

中間報告に向けたディスカッションペーパー

1. 今後の我が国の原子核物理学は、どのような新たな展開を目指すか？

○原子核物理学を起点とした、日本発・主導の新たな学問領域の創成

- 量子物理学は、クォーク・核子・原子核、原子・分子、凝縮系（液体・固体）、天体・宇宙までの各階層に適用されて、**それぞれの階層での理解**が進んできた。一方、連星中性子星合体からの重力波・電磁波放出、物質中における量子もつれの定量化、強相関電子系における高温超伝導の発現やその輸送現象（スピンや電荷の流れ）等、**各階層の理解だけでは解決できない問題が山積しており、複数の階層にわたる理解が不可欠**となっている。
- 原子核物理学**は、物質の創成と進化の解明を目指し、量子色力学（Quantum Chromodynamics, QCD）を基礎理論、素粒子（クォークとグルーオン）を基本単位として、核子（約 10^{-13}m ）から中性子星（約 10^4m ）までの**広い階層の量子ダイナミクスを研究する学問**である。
- このような特性を有する**原子核物理学を起点**として、理論、実験、計算科学を融合したアプローチにより、様々な階層を超える量子ダイナミクスの普遍的な法則の解明を目的とする「**マルチスケール量子ダイナミクス研究**」の**創出**を目指す。
- 具体的には、以下の事例のように、原子核物理学の概念・理論・数理・実験手法・技術を階層横断的に活用することで、**様々な階層の量子多体系に対して、根源的な概念や法則性を与える**ことが期待される。

| 原子核物理学 | 他の階層への展開 |
|--------------------------------|------------------------------|
| 原子核反応機構の解明 | 非平衡量子系の普遍的性質の抽出 |
| 格子 QCD 第一原理計算による核力の解明 | 量子多体系の動的構造形成への応用 |
| ハドロンやクォーク・グルーオン物質の内部構造解明 | 非摂動効果が本質的な役割を果たす強相関量子多体系への応用 |
| ハドロン多体系からクォーク・グルーオン多体系への相転移の解明 | 相転移現象の普遍的性質の抽出 |
| QCD におけるトポロジカル現象の解明 | 原子・分子や電子系におけるトポロジカル量子物質への応用 |

- 「マルチスケール量子ダイナミクス研究」創出による、**原子核物理学の振興**により、その科学的意義に加え、社会に直接的な影響を与える分野への貢献が期待される。具体的には、以下のような貢献が見込まれる。
 - ① **医療分野への応用**：原子核物理学の知見を活用することで、がんやアルツハイマー病の診断・治療等の医療技術の発展に寄与する。
 - ② **産業界へのイノベーション創出**：原子核物理学の研究を通じて開発された先端

技術や分析手法は、材料開発、量子情報、非破壊検査、品種改良等の幅広い産業分野に応用可能であり、イノベーションの創出に貢献する。

- ③ **将来のエネルギーの安定供給**：原子核物理学は、核融合等の次世代エネルギー技術の基礎となる学問であり、その発展は将来のエネルギーの安定供給に不可欠である。
- ④ **人材育成**：原子核物理学の研究を通じて、高度な専門知識と俯瞰力を有する人材が育成される。これらの人材は、幅広い分野で活躍することが期待される。

○エネルギー分野のイノベーションへの貢献

(エネルギー変換の根源的理解)

- 核子（陽子/中性子）・原子核の**質量の約99%はクォーク・グルーオンの量子色力学的な相互作用（量子ダイナミクス）と、質量とエネルギーの等価性（ $E=mc^2$ ）から生じている**と考えられている。**核子・原子核の3次元内部構造**（クォーク・グルーオンの空間分布・運動量分布）を明らかにすることで、クォーク・グルーオンの量子ダイナミクスを理解し、**核子・原子核の質量の起源を解明**する。
- 原子核状態からクォーク・グルオン・プラズマ状態へのエネルギー変換機構に本質的な原子核中の**グルーオン飽和**（高エネルギーでのグルーオン数の平衡状態）の**性質を解明**する。

(エネルギー分野との連携・波及)

- **核融合プラズマとクォーク・グルーオンプラズマ（QGP）**はいずれも、粒子と波が複雑な非線形相互作用する多体系であり、**共通の数学的構造**を背後に持つ。
- QGP 研究では、重イオン衝突→初期の熱化過程→非平衡プラズマの時空発展とプラズマ中の高速粒子伝搬→QGP のハドロン化までを統一的に記述する動的モデルの開発と大規模数値シミュレーションが進められている。そこでのモデル構築や計算手法は**核融合炉における燃焼プラズマの動的シミュレーションにも将来応用**が期待できる。
- QGP 研究を通じて、非平衡開放系の普遍的な輸送現象（熱・粒子の拡散）やダイナミクスを解明し、**核融合プラズマの制御・安定化**を可能にすることにより、**核融合エネルギーの実用化への貢献**が期待できる。
- サブアトム物理学の量子シミュレーション計算手法である AMD 法（反対称化分子動力学法）等を用いることで、重水素-三重水素反応を超える**先進燃料核融合として期待される陽子-ホウ素反応等について、核融合の反応率やエネルギースペクトル等の精密な予測**が可能になる。
- 共同研究や人材の流動等を通じて、原子核物理と核融合の研究を新たなフェーズで融合して、エネルギー分野のイノベーションにつながる基礎学理の創出を目指す。

- 核融合実験と原子核実験は、超伝導マグネット、センシング、ビッグデータ処理等、**要素技術や分析手法が共通**であり、**相乗効果による発展**（核融合プラズマのモニタリング、核融合炉の高性能化・安全性向上への貢献）が期待できる。

○量子分野のイノベーションへの貢献

（量子ダイナミクスの根源的理解）

- 量子コンピュータと原子核ダイナミクスは、「非平衡量子開放系科学」として共通の課題を持つ。例えば、量子コンピュータ実用化に向けた課題のひとつが**誤り訂正**であるが、誤りは量子ビットと外部環境の相互作用によって引き起こされる。QGPのプラズマ診断（温度や密度の測定）では、量子もつれ状態にある重いクォーク・反クォーク対と外部環境（QGP）との相互作用を利用する。このような**原子核物理の研究を通じて、階層を超えた量子もつれのコヒーレンス・デコヒーレンス機構の解明**に貢献する。
- 冷却原子・分子の量子もつれ状態を用いた電子の電気双極子モーメント（EDM）測定等、**原子核物理の実験では極めて高い精度のセンシング技術が必要**とされており、原子核物理の実験を通じて、**新たな量子センサー等の量子技術の開発に貢献**する。
- EICにより、非自明なトポロジカル構造を持つ真空の性質の研究が可能となり、トポロジカル絶縁体等の**トポロジカル量子系の研究への貢献**（重イオン衝突によるカイラル磁気効果の検証が、物性分野のカイラル磁性体研究に貢献等）が期待できる。
- 共同研究や人材の流動等を通じて、原子核物理と量子分野の研究を新たなフェーズで融合して、量子分野のイノベーションにつながる基礎学理の創出を目指す。

（量子分野との連携・波及）

- スーパーコンピュータ開発に格子QCD計算が貢献を果たしてきたように（例えば、IBMは、BNLとQCD専用計算機を共同開発し、Blue Gene/Lとして商用化した）、**QCDに代表されるゲージ理論の量子計算に関する研究**や、核子の少数量子多体系の厳密計算は、**量子コンピュータのアルゴリズム開発を促進し、量子アドバンテージの実証に貢献**することが期待できる。
- 量子計算において**誤り訂正は重要な課題**であるが、誤り訂正の最も有名なモデルであるトーリックコードモデルは、QCDと関連深い \mathbb{Z}_2 格子ゲージ理論と等価であることが知られており、量子計算の研究に**格子QCDの手法や人材が大いに貢献**できる（QCDの理論研究者が、**量子計算の分野で即戦力**となっている事例は多い）。
- EIC実験で得られる大量の測定データの解析には、大規模なデータ処理が必要であり、**量子コンピュータや量子アルゴリズムの開発・活用**が進む可能性がある。**量子コンピュータのスケラビリティ向上**のために、モジュール化や量子ネットワークが検討されている。量子ネットワークでは、**量子通信と古典通信のハイブリッドシ**

システムが必要であり、古典的なネットワーク技術が不可欠である。**ストリーミング型データ収集システム**の概念や**基盤技術は量子コンピュータ開発**に示唆を与える可能性がある

2. 原子核物理学の新たな展開に、EIC 計画をどのように活用するか？

○EIC で期待される科学的成果

- ① 原子核物理学における最重要課題のひとつが核子・原子核内部のクォーク・グルーオン構造の解明。EIC は、解像度、時間分解能、強度の観点から人類が手にする「**究極のフェムトスケール電子顕微鏡**」。EIC の目標は、1 次元的な情報しか得られなかったこれまでの実験から大きく飛躍し、**核子・原子核内部の 3 次元構造**（クォーク・グルーオンの空間分布や運動量分布）を**実験的に解明**すること。
- ② これにより、**核子の質量やスピンの起源を解明**する（陽子の質量の 99% はクォーク・グルーオンの量子エネルギーや核子の周りの真空構造の変化に由来すると考えられている。また、陽子のスピンへのクォークによる寄与は 3 割程度であり、残りはクォーク・グルーオンのスピンや軌道角運動量であると考えられている）
- ③ QCD の非線形性（グルーオンの自己相互）に由来する、**グルーオン凝縮**（QCD の真空）や**グルーオン飽和**等の新たな状態の発見やそれらの創発的物性を解明する。

○EIC の科学的成果の波及

- ① **宇宙物理学への波及効果**：EIC による核子・原子核の 3 次元構造（クォークとグルーオンの空間分布と運動量分布）の解明により、**宇宙における物質の起源と終焉の解明**（宇宙初期に QGP から核子が生成される機構や、中性子星内部でハドロンの融解とクォーク物質が生成される機構）の理解が大きく進展することが期待できる。
- ② **ハドロン物理学への波及効果**：EIC における核子・原子核の 3 次元構造の解明により、**ハドロンの内部構造に関する普遍的理解や短距離でのハドロン間相互作用の解明**に波及する。
- ③ **計算科学（古典、量子）への波及効果**：EIC で生成される核子・原子核の構造に関する実験データの理論的解釈にむけた格子ゲージ理論の大規模モンテカルロ計算や量子計算のアルゴリズム開発の進展により、**次世代スパコンの開発や量子計算機開発、量子古典ハイブリッド計算手法の開発**に波及する。
- ④ **核融合科学への波及効果**：EIC による非平衡開放系としての輸送現象（グルーオン飽和中のパートン伝搬等）の解明は、**核融合炉運転に本質的な α 粒子加熱など非線形な粒子と場の相互作用の理解を促進**する。また、カラー分子動力学に基づく QCD の時間発展の量子計算手法開発は、**先進燃料核融合反応の量子計算手法開発**に寄与する。
- ⑤ **物性科学への波及効果**：原子核の高エネルギー極限であらわれるカラーガラス凝縮

(グルーオン飽和。生成消滅するグルーオンのガラス状態)の解明は、物性科学における新規な量子ガラス状態の研究に波及する。

○マルチスケール量子ダイナミクス研究へのEICの貢献

- ① **量子強靱性**：陽子の形成機構の解明を通じて、安定した量子性を持つ物質の開発や量子コンピュータの実用化に貢献
- ② **量子多体系の創発ダイナミクス**：核子の3次元構造の解明を通じて、真空から核子、原子核、中性子星などの階層が創発する普遍的機構を解明し、巨視的スケールの量子現象の実現に貢献
- ③ **量子開放系の非平衡現象**：QCD特有のグルーオン飽和環境における高エネルギー粒子の伝搬を解明することにより、強相関非平衡開放系に関する普遍的な理論を構築

○我が国の戦略

日本グループは、ePIC共同実験に参加し、我が国の強みである半導体技術とデータ収集技術を活かして、以下の測定器・システムを担当予定(実験を主導するポストは獲得)。

- ① **TOF：粒子を同定する高時間分解能センサー** 核子・原子核の内部構造の測定には、クォークの種類を同定することが必要。先行実験(HERA)よりも格段に優れた粒子同定用の測定器を設置し、**EICが初めて高精度で粒子同定を行う**
- ② **ZDC：事象を判別する高空間分解能の半導体センサー** 核子内部のクォーク・グルーオンの空間分布を測定するには、最前方方向に散乱される陽子や中性子のエネルギーを正確に測定することが必要。**EICで初めて高精度で測定されるものであり、EICで最も重要な測定器**
- ③ **DAQ：スケーラビリティのある「ビッグデータ収集×リアルタイム高度解析」システム** ePIC実験では、毎秒50万回の衝突が起こる。測定器から出力される総データレートは400Tbpsに達し、これらのデータをすべて収集する。収集したデータを、ハードウェア加速演算装置とAI技術を使って遅延なくリアルタイムで再構成し、反応事象を可視化する。ストリーミング型データ収集システムを採用することで、実験環境や規模の変化に柔軟に対応できるアーキテクチャを実現し、**高度なスケーラビリティを獲得**する。この新しいシステムをePIC実験に実装し、**将来の原子核実験のデータ収集システムの世界標準となることを目指す**。
 - 日本グループは①～③を担当し、**データ解析と物理成果の創出を主導**する。
 - ①～③のいずれも純国産の基盤技術を用いており、国際共同実験であるePIC実験に参加し、実装することで、**我が国の基盤技術を国際標準化する契機**とする。
 - 米国からは、KEKが高い技術(クラブ交差等)を持つことから、**加速器本体への協**

力（金銭ではなく、技術面でのアドバイス等）に強い期待があることから、可能な協力の在り方について、研究者間でのコミュニケーションを継続する。

○我が国の強みの更なる強化

- 我が国には、低エネルギーの原子核実験施設である RIBF と、中間エネルギーの原子核実験施設である J-PARC があり、国内に一定の研究コミュニティが存在する。
- 従来、エネルギー階層を超える交流は多くはなかったが、**EIC は低エネルギーから高エネルギーまでの階層を超えた解析装置**であることから、EIC 計画への参加を契機として、国内の研究コミュニティが一丸となり、**クォーク・グルーオンから第一原理により原子核のダイナミクスを理解することを目指した取組を進める**。
- この取組により、**階層を超える新たな学理を創出し、量子やエネルギーに関する根源的な理解等、原子核物理学に新たな価値を与える**。また、各階層における**研究の価値を最大化**するとともに、**量子非平衡系科学等の新たなサイエンスを開拓**する。

○我が国の産業への波及等

- 最先端の加速器実験は、新たな技術を産み出すとともに、その技術実証の場であり、**社会実装前のテストベッドとして加速器実験を活用することは極めて有益**である（例えば、CMOS センサーを改良し、100%の検出効率・高放射線耐性・高空間分解能・高時間分解能を持つ CMOS センサーが加速器実験のために開発されている）。
- ePIC 実験に向けて、大量データを取得し、即時データ解析し、理論に基づく大規模計算と比較し、**直接見えない核子内部のクォーク・グルーオンの3次元構造を再構成**することを可能とする**新たなデータ収集・分析システムを開発**する。
- この**直接見えないものを可視化する技術**は、ナノスケール構造解析等で幅広く応用できる技術であり、それを活用できる人材育成にもつながる。
- データの重要な相関をありのまま伝える「マルチメッセンジャー」として**サイエンスの研究方法を革新し、新たな発見をもたらす可能性**を秘めている。また、自動運転等の産業技術への応用も期待でき、我が国が目指すサイバーフィジカルが融合した **Society 5.0 の実現にも大きく貢献**することが期待できる。
- EIC 実験による発見を通じて、**核子・原子核を能動的に直接制御**することが可能となれば、以下のような革新的な技術が産まれる可能性がある：
 - ① 核融合反応の制御技術の向上による、**安定かつ持続可能な核融合発電**の実現
 - ② 希少元素や同位体の効率的な生成による、**新素材や医療用アイソトープの製造**
 - ③ 量子状態の精密な制御による、**革新的な量子計算技術**の開発

3. どのような体制で EIC 計画に参画するか？

○大学・研究機関等の幅広い分野のコミュニティの連携

- 理研は、BNL に EIC 拠点を整備し、測定器建設やストリーミング型データ収集システムの実装、日本人研究者の受け入れ支援を行う。新たな視点で量子を基礎に立ち返って見直す「マルチスケール量子ダイナミクス研究プログラム（仮称）」を立ち上げて、その中核として EIC 計画を推進。
- 大学は、国内のアカデミアの知を集約し、優秀な人材を確保し BNL に派遣するとともに、技術の国際標準化を主導。EIC 計画を推進するクォーク・核物理研究機構を東京大学に本年 7 月に設置予定。大阪大学核物理研究センター（国際共同利用・共同研究拠点）との大学間連携により、オールジャパンで大型国際研究を推進する体制「国際量子物理ネットワーク拠点」（ネットワーク型国際共同利用・共同研究拠点を旨す）を構築。共同利用・共同研究拠点の機能を活かし、エネルギーや量子などの関連分野も含めた多様な大学・研究機関の参加を促していく。
- 汎用な高速・高効率ストリーミング型データ収集システムを開発するために SPADI Alliance（約 130 人が参加）を強化し、組織的に技術を開発し継承する体制を構築。
- NPC（Belle II 実験に個人で参加できる仕組み）や SPADI Alliance の取組を参考に、所属組織の規模に関わらず、研究者が EIC 計画に参画しやすくなる仕組みを構築。

○関連人材の育成

- 量子技術（量子コンピュータ等）や核融合（フュージョン・エネルギー）の分野は、近年急速に民間の投資が拡大してきたこともあり、研究開発を担う人材の育成や確保が課題となっている。
- 原子核物理学と量子技術・核融合は、学問としての共通性や、用いる技術・装置の共通性が高く、きわめて親和性の高い分野である。
- 原子核物理学と量子技術・核融合の分野の間で、連携して人材育成に取り組み、分野間で人材を流動できるように、合同での研究者間交流のためのワークショップや若手・大学院生向けのサマースクール等を開催する。

4. EIC 計画への参画に要する経費は妥当か？

精査中

【参考】資料 1-3 郡司先生発表資料から抜粋

- ◆ 建設費（2025 年～2030 年）：総額 45 億円程度
- ◆ 運営費（2025 年～2030 年）：年間 7 億円程度
- ◆ 運営費（2031 年～2050/2060 年）：年間 10 億円程度