

FASERによるニュートリノと衝突型加速器の邂逅，新展開

瓢箪から駒という言い過ぎだろうか。FASER (ForwArd Search ExpeRiment) が、世界で初めて衝突型加速器が生成したニュートリノを観測¹⁾した。欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) におけるビーム軸上 480 m 地点に検出器を配置して、LHC の第 3 期運転が始まった 2022 年の取得データを解析した成果である。九州大学、高エネルギー加速器研究機構、千葉大学、名古屋大学の若手研究者が中心となりアイデアの提案から検出器の開発と運用、そして物理解析まで主導してきた。FASER は素粒子研究に新たな潮流を生んでいる。

衝突型加速器の歴史は、1963 年の AdA²⁾ による電子と陽電子の衝突の成功によって始まった。衝突型加速器は粒子を周回して正面衝突させるため高い重心系エネルギーを実現する。17 種の素粒子からなる素粒子標準理論の体系化と検証に大きな役割を果たしてきた。その一方でこれまでに衝突型加速器はニュートリノ研究に用いられることはなかった。LHC は地下 100 m に設置された直径 10 km の衝突型加速器であり、2010 年より稼働を開始した。陽子同士を正面衝突させた重心系エネルギーは世界最高となる 13.6 TeV に到達している。LHC の衝突点を囲うように大型検出器を配置した ATLAS と CMS がヒッグス粒子の発見^{3,4)}に至り、素粒子標準理論を構成する全ての素粒子が揃ったのは 2012 年のことである。

現代の素粒子研究の最前線は、素粒子標準理論の背後に隠された未知の物理法則を明らかにすることにある。そして、積年の謎である宇宙観測から存在が確実視される暗黒物質の正体解明などが期待されている。このような背景の中、FASER は LHC における新たな実験としてビーム軸方向に生成する新粒子の探索⁵⁾を当初の目的として 2017 年に提案された。^{*1}そして LHC の生成するニュートリノにも着目するに至り、⁷⁾本稿の成果に向けた検討を開始した。

ニュートリノは 1956 年に発見⁸⁾されて以降、素粒子分野に留まらず、地球惑星、天文分野に至るまで多彩な研究が進展している。これまでの加速器を用いたニュートリノ研究は粒子を固定標的に入射する固定標的型加速器によって成し遂げられ、その最高エネルギーは 1997 年に DONuT⁹⁾ が測定した約 400 GeV だった。FASER は加速器を用いたニュートリノ研究の到達エネルギーを四半世紀ぶりに更新し数 TeV にまで押し上げることで、未知のニュートリノの相互作用を検証する。タウニュートリノの加速器を用いた研究は、2012 年にデータ取得を終了した OPERA¹⁰⁾以降実

施されておらず、これまでのタウニュートリノの総検出数は 20 イベント程度に過ぎない。FASER の将来計画は 1,000 イベントを超える検出数が期待され、タウニュートリノの詳細研究への道も拓く。LHC の生成するニュートリノの種類やエネルギーは、陽子内部のクォークやグルーオンの分布によって決まる。FASER は陽子の内部構造について新たな研究手法を提供する。原子核や宇宙線分野とも融合領域を創出し多様な研究者が参入している。

LHC のビーム軸方向は最も放射線量が高い領域のため、LHC の稼働中に検出器を常設することは困難と考えられてきた。FASER は ATLAS の衝突点から 480 m 地点にある使用されていないトンネルを実験区域として活用することで、放射線が抑制できることに着目した。図 1 での TI12 と TI18 である。2018 年は LHC の第 2 期運転の最終年であり、放射線環境を実測できる機会を活かすため、電源も無い未整備のトンネルで使用できる原子核乾板を導入した。10 cm 角の検出器を TI12 と TI18 に設置し、放射線量が十分に低く実験遂行が可能であることを確認した。さらに、ニュートリノ観測に向けた検出器を製作し、第 2 期運転の終了間近に 1 か月間設置した。簡易な検出器のため背景事象の抑制が難しかったがニュートリノ反応の候補を検出した。¹¹⁾

FASER は TI12 を実験区域として選択した。TI12 は LHC の真横にあり、LHC の運転中は数か月に 1 度しか立ち入ることはできない。そのため TI12 の改造と検出器の設置は第 3 期運転が開始するまでに完了させる必要があり、検出器は長期にわたる安定した動作が必須となる。FASER はニュートリノの強度が最も強いビーム軸上に検出器を置くために TI12 の床を最大で 50 cm 掘削した。^{*2}そして ATLAS

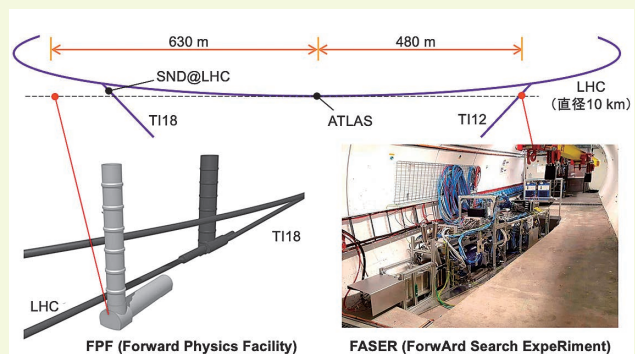


図 1 LHC における ATLAS の衝突点からビーム軸方向に 480 m 地点にある TI12 に設置した FASER の検出器と、630 m 地点において建設に向けた検討が進んでいる FPF の模式図。(表紙も参照)

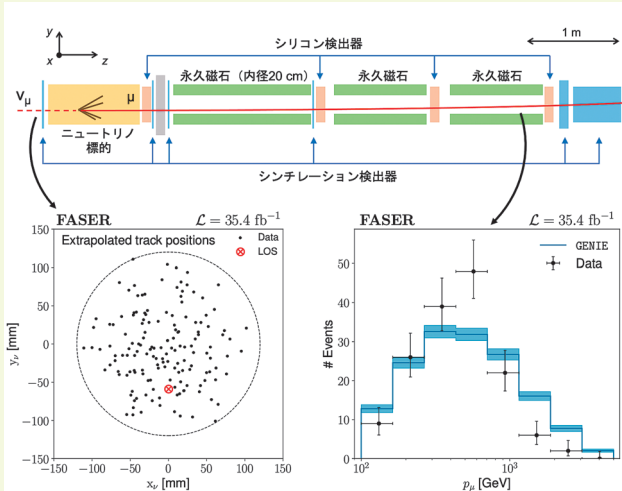


図2 [上] ミューニュートリノ (ν_μ) がニュートリノ標的と反応して生成するミューオン (μ) の飛跡をシリコン検出器が再構成する概念図。[左下] 信号領域に確認した153イベントについて再構成した飛跡を最上流のシンチレーション検出器まで外挿した際の位置分布。LOS (line of sight) はビーム軸、点線の内側が信号領域を示す。[右下] 再構成した飛跡の運動量分布についてシミュレーション (GENIE) との比較。文献1から転載。

がスペアとして保管していたシリコン検出器¹²⁾などを活用する一方で、データ取得や制御システムは独自に開発した。COVID-19の猛威もあり余裕の無いスケジュールとなったが、第3期運転での実験開始に間に合わせた。

FASERは図2上のように複数の検出器で構成され、全体で0.5 m × 0.5 m × 6 m程度の大きさである。ニュートリノは極めて低い反応確率で物質と相互作用する。LHCが生成するニュートリノの大半を占めるミューニュートリノはニュートリノ標的と反応すると約4分の3の確率でミューオンを生成する。ミューオンはニュートリノの高いエネルギーを引き継いでニュートリノ標的を突き抜ける。下流に配置した永久磁石は内径20 cmの中空部に作る0.6 Tの磁場によって通過するミューオンを曲げ、その飛跡をシリコン検出器を用いて再構成することで運動量を導出する。

データ解析において重要な測定量は、再構成した飛跡を検出器の最上流まで外挿した際の位置 (x_v, y_v) と再構成した飛跡の運動量 (p_μ) である。ミューニュートリノに対する高い検出効率と背景事象の十分な抑制を両立させる信号領域として $\sqrt{x_v^2 + y_v^2} < 12$ cm かつ $p_\mu > 100$ GeV を決めた。ブラインド解析を採用し信号領域を隠した上で詳細な解析手法を確定させ、背景事象を 0.14 ± 1.83 イベントと見積もった。その上で信号領域を確認したところ背景事象を大幅に超過する153イベントを観測した。有意水準は 16σ に到達

した。図2左下は再構成した飛跡がビーム軸に対して満遍なく分布し、図2右下は運動量分布がシミュレーションとよく一致していることを示している。衝突型加速器が生成するニュートリノを人類が初めて捕らえた瞬間である。^{*3} 今回の観測ではシリコン検出器¹⁴⁾が主要な役割を果たした。今後さらに写真乾板のデータを組み合わせることで電子ニュートリノやタウニュートリノを含む全てのニュートリノの包括的な測定を実現する。

LHCの第3期運転は2025年に終了し、ビームの強度を数倍に向上させたHigh-Luminosity LHCが2029年から稼働する。それに合わせ、ATLASの衝突点から630 m地点に長さ65 m、幅10 m、高さ8 mの新たな地下施設となるFPF (Forward Physics Facility)¹⁵⁾の建設計画を進めている。ニュートリノの反応数を100倍以上に増やすFASERの次世代実験を含む複数の実験が同時に推進できるように設計を詰めている段階であり、2031年の実験開始を目指している。FASERが切り拓いた衝突型加速器におけるニュートリノ研究と新物理探索は始まったばかりである。

参考文献

- 1) FASER Collaboration, Phys. Rev. Lett. **131**, 031801 (2023).
- 2) C. Bernardini, Phys. Perspect. **6**, 156 (2004).
- 3) ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 1 (2012).
- 4) CMS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).
- 5) J. L. Feng et al., Phys. Rev. D **97**, 035001 (2018).
- 6) FASER Collaboration, CERN-EP-2023-161.
- 7) FASER Collaboration, Eur. Phys. J. C **80**, 61 (2020).
- 8) C. L. Cowan Jr. et al., Science **124**, 103 (1956).
- 9) DONuT Collaboration, Phys. Rev. D **78**, 052002 (2008).
- 10) OPERA Collaboration, Phys. Rev. Lett. **120**, 211801 (2018).
- 11) FASER Collaboration, Phys. Rev. D **104**, L091101 (2021).
- 12) ATLAS SCT Collaboration, Nucl. Instrum. Meth. A **568**, 642 (2006).
- 13) SND Collaboration, Phys. Rev. Lett. **131**, 031802 (2023).
- 14) FASER Collaboration, Nucl. Instrum. Meth. A **1034**, 166825 (2022).
- 15) J. L. Feng et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **50**, 030501 (2023).

音野 瑛俊 (九州大学先端素粒子物理研究センター
otono@phys.kyushu-u.ac.jp)

(2023年7月20日原稿受付)

*1 本稿の主題から外れるため割愛したが、FASERは2022年の取得データを用いた新粒子の探索も遂行している。⁶⁾

*2 FASERが調査したTI18には別の実験となるSND@LHCが実験区域として使用することとなった。SND@LHCはTI18の床を掘削せず、ビーム軸上には検出器を配置しない。

*3 SND@LHCもミューニュートリノの測定結果を公表し、 0.086 ± 0.038 イベントと見積もった背景事象に対して8イベントを観測した。¹³⁾ 有意水準は 7σ である。