

Belle 実験による 小林・益川理論の検証と 新たな成果

西田昌平

総合研究大学院大学助教 素粒子原子核専攻
高エネルギー加速器研究機構助教

B中間子におけるCP対称性の破れは Belle 実験によって 2001 年に確認され、小林・益川理論が実証された。Belle 実験はその後精度を向上させながら続けられ、標準理論では説明できない現象を示唆する結果を発見するなど、新しい物理法則の開拓をめざしている。



始まりはK中間子のCP対称性の破れ

小林・益川理論は、そもそも1964年に発見されたK中間子におけるCP対称性の破れを説明すべく、1972年に提唱されたものである。当時知られていたクォークはアップ(u)、ダウン(d)、ストレンジ(s)の3種類だけであったが、小林と益川は、クォークが3世代6種類以上存在すれば、弱い相互作用でのCP対称性の破れが説明できるとした。理論が発表された当初は、CP対称性の破れを説明する一つの可能性と考えられていたが、まもなくチャーム(c)、ボトム(b)クォークと、3世代目のレプトンのタウ(τ)粒子が発見され、クォークに3世代6種類あることが有力視されるようになった。こうして小林・益川理論は素粒子の「標準理論」の一部として組み込まれていった。

西田昌平(にしだ・しょうへい)
Belle実験が運転を開始した1999年から実験に参加し、B中間子の稀な崩壊を通じて標準理論を超えた物理の探索を行ってきた。今は、ルミノシティ増強のためのBelle測定器の改良に取り組んでいる。自分たちで建設した測定器で、標準理論の向こうにある新しい物理を明らかにしたいと思っている。

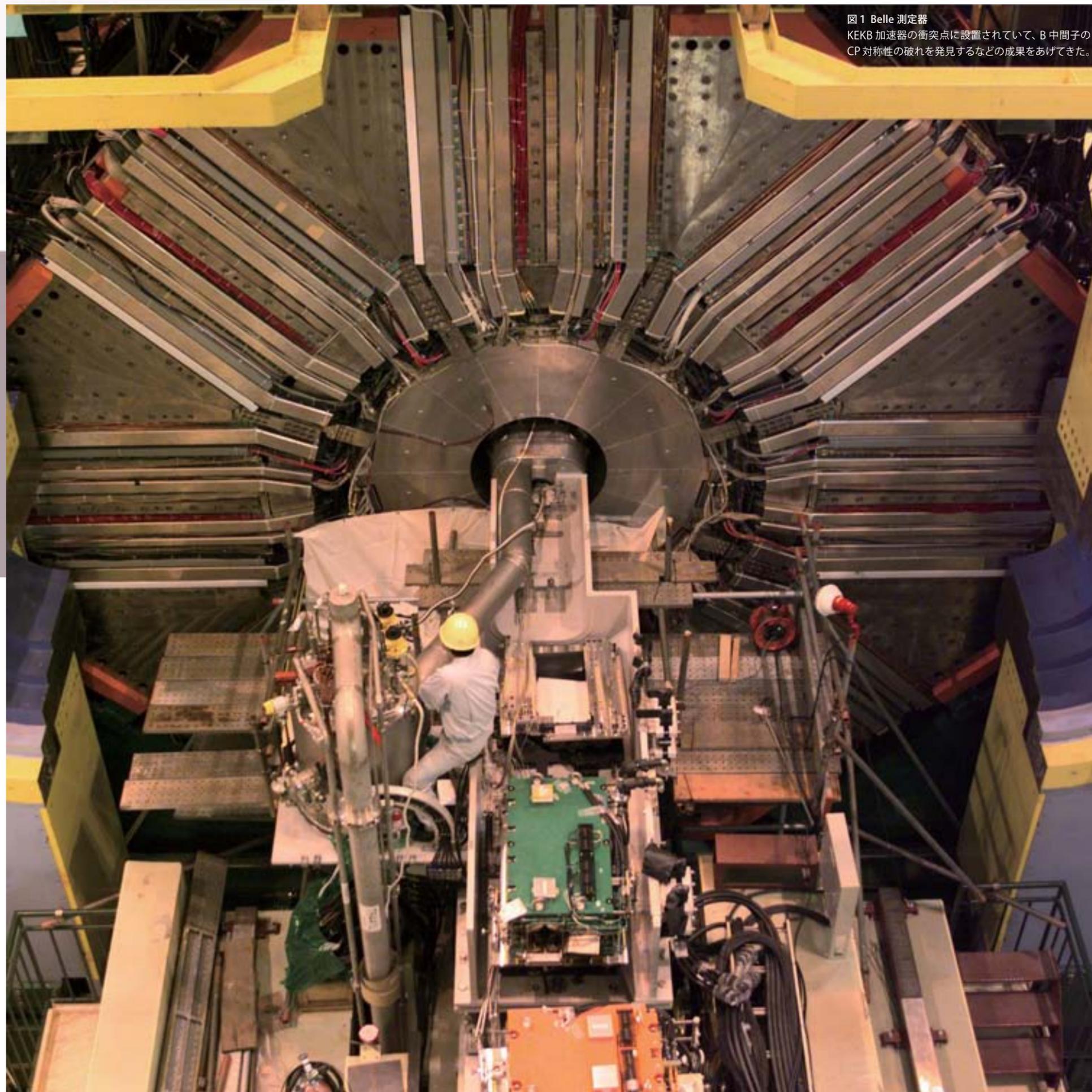
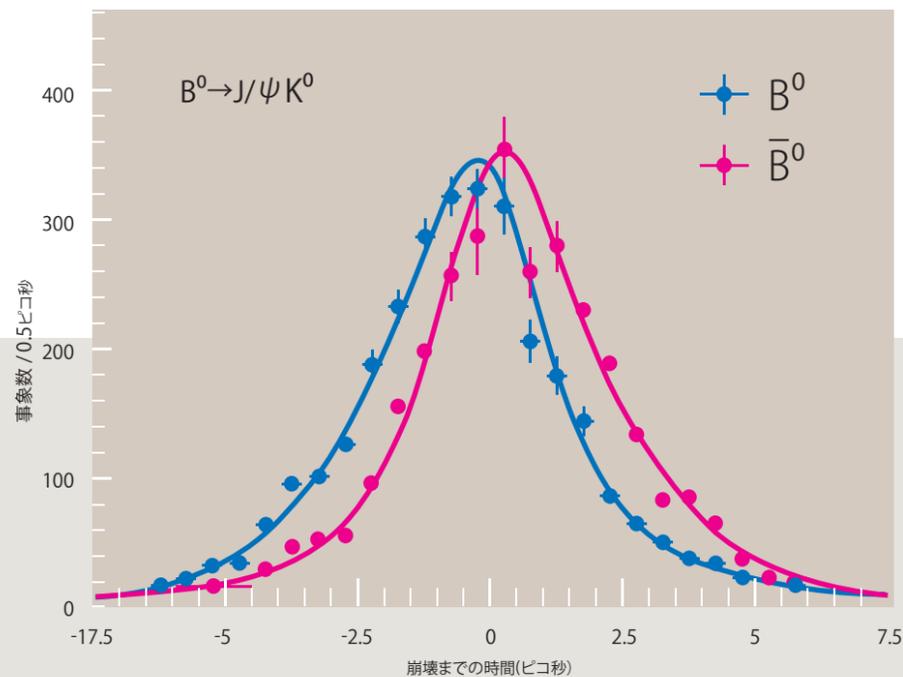


図1 Belle 測定器
KEKB 加速器の衝突点に設置されていて、B 中間子の CP 対称性の破れを発見するなどの成果をあげてきた。

図2 Belle が測定した B 中間子の CP 対称性の破れ
B 中間子が J/ψ と K_s に崩壊するまでの時間の分布をみると、B 中間子 (B⁰, 青) と反 B 中間子 (B⁰, 赤) の間に違いがある。2006 年の結果。



6種類目のクォークであるトップ (t) は 1995 年に発見されたが、この時点においても CP 対称性の破れは K 中間子においてしか観測されておらず、CP 対称性の破れが小林・益川理論によって起こるという実験的証拠はなかった。

B ファクトリー実験における「ルミノシティ」競争

一方で、b クォークを含む中性 B 中間子で CP 対称性の破れを観測できることを 1981 年に三田らが理論的に示した。これは、B 中間子とその反粒子である反 B 中間子が、ある特定の状態で崩壊する場合に、その崩壊の時間分布に B と反 B の間で差があるというものである。とくに、B (および反 B) がジェイ・プサイ (J/ψ) とケーショート (K_s) に崩壊するモードにおける非対称性は大きいと予想されたため、このモードで大きな CP 対称性の破れを確認すれば小林・益川理論を支持することとなる。ただし、B が J/ψ と K_s に崩壊するのは 1000 回に 1 回程度であり、さらに J/ψ などが観測可能なモードに崩壊する確率や、崩壊でできた粒子を検出器で捉える確率を考慮すれば、約 1 億個の B 中間子を作り出す必要がある。

そこで、「B ファクトリー」と呼ばれる大量の B 中間子を生成する電子陽電子衝突型加速器の建設が 1990 年代後半から推進された。アメリカのスタンフォード線形加速器センター (SLAC) 研究所で行われた

PEP-II 加速器を用いた BaBar 実験と、つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の KEKB 加速器を用いた Belle 実験である。

KEKB 加速器では一周 3 km のリングに 8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を回し、衝突させる。重心系のエネルギーは 10.58 GeV であり、ウブシロン (Υ) (4S) という共鳴状態を経て B と反 B 中間子の対が生成される。これらの B ファクトリー実験において最も重要なのは「ルミノシティ」とよばれる衝突性能で、これは B 中間子の単位時間あたりの生成量に比例する。より多くの B 中間子を生成すれば、より精度よく非対称度などを測定できるため、KEKB と PEP-II は実験が開始された 1999 年以来、互いに競い合っ

てルミノシティを向上してきた。最終的には KEKB がこのルミノシティ競争を制し、これまでに世界最高の $1.76 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という記録を達成した。これは 1 秒間に B 中間子を約 30 個作り出すことに相当するもので、KEKB、PEP-II 以前の加速器に比べれば 100 倍以上のルミノシティを実現したことになる。2008 年夏の時点で、KEKB (Belle) と PEP-II (BaBar) はそれぞれ 850 fb^{-1} と 530 fb^{-1} (1 fb^{-1} はおよそ 100 万の B 中間子対に相当) のデータを蓄積した。

KEKB 加速器の衝突点には Belle 測定器 (図1) が設置されている。電子と陽電子が衝突して生成された B 中間子は 1 ピコ秒 (1 兆分の 1 秒) という短い時間で崩壊し、最終的にはいくつかの荷電粒子や光子などになってしまう。Belle 測定器は 7 種類の検出器を組み合わせで作られた測定器で、これら崩壊で生じた粒子をできるだけ捉え、その運動量などを精度よく測定する。前述したように、CP 対称性の研究には B の特定の崩壊が必要であるが、Belle 測定器は基本的に B のすべての崩壊を記録する汎用の測定器であり、B のさまざまな崩壊モードが研究対象となっている。

Belle 実験は、14 カ国 59 研究機関からの約 350 名の研究者が参加する国際共同実験であり、Belle 測定器の建設や運転から収集されたデータの解析まで、分担して行われてきた。

ノーベル物理学賞の決め手となった測定

Belle 実験と BaBar 実験によって B 中間子で CP 対称性の破れが初めて確認されたのは 2001 年のことである。B が J/ψ と K_s に崩壊する場合の CP 対称性の破れは、崩壊の時間分布という形で現れる。この時間分布を測定するために、KEKB 加速器の

エネルギーが電子と陽電子で非対称に設計されている。詳細は『総研大ジャーナル』2号「世界最強の加速器 KEKB の挑戦」を参照いただきたい。

図2は 2006 年のデータであるが、J/ψ と K_s への崩壊の時間分布をみると B 中間子と反 B 中間子で明らかに差があることがわかる。2001 年の時点で、Belle は非対称度 ($\sin 2\phi_1$) が 0.99 ± 0.15 と測定し、B 中間子でも CP 対称性が破れていることを確認した。その後、非対称度の測定値は精度が増し、BaBar 実験と合わせると 0.671 ± 0.024 と測定されている。

この結果は、小林・益川理論を大きく支持するものであり、今回の両氏のノーベル物理学賞の決め手となった測定と言ってもよいであろう。ただし、この結果だけでは、K 中間子や B 中間子の CP 対称性の破れが小林・益川理論によってのみ起こっていることを実験的に検証したとは言えない。小林・益川理論であらわれるパラメータは特定の行列要素であり、これがさまざまな実験結果を矛盾なく説明する必要がある。

この行列要素は図3のような三角形 (ユニタリ三角形) に描くことができる。この三角形の辺と角度は、B や K の崩壊を利用して測定することができる。たとえば、B の J/ψ と K_s による崩壊での CP 非対称度は、

角度 ϕ_1 を与える。もし、さまざまな測定を行った結果この三角形が閉じなければ、小林・益川理論以外に起因する CP 対称性の破れが存在することになる。したがって、B 中間子の CP 対称性の破れの発見後の B ファクトリーの役割の一つは、この三角形の辺や角度をさまざまな崩壊モードを用いて精度よく測定して、三角形が閉じているかを検証することである。

三角形の残りの角度 ϕ_2 と ϕ_3 は、B 中間子の別の崩壊を利用して求めることができるが、角度 ϕ_1 に比べ測定が困難とされていた。しかし、ルミノシティの向上によるデー

タの蓄積、新しい測定手法の開発などにより、ある程度の測定が可能になった。図3は、2008 年夏の時点での三角形で、三角形の頂点 (ρ, η) の許される範囲が示されている。三角形の頂点の位置は諸々の測定が数%の精度で一致している。この三角形が厳密に閉じているのか、それともこの三角形の中に未知の CP 対称性の破れの起源が隠れているのかはわからないが、三角形に大きな矛盾はないことがわかった。即ち、これまでに実験室で測定されてきた CP 対称性の破れが、小林・益川理論の提唱する機構でおこっていることが証明されたのである。

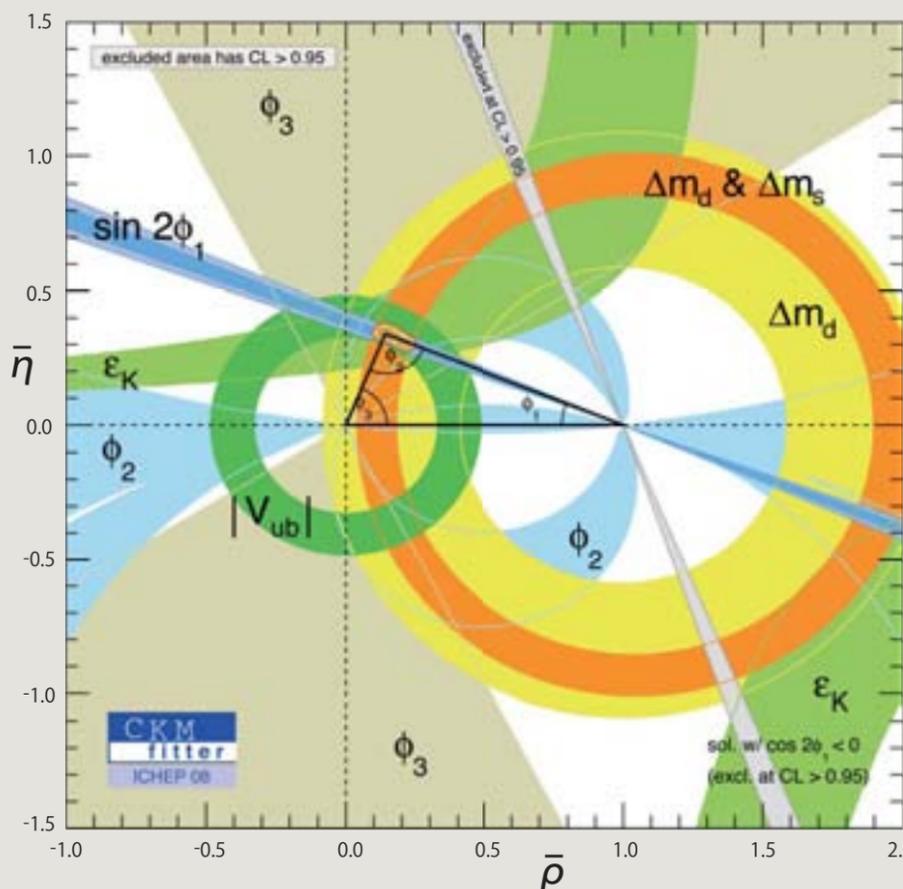


図3 2008 年時点でのユニタリ三角形
主に B ファクトリー実験の結果から得られた値を図示すると、色分けしたような分布になる。それらの交点が三角形の頂点で一点に集まるということは、CP 対称性が小林・益川理論によって説明されることを表している。

Bファクトリーの若手研究者

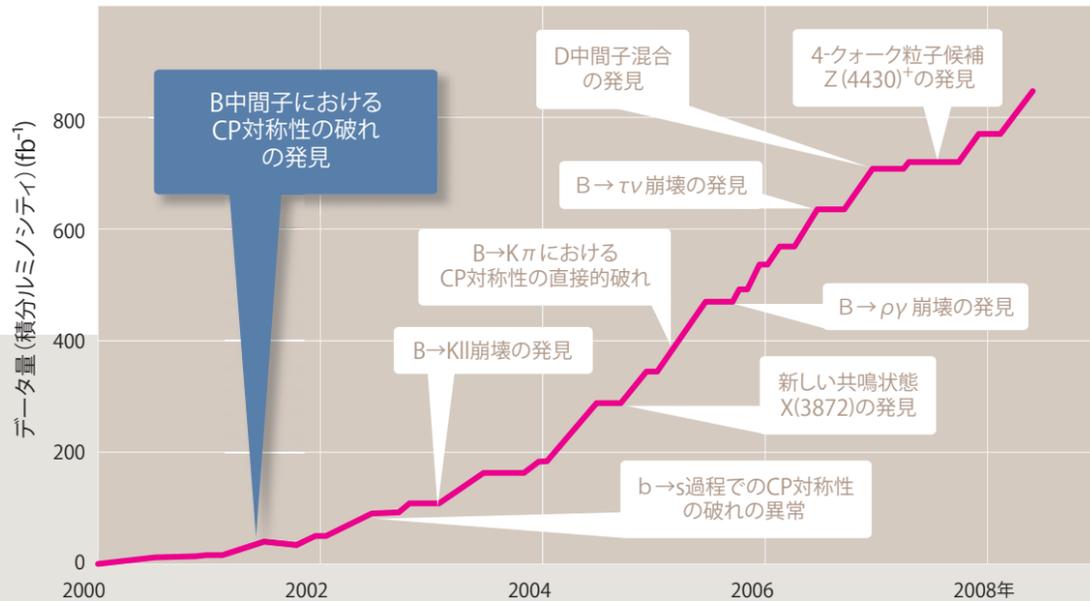


図4 Belle実験のこれまでの主な成果

グラフはその時点までの総データ量(積分ルミノシティ)を表す。データ量が増えるにつれ Belle は素粒子の世界の新しい知見をもたらしてくれたが、その中には標準理論を超える物理を示唆するものも含まれている。

新しい物理法則とCP対称の破れの起源を探る

このように、小林・益川理論はBファクトリー実験により検証されたわけであるが、これでBファクトリー実験の役割が終わったわけではない。現在の素粒子の標準理論はこれまでの実験データとは非常によく一致するが、究極の理論というには不十分であって、より高いエネルギー領域に新しい物理が存在すると考えられている。一般にはTeV(GeVの千倍)のエネルギー領域に、超対称性粒子のような標準理論を超えた新粒子が存在すると予想されている。これを観測するため、ヨーロッパのCERNでは周長27kmの巨大加速器を用いて7TeVの陽子ビームを衝突させるLHC実験が開始されようとしている。

また、宇宙が誕生した初期には粒子と反粒子が同数だけ存在したはずなのに、現在の宇宙は粒子優勢である。これを説明するためには、CP対称性の破れが必要なのだが、実は小林・益川機構でおこる弱い相互作用のCP対称性の破れだけでは定量的に説明できない。よって、新しい物理においては、小林・益川理論とは別のCP対称性の破れの起源が存在すると予想されている。

Bファクトリーでは標準理論にあらわれな

い重い新粒子を直接的に作り出すことはできないが、Bの崩壊を詳細に調べれば新粒子の効果をみる事ができる。たとえば、崩壊の際にWボゾンなどの粒子を生成してすぐに吸収してしまうような過程では、新粒子の影響を受けると考えられている。このような過程を経るBの崩壊の分岐比やCP非対称性などは、Belle実験では精力的に調べられてきた。

2002年ごろには、bクォーク→sクォークという過程でCP非対称度が標準理論の予想からずれるという「異常」がみつき、報道されたことがある。また、B中間子がKとπに崩壊する場合のCP非対称度が、中性Bの場合と荷電Bの場合で異なるという、標準理論では説明しにくい現象がみつかった。これらが新しい物理、新しいCP対称性の起源を示すものかどうかを結論づけるためには、さらなる測定精度の向上や理論的不定性の評価が必要となる。

Belle実験では、そのほかにもD中間子と反D中間子の混合や、4つのクォークからなる複合粒子の候補を発見するなど、cクォークを含む中間子やτ粒子の崩壊を用いて、さまざまな物理を研究してきた。このようなクォークの様相を探る「フレーバーの物理」を中心に、新しい物理の探索、強い相互作用の理解など、現代の素粒子物理に大きな貢献をしてきた。

Bファクトリー実験の一つSLACのBaBar実験は2008年をもって運転を終了した。Belle実験は現在も運転中であり、KEKBのルミノシティを現在の50倍に増強する、KEKBの高度化計画が検討されている。この計画では、KEKBの運転を3年ほど停止して、KEKB加速器やBelle測定器の改良を行う。改良後のBelle実験では、フレーバー物理を通して、未知のCP対称性の破れの起源を探索するとともに、LHCで発見されるであろう新しい粒子に働く力の性質やその理論のもつ対称性を調べることができる。

標準理論を超えた新しい物理の候補としては、超対称性理論や余剰次元などが提案されていて、その中にもいろいろなモデルが存在する。どのモデルが正しいのか、また新しい理論ではCP対称性がどのように破れているのか。標準理論では左右の対称性が破れているが、新しい理論でこの対称性が復活しているのか。これらは、B中間子のまれな崩壊を高い精度で測定したり、τ粒子の崩壊などから、標準理論の背後にある新しい理論の解明をすすめるとともに、物質優勢の宇宙を作り出したCP対称性の破れの謎を解明することが、今後のBelle実験の使命である。



西脇みちる (にしわき・みちる)
KEKB博士研究員(総研大論文博士)

私は、粒子加速器という装置そのものにかかわる研究をしています。将来の大強度加速器を含めて今、「電子雲効果」が問題となっています。これは、加速された粒子が加速器の内壁にぶつかることにより電子がはじき出され、それが雲のように浮かぶ現象です。加速粒子の飛行を妨げるほか、真空度の悪化や、内壁の発熱など、さまざまな障害を起こします。

この電子雲効果の低減をめざし、私は、さまざまな材料表面における2次電子放出率を測定し、同時に表面状態の観察を行うといった研究をしています。最近では、低い2次電子放出率を示す「グラファイト化」

処理をしたビームダクトをKEKB加速器の一部に設置して、電子雲密度の低減効果の実証実験に取り組んでいます。

この研究では、材料のいろいろな“表情”を知ることができます。同じように見える表面でも、詳しく分析してみると“別人”のような結果が得られたりします。それが難しいところでも面白いところでもあります。

小林・益川理論を実証したKEKB加速器に、自分がほんの少しでもかかわっていることをとても誇りに思います。今の研究の中から、1つでも実際の加速器に応用されればいいと思いつつ、日々研究を続けています。



住友洋介 (すみとも・ようすけ)
総合研究大学院大学
素粒子原子核専攻5年一貫博士課程5年

私は万物の基礎となる構造・力に興味を持ち、極微の世界の研究をしています。その中でも「超弦理論」、あるいは統一理論の候補である11次元理論「M理論」に焦点をあて、統一理論の構築にほんの少しでも近づこうと努力しています。

小林・益川理論をはじめ実証された理論においては、「対称性」が重要な役割を果たしています。より大きな対称性を持つ超弦理論などによって現在の事象が説明できれば、世界の根本を決めている基本的な約束事の理解へとつながります。私は、確実に存在しているけど今はまだ明らかでない物理を解き明かしていくことに、魅力を

感じています。

「標準模型」は、加速器実験の結果と非常によく合います。しかしこの模型では、全宇宙のわずか4%程度しか理解できません。私は超弦理論やM理論によって、残りの多くを占める「暗黒エネルギー」の問題に挑戦していきたいと考えています。

KEKで追加検証が行われている小林・益川理論のお二人、今私が研究している弦理論の基礎を築いた南部先生がノーベル賞を受賞され、個人的にも非常にうれしいです。お三方の優れた業績をきちんと評価してもらえることが、われわれ若手にとって研究の励みになると実感できました。



中山浩幸 (なかやま・ひろき)
KEK共同利用研究員
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程3年

Belle実験によってCP対称性の破れが発見された2001年、私は大学2年生でした。見学でKEKを訪れた私は、巨大な実験装置の迫力と、そこで働く研究者たちの熱気に圧倒され、この分野に進むことを決めました。

そして今、私はBelle実験グループの一員として、B中間子の崩壊を観測しています。私たちのグループでは、現在の「Bファクトリー」および、数年後に計画されている「スーパーBファクトリー」によって、従来の理論の枠組みを超えた新しい物理現象の発見をめざしています。私はとくに、B中間子に含まれるbクォークが、sクォークと2つ

のレプトン(電子またはミュー粒子)に変化する過程に着目して観測を行っています。

ノーベル賞受賞の瞬間に、実験グループの一員としてリアルタイムで立ち会えたのは本当に幸運でした。翌日の主要な朝刊を買い込み、今も大事に保管してあります。実験的アプローチの魅力とは、世界がどのように生まれたのかという根源的な問いを、自然という“先生”と対話しながら検証していくことができる点にあると思います。この受賞をきっかけに、たくさんの若い方々にこの分野に興味を持っていただき、一緒に盛り上げていけたらいいと考えています。

(構成 吉戸智明)