

器に痕跡を残すこともないので、カロリーメーター(図●のCsI)で測定される。これは長さ30cmの細長いヨウ化セシウム結晶を9000本並べて作った直径3mほどの樽状の測定器だ。ガンマ線が入射したときに出る光を測定し、そのエネルギーと方向、すなわち「ガンマ線の運動量ベクトル」を導く。ガンマ線や荷電粒子の運動量ベクトルから、Bが「いつ、どのような壊れ方をしたか」がわかり、多くのBのうちから、後で述べる「ある特定の壊れ方」をしたBを探すことができる。

このほかにもBelleにはさまざまな測定器が組み込まれている。測定器のシグナルはすべて電気信号として10万本以上のケーブルを通して取り出され、電子装置によってデジタル化されたあとコンピュータで解析される。この電子回路は、20万の半導体チップからなる膨大なもので、データ解析に使われるコンピュータもパソコン数千台分に相当する。

13カ国55機関によるBelle開発

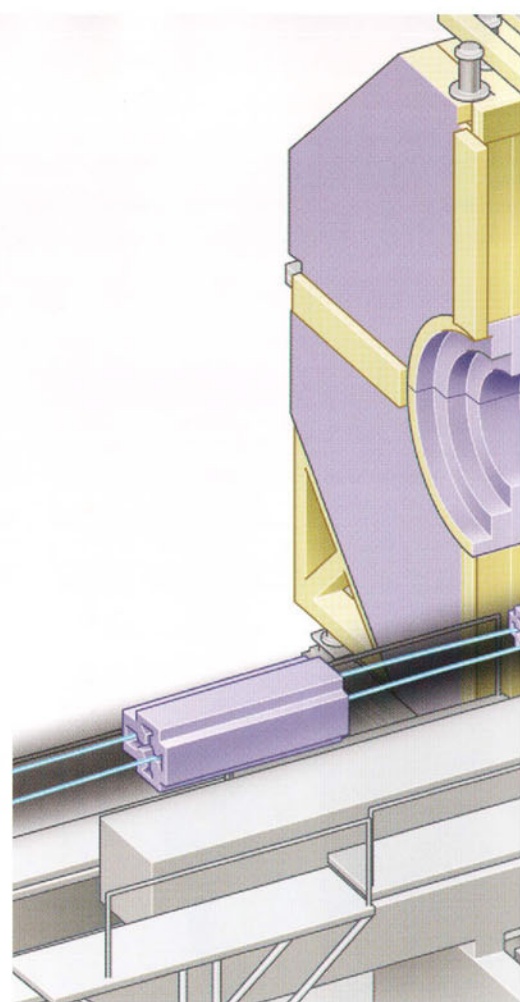
Belleは非常に複雑かつ大規模な測定装置なので、構想をまとめて完成に至るまでには、大変な時間と労力を要した。われわれは、「測定器をつくって実験を遂

行し、データ解析を行って新しい物理を探し出す」という一連の仕事を進めるために、「Belleグループ」と呼ばれる国際共同グループを立ち上げた。現在では参加者は大学院生を含めて約300人、参加機関数は55、参加国はアジア、アメリカ、ヨーロッパからの13カ国である。

素粒子実験の分野では研究に莫大な資金を必要とするので、中心となって計画を推進できる研究機関は世界でも限られている。それゆえ、外国の研究チームに門戸を開き、測定器の建設段階から広くアイデアを交換しながら、共同で研究を進めるスタイルが定着している。

Belleも構想段階から多国籍グループとなっていた。資金60億円の大部分は日本側から提供されたが、設計において日本人研究者の意見を優先させるなどということは一切ない。「目指している物理にとって最も適した測定器を」という一点だけが設計の方針である。これをめぐって大議論を積み重ねながら設計を進めた。

加速器実験の分野では、米国や欧州の実験に日本人研究者が乗り込むことはよくあるが、日本が加速器を建設し大規模な国際共同実験のホストを務めるのは初めての経験である。



SOKENDAI先端研究

Bファクトリーで描く素粒子像

岡田安弘

総合研究大学院大学教授素粒子原子核専攻/高エネルギー加速器研究機構教授

われわれの宇宙を形づくっている物質は、どのような「基本粒子(素粒子)」でできているのだろうか。基本粒子の間にはどのような「力」が働いているのだろうか。基本粒子と力との「物理法則」を追究すれば、宇宙がどのように始まり、どのように進化し、現在の姿になったかを理解することができるのだろうか。素粒

子物理が目指しているのは、これらの疑問に答えることである。

そして今、Bファクトリー実験では、B中間子の世界を「CP対称性の破れ」と「フレーバー物理」という先端的な2つの「窓」から覗き、その奥に潜む新しい素粒子像を浮かび上がらせようとしている。

Bファクトリーが解明しつつ

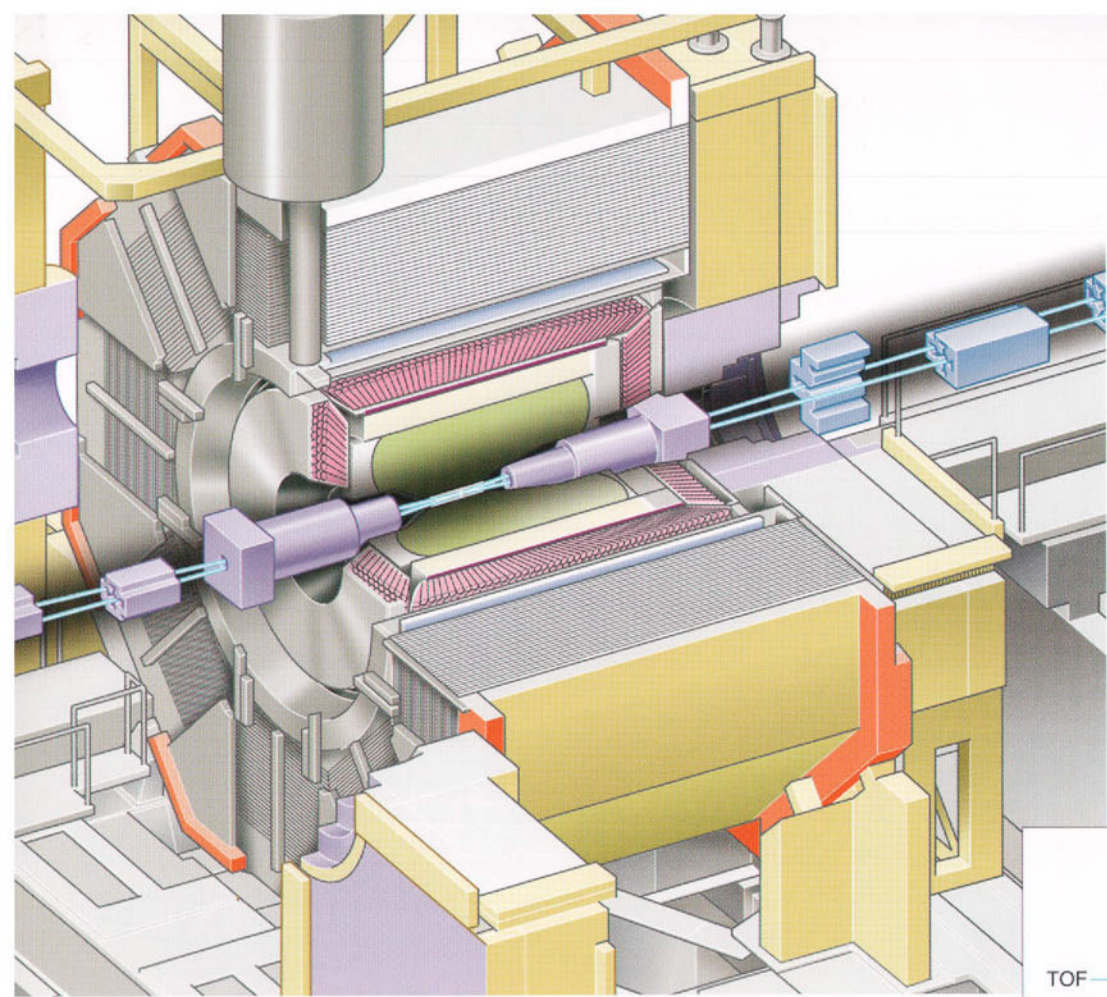
ある世界がどんなものか、背景にある素粒子物理の発展と重ね合わせながら紹介しよう。

反粒子の存在とCP対称性

20世紀を通じて、素粒子物理学は飛躍的な発展をとげてきた。

1905年にアインシュタインが発表した相対論は物理学における「時間」と「空間」に対する考え

方を一変させた。また、プランクに始まり、ボーア、ハイゼンベルク、シュレディンガーらによって追究され、25年頃に完成を見た量子力学は、古典物理学とは違うミクロな世界の姿を描き出した。ミクロな世界では「粒子と波は同じものの2つの側面」として現れるのである。これらの原理は、宇宙の物質をつくる



③ Belle測定器の構成

B中間子におけるCP対称性の破れは、電子・陽電子の衝突点におかれたBelle測定器で検出された。これは衝突点を囲む7つの検出器からなり、B中間子の崩壊でできた軽い粒子の種類や運動量を高い精度で測定する。検出器からの情報はおよそ10万本以上の電気信号として取り出され、デジタル化処理されたのちコンピュータで解析される。ここでは、半導体、エレクトロニクス、コンピュータ、超伝導などさまざまなハイテク技術が駆使されている。

シリコン・バーテックス検出器 (SVD)
Bの崩壊点を詳しく測定するために衝突点にもっとも近い位置に置かれた検出器で、3層のシリコンの板からなる。

ドリフトチェンバー (CDC)
荷電粒子の軌跡は磁場のためにらせんを描く。これを測定し、粒子の運動量を測定するための検出器。

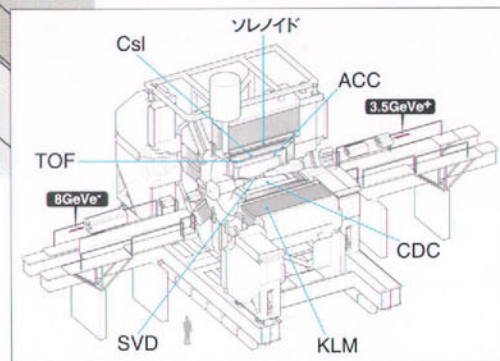
エアロジェル・チェレンコフ・カウンター (ACC)
荷電粒子の種類を識別するための検出器。シリカエアロジェルというもっとも軽い透明な固体からできている。

飛行時間測定器 (TOF)
荷電粒子の飛行時間を測定し、粒子を識別する検出器。

カロリメーター (CsI)
ガンマ線のエネルギーと方向を測定するための検出器。ヨウ化セシウムの結晶からできている。

ソレノイド
1.5テスラの磁場をつくり出す超伝導コイル

KL・ μ 検出器 (KLM)
 μ 粒子やKL粒子など透過性の高い粒子を検出する装置。15層の鉄と検出器のサンドイッチになっている。



基本粒子の満たすべき物理法則の基礎になっている。

一方、何が基本粒子かに関しては、放射線実験や宇宙線の観測、加速器の発達によって、答えは進化してきた。原子の中心には原子核があり、その周りを電子が回っており、さらに原子核は陽子、中性子から構成されていることが明らかになった。

28年、ディラックは相対論と量子力学の統合をはかり、ディラック方程式を提唱した。これは電子を記述する式だが、その解にはエネルギーが正となる状態以外に、「負エネルギー状態」が含まれていた。

負エネルギー状態の解釈として、「真空とは、負エネルギー状態に粒子がいっぱい詰まっている状態である。その負のエネルギー粒子の1つが十分なエネルギーをもらって飛び出したとしたら、真空から正のエネルギーの粒子1個（電子）と、粒子が抜けた穴が生じたことになる。抜けた穴は、負のエネルギーの粒子が飛び出した跡なので、飛び出した粒子と反対のエネルギーと反対の電荷をもつ」という考え方が提案された。この解釈の重要な帰結として、電子には質量（エネルギー）が同じで電荷が逆の反粒子、つまり「陽電子」が存在

することがあげられた。

32年にアンダーソンが宇宙線観測実験で陽電子の存在を確認、相対論と量子力学の融合は、素粒子物理学に大きな成果をもたらすことになった。

そして、さらなる素粒子理論の発展により、ある素粒子に対して質量が同じで電荷が逆の反粒子が存在することは、素粒子の一般的な性質だと考えられるようになった。ただし、光子のような電的に中性な粒子では、自分自身が自分の反粒子となる。粒子と反粒子は、質量や寿命は同一であり、たがいに対等な存在であると考えられた。

さて、CP対称性の「C」とは荷電共役 (Charge Conjugation) 変換のことで、粒子と反粒子を入れ替えることだ。Cの対称性不変とは、粒子と反粒子を入れかえても物理法則が変わらないので、現象にまったく変化がないという意味である。この対称性は前述のディラック方程式から導かれたものの1つである。

一方、「P」は空間反転 (Parity) のことである。Pの対称性不変とは、物理法則が空間反転しても変わらないので、こちらの世界の現象も、鏡に映した世界の現象も、どちらも同じで区別がつかないことを意味している。

妥協点の探り方、リーダーの果たすべき役割についての認識、対外的な姿勢などは、各国の文化や各チームの経験によってじつに多様である。このバリエーションに富んだ考え方を包括しながら1つ1つ結論を導き出すことは、こちらから出かけていって海外の研究に加わる場合とはひと味違う新鮮な体験の連続であった。

その醍醐味が、14ページのBelleグループ代表オールセン氏 (Steve Olsen) のコラムから伝わるだろう。

現在もBelleグループは実験を続けながら取ったデータを解析し、Bの崩壊に新しい物理の知見を得るべく、激しい内部競争を続けている。何か発見したとき、外部評価ではグループ全体の手柄だが、グループ内では「誰の仕事だ」ということになるので、たがいの競争意識は強い。

ここ数年、計算機ネットワークのインフラが急速に発展し、世界のあちこちとテレビ会議をすることが容易になった。KEKではほとんど毎日テレビ会議が行われており、たがいに自分の解析結果を発表し、議論し合っている。時差のことさえ忘れれば、世界のどこにいても最新のデータにアクセスし、顔をつき合わせて議論できるようになった。

情報技術の進化は、われわれのような多国籍グループにとって、本質的に重要な研究環境を与えてくれている。大学院生をはじめ若手研究者教育に対しても、画期的な効果をもたらしている。学生は自分の所属する機関のスタッフだけでなく、居ながらにして世界中のエキスパートから指導を受けられるのだ。

CP対称性の破れを「いかに」とらえるか

話を本題に戻そう。まず、B中間子崩壊においてCP対称性の破れがどのように見えるかを説明する。岡田氏の12ページの文では、B中間子の中でも測定対象となるのが中性B中間子(B^0)であると正確に記されているが、ここでは単にB中間子(B)という表現にする。

図④には電子・陽電子の衝突でできたBと \bar{B} の対が飛ぶ様子を描いた。KEKB、PEP-IIともに衝突する電子のエネルギーが陽電子のそれよりも高くなるように設定されている。そのため、生成されたBと \bar{B} の対は本来電子の飛んで行くはずだった向きに光速の約4割のスピードで飛ぶ。

あるときBあるいは \bar{B} が崩壊して、さらにそのt秒後に相棒(Bでは \bar{B} 、 \bar{B} ではBのこと)が、「ある特定の壊れ方」で崩壊し

たとする。実際にはtは1ピコ秒くらいで、直接測定するには短かすぎるが、崩壊点の位置の差を測定してそれを時間差に焼き直すことで求められる。このような現象をたくさん集めると、tの分布を表すヒストグラムをつくることができる。

この「生きている時間」の分布図を、Bの相棒の場合と \bar{B} の相棒の場合で比較する。もし粒子と反粒子の間で自然法則が等しければ、その2つの分布は一致しているはずだろう。もし違いが見つければ、それは粒子と反粒子の違い、すなわちCP対称性の破れに他ならない。小林・益川理論によれば、この違いが大きいと予言される、と三田一郎らが指摘している。

じつは、Bには奇妙な性質があることが知られている。ある瞬間Bであった粒子がいつのまにか \bar{B} に変わっている、あるいはその逆が起こるのである。これを $B\bar{B}$ 振動と呼んでいる。

先にBの相棒の崩壊について「ある特定の壊れ方をしたとき…」と述べたが、この壊れ方は専門的には「CPの固有状態」と呼ぶ終状態への崩壊を指す。要は「壊れた破片を集めてみてもBが壊れたのか \bar{B} が壊れたのか区別がつかない終状態」のことであると思っただきたい。

CP対称性とフレーバー

30年代に、自然界には4つの基本的な相互作用(力)があることが明らかになった。「重力」、「電磁相互作用(電磁気力)」、「強い相互作用(強い力)」、「弱い相互作用(弱い力)」の4つだ(図⑤)。

前者2つは日常生活に現れて

いるので、説明の必要はないだろう。後者の「強い相互作用」は陽子と中性子を結びつけて原子核を構成する力であり、「弱い相互作用」は核分裂などを引き起こす力だ。

56年、P対称性に関する大きな発見があった。弱い相互作用の引き起こす現象だけは、空間

反転変換すると違いのあることが実験的に示されたのだ。

現在では、P対称性は素粒子の世界の基本的な対称性とは考えられておらず、むしろこの対称性が破れた世界が基礎になっていると思われる。

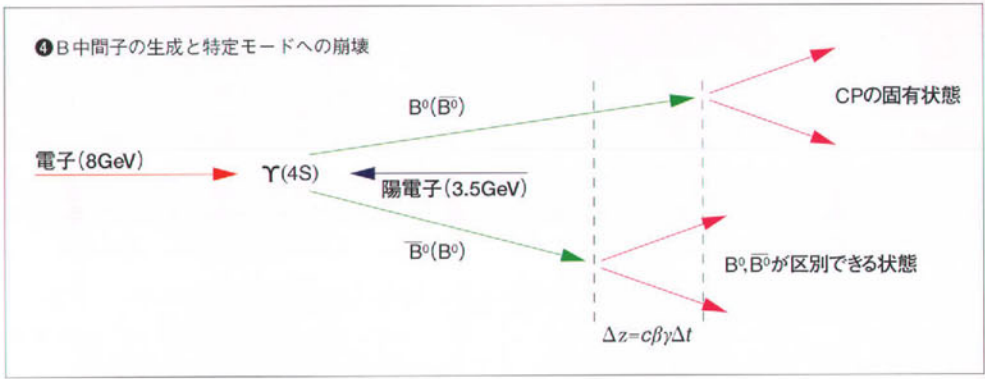
さて、空間反転のP対称性が破れた世界では、粒子・反粒子の入れかえの対称性は、CとPの変換を同時に行うCP変換でないと定義できないことが数学的に明らかになっている。そこでP対称性の破れの発見以降、粒子・反粒子変換は、CP対称性で表されている。

基本粒子が何かについても、

さまざまな発見があった。37年に宇宙線中で電子の約200倍の質量もつ粒子が発見された。この粒子は μ 粒子といわれ、質量が重い以外は電子と良く似た性質をもつことがわかった。電子や陽電子、 μ 粒子は、基本的な力のうち強い相互作用だけをもたず、これらの粒子は「レプトン」とよばれる(図⑥)。

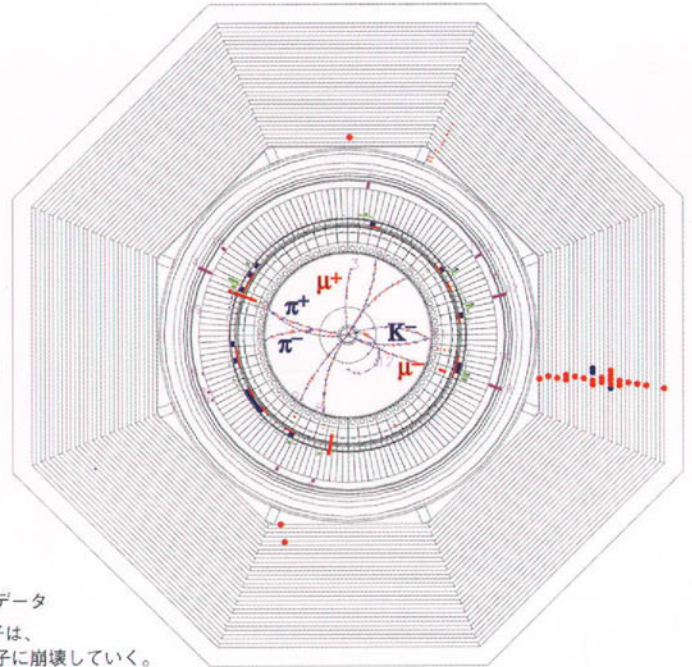
一方、強い相互作用をもつ粒子としては、陽子や中性子が古くから知られている。湯川秀樹が35年にその存在を予言し、47年に発見された π 中間子も強い相互作用をもつ粒子だ。また戦後になると、K中間子、 Λ 粒子

4つの相互作用				
相互作用の種類	強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	重力相互作用
力としての現れ方	核力	電磁気力	核分裂	重力
力の媒介粒子	グルーオン	光子	W、Z粒子	重力子



このことと $B\bar{B}$ 振動を組み合わせると、小林・益川理論が予言するCPの破れがどのように観測されるかを、2つのスリットを通った光の干渉のアナロジーで説明することができる。

あるときにBであった粒子がt秒後に「CPの固有状態」に壊れたとすると、この崩壊に至るには2つの経路がある。すなわち、Bがそのままt秒間生き延びて壊れた場合と、いったん \bar{B} に化けてから壊れた場合である。この2つの経路のうちどちらが起こったのかを区別することはできない。しかし、2つの振幅は干渉を起こすので、BがCPの固有状態に壊れる現象を数多く集めれば干渉縞をつくるだろう。干渉縞のパターンは、光の干渉



⑤観測された実験データ
 生成されたB中間子は、たちまち多くの粒子に崩壊していく。

など新しいタイプの強い相互作用をもつ粒子が次々と発見された。これらの粒子は、陽子、中性子、 π 中間子とは違う「奇妙さ」(strangeness) という量をもっている。

60年代に入ると、強い相互作用をもつ粒子にはさらに内部構造があり、これらの粒子は「クォークやその反粒子である反クォークの複合状態である」という考えが、ゲルマンとツバイクにより提唱された(図⑥)。

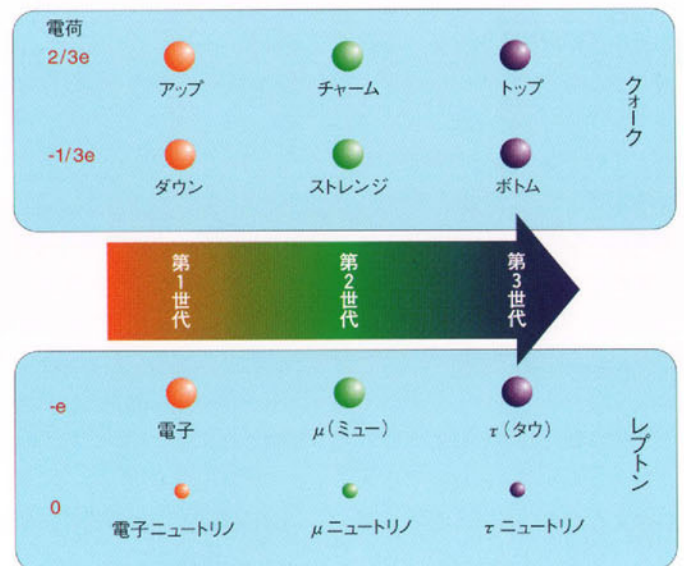
たとえば、陽子は「アップクォーク(u) 2個とダウンクォーク(d) 1個」からなり、 π 中間子の一種である π^+ 中間子は「1個の

アップクォークと1個の反ダウンクォーク」からできているとされた。また、「奇妙さ」をもつK中間子などの粒子は、アップやダウンクォーク以外に第3のクォークであるストレンジクォーク(s)を含む複合粒子であると解釈された。

アップ、ダウン、ストレンジといったクォークの異なった種類のことを「クォークフレーバーの自由度」というが、60年代当時は以上の3種のクォークしか知られていなかった。

また、弱い相互作用が引き起こす現象では、クォークが別の種類のクォークに変化する「クォ

⑥ 3世代のクォークとレプトン





KEKB加速器の電子・陽電子蓄積リング

と同様に2つの経路の位相差に関係する。

この縞をBから出発する場合と \bar{B} から出発する場合で比較することで、位相差に差があるかどうか調べられるであろう。この位相差こそ小林・益川理論で予言されているものである。前述のBと \bar{B} の「生きている時間」の分布のズレは、この位相差を三角関数で表したものとなる。

実験をする上での困難さは、BがCPの固有状態に壊れる確率が非常に低いことである。このためにBの崩壊例をたくさん集めて、その中からたまたまほしい終状態へ崩壊している事象を探さなければならない。これが前に述べたように高いルミノシティを必要とする理由である。

小林・益川理論はCP対称性の破れがあることは予言するが、どのくらい大きく破れているかに関しては残念ながら信頼できる予言はない。他の実験結果などからの推測で、Bと \bar{B} の「生きている時間」の分布のズレは、数十%くらいだろうというのが大方の予想であった。数十%といっても、実験をする立場からすると20%と50%ではデータをためるのに必要な時間は6倍ほど違うのだから、心もとない話である。

ークフレーバーの変化」が起きていることも明らかになった。

たとえば、K中間子の一種である中性K中間子(K^0)は「1個の反ストレンジクォークと1個のダウンクォーク」からできているが、これが弱い相互作用で中性 π 中間子(π^0)に崩壊するとき、反ストレンジクォークが反アップクォークに変化する(図9)。

フレーバーの変化とCP対称性の破れ

空間反転対称性の破れがわかったあとも、粒子と反粒子を入れかえたときのCP対称性は保たれていると考えられていた。

しかし、64年に、クォークフレーバーの変化を生じる現象の中で、CP対称性が破れているものが発見された。先に紹介した中性K中間子が中性 π 中間子に崩壊する現象においてである。

じつは、中性K中間子(K^0)も反中性K中間子(\bar{K}^0)も、そのままでは質量や寿命をもった粒子として存在することはできない。つねに K^0 と \bar{K}^0 の量子力学的な重ね合わせの状態、いわば混じりあった状態で存在する。この重ね合わせには2つタイプがあり、寿命が違う。

CP対称性の破れが見いだされたのは、寿命の長いほうだ。CP

対称性が保たれている場合、長寿命の中性K中間子(K_L)では中性 π 中間子(π^0)3つに崩壊し、2つには崩壊できないことが、理論的に示されていた。ところが、実際には、1/1000のオーダーの確率で、中性 π 中間子2つに壊れることが、クローニンとフィッチたちの実験によって見つかったのだ。

標準模型で描く素粒子の世界

中性K中間子で見つかったCP対称性の破れは、それまでの常識を覆すものであり、この破れの原因がどこからくるのかが、素粒子物理の大きな謎となった。

その謎に1つの解を与えたのが、標準模型における小林・益川理論である。まず、標準模型を説明しよう。

70年代を通じて素粒子理論には大きな進展があった。素粒子標準模型とよばれる理論の形が整ったのである。

この模型では、素粒子間に働く4つの基本的相互作用のうち重力を除いた相互作用、つまり「強い相互作用」、「電磁相互作用」、「弱い相互作用」をゲージ理論という共通の枠組みで記述する。

また、物質の基本粒子は、クォークとレプトンであると考えている。そして、3つの相互作用

CP対称性の破れを発見する

99年6月に実験を開始した当初は、どれだけデータをためればCP対称性の破れが見えるか、かなり不定性があった。

素粒子物理の分野では毎年夏に大きな国際会議を開くが、2000年は大阪での開催であった。日本で実験を続けるわれわれとしては、その機会に「CP対称性の破れの発見」を発表したかったが、それまでにつくられたBの数は約600万個で、目標の1億個には程遠い数であった。中間報告的な発表しかできないことをなにかば覚悟していたが、ここに嬉しい誤算があった。測定されたCP対称性の破れの大きさが約80%もあったのである。

まだ確定はできなかったが、CP対称性の破れが見えはじめていることを大阪の会議で報告することができた。このときPEP-IIでつくったBの数は約1000万個で、同様な報告があった。この時点での勝負は引き分けであった。

ここで、データ解析の「目隠し」について触れておきたい。この実験のような発見が期待される研究では、その結果に心理的影響が入るのをできるだけ避けねばならない。物理研究では、実験の答え

は自動的に一通りになると思われるかもしれないが、必ずしもそうではない。

たとえば、数多くのBの崩壊例の中からCPの固有状態を選び出すことを考えよう。このときの選別条件は、「なるべく多く、しかもゴミが混じらないように」ということだが、これを決めるのは人間である。「結果にとって都合の悪い事象があれば、それがはずれるように選別条件を決め直す」というインチキも可能になる。もちろん、このようなことを意図的にするはずはないが、心理的バイアスが入り込む余地がないとはいえない。

このようなことが起こらないように、われわれは「結果は最後の最後まで見ない」というルールを徹底している。事象の選別条件や解析の細かい点まですべて決め、その後に最終結果であるCP対称性の破れを見る。一度見たら、その後で解析方法を変えることはしない。最初に見た数字が国際会議で発表される数字となる。

実際に確かなCP対称性の破れが発表されたのは翌2001年夏のローマの会議であった。われわれがつくったBの数は3000万個、PEP-IIは4000万個だった。

われわれの結果は 0.99 ± 0.18 というも

ので、後ろの数字が実験の統計的誤差である。CP対称性の破れがない場合にこの数字はゼロとなるはずであるから、「誤差を考慮してもCP対称性の破れが発見されました」と、胸を張って主張できる結果である。

これに対してPEP-IIが発表した結果は 0.52 ± 0.15 という値で、これもやはりCP対称性の破れを支持してはいるが、われわれの結果とは完全に一致しているとはいえない。どちらかが小さなところでミスをおかしている可能性もあり、「CP対称性の破れは見つかったが、その大きさはいくらなのか、どちらが正しいのか」が、次の興味として残ることとなった。

この問題を解決するためにはさらに双方ともデータを蓄積する必要があり、ほぼ決着がついたのは2002年2月である。われわれがBの数を4200万個にまで増やして解析をやり直した結果、この値は 0.82 ± 0.12 となり、PEP-IIの新しい結果ともほぼ一致しており、これがCP対称性の破れの大きさとしとして認められた。

結局、2001年のローマ会議での「どちらが正しいのか」という疑問に対しては、「両方の中間に正しい答えがあり、そこからの統計的ばらつきによって、ど

は、クォークやレプトンの中で、力を媒介する粒子「ゲージ粒子」を交換することによって生じるとしている(図①)。

電磁相互作用のゲージ粒子は「光子」である。弱い相互作用は、「W粒子」「Z粒子」とよばれる質量が陽子の約86倍と約97倍の重いゲージ粒子によって媒介される。媒介される粒子が重い分、弱い相互作用は電磁相互作用と比べ、日常的には「弱い力」としてしか現れない。

レプトンには作用せず、クォークの間だけに働く強い相互作用は、「グルーオン」と呼ばれるゲージ粒子によって媒介される。

その力は遠くなるほど強くなるので、クォークは陽子やK中間子などの粒子の中に閉じ込められてしまい、単独では取り出すことはできない。

80年代から90年代にかけての加速器実験で、W粒子とZ粒子とグルーオンの存在が確認され、クォークやレプトンとゲージ粒子との相互作用が標準模型によるものと一致することが確かめられた。

さて、電磁相互作用と弱い相互作用との力の強さの違いを生み出すゲージ粒子の質量は、標準模型を形成するもう1つの重要な要素「ヒッグス場」との相互作

用によって生じている。

そして、標準模型では、ゲージ粒子によって媒介される3つの力以外に、ヒッグス場とクォークやレプトンとの相互作用による新しい力が導入されている。この力は「湯川相互作用」といい、クォークやレプトンがさまざまな質量をもつ原因になっている。また弱い相互作用でクォークのフレーバー変化が起こる原因も、湯川相互作用だとされている。

小林・益川理論がもたらすもの

72年に、小林誠と益川敏英は、「CP対称性の破れは、クォークの世代数が3つあれば、湯川相互

作用によるクォークの世代を超えたフレーバー変化の中で説明できる」ことを数学的に示した。

発表当時は、アップ、ダウン、ストレンジの3種2世代のクォークしか発見されていなかったの、CP対称性の破れを説明する理論の1つという位置づけでしかなかった。しかし、その後、74年に第2世代のクォークであるチャームクォーク、75年に第3世代のレプトンである τ 粒子、77年に第3世代のクォークであるボトムクォークが発見され、70代末には最も有力な理論として注目を集めるようになった。

現在、6種のクォークと6種の

ちらの答えも間違っているとは言えない」という結論となったのである。

2002年夏の最新成果

実験結果は、さらに新しい展開を見せている。今年の7月25日から31日まで、アムステルダムで「高エネルギー物理学国際会議」が開かれ、ここで新しいデータの発表を行った。図⑥がそれである。ちなみに岡田氏の12ページの図④は図⑥の右半分に当たるものである。

われわれの8500万個のB中間子イベントの解析に基き得られたCP対称性の破れの大きさは、 0.719 ± 0.074 であった。一方、競争相手のSLACの結果は、8800万個のBの測定から得られた 0.741 ± 0.067 であり、両者は非常によく一致している。発見の段階を越えて精密測定の領域に入ったというのが、会議の参加者の一般的な印象だろう。

両者の結果の重要な点は、他のさまざまな実験結果も考慮すると、小林・益川理論を完全に支持することにある。つまり、小林・益川理論が提案から30年近くを経て実験的に証明され、素粒子の世界を記述する標準的な理論として確立したことを意味する。SLACとKEKは3年にわ

たる激しい競争の末、同時にこのランドマーク的な仕事を達成したことになった

この会議で発表されたCP対称性に関連するトピックはこれだけではない。Bがさまざまな終状態に壊れるときに、いろいろなタイプのCP対称性の破れを示すことが予想されているが、これらについても新しいデータが出始めたのである。

中間子Bが中間子 $\pi^+\pi^-$ 対に崩壊する場合のCP対称性の破れに関してはKEKとSLACの結果が一致していない。また、Bが ϕ (ファイ)とKs(ケーショート)という粒子に壊れるときのCP対称性の破れはKEKとSLACで一致しているが、標準模型が予言する値とは符号が逆である。

これらの崩壊モードの測定には、より多くのB中間子が必要で、現在のデータではまだはっきりした結論は得られない。データが蓄積されれば、驚くような新しい物理が姿を現すかもしれない。

KEKBが切り開く世界

小林・益川理論の正しさを証明できたことは、物理学としては重要な進歩である。粒子と反粒子、物質と反物質の間で自然法則が少し違う理由について、自信をもって説明できるようになった。この

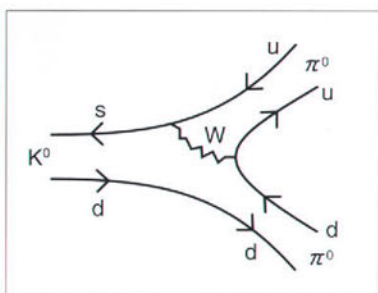
ような発見に関与できたことは研究者の1人として本当に嬉しい。同時に、素粒子実験分野の後発国であった日本で、SLACと対等以上の競争をしながらこのような発見に至ったことを誇りに思う。

しかし、実験研究はこれで終わりではない。ここからが始まりで、実験の醍醐味は理論の検証にではなく、理論を手がかりにしながら新しい、できれば誰も予想しなかったことを発見することにある。

いろいろな状況証拠があって、現在われわれが「標準模型」と呼んでいる素粒子理論(岡田氏の文、10~11ページ参照)は、素粒子を理解する上での究極的な理論ではないと考えられている。標準模型が扱える現象は、エネルギーで言うと100GeV(1000億電子ボルト)以下、サイズで言うと 10^{-16} cm(1京分の1cm)より大きい世界であって、より小さな世界に適用すべき理論が別にあるに違いないというのが一般的な考え方だ。標準模型はその理論の近似だと考えられる。

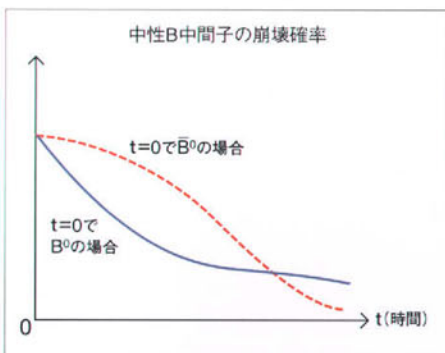
現在のところ、実験事実はすべて標準模型により説明されるので、さらに向こうにあるものを見ようと思ったら、今までとは違う実験を試みなければならない。

1つの方法はエネルギーを上げること



③中性K中間子から中性 π 中間子への崩壊

この崩壊過程では、 K^0 の反ストレンジクォーク(\bar{s})がW粒子を吸収・放出して反アップクォーク(\bar{u})になるフレーバー変化を生じている。



④中性B中間子の特定モードへの崩壊の時間依存性

レプトンの存在が確認されているが、これらを同じパターンの電荷をもった3組に分類することができ、これをクォークとレプトンの世代構造という(図①)。

質量の小さい方から第1、第2、第3世代という。第1世代はアップクォーク、ダウンクォーク、電子と電子ニュートリノからなる。第3世代のトップクォーク(t)の確認は、94年の米国フェルミ国立研究所加速器による検出まで待たねばならなかった。

小林・益川理論の検証へ

CP対称性の破れは、64年に見つかった中性K中間子の崩壊

以外には長らく発見されなかった。粒子と反粒子が対等ではないという素粒子物理学にとって本質的な問題を、1つの現象からのみで確定することはできない。そんななか、80年代初めに、三田一郎らは、小林・益川理論に基づけば、第3世代のボトムクォーク(b)を含む中間子「B中間子」の崩壊において、K中間子崩壊より大きなCP対称性の破れを観測できると予言した。

この大きなCP対称性の破れは、とくに中性B中間子の崩壊の時間依存性に現れる。量子力学の法則によれば、不安定な粒子はある一定の確率によって崩

であり、スイスにある^{セルン}CERN(欧州原子核物理学研究所)で建設が進められているLHC(Large Hadron Collider)がその例である。これは陽子を7TeV(7兆電子ボルト)まで加速して正面衝突させるもので、新しいエネルギーフロンティアで新しい物理を探ろうとする試みである。

もう1つの方法は、数をたくさん集める実験により新しい物理を探ろうとする方向である。つまり、数多くの反応を調べて、標準模型では想定されないことが

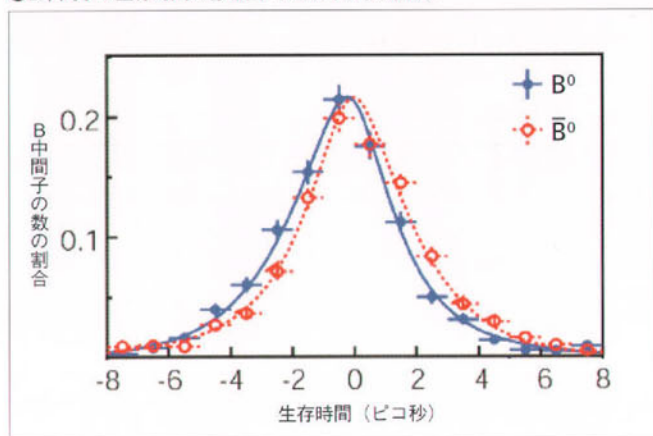
起きていることを探すのである。たとえば100億個に及ぶB中間子などをつくりその崩壊を丹念に見ると、新しい物理の姿が垣間見えるであろうと期待される。

エネルギーフロンティアの追求は素粒子の研究にとって不可欠なことだが、一方、多くの事象を積む高統計実験で高いエネルギースケールの物理が明らかになった例は多い。山の頂上の様子を調べるのに、実際に登ってみる方法と、麓から高性能の望遠鏡で覗くのと2つの方法が

あるのと似ている。麓から覗くほうが全体像が良くわかる場合もあるだろう。

われわれは、世界最高ミノシティ加速器KEKBの性能をさらに改良し、実験を続ける。その先にあるものが小林・益川理論のさらなる精密検証だけなのか、新しい現象がいっぱいのエキサイティングな世界が広がっているのかは、誰にもわからない。誰にもわからないところまでわれわれは来たのである。

⑨ B中間子の生存時間の分布図(2002年7月の結果)



山内正則(やまうち・まさのり)
電子・陽電子衝突を使って素粒子の研究をかれこれ20年以上続けている。よく飽きないねという人もいるが、つくりたい素粒子をきれいに作るには、これがいちばんと信じている。とくにB中間子をきれいにたくさんつくりその崩壊を調べれば、新しいことがまだたくさんわかるはず、というのが最近の信念であり抱負である。



素粒子物理学上の発見

- 1928 ディラック方程式の提唱(ディラック)
- 1932 陽電子の発見(アンダーソン)
- 1935 中間子論の発表(湯川秀樹)
- 1937 μ 粒子の発見(アンダーソン、ネッダーマイヤー)
- 1947 π 中間子の発見(パウエル)
- 1949-59 新粒子(Λ , Σ , Ξ , K)の発見(パウエル、アンダーソンら)
- 1956 坂田模型の提唱(坂田昌一)
- 1956 パリティの非保存の提唱(リー、ヤン)
- 1964 CP対称性の破れの発見(クローニン、フィッチ)
- 1964 クォーク理論の提唱(ゲルマンら)
- 1967 電弱相互作用と弱い相互作用の統一理論(電弱理論)の提唱(ワインバーク、サラム)
- 1971 電弱理論のくりこみ可能性の証明(トーフト、ベルトマン)
- 1972 小林・益川理論の提唱(小林誠、益川敏英)
- 1980 B中間子におけるCP対称性の破れの予言(三田一郎ら)
- 1983 W、Z粒子の発見(ルビアら)
- 1994 トップクォークの発見(テバトロン実験)
- 2001 B中間子におけるCP対称性の破れの発見(KEK, SLAC)



坂田昌一



益川敏英

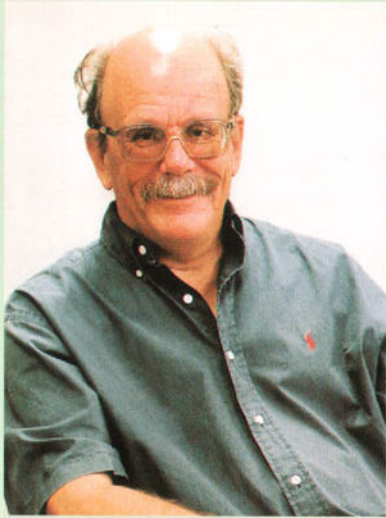


三田一郎

— Belleグループでは、研究方針を決定する必要が生じたとき、どのようなプロセスを踏んでいるのでしょうか。

オールセン Belleグループには代表者が3名います。その下に、執行部としてエグゼクティブ・ボード (EB。代表者3名、測定器サブシステムのリーダーたち、実験の解析部門の代表者から構成) があり、またグループの総意を反映するためのインスティテューショナル・ボード (IB。代表者3名、EB議長、参加研究機関の代表から構成) があります。

Belleグループは、グループの総会を年に3回開きます。重要な決定は、可能な限り総会で総意として採択されます。しかし、ごくまれですが、総意をまとめることができない場合、すべての出席者 (大学院生を含む) の投票で決定されます。



最近の例としては、測定器部分のビームパイプ半径の変更がありました。複数の案があって、どれが良いかサイエントフィックには判断できないような重要かつ難しい決定の場合、総会前にメンバー全員に情報が行き渡るように、慎重な準備が進められます。たいへん、3人の代表者が臨時委員会を指名し、その委員会が課題をかなり掘り下げて検討するのですが、その

際、それぞれの提案者に資料や試験結果の提出を要求することができるようになってきました。

臨時委員会は総会に先がけて、問題が物理学上のものや技術的なものである場合はEBに、政策上の問題や経営上の問題の場合には、IBに報告書を提出します。報告書は、すべてのメンバーが読めるようにウェブサイトに掲示されます。これを受けて、EBやIBでは、綿密な討議を重ねて推薦案を決めます。

その後の総会において、臨時委員会が独自の報告を発表するとともに、EBあるいはIBがそれぞれの推薦案を提示します。それで合意に至れば、その問題は採択されます。投票結果が僅差で、また決定するまでに時間的な余裕がある場合、ふたたびこの過程を繰り返すこともあります。即決しなければならないときには、多数決によって決定します。

次の総会を待たずに決定しなければならない課題が発生した場合は、EBあるいはIBが特別委員会を召集し、遠隔地からでも討議に参加できるようにテレビ会議を行って、そこで決議します。

Belleのメンバーは、電子メールとウェブサイトで何が起きているかについての情報をいつでも入手できるようになっていますが、例外もあります。重要性は低くても緊急を要する問題が生じたときには、EBあるいはIBにおいて電子メールで討議をしたのち、その結果を受けた代表者の相談によって決定されます。

— オールセンさんは、日本のTRISTANや他の国での国際的プロジェクトに関わってこられました。Belleグループや日本の実験グループのあり方をどう見ておられますか。

オールセン Belleのスタイルには特別に日本的な面があります。決定

壊し、単位時間当たりの崩壊数は指数的に、つまり急激に減っていく。ところが CP対称性の破れがあると、中性B中間子のある特定の崩壊モードへの崩壊数は、指数的な減少からのずれが生ずる。中性B中間子 (B^0) 場合と反中性B中間子 (\bar{B}^0) の場合とのずれの度合いの違いが、粒子と反粒子の性質の違いを表すことになり、小林・益川理論の直接的な検証になる、と三田らは指摘した (図 10)。

これを確かめようとKEKとSLACの日米2つの研究所は、80年代末にBファクトリー構想に着手、90年代末から今日まで激

しい実験競争を繰り広げてきた。

昨年までのデータで、「中性B中間子が中性K中間子とチャームニューム (チャームクォークと反チャームクォークの複合状態) に崩壊する」という理論の検証に最も重要な崩壊モードで、CP対称性の破れが日米ともに観測された。

これは中性K中間子以外における初めてのCPの破れの発見である。観測されたCPの破れの大きさは、小林・益川理論が正しいことを強く示唆した結果となっている。

現在、2つのBファクトリー実験はCP対称性の破れやB中間子の稀崩壊現象、たとえば B中間

子がK中間子と μ 粒子2つに壊れる崩壊などで、次々と新発見を発表している。

これらの崩壊は非常にまれにしか起こらない現象である。素粒子物理学では、まれな現象には、さらにエネルギーの高い未知の世界の情報が含まれているとされる。その意味でもBファクトリーの意義は大きい。

いずれにしろ、2、3年の内にボトムクォークに関するCP対称性の破れとフレーバー変換についての全貌が明らかになるだろう。

Bファクトリー物理の明日

それでは、次にBファクトリ

ーが目指すものは何か。

現在の素粒子標準模型は、素粒子の最終理論とは考えられてはいない。たとえば、前述の3つの力の相互作用の強さは、「超対称大統一理論」という標準模型を越える、さらに大きな枠組みの統一模型の予言と一致する。

標準模型を越える物理が存在するならば、そこには必ず新しいフレーバーの構造やCP対称性の破れの原因が含まれており、その効果はB中間子の物理にも現れてくるはずだ。

また、超対称大統一理論ではクォークに対応してスカラークォークといわれる超対称パート

を下す前に、しばしば繰り返し注意深く長い議論や準備がなされま
す。これはいわゆる「ネマワシ」と呼ばれるものでしょうか？

それにもかかわらず、最終決定は必ずしも総会に出された推薦案
のままというわけではありません。総会の決定が執行部の推薦と異
なるケースや、最終決定を下す前にさらに詰めが必要だと総会が判
断することもあり、われわれにとっては驚きです。

Belleでは原則的に、実験に関わるすべての人が方針決定の過程に
おいて意見を言うことができる、というルールを採用しています。
このような決定方法をとれば、当然、その実行にあたっては協力が
得られやすいでしょう。

外国の多くの実験グループでは違います。重要な決定は委員会レ
ベルで下されるのが一般的で、「ひら」は末席にあって発言力をも
っていません。

——日本も、将来的には多くの国際プロジェクトを遂行していくと思
われますが、大きな国際研究組織をつくり動かしていくためのアドバ
イスをお聞かせください。

オールセン Belleグループの規模はとても大きいと考えられているよ
うですが、国際的に見るとそれほどではありません。総会での直接
の議論が可能であり、グループ内での情報のやりとりもうまくいっ
ていますが、米国や欧州の実験グループのように、それこそ大きな
規模になると、そうは行かないでしょう。

将来の大型国際プロジェクトにおいては、コンセンサスの構築を
目的としてグループ全体が問題を論議するというような日本のな
スタイルは実際的ではありません。必然的に、階層性をもった組織構
成を取り入れるべきだと思います。(構成：平田光司)

Belle実験グループは世界13ヵ国、55の大学・研究機関からの約300
人の研究者によって構成される。大学院生は国内外合わせて150人ほ
どで、そのうち総研大の学生は3名。博士論文を目指してさまざまな
研究テーマに取り組んでいる。約50名は1年の半分以上の期間KEK
に滞在し、実験の遂行、データ解析の前線で活躍している。これま
でに26人がBelleの実験で博士号を取得した。

Belle実験グループでは、学生と学位をもった研究者の区別をしな
い。学生も研究グループの一員として仕事を分担し、その成果を博
士論文にまとめていく。学生にとっては世界中から来ている第一線
の研究者から直接指導が受けられるメリットがあるが、半面、自分
の仕事に考察が不十分だと、グループ内で厳しい批判にさらされる
ことも少なくない。

B中間子の崩壊からCP対称性の破れを見つけるなどというデータ
解析は、すべての研究者にとって初めての経験であって、どうすれ
ば正しい答えが得られるかというマニュアルは存在しない。すべて
が試行錯誤である。手法が確立しているようなデータ解析なら、経
験を積んだベテラン研究者のほうが若い学生よりよく知っているが、
まったく新しいタイプの解析となると事情は違ってくる。

データ収集を終えてから会議まで、2週間くらいの短い期間に集中
して解析を行ったことがある。交代で仮眠をとりながらの仕事であ
った。若い学生たちが次々とアイデアを出しながら難しい問題に取
り組み、結果的に会議で発表した解析手法や証明手法はライバルの
それと比べても決してひけをとらなかった。彼らの独創性や論理的
思考能力は世界で十分通用することが証明されたと言えよう。

(山内正則)

ナー粒子の存在が予言される。
スカラークォークのフレーバー
やCP対称性が、クォークと同じ
とは限らない。

超対称大統一理論による予言
の確認をめざして、現在フェル
ミ国立研究所ではテバトロン実
験というのが行われている。ま
た、2007年からは欧州のCERN
でLHC実験が始まる。これらの
加速器実験や、さらに将来の電
子陽電子リニアコライダー実験
では、超対称パートナーのスカ
ラークォークを直接探ることが
目的の1つとなっている。

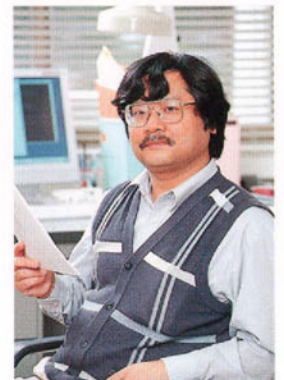
この流れの中で、スカラーク
ォークのフレーバーの構造やCP

対称性の破れを探るのは Bファ
クトリー実験の役割である。そ
のためには、Bファクトリーの
能力を少なくとも今の10倍以上
向上させる必要がある。

また、素粒子物理の発展は宇
宙の歴史の解明にも重要な役割
を果たしてきた。現在の宇宙は
物質の集まりで、反物質がない。
CP対称性を破るどのような相互
作用があるかの追究は、初期宇
宙でどのようにして粒子、反粒
子の非対称性が生じ、なぜ反物
質が消えて現在の宇宙が
できたかを明らかにする鍵となる。

「CP対称性」と「フレーバー物
理」を覗き窓とするBファクトリ

一の物理は、今後数十年にわた
って、素粒子物理の発展に重要な役
割を果たすことになるだろう。



岡田安弘 (おかだ・やすひろ)

専門は素粒子理論。現在は、ヒッグス粒子探索、B中間子崩壊、 μ 粒
子崩壊などいろいろな物理過程で標準模型を超える物理をいかにして
探ることができるかを理論的な立場から解明する研究を行っている。