

## CP の破れ—新しい物理を探る

三田一郎\*

### CP Violation - A Search for New Physics

A. I. Sanda

平成14年秋の紫綬褒章

2004年 J.J. Sakurai 賞 (米国物理学会賞)

その他

#### 1 緒言

人間は昔から、夜空を見上げながら、わたしたちはなぜこの世に存在するのだろうか、この宇宙はどのようにしてできたのだろうかと疑問を持ち続けてきた。また、わたしたちは何からできているのだろうか。そもそも物質ってどのようにできているのだろうかと疑問を持ち、分子、原子、原子核、陽子、クォーク (陽子や中間子を構成する基本粒子。) など、最も基本的な物質は何かと追求してきた。

この二つの基本的疑問を統一的に考えることが出来る。つまり、この世の中で一番大きいもの「宇宙」と一番小さいもの「素粒子」の両者を総合的に理解できる可能性がある。それが素粒子論的ビッグバン宇宙論である。

後から詳しく説明するが、ごく簡単な考え方から素粒子論は、それぞれの素粒子に反素粒子と呼ばれる相棒が存在することを予言する。陽子には反陽子、中性子には反中性子、電子には陽電子という相棒である。これら反粒子は粒子と同じ質量、同じ寿命、同じスピン (素粒子は駒のように回転していて角運動量をもつ。この角運動量をスピンと呼ぶ。) をもっているが、電荷など、あらゆる量子数 (電荷や他に様々な性質を量子数と呼ぶ。) の符号が反対なのである。

さらに、この反粒子が存在することによって

エネルギー → 陽子+反陽子

など、エネルギーが同量の物質と反物質に遷移することが予言される。この反応はアインシュタインの有名な質

量とエネルギーの関係式  $E = mc^2$  によって、終状態のエネルギーが始状態のエネルギーと等しい。さらに、粒子と反粒子は反対の量子数を持つがゆえに、終状態である同量の粒子と反粒子の量子数の和はゼロになり、エネルギーや量子数は始状態と等しい。

わたしたちの周りの星や銀河も、宇宙に存在する全ての物質はエネルギーの塊から出来たと考えられる。つまり、ビッグバン宇宙論によると、現在の宇宙は針の先より、もっともっと小さな球の中に莫大なエネルギーが押し込まれていて、その状態が爆発して誕生した。宇宙が膨張するにつれて温度が下がり、エネルギーが物質に変化し、137億年後に、現在我々が住む宇宙になったわけだ。ここで述べた素粒子論の予言とビッグバン宇宙論はただの仮説ではなく、全て実験で証明されている。

この初期宇宙の状態を考えてみよう。初期にさかのほればさかのほるほど宇宙の体積が小さくなるので、熱力学によると温度が高い状態であり、宇宙を構成する粒子のエネルギーが高くなる。粒子は小さな空間に閉じ込められて、すさまじいエネルギーで運動しているので、お互いに衝突し、原子核はさらに小さい陽子と中性子に壊れてしまう。このようにして生成された陽子や中性子も、さらに基本粒子 (クォーク) に壊れてしまう。

現在の宇宙に存在する全てのエネルギーがこの小さな球の中に閉じこめられたときの温度は、わたしたちの考えうる最高の温度である。さらに、この最高の温度の状態が存在する粒子と反粒子こそ最も基本的な粒子であり、これらの粒子がクォークなど全ての物質を構成する。さらに、この最も基本的な粒子と反粒子が運動して出来ている初期宇宙の究極な状態を記述する法則こそ、最も基本的な物理学であり、わたしたちが探求する理論である。

現在わたしたちが理解している素粒子論の有効領域は、大爆発した100億分の1秒までで、それ以前を記述する物理は解っていない。これは究極な物理学に比べて極めて低い温度の素粒子論であり、この宇宙を完全に理解す

\* 教授 物理教室

Professor of Physics Department of Physics

るには役に立たない。もっと高い温度で有効な素粒子論を追求するには何か実験からのヒントが必要である。このヒントを与えてくれるのが初期宇宙の観測である。最近の例として、WMAPで観測された負のエネルギー密度は我々の理解するに物理を超えた理論を構築する必要がある。

ここではもっと具体的な課題を追求する。わたしたちがこの宇宙に存在するという観測事実が基本的素粒子論にたどり着くのに大きなヒントを与えてくれる。仮に、素粒子論が物質と反物質を同じように扱うとしよう。つまり、反粒子に作用するあらゆる力は、粒子に作用する力と全く同じだとする。この場合、エネルギーは同量の宇宙と反宇宙に変化するもので、もし生成された宇宙と反宇宙の物理法則が全く同じであったら、

- (1) 同量の銀河と反銀河が存在する、
- (2) お互いに消滅してエネルギーの宇宙に戻る、

のどちらかである。

奇妙なことに銀河と銀河の衝突は観測されているが、反銀河と銀河の衝突は、今だかつて観測されていない。もし銀河と反銀河が衝突すれば、近づいた部分は互いに消滅し合い、夜空が明るくなるほどエネルギーが放出されるので絶対見逃せない。従って、(1)は除外される。更に、わたしたちが存在するのだから(2)も除外される。つまり、上記のごく簡単な観測事実から仮定した「素粒子論が物質と反物質を同じように扱うとしよう」が間違っていることになる。

「素粒子論が物質と反物質を同じように扱わない」ことをCP対称性の破れ(CPは荷電共役×パリティを意味する。ここでは粒子の世界を反粒子の世界に変換させることと理解していただきたい。)という。上の議論で解ったことは、究極な素粒子論はCP対称性を破る。

わたしは究極的素粒子論の探究には、まずわたしたちが理解している素粒子論のCP対称性の破れを研究することが不可欠と考え、30年前にこの研究を始めた。1980年に、当時未発見であったB中間子の崩壊で15%以上のCP対称性の破れが存在することを予言した。つまり、Bとその反粒子 $\bar{B}$ の振舞いには15%以上のずれがあると予言した。K中間子のCP対称性の破れは既に発見されていたが、0.2%と極めて小さかったのでこの予言は極めて画期的なものであった。

わたしは1980年から16年間、この予言を確認する可能性のある世界の研究所を周り、この研究の重要さと面白

さを述べ伝えた。当時B中間子のことは何も知られておらず(1980年には発見もされておらず)、わたしの計算も物理学者としての直感で行った要素が多かった。何百億円もの大型予算を一人の直感に賭けるわけにはいかない。7年間は完全に無視された。1987年ごろからわたしの直感が次々と的中していることが明確になり、わたしの話をまじめに聞いてくれるようになった。そしてついに1996年には米国ではスタンフォード加速器研究機構(SLAC)と、我が国では高エネルギー物理学研究所(KEK)でこの研究に必要な新加速器の建設が始まった。それ以降、我国と米国の研究者はすざましい競争を続けてきた。両国合わせて700億円の予算をつぎ込み、2000年には同時にわたしが予言したB中間子における70%のCP対称性の破れを発見した。

この3年間の結果を見てみると驚くべきことに、KEKの加速器はSLACの加速器より強度が2倍もあることが明確になった。我国が最先端技術を必要とする最先端物理学の研究で世界を相手に勝利をおさめたことは明らかである。

我が国では日本人の選手がオリンピックで金メダルを取ると、国を挙げて大喜びするが、この研究で日本が全世界を相手に勝利したことは、オリンピックの勝利と比べ物にならないほど大きいものである。国民1人あたり400円もの貴重な税金を使って勝ち得た勝利であり、大いに喜んでいただきたい。

この論文を出筆するにあたり、幅広い分野の理系専門家に理解していただくために、込み入った専門的な素粒子論の議論は避け、国際研究の様々なエピソードも含めて、この研究を理解していただいたら幸いと考えている。なお、詳しいことは参考文献[1]を参照していただきたい。

## 2 反粒子は平方根から出る

「われわれの知る素粒子は、それぞれ反粒子という相棒をもっている」と上で述べたが、ここでは、物理法則からどのようにして反粒子の存在が導かれるかを説明する。

### 2.1 $E = mc^2$

ニュートン力学では、質量 $m$ の粒子が速度 $v$ で運動した場合、その物質の運動エネルギーは

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

と学んだ。でもアインシュタインの式では停止している物質も、質量を持つ限りエネルギーを持つ。質量  $m$  をもつ粒子のエネルギー ( $E$ ) と運動量 ( $p$ ) 光速 ( $c$ ) の関係は

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (2)$$

である。

わたしたちの生活に限れば反物質は縁が薄い存在である。日常生活に必要な物理法則は、反物質が有っても無くても変わらないからである。このこともアインシュタインの式から導かれる。ビリヤードボールの運動を考えよう。いくらわたしたちがビリヤードボールを強くたたいても速度  $v$  は光速  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$  に比べれば圧倒的に小さい ( $v \ll c, p = mv \ll mc$ )。したがって、式 (2) は

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \sqrt{1 + \frac{p^2}{m^2 c^2}} \\ &\approx mc^2 + \frac{p^2}{2m} \\ &= mc^2 + \frac{1}{2} mv^2 \end{aligned} \quad (3)$$

と近似される。ニュートン力学 (古典力学) では物質の質量は変化しないので、質量のエネルギー  $mc^2$  は運動に影響がなく、ビリヤードボールの運動を考えるには運動エネルギー

$$E_{\text{古典}} = \frac{1}{2} mv^2 \quad (4)$$

のみ考慮すればよい。

このようにして、古典力学の運動は相対論的力学の特殊な場合の近似であることがわかる。エネルギーの低い領域 ( $v \ll c$ ) では、式 (2) の代わりに式 (3) を使える。

素粒子論は粒子の生成などを扱い、古典力学を超えるので式 (2) を使う必要がある。式 (2) で第2項を無視できないとき、式 (4) と本質的違いがある。式 (2) は平方根で表されており、平方根をとれば解は二つある。

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \quad (5)$$

この負のエネルギーの状態はなにを意味するのか。解らないものは無視するのが人間的反応だが、このようなパズルを最後まで追及すると大きな発見につながることもある。この負のエネルギーの状態こそが反粒子の存在を意味する。

式 (3) では  $\pm$  の符号を考える必要がない。この場合  $mc^2$  の項が  $\frac{1}{2} mv^2$  よりあまりにも大きく、どちらの符号を選んでも同じニュートン力学が導かれることが簡単に

示せる。式 (5) では平方根の中の2項が同じように寄与すると負のエネルギーの解と正のエネルギーの解が互いに影響し合い、物理学が変更される。

電流の例を考えてみよう。電流は乾電池の正の電極から負の電極に正の電荷が流れると定義されているが、実は電子が逆さまに流れていることは現在の常識である。伝導体には電子が占拠できる穴を持った原子が存在する。電子は電圧を感じ、その穴をつたわって電圧の低いほうから高いほうに運動する。この運動はあたかも電子の反対の電荷を持った穴が電圧の高いほうから低いほうに運動するように考えられる。

電流の例から分かるように、もし粒子の電荷を  $e$  とし、穴を反粒子と仮定したら反粒子の電荷はその反対  $-e$  となる。

上記の議論をまとめる。式 (5) では平方根を取ったとき  $\pm$  サインが出るが、負のサインは意味が無いといって捨ててしまわず、負のエネルギーの状態がどのような物理的意味をもつか、真剣に考えることによって反粒子の存在を予言することが出来た。負の解は粒子と同じ質量を持つが、あらゆる性質が全く正反対の粒子が存在することを予言する。この粒子を反粒子とよぶ。

このようなごく簡単な解析で反粒子の存在が予言された。そして電子の反粒子、陽電子が宇宙線の中で観測され、この理論が実験で確認された。

### 3 基本粒子とは何んだらう

基本粒子という概念はそのときの物を壊す能力に依存する。昔、原子の構造を研究出来なかつたころは原子が基本粒子であった。原子のイオン化されるのを観測可能になったとき、原子核と電子が基本粒子となった。現在観測されている全ての素粒子は6個のクォーク

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ d_\alpha \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c_\alpha \\ s_\alpha \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t_\alpha \\ b_\alpha \end{pmatrix} \quad (6)$$

と、6個のレプトン

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \quad (7)$$

で構成されている。

3 グループのクォークを1世代 (up, down), 2世代 (charm, strange), 3世代 (top, bottom) とよぶ。これらのクォークは「色」、(ここでは  $\alpha =$  青, 赤, 緑色と記述する) という量子数を持っている。レプトンは色をもたない。

クォーク  $u, c, t$  の電荷は  $+\frac{2}{3}e$  であり、 $d, s, b$  の電荷は  $-\frac{1}{3}e$  である。さらに、レプトン  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  の電荷は 0、 $e, \mu, \tau$  の電荷は  $-e$  である。

レプトンは全て実験で発見されているが電荷が  $+\frac{2}{3}e$  や  $-\frac{1}{3}e$  をもつ粒子は一切発見されていない。

中間子はクォークと反クォークの結合状態であり、クォークと反クォークの色が帳消されるので、無色の中間子は実験で発見される。中間子を構成するクォークと反クォークを引っ張ってクォークだけを取り出す実験を考えよう。

もし N 極と S 極で成り立つ磁石を引っ張って N 極のみを取り出そうとすると、それは無理なことがわかる。半分の長さの二つの磁石ができてしまう。つまり単磁極は存在しない。色の量子数を持つ粒子を単独で取り出そうとすると、この現象と同じことが起き、わたしたちが観測できるエネルギー領域ではクォークは独自で存在できない。理論的に解析すると、エネルギーが高い領域ではクォークと反クォークを結ぶ力が弱くなり、クォークと反クォークは独自で存在することも予言する。

### 4 K 中間子

CP 対称性は初めて K 中間子の崩壊で発見された。 $K^0$  中間子とは  $d$  クォークと  $\bar{s}$  反クォークの結合状態であり、 $\bar{K}^0$  中間子は  $\bar{d}$  反クォークと  $s$  クォークの結合状態である。つまり、 $K^0$  中間子の反粒子は  $\bar{K}^0$  である。素粒子物理学で最も面白い現象の一つとして

$$K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0 \tag{8}$$

遷移がある。つまり、 $K^0$  中間子が時間がたつとその反粒子  $\bar{K}^0$  中間子に遷移してしまうのである。ここでは説明しないが、 $K^0$  と  $\bar{K}^0$  の終状態がレプトンを含む崩壊ではかならず

$$\begin{aligned} K^0 &\rightarrow l^+ \nu \pi^-, \\ \bar{K}^0 &\rightarrow l^- \bar{\nu} \pi^+, \end{aligned} \tag{9}$$

( $l = \mu$  か  $e$ ) のように  $K^0$  は  $\mu^+$  か  $e^+$ 、 $\bar{K}^0$  は  $\mu^-$  か  $e^-$  を含む終状態に崩壊する。従って放出される  $\mu^\pm$  を測定すれば  $K^0$  の崩壊か  $\bar{K}^0$  の崩壊かが明確にわかる。例えば電子と電子の反粒子である陽電子が消滅するとエネルギーになる。そのエネルギーはある確立で粒子と反粒子の対  $K^0 \bar{K}^0$  に遷移する。もし  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  の遷移があれば

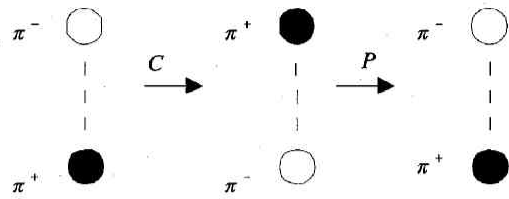


図 1:

$K^0 \bar{K}^0 \rightarrow K^0 K^0, \bar{K} \bar{K}^0$  の遷移が起こり、

$$e^+ e^- \rightarrow \text{エネルギー} \rightarrow K^0 \bar{K}^0 \rightarrow \mu^\pm \mu^\pm \pi^+ \pi^+ \tag{10}$$

が観測される。この反応は同じ電荷を持つ  $\mu$  中間子が 2 個放出されているので、 $2\mu^+$  の場合 2 個の  $K^0$ 、 $2\mu^-$  の場合 2 個の  $\bar{K}^0$  が生成されたことを意味している。従ってこの終状態は式 (8) のような遷移があった証拠である。式 (8) はクォークの遷移として

$$K^0 = d\bar{s} \rightarrow c\bar{c} \rightarrow s\bar{d} = \bar{K}^0 \tag{11}$$

のような遷移があることを示している。この遷移は電荷など重要な量子数を保存するが  $\bar{s} \rightarrow s$  の遷移で *strange* の量子数が反対になっている。この遷移確立は素粒子の標準模型によって計算でき理論は実験結果をよく再現している。式 (8) のような遷移が起こるということは  $K^0$  と  $\bar{K}^0$  を粒子として扱うよりも

$$\begin{aligned} K_+ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \bar{K}^0) \\ K_- &= \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \bar{K}^0) \end{aligned} \tag{12}$$

の方が扱いやすい。なぜかと言うと CP が  $K^0$  を反  $K^0$  に変化させると

$$\begin{aligned} \text{CP } K^0 &= \bar{K}^0 \\ \text{CP } \bar{K}^0 &= K^0 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\text{CP } K_+ = +K_+, \quad \text{CP } K_- = -K_- \tag{14}$$

なので  $K_+$  と  $K_-$  の状態は CP の量子数 ( $\pm 1$ ) で分類される。(詳しいことは [1] を参照)

#### 4.1 $K_L$ と $K_S$

図 1 に  $\pi^+ - \pi^-$  の系を示した。この系を C そして P で変換すると図で示したように元にもどる。そして、

$$\text{CP } \pi\pi = +\pi\pi \tag{15}$$

が示される。つまり  $\pi\pi$  の状態は CP 量子数 + である。もしこの世界が CP 対称性を保存するならば (CP 量子数が始状態と終状態と等しいならば)  $\pi\pi$  の終状態に崩壊するのは  $K_+$  のみである。つまり

$$\begin{aligned} K_+ &\rightarrow 2\pi, \\ K_- &\not\rightarrow 2\pi. \end{aligned} \quad (16)$$

である。この場合  $K_-$  は CP 量子数が保存される限り、 $2\pi$  に崩壊できず、

$$K_- \rightarrow 3\pi. \quad (17)$$

に崩壊する。

この事実から  $K_+$  と  $K_-$  の寿命は大きく違うことが予想できる。式 (16), (17) の終状態を持つ運動エネルギー ( $M_K$  - 終状態に含まれている粒子の質量の和) を計算してみよう。  $M_K = 500\text{MeV}$ ,  $m_\pi = 140\text{MeV}$  ( $\text{MeV} = 10^6 \text{ Electron Volt}$ ) なので,  $M_K - 3 \times m_\pi = 70\text{MeV}$ ,  $M_K - 2 \times m_\pi = 210\text{MeV}$  である。  $K \rightarrow \pi^+\pi^-$  の終状態の運動エネルギーは  $K \rightarrow 3\pi$  の終状態の運動エネルギーよりも 3 倍も高く、位相空間も大きい。崩壊確立は位相空間に比例するので  $K \rightarrow \pi^+\pi^-$  崩壊確立は  $K \rightarrow 3\pi$  に比べて大きい。従って  $K_+$  と  $K_-$  の寿命は大きく違う。

$$\begin{aligned} \tau_S &= (0.8926 \pm 0.0012) \times 10^{-10} \text{ s} \\ \tau_L &= (5.15 \pm 0.04) \times 10^{-8} \text{ s}. \end{aligned} \quad (18)$$

両者の寿命  $\tau_S$  と  $\tau_L$  は 600 倍も違う。ここでは寿命の違う 2 つの  $K$  中間子  $K_+$  と  $K_-$  を  $K_S$  と  $K_L$  呼ぶ。ラベル  $S$  と  $L$  は短い寿命 (Short) と長い寿命 (Long) からくる。

わたしたちも日常、位相空間の影響を受けている。車を駐車するときと駐車してある車を出すときと、どちらがより注意が必要か。それは入れるときである。車が入るときの位相空間は出るときの位相空間より小さいからである。位相空間が大きいと速く車が出せる。

この寿命の大きな比は自然のいたずらとしかいえない。ただただ、 $K$  中間子の質量と  $\pi$  中間子の質量の関係がこのような大きな比を生み出した。もし、 $\pi$  中間子の質量が非常に小さいか無質量だったら、 $\tau_L \sim \tau_S$  になり、次に書くような CP の破れの発見はなかったかもしれない。

1964 年、クローニンとフィッチは  $K_L$  中間子が物質の中を飛ぶときに奇妙な現象がおこると発表された論文を見て、その結果の確認に取りかかっていた。陽子のビームが標的と衝突すると  $K^0$  と  $\bar{K}^0$  が生成される。これらの粒子が、真空を走るときは、 $K_L$  と  $K_S$  として走る。ただ

し、 $K_S$  は寿命が短いので素早く崩壊し、ちょっと時間がたつと、 $K_L$  しか残らない。彼らは  $K_L$  が 2 個の  $\pi$  中間子に崩壊することを発見した。

$$\frac{\text{確率}(K_L \rightarrow \pi\pi)}{\text{確率}(K_S \rightarrow \pi\pi)} = 2 \times 10^{-3} \quad (19)$$

これが CP 非対称性の発見である [2]。  $K_S$  も  $K_L$  も CP 正の固有状態に崩壊することがこの実験で示された。 CP の量子数が -1 の  $K_-$  が CP 量子数 +1 の  $2\pi$  状態に移移することは自然が CP 量子数保存を無視することであり、この現象を CP 対称性を非保存という。

## 5 B 中間子について

当時  $K$  中間子の CP 対称性を破ることを説明する最有力候補は小林・益川模型であり、わたしの解析もこの模型にそったものであった。この模型では 6 個のクォークの存在を仮定している。1980 年には  $B$  中間子が発見されていなかったと上で記したが、その後まず  $b\bar{b}$  の結合状態が Lederman 氏らによって発見された。この状態の質量は約  $10\text{GeV}$  なので  $b$  クォークの質量は約  $5\text{GeV}$  であることが分かった。

### 5.1 B と K の関係

$b$  クォークが存在すれば  $B$  中間子が存在することが  $K$  中間子と  $s$  クォークの関係から分かる。

$$\begin{pmatrix} K^+ \\ K^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{s}u \\ \bar{s}d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} B^+ \\ B^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{b}u \\ \bar{b}d \end{pmatrix} \quad (20)$$

たんに  $s$  クォークを  $b$  クォークに置き換えただけで、 $B$  中間子は  $K$  中間子のコピーみたいなものだ。従って、 $K$  中間子で観測された  $K^0 - \bar{K}^0$  振動や CP 対称性の破れなど、面白い物理現象が  $B$  中間子でも期待される。

$K^0 - \bar{K}^0$  振動の計算を経験しているわたしにとって  $B^0 - \bar{B}^0$  振動の計算など朝飯前だった。ではなぜわたしは  $B^0 - \bar{B}^0$  振動を予言出来なかったのだろうか。それは当時まだトップクォークが発見されていなかったからである。もちろんトップクォークの存在は仮定した。でも、その質量が与えられていなかった。ある実験結果ではトップクォークの質量は  $50\text{GeV}$  以下と発表されていた。わたしはこの間違った結果に惑わされた。

1996 年にトップクォークが発見されたが質量は  $170\text{GeV}$  であり、振動確立はトップクォーク質量にその 4 乗で依

存するので、私の計算はなんと  $(\frac{170}{50})^4 \sim 134$  もくるってしまった。このことはわたしの予言「15%以上の CP の破れ」が実は 70%であったことにつながる。

### 5.2 B と K の違うところ

B 中間子と K 中間子の質量は大きく違う。B は 5GeV で K はその 10 分の 1 だ。質量が 500MeV しかない K 中間子にエネルギー保存で許されている崩壊は  $2\pi$  か  $3\pi$  だけである。  $2\pi$  は CP 固有値が正であるから、CP が保存していれば  $K_L$  は  $2\pi$  に崩壊できず、  $3\pi$  の崩壊は位相空間が小さいので  $K_L$  は寿命が長い。さて、B の場合だが、質量が 5GeV にもなると、数多くの崩壊過程があり、次式で示される 2 つの固有状態には K 中間子の崩壊に存在したような終状態の制限がない。

$$B_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} (B^0 \pm \bar{B}^0) \quad (21)$$

$B_+$  と  $B_-$  の寿命はほぼ同じである。

K 中間子の場合、陽子を標的に入射すると  $K^0$  と  $\bar{K}^0$  が生成され、待っていると  $K_S$  が崩壊して自然に  $K_L$  ビームができる。B 中間子の場合、このように簡単に固有状態を分けることができない。後ほど述べるが、このことは大きな課題であり新しいデザインの加速器を設計することにつながる。

### 5.3 CP 対称性の破れはどこから

ここでは一般に CP 対称性が観測可能になる条件について簡単に述べる。B 中間子がある終状態 X に遷移するとき二つ異なった中間状態が存在するとしよう。この二つの遷移振幅を

$$\begin{aligned} S(B \rightarrow C \rightarrow X) \\ S(B \rightarrow D \rightarrow X) \end{aligned} \quad (22)$$

と表す。崩壊を観測する場合、中間状態は観測できず、式 (22) に示した二つの崩壊振幅は区別がつかない。量子力学の法則によると、崩壊確立は式 (22) に示した二つの振幅の和の二乗に比例する。

$$\begin{aligned} \text{崩壊確立 } (B \rightarrow X) &\propto |S(B \rightarrow C \rightarrow X) + S(B \rightarrow D \rightarrow X)|^2 \\ &= |S(B \rightarrow C \rightarrow X)|^2 + |S(B \rightarrow D \rightarrow X)|^2 \\ &\quad + 2\text{Re}(S(B \rightarrow C \rightarrow X)S(B \rightarrow D \rightarrow X)^*) \end{aligned}$$

最後の項は二つの振幅が干渉することから生じる。両者の位相が異なる場合この干渉項が存在すると

$$\text{崩壊確立 } (B \rightarrow X) \neq \text{崩壊確立 } (\bar{B} \rightarrow \bar{X}) \quad (23)$$

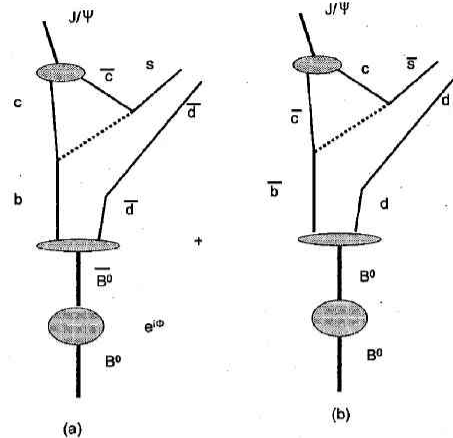


図 2:

B 中間子の崩壊と反 B 中間子の崩壊確立が異なることが示せる。わたしは  $B^0 - \bar{B}^0$  混合によってこの現象が観測できるのではないかと考えた。そして 2 つの位相が大きく違う図 2 を書き、この 2 つの振幅が干渉したら大きな CP の破れが生じることを予想した。しかし図 2(a) の終状態は  $s\bar{d}$  で、図 2(b) の場合は  $d\bar{s}$ 。ふたつの異なる終状態は干渉しない。ここで、行きつまり、2 週間悩んだ。

丁度その時、わたしの恩師であるパイス先生がロックフェラー大学でセミナーをされた。そのセミナーはこのように始まった [1].

「今日私はあなた方に良いニュースと悪いニュースをお伝えします。まず良いニュースから。重いクォークの系にも CP の破れは存在します。そして悪いニュース。やはり K 中間子の系と同じ様に CP の破れは小さいです。」

わたしはそのセミナーが終わってがっくりときた。CP の破れの研究で世界に名がとどろくパイス先生が B 中間子系で CP の破れが小さいと言われたのだ。でも少し時間が経って気を取り戻した。いくら偉大な先輩だからといって全面的に信じる必要はない。

ある暑い夏の土曜日の午後、試験監督をしながらノートを見ていたら急に気がついた。実験家は  $s\bar{d}$  や  $d\bar{s}$  を観測するのではない。これらの状態は  $K_L$  と  $K_S$  で観測されるのだ。

計算した結果、粒子と反粒子崩壊の非対称は [1]

$$a(t) = \frac{Br(\bar{B}(t) \rightarrow J/\psi K_S) - Br(B(t) \rightarrow J/\psi K_S)}{Br(\bar{B}(t) \rightarrow J/\psi K_S) + Br(B(t) \rightarrow J/\psi K_S)} = \sin(2\phi_1) \sin(\Delta m t) \quad (24)$$

であった。もし  $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$  の遷移が存在したら  $B^0$  と  $\bar{B}^0$  の状態は時間によって変化するので、 $B(t)[\bar{B}(t)]$  は時間  $t = 0$  の時、 $B^0[\bar{B}^0]$  と示す。  $\Delta m = M_- - M_+$  である ( $M_{\pm}$  は  $B_{\pm}$  中間子の質量)。

まず、 $\phi_1$  の位相が重要だ。私の計算によると、 $\phi_1$  が大きくなるパラメーターの領域は存在する。さらに、 $B^0 - \bar{B}^0$  混合が無いと  $\Delta m = 0$  なので、混合が存在する必要がある。わたしはこの混合確立を理論的に計算した。

次の大きな課題は、どのようにして時間依存性を測るかである。これだけは実験家の技術に頼るしかない。

すぐに  $B \rightarrow J/\psi K_S$  の崩壊過程の CP の破れについて当時ロックフェラーの研究者だったカーター氏と共著で論文を書いた。ただし、なにしろ  $B^0 - \bar{B}^0$  混合が発見される7年も前なので、ある特定なパラメーター領域では CP の破れが大きい可能性があるという予言であった。

20年後振り返って見ると、面白いもので、広いパラメーター領域の中で、自然はなんと我々が論文で指摘した CP が大きくなるパラメーター領域を選んでくれた。トップクォークの質量もわたしたちが考えていたよりずっと重く、混合振幅もわたしたちが計算した結果よりも大きく、現在ではほぼ70%の CP の破れを予言する。

## 6 実験のデザイン

さて  $B^0 - \bar{B}^0$  混合が1987年発見されたので、7年間眠っていた理論的提案にやっと実験家が興味を持ち始めた。5.2章で説明したように、 $B$  中間子は  $K$  中間子と違い、 $B_+$  と  $B_-$  のビームを造るのとは不可能である。まず式(24)を見てみよう。この非対称性を測定するには  $B(t)$  と  $\bar{B}(t)$  のビームを造る必要がある。

我々は  $B\bar{B}$  を生成するにあたり、

$$e^+e^- \rightarrow \text{エネルギー} \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0 \quad (25)$$

に着目した。まず  $B^0$  と  $\bar{B}^0$  を見分けるにはどうしたらよいか。ひとつの  $B^0$  か  $\bar{B}^0$  がレプトンを含んだ崩壊をしたとしよう。

$$\begin{aligned} B^0 &\rightarrow l^+ \text{を含む状態} \\ \bar{B}^0 &\rightarrow l^- \text{を含む状態} \end{aligned} \quad (26)$$

$K$  中間子のときと同じように  $B^0(\bar{B}^0)$  の崩壊で  $\mu$  レプトンを含む場合、必ず  $\mu^+(\mu^-)$  である。そうすれば式(26)にあるようにレプトンの電荷を観測することによって  $B^0$  か  $\bar{B}^0$  であるかを識別できる。仮に、 $\mu^-$  が時間  $t$  に観測されたらとしよう。そのとき1個の  $B$  中間子は時間  $t$  に  $\bar{B}^0$  であったことが示された。ではこの瞬間、観測されなかった方は  $B^0$  か  $\bar{B}^0$  か? これは  $\Upsilon(4S)$  がスピン1で、 $B^0$  と  $\bar{B}^0$  が角運動量1の状態にあることから、もし時間  $t$  に  $\bar{B}^0$  が観測されたらペアの相棒はその瞬間  $B^0$  であることが分かる。

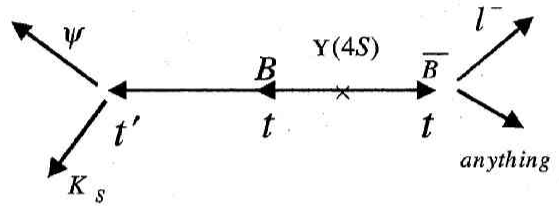


図3: 時間  $t$  で  $\bar{B}^0 \rightarrow l^- + \text{anything}$  を観測した。従ってその瞬間  $B^0 - \bar{B}^0$  ペアの相棒は  $B^0$  である。この図では  $B^0(t' - t) \rightarrow \psi K_S$  の崩壊が  $B^0$  ビームの時間  $t' - t$  に測定された。

このように相棒が  $\bar{B}^0$  であることを測定することによって  $B(t)$  のビームを原理的には造ることができる。

さて時間  $t$  に崩壊した相棒をどのようにして識別するのか?  $B$  中間子は約  $10^{-12}$  秒で崩壊する。これは光でさえ  $0.3\text{mm}$  しか飛ばず、 $B$  中間子は  $20$  ミクロンぐらしか飛ばない時間である。今日の技術ではとうてい時間依存性を実験的に観測するのは不可能である。

この壁にぶつかり、途方に暮れていたときの様子が【CP Violation】 [1] に記述されているので紹介する。

非対称電子・陽電子加速器を建設するという気遣いじみた案がブレイク・スルーとなった。著者と P. Odone が上記の困難を議論していたときに Odone が発案した。もし  $\Upsilon(4S)$  が飛んでいたら、 $B^0 - \bar{B}^0$  ペアも飛ぶ。例えば、 $9 \text{ GeV}$  の電子と  $3 \text{ GeV}$  の陽電子が衝突した場合、 $B^0 - \bar{B}^0$  ペアは平均  $200$  ミクロン飛ぶ。 $200$  ミクロンは、現在の技術で測定可能な距離である。この提案を我々は SLAC と KEK の加速器専門家に持っていった。たびたび門前払いをくらった。でも現在両研究所ではこの非対称加速器での実験が行われている。

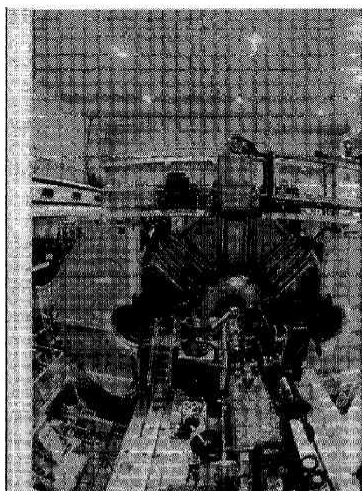


図 4: KEK で建設中の Belle 検出器. 検出器は 3 階建ての建物と同じ大きさで, よく見ると人間が小さく見える.

つまり今までの常識である同じエネルギーの電子と陽電子を加速して正面衝突させる加速器とちがいで, 9 GeV の電子と 3 GeV の陽電子が衝突する非対称型加速器を提案した. そして, 1996 年に KEK と SLAC で非対称形 B 工場の建設が始まった. ここでオリンピックで言えば研究のマラソンが始まった.

## 7 結果

2001 年の 2 月に名古屋大学が主催し, 伊勢志摩で開催された BCP 4 国際会議で実験の結果が発表された.

実を言うと SLAC の加速器は KEK の加速器より 6 ヶ月早くビームを出した. 発見は最初に測定したグループが全ての栄誉を受け, 2 番目に観測したグループの業績は発見を確認した業績のみである. ここで神様が統計の奇跡を行い, KEK のグループも SLAC のグループと同時に発見を発表することが出来た.

我々の業界で発見を発表するには, 新しい現象のシグナルが測定のエラーより 4 倍大きいことが条件である. これが  $4\sigma$  の発見と定義されている. つまり, 非対称  $a(t)$  を測ったと発表するとき  $a(t)$  の測定誤差が  $a(t)/4$  である必要がある.  $a(t)$  が大きければ大きいほど大きな誤差でも  $4\sigma$  を達成することが可能になり, 少ないイベント数 ( $B^0\bar{B}^0$  対の数) でも  $4\sigma$  の発見になるのだ. 初めての実験では統計が少なく, SLAC の実験結果は KEK の値の  $a(t)$  半分しかなかった. 従って SLAC が発見を発表

するには KEK で必要なイベント数の 4 倍必要であった. 現在  $a(t)$  は 5% の誤差で測られており, KEK が当初発表した値に近いところに落ち着いている. なぜ SLAC のグループの結果が統計の誤差内と言えども小さく出て発表が遅れたのか, いまだかつて分からない. 神業としか言えないのである.

その後 5 年間 KEK と SLAC はいい意味で競争を続けた. 現在 KEK の加速器は SLAC の加速器の二倍のビームの強度をだしている. 米国の研究環境は厳しい. 世界で 2 位の研究グループには研究費を出さない. この研究を続けたいアメリカの研究者は日本に来るしかない.

今後の課題はこの観測から新しい物理を探求することである. ここでは説明しなかったが, そのような理論ができれば, クォークやレプトンの質量の起源が同時に分かるであろう. 逆に言うと, クォークやレプトンの質量の起源を理解しないかぎり CP の破れは理解できない.

過去には途方もない大きなチャレンジと考えられていたことが急に完全に解けると言うことがよくある. 同じようなブレーク・スルーが期待される.

CP 非対称性を理解することは宇宙の存在の理解につながる. より基本的な理論が発見されれば, 現在理解している宇宙よりさらに初期の宇宙を考えることが可能になる. このようにして我々は宇宙の歴史をどんどんさかのぼることができるであろう.

## 参考文献

- [1] この論文は三田一郎 CP 非保存と時間反転 失われた反世界 岩波講座 物理の世界 2001 年に基づいています. 更に専門的なことは I. I. Bigi and A. I. Sanda *CP Violation* Cambridge University Press, (2000) に記されています.
- [2] J. H. Christensen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **13** 138 (1964).
- [3] A. B. Carter and A. I. Sanda, *Phys. Rev.* **D23** 1567 (1981), I. I. Bigi and A. I. Sanda, *Nucl. Phys.* **B193** 85 (1981).