

# CP対称性の破れをとらえる

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教授

今年はサッカーの世界カップがあった。結局ブラジルが優勝したが、前回の覇者フランスは一勝もできなかった。どんなことでも世界一になり、それを維持するのは大変なことだと痛感させられる。

素粒子研究の世界も例外ではない。現在われわれは、加速器KEKBによってB

中間子におけるCP対称性の破れを見つけようとしているが、その競争相手は加速器PEP-IIを使って同じ目標を追いかけている米国スタンフォード大学線形加速器センター (SLAC) のグループである。

どちらの加速器でも、電子とその反粒子である陽電子をほぼ光速にまで加速

し、両者を衝突させてB中間子をつくる。そして衝突点に置いた測定装置で、B中間子が瞬時に崩壊していく様子を検出し、その壊れ方からCP対称性の破れを見いだそうとしている (図①)。

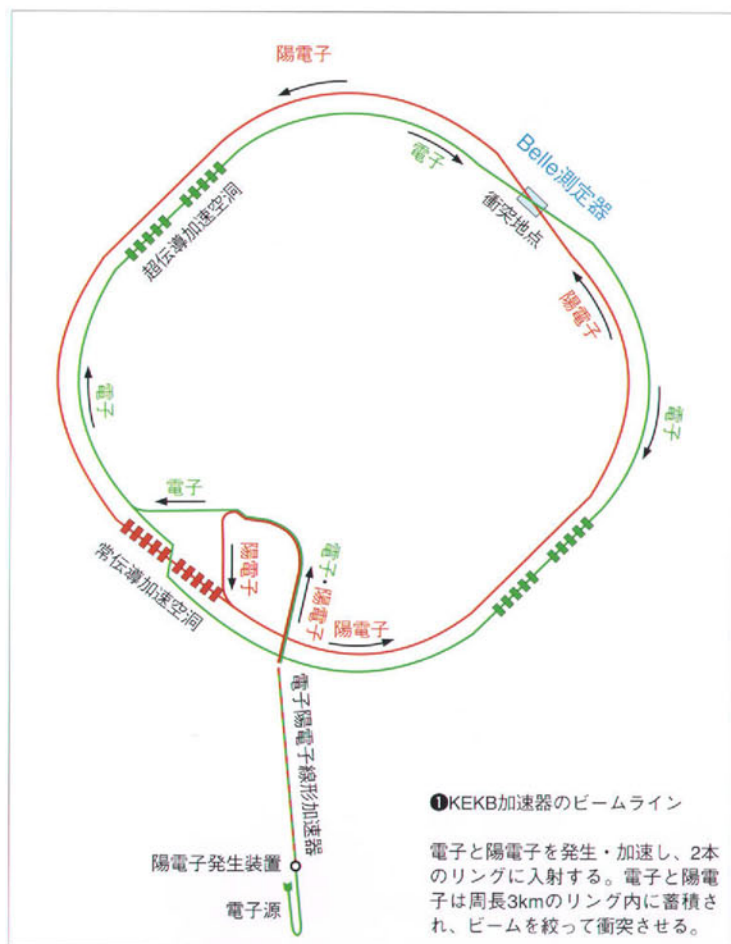
ここでCP対称性についてちょっと触れておこう。ある粒子には質量が同じで、電荷が逆の反粒子が必ず存在する。粒子と反粒子に働く物理法則が同じ場合をCP対称性不変、違う場合をCP対称性が破れているという。詳しくは岡田安弘氏の文 (6~15ページ) を読んでいただきたい。

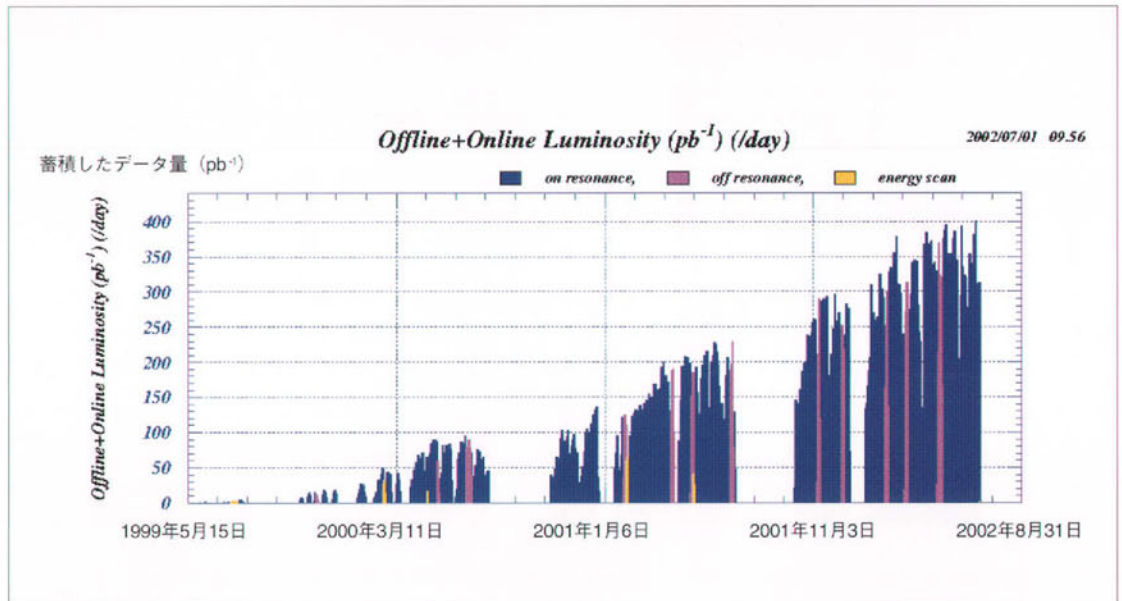
## ルミノシティ競争

SLACとの競争に負けないためにもっとも大切なのは、「ルミノシティ」の向上だ。ルミノシティは衝突地点における電子と陽電子の数の積に比例するもので、その値が大きいくほど衝突確率が増し、B中間子がたくさんできる。CP対称性の破れを確かめるには、三田一郎<sup>さん</sup>の予言からすると、1億個近いB中間子の壊れ方を調べる必要がある。

したがって、とにかく先に1億個のB中間子を集めてCPの破れを見つけた方が、人類の知識に貢献したという栄誉を得ることになる。1週間でも遅れたら、発見をあとから再確認した、という評価しか与えられないだろう。

科学としては後者も重要なことに違いないが、KEKBもPEP-IIも税金を使って開発・運営している以上、「わが国で最





②KEKBが測定したルミノシティの日変化

ルミノシティの連続的な増加は、加速器に蓄える電流を増やすことができたことと、電子雲などによるビーム不安定性を解決したことが要因である。詳しくは生田勝宣氏の文(16~21ページ)にある。

初に発見されました」という報告をして納税者に誇りを感じてもらおうのが、投資に報いる筋というものだろう。ここから熾烈なルミノシティ競争が始まった。

KEKBの特徴と性能については生田勝宣氏の解説(16~21ページ)に譲るとして、図②で示されているルミノシティの変化を見ていただきたい。横軸は日にち、縦軸はその日に蓄積したデータの量である。これはルミノシティの1日ごとの積算で、 $\text{pb}^{-1}$ という単位で示されているが、つくり出したB中間子の数に対応している。1999年6月の実験開始以来、3年分の歴史が描かれている。1日当たりの成績が日ごとに向上していく様子がうかがえる。

PEP-IIはKEKBより半年早く実験を開始、同様に成績を向上させてきた。実験初期の半年の差はわれわれにとって大きなハンディであり、PEP-IIにCP対称性の破れを発見される前に追いつくことがKEKBの至上命題であった。抜きつ抜かれつの競争を繰り返しながら、ルミノシティの世界記録を塗りかえて3年間実験を進めてきた。この激しい競争の末、CP対称性の破れが発見されたわけだが、まずその検出に威力を発揮した巨大な測定装置を紹介しよう。

### 巨漢Belleの高感度性

電子と陽電子の衝突に伴うさまざまな反応の中で、B中間子(以下B)とその反粒子である反B中間子(以下 $\bar{B}$ )が対をなしてつくられる。

Bはつくられてから1ピコ秒(1兆分の1秒)ほどの短い時間のうちに壊れて別の複数の軽い粒子となって飛び散る。この短い時間の間にBが飛ぶ距離は0.2mm程度しかないので、Bが飛んでいる様子を直接観測することはできないが、崩壊でできた軽い粒子から間接的にBのことが調べられる。飛び散る粒子はどの方向に出るかわからないので、これらを全部つかまえるために衝突点を囲むように粒子測定装置が設置されている。

この測定装置はBelle(ベル)と呼ばれるが、その由来を説明しよう。最初のBはB中間子、次の「e」は電子(electron)のつもり、その次の「le」は「el」の逆で陽電子のつもり。したがってBを電子と陽電子でつくる、という意味づけだ。

Belleは縦、横、高さのそれぞれが約8m、重さ1000トンを超える巨漢だ。これは、図③のように、さまざまな機能をもつ7種類の粒子検出器の組合せでできており、Bの崩壊を高い精度でとらえることができる。

この測定装置は衝突点に設置され、両側から入った電子と陽電子は装置のほぼ中央で衝突して反応を起こす。図⑤の例では、衝突点でBと $\bar{B}$ の対ができ、その両方のカケラ(正しくは崩壊の終状態)が飛び散るようすが記録されている。中央から飛び出す実線が示しているのは電荷を持つ粒子(荷電粒子)の軌跡である。

測定器全体には超伝導コイル(図④のソレノイド)によって、1.5テスラの磁場がかけている。荷電粒子が磁場中を走ると力を受けて曲がる。そのため軌跡が弧を描いているのがわかるだろう。この曲率半径を測ることにより、粒子の運動量が測定される。この軌跡は3次元的に測定され、Bの崩壊から飛び出した瞬間の粒子の「運動量ベクトル」がわかる。

荷電粒子の「通過位置」は、中央部にある半導体を使った精密検出器(図⑥のSVD)で詳しく測定され、Bが壊れた点の「空間的位置」を求められる。この位置精度は約0.1mmで、Bがつくられてから壊れるまでに飛んだ距離、すなわち「Bが生きていた時間」を測定できる。これがCPの破れの測定にとって大変重要になる。

Bの崩壊で出てくる粒子は荷電粒子だけではなく、電気的に中性の粒子もある。このうち重要なのはガンマ線である。ガンマ線は磁場で曲がらないし、軌跡測定



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

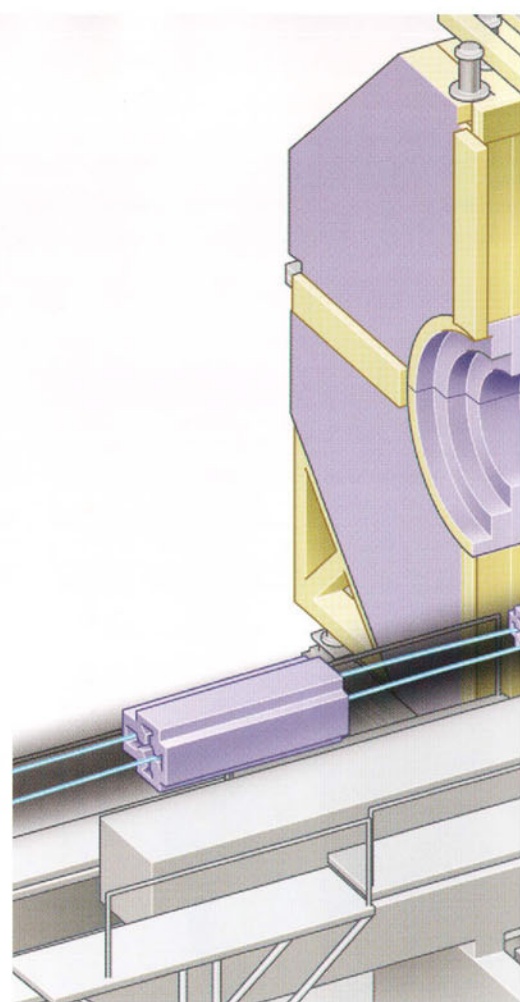
Belleは非常に複雑かつ大規模な測定装置なので、構想をまとめて完成に至るまでには、大変な時間と労力を要した。われわれは、「測定器をつくって実験を遂

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