

高エネルギー加速器による素粒子原子核物理学の研究

① ビジョンの概要

物理学に基づいた時空と物質構造と宇宙進化の全体像を真に統一的に記述するための本質的な鍵を得る挑戦を行う。高エネルギー加速器の実験として、欧州 LHC でエネルギーフロンティアの素粒子研究、日本の SuperKEKB/Belle II と J-PARC で大強度フロンティアの素粒子研究、J-PARC ではさらにハドロンや原子核の研究を行う。将来、エネルギーフロンティアでのヒッグス粒子の精密測定が不可欠である。

② ビジョンの内容

自然界の物質を構成する原子核や素粒子を理解することは基礎科学の中心的な課題である。原子核と素粒子への理解の最大の要因は加速器の発明と発展に求められる。様々な発見は新たな謎を生んだ。存在が確実視される暗黒物質は標準模型に欠けている要素である。宇宙に反粒子が見当たらず粒子だけが残った理由、素粒子の世代構造の謎、宇宙の加速膨張の謎、さらに宇宙開闢の謎など数多くの問題が残されている。加速器技術の進歩は、数多くの不安定原子核や原子核の極限状態を研究する扉を開いた。クォークの閉じ込めから重い元素の生成、中性子星に至る物質の進化を解明する研究が続いている。これらの探求を推し進め、物理学に基づいた時空と



図1 素粒子原子核物理学の研究

物質構造と宇宙進化の全体像の真に統一的な記述へ至る本質的な鍵を今後 20-30 年のうちに得る挑戦を行う。

素粒子原子核物理学の次のブレークスルーは、未踏の高エネルギーでの実験から既知の粒子を使った様々な超精密測定まで、広いエネルギースケールの研究でもたらされうる。本戦略で提案する多様なアプローチが肝要である。1. 欧州の LHC 実験においてヒッグス粒子やトップクォークの測定と新しい物理の直接探索を進める。2. 日本の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の大強度加速器実験施設: SuperKEKB/Belle II と J-PARC で B 中間子やタウレプトン、K 中間子やミュオン、そしてニュートリノにより全ての世代のクォーク・レプトンを用いた測定や探索を網羅的に行う。3. 陽子や K 中間子のビームを用いて生成する重いクォーク (ストレンジやチャームなど) を挿入した原子核の構造や、クォークの種類を拡張してより一般化した核力の研究を進める。4. 将来、LHC 実験を引き継ぐ国際リニアコライダー等のよりグローバルな次世代エネルギーフロンティアの衝突型加速器での、ヒッグス粒子の性質の精密な測定とさらなる未知粒子の探索が不可欠である。

③ 学術研究構想の名称

高エネルギー加速器による素粒子原子核物理学の研究

④ 学術研究構想の概要

欧州 LHC 加速器での ATLAS 実験を引き続き遂行するとともに、LHC の高輝度化に向けた加速器と測定器のアップグレードを国際協力で推進する。SuperKEKB 加速器とその Belle II 実験は、性能改善を行いつつ運転を継続し新物理現象の探索などを進める。J-PARC 加速器の実験は、ビーム時間の確保と施設の高度化のバランスをとりながら進める。加速器と基盤技術、検出器・測定器の技術開発を国内外の研究者とともに進める。

物質と宇宙の全体像を探求するとともに、数理科学全般さらに哲学にまで大きなインパクトを与える。産業・医療応用まで広範囲に波及効果がある。それぞれの研究が相補的であるとともに、国外の実験とは最初の発見を目指す競争関係にある。大規模な国際共同研究として行われ、国外からも研究者が多数参画し、KEK はそのハブ拠点としての役割を果たしている。多様な国籍・世代・性別・キャリアを持つ共同研究者の議論に基づき研究が展開されている。大学院生にも積極参加と交流を促し、分野の多様性を維持・確保する。KEK は実施すべき課題と優先順位を明確にして進めており、大学共同利用機関法人として共同利用を実施する。本構想の研究はいずれも、今世紀に我が国が国際的に高い優位性を示している。グローバル化が一層進む中で世界最先端の加速器での研究を実現し、将来を担う優秀な人材の育成と分野の発展を可能にする。宇宙の歴史や物質の成り立ちに対する深い理解は、人類全体が共有する新たな英知の創造としての社会的・文化的

意義を持ち、計画段階では思いもしなかった社会的効果やイノベーションをもたらすポテンシャルは高い。

⑤ 学術的な意義

KEK は素粒子原子核研究の国際的な一大拠点である。CERN の LHC 実験に参画し、新しい物理の直接的探索とヒッグス粒子やトップクォークなど LHC 加速器でのみ生成できる多様な粒子の解明を進めている。KEK が有する SuperKEKB や J-PARC では、素粒子標準模型の綻びを探る試みを多角的に進め、あらゆる世代の素粒子の精密測定や宇宙観測から得られる結果を総合的に組み合わせて、標準模型を超える理論の構築を進めている。大強度ビームで生成されるエキゾチックなハドロンや原子核の高精度測定により、クォーク多体系の QCD に基づく理解を進めている。これらの実験を今後もタイムリーに実現し豊かな研究成果を出し続ける。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

国内外で行われている多くの素粒子実験は、標準理論を超える新しい物理を多角的に検証する上で相補的な役割を果たす一方、その証拠の最初の発見を目指す競争関係にある。欧州 LHC での ATLAS 実験は世界で唯一稼働中の「エネルギーフロンティア」での研究である。国内の SuperKEKB 加速器での Belle II 実験や J-PARC での実験は「大強度フロンティア」での研究で、CERN での LHCb 実験や K 中間子実験、米国フェルミ研究所でのニュートリノ実験やミュオン実験と競争している。原子核分野では米国のジェファーソン研究所、LHC での重イオン衝突 (ALICE 実験) やドイツ GSI の FAIR 計画でハイパー核やハドロンの実験が進み、J-PARC での原子核実験と競争している。

⑦ 社会的価値

宇宙の歴史や物質の成り立ちに対する深い理解は、人類全体が共有する新たな英知の創造としての社会的・文化的意義を持ち、国家・社会のあらゆる分野の発展の基盤と原動力になる。CERN での国際共同実験が World Wide Web とインターネット社会の契機となったように、計画段階では思いもしなかった社会的効果やイノベーションをもたらすポテンシャルは高い。装置・機器への要求は高く、挑戦的な技術開発が求められる。産学が共同で開発し量産する中で発展が促され、産業的価値が社会に還元される。国際共同実験をホストし若手研究者が重要な役割を担うことで、国際感覚を身につけた研究者を数多く育成できる。研究に対する国民の関心と期待も高い。SDGs の 3 (健康と福祉)、4 (教育)、5 (ジェンダー平等)、7 (エネルギー)、9 (産業と技術革新の基盤)、16 (平和と公正)、17 (パートナーシップ) に貢献している。

⑧ 実施計画等について

実施計画・スケジュール LHC での研究は 2029 年以降に高輝度の LHC 加速器が運転を開始し、加速器の調整、検出器の調整と較正作業を行って年間 300fb⁻¹ 程度のデータを収集する。SuperKEKB/Belle II では年間約 8 ヶ月の物理実験を毎年継続して行う。2026 年以降に約 1 年半かけて加速器・測定器を改造し、加速器の衝突性能の大幅な改善と測定器の放射線耐性向上を見込んでいる。J-PARC は運用を十年以上継続し、大強度のビームでの運転時間を充分確保して研究成果の創出を続ける。並行して実験施設の高度化を行う。ハイパーカミオカンデ検出器の運転は 2026 年に開始され、J-PARC の MR 加速器も 1.3MW の大強度での運転を開始する見通しである。

実施機関と実施体制 加速器や実験施設に建設国・機関が責任を持ち、世界中の専門家で構成される国際諮問委員会が進捗や方針を評価する方式が国際標準として確立している。KEK の各部署に加速器や実験施設の運用を行うグループがあり、連携して運用と研究を行っている。研究の実施にあたり、国内外の研究者コミュニティが協力する体制 (国際コラボレーション) を組んで実施している。KEK はテストビーム施設などの共同施設を運用し、次世代の実験を支える最先端の基幹技術を推進するプラットフォームを提供している。

総経費 概ね 2,000 億円

所要経費 LHC での研究は、LHC 全体の経費の中で加速器の増強に 73 億円、検出器に 20 億円、10 年間の運営費に 19 億円、合計で 112 億円である。SuperKEKB/Belle II での研究は加速器・測定器の高度化のための施設・設備費に 40 億円、10 年間の運営費に 928 億円、合計で 968 億円である。J-PARC での研究は、加速器と実験施設の整備と高度化に 210 億円、10 年間の運営費に 894 億円、合計で 1,104 億円である。

⑨ 連絡先

山内 正則 (高エネルギー加速器研究機構)