

なぜ反物質は存在しないのか —CP 対称性の破れの証拠をとらえた—

高エネルギー素粒子物理学研究室 准教授 飯嶋 徹

素粒子と初期宇宙史

杉山さんの講演は壮大な宇宙の話でしたが、私の話は物理の研究の中では一番小さな要素、素粒子についてです。素粒子の研究が宇宙史解説の中でどのように位置付けられるかを、まずお話しします。

図 1 は、宇宙のはじまりであるビッグバン直後の初期宇宙の発展を示したものです。杉山さんはビッグバン 3 分後からの出来事をお話しされましたが、私の話はビッグバン 10^{-5} 秒後までの出来事です。ビッグバン直後の初期宇宙は、非常に高温でした。このようなエネルギーの高い状態では、分子や原子は存在できず、ばらばらの素粒子となっています。天文学では望遠鏡を使って宇宙の果てを見ようとしています。望遠鏡で直接見ることができるのは、宇宙の晴れ上がり以降だけです。それ以前の素粒子で満たされた宇宙の様子は、加速器を使った実験で調べることができます。

加速器を使った素粒子の研究によってこれまでに分かっていることを図 2 にまとめました。これは、宇宙を構成している一番基本的な粒子は何かという問いに対して、私たちが今持っている答えです。現在の素粒子標準理論では、クォークとレプトンがわれわれの宇宙を構成している基本的な粒子であると考えられています。

クォークには、アップ (u)、ダウン (d)、チャーム (c)、ストレンジ (s)、トップ (t)、ボトム (b) という 6 種類が知られています。レプトンにも 6

種類あります。電子 (e)、ミューオン (μ)、タウ (τ) と、3 種類のニュートリノ、電子型 (ν_e)、ミュー型 (ν_μ)、タウ型 (ν_τ) です。ほかに、力を媒介するボゾンがあります。ボゾンは 4 種類あり、物質を構成している粒子間の電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用を担っています。そして、すべての素粒子には質量や寿命は同じだが符号の異なる相棒、反粒子が必ず存在します。

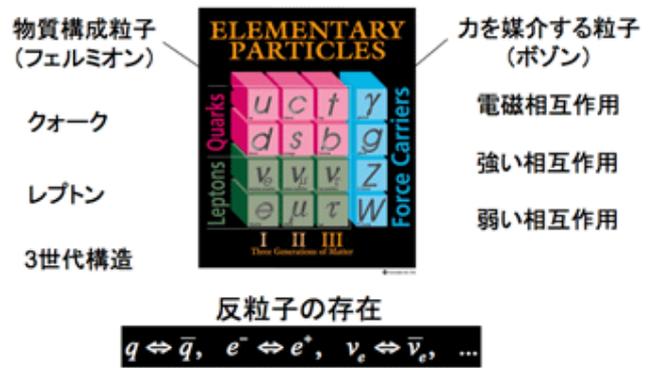


図 2：現在の素粒子標準理論

消えた反粒子

ところが、現在の宇宙には反粒子がありません。ビッグバンによって粒子と反粒子ができたはずですから、宇宙の進化の過程のどこかで反粒子が消えてしまったらしい。それはなぜか。

この謎を説明できるシナリオは、こうです。宇宙の初期に素粒子 X と反 X があり、それぞれクォークと反クォークに崩壊するとします。その崩壊率が非対称、つまり崩壊率が少し違う。崩壊率の非対称度は 10^{-10} ととてもわずかですが、クォークが 100 億プラス 1 個できるのに対して反クォークは 100 億個です。100 億個のクォークと 100 億個の反クォークは衝突して対消滅し、最後にクォークが 1 個だけ残ります。それがわれわれである、というシナリオです。

粒子と反粒子の崩壊率が非対称であることを「CP (粒子—反粒子) 対称性の破れ」と呼んでいます。宇宙の初期の出来事を見てきたかのように言いましたが、私たちは加速器を使って素粒子と反粒子を大量に作り出し、CP 対称性の破れが本当にあるのかを調べている

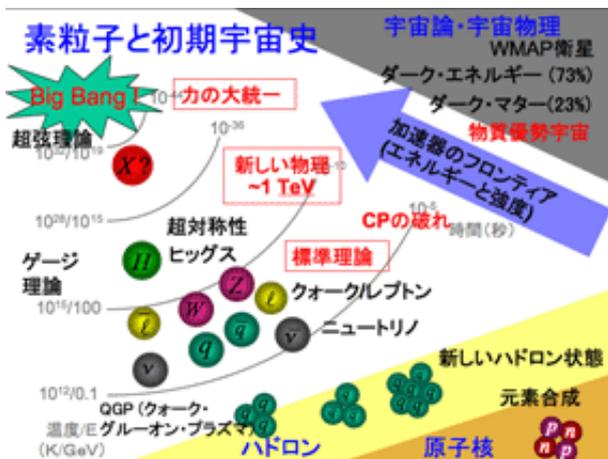


図 1：素粒子と初期宇宙史

のです。

B ファクトリーで B 中間子対を大量に生成

ここで、今日の話の主演となる粒子が B 中間子と反 B 中間子です。B 中間子は反ボトムクォークとダウンクォーク、反 B 中間子はボトムクォークと反ダウンクォークでできていて、質量は陽子の約 5 倍、寿命は 1.53 ピコ秒と非常に短い粒子です。私たちは、B ファクトリーで B 中間子と反 B 中間子を大量に作り出し、両者の崩壊の違いを精密に測っています。

B ファクトリーは、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構にあります。地下に設置された直径 1km の KEKB 加速器で 8 ギガ電子ボルトに加速した電子 (e^-) と 3.5 ギガ電子ボルトに加速した陽電子 (e^+) を 1 点で衝突させ、B 中間子と反中間子を大量に作り出します (図 3)。KEKB は、世界最高強度を達成し、B 中間子と反 B 中間子のペアを年間約 2 億対生成することができます。同様の加速器はアメリカのスタンフォード線形加速器センターにもあり、2000 年の実験開始以来、両者の熾烈な競争が続いています。初めのうちはアメリカの PEP-II の方が調子よかったのですが、途中で KEKB の性能が上回りました。2006 年 7 月 24 日時点で、実験開始から蓄積された B 中間子対のデータは、PEP-II の 3 億 7000 万に対して、KEKB は 6 億 3000 万に上ります (図 4)。

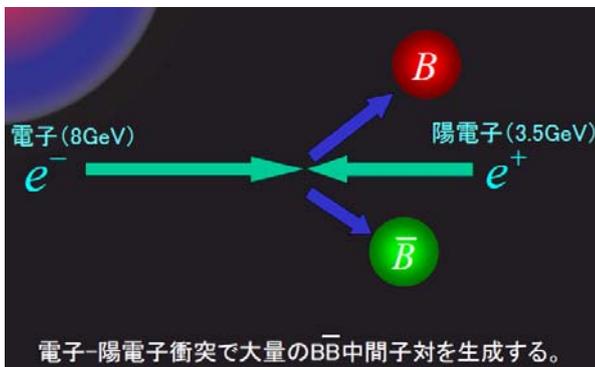


図 3 : B ファクトリーによる B 中間子対の生成

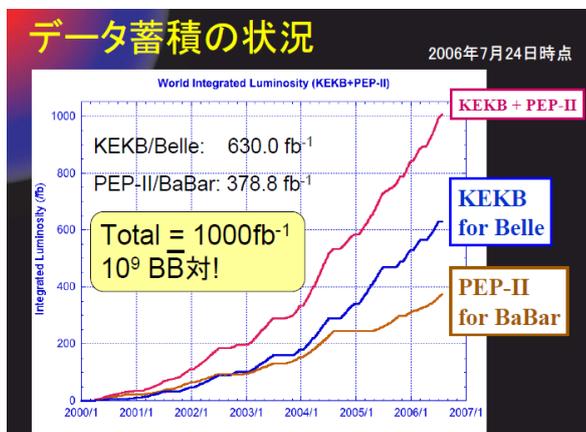


図 4 : B 中間子対のデータ蓄積

電子と陽電子の衝突点の周りを、粒子の崩壊を測定する Belle 測定器が取り囲んでいます (図 5)。B 中間子対の崩壊位置を精密に測定するための半導体検出器が真ん中にあり、その周りを粒子の運動量やエネルギーを測定する 7 種類の装置が取り囲んでいます。われわれの研究室では、主に中央飛跡検出器を担当しています (図 6)。これは、B 中間子と反 B 中間子が崩壊して生成した粒子の飛跡を正確に測る装置です。ガラス容器の中に約 2000 本のワイヤーをはり、粒子がそこを通ったときに出る電気信号を測ることで飛跡を求め、粒子の運動量や種類を決めます。

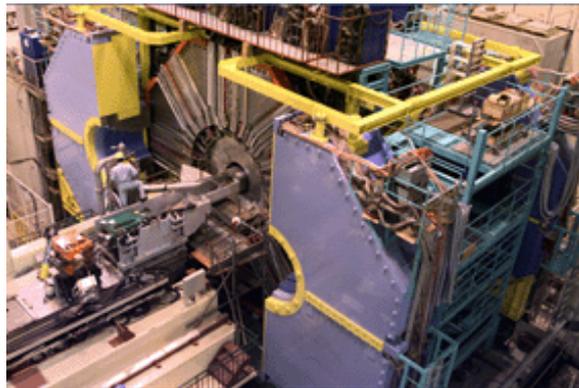


図 5 : Belle 測定器

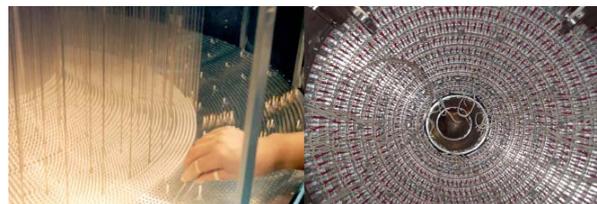


図 6 : 中央飛跡検出器

B 中間子崩壊での CP 対称性の破れの発見

CP 対称性の破れを初めて説明したのが、名古屋大学の出身の小林誠先生と益川敏英先生が提唱した「小林・益川理論」です。1973 年といえば、私が 10 歳のころです。当時知られていたクォークは、アップ、ダウン、ストレンジの 3 種類でした。実は、名古屋大学では丹生潔先生のグループがチャームクォークがあるのではないかとデータを出していましたから、名古屋大学では 4 種類のクォークが知られていたこととなります。

小林・益川理論では、クォークには 6 種類あり、6 種類あれば CP 対称性の破れが起きると説明しました。6 種類のクォークのうち、アップとダウンが第 1 世代、チャームとストレンジが第 2 世代、トップとボトムが第 3 世代です。第 3 世代のクォークはとても重く、第 3 世代のトップクォークとボトムクォークが、第 1 世代のアップクォークやダウンクォークに変化するとき、

CP 対称性の破れが起きると説明したのです。

私たちは B 中間子の崩壊を調べることで、CP 対称性の破れが起きることを確かめようとしています。B 中間子はそのまま終状態に崩壊する経路と、反 B 中間子になってから終状態に崩壊する経路があります。B 中間子が反 B 中間子に振動する中間状態で、一瞬だけでも重いトップクォークになることがあります。トップクォークはダウンクォークに変化しますから、ここで CP 対称性が破れると考えられているのです。量子力学では、二つの波が重ね合わさると干渉という現象が起きます。初期状態が B 中間子の場合と反 B 中間子の場合では振動が少し異なるので崩壊率が変わる、というのが小林・益川理論による CP 対称性の破れの説明です (図 7)。

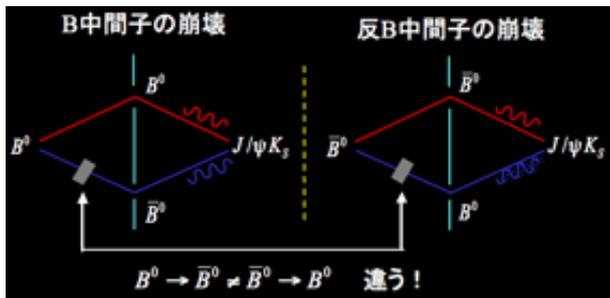


図 7 : B 中間子崩壊での CP 対称性の破れ

B 中間子における CP 対称性の破れの証拠が初めて得られたのは、5 年前の 2001 年です。3100 万個の B 中間子対のデータから、B 中間子の崩壊率と反 B 中間子の崩壊率がわずかに違うことが初めて分かりました (図 8 左)。さらに 2006 年には、5 億 3200 万個の B 中間子対データを使って、B 中間子と反 B 中間子の崩壊率が明らかに違うことが示されました (図 8 右)。

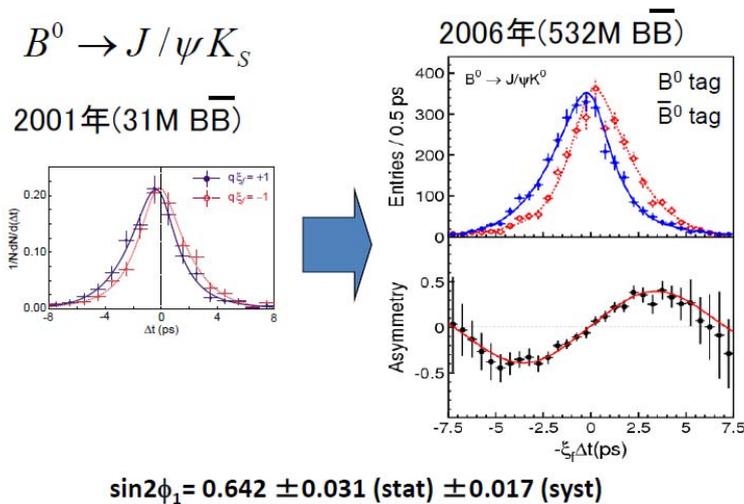


図 8 : B 中間子崩壊での CP 対称性の破れの発見

深まる謎、新しい物理の探索へ

このように CP 対称性の破れの証拠を発見したことで、小林・益川理論が正しいことが分かりました。しかし、小林・益川理論だけでは、宇宙が物質だけでできていて反物質がないという、宇宙の物質優勢を説明できません。小林・益川理論のメカニズムだけでは、非対称性が小さすぎるのです。宇宙の物質優勢を説明するためには、小林・益川理論以外の CP 非対称性の源が必要になります。すなわち、標準理論を越えた新しい物理があるはずで、これからの素粒子研究は、新しい物理の探索、新しい粒子の探索に向かいます。

では、新しい粒子をどのように探るか。そのキーワードの一つが「不確定性関係」です。古典物理の世界では、エネルギー保存が精密に成り立っています。ところが量子力学の世界では、ごくわずかな時間だけならエネルギーがゆらぐことがあるのです。B 中間子と反 B 中間子の振動でも、B 中間子の 30 倍の質量を持つトップクォークがわずかな時間だけ現れます (図 9 上)。また、クォークの崩壊過程の一つに「ペンギン崩壊」があります。クォークがどのように壊れていくかを図に描くと、その形がペンギンのように見えることから、この名前がついています。標準理論では、ペンギン崩壊の途中でウィークボゾン (W) という粒子が現れます (図 9 下)。崩壊の途中でトップクォークやウィークボゾン以外の効果を観測することができれば、新しい粒子が存在する証拠になります。

その一つの例が、ペンギン崩壊における CP 対称性の破れです。B 中間子が $J/\psi K^0$ という粒子と ϕK^0 という粒子に崩壊するときに CP 対称性の破れが起きます。そのときの CP 対称性の破れの大きさを観測しました。グラフだけではあまり変わらないように見えますが、数値を見ると、B 中間子が ϕK^0 に崩壊する方が少し小

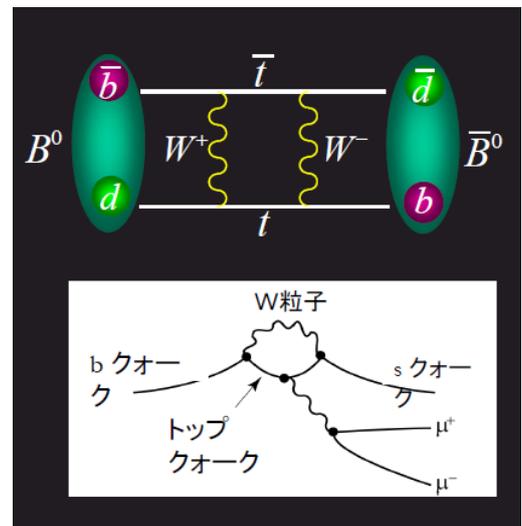


図 9 : 新しい物理の探究

さくなっています (図 1 0)。まだ誤差が大きいので結論付けることができませんが、両者の結果が異なれば、新しい粒子が存在する証拠となります。われわれは今後、このデータをもっと追跡して明らかにしたいと思っています。

誤差の範囲で一致しており、新しい物理の発見とはなりません。しかし、観測されたデータから荷電ヒッグス粒子がどのくらいの質量を持ちうるか、制限を付けることができました。

今回の観測データから、荷電ヒッグス粒子は 250GeV くらいしか見られないという制限が得られています。この制限は、高エネルギーの巨大加速器を使った実験による直接探索から得られた制限より、はるかに強いものです。B ファクトリーはエネルギーの低い加速器ですが、精密測定によって、より高いエネルギーで存在するかもしれない粒子を発見できることを示しています。

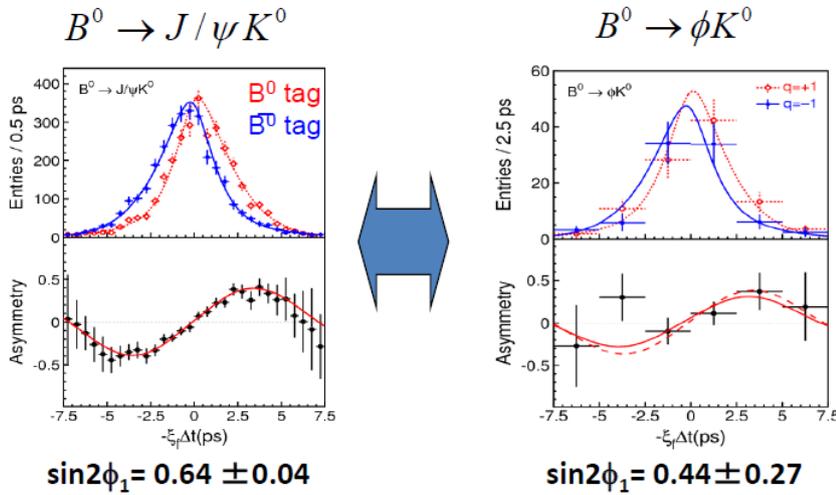


図 6：ペンギン崩壊による CP 対称性の破れ

ヒッグス粒子の探索

最後に、2006 年度にわれわれの研究室が中心に行った解析から得られた成果を紹介します。B 中間子がタウレプトンとニュートリノに崩壊する場合、標準理論ではウォークボゾンが崩壊の途中で飛びます (図 1 1 左)。もし新しい物理があれば、荷電ヒッグス粒子という新しい粒子が飛び、崩壊率が標準理論の予測から変化するかもしれません。われわれは、B 中間子がタウレプトンとニュートリノに崩壊する現象を初めて観測しました (図 1 1 右)。崩壊率は標準理論の予想と

今後の素粒子研究

今後の素粒子研究では、現在の標準理論の背後にある新しい物理の世界を探索していくことになります。それには、一つにはできるだけエネルギーの高い加速器を作り、新粒子の生成を直接見る必要があります。2007 年、ヨーロッパの CERN で一周 27km という巨大な加速器 LHC が完成し、新粒子の直接観測に挑みます。この実験にも、われわれの研究室は参加します。

また、現在の約 50 倍のビーム強度を持つスーパー B ファクトリーを建設し、新しい粒子を観測しようとい

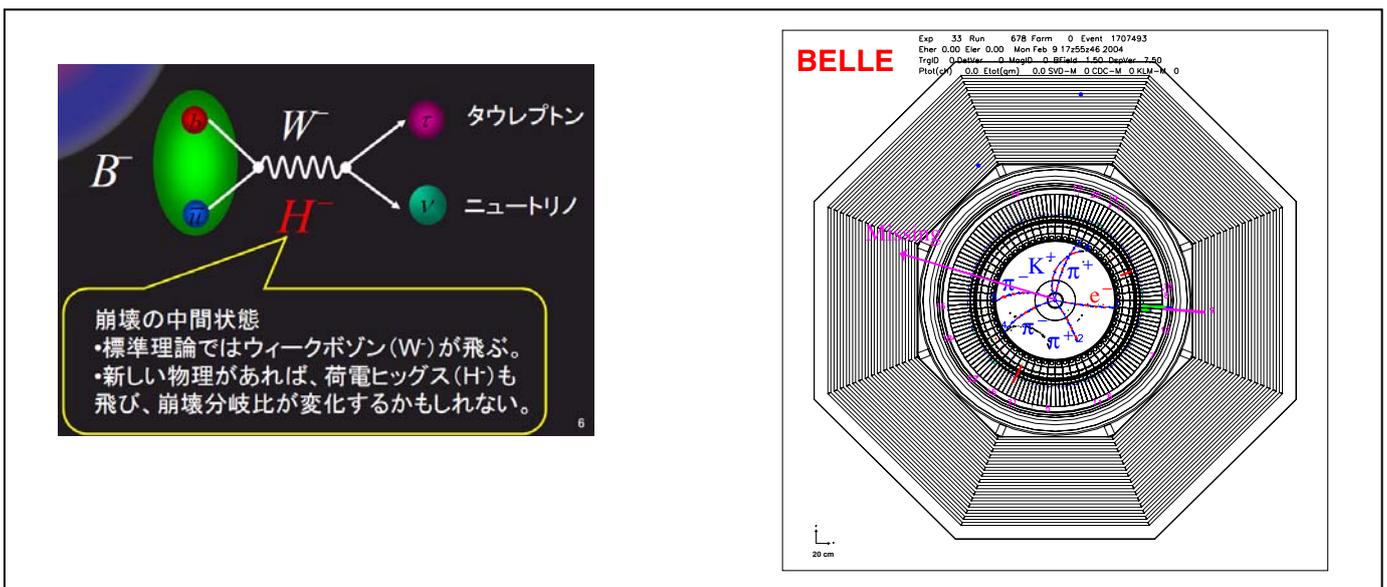


図 1 1：B 中間子→タウレプトン・ニュートリノ崩壊の発見

う計画を提案しています。

今日は B 中間子を中心にお話ししましたが、B ファクトリーでは B 中間子と同じようにタウレプトンを大量に生成することができます。タウレプトンの崩壊を使った新しい実験も進めようとしています。ニュートリノやクォークには振動があり、その種類が変化することが分かっています。しかし、レプトンについては変化するのか、変化しないのか、分かっていません。そこで、タウレプトンを大量に作って、それを確かめていきたいと考えています。

われわれは、高エネルギー・最高強度の加速器を使って、宇宙の歴史の最も初期の探究を、これからも続けていきます。

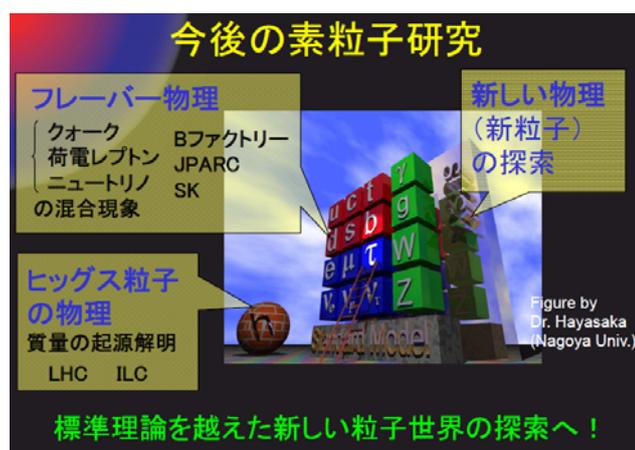


図 1 2 : 今後の素粒子研究

質疑応答

B ファクトリーで衝突させる電子と陽電子は、なぜ同じエネルギーにしないのですか。

飯嶋：B 中間子の寿命は非常に短い。ですから、生成してもすぐに崩壊してしまいます。短い寿命でも崩壊の過程を測れるように、衝突させる電子と陽電子のエネルギーを変えているのです。一方のエネルギーを強くすることで、生成した B 中間子が前方に勢いよく飛び出します。すると、光速度で動く粒子の寿命は相対性理論によって伸びますから、崩壊の過程をきちんと測ることができるのです。