

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05474

研究課題名（和文）中間子崩壊におけるレプトンフレーバーの破れの探索

研究課題名（英文）Search for lepton flavor violation in meson decays

研究代表者

西田 昌平（Nishida, Shohei）

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：20370075

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：Belle実験データを用いて、Bや Υ などの中間子が τ を終状態に含む崩壊モードで、レプトン数を破る過程の探索を行った。Bsが τe に崩壊するモードを世界で初めて探索したほか、 $\Upsilon(2S) \rightarrow \tau \mu$ などで過去の測定よりも厳しい分岐比の上限を設定した。いずれのモードでも有意な信号は見つらなかった。また、Belle II実験のデータを用いた研究を行い、今後のBelle IIでの解析手法を研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
レプトン数を破る過程は、素粒子の標準模型を超える新物理の手がかりとなり、多角的に探索されている。本研究では、その一翼を担い、中間子の崩壊を用いた探索を行った。レプトン数を破る過程は見つからなかったが、可能性のある探索領域に制限を加えるものであり、このような測定の積み重ねで未知の新物理の性質の情報を得られる。

研究成果の概要（英文）：With data from Belle experiment, we have searched for the lepton-flavor violation process using the decays of mesons, such as B and Upsilon, to final states with a tau. We have searched the decay of Bs to tau e for the first time. We also set the most stringent upper limits of the branching fractions in several decay modes such as $\Upsilon(2S) \rightarrow \tau \mu$. We do not find any signal in all the searched modes. In addition, we have performed the studies the analysis method at Belle II using Belle II data.

研究分野：素粒子実験

キーワード：レプトンフレーバーの破れ 中間子 新物理 フレーバー物理 粒子識別

1. 研究開始当初の背景

2012年にLHCでヒッグス粒子が発見され、素粒子物理学における最大の課題は標準模型を超える新物理の探索になった。荷電レプトンのレプトン数を破る過程(LFV過程)の探索はTeVスケールの物理に優れた感度があるとされており、LFV過程の探索として多くの実験が行われていたり計画されていたりした。

BelleとBelle II実験は、電子陽電子衝突型加速器KEKBあるいはSuperKEKBを用いて大量のB中間子を生成し、その崩壊を調べる実験である。研究開始時点では、2010年までに稼働していたBelle実験のデータが利用可能であり、まもなくBelle II実験が運転を開始するという状況であった。当初の予定では、本研究の期間中にBelleのデータの倍程度のデータを収集できると予想されていた。このころ、終状態に τ を含む崩壊モードの測定が行われるようになり、興味深い結果が得られていたこともあって、 τ を終状態に含む中間子の崩壊モードでLFV過程を探索するという、今回の研究の着想を得た。

2. 研究の目的

本研究は、BelleやBelle II実験のデータを用いて、LFV過程を、 τ を終状態に含む中間子の崩壊の中で探索することを目的としている。具体的にはB中間子のレプトニック崩壊である $B \rightarrow \ell \ell$ ($\ell = e, \mu$)のほか、電弱ペンギン崩壊 $B \rightarrow K^{(*)} \ell \ell$ ($\ell = e, \mu$)を探索する。また、B中間子以外の崩壊として、 $B_s \rightarrow (nS)$ ($n=1,2,3$)のLFV崩壊も探索対象とする。これらの探索は、CLEOやBaBar実験により試みられているものもある。本研究では、すでにあるBelleのデータに加えて、研究期間内にBelle IIが蓄積すると予想される2-3 ab^{-1} のデータを用い、解析方法を改良したうえで、従来よりも1桁低い領域を探索し、信号の発見または上限値を向上することをめざしている。さらに、Belle IIが蓄積する予定の50 ab^{-1} のデータでの感度を見積もる。

3. 研究の方法

本研究の開始時点ではBelle IIのデータ収集は開始されていなかったため、Belle実験のデータを用いた解析で今まで試されてなかったモードである $B_s \rightarrow \ell \ell$ と $(2S) \rightarrow \ell \ell$ を中心に研究を行った。

本研究の解析では、ニュートリノを伴って崩壊する τ の扱いが課題である。そのため、カロリメータの残存エネルギー E_{ECL} やレプトン ℓ の運動量などの変数を用いて、信号とバックグラウンドの識別を行う研究を行った。信号を特徴づけるいくつかの変数を探し出し、これらを入力変数としたニューラルネットワークを用いた多変量解析を行った。ニューラルネットワークにはFastBDTというパッケージを用いた。Belleで $(2S)$ のエネルギーで収集された $(2S) \rightarrow \ell \ell$ では、 E_{ECL} の他に消失質量や消失運動量の方向などの情報を加えることにより、効果的にバックグラウンドが抑制され、信号を抽出できることがわかった。図1に得られたFastBDTの出力値の分布を示す。値が1に近いほど信号に近い事象となり、バックグラウンドと信号がうまく分離できていることがわかる。

$B_s \rightarrow \ell \ell$ 解析は $(5S)$ のエネルギーで収集されたデータを用いた解析で、同様のバックグラウンド抑制が必要になるのであるが、そもそも B_s が対で生成されるために、反対側の B_s の情報も用いなければ誤った組み合わせで再構成された事象が膨大なために困難であることがわかった。そこで、反対側の B_s が D_s を伴うセミレプトニック崩壊したことを要求する解析手法(セミレプトニックタグ)を開発した。このような手法を用いた本研究がはじめてである。

これらの解析でも確認されたことであるが、LFV過程の探索においては電子または μ と荷電レプトンの識別能力が、解析の感度に大きく影響する。そこで、Belle II実験における粒子識別能力の改善についての研究を行った。特に、ARICH検出器について τ の崩壊ででてくる荷電粒子の粒子識別性能の向上にむけてのシミュレーション研究や、データによる検出器のキャリブレーションなどを行った。

本研究課題中にBelle II実験は開始し、データの収集が行われたが、研究前に予想したほどはデータが蓄積されなかったこと、 $\Upsilon(4S)$ 共鳴以外のデータは収集されなかったことから、Belle II実験データを用いた研究は、将来の性能向上のための粒子識別の研究などととどめ、Belle II実験のデータを用いた解析を中心に進めることとした。

4. 研究成果

Belle 実験の (5S) のエネルギーで収集された 121 fb^{-1} のデータを用いた $B_s \rightarrow \ell$ 解析では、セミレプトニックタグを用いた手法をもちい、FastBDT によるバックグラウンド抑制を行った結果、図 2 のようなレプトン運動量分布が得られた。 $B_s \rightarrow \ell$ の探索では有意な信号はなく、 $B_s \rightarrow e, \mu$ の分岐比の上限として $1.4 \times 10^{-3}, 7.3 \times 10^{-3}$ を得た。 $B_s \rightarrow e$ の分岐比は本研究が初めての測定である。

また、(2S) のエネルギーで収集された 25 fb^{-1} のデータを用いた (2S) $\rightarrow \ell$ でも有意な信号は見られなかったので、(2S) $\rightarrow \ell$ の分岐比の上限を求めた。この結果は従来の BaBar 実験の結果を更新するものであった。現在、この結果を論文にまとめている途中である。

このほか、(1S) $\rightarrow \ell$ や $B \rightarrow \ell$ 解析などの解析も協力して進めた。いずれのモードでも有意な信号は得られず、多くのモードで従来の測定よりも厳しい分岐比の上限を設定した。研究開始時点と比べれば、かなり多くの LFV 過程を伴った中間子探索を Belle 実験のデータで行うことができた。Belle II 実験のデータを用いた結果を出すところまでは至らなかったが、Belle II のデータを用いた研究も行い、今後の測定につなげることができた。

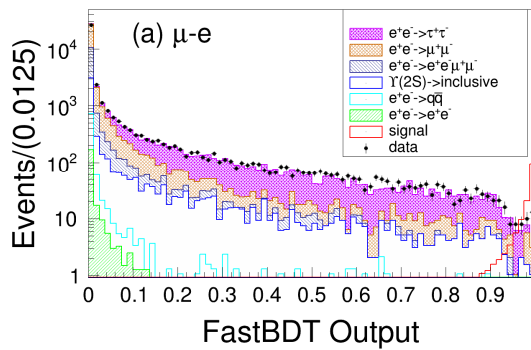


図 1 (2S) $\rightarrow \ell$ 解析での FastBDT の出力値。

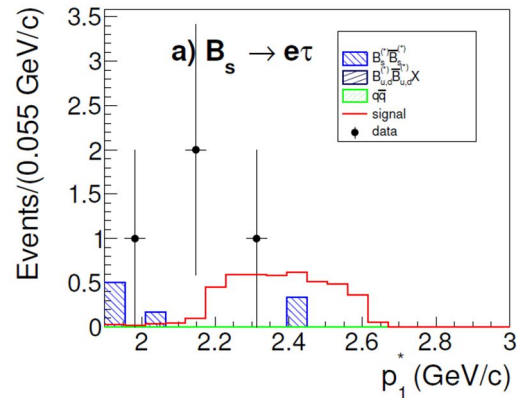


図 2 $B_s \rightarrow e \tau$ 解析でのバックグラウンド抑制後のレプトン運動量分布。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S. Patra et. al. (Belle Collaboration)	4. 巻 5
2. 論文標題 Search for charged lepton flavor violating decays of Upsilon(1S)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 95
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP05(2022)095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Egede Ulrik, Nishida Shohei, Patel Mitesh, Schune Marie-Helene	4. 巻 72
2. 論文標題 Electroweak Penguin Decays of b-Flavored Hadrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annual Review of Nuclear and Particle Science	6. 最初と最後の頁 283-305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1146/annurev-nucl-102020-092535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 H. Atmacan et. al. (Belle Collaboration)	4. 巻 104
2. 論文標題 Search for $B_0 \rightarrow \tau l$ ($l=e, \mu$) with a hadronic tagging method at Belle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 L091105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.L091105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Choudhury et. al. (Belle Collaboration)	4. 巻 2021
2. 論文標題 Test of lepton flavor universality and search for lepton flavor violation in $B \rightarrow K^{*} \ell \ell$ decays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 105(1-19)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP03(2021)105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Sandilya et. al. (Belle Collaboration)	4. 巻 98
2. 論文標題 Search for the lepton-flavor-violating decay $B_0 \rightarrow K^*0 \mu^\pm e^\mp$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 71101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.071101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計5件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Shohei Nishida
2. 発表標題 Flavor Physics and the Belle II Experiment
3. 学会等名 International Conference on the Physics of the Two Infinities (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Nishida
2. 発表標題 Operation and Performance of Belle II Aerogel RICH Counter
3. 学会等名 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田昌平
2. 発表標題 CKM and CP Constraints from B-Decays
3. 学会等名 XXIX International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (Lepton Photon 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西田昌平
2. 発表標題 CKM physics at e+e- colliders
3. 学会等名 10th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今野智之
2. 発表標題 The Aerogel Ring Image Cherenkov counter for particle identification in the Belle II experiment
3. 学会等名 TIPP2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------