

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2018～2022

課題番号：18KK0085

研究課題名（和文）ナノ精度飛跡検出器によるタウニュートリノ生成研究

研究課題名（英文）Study of tau-neutrino production with a nanometre-precision tracker

研究代表者

有賀 智子（古川）（Ariga, Tomoko）

九州大学・基幹教育院・助教

研究者番号：00802208

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000円

研究成果の概要（和文）：タウニュートリノ反応断面積測定における最大の不定性であるタウニュートリノの生成について、CERNの加速器による400GeV陽子ビームを用いた研究を実施してきた。CERNでの陽子ビーム照射実験、精密測定手法の開発、データ解析などを行う国際共同研究グループを形成し、CERNにおける暗室ファシリティをベルン大学グループなどと協力して構築した。2021-2022年のビーム照射実験およびデータ解析を、CERN、トルコ、ロシア、ルーマニアの研究者と協力して、国際共同研究にて実施した。また、検出器サイズ、ビーム照射システムの大型化を遂行し、検出器の運用およびデータ読み出しの高速化/効率化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3世代あるニュートリノの中で電子ニュートリノ・ミューニュートリノが非常によく調べられているのに対して、タウニュートリノはあまり調べられていない粒子である。タウニュートリノ反応断面積を精密に測定することは、ニュートリノ実験や宇宙ニュートリノ観測のための基礎データになるとともに、タウニュートリノ-原子核反応において標準理論を超える物理があるかどうかを探索する試みである。タウニュートリノの生成源であるDs中間子の微分生成断面積は陽子ビームを用いた固定標的実験では測定されておらず、本研究をもとに初測定を行い、将来実験に活かす。

研究成果の概要（英文）：A precise measurement of the tau neutrino cross section would enable a search for new physics effects, such as testing the Lepton Universality of Standard Model in neutrino interactions. The largest uncertainty in such cross-section measurements is due to a lack of data on the tau neutrino production or Ds differential production. We aim to measure an inclusive differential cross-section of Ds production in p-A interactions, detecting consecutive Ds to tau lepton to X decays which are the source of tau neutrinos. We formed an international collaboration for this research. We designed and produced the detector based on the nuclear emulsion, providing a sub-micron spatial resolution for the detection of short-length and small kink decays, such as Ds to tau to X decays. We successfully performed the beam-exposure experiments at CERN in 2021 and 2022 and are progressing with the analysis.

研究分野：素粒子実験

キーワード：タウニュートリノ Ds中間子

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者・分担者は、世界で初めてタウニュートリノを検出した DONuT 実験において主要な貢献を行い、タウニュートリノ反応断面積の初測定にも取り組んだ。しかし、タウニュートリノの生成源である  $D_S$  中間子の微分生成断面積の実験データが不足していたために非常に大きな不定性 (~50%) を伴った。タウニュートリノ反応断面積測定のためには、タウニュートリノ生成を研究してその不定性を減らすことが不可欠である。代表者は、タウニュートリノの生成を測定する計画を提案し、その測定結果を用いて、将来的にタウニュートリノを高統計で調べる実験での反応断面積測定の精密測定を行うことを考えた。

3 世代あるニュートリノの中で電子ニュートリノ・ミューニュートリノが非常によく調べられているのに対して、タウニュートリノはあまり調べられていない粒子である[1]。タウニュートリノ反応断面積を精密に測定することは、ニュートリノ実験や宇宙からのタウニュートリノ観測のための基礎データになるとともに、タウニュートリノ-原子核反応において標準理論を超える物理があるかどうかを探索する試みである。素粒子標準模型における基本的仮定であるレプトン普遍性の検証については崩壊モードにおいてよくなされているが、第 3 世代のクォーク・レプトン間の新物理の探索として実験的に多方向からアプローチすることが重要であると考えた。

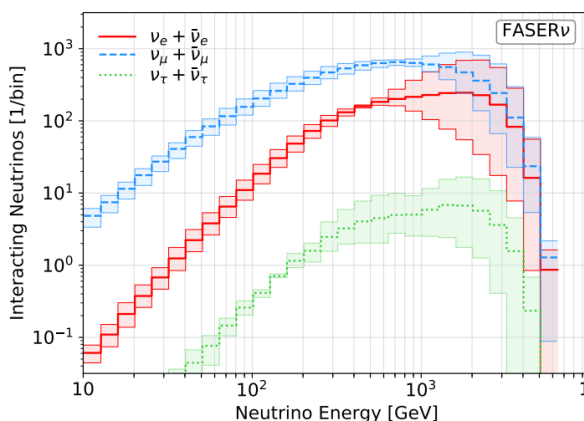


図 1. 例として CERN-LHC でのニュートリノ実験で期待されるタウニュートリノ反応数の推定 (緑色の線)。幅は event generator による推定の違いを示している。

### 2. 研究の目的

タウニュートリノ反応断面積測定は、高エネルギー陽子反応で生成されるタウニュートリノフラックスの推定と、タウニュートリノ反応の検出から成る。ここで、タウニュートリノの生成源である  $D_S$  中間子の微分生成断面積が陽子ビームを用いた固定標的実験では測定されていないことが反応断面積測定において最大の不定性になっており、タウニュートリノの生成についての研究が不可欠である。また、超前方領域においては ( $D_S$  中間子を含め) チャーム粒子の微分生成断面積が固定標的実験に限らず測定されておらず、図 1 に示すようにチャーム粒子を起因とするタウニュートリノおよび電子ニュートリノの期待値に大きな不定性がある。本研究では、タウニュートリノビーム生成の不定性を 10% 以下に減らすため、生成源である  $D_S$  中間子の微分生成断面積を 400 GeV 陽子ビームに対して初めて測定する[2]。この実験は現在計画されている実験の中で最も精度がよく、この測定結果を用いて将来的にタウニュートリノ-原子核反応における新物理の効果を探索することを目指す。また、この国際共同研究を通して、グループ間のネットワークおよび最新のエマルジョン検出器技術を構築し、他の将来実験にも応用することを目指す。

### 3. 研究の方法

タウニュートリノの生成について CERN 加速器 SPS による陽子ビームを用いて研究する。CERN での陽子ビーム照射実験、精密測定手法の開発、データ解析などを遂行するため国際共同研究グループを形成した。2021 年および 2022 年に、日本でエマルジョンフィルムを製造して CERN に輸送し、検出器を構築し、照射実験を行った。その中で、CERN にて検出器の運用に必要な暗室ファシリティを立ち上げ、ベルン大学グループなどと協力してエマルジョン検出器の組み立ておよび現像の体制を整えた。また、エマルジョンフィルムのサイズをパイロットランの 4 倍にし、ビーム照射システムの大型化[3]を遂行して、検出器の組み立て・ビーム照射・現像・



図 2. 陽子ビーム照射実験後の写真

データ読み出しの高速化/効率化を実現した。ビーム照射実験での検出器の組み立て、照射、現像については、CERN の協力者、ロシアやトルコ、ルーマニアのグループなどと協力して国際共同研究にて実施した (図 2)。現像したフィルムは日本へ輸送してデータ読み出しを実施し、膨大なデータ処理のさらなる高速化に取り組んでいる。

#### 4. 研究成果

現像したフィルムは日本へ輸送してデータ読み出しを実施し、膨大なデータ処理のさらなる高速化に取り組んでいる。タウニュートリノの生成源である  $D_S$  中間子のタウ粒子への崩壊は、数 mm という短い飛距離での数 mrad という微小な折れ曲がりの特徴とする (図 3)。本研究では、 $D_S$  中間子の検出方法としてこの微小な折れ曲がりをつかえるため、50 nm という高い 3 次元位置精度を持つエマルジョン検出器を用いて高精度での角度測定の開発を進めてきた。高密度の飛跡を用いてフィルム間の精密なアライメントを取ることが可能であり、複数枚のフィルムにおける飛跡の位置情報を用いて角度を測定することにより、飛距離が長い事象に対し高い角度精度を実現できることを確認した (図 4)。

崩壊角の小さい超前方成分についてさらに感度のよい測定を実現するため、運動量測定手法の改良による背景事象の削減に取り組んでいる。

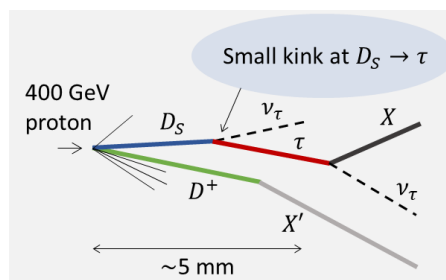


図 3. タウニュートリノの生成源である  $D_S$  中間子のタウ粒子への崩壊のトポロジー

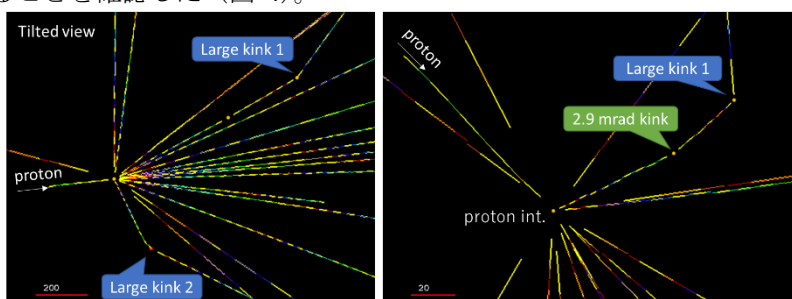


図 4. 微小な折れ曲がりの特徴とする崩壊候補の検出

[1] Roshan Mammen Abraham, Tomoko Ariga, et al. (alphabetical order), “Tau neutrinos in the next decade: from GeV to EeV”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 49, 110501, 2022.

[2] Shigeki Aoki, Akitaka Ariga, Tomoko Ariga, et al. (alphabetical order), “DsTau: study of tau neutrino production with 400 GeV protons from the CERN-SPS”, J. High Energ. Phys. 2020, 33, 2020.

[3] Shigeki Aoki, Akitaka Ariga, Tomoko Ariga, Toranosuke Okumura, et al. (alphabetical order), “Development of proton beam irradiation system for the NA65/DsTau experiment”, accepted for publication in JINST, 2023.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shigeki Aoki, Akitaka Ariga, Tomoko Ariga, et al. (alphabetical order)	4. 巻 2020
2. 論文標題 DsTau: study of tau neutrino production with 400 GeV protons from the CERN-SPS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)033	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 Tomoko Ariga	4. 巻 -
2. 論文標題 Study of tau-neutrino production at the CERN SPS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS (ICHEP2018)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.340.0240	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 Roshan Mammen Abraham, Tomoko Ariga, et al. (alphabetical order)	4. 巻 49
2. 論文標題 Tau neutrinos in the next decade: from GeV to EeV	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 110501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/ac89d2	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 Shigeki Aoki, Akitaka Ariga, Tomoko Ariga, Toranosuke Okumura, et al. (alphabetical order)	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of proton beam irradiation system for the NA65/DsTau experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JINST (accepted for publication)	6. 最初と最後の頁 -
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 該当する

[学会発表] 計11件(うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 佐藤修, 小松雅宏, 中野敏行, 六條宏紀, 臼田育矢, 有賀智子, 吉本雅浩, 吉田純也, 有賀昭貴, 奥井一暁, 奥村虎之介, 金井巧, 三浦真登
2. 発表標題 タウニュートリノ生成研究DsTau実験(CERN NA65)報告
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥村虎之介, 有賀昭貴, 奥井一暁, 金井巧, 三浦真登, 佐藤修, 小松雅宏, 中野敏行, 六條宏紀, 臼田育矢, 有賀智子, 吉本雅浩, 吉田純也
2. 発表標題 NA65/DsTau実験2021年ランの準備状況
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤修, 有賀昭貴, 有賀智子, 早川大樹, 金井巧, 小松雅宏, 三浦真登, 中野敏行, 奥井一暁, 奥村虎之介, 六條宏紀, 吉田純也, 吉本雅浩
2. 発表標題 400GeV陽子反応によるタウニュートリノ生成研究 NA65/DsTau2018年・2021年データ解析状況
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三浦真登, 有賀昭貴, 有賀智子, 早川大樹, 金井巧, 小松雅宏, 佐藤修, 中野敏行, 奥井一暁, 奥村虎之介, 六條宏紀, 吉田純也, 吉本雅浩
2. 発表標題 NA65/DsTau実験 2021年物理ランの報告
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有賀智子
2. 発表標題 Neutrinos at CERN
3. 学会等名 29th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤修, 小松雅宏, 中野敏行, 六條宏紀, 有賀智子, 吉本雅浩, 吉田純也, 有賀昭貴
2. 発表標題 タウニュートリノ生成研究DsTau実験(CERN NA65)の物理ラン準備状況
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤修, 小松雅宏, 中野敏行, 六條宏紀, 有賀智子, 吉本雅浩, 吉田純也, 有賀昭貴
2. 発表標題 NA65/DsTau実験2018年ランにおけるチャーム解析と2021年ランでの物理と展望
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 DsTau実験におけるタウニュートリノ生成研究 - パイロットランの解析 -
2. 発表標題 佐藤修, 小松雅宏, 中野敏行, 六條宏紀, 有賀智子, 吉本雅浩, 吉田純也, 有賀昭貴
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤修, 小松雅宏, 六條宏紀, 中野敏行, 有賀智子, 有賀昭貴, 吉本雅浩 他 DsTau collaboration
2. 発表標題 400GeV陽子ビームダンプによるタウニュートリノ生成研究 (DsTau実験) の現状報告
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥村虎之介, 有賀昭貴, 早川大樹, 奥井一暁, 金井巧, 三浦真澄, 久下謙一, 佐藤修, 小松雅宏, 中野敏行, 六條宏紀, 臼田育矢, 有賀智子, 吉本雅浩
2. 発表標題 NA65/DsTau実験2021年ランの報告と2022ランの準備状況
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤修, 有賀昭貴, 有賀智子, 早川大樹, 久下謙一, 三浦真登, 中野敏行, 奥村虎之介, 六條宏紀, 牛久保文斗, 吉本雅浩
2. 発表標題 400GeV陽子衝突反応によるタウニュートリノ生成研究 NA65/DsTau
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
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	小松 雅宏  (Komatsu Masahiro)  (80345842)	名古屋大学・教養教育院・准教授   (13901)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	佐藤 修  (Sato Osamu)  (20377964)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任准教授    (13901)	
研究分担者	吉田 純也  (Yoshida Junya)  (60573186)	東北大学・理学研究科・助教    (11301)	
研究分担者	吉本 雅浩  (Yoshimoto Masahiro)  (40854964)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・特別研究員    (82401)	

## 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			
スイス	University of Bern			
トルコ	Middle East Technical University			
ルーマニア	Institute of Space Science			
ロシア連邦	Joint Institute for Nuclear Research			