

LHC 加速器・高エネルギー原子核衝突実験 ALICE で拓く 宇宙初期物質 QGP 生成とハドロン化機構の解明

① ビジョンの概要

物質は陽子や中性子で構成されるが、その 98%の質量起源は未解明である。本ビジョンは、我が国が大きく寄与した高エネルギー原子核物理学を基盤とし、全人未到の精度実験から陽子質量誕生の謎を探る。大型加速器で初期宇宙物質 QGP を生成し、量子半導体や高速データ処理により物質化の過程を解明する。宇宙物理や核融合の発展を促し、技術を社会実装し、医療等に還元する。

② ビジョンの内容

物質は陽子や中性子といったバリオンで構成されるが、その質量の約 98%の起源はいまだ明らかではない。クォークの質量はヒッグス機構で説明される一方、陽子や中性子の質量はクォークの質量和では到底足りず、量子色力学 (QCD) のダイナミクスに由来すると考えられている。この「質量誕生の謎」は、物理学の最重要課題の一つであり、解明は物質と宇宙の理解に根本的な進展をもたらす。本ビジョンは、我が国が大きく寄与してきた高エネルギー原子核物理学を基盤に、これまでにない精度の実験を実現し、陽子質量起源の謎に迫ることを第1のビジョンとする。我が国の研究者は、RHIC や LHC 加速器での重イオン衝突実験に長年参画し、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の研究を国際的に主導してきた。こうした蓄積が、未解明の課題に挑む強力な基盤となる。

本計画では、世界最大の加速器 LHC を用いて、初期宇宙に存在した QGP を生成し、そこから通常物質が形成される過程を探究する。QGP はクォークやグルーオンが閉じ込められずに存在する状態であり、その相転移を観測することで質量誕生のメカニズムを探る。これを実現するには高精度の検出器と膨大なデータを処理する高速計算基盤が不可欠である。そこで、最先端の量子半導体技術を応用した検出器を開発し、従来を超える空間・時間分解能を達成する。また、得られる膨大なデータ

を効率的に解析するため、AI・機械学習を取り入れ、衝突事象から物質化を解明するデータを抽出する。これにより QGP から通常物質への移行過程を精密に描き出し、陽子質量の起源に解明に迫る。

③ 学術研究構想の名称

LHC 加速器・高エネルギー原子核衝突実験 ALICE で拓く宇宙初期物質 QGP 生成とハドロン化機構の解明

④ 学術研究構想の概要

本研究の学術研究構想は、(1) 陽子質量の起源の解明、(2) カラーガラス凝縮の発見、(3) QGP 誕生の謎の解明、の達成である。そのために、LHC 加速器を使った国際共同実験 ALICE において、プロジェクトの三本柱である ALICE2、FoCal、ALICE3 を順次整備・運用し、世界に先駆けて革新的成果を導出する。ALICE2 では、TPC 検出器の高度化、連続読み出し方式 O^2 システムにより従来比 100 倍の統計を実現する。現在から 2032 年まで、大規模データ収集と解析を行い、QGP 物性を精密に決定する。FoCal は、日本が主導して開発した超前方カロリメータであり、2025 年より建設を開始し、2030 年から運用を予定する。未踏領域の直接光子を測定し、グルーオン飽和を世界で初めて実証する。さらに ALICE3 では、2030 年代前半を目標に Outer Tracker (OT) シリコン検出器を日本主導で建設する。CMOS 技術を用いた世界最高分解能の検出器を大面積導入し、従来比 5 倍の衝突点分解能を達成する。これにより、カイラル対称性の部分的回復、すなわち陽子質量の起源解明が可能となる。

⑤ 学術的な意義

宇宙誕生直後に存在したとされる QGP の解明は、物質生成や質量起源といった人類の根源的課題に迫る研究である。RHIC や LHC で QGP 生成は確立したが、その生成機構、物性、ハドロン化過程には未解明の問題が残る。特に QGP の物性、グルーオン飽和の存在、カイラル対称性の回復は、現代物理学の大きな課題である。日本は ALICE 実験で主要検出器建設に貢献し、国際研究を主導し、ALICE 実験をはじめとする LHC の 4 つの実験は 2025 年、ブレークスルー賞を受賞している。本計画により、以下の 3 つの成果が期待される。第1に重クォークやジェットで QGP の輸送係数を定量化する。第2に FoCal を用いて、 $x=10^{-6}$ 領域の測定からグルーオン飽和を実証す

学術研究構想の内容



図1 学術研究構想の内容

る。第3に ALICE3 の高分解能検出器で ρ 中間子と a_1 粒子の縮退を観測し、カイラル対称性回復を示す。これらはいずれもノーベル賞級の成果に直結する。

⑥ 国内外の動向と当該構想の位置付け

高エネルギー原子核衝突実験は、米国 RHIC と欧州 LHC を中心に展開され、QGP 生成の証拠は確立された。しかし RHIC は 2025 年に運転を終え EIC 実験に移行するため、QGP 研究の主舞台は LHC に集約される。欧州では ALICE を含む LHC 実験に加え、FAIR（独）、FCC（欧州）、EIC（米）などの将来計画が進められ、国際的な研究競争は激化している。この中で日本は、ALICE 実験において検出器開発、物理解析、マネジメントの中で、中心的役割を果たしてきた。特に前方カロリメータ FoCal は、日本主導の提案として CERN に正式承認され、新領域を探索する世界唯一の実験として位置付けられている。さらに次期 ALICE3 においては、OT 検出器の開発・量産に日本が貢献することを期待されている。本構想は、こうした国際的潮流の中で、日本が持つ独自技術と研究実績を活かし、ALICE 実験の中核として国際共同研究を先導するものであり、世界的にも不可欠かつ戦略的な位置付けを持つ。

⑦ 社会的価値

本構想は、宇宙の起源や物質生成機構といった人類普遍の問いに挑むものであり、国民に大きな知的価値を提供する。経済的・産業的価値としては、放射線耐性シリコンセンサや最先端半導体開発が、医療機器や宇宙機器分野への応用に直結する。また、大規模データ解析で培われる AI・ビッグデータ処理技術は情報産業に波及し、社会全体のデジタル基盤強化に寄与する。さらに、CERN や国際コラボレーションの中での研究を定常的に行うことで、グローバルに活躍する若手優秀人材を輩出し、我が国の競争力を高める。

⑧ 実施計画等

前期（2026～2028 年度）には、ALICE2 による第3衝突期データ収集と解析を進め、QGP 物性量の精密測定を行う。同時に FoCal の量産を国内で開始し、順次 CERN に送り ALICE 実験への導入を完遂する。さらに ALICE3, OT に向け、センサの試作と評価を KEK や国内外のテストビーム施設で実施し、設計仕様を確立する。中期（2029～2031 年度）には、FoCal の最終組立と較正を CERN で行い、2030 年度から運用を開始する。FoCal によりグルーオン飽和の探索を行う。並行して ALICE2 解析を深化させ、輸送係数等を精密に決定する。また OT については、長期安定性試験や放射線耐性評価を経て量産技術を確立し、国際分担を最終化する。

後期（2032～2035 年度）には、FoCal の物理成果を論文化し、国際会議で発表する。同時に OT の量産・建設準備を国内で開始し、2035 年度以降の ALICE3 本格実装に備える。博士学生や若手研究者を CERN に派遣し、国際共同研究を通じて人材育成を推進する。

これらの活動を ALICE 日本グループ（筑波大（QGP 国際研究センター）、東大、奈良女子大、広島大、佐賀大、長崎総合科学大、理研、熊本大）で進める。

総経費 82 億円（10 年間）：FoCal 建設 16 億円、ALICE3 Outer Tracker 開発 46 億円、ALICE 登録費 3.5 億円、人材育成・研究支援 11.4 億円、旅費 2 億円、計算資源 3 億円。

⑨ 連絡先

中條 達也（筑波大学 数理物質系）