

機関番号：82118

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007 年度～2010 年度

課題番号：19740161

研究課題名 (和文) 光子偏極度測定による新物理探索

研究課題名 (英文) Search for New Physics via measurement of photon polarization

研究代表者

後田 裕 (USHIRODA YUTAKA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：10342601

研究成果の概要 (和文)：

B 中間子の輻射崩壊には素粒子物理学の標準理論を超える新しい物理法則の影響が入りやすいことが知られている。崩壊により生じる光子の偏極度を測定することにより、新しい物理法則の効果を見ることができると期待されている。時間に依存する粒子・反粒子非対称度を測定するなどの方法により新物理を探索したところ、有意な兆候は確認されなかった。一方で、近い将来の実験での探索感度を改善することに成功した。

研究成果の概要 (英文)：

Radiative decay of B meson is known as one of the best places to look for New Physics beyond the Standard Model. By measuring photon polarization, we might derive effect of New Physics. Searches for New Physics by measuring parameters such as time-dependent CP asymmetry have been performed, however, no significant evidence has been found. On the other hand, sensitivity reaches in near-future experiments have been improved successfully.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	900,000	0	900,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,700,000	540,000	3,240,000

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：クォークフレーバー、フレーバー変換中性電流、左右対称模型、新物理、Belle, KEKB, B の物理、ペンギン図形

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題を申請した当時は、新物理の光子偏極度に与える影響が理論的に注目を集め、実験的にも測定が始められたところであった。関連する B 中間子の主要な崩壊様式の一つである  $B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$  の時間に依存する CP 非対称度 ( $S_{CP}$ ) が測定され、理論的な誤差がどの程度かという議論も活発に行われていた。本研究によりそれをさらに推進したいとい

う動機があった。

## 2. 研究の目的

本研究により、光子偏極度に関するさらに多くの知見を集め、新物理に関する議論を深めることが目的であった。また、測定結果は国際会議や学術論文などに発表し、それに基づいた理論的考察を促すことも重要であった。

### 3. 研究の方法

B中間子の輻射崩壊(クォークレベルで  $b \rightarrow s\gamma$  や  $b \rightarrow d\gamma$ ) で発生する光子は、素粒子標準理論に従う限り、ほぼ完全に左巻きのみになる。標準理論を超える新しい物理法則が寄与すると、この偏極が解けるので、光子偏極度を測定することで新物理の探索が可能である。偏極度の測定のために、以下に述べる二通りの方法がある。

(1) ひとつは、時間に依存する CP 非対称度を測定する方法で、偏極している限り非対称度はほぼ 0 となる。非対称度が 0 から大きくずれば新しい物理の寄与が発見されたことに相当する。すでに測定された崩壊様式 ( $B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$ ) に関しては、解析に供するデータ量を増やしかつ解析手法を改良することで測定精度を向上し、測定されていない崩壊様式に関しては新たに信号を探索し測定を行う。研究手法の最大の鍵は B 中間子の崩壊点位置を測定することであり、中性粒子  $K_S$  の (直接は観測できない) 軌跡を用いた手法の改良と、 $K_S$  を用いずとも荷電粒子が直接 B 中間子の崩壊点から飛跡を残す崩壊様式の探索が重要であった。

(2) もうひとつの方法は、光子が電子・陽電子対に変換する反応を用いる。変換反応による電子・陽電子対の張る面と、反跳する側の中間子の崩壊により決まる面のなす角度を測定すれば、光子の偏極度を直接測定することが原理的には可能である。この手法を用いた偏極度測定の可能性を追求した。

### 4. 研究成果

(1) 本研究期間中に、崩壊事象の抽出手法を確立し、新たに  $S_{CP}$  の測定に成功したものは、 $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ ,  $B^0 \rightarrow K_S \rho^0 \gamma$ ,  $B^0 \rightarrow K_S \phi \gamma$  の 3 つの崩壊様式であり、いずれも世界初の測定であった。中でも、 $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  は、第三世代の b クォークが直接第一世代の d クォークへと遷移する非常に稀な崩壊様式であり、難易度の高いこの測定の成功は衝撃的であった。また、 $B^0 \rightarrow K_S \eta \gamma$  の抽出を試みたところ、残念ながら十分な数の事象が得られず、代わりに崩壊分岐比の上限を定めた。以下に、 $S_{CP}$  の測定に成功した 3 モードについて述べる。なお、本研究開始前に測定された  $B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$  の改善された再測定を目指し、特に  $K_S$  による B 中間子の崩壊点位置決定の手法の大幅な改善に成功し、解析作業を進めているが、結果の発表には至っていない。

#### ① $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$

この崩壊モードでは、 $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  崩壊により生じる 2 つの荷電  $\pi$  中間子の飛跡を用いて、B 中間子の崩壊点を決定する。分岐比の高い  $B^0 \rightarrow K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-) \gamma$  は、終状態の K 中間子を  $\pi$  中間子と識別し間違えると信号事象と全く同じ終状態粒子を持つことから、非常に区別しづらく厳しい背景事象となる。これを排除するために、 $\pi$  中間子候補に仮に K 中間子の質量を割り当てたときの 2 中間子系の不変質量を計算し、可能な 2 通りの組み合わせのうちの小さい方の値 ( $M_{K\pi}$ ) を導入した。これにより、背景事象と信号事象を最大限分離することができた。図 1 に信号と背景事象を区別する変数の例として、再構成されたエネルギーと期待される値の差 ( $\Delta E$ ) と  $M_{K\pi}$  の分布を示す。

このようにして確立した  $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  の信号事象  $48.3 \pm 13.5$  イベント、 $B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma$  からの背景事象  $180.6 \pm 16.8$  イベント、他の B 中間子崩壊による背景事象  $10.3 \pm 4.3$  イベントと B 中間子以外のハドロン生成過程 ( $e^+ e^- \rightarrow c\bar{c}, s\bar{s}, d\bar{d}, u\bar{u}$ ) からの背景事象  $168.8 \pm 2.6$  イベントを用い、崩壊時間差 ( $\Delta t$ ) などの分布をフィットすることで、非対称度  $S_{CP}$  を求めた。図 2 に事象数の非対称度とフィットの結果を示す。得られた結果は、

$$S_{CP}(B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma) = -0.83 \pm 0.65 \pm 0.18$$

ここに、一つ目の誤差は統計誤差、二つ目は系統誤差である。値は誤差の範囲で 0 に一致する。

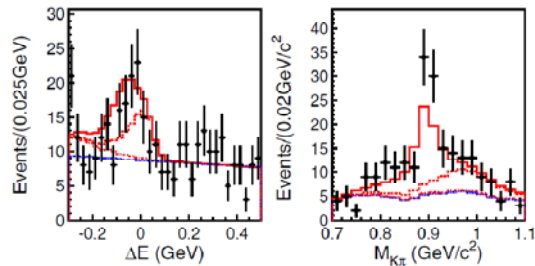


図 1 : 抽出された  $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  の事象分布。左が再構成されたエネルギーと期待される値の差 ( $\Delta E$ )。右は  $\pi$  中間子候補に仮に K 中間子の質量を割り当てたときの 2 中間子系の不変質量  $M_{K\pi}$  (2 通りの組み合わせのうちの小さい方の値)。誤差棒付きの点が測定データ。線は最尤法によるフィットの結果で、区切られた領域は、上から順に、 $B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma$  背景事象、 $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  信号事象、その他の B 中間子の崩壊からの背景事象 (非常に少なく図では見えづらい)、B 中間子以外のハドロン生成過程 ( $e^+ e^- \rightarrow c\bar{c}, s\bar{s}, d\bar{d}, u\bar{u}$ ) からの背景事象。

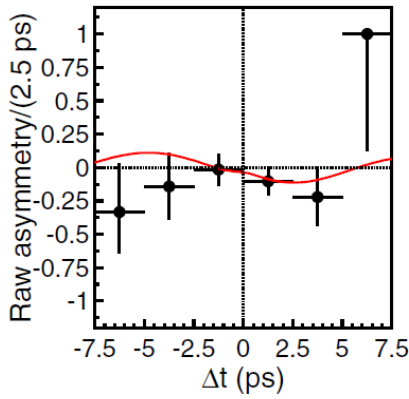


図2 :  $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  の  $\Delta t$  に依存する生非対称度分布。フレーバーが比較的確実に決定できた事象のみをプロットしてある。誤差棒付きの点が測定データ。曲線は、最尤法によるフィット結果。

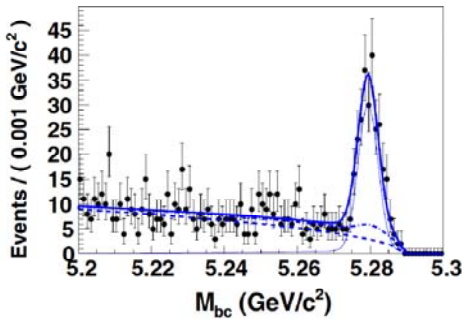


図3 :  $B^0 \rightarrow K_S \rho^0 \gamma$  の不変質量( $M_{bc}$ )分布。誤差棒付きの点が測定データ。B 中間子の不変質量のところに明らかな信号事象の集中が見られる。実線は最尤法によるフィットの結果で、破線は B 中間子以外のハドロン生成過程による背景事象の分布、一点破線はそれに他の B 中間子崩壊の背景事象を加えた全ての背景事象の分布を表す。

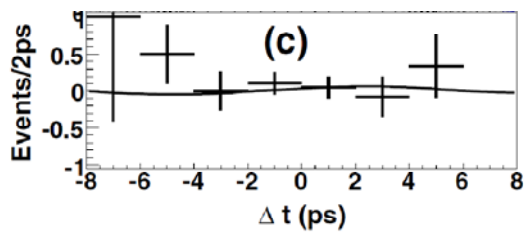


図4 :  $B^0 \rightarrow K_S \rho^0 \gamma$  の崩壊時間差( $\Delta t$ )に依存する生非対称度分布。フレーバーが比較的確実に決定できた事象のみをプロットしてある。誤差棒付きの点が測定データ。曲線は、最尤法によるフィット結果。

## ② $B^0 \rightarrow K_S \rho^0 \gamma$

この崩壊モードも、 $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ により B 中間子の崩壊点を決定する。 $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  ほどの厳しい背景事象はないが、終状態が  $K_S \rho^0$ となる異なる K 中間子系共鳴状態からの寄与の干渉の効果を注意深く計算する必要があった。

図3に示すように明らかな信号事象が得られ、これら  $212 \pm 17$  イベントの信号事象を含む 299 イベントのデータをフィットし、

$$S_{CP}(B^0 \rightarrow K_S \rho^0 \gamma) = +0.11 \pm 0.33^{+0.05}_{-0.09}$$

という結果が得られた。一つ目の誤差が統計誤差、二つ目が系統誤差である。値は誤差の範囲で 0 に一致する。図4に生非対称度分布とフィットの曲線を示す。このモードは比較的崩壊分岐比が高く、崩壊点位置決定のための大きなロスもないため、 $B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$ の非対称度

$$S_{CP}(B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma) = -0.10 \pm 0.31 \pm 0.07$$

と遜色の無い精度での測定ができた。

## ③ $B^0 \rightarrow K_S \phi \gamma$

この崩壊モードでは、 $\phi \rightarrow K^+ K^-$ 崩壊の K 中間子の飛跡を用いて B 中間子の崩壊点を決定する。

図5に抽出された信号事象の分布、図6に生非対称度の分布とフィットの曲線を示す。得られた結果は、

$$S_{CP}(B^0 \rightarrow K_S \phi \gamma) = +0.74^{+0.72+0.10}_{-1.05-0.24}$$

ここに、一つ目の誤差が統計誤差、二つ目が系統誤差である。値は誤差の範囲で 0 に一致する。このモードでは崩壊分岐比も初めて測定したが、その値が、 $BF(B^0 \rightarrow K_S \phi \gamma) = (2.74 \pm 0.60 \pm 0.32) \times 10^{-6}$  と小さく、信号事象が  $37 \pm 8$  イベント程度しか得られなかったために、誤差が非常に大きくなっている。

上記①～③いずれの測定も標準理論の予言値(およそ 0)と誤差の範囲内で一致し、新物理の影響は観測されなかった。新物理の模型のうち Left-Right symmetric model (LRSM) などでは非常に大きな CP 非対称を起こしうるが、今回の観測にかかるほどの大きな非対称性は見られなかった。LRSM が正しいとしても、そのパラメータは今回の測定結果と矛盾のない範囲に制約されることにな

る。もうひとつの新物理模型として、超対称性理論が挙げられる。こちらは  $0(0.1)$  の非対称性を起こしうが、今回の測定では、それを有意に検証するには至らなかった。本研究期間に並行して B-factory 実験の高度化計画が進んでおり、本研究の結果を踏まえて測定器の設計を改善することができたので、高度化された加速器と測定器によりたくさんの良質なデータが取得され始めれば、超対称性理論の予言する程度の非対称度を検知できるようになると期待される。つまり、今回の測定だけでは新物理に対して否定的な結果が得られたが、近い将来に新物理の効果を発見できる可能性を増したという意味で、大きな成果を上げたと言える。

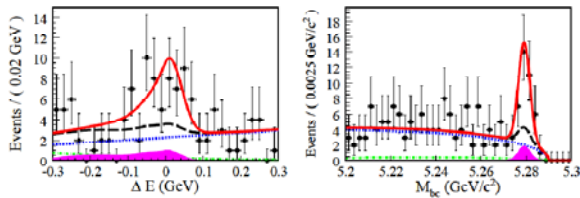


図5： $B^0 \rightarrow K_s \phi \gamma$  の不変質量( $M_{bc}$ )分布(右)とエネルギー差( $\Delta E$ )分布(左)。誤差棒付きの点が測定データ。実線は最尤法によるフィットの結果で、点線が B 中間子以外のハドロン生成過程からの背景事象、破線がそれに B 中間子からの背景事象を加えた全背景事象の分布を表す。

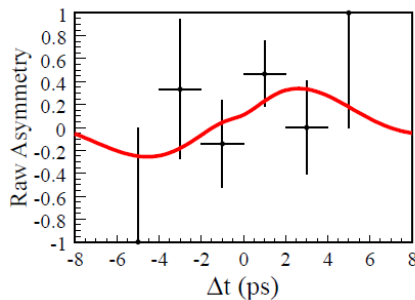


図6： $B^0 \rightarrow K_s \phi \gamma$  の  $\Delta t$  に依存する生非対称度分布。フレーバーが比較的確実に決定できた事象のみをプロットしてある。誤差棒付きの点が測定データ。曲線は、最尤法によるフィット結果。

- (2)  $\gamma \rightarrow e^+e^-$  転換過程を用いた光子偏極度測定  
この手法の可能性を追求したが、生成された電子・陽電子対の開き角が想像よりも小さく、面決定精度が十分得られなかった。もともと転換過程を起こす確率が約 3% と小さいという不都合もあったため、この方法では有意義な物理情報を得るのは容易ではないという結論に達した。

## 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 2 件)

- (1) “Measurement of the Time-Dependent CP Asymmetries in  $B^0 \rightarrow K_s \rho^0 \gamma$  Decays”, 査読有, Phys. Rev. Lett. 101, 251601 (2008), 251601-1 to 251601-6, J. Li, Y. Ushiroda 他 Belle Collaboration 123 名中 104 番目
- (2) Time-dependent CP-violating asymmetry in  $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  decays”, 査読有, Phys. Rev. Lett. 100, 021602 (2008), 021602-1 to 021602-5, Y. Ushiroda 他 Belle Collaboration 142 名中 1 番目

[学会発表] (計 7 件)

- (1) H. Sahoo, “Observation of  $B \rightarrow \phi K \gamma$  and Measurement of time-dependent CP violation”, ICHEP2001, 2010/7/24, Paris
- (2) S. Nishida, “Exclusive leptonic and radiative B meson decays at Belle”, 2009 欧州物理学会, 2009/7/17, Krakow
- (3) N. Taniguchi, “Radiative/EW penguin decays at Belle”, LLWI 2009, 2009/02/21, Alberta
- (4) J. Li, “Radiative penguin decays at Belle”, ICHEP2008, 2008/07/31, Philadelphia
- (5) N. Taniguchi, “Inclusive and exclusive  $b \rightarrow s/d \gamma$ ”, FPCP2008, 2008/05/08, Taipei
- (6) 後田 裕, “B 中間子の輻射崩壊における CP 非対称度の測定”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007/09/24, 北海道大学札幌キャンパス
- (7) O. Tajima, “CP violation in radiative B decays at Belle”, 2007 欧州物理学会, 2007/07/19, Manchester

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

後田 裕 (USHIRODA YUTAKA)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核・准教授

研究者番号：10342601

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし