

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22340062

研究課題名(和文) タグした二光子過程ハドロン生成断面積の高統計測定による量子色力学の詳細検証

研究課題名(英文) Detailed study of QCD through high statistics measurement of hadron production cross section in tagged two-photon collisions

研究代表者

渡邊 靖志 (WATANABE, Yasushi)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：40126199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：まず、一方の光子をタグした π^0 中間子の遷移形状因子の測定を行い、BaBarの結果と異なり、よりQCD極限值に近い結果を得て、この問題を落ち着かせた。

次にノータグ二光子過程によるKOS中間子対生成反応を閾値付近からの断面積を測定解析し、 $f_2(1270)$ と $a_2(1320)$ の負の干渉、 $f_2'(1525)$ の二光子幅×分岐比等の高精度の測定が可能となった。

現在、一方の光子をタグした π^0 中間子対の微分断面積を $Q^2=30$ GeV²まで測定解析して、論文として投稿準備中である。 $f_2(1270)$ (ヘリシティ=2,1,0別々)と $f_0(980)$ 中間子の遷移形状因子を Q^2 の関数として測定し、理論の予言と比較した。

研究成果の概要(英文)：We first measured the transition form factor of the π^0 meson through singly tagged two-photon process and obtained better agreement with the QCD limiting value than the BaBar's, settling the "BaBar anomaly". Then measured the cross section of no-tag-two-photon production of KOS pair from the threshold, confirming the full interference between the $f_2(1270)$ and $a_2(1320)$ and measuring the two-photon widths of the $f_2'(1525)$, etc.

At present, the paper on the measurement of π^0 pair production cross section through singly tagged two-photon collision is almost ready to publish, where the transition form factors of the $f_0(980)$ and those of the $f_2(1270)$ for each of helicity=0,1 and 2 states as a function of Q^2 are measured and compared with theories for the first time.

研究分野：素粒子実験

 キーワード：量子色力学の検証 Bファクトリー実験 共鳴粒子の構造的性質 中間子対生成反応 低質量スカラー粒子
低質量ベクトル粒子 タグした二光子過程 KEKB-Belle

1. 研究開始当初の背景

(1) Bファクトリー実験の主目的は電子・陽電子衝突実験における CP 非保存の研究である。しかしながら、そこでの圧倒的な高統計、高粒子識別能力、高いエネルギー・運動量分解能等は、ハドロン物理研究においても、その質を変え、新たな時代を切り開くこととなった。すなわち、従来の実験の3桁以上の高統計により、これまで測れなかった断面積の測定を可能にし、見えなかった構造がきれいに見えるようになったのである。

(2) Belle 実験では、私たちの小グループを中心として二光子過程でのハドロン生成反応において世界をリードしてきた。ライバルである BaBar 実験からは、恐らくトリガーの制限から、このような実験結果は全く出されて来なかった。Belle ではそれまでタグしない(ノータグ)実光子での物理で成果を挙げてきた。

(3) 二光子過程のハドロン生成反応では、終状態が正の荷電パリティ中間子のみが生成されるなど比較的クリーンにスカラー粒子やテンソル粒子、チャーモニウム等の構造や性質を探ることができる。とくに共鳴粒子の二光子幅は、ほぼ二光子過程による生成反応でのみ測定可能である。

(4) ハドロンの世界を記述する量子色力学(QCD)は非可換 SU(3)ゲージ理論であり、高エネルギー領域では「漸近的自由」の性質により摂動計算が可能であって、直接的な実験的検証が可能である。一方、低エネルギー領域での共鳴粒子の性質、構造、相互作用については、摂動論が使えず、QCD は予言能力を持たない。(事実、QCD では予想されなかった新しい粒子などが次々と見つかっている。)そのため、QCD に基づくいくつかの現象論モデルが考案されるとともに、専用計算機や大規模並列計算機を駆使した格子QCD計算のさらなる精密化が現在も続けられている。そういう背景のもと、様々な終状態の二光子過程の実験結果がQCDの総合的理解や発展に大きく寄与することは論を待たない。

(5) 中でも $1 \text{ GeV}/c^2$ 以下の低質量スカラー粒子の存在はQCD理論の長年の謎とされてきた。 $f_0(980)$ 、 $a_0(980)$ スカラー中間子の二光子幅の測定等はその謎の解明に大きく寄与するはずである。

(6) より高エネルギー領域では、断面積の W (重心系エネルギー) 依存性や角分布などをQCDの予言と比較し、どのように高エネルギー極限值に近づいていくのかについての知見を得ることができる。

(7) 私たちがこのようなノータグでのデータを次々と発表していたとき、ライバルの BaBar 実験から初めて二光子過程の論文が出された。それは、一方の光子をタグ(シングルタグ)して 0 中間子の遷移形状因子を Q^2 (タグした光子の不変質量 2 乗の絶対値) の関数として 40 GeV^2 まで測定した論文であった(文献)。BaBar では、これを測定する

ために特別なトリガーを用意していたとのことである。その測定結果は、 Q^2 とともに QCD の高エネルギー極限值との差が大きくなり、最大 50%ほど超えるというもので、理論家たちはその解釈に追われていた(図1の黒丸)。世界で Belle 実験のみがこの結果を追試可能であった。上記のとおり QCD の高エネルギー領域は摂動論で計算でき、その予言値と実験値が合わないことは新しい物理の存在を示唆し、その検証は極めて重要である。

(8) Belle ではこれまでタグした二光子過程の物理には手つかずであったが、上記 BaBar 実験の結果の追試を始めとして、 0 中間子以外の共鳴粒子の移行形状因子も Q^2 の関数として求める未開の領域が解析を待っていることは明らかであり、その測定によって QCD のさらなる精密な検証が可能になる。

2. 研究の目的

(1) まずは BaBar 実験の結果を追試し、その正否を独立な実験で検証することが急務である。

(2) この 0 中間子の遷移形状因子の測定において、その主要なバックグラウンドの1つである 0 中間子対生成反応の寄与を見積もり、正しく差し引くとともに、その信号自身を次のシングルタグ二光子過程反応物理として解析する。

(3) これらの解析に続いて、 K_S^0 中間子対生成反応の事象(ノータグおよびタグ)の解析を行う。この反応のノータグ過程については、Belle で過去に高エネルギー領域(2.4 GeV 以上)では測定されていた。しかしながら K_S^0 中間子の同定の困難などの理由から、閾値付近は測定されなかった。 K_S^0 中間子対生成反応では 0 中間子対生成反応と異なり、アイソベクトルの共鳴粒子も寄与するため一般的に解析はより複雑である。しかしながら、Belle でのそのプレリミナリーなデータを解析した結果、理論の予想通り $f_2(1270)$ と $a_2(1320)$ は負の最大干渉を示すことがわかった。また、 $f_2'(1525)$ の二光子幅 \times 分岐比の高精度の測定が可能であることもわかった。

3. 研究の方法

(1) 0 中間子の遷移形状因子の測定については、まずは Belle の生データから、 0 などの「(陽)電子プラス中性エネルギー」候補のデータを抽出する skimming を開始する。

K_S^0 中間子対生成反応については、荷電粒子トラック 4 ~ 6 本の skimmed データを作成する。

(2) 上原自作のノータグ二光子過程中間子対生成反応用のモンテカルロ(MC)コード(TREPS)をシングルタグ用に改良する(TREPSB-ST)。それを走らせて生事象を発生させ、それを Belle のトリガーシミュレーターおよび GEANT3 に基づく測定器シミュレーターを通して Belle 測定器での擬似データを作成する。こ

の作業には、Belleでの他のいろいろな解析を妨げないように専用の計算機および磁気テープシステムを用いる。擬似データ発生には数ヶ月を要するため、ジョブを小分けにし、たくさんジョブを次々と投入していく。そのため、ジョブが終了することに正しく生成されているかをチェックし、ルミノシティのブックキープングを行っていく必要がある。

(3) 目的のskimmedデータから信号抽出の条件を最適化して目的の信号候補事象を選び出す。そのうえで、バックグラウンドの見積もりを行ってその差し引きを行う。さらにMCデータに基づいて検出効率の補正や輻射補正を行い、最終的に微分断面積を導き出す。

(4) シングルタグのデータでは、電子をタグした事象と陽電子をタグした事象を独立に解析してその無矛盾性を確かめる。加速器のビームエネルギーは陽電子が3.5 GeV、電子が8.0 GeVであって非対称であり、Belle測定器もそれに対応して非対称に設計されている。これら2つの断面積が統計誤差の範囲で一致することは測定バイアスが無いことのよい確認になる。それを確認したうえで2つを足し合わせた断面積を最終結果とする。

(5) 物理解析では、いろいろなQCD計算との比較やフィット等を行い、系統誤差の見積もり等を行って論文としてまとめる。具体的には 0 中間子の遷移形状因子については、BaBarの結果との比較、 Q^2 依存性のパラメータフィットなどを行う。ノータグ K_S^0 中間子対生成反応やシングルタグ 0 中間子対生成反応では、4.の研究成果で述べるような詳細なフィット等を行って物理を抽出する。

(6) Belle実験での論文投稿までのルールに従い、各論文について、まずはグループ内のレフェリー3名をアサインしてもらおう。その助言コメントを考慮の上論文を修正していく。二光子過程の論文は一般に長文になり、そのプロセスに半年から1年かかってしまう。その過程で、解析上足りなかったチェックやバックグラウンドの可能性などの指摘を受け、それらを補充し修正して、より完成度の高い論文として仕上げる。そのうえで実験グループ全体に公開し、その批判・コメントを受けてさらに修正し、グループの承認を得て雑誌に投稿する。投稿後は、雑誌のレフェリーのコメントに答え、必要な修正を行ってアクセプトに至る。(Belleの結果は世界初のものがほとんどではほぼ問題なく掲載に至ってきた。)

4. 研究成果

(1) まず、一方の光子をタグした 0 中間子生成反応の解析から 0 中間子の遷移形状因子の測定を行った。Belleでは、BaBar実験と異なり、Bhabha veto triggerの影響が大きく、その補正が難しかったが、BaBarと同程度の感度で測定することができた。その結果は図1のようにBaBarの結果(引用文献)と異なり、よりQCD極限值に近い結果を得て、この問題を落着かせた(雑誌論文)。

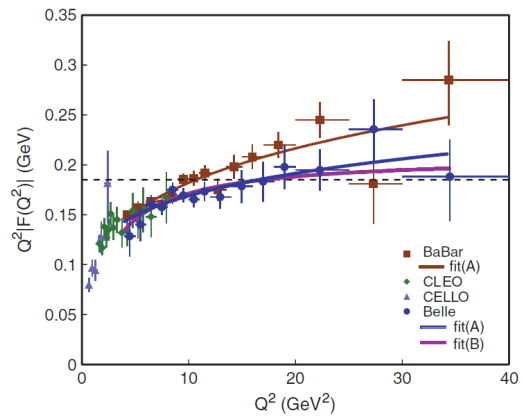


図1 0 中間子の遷移形状因子

(2) 次に、ノータグ二光子過程による K_S^0 中間子対生成反応について、閾値付近からの断面積を測定解析した。この過程は、 0 中間子対生成反応と異なり、その終状態に f_1 中間子だけでなく a_1 中間子($J=0, 2, 4$)も寄与し、解析が複雑になるが、その代わりそれらの干渉についての興味深い結果が期待できる。その期待通り、 $f_2(1270)$ と $a_2(1320)$ との位相差を圧倒的な統計精度で測定でき、理論で予想する負の最大干渉を実証することができた。また、 $f_2'(1525)$ の二光子幅×分岐比の高精度の測定が可能となった(図2)。

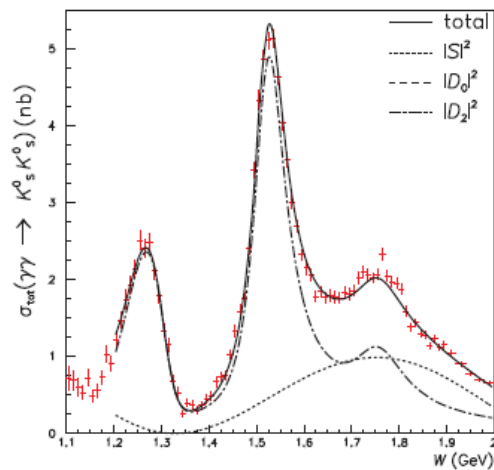


図2 K_S^0 中間子対生成反応(1)

中間エネルギー領域の1.8 GeV付近のピークについては、従来のテンソル中間子という解釈とは異なり、スカラー粒子共鳴であるという結論を得、その質量、全幅および二光子幅×分岐比の測定を行うことができた。とくに、2.2 GeV付近には幅の狭いグルーボール候補の存在が示唆されていたが、この二光子過程での測定でそれを否定する結果を得た。

高質量領域では、 S, D_0, D_2 波に加えて、 G_0, G_2 波が効いてくるが、それらをパラメータ化してフィットした結果、2.5 GeV付近のピーク(図3)はスカラー中間子であるという強い示唆を得、これまでで最大質量のスカラー粒子の同定となった。

一方、高エネルギー領域では、チャーモニウムについての知見をさらに深めるとともに、従来の Belle での解析結果(引用文献)を確認し、さらに更新することができた(雑誌論文)。

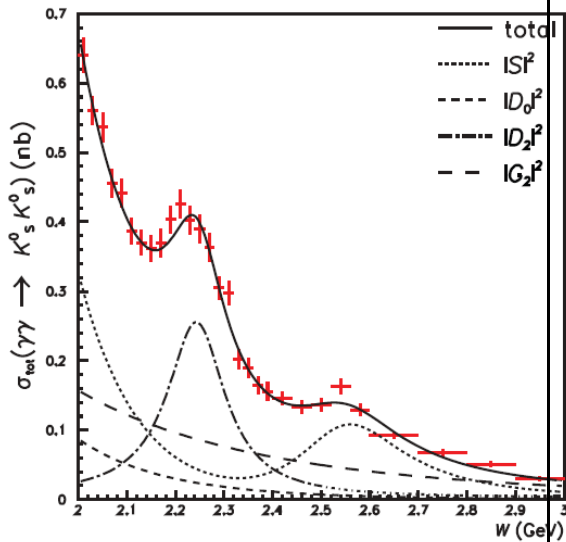


図3 K_S^0 中間子対生成反応(2)

(3) 現在、シングルタグ K_S^0 中間子対生成反応 ($e^+e^- \rightarrow \gamma^* \gamma^* K_S^0 K_S^0$ 反応)の微分断面積を $Q^2=3-30 \text{ GeV}^2$ の領域で測定し解析して、論文として投稿準備中である。これは上述のようにシングルタグによる K_S^0 中間子の遷移形状因子の測定の副産物で、まずは微分断面積を求めることに集中した。 Q^2 がゼロでない K_S^0 中間子対生成反応では、 S, D_0, D_2 波に加えて D_1 波も寄与する。しかし、方位角について積分してしまった断面積では、自由度の制限から、 S, D_0, D_1, D_2 波のすべてを決めることはできない。 $f_2(1270)$ 中間子の遷移形状因子の理論計算では、 D_0 と D_1 波は Q^2 とともに増加すると予言されている。そこで、まず、方位角依存性を含んだシングルタグ K_S^0 中間子対生成微分断面積の式を導く必要があった。それに関して Belle 共同研究者から紹介されたノボシビルスク国立大学(ロシア)の V.G. Serbo 教授が丁寧に私たちの問いに答えてくれ、正しい微分断面積の式を手に入れることができた。

解析面では、いかに B ファクトリーの高統計をもってしても方位角までピンに分けることはできない。そこでまず、方位角依存の微分断面積では Q^2 について積分したもので D_1 波の寄与も考慮に入れてフィットした。その結果を用い、 D_1 波について Q^2 依存性をパラメータ化して、方位角について積分した微分断面積をフィットし、最終的に $f_2(1270)$ (ヘリシティ=2,1,0 別々に)と $f_0(980)$ 中間子の遷移形状因子を Q^2 の関数として求めることができた。

図4はその解析結果であり、 $f_2(1270)$ (ヘリシティ=2,1,0)と $f_0(980)$ 中間子の遷移形状因子

の Q^2 の依存性の測定結果と、理論の予言(引用文献 ,)と比較している。

このような測定は世界で初めてのものであり、Belle での二光子過程の物理の可能性を端的に示した好例である。

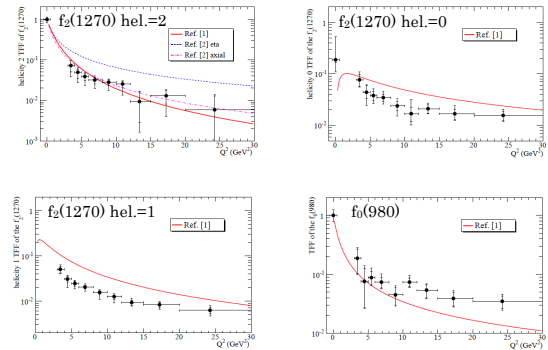


図4 $f_2(1270)$ (ヘリシティ=2,1,0)と $f_0(980)$ 中間子の遷移形状因子

<引用文献>

B. Aubert et al. (BaBar Collab.), “Measurement of K_S^0 transition form factor”, Phys. Rev. D 80, 052002 (2009).

W.T. Chen et al. (Belle Collab.), “A study of K_S^0 production at energies from 2.4 to 4.0 GeV at Belle”, Phys. Lett. B 651 15 (2007).

G.A. Schuler, A.B. Berends and R. van Gulik, Nucl. Phys. B 523, 423 (1998).

V. Pascalutsa, V. Pauk and M. VanderHaeghen, Phys. Rev. D 85, 116001 (2012).

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 4件)

J. Bevan, S. Uehara, Y. Watanabe et al. (BaBar and Belle Collab.), “The Physics of the B Factories”, Euro. Phys. J. C 74: 3026 (2014), 査読有。
S. Uehara, Y. Watanabe et al. (Belle Collab.) “High-statistics study of K_S^0 s pair production in two-photon collisions”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 123C001, 査読有。

J. Brodzicka, S. Uehara, Y. Watanabe et al. (for Belle Collab.), “Physics achievements from the Belle experiment” Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 04D001, 査読有。

S. Uehara, Y. Watanabe et al. (Belle Collab.), “Measurement of K_S^0 transition form factor at Belle”, Phys. Rev. D 86, 092007 (2012), 査読有。

【学会発表】(計 13 件)

上原貞治, Exotic hadrons at KEKB
KEK theory center workshop on
hadron physics with high-momentum
hadron beams at J-PARC
2015年3月13-16日 KEK、つくば, 招
待講演
中澤秀介, “Measurement of Hadronic
Cross Section with ISR/Two-Photon
Events at Belle”, The 13th
International Workshop on Tau Lepton
Physics (TAU 2014), 2014年9月15-19
日, アーヘン工科大学, Aachen,
Germany, 招待講演
上原貞治, “Gamma-gamma physics at
Belle”, International Workshop on e+e-
collisions from Phi to Psi
(PHIPSI13), 2013年9-12日, Sapienza
University of Rome, Rome, Italy, 招待
講演
上原貞治, “Charmed mesons at B-factory
experiments”, JPARC-KEK theory
center Workshop on Hadron Physics with
high momentum hadron beams at JPARC in
2013, 2013年1月15-18日 KEK, Tsukuba,
招待講演
上原貞治, “Measurement of gamma gamma*
pi0 transition form factor of at
Belle”, Workshop on Fragmentation
Functions and QCD 2012 (Fragmentation
2012), 2012年11月9-11日, Riken, Wako,
招待講演
上原貞治, “The Two-photon Measurements
at Belle”, Workshop on QCD un
Two-photon Physics, 2012年10月2-3
日, Academia Sinica, Taipei, Taiwan,
招待講演
上原貞治, “Measurement of gamma gamma*
pi0 transition form factor of at
Belle”, 12th International Workshop on
Meson production, Properties and
Interactions (Meson12), 2012年5月31
日-6月4日, Auditorium Maximum,
Callegium Maius, Jagiellonian
University, Cracow, Poland, 招待講演
上原貞治, “Measurement of gamma gamma*
pi0 transition form factor of at
Belle”, Workshop on Meson transition
form factors, 2012年5月29-30日,
Callegium Maius, Jagiellonian
University, Cracow, Poland, 招待講演
上原貞治, “Recent Results on Two-
Photon Physics at Belle”,
International Workshop on e+e-
collisions from phi to psi (PHIPSI11),
2011年9月20日, Budker Institute,
Novosibirsk, Russia, 招待講演
上原貞治, “Resonance physics at
B-factories”, International Workshop
on e+e- collisions from phi to psi

(PHIPSI11), 2011年9月20日, KEK,
Tsukuba, 招待講演
上原貞治, “Meson-pair Production in
Two-Photon Collisions at Belle”, Workshop
on Hard Meson and Photon Production
(GPD2010), 2010年10月10-15日,
Jagiellonian University, Krakow, Poland,
招待講演
中澤秀介, “Particle production in two-ph
oton collisions at Belle”, 35th Internati
onal Conference on High Energy Physics
(ICHEP10), 2010年7月21-28日, Paris,
France, 招待講演
上原貞治, “Recent Results on Meson Sp
ectroscopy from Belle and BaBar”, MES
ON2010, 2010年6月10-15日, Jagiellonian
University, Krakow, Poland, 招待講演

〔図書〕(計 0 件)

【産業財産権】

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 靖志 (WATANABE Yasushi)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号: 40126199

(2) 研究分担者

上原 貞治 (UEHARA Sadaharu)
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・講師
研究者番号: 70176626

(3) 連携研究者

()
研究者番号: