

EIC 実験による物質階層構造の起源探究：クォーク・グルーオンから核子・原子核へ

① ビジョンの概要

電子・イオン衝突型加速器（EIC）を中核として、クォーク・グルーオンから核子・原子核に至る物質の階層構造を量子色力学（QCD）に基づき統一的に理解する「マルチスケール量子科学」を確立する。EIC による核子・原子核の三次元イメージングを起点に、実験・理論・計算の融合を進めるとともに、データ科学や先端量子計測技術を発展させる。量子科学・情報科学と連動した国際研究基盤を形成し、30 年先を見据えた学術と人材の新展開を拓く。

② ビジョンの内容

原子核物理学は、物質の起源と進化を理解し、宇宙における物質の創生と終焉に関する根源的課題に挑む学問分野である。物質は多様なスケールにまたがる階層的構造を持ち、原子は原子核と電子から、原子核は陽子・中性子（核子）、さらに核子はクォーク・グルーオンから構成される。これらを支配する量子色力学（QCD）は、素粒子から天体に至る物質の振る舞いを統一的に記述する基礎理論である。しかし、QCD 真空からクォーク・グルーオン、核子、原子核へと至る階層の中で、安定な核子や原子核の性質がどのように創発するのかは未解明である。

電子・イオン衝突型加速器（EIC）は、偏極電子と偏極陽子・原子核の高エネルギー衝突により、核子・原子核内部のクォーク・グルーオン構造を三次元的に高精度で可視化する。EIC は RIBF や J-PARC などの低・中エネルギー施設と相補的に機能し、核子質量やスピンの起源、原子核中の核子間相関など、物質階層構造の起源を QCD に基づいて解明する基盤となる。

本構想は、クォークから核子、原子核、さらに宇宙へと至る物質階層を統一的に理解する**マルチスケール量子科学の創設**を目指す（図 1）。EIC を核として既存の加速器施設と連携し、実験・理論・計算を統合することで、QCD に基づきクォーク・核子・原子核・物質の階層構造を結ぶ新しい研究枠組みを構築する。そのために、EIC を中心とする国際研究拠点を形成し、精密実験データと理論・計算を融合した研究を推進する。スーパーコンピュータ、AI、量子計算を活用し、実験・理論・計算の統合によって階層構造の理解を飛躍的に高める。さらに、半導体センサーやストリーミング型データ収集技術など日本の強みを活かして EIC で行われる国際共同実験 ePIC を主導し（図 2）、量子科学・情報科学と連携した新しい研究領域を切り拓く。また、東京大学 QNSI、大阪大学 RCNP、理化学研究所などが連携し、国際量子物理ネットワーク（IQPN）を通じて国内研究資源を結集する。これにより、**階層を超えた研究体制を確立し、マルチスケール量子科学を推進するとともに、新しい研究分野と次世代人材を創出する国際的研究拠点をオールジャパン体制で形成する。**

③ 学術研究構想の名称

EIC 実験による物質階層構造の起源探究：クォーク・グルーオンから核子・原子核へ

④ 学術研究構想の概要

本構想は、EIC を中核としたマルチスケール量子科学の確立を目指し、クォーク・グルーオンから核子・原子核に至る物質階層構造の統一的理解を進める研究基盤を構築するものである。東京大学 QNSI を中心とする IQPN と理化学研究所 FQSP の連携の下、約 70 名・12 機関から成る EIC 実験日本グループを基盤として研究体制を拡充し、実験・理論・計算を融合した国際共同研究を推進する。EIC と RIBF、J-PARC など国内施設との

マルチスケール量子科学の推進

- QCDでクォーク・核子・原子核・物質の階層を統一理解
- EICを核に既存加速器施設と連携し、実験・理論・計算を統合
- 階層を超えた研究体制を確立し、新しいマルチスケール研究と人材を創出

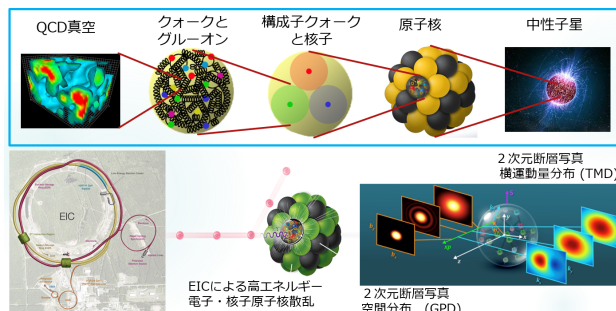


図 1 マルチスケール量子科学と EIC 実験の概要

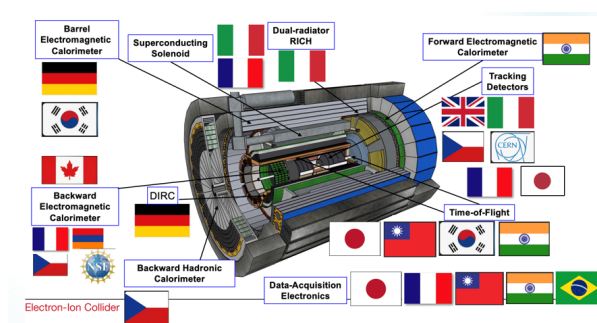


図 2 ePIC 実験と日本の貢献

連携により、低・中・高エネルギーを統合した研究フレームワークを形成する。また、高精細半導体センサー、大規模ストリーミング型データ収集、AI・HPC・量子計算を組み合わせたデータ駆動型解析技術を整備し、日本の技術を国際標準として確立する。

⑤ 学術的な意義

原子核物理学は、物質の起源と進化を理解する基礎科学である。これまでクォーク、核子、原子核という各階層ごとに研究が進展してきたが、それらを QCD に基づいて統一的に理解することは未だ実現していない。本構想は、EIC による核子・原子核内部構造の精密測定を通じて、核子質量やスピンの起源、核子間相関、非摂動的 QCD 現象などの根本問題を解明することを目指す。さらに、低・中・高エネルギー施設を統合した研究により、真空から原子核に至る物質階層の理解を進めるとともに、量子計算や AI を取り入れた新しい研究手法を発展させる。これにより、原子核物理学を基礎量子科学の重要領域として発展させる。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

日本は RIBF や J-PARC を中心に低・中エネルギー原子核研究で世界をリードしてきた。一方、EIC はクォーク・グルーオン自由度から核子・原子核構造を直接探る唯一の次世代施設であり、世界的にも重要な研究基盤として建設が進められている。国内では、東京大学 QNSI を中心に EIC 日本グループが形成され、IQPN や理研 FQSP との連携により研究体制が拡充されている。また、米国エネルギー省から日本政府に対して EIC への参加支援が要請されており、日本の半導体センサー技術やデータ処理技術が国際標準として期待されている。なお、「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」は、BNL の EIC や CERN の LHC など海外大型施設での研究活動と人材を束ねるプラットフォームとして機能する本構想とは独立した計画であり、これに対し、本構想は EIC 科学を中心とした具体的研究計画として相補的な関係にある。

⑦ 社会的価値

本構想は、物質の起源という根源的課題に挑むことで科学的知見を拡大し、社会に知的価値を提供する。EIC による研究は、量子多体系や創発現象の理解を深めるとともに、先端計測技術やデータ基盤技術の発展を促す。これらの技術は、エネルギーや医療など幅広い分野への応用が期待される。また、国際共同研究を通じて次世代研究者を育成し、日本の科学技術の国際的プレゼンスを高める。

⑧ 実施計画等について

・実施計画・スケジュール：本構想は、EIC 建設から初期運用までの約 10 年間を見据えて段階的に推進する。

2025～2027 年度（開発期）：半導体センサー（MAPS、AC-LGAD 等）、前方検出器、ストリーミング型 DAQ などの検出器・データ基盤技術を開発し、国際共同実験 ePIC への実装を進める。

2028～2032 年度（建設期） 実験装置の建設と試験を進め、国内研究拠点と国際研究機関の連携を強化する。

2030 年代前半（運用開始）：EIC の初期実験を開始し、核子・原子核の三次元構造測定を通じて物質階層構造の研究を本格化する。

・実施機関と実施体制：東京大学クォーク・核物理研究機構（QNSI）を中心に、大阪大学 RCNP、理化学研究所、国内大学・研究機関からなる EIC 日本グループ（国内の研究者約 50 名・12 機関）によって推進される。IQPN を通じて研究者交流と共同研究を促進し、様々な国際研究機関との連携の下で EIC 実験を推進する。

・総経費 95 億

・所要経費

設備費・装置費（50 億円）：ePIC 実験用の高精度半導体検出器（MAPS、AC-LGAD、ZDC カロリメーター）の開発・製作、組立・計測設備、ストリーミング型 DAQ および GPU 計算基盤の整備に充当する。これらの技術は RIBF や J-PARC など国内施設への展開も図る。

人件費（25 億円）：ePIC 実験、QCD 理論・計算研究、マルチスケール量子科学の推進のため、大学および理化学研究所において PI、博士研究員、技術スタッフを配置する。

運営費（20 億円）：BNL・JLab 拠点の運営、国際共同研究の旅費・招聘、研究会開催、国内実験施設やクリーンルームの維持、検出器・計算基盤の保守、IQPN による国際連携の運営に充てる。これにより、EIC を中核とする国際研究基盤を整備し、物質階層構造の理解と次世代研究者育成を推進する。

⑨ 連絡先

中村 哲（東京大学大学院理学系研究科附属クォーク・核物理研究機構）