

ハドロン衝突型加速器におけるビーム軸方向での素粒子研究の開拓

① ビジョンの概要

既知の素粒子の振る舞いを記述する標準模型を超える未知の物理の発見に向け、MeV-GeV 領域の質量をもつ新粒子の探索と TeV 領域のエネルギーをもつ3世代ニュートリノ測定を推進する。CERN の大型ハドロン衝突型加速器 LHC とその後継となる HL-LHC を活用し、衝突点から数百 m 前方での実験を展開する。天文・原子核・宇宙線分野と連携し、宇宙を支配する法則の解明と融合領域の創出を目指す。

② ビジョンの内容

標準模型はヒッグス粒子の発見により完成したが、暗黒物質の正体やニュートリノの質量などを説明できない。我々は LHC の衝突点から接線方向 480 m 地点において FASER 実験を推進し、将来は 620 m 地点に Forward Physics Facility (FPF) を建設し、研究を拡張する。LHC 及び HL-LHC への追加投資なく新領域を開拓する。20-30 年後には世界の主要な加速器 (LHC/HL-LHC、SuperKEKB、J-PARC 等) からの成果を統合する段階に入り、本計画はその一翼を担う。次世代の衝突型加速器となる Future Circular Collider (FCC) においてもビーム軸方向における新物理の開拓を推進する。

③ 学術研究構想の名称

素粒子標準模型を超える新物理に向けた FASER 実験と FPF 計画の推進

④ 学術研究構想の概要

本構想は MeV-GeV 領域の新粒子探索と TeV 領域ニュートリノ測定を柱とする。FASER は衝突型加速器の生成するニュートリノの初測定を含む成果を挙げており、FPF では FASER2 実験と FASERnu2 実験を展開し 2032 年開始を目指す。FPF の施設は CERN が建設し、各実験の検出器を国際分担する。日本は超電導磁石やニュートリノ検出器の開発において主導的役割を担う。

⑤ 学術的な意義

標準模型は多くの未解決問題を残している。本構想は未開拓の MeV-GeV 領域を探索し、FPF では多様な検出技術により暗黒物質と関連する新粒子の網羅的検証を推進する。TeV 領域での3世代ニュートリノ測定は世界初である。特にタウニュートリノの統計を飛躍的に増やし、素粒子の世代構造の理解に新展開をもたらす。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

衝突型加速器におけるビーム軸方向での新物理探索は初の試みである。MeV-GeV 領域の新粒子探索は LHCb や BelleII など衝突型加速器を用いた実験と相補的、NA62 や SHiP など固定標的型加速器を用いた実験とは競争的關係にある。TeV 領域でのニュートリノ測定は本構想が唯一である。

⑦ 社会的価値

新粒子や新現象の発見は宇宙観を刷新する可能性を持つ。LHC/HL-LHC の新たな価値を引き出し、開発するシリコン検出器や原子核乾板は医療・通信・地球科学へ応用可能である。

⑧ 実施計画等について

FASER 実験は LHC の第3期運転 (2022-26) における全データを用いた新粒子探索とニュートリノ測定を完遂する。第4期運転に向けた検出器の追加により、新粒子の探索感度とニュートリノの検出数を高める。第4期運転 (2030-33) を通じてさらに数倍の統計量を蓄積し、標準模型を超える新物理の探索を着実に進める。



図1 LHC の衝突点からビーム軸方向における FASER 実験と FPF 計画

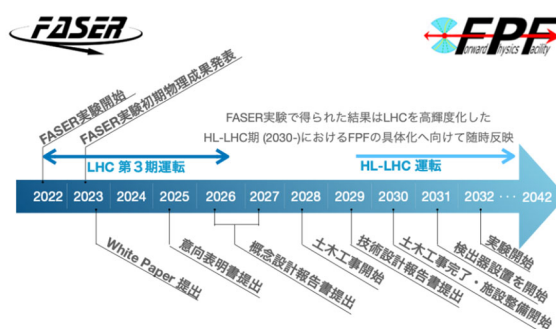


図2 FASER 実験と FPF 計画の想定スケジュール

得られた結果は LHC を高輝度化した HL-LHC 期（2030-）における FPF 計画の具体化へ向けて随時反映させる。

FPF 計画の承認に向け、CERN が設置する委員会である LHC Experiments Committee (LHCC) との議論を開始する。2025 年 9 月に提出した意向表明書を踏まえ、概念設計報告書、技術設計報告書を提出する。LHCC からの承認を経て、CERN での実験に対して決定権を持つ Research Board からの承認を得て、FPF の建設を開始する。

2030 年に FPF のための土木工事を完了し、新粒子探索及びニュートリノ測定の背景事象を削減するスウィーパー磁石を設置する。HL-LHC のための工事が完了する 2030 年に FPF の施設整備を開始し、2031 年に検出器の設置を開始する。本構想で開発する超伝導磁石やニュートリノ検出器を設置して、2032 年に実験の開始を目指す。HL-LHC は 2042 年ごろまで運転を予定し、その期間の安定したデータ取得を実現する。

九州大学を中心機関として、千葉大学、名古屋大学、新居浜工業高等専門学校が参加し、FASER 実験及び FPF 計画を推進する。研究者は、九州大学から音野瑛俊（准教授）・有賀智子（准教授）・稲田知大（助教）・六條宏紀（助教）、千葉大学から有賀昭貴（准教授）、名古屋大学から中野敏行（准教授）・佐藤修（特任准教授）・毛受弘彰（助教）、新居浜高専から田窪洋介（准教授）、そして各大学からそれぞれ数名の大学院生が参加する。また KEK の角直幸（助教）・槇田康博（教授）・山本明（名誉教授）から協力を得る。

FASER 実験の新粒子探索に向けて、九州大学は KEK と飛跡検出器をストリップ型シリコン検出器を用いて開発した。新粒子の崩壊で生成する荷電粒子ペアを分離測定する重要な役割を果たす。音野瑛俊及び稲田知大が飛跡検出器の責任者を務め、田窪洋介と共に LHC の第 3 期運転（2022-26）での安定した運用に成功している。今後 HL-LHC の第 4 期運転（2030-33）においても新粒子探索を推進する。FPF での FASER2 実験に向けては超伝導磁石の開発を開始する。KEK はこれまでに多様な超伝導磁石を製作した実績があり、共に開発を進める。

FASER 実験のニュートリノ測定は、有賀智子と有賀昭貴が責任者としてニュートリノ検出器の構築・運用・解析を牽引し、LHC の第 3 期運転でのデータ取得を実現し、データ解析を進めている。今後、第 4 期運転で統計量を増やし、精密なニュートリノ測定を実施する。六條宏紀が写真乾板の製造、中野敏行が写真乾板の読み出し装置の責任者として、安定した運用とさらなる高速化に向けた技術開発を続ける。FPF での FASERnu2 実験に向けては、有賀昭貴と有賀智子が責任者として実験提案や検出器設計を進める。国際的協力体制を強化し写真乾板の基盤技術を発展させ他の将来実験にも繋げる。

FASER 実験を運営する Executive Board を構成する 11 名に有賀智子、有賀昭貴、稲田知大が参画し、この 3 名を含む 10 名以上が 45 歳以下の若手研究者もしくは大学院生である。今後も FASER 実験と FPF 計画の中核として役割を果たすと期待できる。

2032 年までに必要となる経費は 20 億円（設備費 18.5 億円、人件費 1.5 億円）である。FASER 実験の遂行を主導する研究員の雇用費と CERN への渡航費に 0.5 億円を計上する。FPF において FASER2 実験で荷電粒子ペアの飛跡を分離するために必須となる超伝導磁石について超伝導線材に 4 億円、冷却系に 3 億円、磁気回路を作る鉄材に 2 億円が必要となる。設計、製作、輸送、性能評価のための人件費として 0.5 億円を計上する。同型の超伝導磁石を開発した日本企業と協力し、FPF で必要となる仕様に合わせた見積もりを作成した。FASERnu2 実験でニュートリノの標的として用いるタングステンに 3 億円、写真乾板の読み出し装置に 2 億円とその組み上げの人件費として 0.5 億円、周辺装置に 0.5 億円が必要となる。写真乾板の製作費に 3 億円が必要となる。新粒子及びニュートリノの背景事象削減のためのスウィーパー磁石について 1 億円を計上する。FASER 実験でのこれまでの経験を基礎に現時点での最善を尽くした見積もりとなっている。

⑨ 連絡先

音野 瑛俊（九州大学）