

論文内容の要旨

論文題目: Study of CP Asymmetry
in the Neutral B Meson Decays to Two Charged Pions
(中性 B 中間子の荷電パイ中間子二体崩壊における CP 非対称の研究)

氏名: 中平 武

20世紀の半ばまでほとんどの物理学者は、空間反転 (P) や荷電共役 (C) といった基本的な変換のもとで物理法則は不変であると信じていた。ところが、1950年代に弱い相互作用においては空間反転や荷電共役に関する対称性が破れていることが明らかになった。さらに1964年には、これらの合成変換である CP 変換に対する対称性の破れが、Christensonらの実験グループによって K 中間子の崩壊において発見された。 CP 変換は粒子と反粒子を入れ替える変換であり、 CP 対称性の破れは、粒子と反粒子の間で物理現象に違いがあることを意味する。1973年、小林と益川は、クォークが3世代6種類以上存在すれば、素粒子物理学の標準模型の枠組みの中で CP 対称性の破れの起源を説明できることを示した。この小林-益川模型は、当時 u, d, s の3種類しか知られていなかったクォークが、6種類以上あることを予言する画期的なものであったが、その後実際に c, b, t クォークが発見されたことで、標準模型の一部として位置づけされるようになった。その一方で、 K 中間子系での CP 対称性の破れの大きさは小さく、また、それ以外の系では CP 対称性の破れが見つからなかったため、 CP 対称性の破れが小林-益川模型で説明されるものかどうかの検証は困難と考えられていた。

小林-益川模型は、クォーク混合を記述する複素行列 (CKM 行列) が除去できない位相をもつことが CP 対称性の破れの起源であるとしている。また、CKM 行列要素の満たすべき条件は、複素平面上での三角形 (ユニタリティトライアングル) として表される。したがって、小林-益川模型を検証するためには、ユニタリティトライアングルの各辺の長さ、3つの角の大きさ (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) を実験的に測定することが不可欠である。とくに、ユニタリティトライアングルの角の大きさを測定し、零でないことがわかれば、小林-益川模型のメカニズムで CP 対称性の破れが起こっていることの証明になる。

1980年、Carter, Bigi および三田らは、中性 B 中間子の特定の崩壊では大きな CP 対称性の破れが現れ、さらに CKM 行列要素間の位相差が求められることを示した。そして、2001年に $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$

崩壊等により、 ϕ_1 が零でないことが実験的に証明され、小林-益川模型のメカニズムで CP 対称性の破れが起きていることが確かめられた。これにより、 CP 対称性の物理は、 B 中間子系での発見を目指す段階から、他の崩壊モードの CP 非対称性の測定等による小林-益川模型のより精密な検証の段階に至った。

本研究では、 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ の崩壊モードを用いて、 CP 対称性の破れを測定する。この崩壊モードでの CP 対称性の破れの測定は、既に測られているものとは別の角である ϕ_2 を測定することになるので、既存の測定とは独立の制限を小林-益川模型に与える。この崩壊モードでは、高次のダイアグラムの効果が無視できないために、 ϕ_2 の測定には理論的不定性が入ってしまうという不利な点はあるが、今までに発見されているもの（“クォーク混合に誘導された CP 対称性の破れ”）とは別の種類の”直接的な CP 対称性の破れ” があらわれることが期待されるという大きな意義がある。

$B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ の崩壊では、 CP 対称性の破れは、 B^0 とその反粒子である \bar{B}^0 との間での崩壊率とその時間依存性の違いとして現れる。実験的には、対生成された $B^0\bar{B}^0$ の一方 (B_{CP} と呼ぶ) が $\pi^+\pi^-$ 状態に崩壊した時刻と、他方 (B_{tag} と呼ぶ) が崩壊した時刻との時間差 Δt を測定する。 B_{tag} のフレーバーが B^0 であった場合と \bar{B}^0 だった場合との Δt の分布の相違から、 CP 非対称性が測定される。クォーク混合に誘導された CP 対称性の破れと直接的な CP 対称性の破れによる CP 非対称度の大きさをそれぞれ $S_{\pi\pi}$ と $A_{\pi\pi}$ としたとき、理論的に予想される Δt の分布は、

$$f(\Delta t; B_{tag} = B^0) = \frac{1}{4} \exp(-|\Delta t|/\tau_{B^0}) [1 + A_{\pi\pi} \cos(\Delta m_d \cdot \Delta t) + S_{\pi\pi} \sin(\Delta m_d \cdot \Delta t)]$$

$$f(\Delta t; B_{tag} = \bar{B}^0) = \frac{1}{4} \exp(-|\Delta t|/\tau_{B^0}) [1 - A_{\pi\pi} \cos(\Delta m_d \cdot \Delta t) - S_{\pi\pi} \sin(\Delta m_d \cdot \Delta t)]$$

である。 $(\tau_{B^0}$ と Δm_d はそれぞれ中性 B 中間子の寿命と $B^0\text{-}\bar{B}^0$ 混合のパラメータである。) CP の破れが存在する場合には、図 1(左) に示されるような非対称性があらわれる。この図において、実線と点線は、それぞれ $B_{tag} = B^0$ であった場合と $B_{tag} = \bar{B}^0$ の分布を示している。クォーク混合に誘導された CP 対称性の破れは、2つの分布の形状の違いとして現れ、直接的な CP 対称性の破れは、2つの分布の形状および面積の違いとして現れる。 CP 対称性の破れがない場合には、2つの分布は一致する。

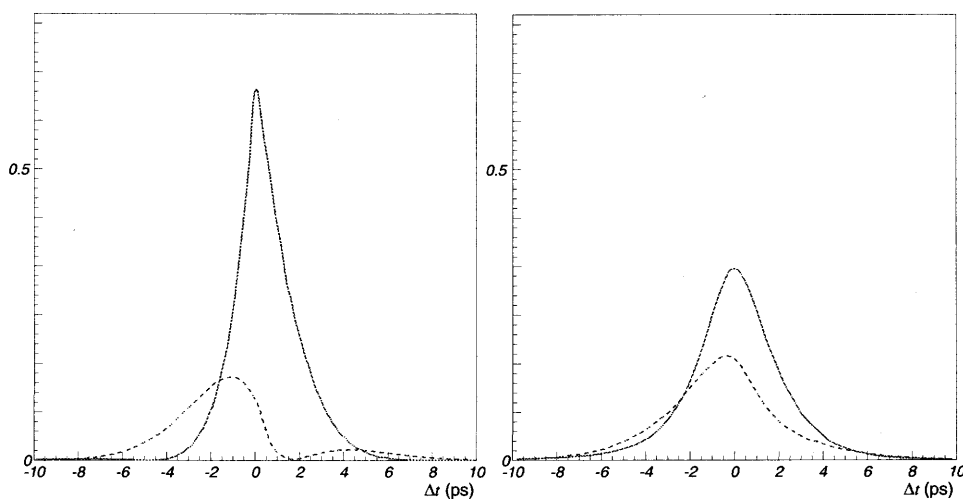


図 1: Δt 分布に現れる CP 非対称性。 $S_{\pi\pi} = 0.7$ かつ $A_{\pi\pi} = 0.7$ の場合の理論的な分布 (左) と検出器の性能を考慮して実験的に得られると予想される分布 (右)

本研究は、高エネルギー加速器研究機構の B ファクトリー実験において行った。 B ファクトリー

では、世界最高のルミノシティを誇る KEKB 加速器によって年間約 1 億個の B 中間子対が電子陽電子衝突により生成されるので、崩壊分岐比が $\mathcal{O}(10^{-6})$ と極めて小さな $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 崩壊を観測することが可能である。この崩壊モードは、終状態が π 粒子 2 つのみからなるため、陽子反陽子衝突実験等では膨大な背景事象にうもれて観測するのが困難である。したがって、 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 崩壊の研究は B ファクトリー実験に特徴的なものである。KEKB 加速器は、非対称エネルギー衝突 (電子: 8GeV, 陽電子: 3.5GeV) により、 B 中間子を $\beta\gamma = 0.425$ で運動させて生成する。これにより、 Δt は、二つの B 中間子の崩壊点の間隔 $\Delta z = \Delta t \cdot \beta\gamma c$ として測定可能となっている。 B 中間子の崩壊を測定するための Belle 検出器は、荷電粒子を検出する飛跡検出器、 Δz を精密に測定するためのシリコン崩壊点検出器、電子と光子を検出するための電磁カロリメータ、 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 事象の背景事象となる $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 事象を判別したり、 B_{tag} のフレーバーを決定するのに重要な役割を果たす粒子識別のための測定器等からなる。我々は、 B 中間子の寿命や B^0 - \bar{B}^0 混合の測定により、Belle 検出器の崩壊点検出や B_{tag} フレーバーの決定の性能を評価し、検出器の応答を理解した。検出器の性能を考慮して、実際に得られる Δt 分布に現れると予想される CP 非対称性を、図 1(右) に示した。

我々は、2000 年 1 月から 2002 年 7 月の間に、KEKB が生成した 8.5×10^7 個の B 中間子対を解析し、 Δt と B_{tag} のフレーバーを測定可能な $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 崩壊事象の候補を 760 個得た。このうちに含まれる信号事象の数は 163^{+24}_{-23} 個と見積もられ、それ以外の背景事象は、 $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 崩壊や continuum 事象 ($e^+e^- \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$) として理解された。図 2 に、 B_{tag} のフレーバーごとの $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 事象の Δt の測定値の分布である。白丸点と三角点がそれぞれ $B_{\text{tag}} = B^0$ と $B_{\text{tag}} = \bar{B}^0$ の Δt 分布を表す。この図において、背景事象からの寄与は差し引かれている。

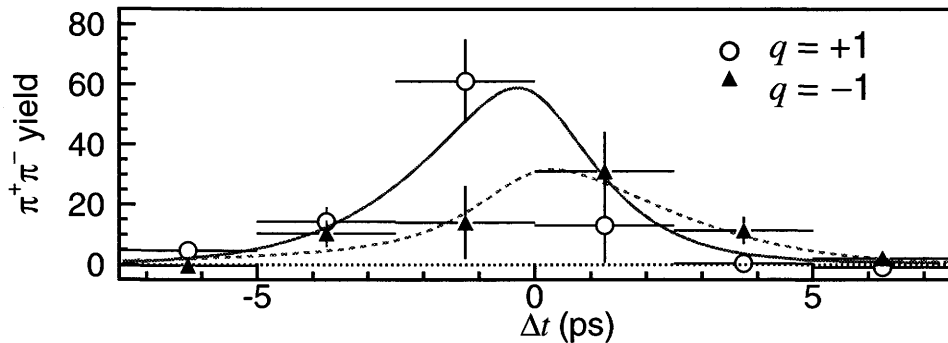


図 2: B_{tag} のフレーバーごとの $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 事象の Δt の測定値の分布とフィットによって得られた確率密度関数

候補事象の Δt 分布に対して、unbinned-maximum-likelihood-fit 法を用いて CP 非対称度の測定を行った。 $A_{\pi\pi}$ および $S_{\pi\pi}$ をパラメータとして理論的予測と検出器の応答関数から、 Δt の確率密度関数を構築し、最尤法によりデータにフィットし、 $A_{\pi\pi}$ および $S_{\pi\pi}$ の値を決定した。確率密度関数は、信号事象である確率、 B_{tag} のフレーバー決定が間違っている確率および崩壊点の測定精度を、得られた候補事象ごと評価し、考慮に入れている。フィットの結果として得られた確率密度関数を B_{tag} のフレーバーごとに図 1 に示した。実線および破線がそれぞれ $B_{\text{tag}} = B^0$ と $B_{\text{tag}} = \bar{B}^0$ の場合の確率密度関数を表す。フィットの結果は、実際のデータをよく反映している。得られた CP 非対称度は、

$$A_{\pi\pi} = +0.77 \pm 0.27(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst})$$

$$S_{\pi\pi} = -1.23 \pm 0.41(\text{stat}) \pm_{-0.07}^{+0.08}(\text{syst})$$

であった。統計誤差は、モンテカルロ法による模擬実験をくりかえすことにより評価した。系統誤差としては、背景事象の数の見積もりに起因するもの、崩壊点の再構成に起因するもの、非対称度の決定方法に起因するものが支配的であったが、いずれの成分も統計誤差にくらべて十分小さく抑えられている。なお、このフィットにおいて $A_{\pi\pi}$ と $S_{\pi\pi}$ の間の相関はなかった。

我々は、この測定値の統計的有意性を、Feldman と Cousins によって確立された Frequentist-Approach 法によって厳密に評価し、物理的に許される領域内の信頼区間を求めた。得られた信頼区間を図 3 に示す。また同じ方法により、「 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 崩壊で CP の破れが全くない ($A_{\pi\pi} = S_{\pi\pi} = 0$)」という仮説を棄却する有意水準が、99.93%と求められた。また、「 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 崩壊での CP の破れの原因は、クォーク混合に誘導された CP 対称性の破れのみである」という仮説は、98.1%で棄却された。

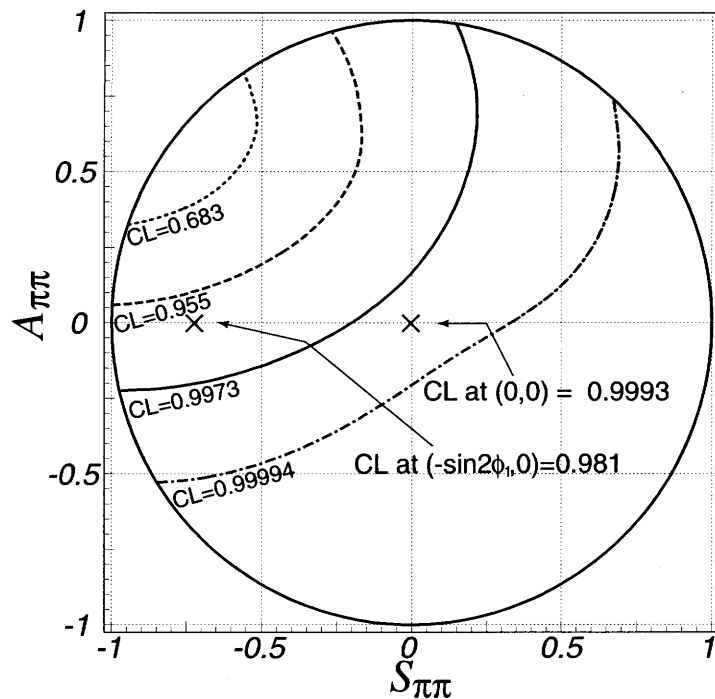


図 3: 測定結果から得られる信頼区間

我々の測定値によるユニタリティトライアングルの角の1つ ϕ_2 に対する制限を、95.5%有意水準で、 $77^\circ < \phi_2 < 151^\circ$ と評価した。ここで、理論的に不定性の大きな高次ダイアグラムの効果の割合 ($|P/T|$) は、現在の理論的予測値 (約 0.28) 付近で $0.18 < |P/T| < 0.48$ と仮定した。この予測値はモデルに依存した理論に基づいているので、この ϕ_2 に対する制限もモデルに依った制限である。

以上の通り、我々は $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 崩壊において、 CP 対称性が破れている兆候を得た。これは、 B 中間子系で直接的な CP 対称性の破れの兆候を示唆する初めての実験結果である。また、モデルに依存した方法ではあるが、小林-益川模型に対してこれまでとは独立な制限を与えた。