

平成 21 年 6 月 15 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19740132  
 研究課題名 (和文)  
 フレーバー物理研究のためのガンマ線電子対生成を用いた位置偏光検出器の研究  
 研究課題名 (英文)  
 Study on the position-polarization sensitive detector using the gamma ray pair creation for flavor physics.  
 研究代表者  
 石野 宏和 (ISHINO HIROKAZU)  
 岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授  
 研究者番号：90323782

## 研究成果の概要：

本研究では、高輝度 B ファクトリー実験において、ガンマ線が検出器中で対生成を起こす現象を利用して、クォーク間相互作用の研究手法に新しい測定手順を展開することを目指した。まず、中性 B 中間子が二つの  $\pi^0$  中間子に崩壊する過程において、対生成現象を利用して時間に依存する CP の破れを測定する方法を開発した。また B 中間子が  $K^*$  と  $\gamma$  に崩壊する過程から標準模型を超える物理に対する制限を得るための条件を得た。SIO 技術を用いた新しい検出器の読み出しシステムの準備をおこなった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	0	1,700,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	480,000	3,780,000

研究分野：素粒子物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：フレーバー物理、小林・益川行列、B ファクトリー実験

## 1. 研究開始当初の背景

(1) クォーク間の相互作用を詳しく研究する分野をフレーバー物理という。この研究は、小林・益川行列のユニタリティを検証し、また、理論的予測からのずれにより、標準模型を超える新物理を探索することが主な目的である。

(2) フレーバー物理を研究するには、B 中間子の様々な崩壊パターンを観測し、CP の破れを測定する。B ファクトリー実験により、この研究分野が急速に進み、小林・益川理論の検証がなされた。

(3) 今後の動向としては、TeV エネルギースケールに存在すると予想されている標準模型を超える新物理を探索することがメインと

なる。これは、2009 年度からヨーロッパで本格的に稼働する LHC 実験との相乗効果により、新物理モデルの決定という大変重要な研究課題となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、フレーバー物理を新しい測定方法から、別の角度から展開していく手法を開発し、新物理探索に必要な解析方法と検出器を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 中性 B 中間子が二つの中性  $\pi$  粒子に崩壊する過程において、B 中間子が崩壊する位置を精度良く測定することが、ガンマ線の対生成現象を利用することによって、可能になることを示す。この測定により、この崩壊モー

ドでの時間に依存するCPの破れを測定することが可能となり、小林・益川のCPを破る位相 $\phi_2$ を不定性なしに測定することが可能となる。

(2) B中間子がK\*中間子とガンマ線に崩壊する過程は、FCNC(Flavor Changing Neutral Current)相互作用といい、この崩壊過程で、質量がB中間子の2.5倍もあるトップクォークが不確定性原理により一瞬だけ現れる。もし、TeVスケールに新粒子が存在するならば、この粒子もごく短時間だけ現れることができ、この効果は、この崩壊過程の標準模型の理論的な予想値からのずれとなって現れる。本研究では、この崩壊過程で生じるガンマ線が電子対生成を起こす現象から、ガンマ線の偏光を測定する手法を開発する。標準模型では、ガンマ線は100%の確率で円偏光しているが、新物理が存在すると円偏光からのずれがみつかると。

(3) ガンマ線電子対生成現象を効率よく測定するためには、今現在存在する検出器では難しい。そこで、シミュレーションにより、タングステンとシリコン検出器をサンドウィッチした検出器のデザインを決定する。

(4) Bファクトリー実験で用いられているシリコン検出器は、ストリップ型である。しかし、Bファクトリー実験が高輝度化されると、ビーム強度が大変大きいので、ビーム起源のバックグラウンドが高くなり、ストリップシリコン検出器は使用不可能になる。そこで、放射線耐性があり、ビームバックグラウンドに強い検出器が必要となる。本研究の課題は、この検出器無しでは実行不可能である。そこで、SOI(Silicon On Insulator)技術を用いた検出器の開発を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 中性B中間子が二つの中性 $\pi$ 中間子に崩壊する過程で、B中間子の崩壊位置を再構成する方法を開発した。まずモンテカルロシミュレーションにより、Bファクトリー実験(Belle実験)において、 $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊位置を決定することができる効率とその精度を求めた。 $B^0$ の崩壊位置を再構成するアルゴリズムを考案し、それに必要な情報をDSTファイルに残すよう工夫した。その結果、 $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊位置を測定することが原理的に可能であることを示すことができた。

$B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の分岐比が低いために、現存するデータからでは、統計が足りずCPの破れは測ることができない。そこで $B \rightarrow D \pi^0$ 崩壊を用いることにより、実データで原理検証を行った。その結果、データとモンテカルロシミュレーションの予言はほぼ一致し、原理検証に成功した。

$B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊の崩壊位置分解能と分岐比、将来の高輝度Bファクトリー実験で貯めら

れるデータ量を用いて、CPを破る位相 $\phi_2$ の測定精度を見積もった。図1は得られた結果である。横軸は $\phi_2$ 、縦軸はパラメータ決定における有意差を表す。点線は、本研究が開発した手法を用いない場合で、7つの多重解が現れてしまう。一方、ガンマ線が対生成を起こす現象を用い、本研究で開発した解析手法を用いると、緑色の領域にまで制限することができる。

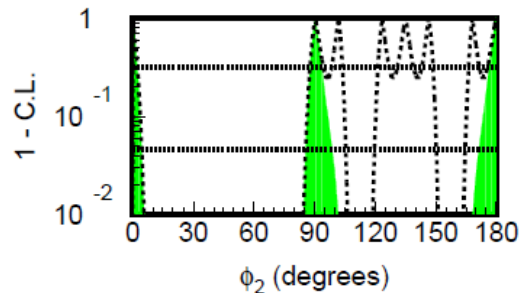


図1 CPを破る位相 $\phi$ の決定精度。点線が本研究の手法を使わない場合、緑色が本研究の手法をつかう場合に得られる決定精度。

本研究で開発した $\phi_2$ 決定方法は、他の方法よりも系統誤差が5分の1程度に抑えることができ、統計制度さえあがれば最も強力な手法となる。高輝度Bファクトリー実験で、この角度を2度以下の精度で決定することができれば、小林・益川理論の予想値からのズレを議論することができ、新物理に大きなヒントを与えることができる。

Belle実験において、 $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 崩壊において、CPの破れを測定した。Belle実験は、世界で最も多くのB中間子データを持つので、世界最高の決定精度を得ることができる。この崩壊モードでのCPの破れは、以前から行われていたが、決定精度がいまひとつであった。本研究代表者は、 $\pi$ 中間子とバックグラウンドとなるK中間子を効率よく分離する変数を新たに解析方法に導入することにより、CPの破れの決定精度を極限にまで高めることができた。図2は、その測定結果を表す。横軸は時間を表し、図(a)は、B中間子または反B中間子が $\pi^+ \pi^-$ に崩壊した時間分布を示し、(b)は、その非対称性をプロットしたものである。B中間子と反B中間子が $\pi^+ \pi^-$ に崩壊する数が明らかに異なることがわかった。この違いは、直接的CPの破れの発見である。実際その統計的有意性は $5.5\sigma$ であり、世界では初めて、B中間子における直接的CPの破れを $5\sigma$ 以上の有意差で観測することができた。また、時間に依存するCPの破れ(図では、sin関数のようなカーブの振幅)も

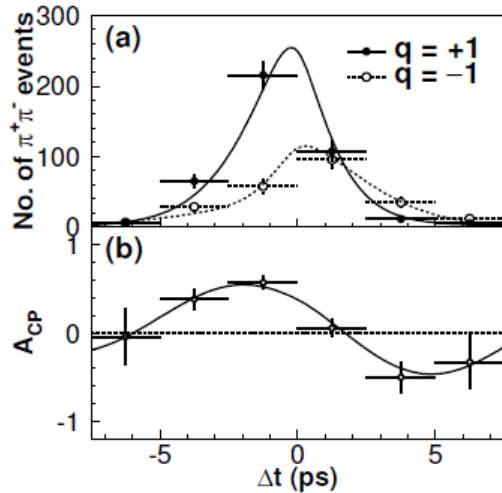


図2:  $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 崩壊による時間に依存するCPの破れの測定結果。横軸は時間を表す。(a)はB中間子(実線)と反B中間子(点線)が $\pi^+ \pi^-$ に崩壊した時間分布をプロットしたもの。(b)はその非対称性をプロットしたもの。B中間子と反B中間子が崩壊する数の違いが直接的CPの破れである。

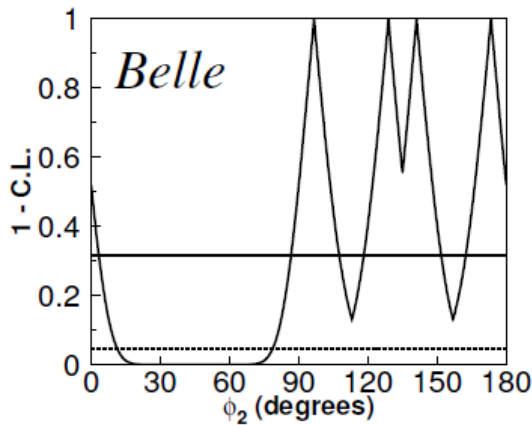


図3:  $\phi_2$ の制限の図。横軸は $\phi_2$ 、縦軸は有意差を洗わず。横線は $1\sigma$ の線で、曲線と囲まれた領域が $\phi_2$ の $1\sigma$ の制限領域となる。

5 $\sigma$ で観測された。

この解析からCPを破る位相 $\phi_2$ を当時では世界最高の精度で測定することができ、 $\phi_2 = (97 \pm 11)$ 度を得た。図3は、角度 $\phi_2$ の制限を示すプロットである。(2)中性B中間子がK\*中間子とガンマ線に崩壊する過程において、ガンマ線の偏光を測定する方法を開発した。K\*中間子は、K中間子と $\pi$ 中間子に崩壊する。また、ガンマ線は、電子対生成をおこすと、電子と陽電子をつくる。K中間子と $\pi$ 中間しが張る平面と、電子

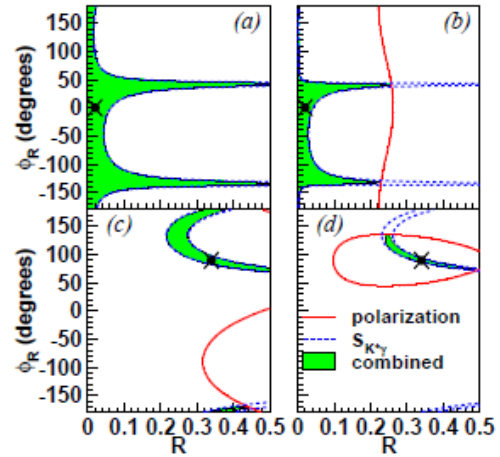


図4: 中性B中間子がK\*中間子とガンマ線に崩壊する過程を用いた時に得られる、新物理パラメータの制限。赤で囲ってある領域は、ガンマ線の偏光測定で制限できる領域。青の点線で囲ってあるところは、時間に依存するCPの破れから制限できる領域。緑の領域は、両方の情報を使った場合に得られる領域。バツ印は、仮定した新物理のパラメータを表す。左の二つ図(a), (c)は50/abのデータ、右の(b), (d)は500/abのデータ統計量での制限を表す。

と陽電子が張る平面の間の角度を測定すれば、ガンマ線の偏光を測定することができる。本研究では、電子対生成で生じた電子と陽電子の発生位置を精度よく測定するアルゴリズムを開発し、電子と陽電子が張る平面をもとめる方法を開発した。しかしながら、電子と陽電子の発生直後の開き角が大変せまい(1度程度)、電子、陽電子の検出器中での多重散乱の影響があり、測定アルゴリズムの性能は考えたほど改善しなかった。

標準模型では、弱い相互作用は左向きの素粒子としか反応しない。一方、新物理が存在すると、右巻きの粒子との相互作用も起きる。そこで、右巻き相互作用の大きさ(R)とその位相( $\phi_R$ )について、二つのモデルパラメータを考え、ガンマ線偏光測定からどの程度パラメータ領域に制限を与えることができるかを調べた。図4はその制限を示す。この制限では、時間に依存するCPの破れから得られる制限も示した。図にあるようにガンマ線の偏光測定からは、十分な制限が得られないことがわかった。パラメータにも依存するが、偏光測定が十分発揮するのは、500/abデータを貯めた時で、このデータ量は、現在Bファクトリー実験が持っているデータ量の500倍であり、あまり現実的でない。ガンマ線の偏光測定は、不可能ではないが、物理

研究にはあまりインパクトがないことがわかったので、この研究はこの時点でストップすることにした。しかし、将来LHCでの高輝度実験などで、ガンマ線の偏光測定が可能となるかもしれない。国際ワークショップでこの議論をしたところ、ヒッグス粒子が二つのガンマ線に崩壊するモードで、ガンマ線の偏光を測定すれば、CやPパリティなどのヒッグス粒子の基本的性質が測定可能かもしれないというアイデアもあった。

(3)ガンマ線が電子対生成を起こす効率を良くする検出器のデザインを、シミュレーションを用いて行った。現在 Belle 実験では、最内層に4層のシリコンストリップ検出器を用いている。この検出器は、荷電粒子の位置を10ミクロンの精度で測定することが可能である。荷電粒子の多重散乱をさけるために、シリコン検出器は、300ミクロンと大変薄い。対生成を故意に起こすために、薄いタングステンシリコン検出器に張ることを提案する。タングステンは、密度が大きいので、薄くても、多重散乱の影響が大きく、荷電粒子位置測定精度が悪くなることが予想される。この研究では、シミュレーションを用いて、どのシリコン層にどれくらいの厚みのタングステンを張り付けると、どういう影響が出るのかを詳しく調べた。その結果、第2, 3層目のみに張り付ければ、位置分解能を損なわずにかつ対生成効率を3倍に増やすことが可能であることを示すことができた。

(4)ガンマ線対生成を利用したフレイバー物理研究は、将来の高輝度Bファクトリー実験で真価を発揮する。高輝度Bファクトリー実験では、大変強い電子・陽電子ビームを用いるために放射線による影響が多大で、現在のシリコンストリップはもはや使用できないことがわかっている。そこで、SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いたピクセル検出器の開発にとりかかった。本研究期間中にBファクトリー実験用のピクセル検出器プロトタイプ設計・製作を行い、読み出しテストを行った。USB接続でデータを読み出すシステムを開発し、ベータ線を照射したところ、ランダウ分布のような付与エネルギー分布を得ることができ、荷電粒子の検出に成功した。また、可視光をあてることにより、マスクを用いてイメージングにも成功した。これらの結果は、学会で発表された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① I. Adachi, H. Ishino et al. (sBelle Design Group), "sBelle Design Study

Report", KEK Report 7 (2008), 1-80, 査読無、(員数33名、7番目)

- ② H. Ishino et al. (Belle Collaboration), "Observation of Direct CP Violation in  $B_0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  Decays and Model-Independent Constraints on  $\phi_2$ ", Physical Review Letters 98 (2007), 211801-6, 査読有、(員数151名、1番目)。  
③ H. Ishino, M. Hazumi, M. Nakao and T. Yoshikawa, "New Measurements Using External Photon Conversion at High Luminosity B Factories", arXiv:hep-ex/0703039 (2007), 1-4, 査読無。

[学会発表] (計3件)

- ① 池本由希子、「SOI pixel 検出器におけるセンサー及び回路開発」、日本物理学会、2008年9月23日、山形大学  
② 石野宏和、「SOI 技術を用いた pixel 検出器の開発 (放射線検出による実験評価)」、日本物理学会、2008年3月26日、近畿大学  
③ 東ヶ崎洋生、「Belle 実験における photon-conversion の研究」、日本物理学会、2007年9月23日、北海道大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石野 宏和 (ISHINO HIROKAZU)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：90323782