

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01909

研究課題名（和文）LHC陽子衝突点超前方における高エネルギーニュートリノ研究

研究課題名（英文）Study of high-energy neutrinos at the LHC

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） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、世界最大・最高エネルギーの衝突型加速器LHCを用いて未開拓の高エネルギー領域でのニュートリノ研究が可能なることを見出し、LHCでのニュートリノ実験を初めて立ち上げました（FASERnu）。2018年に実施したパイロットランのデータ解析において膨大な背景事象の中での再構成手法を開発し、史上初めてLHCからのニュートリノ反応候補の観測に成功しました。それとともに、2022-2025年の本格的な実験に向けてFASERnuニュートリノ検出器の構築を実現しました。2022年3月には最初のインストールを成功させ、今後の高エネルギーニュートリノ測定への道筋をつけました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでコライダー実験とニュートリノ実験は別々の研究領域としてみなされてきました。本研究の結果は両者のシナジーを生み、今後のコライダーを用いた高エネルギーニュートリノ実験への道を拓くものです。2022-2025年には本研究で構築してきたニュートリノ検出器を用いて本格的な実験を行い、高エネルギーニュートリノ測定を実施します。本研究の成果は、その後の2027年頃からの高輝度LHCにおいて計画中の新しいプラットフォームForward Physics Facility構想の基礎でもあり、未知粒子探索、高エネルギーニュートリノ研究、ハドロン研究、宇宙物理にまたがる超前方研究の発展につながります。

研究成果の概要（英文）：Although there has been a longstanding interest in studying high-energy neutrinos produced at the Large Hadron Collider (LHC), collider neutrinos were not directly detected. In this research, we have established a new experiment to detect these neutrinos in the uncharted energy region and investigate their properties for the first time. By analyzing the data of the 2018 pilot detector installed 480-m downstream of the proton-proton interaction point, we observed the first neutrino interaction candidates at the LHC, opening a new avenue for studying neutrinos from current and future high-energy colliders. In parallel, we have established the FASERnu neutrino detector, ready for the physics runs from 2022.

研究分野：素粒子実験

キーワード：高エネルギーニュートリノ ニュートリノ反応 LHC

### 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノは、極端に小さな質量を持ち世代間で大きく混合しているなど異質な存在です。未だ謎が多く、未知の枠組みの解明への手がかりとなることが期待されています。1GeV 程度のニュートリノを研究する大型のハイパーカミオカンデ計画が進行中ですが、一方で 1TeV (1000GeV) 程度の高エネルギー領域でのニュートリノ研究は未開拓であり、衝突型加速器 (コライダー) からのニュートリノはこれまでに直接観測されたことがありませんでした。

本研究では、欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロンコライダー (LHC) を用いて未開拓の高エネルギー領域でのニュートリノ研究が可能なることを見出し、LHC でのニュートリノ実験を初めて立ち上げました (FASER $\nu$ ) [1]。研究代表者は FASER $\nu$  の共同プロジェクトリーダーに就任し、本研究を国際共同研究により推進してきました。

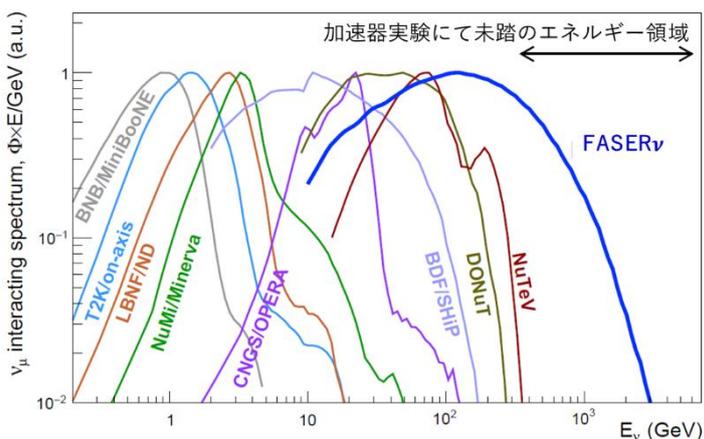


図 1. FASER $\nu$  で測定予定のエネルギー領域 (青い線) とこれまでの研究で測定されてきたエネルギー領域 (その他の色の線)。横軸はニュートリノのエネルギー、縦軸は 1GeV あたりのニュートリノ反応数を規格化したものを示しています。FASER $\nu$  は黒い矢印で示した高エネルギー領域にて加速器実験として史上初の測定を行います。

### 2. 研究の目的

現在の加速器によって生成できる最高エネルギーのニュートリノを研究し、未知の高エネルギー領域において 3 種類のフレーバーのニュートリノに素粒子標準理論を超えた物理の影響があるかを検証することを目指しています。

### 3. 研究の方法

本実験では、LHC 陽子・陽子衝突点からビーム軸上約 480m離れたトンネル内にタングステン/エマルジョン検出器と FASER スペクトロメータとの接続を可能にするためのインターフェースシリコン検出器・veto 検出器を設置し、3 世代ニュートリノの検出に取り組みます。本研究では、高エネルギーニュートリノ研究に向けた検出器の研究開発・構築およびニュートリノ反応点探索のための解析手法の開発を実施しました。

まずは、パイロットランとして 2018 年に実施した小型のニュートリノ検出器のデータ解析に取り組みました。ニュートリノは LHC の陽子・陽子衝突で生じる様々な粒子の崩壊によって生じますが、反応する確率は非常に小さいです。約 2000 万本ものミュオン飛跡が検出器に記録されたのに対し期待されたニュートリノ反応は 10 事象程度でした。膨大な背景事象を処理するために高い飛跡密度での飛跡および反応点の再構成アルゴリズムの技術開発を行い、ニュートリノ反応候補の探索を行いました。さらに、粒子の角度情報など幾何学的パラメータを用いた多変数解析により背景事象の分別を行い、LHC におけるニュートリノ反応候補の初検出を実現しました。この結果は研究代表者が責任著者として論文にまとめ発表しました [2]。

並行して、2022 年からの本格的な実験に向けて、エマルジョンフィルムの製造、タングステン標的の品質チェック、支持構造物のデザイン・製造、CERN での組み立てなどを行い、2022 年 3 月に物理ランで最初のインストールを成功させました。

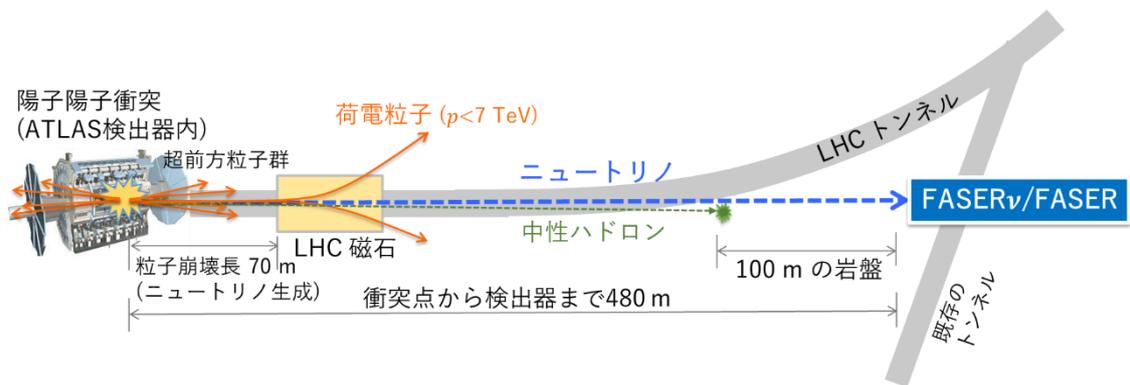


図 2. LHC の陽子・陽子衝突点と FASER  $\nu$  検出器の設置位置。

#### 4. 研究成果

本研究では、LHC を用いて未開拓の高エネルギー領域でのニュートリノ研究が可能であることを見出し、LHC でのニュートリノ実験を初めて立ち上げました。2018 年パイロットランの解析においては、史上初めて世界最大・最高エネルギーのコライダーLHC からのニュートリノ反応候補の観測に成功しました。また、2022-2025 年に予定している本格的な実験に向けて検出器を構築し、高エネルギーニュートリノ測定への道筋をつけました。

これまでコライダー実験とニュートリノ実験は別々の研究領域としてみなされてきました。本研究は両者のシナジーを生み、今後のコライダーを用いた高エネルギーニュートリノ実験への道を拓くものです。本研究の成果は、その後の 2027 年頃からの高輝度 LHC において計画中的の新しいプラットフォーム Forward Physics Facility 構想についても後押しし、未知粒子探索、高エネルギーニュートリノ研究、ハドロン研究、宇宙物理にまたがる超前方研究の発展につながります。

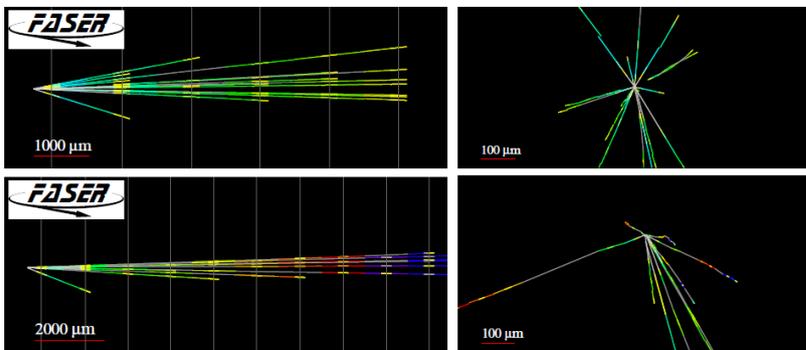


図 3. LHC にて初観測したニュートリノ反応候補のうちの 2 例。左側の図は左から、右側の図は紙面に垂直な方向からビームが来ています。各線分は反応で生じた粒子の飛跡を表しています。

[1] A. Ariga (主要著者), T. Ariga (主要著者), F. Kling (主要著者), 全 47 名 (アルファベット順), Detecting and Studying High-Energy Collider Neutrinos with FASER at the LHC, Eur. Phys. J. C 80 (2020) 61.

[2] T. Ariga (責任著者), 全 75 名 (アルファベット順), First neutrino interaction candidates at the LHC, Phys. Rev. D 104 (2021) L091101.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 H. Abreu, T. Ariga (corresponding author), et al. (alphabetical order)	4. 巻 104
2. 論文標題 First neutrino interaction candidates at the LHC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 L091101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.L091101	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. Abreu, A. Ariga, T. Ariga, F. Kling, et al. (alphabetical order)	4. 巻 80
2. 論文標題 Detecting and studying high-energy collider neutrinos with FASER at the LHC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-7631-5	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 L.A. Anchordoqui, A. Ariga, T. Ariga, et al.	4. 巻 968
2. 論文標題 The Forward Physics Facility: Sites, experiments, and physics potential	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Reports	6. 最初と最後の頁 1-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physrep.2022.04.004	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 T. Ariga	4. 巻 -
2. 論文標題 Measuring three-flavor neutrinos with FASERnu at the LHC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 accepted for publication in SciPost Physics Proceedings	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 -

1. 著者名 T. Ariga	4. 巻 248
2. 論文標題 Measuring TeV neutrinos with FASERnu in LHC Run 3	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PoS(EPS-HEP2021)	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) 10.22323/1.398.0248	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 T. Ariga	4. 巻 409
2. 論文標題 Study of high-energy neutrinos in the FASER experiment at the LHC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PoS (EPS-HEP2019)	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) 10.22323/1.364.0409	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 -

[学会発表] 計14件(うち招待講演 1件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 有賀智子
2. 発表標題 Measuring TeV neutrinos with FASERnu in the LHC Run-3
3. 学会等名 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有賀智子
2. 発表標題 Measuring three-flavor neutrinos with FASERnu at the LHC
3. 学会等名 16th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有賀智子
2. 発表標題 Detecting and studying high-energy neutrinos with FASERnu at the LHC
3. 学会等名 2021 Phenomenology Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有賀智子, 有賀昭貴, 稲田知大, 中野敏行, 音野瑛俊, 六條宏紀, 佐藤修, 田窪洋介, 他 FASER Collaboration
2. 発表標題 FASERnu : 2022年ランに向けた準備状況と測定の展望
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 音野瑛俊, 有賀昭貴, 有賀智子, 稲田知大, 中野敏行, 六條宏紀, 佐藤修, 田窪洋介, 他 FASER Collaboration
2. 発表標題 FASER実験 : LHC-Run3に向けた最新状況と将来計画
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 有賀智子 (Tomoko Ariga)
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 有賀智子, 有賀昭貴, 中野敏行, 音野瑛俊, 佐藤修, 田窪洋介, 他 FASER Collaboration
2. 発表標題 LHC-FASER実験: テストランにおける高エネルギーニュートリノ反応観測とLHC-Run3に向けた展望
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有賀智子, 有賀昭貴, 中野敏行, 音野瑛俊, 佐藤修, 田窪洋介, 他 FASER Collaboration
2. 発表標題 CERN LHCにおけるニュートリノ反応候補の初観測
3. 学会等名 日本写真学会 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有賀智子, 有賀昭貴, 中野敏行, 音野瑛俊, 佐藤修, 田窪洋介, 他 FASER Collaboration
2. 発表標題 LHC-FASERnu: 2018年パイロットラン解析の最終結果とLHC-Run3での物理
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田窪洋介, 有賀昭貴, 有賀智子, 中野敏行, 音野瑛俊, 佐藤修
2. 発表標題 LHC-FASER実験用シリコン検出器のインストール状況とアップグレード計画
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有賀昭貴, 有賀智子, 中野敏行, 音野瑛俊, 佐藤修, 田窪洋介
2. 発表標題 CERN-LHCでのForward Physics Facility構想における新粒子探索とニュートリノ研究
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有賀智子
2. 発表標題 Study of TeV neutrinos in the FASER experiment at the LHC
3. 学会等名 The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有賀 智子, 有賀 昭貴, 音野 瑛俊, 佐藤 修, 田窪 洋介, 他 FASER Collaboration
2. 発表標題 LHC-FASER実験における高エネルギーニュートリノ研究: テストランでのニュートリノ検出と今後の実験計画
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有賀 智子, 有賀 昭貴, 中野 敏行, 音野 瑛俊, 佐藤 修, 田窪 洋介, 他 FASER Collaboration
2. 発表標題 LHC-FASER 実験におけるニュートリノ研究: テストランでのニュートリノ反応検出とRun3に向けた実験準備
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019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	中野 敏行  (Nakano Toshiyuki)  (50345849)	名古屋大学・理学研究科・講師   (13901)	
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・特任講師   (13901)	
研究分担者	音野 瑛俊  (Otono Hidetoshi)  (20648034)	九州大学・先端素粒子物理研究センター・助教   (17102)	

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