

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究 (B)	
研究期間：2006-2008	
課題番号：18740149	
研究課題名 (和文)	中性 B 中間子の η' η' K_s 崩壊の探索と CP 非保存現象の研究
研究課題名 (英文)	Search for neutral B meson decays to η' η' K_s and study of CP violation
研究代表者	
	三宅 秀樹 (MIYAKE HIDEKI)
	筑波大学・大学院数理物質科学研究科・研究員
	研究者番号：20403115

研究成果の概要：

B 中間子の $b \rightarrow sqq$ 遷移モードの一つである $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_s$ 崩壊を研究し、人工ニューラルネットワークを用いた多変量解析を導入する事でシグナルを残したまま膨大な背景事象を効率良く排除する手法を確立した。

また同じく $b \rightarrow sqq$ 遷移モードの一つである $B^0 \rightarrow f_0(980) (\rightarrow \pi^+ \pi^-) K_s$ 崩壊の CP 非対称度パラメータを、当時の世界最高精度で測定すると共にモンテカルロシミュレータを改良し干渉効果の定量的な見積もりを行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 18 年度	2,000,000	0	2,000,000
平成 19 年度	600,000	0	600,000
平成 20 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	270,000	3,770,000

研究分野：素粒子実験物理学

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：B 中間子, CP 対称性の破れ, $b \rightarrow sqq$ ペンギン振幅

1. 研究開始当初の背景

クォークセクターにおける CP 非保存現象のおおまかな起源が素粒子標準模型 (SM) にある事は 2001 年、B 中間子系における CP 非対称性が発見された事により証明された。しかし SM は宇宙を記述する究極の理論では無いと予想されており、SM を超える新しい物理 (BSM) の探索が現在も世界中で行われている。BSM 理論の多くは複数の CP 非保存位相を含む為、BSM に感度の高い B 中間子崩壊モー

ドで CP 非保存位相を測定する事で BSM の存在を証明し、更に理論モデル及びパラメータの決定を行う事ができる。

研究開始時において、このように BSM に感度を持つ B 中間子の $b \rightarrow sqq$ ペンギン崩壊モードにおける CP 非対称度パラメータは統計有意度 2.6σ で SM から乖離しており、注目を浴びていた。

この結果をより詳細に知る為には、既に測定されたモードの解析を改良して統計量を増やす事や測定モードそのものを増やす手法

が有効であり、期待されていた。

2. 研究の目的

本研究における大きな目的は、BSM に感度の高い B 中間子の $b \rightarrow sqq$ ペンギン崩壊を用いた、新しい物理の探索である。

本研究では、特にこれまであまり解析されてこなかった三体崩壊モードに着目した。

CP 非対称度を観測するモードは、 B^0 中間子からも反 B^0 中間子からも崩壊可能な CP 固有状態ではなくてはならないが、三体崩壊の多くは CP 固有状態にならないか、CP 固有状態の重ね合わせの状態になり、測定値が 0、もしくは薄められてしまう。特に異なる CP 固有値を持つ中間状態共鳴による干渉効果を定量的に理解する事は簡単ではなく、系統誤差の見積もりを困難にしていた。この領域を CP 非対称度測定から外す事は可能であるが、これは統計誤差の増大を招く事になる。

本研究においては $b \rightarrow sqq$ 遷移における CP 非対称度測定を行うアイデアの一つとして、B 中間子の三体崩壊モード、特に未発見の中性スカラー三体崩壊モード $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ に着目した研究を行った。中性スカラー三体崩壊モードにおいては、スピン 0 である B^0 中間子の崩壊からの帰結として CP 固有値が唯一に定まり、上記のような問題が生じない。

一方このモードは $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊が観測されている事から存在自体は有望視されているものの、崩壊分岐比は約 10^{-5} と大まかにしか予測されておらず、さらに解析に用いられる終状態は 10 本以上に及ぶ荷電及び中性粒子より構成される複雑な系である事が問題となる。

もしこのような複雑な系において、再構築方法を確立し、更に CP 非対称度測定が行えるようになれば $b \rightarrow sqq$ 遷移における CP 非対称度測定の不定性を大きく改善できる可能性がある。

従って B 中間子の三体崩壊モードの解析を通して再構築方法、解析方法を確立すると共に $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊の発見及び CP 非対称度測定を行う事で他の $b \rightarrow sqq$ 崩壊との比較や BSM のパラメータ領域に制限を与える事を目的とする。

3. 研究の方法

$B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊の再構築

本研究は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構で行われている Belle 実験に参加し、ここで取得されている大量の B 中間子データを用いて行われた。B 中間子は運動量 $8\text{GeV}/c$ 及び $3.5\text{GeV}/c$ の電子陽電子衝突

から生成された $Y(4S)$ 中間子の崩壊により対生成され、これを汎用検出器である Belle 検出器を用いて取得、解析を行う。解析手法としては飛跡検出器によって再構築された荷電粒子 (π 中間子)、光子検出器によって再構築された光子の不変質量を足し上げていき、各中間状態の不変質量を再現しながら最終的に B 中間子質量を求め、これが世界平均値から電子ビームや検出器の分解能によって定められる一定の幅の中に納まっている事を求める。

上述したように $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊は、終状態に含まれる粒子数が多い事から、再構築の際の組み合わせの数が膨大な数になる。 η' 中間子の再構築に多く用いられる崩壊モードは $\eta' \rightarrow \rho^0 (\rightarrow \pi^+ \pi^-) \gamma$ 、 $\eta' (\rightarrow \gamma \gamma) \pi^+ \pi^-$ 、 $\eta' (\rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0) \pi^+ \pi^-$ の 3 通りであり、以降 ($\rho \gamma$)、($\gamma \gamma$) 及び (3π) と称する。これらの崩壊分岐比込みの再構築効率既存の $B^0 \rightarrow \eta' K_S$ 崩壊解析に用いられる手法を用いた場合およそ 8:4:1 となり、($\rho \gamma$) ($\rho \gamma$) モードが最もシグナル数が多いと期待されるが、組み合わせを間違える事による背景事象数は 100:10:1 の割合となり、圧倒的に多い。これは、 ρ^0 の質量幅が大きく、間違える組み合わせを排除しにくい為である。従って従来の手法をそのまま用いた場合、このモードは上手く解析できない事が判明した。

そこでシグナルモンテカルロシミュレーション (MC) を大量に生成し、後に背景事象と識別する為に有効なパラメータを探る。

背景事象は大きく分けて 3 種類挙げられる。I. シグナル事象の組み合わせを間違えたもの、II. B 中間子が他の崩壊を起こしたものを間違えて再構築してしまったもの、III. B 中間子を経由しない軽いクォークジェット事象を間違えて再構築してしまったもの、である。主要なものは III であり、 $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊においては、その 90% 以上を排除してもなお、ほぼシグナルと等しい量の III 型の背景事象が混入してくる。 $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊においては組み合わせの数が増えるので更に多くの背景事象が混入してくると考えられる。そこで、実験データと等量～数倍の大量の II 型～III 型 MC を生成し、どれ程の数が $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊の選択基準を通過するか調べた。

また MC は完全に実データを再現するものではない為、正しくシグナルを残し背景事象を排除する為には、シグナルを含まないサイドバンド領域における振る舞いを理解する事が重要となる。

これらシグナル MC、背景事象 MC 及び背景事象データから幾つかの運動学的変数を選び出し分布の違いを確認すると共に、Fisher Discriminant 法に基づいた事象選択を試み

た。Fisher Discriminat とは各入力変数に対し確率密度関数によるモデル化を行い、更に相関の大きさで更なる重み付けを与える分別法である。こうしてモデル化された関数を多数用いて尤度関数を構成し、この分布の違いによってシグナルと背景事象の選別を行った。シグナル選択の最適化は、統計有意度を最大に高める為、figure of merit(シグナル事象数をシグナル領域の全事象数の平方根で割ったもの)を最大にするように行った。

$B^0 \rightarrow f_0(980) (\rightarrow \pi^+ \pi^-) K_S$ 崩壊による CP 非対称度測定

前述した様に MC は実験データを完全に再現するものではない為、解析手法を確立する為にも実データからのフィードバックは重要である。

$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- K_S$ 崩壊は、 $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 同様スカラ-三体崩壊であり似た崩壊トポロジーを持つと共に、 $b \rightarrow sqq$ 遷移による CP 非対称度測定が可能なモードである。終状態の荷電粒子数は遥かに少ない為、比較的クリーンな崩壊であり、崩壊分岐比の小さな希少崩壊でありながらシグナル事象の分布を調べるには適している。

CP 非対称度測定にあたり必要な情報は、①B 中間子フレーバーの同定、②崩壊点の測定、③分解能関数の決定である。

フレーバー同定は B 中間子崩壊生成物の電荷情報をもとに、 b クォークの電荷、すなわち B 中間子のフレーバーを推定する。例えば、B 中間子の準レプトン崩壊 $b \rightarrow c \mu \nu$ を起こした結果による、運動量 1.2GeV 以上の早い μ 粒子を検出する。フレーバー同定の性能はフレーバー決定率と誤謬率によって評価されるが、この三体系においては二体崩壊における CP 非対称度測定と同じパラメータを用いて測定できる事が MC 及び実データ分布の比較により確認された。この確認手法は $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 解析にも適用可能である。

次に B 中間子の崩壊位置を測定し、そこから B 中間子の崩壊時間を算出してその時間依存性を調べる事で、CP 非対称度を測定する。以降 CP 固有状態に崩壊した B 中間子の崩壊時間と、対になる B 中間子の崩壊時間の差 (Δt) を、時間パラメータとして用いる。 Δt の分布は、検出器の分解能によってなまっている。これを再現する為に分解能関数を用意し、これを畳み込み積分を用いて理論的に与えられる Δt 分布になまりを与える事で、測定される Δt 分布を確率密度関数と一致させる。これがうまく行っているかの確認を、CP 非対称度パラメータを測定せずに B 中間子の寿命を測定し、世界平均と一致するか検証する事などで行い、問題無い事が確認された。

ここまでの解析は $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊においても基本的に共通に行われるが、 $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- K_S$ は中間状態として幾つかの共鳴状態を持つ事が知られている。一例を上げると ρK_S 、 $f_0(980) K_S$ 、 $K^* \pi^-$ などである。特に ρK_S と $f_0(980) K_S$ は異なる CP 固有値を持ち、更に ρ と $f_0(980)$ の不変質量が近い事から共鳴状態同士が干渉を起こし、測定される CP 固有値を歪めてしまう。これは研究目的に述べた通りであり、当時この効果を定量的見積もる事は困難であった。

そこで系統誤差の小さな測定を行う為に、不変質量の要求を狭めて干渉領域を排除し、単一の共鳴が優勢である領域(準二体崩壊近似)を、特に分岐比が大きく狭い質量幅を持つ $f_0(980)$ を用いて CP 非対称度測定を行った。この手法は統計誤差が大きくなる欠点があるものの系統誤差は小さく、結果として測定結果の不定性が小さくなる。

測定結果は他の $b \rightarrow sqq$ 崩壊解析結果と矛盾しておらず、また SM と誤差の範囲で一致した。これは当時の世界最高精度であり、また準二体崩壊解析としては現在でも世界最高精度を保っている。この結果を論文としてまとめ、Physical Review D 誌に掲載された。またこの結果を含む $b \rightarrow sqq$ モードにおける CP 非対称度測定の平均値は、不定性が小さくなった上に SM からの乖離が 2.2σ となるという知見を得た。

共鳴状態を考慮して CP 非対称度を計算する MC シミュレータの開発

準二体崩壊近似に頼らず CP 非対称度測定を行う為には、共鳴状態の干渉効果を考慮する必要がある。

これは Dalitz analysis と呼ばれる、複素平面で各共鳴状態の崩壊幅を記述し、各々の崩壊振幅をその二乗として表す手法により計算され、干渉効果を再現できる。Dalitz analysis 自体は従来から知られていたものの、これまで研究グループで用いていた MC シミュレータでは Dalitz analysis 自体は再現できるが時間に依存する CP 非対称度を表現する事はできなかった。そこで各崩壊振幅が固有の CP 非対称度パラメータを持ち、二体崩壊同様に時間に依存した CP 非対称度分布を再現する様にシミュレータを改良した。これにより $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- K_S$ を用いた場合 $\pi^+ \pi^-$ 不変質量を適切な幅で区切り、特定の中間状態の支配的な領域を切りだした時に、予測通りの CP 符号が得られる事を検出器シミュレーションを通す前及び後で確認した。また適切なパラメータを与えた場合、この MC シミュレーションにより得られる $\pi^+ \pi^-$ 不変質量分布は共鳴状態を仮定しない測定結果より、よく実験データを再現する事も確認した。こ

れにより、三体崩壊における共鳴状態の干渉効果による影響を、本測定のみならず、より一般的な場合において見積もる事が可能となった。

多粒子崩壊事象における人工ニューラルネットワーク法による多変量解析手法の確立

本研究の主測定モードである $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊は未発見であるが、その崩壊分岐比を 1×10^{-5} と仮定した場合、2008 年までに Belle 実験において蓄積された約 6.57 億個の B 中間子対生成事象からは約 1000 個生成されると期待される。しかし実際に再構成可能な事象はこのうち数%である上、背景事象を考慮した事象選択を行う必要がある。前年度までの解析より本測定モードにおける主要な背景事象は偶然背景事象によるものである事が解っている為、実データにおける背景事象領域を切り出し、その量と性質を調べた。またこれらの数を同様に事象選別を通過するシグナル MC の再構築効率と比較する事で $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊のどのサブ崩壊モードが有効であるかも調べられる。

その結果、 $(\gamma\gamma)(\gamma\gamma)$ が最も高い統計有意度を示し、 $(3\pi)(\gamma\gamma)$ 及び $(3\pi)(3\pi)$ モードがそれに続く事がわかった。しかしこれらのモードにより期待される統計量は当初予定されていた $(\rho\gamma)$ を含む 3×3 の組み合わせのうち 15%に過ぎず、従来と同様の事象選択を行った場合期待される事象数は約 3 個となり、予測される崩壊分岐比の上限まで考慮したとしても事象の発見及び CP 非対称度測定には不十分である。したがって、本測定においては $\rho\gamma$ モードを特に改善する事が必須である事が判明した。 $(\rho\gamma)(\rho\gamma)$ モードにおいて解析当初と同様に Fisher Discriminant を用いた事象選択を行った場合、期待される事象数は約 8 個、背景事象数は 3800 に及ぶ。従来はこのような複雑な崩壊トポロジーを持つ事象の再構成、改善は困難だったが、 ρ 中間子の偏極度分布など本モード特有の力学的変数を新たに用いたり、人工的ニューラルネットワークを利用した多変量解析を行い、変数間の相関を考慮したりする事で効果的なシグナル選別を行った。人工的ニューラルネットワークとは人工ニューロンを用いて脳神経を模したシナプス結合の強度を変化させ、問題解決を図る数学モデルである。教師信号としてシグナル MC を、不正解として背景事象を学習させる事で効果的な事象選別関数を得る事ができる。入力に用いる変数間の相関が大きかったり複雑である場合特に有効であり、Fisher Discriminant とは相補的な性質を持つ。また入力変数の選択や組み合わせる順番により学習結果が大きく左右される為、多くの組み

合わせを試して最適なものを選ぶ必要がある。

さらに、選択された組み合わせより得られる出力(Discriminat)のうち最も統計有意度が高くなる点を探し、そこで事象選択を行う必要がある。

最適化の結果、シグナル 13 事象に対し背景事象 1200 とシグナル数を増やしながらシグナル背景事象比が 5 倍向上する著しい改善を見た。これにより 10 本以上に及ぶ荷電及び中性粒子より構成される事象を、多変量解析を用いて再構成する方法を確立した。しかし背景事象の多さから本解析は現状の統計量では CP 非対称度測定には不十分である事も又判明した。

4. 研究成果

10 本以上という多粒子系で再構成される $B^0 \rightarrow \eta' \eta' K_S$ 崩壊の再構築手法を確立した。MC 事象及び実データの背景事象領域を調べる事により、主な背景事象が、多数の粒子が乱数的に組み合わさる偶然背景事象であり、B 中間子由来の背景事象はほぼ無視できる事を確認した。

$B^0 \rightarrow f_0(980) (\rightarrow \pi^+ \pi^-) K_S$ 崩壊の CP 非対称度パラメータを、当時の世界最高精度で測定した。これは現時点においても準二体崩壊領域における測定として世界最高精度である。この結果により、 $b \rightarrow sqq$ モードにおける標準理論からの乖離が 2.2σ となるという知見を得た。

また、共鳴状態を含む三体崩壊における時間に依存する CP 非対称度を考慮した MC シミュレータの開発を行った。これにより、従来困難だった干渉効果による CP 非対称度パラメータの歪みに対する定量的な見積もりが可能となった。

本研究モードのように 10 本以上に及ぶ荷電及び中性粒子より構成される複雑な事象を、人工ニューラルネットワークを用いた多変量解析を行う事でシグナル背景事象比を著しく(5 倍)改善する手法を確立した。しかし背景事象の多さから本解析は現状の統計量では CP 非対称度測定には不十分である事も又判明した。この問題は統計量及び検出器分解能に制限されるものであり、Super Belle 実験など近い将来の高輝度高精度実験により解決されるであろう。

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 1 件)

1. 著者名: K. Abe, H. Miyake *et al.*

(The Belle collaboration)

論文表題: Measurements of time-dependent
 CP violation in $B^0 \rightarrow \omega K_S^0$, $f_0(980) K_S^0$, $K_S^0 \pi^0$
and $K^* K_S^0$ decays

査読の有無: 有

雑誌名: Physical Review D, 76 巻,
091103-091112 (2007)

[学会発表] (計 2 件)

1. 発表者名: Y. Yusa

発表表題: “Studies of penguin dominated
B decays”

学会名: SUSY07

発表年月日: July 27, 2007

発表場所: Karlsruhe, Germany

2. 発表者名: K. Sumisawa

発表表題: “ ϕ and $b \rightarrow s q \bar{q}$ TCPV”

学会名: 21st International workshop on Weak
Interactions and Neutrinos (WIN07)

発表年月日: January 17, 2007

発表場所: Kolkata, India

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三宅 秀樹 (MIYAKE HIDEKI)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・研究
員

研究者番号: 20403115