

## 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

## ① ビジョンの概要

素粒子標準模型を超える物理の発見に向けて MeV から GeV の質量を持つ新粒子探索と、TeV 領域のエネルギーを持つ 3 世代ニュートリノ研究に挑戦する。欧州原子核研究機構 (CERN) の衝突型加速器を活用し、衝突点から前方 (ビーム軸上) における素粒子実験を推進し、世界で進展する多彩な実験と協力して宇宙を支配する物理法則の解明に取り組む。天文、原子核、宇宙線分野とも連携し、新たな融合領域を創出する。

## ② ビジョンの内容

1970 年ごろに提唱された素粒子標準模型 (以降では標準模型と表記) は加速器の発展に伴って実験的検証が進み、2012 年には最後の未確認粒子であったヒッグス粒子が CERN の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) において発見されるに至った。標準模型は人類が到達するエネルギーまでの実験結果の記述に大きな成功を収めたが多数の課題が知られており、広範なエネルギー領域での新粒子探索と標準模型粒子に対する精密測定が活発になっている。

我々は暗黒物質との関連が注目を集めている MeV から GeV の質量を持つ新粒子

の探索と未開拓となる TeV エネルギー領域での 3 世代ニュートリノの精密測定のため、図 1 に示すように LHC の衝突点からビーム軸方向に数 100m 離れた地点において、FASER (ForwArD Search ExpeRiment) 実験と FPF (Forward Physics Facility) 計画を推進し、データ取得を 20 年後には完了する。衝突型加速器のビーム軸方向での新物理探索はこれまで見過ごされてきたが、我々若手研究者が 2018 年より中心となって可能性を拓いてきた。既に稼働中の LHC と高輝度化に向けて準備中の High-Luminosity LHC (HL-LHC) の潜在能力を効果的に引き出すことは特筆に値する。FASER 実験もしくは FPF 計画において新粒子発見に至れば、天文分野と連携して暗黒物質との関連を追求する。3 世代のニュートリノ研究は標準模型を超える物理の発見の可能性があるのみならず、原子核・宇宙線分野の研究における基礎データとして活用でき様々な発展が予想できる。

20 年から 30 年後は世界中で現在進行中の実験が目標とするデータ取得を完了し、その結果を吟味する段階にある。FASER 実験及び FPF 計画からの成果と統合し、標準模型を超える物理の全貌解明が進むと期待する。CERN は次世代の円形衝突型加速器として Future Circular Collider (FCC) の実現を最優先に掲げており、2050 年ごろからの電子衝突、2080 年ごろからの陽子衝突の実現を目指している。我々は FCC においても衝突点からビーム軸方向での実験的研究を推進し、物理学の発展に大きく貢献したいと考えている。

## 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

我々は CERN の LHC における陽子・陽子衝突点からビーム軸方向へ 480m 地点において FASER 実験を開始し、中核として牽引してきた。FASER 実験は 2025 年までの運転を予定し、これを完遂する。そして 2029 年より稼働を開始する HL-LHC に向けて 620m 地点に新たな大規模施設である FPF を建設する。FPF の建設費は CERN が担当し、設置する検出器は日米欧で分担する。FPF において新粒子を探索する FASER2 実験のための超電導磁石、ニュートリノを研究する FASERnu2 実験のための検出器などを開発し、2031 年中頃に実験の開始を目指す。本研究構想には日本の 4 つの研究機関から若手研究者と大学院生を中心とした約 20 名が参加し、20 億円を計上している。

## ⑤ 学術的な意義

MeV から GeV の質量を持つ新粒子は暗黒物質の性質を満たす魅力ある候補である一方で、LHC における ATLAS



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

実験など衝突点周囲に検出器を配置した実験は主に TeV 領域の新粒子を狙ってきた。本構想は LHC の新粒子発見能力を大きく拡張する。これらの新粒子は宇宙開闢直後にも大量に生成され宇宙進化の歴史に大きな影響を与えると考えられ、その発見は暗黒物質や暗黒エネルギーの理解へと繋がる可能性を持つ。

TeV 領域のエネルギーを持つ 3 世代のニュートリノ研究は世界初の取り組みである。第 3 世代粒子となるタウニュートリノが過去の加速器実験において検出されたのは 10 事象程度に過ぎず、最も研究が停滞している標準模型粒子といえる。FASER 実験でのタウニュートリノ反応の期待値は数 10 事象程度に留まるが、FPF 計画では 1,000 事象を超え、詳細な測定が可能となる。電子ニュートリノとミューニュートリノはさらに 1 桁以上高い検出数が期待でき、世代間の階層構造の謎にも迫ることができる。

### ⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

衝突型加速器の歴史は 50 年を超えるが衝突点前方で新物理を探索する取り組みは初めてとなる。本構想は衝突型加速器から新たな価値を引き出し、現在進行中もしくは計画中的実験を補完する。新粒子の発見が実現できればその正体について多角的検証が可能となる。TeV 領域の 3 世代ニュートリノの詳細測定は、本構想が先駆けとなる。これまで世界各地で開発された様々な測定技術について FPF への導入が検討されるなど、FPF の実現に向けた期待が高まっている。

### ⑦ 社会的価値

素粒子研究は極微の世界を司る法則の探求であり、宇宙の開闢と進化の理解に不可欠である。新粒子もしくは新現象の発見は 1970 年ごろに形作られた標準模型による描像を約半世紀ぶりに変革する。本構想で開発する半導体検出器や写真乾板は様々な技術の集積であり、その発展は社会の礎となる。

### ⑧ 実施計画等について

2032 年末までに必要となる経費は 20 億円である。FASER 実験を遂行するための CERN への渡航費と研究員の雇用費に 0.5 億円を計上する。FPF において FASER2 実験で必須となる超電導磁石について 9 億円が必要となる。設計などのための人件費として 0.5 億円を計上する。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、周辺装置の準備に 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。

図 2 に示すように、FASER 実験は既に LHC の第 3 期運転(2022-25)でのデータ取得を開始しており、標準模型を超える新物理の探索を着実に進める。得られた結果は HL-LHC 期(2029-)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、2023 年に FPF 及び各実験の計画書を提出、2024 年に FPF の施設としての概念計画書を提出、2025-2026 年に FPF の施設としての技術設計報告書を提出、2026-2027 年に各実験の技術設計報告書を提出する。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。2028 年に FPF のための土木工事を完了する。HL-LHC のための作業が完了する 2029 年に FPF の施設整備を開始し、2030 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、ニュートリノ検出器、スウィーパー磁石を設置して、2031 年中頃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。

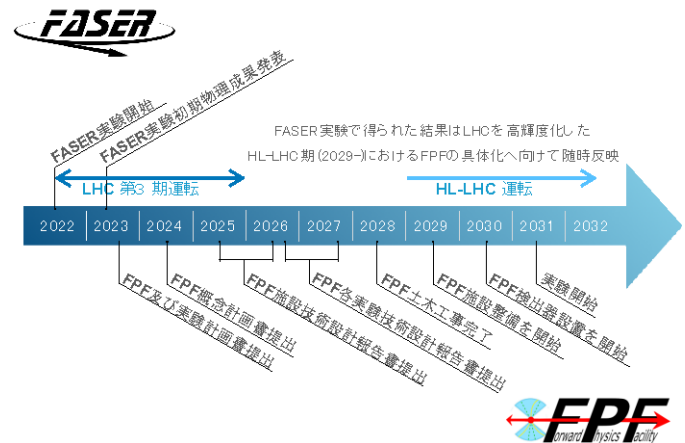


図 2：FAESR 実験と FPF 計画の想定スケジュール

九州大学を中心となる機関として、千葉大学、名古屋大学、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と協力して推進する。FASER 実験の運営に責任を持つ Executive Board を構成する 11 名に音野瑛俊、有賀智子、有賀昭貴が参画し、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。

### ⑨ 連絡先

音野 瑛俊 (九州大学)