

**世界最高エネルギーの衝突型加速器 LHC にてニュートリノ反応候補を初めて観測  
— ニュートリノ実験の新しい視点 —**

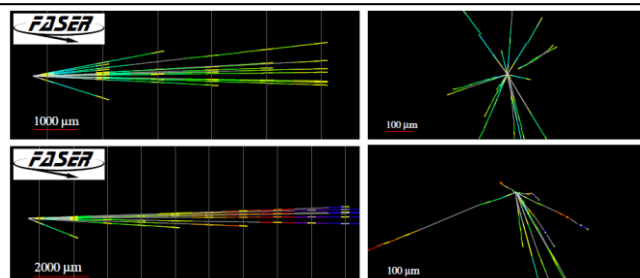
ニュートリノ(※1)は、極端に小さい質量を持ち世代間で大きく混合しているなど異質な存在であり、未だ謎が多く、未知の枠組みの解明への手がかりとなることが期待されています。1GeV 程度のニュートリノを研究する大型のハイパーカミオカンデ計画が進行中ですが、一方で 1TeV(1000GeV)程度の高エネルギー領域でのニュートリノ研究は未開拓であり、衝突型加速器(コライダー)(※2)からのニュートリノはこれまでに直接観測されたことがありませんでした。本研究では、欧州原子核研究機構(CERN、セルン)の大型ハドロンコライダー(LHC(※3))を用いて未開拓の高エネルギー領域でのニュートリノ研究が可能なることを見出し、LHC でのニュートリノ実験を初めて立ち上げました。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(※4)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。

名古屋大学大学院理学研究科・素粒子宇宙起源研究所の中野敏行講師、同大学未来材料・システム研究所の中村光廣教授、六條宏紀特任助教、佐藤修特任講師、九州大学基幹教育院の有賀智子助教、千葉大学大学院理学研究院・ベルン大学 AEC-LHEP の有賀昭貴准教授、九州大学先端素粒子物理研究センターの音野瑛俊助教、高エネルギー加速器研究機構(KEK)素粒子原子核研究所の田窪洋介研究機関講師、そして稲田知大博士研究員らを始めとする FASER(フェイザー)国際共同実験(※5)グループは、史上初めて世界最大・最高エネルギーの衝突型加速器 LHC からのニュートリノ反応候補の観測に成功しました。

本研究では、CERNにあるLHCのビーム軸上にて、2018年に小型のニュートリノ検出器を設置してデータを取得しました。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の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飛跡密度での飛跡再構成アルゴリズム等の技術開発を行い、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。今回の実験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。今後、FASER国際共同実験は2022-2024年に本格的な実験を予定しており、LHC陽子陽子衝突に起因する未知粒子探索および高エネルギーニュートリノ測定を実施します。

本研究成果は、2021年11月24日(EST)に米国科学雑誌「Physical Review D」に掲載されました。



左の写真: FASER 国際共同実験グループのメンバーの一部、右の図: 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。

## 【研究者から一言】

未開拓の高エネルギー領域におけるニュートリノ研究を、日本人グループが中心となって立ち上げ、国際共同研究により推進しています。新しい研究領域を手探りで切り開いており、苦労も多いですが楽しいです。2022-2024 年の実験および将来の実験により、ユニークなデータを提供していきたいと考えています。

## 【用語解説】

### (※1)ニュートリノ:

素粒子標準理論において、電荷を持たず質量が非常に小さい素粒子と考えられています。電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという 3 世代あることが分かっていますが、その詳細な性質の解明はこれからです。FASER 実験では、ニュートリノ検出器としてエマルジョンフィルムという最も 3 次元位置分解能の優れた粒子検出器を用いることにより、これら 3 世代のニュートリノを識別することができます。

### (※2)衝突型加速器(コライダー):

2つのビーム(加速された粒子)を衝突させる加速器です。静止した粒子に加速した粒子を衝突させる方法に比べてはるかに高いエネルギーの衝突となり、より微細な構造を調べる実験が可能になります。

### (※3)大型ハドロンコライダー(Large Hadron Collider(LHC)):

高エネルギー物理学実験を目的として、CERN が建設した世界最大・最高エネルギーのハドロン衝突型加速器です。周長が 27km あり、スイスとフランスの国境をまたいで設置されています。2019-2021 年は運転停止期間でしたが、2022-2024 年に第 3 期(Run3)の運転が予定されていて、FASER 実験もその期間に実施します。

### (※4)フレーバー:

クォーク、レプトンの種類のことで、ニュートリノには、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという 3 種類のフレーバーがあります。標準理論では 3 種類のニュートリノは同じように弱い相互作用をすると仮定されています。これをレプトン普遍性と呼び、これまで広く受け入れられてきましたが、近年、他のコライダー実験によって、高い世代の粒子に関わる崩壊においてレプトン普遍性が破れているかもしれないという実験結果が報告されています。

### (※5)FASER 国際共同実験:

国際共同実験 ForwArd Search ExpeRiment at the LHC (FASER、フェイザーと読む)は、CERN にある世界最大のハドロン衝突型加速器 LHC の陽子陽子衝突点の超前方(ビーム軸に対して 0.6mrad 以内程度の前方)に検出器を設置し、軽い長寿命の未知粒子を探索することを目的として提案された実験です。2019 年 3 月に CERN の正式承認を受けました。その後、未開拓の高エネルギー領域での 3 世代ニュートリノを研究することに着目し、日本人グループを中心としてニュートリノ測定(FASER $\nu$ )を提案しました。2019 年 12 月に FASER $\nu$  も CERN の正式承認を受けて、2022-2024 年のビーム照射実験に向けた準備を進めています。以下の図 1 に FASER $\nu$  検出器の設置位置、図 2 に FASER $\nu$  で研究するニュートリノのエネルギー領域を示します。

## 【参考図】

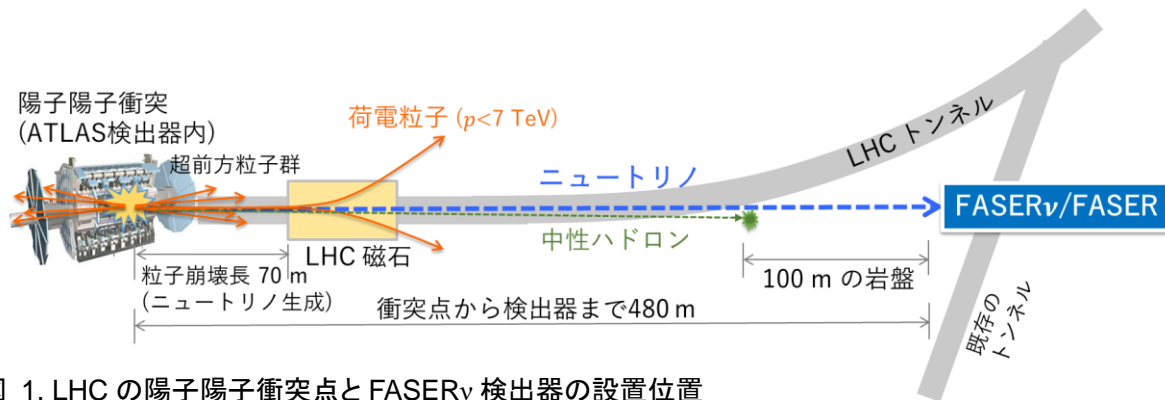


図 1. LHC の陽子陽子衝突点と FASER $\nu$  検出器の設置位置

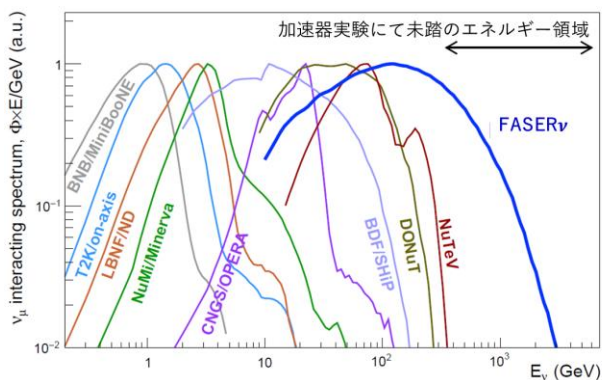


図 2. FASER $\nu$  で測定予定のエネルギー領域(濃い青い線)と先行研究で測定されてきたエネルギー領域(その他の色の線)。横軸はニュートリノのエネルギー、縦軸は 1GeV あたりのニュートリノ反応数(最大値が 1 になるように規格化したもの)を示しています。FASER $\nu$  は黒い矢印で示した高エネルギー領域で加速器実験として史上初の測定を行います。

## 【論文情報】

タイトル: First neutrino interaction candidates at the LHC

著者名: Akitaka Ariga, Tomoko Ariga(責任著者), Tomohiro Inada, Mitsuhiro Nakamura, Toshiyuki Nakano, Hidetoshi Otono, Hiroki Rokujo, Osamu Sato, Yosuke Takubo, et al. 全 75 名(アルファベット順)

雑誌名: Physical Review D

DOI: 10.1103/PhysRevD.104.L091101

## 【謝辞】

本研究は、JSPS 科学研究費補助金 JP19H01909(研究代表者:有賀智子)、JP20H01919(研究代表者:音野瑛俊)、JP20K04004(研究代表者:田窪洋介)、JP20K23373(研究代表者:有賀昭貴)、第 50 回三菱財団自然科学研究助成(若手助成)(研究代表者:有賀智子)、令和 2 年度九州大学 QR プログラム(研究代表者:有賀智子)、2020 年度・2021 年度名古屋大学未来材料・システム研究所共同利用・共同研究(研究代表者:有賀智子)、Heising-Simons Foundation Grant Nos. 2018-1135, 2019-1179, 2020-1840, Simons Foundation Grant No. 623683(研究代表者:Jonathan L. Feng)、CERN の助成を受けて行われました。