

国際高エネルギー量子科学フロンティア：海外施設で展開する QCD 研究

① ビジョンの概要

CERN(欧)、BNL(米)、GSI/FAIR(独)などの海外大型加速器を用いた国際共同高エネルギー原子核実験を推進し、クォークやグルーオンの動力学(QCD)の解明に向け、多様な実験・理論・計算手法を統合するプラットフォームを構築し、日欧米を結ぶ持続的な国際ネットワークを形成する。

② ビジョンの内容

国際高エネルギー量子科学フロンティアは、高エネルギー領域の基本自由度であるクォークやグルーオンの世界を中心に、クォーク・グルーオン、ハドロン、原子核階層が持つ多様な世界をQCDの基礎理論をもとに解明する。そのために、5つの研究テーマを掲げ、これらを統合する国際的プラットフォームを形成し、日米欧を結ぶ研究ネットワークの中で推進する。テーマは、「高温 QCD 物理」、「高密度・ストレンジネス QCD 物理」、「高エネルギー核子・原子核の物理(高エネルギーQCD 物理)」、

「QCD 理論」、「計算 QCD」である。このうち、最初の3つの実験研究を海外の大型加速器施設において国際共同で展開し、それを理論・計算と結合することで、多様なアプローチを束ねる研究基盤(プラットフォーム)を構築する。「高温 QCD 物理」は欧州素粒子原子核研究所(CERN)の大型ハドロン加速器(LHC)を用いたALICE実験で推進する。「高密度 QCD 物理」はドイツのGSI研究所およびその後継加速器施設FAIRで展開する。「高エネルギーQCD 物理」は米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)に建設される原子核衝突型加速器(EIC)で行う。これら5つのテーマを統合し、理論・計算研究を結合することで、閉じ込め、質量の起源、核子・原子核構造といったQCDの基本的性質や、クォーク・グルーオンプラズマや高密度クォーク物質といった創発的性質を包括的に解明する。さらに、QCD研究に関する国際的プラットフォームと日欧米を結ぶ研究ネットワークを形成し、実験技術・知識・人材の国際循環を促進することで、世界を牽引する次世代研究者の育成を実現する。

③ 学術研究構想の名称

国際高エネルギー量子科学フロンティア：海外施設で展開する QCD 研究

④ 学術研究構想の概要

国際高エネルギー量子科学フロンティアでは、CERN、BNL、GSI/FAIRといった海外の大型加速器施設における国際共同高エネルギー原子核実験およびQCD理論と計算QCD研究を統合する国際的なプラットフォームを形成する。これらの活動を単なる個別実験の集合ではなく、日・米・欧を結ぶ国際連携ネットワークとして統合し、人材・技術・知識の国際循環を促し、卓越した次世代の研究者・技術者の育成を実現する。また、このプラットフォームを通じて、次世代の量子測定技術や量子計算技術に関する国際的な知識と経験の共有を促進し、実社会に直結する技術やデータサイエンス手法の発展と実証に向けた協力を推進する。

⑤ 学術的な意義

物質とは何か？真空とは何か？物質は何から構成されているのか？重さはどのように生まれたのか？環境を変えたときに物質はどう変化するのか？その多様な性質は何に基づくのか？—これら根源的な問いに挑むことは、自然科学の最重要課題の一つである。クォークやグルーオンの豊かな性質が反映された物質世界を理解するためには、それらのダイナミクスを記述する強い力の基礎理論QCDに立脚する必要がある。QCDの創発現象を包括的に理解するには、CERN-LHCによる「高温QCD」、GSI/FAIRによる「高密度・ストレンジネスQCD」、BNL-EICによる「高エネルギーQCD」といった異なるフロンティアの実験が不可欠である。これらの国際共同研究は、初期宇宙の物質創生史や中性子星の内部構造、さらには南部理論の検証といった物質観の刷

計画：海外施設で展開する国際共同実験



図1 本構想で構築する国際ネットワーク

新につながる。重要なのは、こうした挑戦的研究を推進するためのプラットフォームと国際ネットワークの形成である。国際共同の場を通じて知見や経験を共有し、国内外の研究者・技術者が交流・協力できる共通基盤（プラットフォーム）を形成する。これにより、学術研究を超えて工学・産業への波及を促し、人材育成のハブとして機能する。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

ALICE 実験におけるクォーク・グルーオンプラズマの研究は、NuPECC の長期計画に明記されたヨーロッパの原子核物理の最重要課題である。高温 QCD 物理の進展に伴い、新たな潮流として高密度 QCD が注目され、FAIR 加速器を用いた CBM 実験が国際的プラットフォームとして推進されている。米国 BNL 研究所の EIC 計画は、DOE 承認プロセスを経て建設が始まろうとしている。日本からも 12 の大学・研究機関が参画し、EIC を契機に大学間連携による国際量子物理ネットワーク（IQPN）が立ち上がっている。

⑦ 社会的価値

本構想におけるプラットフォーム・ネットワーク形成は、国内外の研究者間で知識や手法を共有し、共同研究の機会を創出する。これにより、学術研究の枠を超えて幅広い分野との交流が促進され、データ解析手法や理論知識の発展が社会的・学術的価値として還元される。また、国際的な研究基盤の活用を通じ、世界で活躍できる若手研究者を輩出し、持続的な人材育成や知的資源の循環を確立する点も重要である。

⑧ 実施計画等について

国際高エネルギー量子科学フロンティアでは、ALICE、EIC、FAIR における異なる国際共同実験を横断的に統合するプラットフォームと国際ネットワークを形成する。LHC-ALICE 実験は、2022-2026 年の第 3 期運転期間および 2029-2032 年の第 4 期運転期間に大規模データ収集を行う。EIC の ePIC 実験は、2028 年頃に測定器の量産が開始され、2031-2032 年に設置・試運転、2035 年に本格実験が開始される。FAIR の WASA-FRS HypHI 実験は 2028 年、CBM 実験は 2030 年頃に本格的な実験が開始される。解析・理論協働作業を通じて、国内外の研究者の相互支援体制を整える。

各プロジェクト間で必要となるデータ処理や計算リソースは国内拠点に集約され、ALICE、EIC、FAIR の研究者が柔軟に利用可能とすることで、解析技術や計算手法の標準化、共同研究体制の効率化、国際的なノウハウの共有を実現する。人材面では、国内外の研究者や学生が異なる実験やプロジェクトに段階的に参画する「フェーズ別参画計画」を設定し、経験の蓄積と次世代研究者の育成を両立させる。

本プラットフォームの運営は、今後 5 年間で国内コミュニティを統合し、各実験の解析や理論活動の横断的協力体制を構築することを目指す。2030 年頃には、持続可能で柔軟な国際研究ネットワークを確立し、QCD 研究を牽引する人材・知識・情報の循環基盤を完成させる。

我々が海外の加速器施設で進める国際共同研究は、実験立案から建設までに約 10 年、その後のデータ取得・解析に約 20 年と、数十年単位の長期的な計画が大半を占める。こうした長期計画を持続的に推進するには、競争的資金の枠を超えた安定的な協力基盤と、国際的に連携した組織体制が不可欠である。本研究は、理化学研究所開拓研究所を中核とし、国内外の研究機関や関連分野と共に、国際共同研究を横断的に支える交流基盤の形成と、人材・知識が循環する柔軟な体制づくりを目指す。長期的な展望として、CERN、GSI/FAIR、BNL といった海外の研究拠点と緊密に結びつき、日・米・欧をつなぐ国際研究ネットワークの中で、日本が研究を牽引できる体制を築く。

協力機関は、東大 QNSI、東大 CNS、筑波大、筑波科学技術大学、広島大、奈良女子大、長崎総合科学大、佐賀大、山形大、神戸大、立教大、岐阜大、東北大、京都大、上智大、阪大 RCNP などである。これらの大学・研究機関と有機的な連携を進め、異なるプロジェクトを横断して人材と知識を共有し、持続的な協力体制を構築する予定である。また、HypHI 実験や CBM 実験は J-PARC での将来計画とも密接に関連しており、J-PARC やその利用グループとのネットワーク形成も視野に入れることで、国内外を結ぶ研究交流基盤を強化する。総経費は 40 億円を予定している。

⑨ 連絡先

齋藤 武彦（理化学研究所・開拓研究所）