

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H00682

研究課題名（和文）Belle II実験で探るタウレプトンフレーバ構造

研究課題名（英文）Study of the structure for tau lepton flavor on Belle II

研究代表者

早坂 圭司（Hayasaka, Kiyoshi）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：40377966

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,300,000円

研究成果の概要（和文）：現在進行中のBelle II実験において、効率よくタウレプトン対事象をデータから抜き出してくる（スキム）ための一般的なタウレプトン対事象選別条件を決定し、効率的なデータ解析を実現した。また、レプトン識別効率の高精度な系統誤差を行った。これらの成果を基にタウレプトン質量の測定やタウレプトンのフレーバ保存則を破る崩壊過程の探索を行った。またBelle実験データを用いて、新しい解析手法を開発し、軽いレプトンと光子、または中性ベクトル中間子を含むフレーバ保存則を破る崩壊過程の探索を行い世界最高感度の結果を得た。同様にタウレプトンの電気双極子モーメントの測定も先行実験より一桁高い感度で遂行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強い相互作用に関わる素粒子過程に強いLHC実験において新物理が長らく発見されないことにより、強い相互作用に関わらないレプトンに新物理の糸口を求める期待が高まってきている。本研究により、レプトンフレーバを破る過程や、タウレプトンの電子双極子モーメントの存在に対する制限が1桁強まり、許される新物理のパラメータ領域を制限することに成功した。また、これから大量のデータを取得予定のBelle II実験においてデータ解析を遂行する上で有効な手法や効率的な環境の開発等に成功し、今後さらなる研究の進展が期待できる状況を作ることができた。

研究成果の概要（英文）：In the ongoing Belle II experiment, we have succeeded in realizing efficient data analysis by determining the selection (skim) criteria to pick up tau lepton events from the data. In addition, we have performed the evaluation of a highly accurate systematic uncertainty for lepton ID efficiency. Based on these results, we have measured tau lepton masses and searched for tau lepton decay processes violating the flavor conservation law. On the other hand, utilizing the Belle data, we have also developed a new analytical method to search for tau decays violating flavor conservation law into light leptons and photons or neutral vector mesons, and have achieved the world's most sensitive results. Similarly, we have measured the electric dipole moment of tau leptons with an order of magnitude higher sensitivity than the previous experiment.

研究分野：素粒子実験物理学

キーワード：タウレプトン フレーバ物理 LFV CPV

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用が関わる素粒子過程に強い LHC 実験において新物理が長らく発見されないことにより、強い相互作用が関わらないレプトンに新物理の糸口を求める期待が高まってきていて、特に 1 番質量の重いタウレプトンは新物理の探査針としての役割を非常に高く期待されている。2010 年まで稼働していた Belle 実験は世界最高統計量のタウレプトンデータを取得済みで、その 50 倍の 2019 年に Belle II 実験は本格的なデータ取得が開始予定で、タウレプトン崩壊過程の物理解析、特に新物理探索においては Belle II 実験の独壇場になると期待されていた。

2. 研究の目的

Belle II 実験のデータを用いて素粒子標準模型では禁止されていて、未発見の過程である、タウレプトンの崩壊においてレプトンフレーバ保存則を破る過程 (l -Lepton Flavor Violation; LFV), CP 保存則を破るタウレプトン崩壊過程 (l -CP Violation; CPV) を探索し、世界最高精度で荷電レプトンフレーバの構造を明らかにすることにある。 l -LFV の研究は、荷電レプトン混合の情報を、 l -CPV の研究は、荷電レプトン CP 非保存相の情報を与えてくれる。このような情報は、ほぼ全て Belle II 実験データ解析を通して得ることが可能となっている。(ごく一部の情報は他の実験からも得られるが感度は Belle II 実験の方が高いと期待される) これらの情報から現在知られている素粒子標準模型を超えた新しい物理模型に迫ることができる。

3. 研究の方法

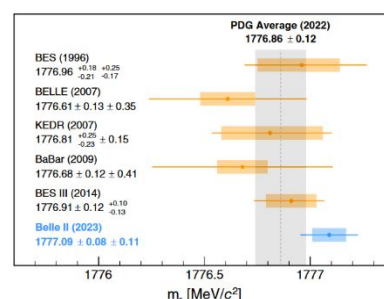
Belle II 実験のデータ解析を通して新物理探索を行う。データを正しく解析するためには、粒子識別など検出器の性能の理解と、信号検出効率の評価や背景事象理解に用いられるシミュレーションによる擬似データ(MC)の理解が先んじて必要となる。(2019 年当時) データ取得が始まったばかりの Belle II 実験ではこれらの理解が不足しているため、タウレプトンのデータ解析で必要不可欠となるレプトン識別に対する理解と系統誤差の評価を中心的に進める。また並行して、タウレプトンの事象の解析を効率的に進めるためのタウ事象スキムの開発を行う。初年度はまだ十分にデータが収集できていないので、先行実験である Belle 実験のデータを活用して、データ解析の方法を開発していく。特に $l = e, \mu$ のような光子を最終状態に含む過程は Belle II 実験の高度化により、Belle 実験の場合よりも偽光子が増加されると考えられるので、力学的な方法で偽光子による背景事象を効率的に棄却する方法を開発する必要がある。ある種の CP を破る起源となるタウレプトンの電子双極子モーメントの測定では、MC の高度な理解に加えて、系統誤差の起源と感度への影響の深い理解が要求される。

4. 研究成果

(1) Belle II 実験において、効率よくタウレプトン事象を収集されたデータから抜き出してくる (スキム) ための一般的なタウレプトン対事象選別条件を決定し、効率的なデータ解析を実現した。Belle II 実験ではタウレプトンは対生成されるため、タウレプトン対事象となる。知られている素粒子標準模型に従った崩壊を 70% 以上残しつつ、主要な背景事象を 10% 以下まで低減することに成功し Belle II 実験の公式スキムとして採用された。

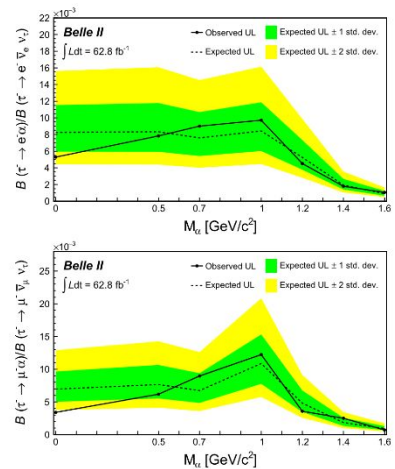
(2) Belle II 実験において 2 光子過程、dimuon 過程、Bhabha 過程、 J/ψ 崩壊過程などの様々な過程を使ってレプトン識別効率の高精度な系統誤差を行った。評価を行う過程でいくつかの問題点 (未発見の不感領域やソフトウエアのバグ) を発見し、感度向上に貢献し、従来の数倍の精度での検出効率の評価に成功し、運動量と仰角に対する系統誤差のテーブルを作成した。これにより、例えばレプトンユニバーサルリティの評価が高精度で行えるようになった。

(3) Belle II 実験のデータ中の τ 崩壊過程を用いてタウレプトン質量の測定を行った。素粒子標準模型に従ったタウレプトン崩壊では必ず最終状態にニュートリノを伴うため、タウレプトンは完全再構成が不可能である。このため、タウレプトン崩壊を用いたタウレプトン質量測定では ARGUS 実験で開発された擬質量法と呼ばれる方法が使われる。この方法では、衝突エネルギーの精度と、運動量測定精度が質量の測定精度に影響するので、高精度質量測定実現のため、衝突毎の衝突エネルギーの揺らぎの較正を行い、運動量測定の精度の評価など、様々な工夫を行った。この結果、小統計ながらも世界最高精度でのタウレプトン質量の測定を達成した。



過去のタウレプトン質量の測定結果の比較。水色が今回の測定

(4) Belle II 実験のデータを用いて検出器では観測されない中性ボソン粒子と軽いレプトンへと崩壊するタウレプトンのレプトンフレーバ保存則を破る崩壊過程の探索を行った。約40年ぶりの測定で、発見には至らなかったが世界最高感度の測定を達成した。この測定では、信号崩壊は2体崩壊であるため、タウレプトンの静止系では軽いレプトンの運動量が一定になることを信号抽出に利用する。しかし、タウレプトンは完全再構成できないため、擬似タウレプトン静止系を利用する。具体的には信号崩壊を起こさない生成されたもう片方のタウレプトン崩壊で重い質量のハドロン崩壊を選択し、この重いハドロンの運動方向がタウレプトンの運動方向に近似できるという仮定を利用する。最大の背景事象であるタウレプトンのレプトニック崩壊の理解と、精度よくタウレプトン方向を評価することがこの解析の鍵となる。

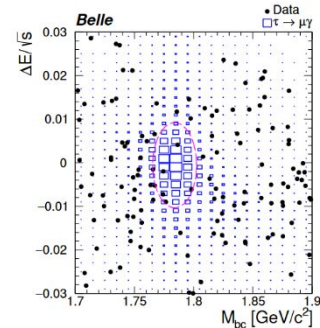


中性ボソン粒子と軽いレプトンへと崩壊するタウレプトンのレプトンフレーバ保存則を破る崩壊過程の感度。上段がμ、下段が電子に対応する。

I. Adachi et al. (Belle II Collaboration), Search for Lepton-Flavor-Violating τ Decays to a Lepton and an Invisible Boson at Belle II, Phys. Rev. Lett. 130, 181803

残念ながら研究期間中に期待される程度のデータ量が Belle II 実験では取得できなかったため、Belle 実験データを用いて、いくつかの解析を行った。

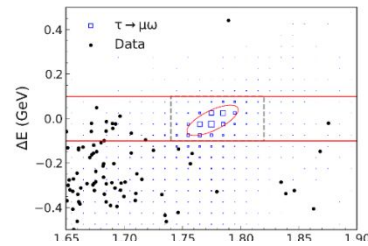
(5)レプトンフレーバ保存則を破るタウレプトン崩壊で新物理過程として最も期待されている過程は、タウレプトンが光子と軽いレプトンへと崩壊する過程である。Belle 実験で収集された全てのデータを用いてこの過程を探索した。高い衝突頻度の加速器では偽光子が観測されやすいため、偽光子に起因した背景事象が現れやすい。Belle II 実験での探索を想定して力学的な関係式を用いて偽光子に起因した背景事象を効率的に棄却する新しい解析手法を開発した。軽いレプトンがμに場合について世界最高感度の探索を達成した。



軽いレプトンがμの場合の、事象選別後のデータの分布。四角はシミュレーションによる信号事象の密度を表す。

K. Uno, K. Hayasaka, K. Inami et al. (Belle Collaboration), Search for lepton-flavor-violating tau-lepton decays to l at Belle, J. High Energy. Phys. 2021, 19 (2021).

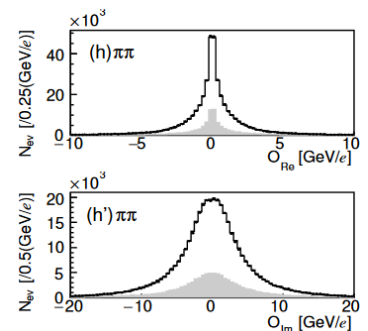
(6) Belle 実験で収集された全てのデータを用いてレプトンフレーバ保存則を破るタウレプトン崩壊で軽いレプトンと中性ベクトル中間子へと崩壊する過程の探索を行った。レプトクォークは近年レプトンユニバーサル性の破れとして注目されている $B \rightarrow D^{(*)}$ 過程を説明する粒子として高い関心が寄せられているモデルであるが、この過程はレプトクォークによって引き起こされ得る過程であるため、レプトンフレーバ保存則を破るタウレプトン崩壊の中でも近年注目を集めている。高感度を得るため機械学習による手法が導入され、その結果として世界最高感度での探索に成功した。



μ 過程の事象選別後のデータの分布。四角はシミュレーションによる信号事象の密度を表す。

N. Tsuzuki, K. Inami et al. (The Belle collaboration) Search for lepton-flavor-violating decays into a lepton and a vector meson using the full Belle data sample, J. High Energy. Phys. 2023, 118 (2023).

(7) Belle 実験のデータを用いてタウレプトンの電気双極子モーメント (EDM) の測定も先行実験より一桁高い感度で遂行した。感度と系統誤差の関係を理解し、Belle II 実験のような大統計による測定にも対応できる高感度 EDM 測定のノウハウを確立した。



両方のタウレプトンが崩壊した場合の、高感度測定値の分布。形の歪みが EDM を表すが歪みはほぼ見えない。

K. Inami, K. Hayasaka et al. (The Belle collaboration), An improved search for the electric dipole moment of the lepton, J. High Energy. Phys. 2022, 110 (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 K.Uno	4. 巻 ICHEP2022
2. 論文標題 Tau physics at Belle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 721-1, 721-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 K. Uno, K.Hayasaka, K.Inami, et. al. (The Belle collaboration)	4. 巻 2021
2. 論文標題 Search for lepton-flavor-violating tau-lepton decays to l at Belle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP10(2021)019	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 Konno Tomoyuki	4. 巻 369
2. 論文標題 Tau LFV and LNV at Belle II	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.369.0089	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 K.Inami, K.Hayasaka et al. (Belle collaboration)	4. 巻 2022
2. 論文標題 An improved search for the electric dipole moment of the lepton	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP04(2022)110	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 N.Tsuzuki, K.Inami et al. (Belle collaboration)	4. 巻 2023
2. 論文標題 Search for lepton-flavor-violating decays into a lepton and a vector meson using the full Belle data sample	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2023)118	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 I.Adachi et al. (Belle II Collaboration)	4. 巻 130
2. 論文標題 Search for Lepton-Flavor-Violating Decays to a Lepton and an Invisible Boson at Belle II	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 181803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.181803	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 I.Adachi et al. (Belle II Collaboration)	4. 巻 108
2. 論文標題 Measurement of the τ -lepton mass with the Belle II experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 32006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.032006	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

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Kenta Uno
2. 発表標題 Tau physics at Belle
3. 学会等名 41st International Conference on High Energy physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Uno
2. 発表標題 Operation and performance of the Belle II Aerogel RICH detector
3. 学会等名 11th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kiyoshi Hayasaka
2. 発表標題 Tau EDM/MDM results and prospects
3. 学会等名 XV International Conference on Heavy Quarks and Leptons (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Inami
2. 発表標題 Measurement of the tau EDM and other properties at Belle
3. 学会等名 16th International Workshop on Tau Lepton Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenta Uno
2. 発表標題 Search for tau LFV/LNV decays at Belle
3. 学会等名 16th International Workshop on Tau Lepton Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiyoshi Hayasaka
2. 発表標題 Closing Remarks
3. 学会等名 16th International Workshop on Tau Lepton Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Inami
2. 発表標題 Tau physics prospects at Belle II
3. 学会等名 the 40th International Conference on High Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇野健太、早坂圭司、他BelleCollaboration
2. 発表標題 Belle実験の全データにおけるタウ粒子崩壊を用いた荷電レプトンフレーバーの破れの探索
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇野健太、他 Belle Collaboration
2. 発表標題 Belle 実験の全データを用いた $B \rightarrow D^{*} \tau \nu$ の探索感度評価
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇野健太
2. 発表標題 tau physics
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Konno for the Belle II collaboration
2. 発表標題 Tau LFV and LNV at Belle II
3. 学会等名 THE 21ST INTERNATIONAL WORKSHOP ON NEUTRINOS FROM ACCELERATORS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Inami
2. 発表標題 Status and prospects of measuring Electric Dipole Moment of tau lepton
3. 学会等名 17th International Workshop on Tau Lepton Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kiyoshi Hayasaka
2. 発表標題 Overview of Tau Physics
3. 学会等名 17th International Workshop on Tau Lepton Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究 分担者	居波 賢二 (Inami Kenji) (50372529)	名古屋大学・理学研究科・准教授 (13901)	
研究 分担者	今野 智之 (Konno Tomoyuki) (60751518)	北里大学・理学部・助教 (32607)	

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
---------	---------