

### 37 「小林・益川理論」

そもそも小林・益川理論とは何か？

自然界には4種類の力、1重力、2電磁力、3強い核力、4弱い核力がある。小林・益川理論は、この中の「弱い核力」の対称性が破れていることを、理論的に証明したものである。

4種類の力の中で唯一「弱い核力」だけが非対称性を示す。対称性とは、電気の+と-を入れ換えても、鏡に映した状態（鏡像対称）でも力の法則が全く変わらないことをいう。

このことを易しく説明するのは至難の業だけれども、何とか説明してみたいと思う。

自然界の物事を突き詰めていくと、結局は分子や原子の話になるが、小林・益川理論はもっと小さくて根本的な粒子についての理論である。

この「対称性の破れ」は、現在われわれの住む地球の姿、生命の起源、生物の進化に関して重要な鍵を握っており、なぜ総てのものがこの“物質”で出来ているのかを解き明かすのに繋がっていく。

ここ1年に満たないわずかな間に、物理学や素粒子に関して立て続けに大きなニュースがあり、この分野への関心を集めつつある。新聞の切抜きを見ると、

① 2, 011年6月6日

#### 「“反水素原子”を世界最長時間16分以上に亘って閉じ込めることに成功」

水素原子は、陽子1個(+)と電子1個(-)で出来ている原子である。反水素原子は、反物質の反陽子1個(-)と陽電子1個(+)からなる原子である。反物質とは、電荷の符号(+か-)だけが異なり、それ以外の性質や質量などはすべて同じ粒子のことである。反物質は造り出すことは出来るが、すぐに消滅し通常状態ではこの地球上に存在しない。

② 2, 011年9月24日

#### 「ニュートリノが光速より1億分の6秒速い速度を持つことを観測」

以前、ニュートリノには質量がないとされていたが、質量を持つことが確認されている。質量を持つ粒子は光の速さを超えられないことが次の式によって分かる。

$m_0$  を静止質量、 $c$  を光速、 $v$  を動いている物体の速度とすると、動いている物体の質量  $m$  は、

$$m = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ である。 } v \text{ が } c \text{ より大きくなると } \sqrt{\quad} \text{ の中がマイナスになり、あり得ない。}$$

もしそれが正しいとすると現代物理学では説明できず、時間と空間に関する考え方を革命的に変える可能性がある。(アインシュタインの相対性理論が否定される)

③ 2, 011年12月14日

#### 「宇宙の物質を構成する素粒子に質量を与える“ヒッグス粒子”を99.98%の確率で発見」

ヒッグス粒子は質量起源の粒子といわれる。素粒子論では物質間に働く力を「ゲージ理論」(素粒子に働く力の相互作用を統一的に扱う理論)によって説明しようとしているが、ヒッグス粒子はその中核をなすもので、ここ数十年間発見が待たれていた。

④ 2, 012年1月16日

#### 「ハイゼンベルグの不確定性原理に欠陥」

ハイゼンベルグは、素粒子の「位置」と「運動量」は正確に決定することはできず、位置の誤差

を  $\Delta q$ 、運動量の誤差を  $\Delta p$  とすると、 $\Delta q \cdot \Delta p \geq h/4\pi$  となる。 $h$  はプランク定数（量子力学の基本定数： $6.626 \times 10^{-34}$  ジュール・秒）である。

不確定性原理は、素粒子の世界においては、測定に伴う誤差が避けられないことを示したものである。一方、ケナードは素粒子の位置は本来的な“ゆらぎ”があり、位置のゆらぎを  $\sigma(q)$ 、運動量のゆらぎを  $\sigma(p)$  とすると、 $\sigma(q) \cdot \sigma(p) \geq h/4\pi$  となるとした。これに対し、名古屋大学の小澤正直教授は、2003年それらを組み合わせた式  $\Delta q \cdot \Delta p + \sigma(q) \Delta p + \sigma(p) \Delta q \geq h/4\pi$  を提唱した。

このニュースは、中性子について位置と運動量に相当するスピンを測定したところ、 $\Delta q \cdot \Delta p$  の値が  $h/4\pi$  よりずっと小さく、限りなく0にできることが判明したことを述べたものである。

ハイゼンベルグの式は「物体の位置を測ったときの正しい値からのずれ  $\Delta q$  と、測定によって引き起こされる運動量の乱れ  $\Delta p$  はトレードオフ（あちらを立てればこちらが立たず）の関係にあり、位置を正確に測れば測るほど運動量の乱れは大きくなり、両方を正確に知ることはできない」ということを意味するものである。

これに対し、ケナードの式は「物体の位置のゆらぎ  $\sigma(q)$  と運動量のゆらぎ  $\sigma(p)$  は、ある一定以上に小さくすることはできない」ことを意味するものだ。位置も運動量も決まった値にはならず、ある幅でゆらいでおり、このゆらぎは物理量にもともと備わっているもので、測定とは関係なく存在するというものである。

今回の実験で実証された小澤の不等式は、“誤差と乱れ”そして“ゆらぎ”をきちんと区別した上で、ハイゼンベルグが追究した測定の限界を正しく語っている。

これによって量子力学が否定されたわけではなく、これまでは一部の専門家にしか知られていなかったことが、今回実験で実証されたことで、物理学界全体に知れ渡ったことが評価に値する。

さて、小林・益川理論である。

素粒子物理学は、実験によって確認された素粒子の振る舞いを、いかに合理的に説明できるのか？という観点から理論構築されているように、私には思える。

現在の理論は「標準模型」という理論であり、これまで高エネルギー加速器を使用して行われた素粒子の実験結果は、標準模型から予測されたものと一致している。

それでも4つの力のうち、3つの力の相互作用の説明はできるが、重力を含めた4つの力すべての説明はできていない。

すべての物質は原子から造られ、原子は原子核と電子から出来ている。原子核の中には陽子 (proton)、中性子 (neutron) がある。陽子と中性子を結び付けているのが、湯川英樹の予言した中間子で、その力は「強い核力」と呼ばれている。

物質を作っている究極の素粒子には、クォーク (quark) とレプトン (lepton)、そしてクォークとレプトンの間に働く力を媒介するゲージ粒子がある。陽子、中性子、中間子はすべてクォークによって造られている。

レプトンの語源は leptos (軽い) というギリシャ語で、代表的なものは電子とニュートリノである。実際にそれらは、クォークと比べて超軽量である。ゲージ粒子は、それぞれ4つの力に対応したフォトン (電磁力を媒介)、グルーオン (強い核力を媒介)、ウイークボソン (弱い核力を媒介)、グラビトン (重力を媒介)、それとヒッグス粒子 (質量起源の粒子) である。

陽子と中性子はそれぞれ3つのクォーク、中間子は2つのクォークからできている。

クォークの電荷は電子の電荷 (e) を基準に  $2e/3$ ,  $-1e/3$  といった電荷を持ち、グルーオン (gluon: 糊) によって結び付けられている。(図1参照) 同時にクォークは“色”(Color 赤, 青, 緑) を持ち、グルーオンはその色に作用して相互作用(強い核力)が生まれる。さらにクォークは“香り”(Flavor u, d, s, c, b, t) を持ち、ウィークボソンはその香りに作用して相互作用(弱い核力)が生まれる。すべての物理現象は、電荷の+-反転((Charge: C変換), 鏡像反転(Parity: P変換)に対して関係なく成り立つ普遍性があり、これがCP対称性である。

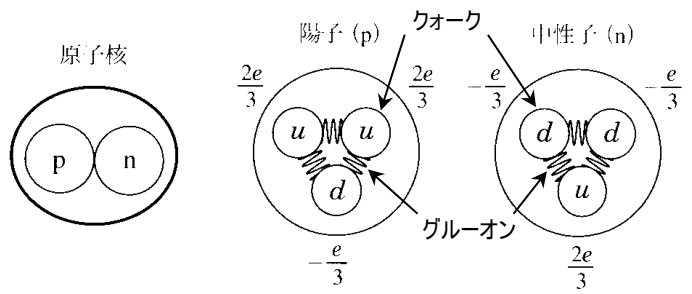


図1 原子核 陽子 中性子

しかし、中間子の中で中性K中間子が崩壊する時に、その中のごくわずかながCP対称性が保存されないことが1, 964年に発見された。

小林・益川理論が発表された1, 973年頃は、陽子, 中性子, 中間子の構成を説明するために、最低3種類のクォークが必要であることが知られており、その時点では3種類のクォークしか発見されていないかった。

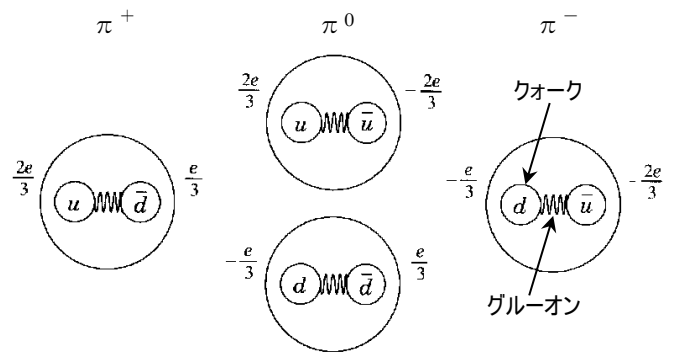


図2 パイ中間子

ゲージ理論は、物質を結合させる力を統一的に説明するものであるが、それはどんなものだろうか? ゲージ理論の原則は次のとおり。

①電荷量はどんな過程においても保存される(増えたり減ったりしない)

②力を伝える粒子(ゲージ粒子)の質量は“0”でなければならない。

ゲージ理論による弱い核力の説明はこんな説明である。

図3は「中性子」が「電子」と「反電子ニュートリノ」を放出して、陽子になるβ崩壊を示したものである。

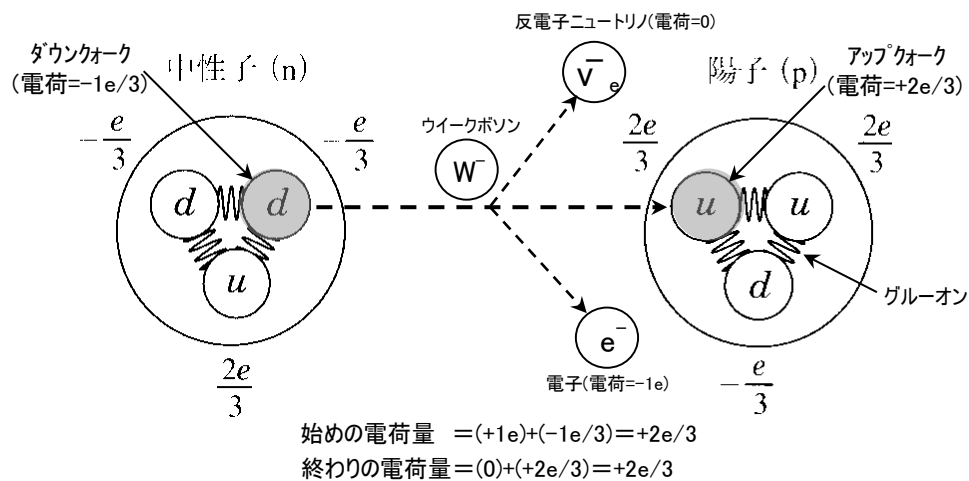


図3 β崩壊説明図

中性子は $-1e/3$ の電荷を持つd(ダウン)クォーク2つと、 $+2e/3$ の電荷を持つu(アップ)クォーク1つでできている。電荷の合計は、中性子であるから $(+2e/3)+(-1e/3)\times 2=0$ である。

この中性子が $W^-$ というウイークボソンの作用により、反電子ニュートリノ( $\bar{\nu}_e$ )と電子( $-e$ )を放出して、電荷 $-1e/3$ のdクォークから電荷 $+2e/3$ のuクォークに変わるのが $\beta$ 崩壊のメカニズムである。

このとき電荷の合計は、 $(+2e/3)\times 2+(-1e/3)+(-1e)=0$ となり、始めと終わりの電荷は変わらない。

中性子と陽子が3つのクォークからできているのに対し、中間子は「クォーク」と「反クォーク(電荷だけが反対の粒子)」からできている。(図2参照)

中間子の寿命は短く不安定である。そして、中性K中間子( $K^0$ 中間子)が崩壊する過程で、CP対称性が破れていることがわかったのである。

$K^0$ 中間子はdクォークと反s(ストレンジ)クォーク( $\bar{s}$ )で構成され、寿命が違う2種類の粒子がある。1つは寿命の短い $K_S^0$ (ショート: $0.9\times 10^{-10}$ 秒)と、寿命の長い $K_L^0$ (ロング: $0.5\times 10^{-7}$ 秒)である。 $K_S^0$ 中間子は崩壊すると、dクォークと反dクォーク( $\bar{d}$ )で造られた $\pi^0(d+\bar{d})$ 中間子2個、あるいは、uクォークと反dクォークで造られた $\pi^+(u+\bar{d})$ 中間子1個と、dクォークと反uクォークで造られた $\pi^-(\bar{u}+d)$ 中間子1個になる。このときCP変換は1である。(P変換=1, C変換=不変)

$$K_S^0 \rightarrow \pi^0(d+\bar{d}) + \pi^0(d+\bar{d})$$

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+(u+\bar{d}) + \pi^-(\bar{u}+d)$$

一方、 $K_L^0$ 中間子は崩壊すると $\pi^0(d+\bar{d})$ 中間子3個(あるいは、 $\pi^0(d+\bar{d})$ ,  $\pi^+(u+\bar{d})$ ,  $\pi^-(\bar{u}+d)$ 中間子各1個)になる。このとき、CP変換は $-1$ である。(P変換= $-1$ , C変換=不変)

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0(d+\bar{d}) + \pi^0(d+\bar{d}) + \pi^0(d+\bar{d})$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0(d+\bar{d}) + \pi^+(u+\bar{d}) + \pi^-(\bar{u}+d)$$

ところが、 $K_L^0$ 中間子が崩壊するとき1/1,000程度が、 $K_S^0$ 中間子と同じように $\pi^+$ と $\pi^-$ の中間子2個になる場合があることが発見された。中間子におけるCP変換は、粒子と反粒子を入れ換える変換であり、これを理論的に説明したのが小林・益川理論というわけだ。

当時クォークは第1世代のクォーク2個(u, d)、第2世代のクォーク1個(s)の3つだけであり、クォークが3世代6種類あるという予想は非常に大胆なものだった。

$K_L^0$ 中間子( $d+\bar{s}$ )が崩壊するとき $\bar{s}$ クォークは1,000回に1回の割合で、一時的に第3世代の $\bar{t}$ (トップ)クォークと $W^+$ ボソンの組に変化する。 $\bar{s} \rightarrow \bar{t} + W^+ \rightarrow \bar{d}$ (反 $K_L^0$ 中間子 $[\bar{K}_L^0]$ で書けば $s \rightarrow t + W^- \rightarrow d$ となる。(図4参照)。

tクォークは、小林・益川理論発表の21年後1994年、最後に発見されたクォークである。

$\bar{t}$ クォークから $\bar{d}$ クォークになる過程でCP対称性が破れる。これが、 $K_L^0$ 中間子崩壊と反 $K_L^0$ 中間子崩壊の間にわずかな違いを作り、CP対称性の破れの原因となっていたのである。

sクォークからエネルギーの大きなtクォークに変わる過程は量子トンネル効果という量子力学特有の現象によるものである。(説明は省略)

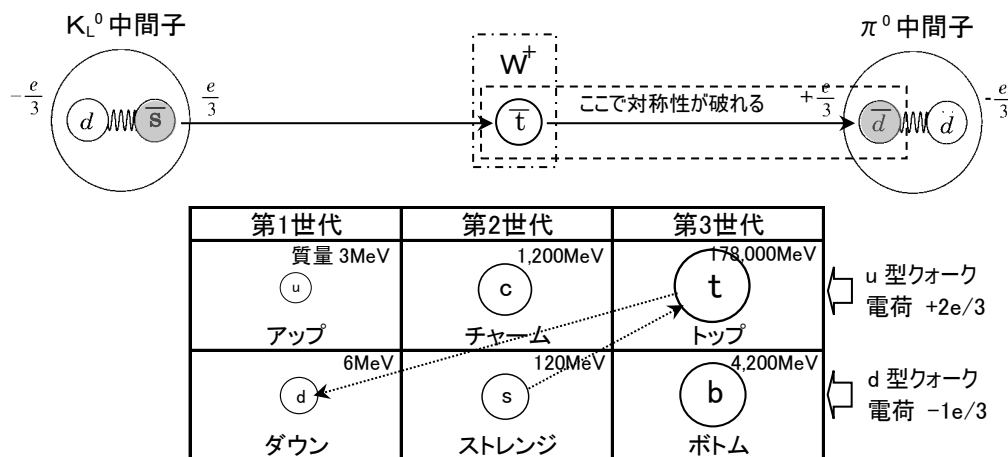


図4 3世代6種類のクォーク

(すべてのクォークに対して電荷だけが反対の反クォークがある)

図4において、上段が電荷 $+2e/3$ のu型クォークu, c, t、下段が電荷 $-1e/3$ のd型クォークd, s, bである。クォークの世界では、いつまでも同じ粒子でいることはできず他の粒子へと次々と姿を変えてゆく。

弱い力の相互作用において、 $W^+$ あるいは $W^-$ ボソンを交換すると、u型クォークはd型クォークに、またその逆も起こる。このときクォークは同一世代間への遷移がほとんどだが、ごくわずかに他の世代への遷移が起こる。これをクォークの世代間混合とっている。

クォークは物質に質量を与えるヒッグス機構により、図4に示すような質量 MeV (メガ・エレクトロン・ボルト:  $E = mc^2$ で質量を表したもの  $m = E/c^2 = \text{MeV}/c^2$ ) を持っている。

世代間混合があるということは、クォークの質量に「固有状態質量」と「弱い相互作用時の質量」が異なることを示しており、第1, 第2世代に対して固有状態の質量をd, s、相互作用の時の質量を $d'$ ,  $s'$  とすると①式のように行列式で表せる。

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} d \\ s \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{-----①}$$

クォークの世代間混合を、2世代で考えたものがカビボ理論で「V」をカビボ行列という。カビボはイタリアの理論物理学者で、例えばここで $V_{ud}$ はuクォークが $W^-$ を吸収してdクォークに変わる確率を表す。相互作用時の質量 $d'$ ,  $s'$ は、それぞれdとsが混合しているものと考え、Vはその混合比率を表すものとも考えることもできる。

ここで、 $V_{ud}$ ,  $V_{us}$ 及び $V_{cd}$ ,  $V_{cs}$ は確率なので、 $V_{ud}^2 + V_{us}^2 = 1$ ,  $V_{cd}^2 + V_{cs}^2 = 1$ である。 $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$ を用いて、 $V_{ud} = \cos\theta_1$ ,  $V_{us} = \sin\theta_1$ ,  $V_{cd} = \cos\theta_2$ ,  $V_{cs} = \sin\theta_2$ とすると、結局 $\theta_1 = \theta_2$ となり、それを $\theta$ と表すと、

$$V = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{と書ける。ここで、}\theta\text{はクォークの根号比率を角度に置き換えた形となっており}$$

り、 $\theta$ をカビボ角という。

この2世代にわたる遷移に対するカビボ理論では、CP対称性の破れを説明することができない。

そこで、まだ未発見の3世代目のクォークが存在し、それらを含めた世代間の遷移を考えることによ

って、 $K^0$  中間子におけるCP対称性の破れを、標準モデルの枠組みの中で説明できるとして提唱されたのが小林・益川理論なのである。

2×2のカビボ行列を3×3の行列に拡大し、クォーク間の混合比率を示す角度のほかに、位相の自由度を含ませるために複素数を導入したのが、小林・益川理論のアイデアのポイントである。

クォークの生成・消滅を複素数で表すことによって、複素数どうしの掛け算は回転に、粒子・反粒子の入れ換えは複素数の共役を取る（複素数  $a + bi$  の虚数部の符号を反転させ  $a - bi$  にする）ことに対応させることができる。行列式の中の虚数を含む項は、演算の結果で形が変わりうるので、+-符号反転によって虚数項が消えない場合があり、これがCP対称性の破れを証明することになるからである。

① 式を拡張して、3世代に適用したものを小林・益川行列といい、次のように表される。

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

Vを具体的に書き表すと次のようになる。（途中の計算は省略 2世代ではカビボ角は1つのみであったが、3世代になると  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{31}$  の3つになる）

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\phi} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\phi} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{----- ②}$$

第1世代                      第2世代+複素位相                      第3世代

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_{12} \cos \theta_{13} & \sin \theta_{12} \cos \theta_{13} & e^{-i\phi} \sin \theta_{13} \\ -\sin \theta_{12} \cos \theta_{23} - \cos \theta_{12} \sin \theta_{23} \sin \theta_{13} e^{i\phi} & -\cos \theta_{12} \cos \theta_{23} - \sin \theta_{12} \sin \theta_{23} \sin \theta_{13} e^{i\phi} & \sin \theta_{23} \cos \theta_{13} \\ \sin \theta_{12} \sin \theta_{23} - \cos \theta_{12} \cos \theta_{23} \sin \theta_{13} e^{i\phi} & -\cos \theta_{12} \sin \theta_{23} - \sin \theta_{12} \cos \theta_{23} \sin \theta_{13} e^{i\phi} & \cos \theta_{23} \cos \theta_{13} \end{bmatrix}$$

② 式の第2項に複素位相を含めたのは、第1世代から第3世代 (u→b, d→t) への遷移に対して、CP対称性を破る条件となる位相の自由度を与えたものである。位相の自由度とは、同時に崩壊するのではなく、崩壊するまでに時間的な遅れが存在すると考えればよい。

これからは数学のテクニクである。行列に関する知識を駆使する。この3×3の行列は、遷移確率の合計が1となる原則から、ユニタリー行列でなければならない。

ユニタリー行列とは、複素数を含む正方行列（行と列の数が同じもの）で、 $V \cdot V^* = 1$  ( $V^*$  は共役を示し、行列の中の複素数に対して虚数部の+-を入れ替えたもの) を満たすものをいう。

ユニタリー行列では、条件  $V \cdot V^* = 1$  の中の1つとして重要な関係式である次式が成り立つ。

$$V_{td} \cdot V_{tb}^* + V_{cd} \cdot V_{cb}^* + V_{ud} \cdot V_{ub}^* = 0$$

$V_{td} \cdot V_{tb}^*$ ,  $V_{cd} \cdot V_{cb}^*$ ,  $V_{ud} \cdot V_{ub}^*$  は、複素平面上で各々を辺とする三角形を示し、これをユニタリー三角形と呼んでいる。

三角形の内角  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  のうち1つでも0でなければ小林・益川行列が複素位相を持つことを意味し、CP対称性が破れていることになる。つまり粒子への遷移と反粒子への遷移が異なり、CP対称性の破れを引き起こす。

小林・益川行列の各要素は実験により求められ、その値

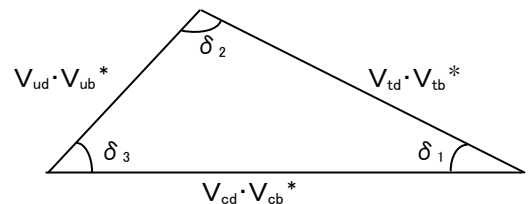


図5 ユニタリー三角形

は90%の信頼度で式③のようになる。この中で、第1世代から第3世代への遷移確率を示す  $V_{ub}$  と  $V_{td}$  は非常に小さい値となっている。(ユニタリ行列なので対角項はほぼ近い値である)

$$= \begin{pmatrix} 0.9745 \sim 0.9760 & 0.217 \sim 0.224 & \boxed{0.0018 \sim 0.0045} \\ 0.217 \sim 0.224 & 0.9737 \sim 0.9753 & 0.036 \sim 0.042 \\ \boxed{0.004 \sim 0.013} & 0.035 \sim 0.042 & (0.9991 \sim 0.9994) \end{pmatrix} \quad \text{③}$$

$V_{ub}$  (top-right),  $V_{td}$  (bottom-left), 対角項 (diagonal)

小林・益川は「標準模型」の枠組みの中で、CP対称性の破れの説明に成功した。CP対称性が破れるためには、クォークが3世代6種類あることが必要なことを示し、最低6個のクォークが存在することを予言した。

そして、1974年には第2世代c(チャーム)クォーク、1977年には第3世代b(ボトム)クォーク、1994年に同じく第3世代6つめのt(トップ)クォークが発見された。

このCP対称性の破れは、2001年  $B^0$  中間子の崩壊実験により実験データで証明された。第3世代のbクォークを含む  $B^0$  中間子は、そのまま崩壊する場合と一度混合して反  $B^0$  中間子になってから崩壊するケースがある。

お互いに干渉し影響を及ぼしあうことによって、CP対称性の破れが大きく、 $B^0$  中間子と反  $B^0$  中間子の崩壊確率の差が計測によって確認できるため、実験的に証明しやすいことがわかっており、その証明が期待されていたものである。

図6は  $B^0$  中間子の崩壊点を基準にしたとき、反  $B^0$  中間子が崩壊するまでにかかる時間分布を示したものである。

CPが保存されていて、 $B^0$  中間子と反  $B^0$  中間子に違いがなければ2つの曲線は完全に重なる。このように、崩壊時間の差が実験データによって示され、小林・益川理論の正しいことが証明された。

論文発表から35年、CP対称性の破れの証明に伴い予言された6種類のクォーク全てが発見され、小林・益川氏がノーベル物理学賞を受賞したことはまだ記憶に新しい。

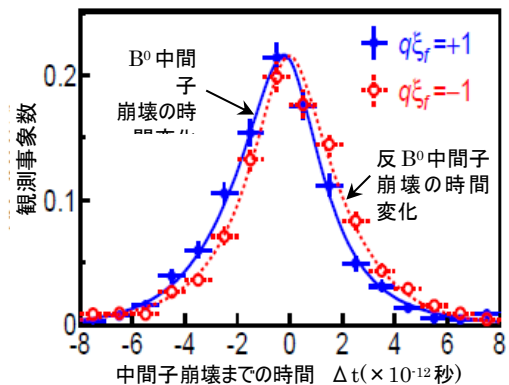


図6  $B^0$  中間子によるCP対称性の破れを示すグラフ

スーパーカミオカンデ(神岡核子崩壊実験)では、ニュートリノの到来方向がわかる。大気ニュートリノ(陽子やヘリウムの原子核と大気分子が衝突してできるミューニュートリノ  $[\nu_\mu]$  と電子ニュートリノ  $[\nu_e]$ )のうち  $\nu_\mu$  は、日本で観測して上空から到来するものよりも、日本の裏側で発生して到着する  $\nu_\mu$  の方が数が少なくなっていることが、スーパーカミオカンデにおいて発見された。これは、地球の直径分だけ長い距離を走ったニュートリノが、他の種類のニュートリノに変化していることを示している。この発見は、小柴博士研究チームの偉業であり、この発見によってニュートリノに質量があることが明らかになった。これで、ニュートリノは光速を超えることができないことになる。

ニュートリノに質量があるという事実は、標準模型(ニュートリノは質量を持たない)から大統一理

論へ向かう第一歩であり、物理学の歴史の中で非常に大きな転換ポイントといえる。

日本の素粒子物理学は、理論、実験とも世界のトップレベルを走っていることがよくわかる。

(2012. 4. 24)