

標準理論を超えた 何かがありそうだ

山内正則

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素粒子原子核研究所教授



KEKに建設されたBファクトリーの全景。環状に見えている地下に周長3kmのリングがあり、その中で電子と陽電子がたがいに逆向きに回り、一カ所で衝突する。ここで生成されたB中間子と反B中間子のペアが研究の対象である。

われわれはこれまでに物質と反物質の非対称性を調べた研究を行ってきたが、昨2003年と今年、この非対称性に標準理論を超えた新しい物理法則が関与している可能性が高いと考えられる結果を得た。これまでの研究の経緯と、この新しい結果について紹介しよう。

より本質的な物理法則を求めて

物質の最小単位とされる素粒子の世界の物理法則は、「物質」と「反物質」が対等に存在することを許している。「反物質」とはマイナスの存在とでもいったもので、プラスの存在である「物質」と出会うと跡形もなく消滅してしまうものである。ところが、現在の宇宙には物質は存在するが、反物質が存在する証拠はない。宇宙ができた当初はどうだったのかを直接調べることはできないが、現在の宇宙論によればこの世は百数十億年前に真空、すなわち何も無い状態から始まったと考えられている。この何も無いという状態からは物質と反物質が等量つくりだされることはあっても、現在の宇宙のように、どちらか一方だけになるには余程の事情が必要であろう。この事情がいったい何なのかは物理学上の大問題で、人間の知的好奇心を大いにくすぐる謎である。

この大問題を解明する鍵は、物理法則が厳密には物質・反物質で対称ではなく、少しだけ違っている（CP対称性の破れ）ところにある。このことが最初に発見されたのは1964年で、73年には小林誠（現・高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所長、総研大素粒子原子核専攻長）と益川敏英（現・京都産業大学教授）がこれを自然に説明する理論を提唱した。「小林・益川理論」として知られるようになるこの理論は、当時知られていた素粒子のクォーク以外に3種類のクォークが存在することを予言していた。その後、加速器を使った研究でこれらの新しいクォークが次々に発見されるに及んで、小林・益川理論は素粒子の標準理論の一部と考えられるようになった。

しかし肝心の粒子・反粒子の対称性の破れについては、さまざまな実験の試みにもかかわらず、一例を除いて長い間よくわからないままであった。このような経緯

を受けて三田一郎（現・名古屋大学教授）らは1981年、B中間子の崩壊現象を調べることによって小林・益川理論の定量的な証明ができることを提案した。しかし、これを実験的に行うためには途方もない性能の加速器が必要であり、実現にはさらに10年以上の年月がかかることになる。

ところで、素粒子物理学の「標準理論」とは物質とその相互作用を記述する非常にすっきりとした理論で、これまでに知られている実験事実は少数の例外を除いてこの理論で完璧に説明できる。しかしながら、この理論を素粒子の最終的な理論と考えるにはいくつか本質的な問題があるために、ほとんどの研究者はこれを超える、より本質的な法則が存在するはずで、ある近似において標準理論が成り立っているのだらうと考えている。この新しい物理法則を見つけようとする努力こそが、現在の素粒子物理学研究の中心課題といっても過言ではない。

最近になってニュートリノという粒子に質量があることが確実になり、この発見が新しい物理の突破口になるという期待は大きいですが、他の手がかりを探す努力も世界中で懸命に続けられている。

国際研究チームによる解析競争

このような背景において、三田らのアイデアを実現して小林・益川理論を証明し、さらにこの現象を詳しく調べることによって、新しい物理法則を探ってやろうということで登場したのがBファクトリーである。1999年に高エネルギー加速器研究機構（KEK）で建設されたBファクトリー（KEKB）は周長約3kmの加速器と巨大な測定装置からなる。加速器では電子とその反粒子である陽電子を高いエネルギーのまま逆方向にぐるぐる回し、1カ所で正面衝突させる。このときの衝突エネルギーにはうまい値が選ばれていて、衝突によってB中間子とその反粒子である反B中間子のペアがつけられる。B中間子（以下Bと略す）というのは2番目に重いクォークであるボトムクォーク（b）を含む重い粒子である。Bと反Bがつけられる衝突点には測定装置が置かれているが、

Bの寿命は1兆分の1秒ほどしかないので、飛んでいる様子を直接観察することはできない。崩壊してできるいろいろなカケラ（それも素粒子である）を精密に測定することによってB（あるいは反B）の振る舞いを調べることができるはずで、そこから粒子・反粒子の非対称性を調べて、小林・益川理論の予言を確かめようという筋書きである。

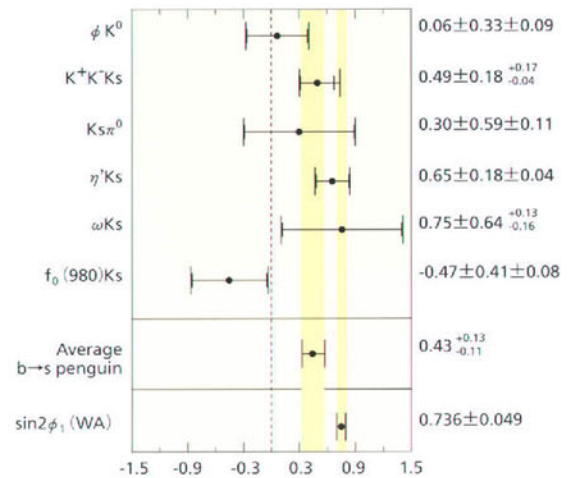
この実験でもっとも大切なのはルミノシティと呼ばれる加速器の性能である。つまり、Bを毎秒何個発生させられるかという性能で、Bファクトリー（B工場）という名が表しているように、工場の生産能力ということになる。KEKBはBと反Bの対を毎秒14対ほどつくり出ることができる。この性能は世界一であり、それ以前の加速器に比べて10倍以上の生産性を誇っている。これに測定装置を建設して実験とデータ解析を遂行しているのはBelleの愛称をもつ実験グループで、世界13カ国55研究機関から参加する約400人の研究者からなる国際研究チームである。

Belleの研究計画には強力なライバルがいる。アメリカのスタンフォード大学線形加速器センター（SLAC）は素粒子の研究において先輩格の研究施設で、ここでも一つのBファクトリー、PEP-IIがKEKBとほぼ同時に建設された。そこで実験を続けるBaBarグループはわれわれと同様、国際共同研究チームで、両者は友好的ではあるが、激しい競争を続けながら粒子・反粒子の物理学を追求してきた。厳しい競争にさらされるのは研究者にとって非常に大変なことであるが、一方、短期間で成果が出ることにつながり、双方で結果を確認し合うことができるなど、メリットも大きい。

データに現れた新たな可能性

Belle実験では、この3年間に画期的な成果が得られた。まず第一は、2001年7月に得られたBにおける粒子・反粒子の非対称性についての最初の発見である。その経緯は既刊の『総研大ジャーナル』第2号（2002年9月）に詳しく述べたので、そちらを参照していただきたいが、小林・益川理論が予言するおりの非対称性がこのときに発見されたのである。その後、実験精度が飛躍的に改善され、現在では、この理論の定量的な証拠としてゆるぎないものとなっている。さらに、これまでに二つのBの崩壊パターンで非対称性が見つかっている。

第二の結果はより重要な意味をもっている。もし小林・益川理論だけが粒子・反粒子の非対称性にかかわる唯一の物理法則であるとするならば、「Bが崩壊する際の非対称性の大きさが、ある種の崩壊パターンの場合に共通している」という予言がある。2001年に初めて非対称性を発見したときに使った崩壊パターンはBが ψ とKsに壊れるというものであったが、このときの非対称性と同じものが、Bがたとえば ϕ とKsに壊れると



きにも見られるはずだ、ということである。前者についての測定はこれまでに大変よい精度で行われ、+0.73という非対称性が確立されている。

ϕ とKsへの崩壊は、それが起こる確率が低いためにむずかしく、2003年になって初めて成功したが、そのときの値は-0.96。まだ測定誤差が大きいとはいえ、このズレは小林・益川理論だけでは説明できそうもない、ということで、この結果を発表したシカゴの国際会議で大きな反響を呼んだ。

実は、このようなことが起きるかもしれないということは理論的に予測されていた。前に述べたように、この分野の研究者には、標準理論を超えた物理法則があるに違いないという信念があり、その手がかりを懸命に探していたという経緯があるが、そういった新しい物理法則があれば、Bが ϕ とKsに壊れるときの非対称性を変えてしまうかもしれない、という説である。したがって、それから1年かけてデータを蓄積し、高精度の結果が出たときにこの数字がどうなるか、世界中が注目していた。その結果を報告したのが、今年8月に北京で開かれた高エネルギー物理学国際会議である。結果は、 ϕK_s に関してはズレが小さくなった（+0.06±0.33）が、これと同じように興味もたれる崩壊パターンについての平均値が+0.43±0.11という結論で、やはり標準理論を超えたものが何かありそうである。われわれの競争相手であるBaBarも同時に結果を発表し、この値も+0.42±0.10と、われわれの値にピッタリと一致していた。すなわち、日米で新しい物理法則を示唆する結果が一致して得られたことになる。

そうはいってもまだ統計精度が不十分で、発見しましたと報告できる段階ではないが、重要な手がかりが得られたものと考えている。今後はこれを詳しく調べて、新しい物理法則を確立し、さらに解明するということが大きな研究課題になるだろう。研究者としては願ってもない大きなチャンスに遭遇した幸運に感謝したい。

粒子・反粒子の非対称性の大きさ（ $\sin 2\phi_1$ ）を、さまざまな崩壊パターンについて測定した結果。もし、標準理論だけが唯一の物理法則であれば、最下段の値（+0.736）にすべて一致するはずであるが、ここにあげた6種類のパターンの平均値（下から2段目）は+0.43で、新しい何かを示唆されている。