器の開発に着手したこと、反物質1グラムが有するエネルギーはヒロシマに投下された核爆弾に相当すること、などが「事実」として記されている。これらは本当だろうか？

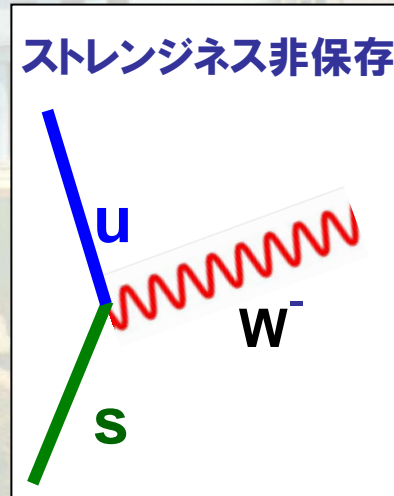
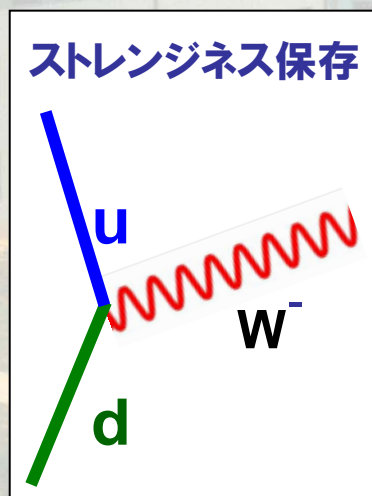
1. 「スイスのセルンが、反物質粒子の生成に先ごろ初めて成功した」これは、1996年の「Physics Letters」誌に、CERNで実験していた研究チームが Production of Antihydrogen（反水素の生成）という論文を発表した事実を踏まえて書かれています。この時生成された反水素原子の個数は約10個でした。反水素原子は、反物質の最小基本単位です。
 「天使と悪魔」でダン・ブラウンが反物質という用語を使う場合、多くの場合は反水素原子を指すものと考えられますが（「化学的痕跡は純粋な水素と同じ」上巻231頁）、「反物質の陽電子（上巻134頁）」のように、反物質を反粒子の意味に使っている箇所もあります。

小林・益川によるCPの破れの説明の準備

クォークの混合

クォークとWボゾンの間の弱い相互作用は異なる世代間 (u:第一世代、s:第二世代)にも存在することが知られている

(弱い相互作用が「ストレンジネス」(sクォークの粒子数)を保存しないのはこのため)



約1 : 0.2の比

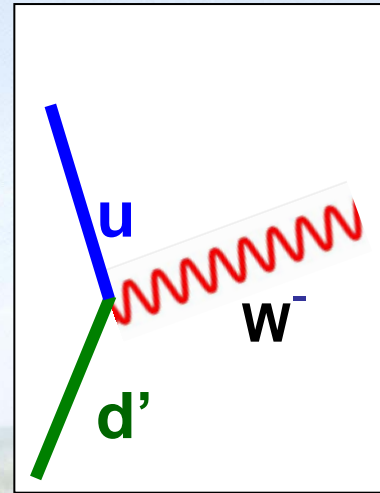
この事実を説明するために、dクォークの定義を変更することが提唱された:

$$d' = d \cos \theta + s \sin \theta$$

定数

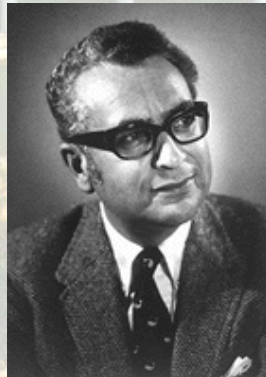
このことを、(元々のクォークを混ぜて新たに定義するという意味で)クォークの混合と呼ぶ

θ のことを通常カビーボ角と呼んでいるが、アイデアはゲルマン-レヴィ (1960年) によって与えられていた



$$\sin \theta = 0.22, \\ \cos \theta = 0.97$$

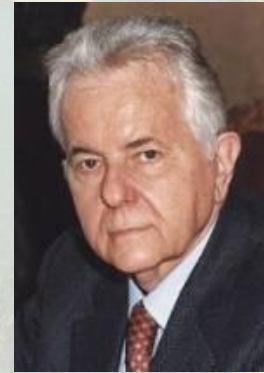
1960年 ゲルマン-レヴィ
1962年 カビーボ



ゲルマン



レヴィ

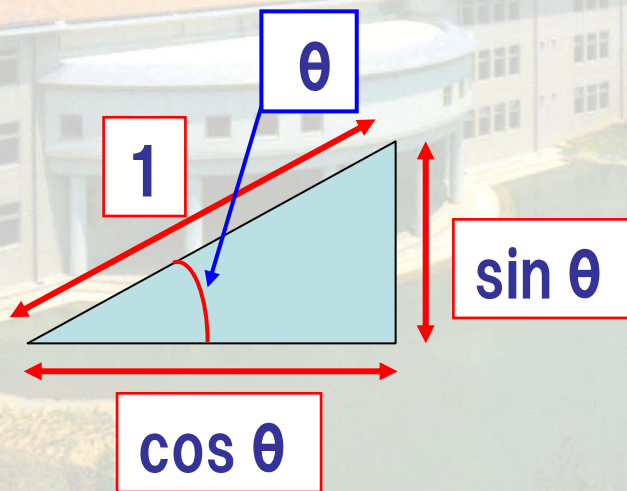


カビーボ

[注] 数学に関する若干の説明 (1)

三角関数

- 角度 θ に対して下図のように定義される量を $\sin \theta$, $\cos \theta$ と呼ぶ：



小林・益川理論：3世代への拡張

実はワインバーグ・サラムの理論では、CP対称性を破ることは簡単ではなく、クォーク・レプトンが**3世代以上**あって初めて可能になることが**小林・益川(1972年)**によって示された



小林誠



益川敏英

2世代クォークの混合(カビーボ)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d \cos \theta + s \sin \theta \\ -d \sin \theta + s \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

3世代クォークの混合(小林・益川)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud}d + V_{us}s + V_{ub}b \\ V_{cd}d + V_{cs}s + V_{cb}b \\ V_{td}d + V_{ts}s + V_{tb}b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

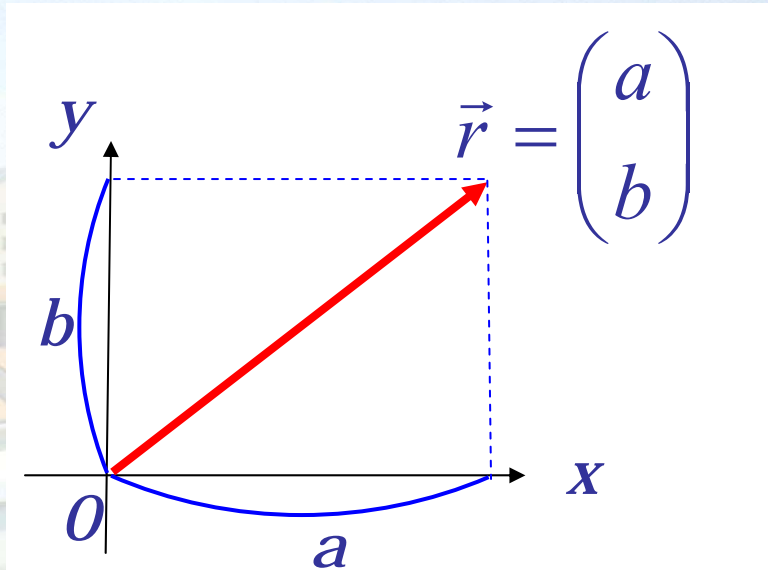
数学で行列と呼ばれるもの

V_{ud} 等は定数で $\sin \theta$ 、 $\cos \theta$ を拡張したもの

[注] 数学に関する若干の説明 (2)

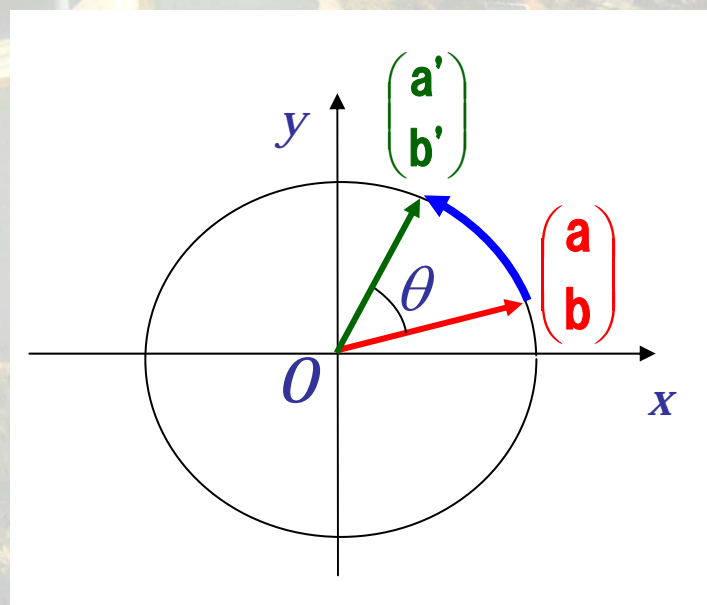
ベクトルと行列(2次元)

ベクトル $\vec{r} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$ は
向きを持つ矢印



行列 $\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ は
ベクトルを回転させる量

$$\begin{pmatrix} a' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

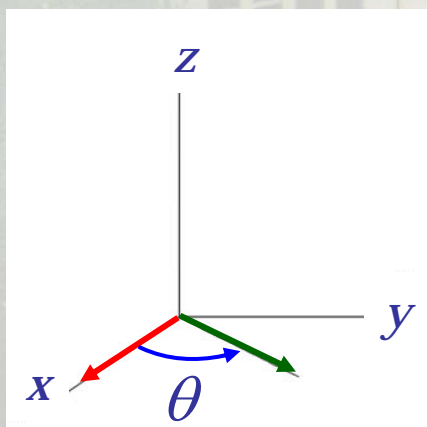


[注] 数学に関する若干の説明 (2)

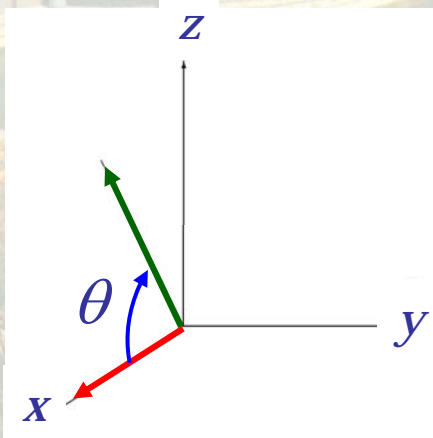
ベクトルと行列(3次元)

3次元では x 軸、 y 軸、 z 軸のまわりの回転の 3 種類がある

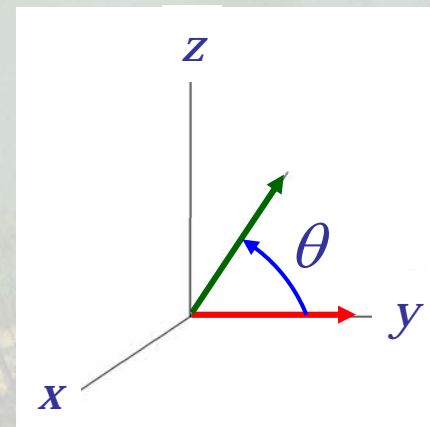
$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}$$

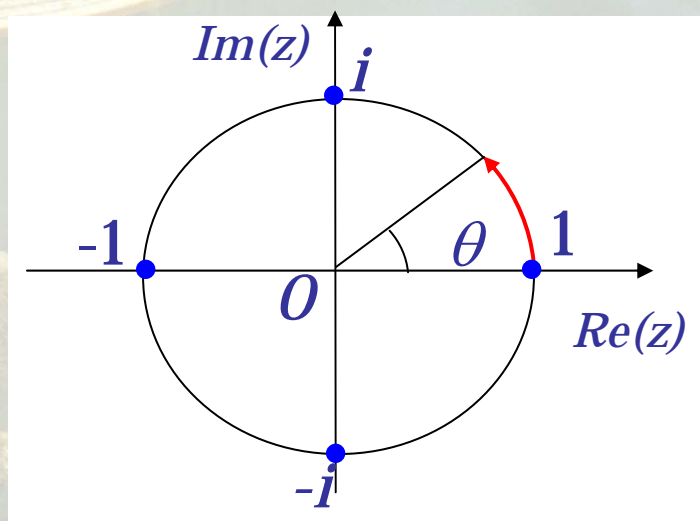
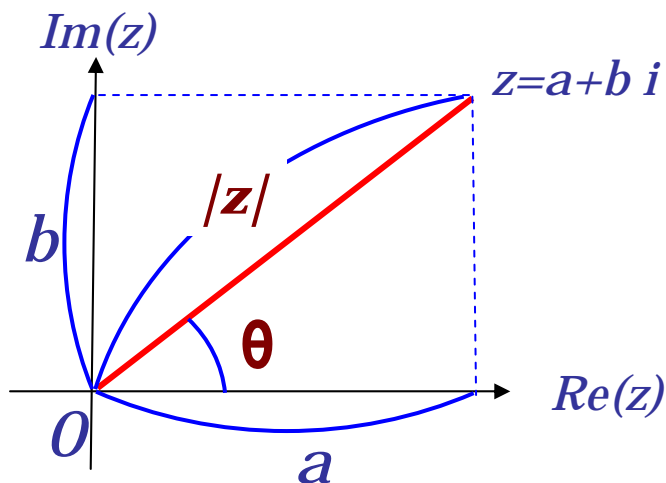


$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$



- 実数とは二乗するとゼロ又は正となる数 : (例) $(-1)^2 = (-1) \times (-1) = +1 > 0$
- 虚数とは二乗すると負になる数(定義) : (例) $i^2 = i \times i = -1 < 0$
- 複素数は実数と虚数をあわせた数全体 : $z = a + bi$ (a, b は実数で、それぞれ $a = \text{Re}(z)$, $b = \text{Im}(z)$)と書き、 z の実部(real)、 z の虚部(imaginary)と呼ぶ
- $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ を複素数 z の絶対値、 $\tan \theta = b/a$ を複素数 z の偏角(物理では位相とも)と呼ぶ
- オイラーの公式 $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ が成り立つ
- 複素数の極形式 : $z = r e^{i\theta} = r(\cos \theta + i \sin \theta) = a + bi$
- $e^{i\theta}$ をかけることは偏角を変えることに相当し、**複素平面内の回転に相当**

複素平面と呼ばれる図



- 一般にCP対称性を破るには、相互作用の**結合定数が複素数**になる必要があることが知られている
- 一方、クォーク混合には、数学でユニタリー行列と呼ばれるものが現れる。

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

1. 3世代の場合には最初は $3 \times 3 = 9$ 個の自由度がある
2. しかし、右側から掛かるd, s, bクォークと左側から掛かるu, c, tクォークの位相因子($e^{i\theta}$)は最終的な結果に効かないことが知られている
3. 但し行列全体の位相因子が元々最終的な結果に効かないことはわかっているので、 $6 - 1 = 5$ 個の自由度を引く
4. 結局、 $9 - 5 = 4$ 個の自由度が残る
5. 4個の自由度は3個の回転角度と**1個の位相因子**となる

[注] 一般に、N世代の場合に残る位相因子の数は

$$N \times N - (2N - 1) - N \times (N - 1) / 2$$

$$= (N - 2) \times (N - 1) / 2$$

[注] 量子力学の原理とCP非対称

ある過程の起こる確率Pは、振幅と呼ばれる量Aにより

$$P = |A|^2$$

で表せる。

ある過程に対する振幅が2通りあり(A_1 、 A_2 とする)、それぞれが結合定数 g_1 、 g_2 に比例している場合、その過程の起こる確率Pは

$$P = |g_1 A_1 + g_2 A_2|^2$$

と表せる。同様にしてその過程をCP変換した過程に対する確率P(CP)は

$$P(\text{CP}) = |(g_1)^* A_1 + (g_2)^* A_2|^2$$

と表せる(*は複素数に対する複素共役とよばれる演算; $z^* = a - bi$)。

したがってCP非対象は

$$P - P(\text{CP}) = \text{Im}(g_1 (g_2)^*) \times \text{Im}(A_1 (A_2)^*)$$

で与えられる。

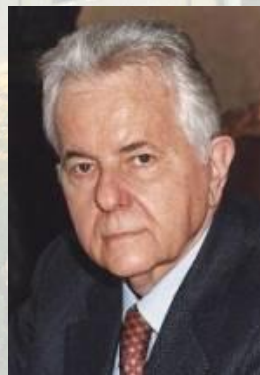


CP対称性を破るには相互作用の**結合定数が複素数**になることが必要

- ということで、3世代のクォークがあれば、標準理論でCP対称性を破ることができることがわかった
- 行列

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

はカビーボ・小林・益川行列と呼ばれ、標準理論の根幹をなしている



カビーボ



小林誠



益川敏英

小林・益川理論の検証

小林・益川理論を検証するには3世代のクォーク・レプトンが発見するだけでは不十分
→CPの破れが小林・益川理論の予言と一致することを示す必要がある

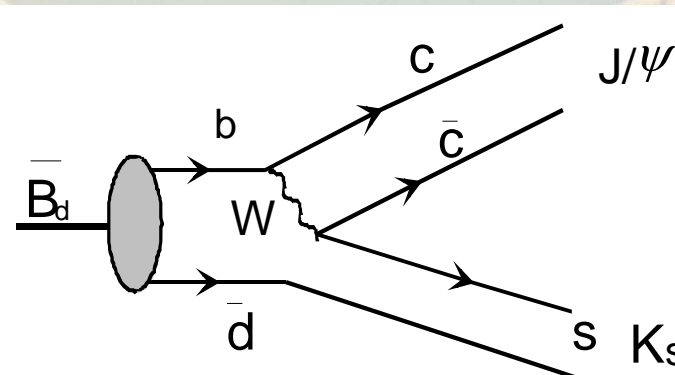
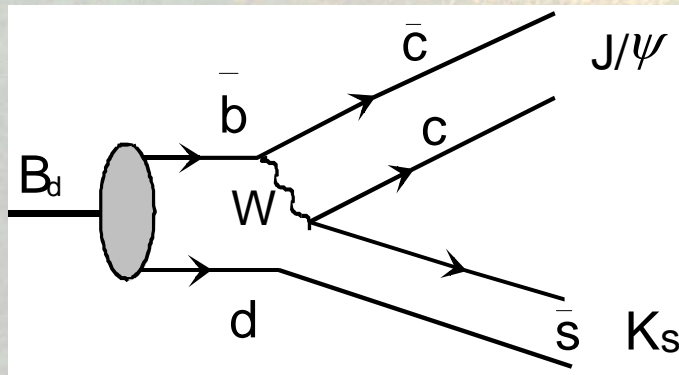
一方、 $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ におけるCP非対称が小さいのに比べ、B中間子 ($B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$) におけるCP非対称は大きくなり得ることが示されていた(1980年、カーター・三田)



カーター



三田一郎

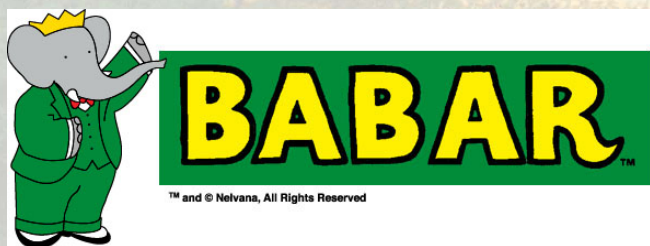


そこで大量にB中間子を生成して $B^0 \Leftrightarrow \bar{B}^0$ における非対称性を研究する実験が計画された

→これらはBファクトリーと呼ばれ、日本とアメリカの2か国で独立に開始された



日本：つくば市
KEK（高エネルギー加速器
研究機構）
加速器の名前：KEKB



アメリカ：カリフォルニア州
SLAC（スタンフォード線形
加速器センター）
加速器の名前：PEP-II



Belle実験グループ (日本)



KEKBは世界一の性能を達成した

■ 国際共同実験グループ

55の研究機関、12カ国、~300人の研究者。

Babar実験グループ(アメリ)



USA [32/223]

California Institute of Technology

UC, Irvine

UC, Los Angeles

UC, Riverside

UC, Santa Barbara

UC, Santa Cruz

U of Cincinnati

U of Colorado

Colorado State

Harvard U

U of Iowa

Iowa State U

Johns Hopkins U

LBNL

LLNL

U of Louisville

U of Maryland

U of Massachusetts, Amherst

MIT

U of Mississippi

SUNY, Albany

U of Notre Dame

Ohio State U

U of Oregon

Princeton U

SLAC

U of South Carolina

Stanford U

U of Tennessee

U of Texas at Austin

U of Texas at Dallas

U of Wisconsin

The **BABAR**
Collaboration
10 Countries
74 Institutions
459 Physicists

Canada [4/19]

University of British Columbia

McGill University

University de Montréal

University of Victoria

France [5/41]

LAPP, Annecy

LAL Orsay

LPNHE des Universités Paris VI et VII

Ecole Polytechnique, Laboratoire

Leprince-Ringuet

CEA, DAPNIA, CE-Saclay

Germany [6/28]

Ruhr Universitaet Bochum

Universitaet Dortmund

Technische Univeritaet Dresden

Universitaet Heidelberg

Universitaet Rostock

Universitaet Karlsruhe

Italy [12/83]

INFN, Bari

INFN, Ferrara

Lab. Nazionali di Frascati dell' INFN

INFN, Genova & Univ

INFN, Milano & Univ

INFN, Napoli & Univ

INFN, Padova & Univ

INFN, Pisa & Univ & Scuola

Normale Superiore

INFN, Perugia & Univ

INFN, Roma & Univ "La Sapienza"

INFN, Torino & Univ

INFN, Trieste & Univ

The Netherlands [1/2]

NIKHEF, Amsterdam

Norway [1/3]

U of Bergen

Russia [1/11]

Budker Institute, Novosibirsk

Spain [2/7]

IFAE-Barcelona

IFIC-Valencia

United Kingdom [10/43]

U of Birmingham

Brunel U

U of Edinburgh

U of Liverpool

Imperial College

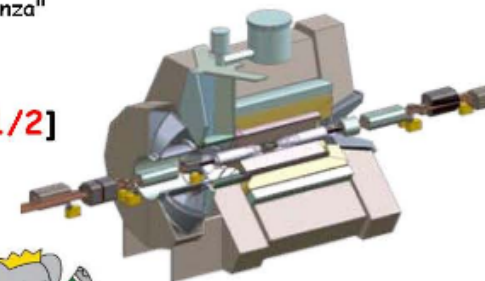
Queen Mary, U of London

U of London, Royal Holloway

U of Manchester

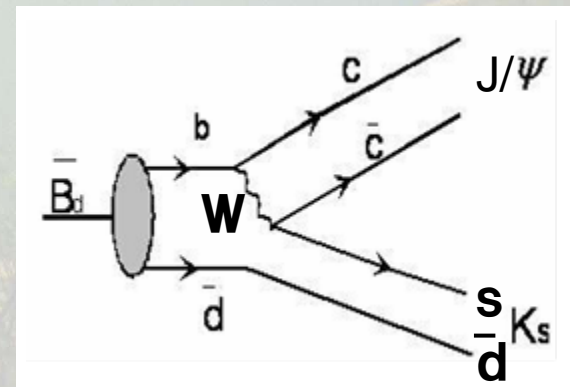
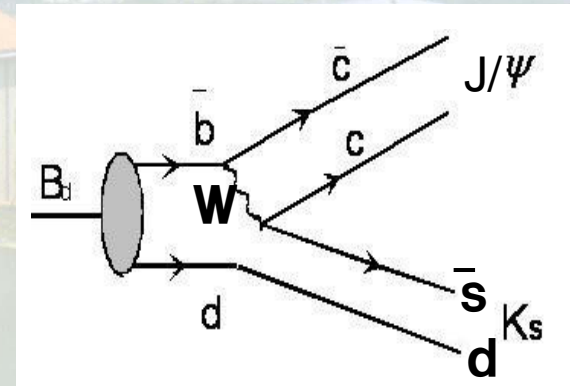
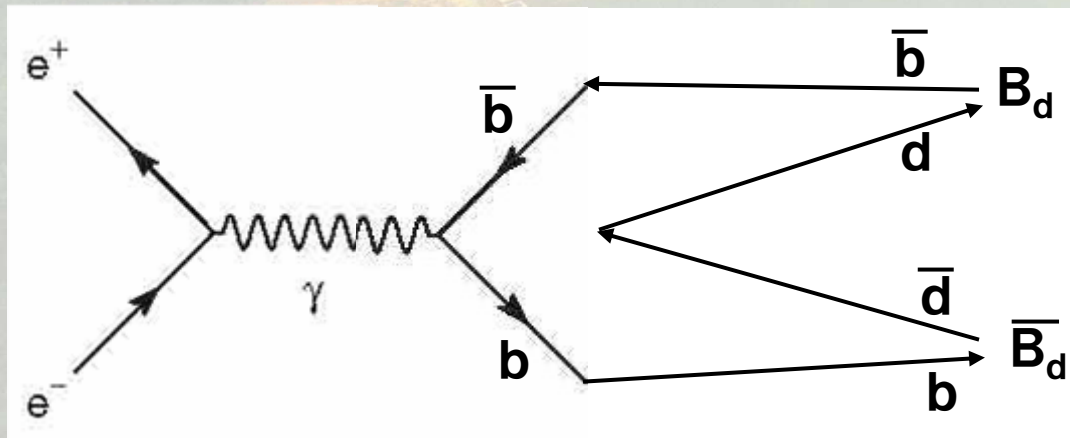
Rutherford Appleton Laboratory

U of Warwick



Bファクトリー

1. 電子 (e^-) と陽電子 (e^+) を衝突させて、光子 (γ) を生成させる
(エネルギーが小さいためZボゾンは生成されない)
2. bクォークの対を生成する
3. dクォークが対生成されてB中間子の対ができる
4. B中間子とその反粒子が崩壊する際の寿命を測定し、それらの間に差があるかをチェックする



時間の方向

B中間子によるCP非対称性の測定

最初B中間子であったものが時間 t にJ/ψ+K_Sに崩壊する確率と
最初反B中間子であったものが時間 t にJ/ψ+K_Sに崩壊する確率の
非対称性の時間依存性に対する小林・益川の予言は次の通り

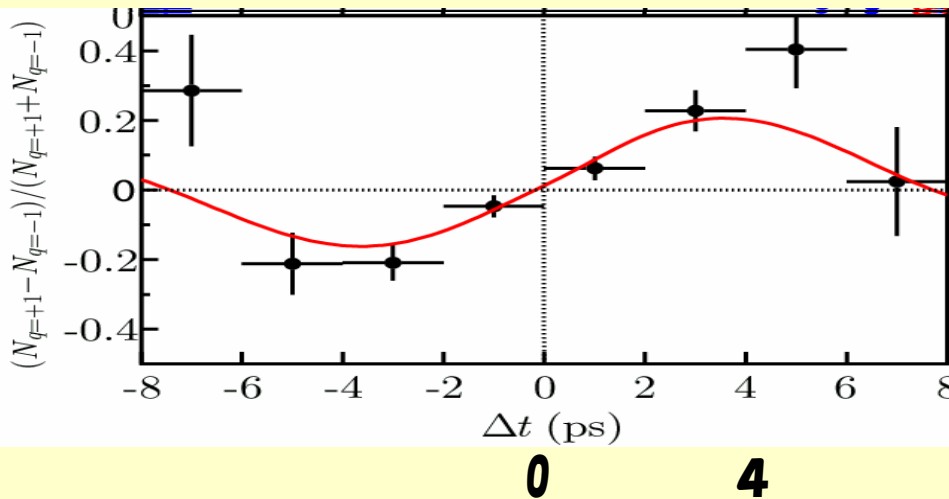
(Γ: イベント数×定数):

$$\frac{\Gamma(\bar{B}_d^0 \rightarrow J/\psi + K_S) - \Gamma(B_d^0 \rightarrow J/\psi + K_S)}{\Gamma(\bar{B}_d^0 \rightarrow J/\psi + K_S) + \Gamma(B_d^0 \rightarrow J/\psi + K_S)} = -\xi_f \sin 2\phi_1 \sin \Delta m t$$

$$\xi = \pm 1 \quad \text{for CP} = \pm 1, \quad \Delta m = m_1 - m_2$$

この項があると
CP非保存

Bファクトリーの実験の結果は確かに振動曲線になっていた:



1ピコ秒: 光の速さ
で 0.3 mm

8 (ピコ秒)

小林・益川理論の検証

BファクトリーにおいてさまざまなB中間子の崩壊モードでのCPの破れが測定された

→ 2002年にはBファクトリーの結果が出揃い、実験の誤差の範囲内で小林・益川理論の正しさが証明された

→ 2008年 小林・益川両氏ノーベル賞授賞

まとめ

- 弱い相互作用はパリティ・CP対称性の両方を破っている
- 標準理論において3世代以上のクォークが存在すればCP対称性の破れが可能
- 小林・益川理論の正しさはBelle(日本・つくば)とBabar(米・スタンフォード)のBファクトリーにおける実験結果により初めて証明された
- 宇宙における物質・反物質の非対称性はCP対称性によって説明できる可能性がある(理論は未完)