

EIC計画が切り拓く 原子核物理学の 新たな地平

郡司 卓

EIC-EPIC実験執行部委員、EIC-EPIC日本機関代表
東京大学大学院理学系研究科原子核科学研究センター

Electron-Ion Collider



- ▶ EICは、原子核3階層*に飛躍的な新知見をもたらす
- ▶ EICの意義：
 - *原子核の3階層：クォーク・ハドロン・原子核
 - ▶ クォークとグルーオンのダイナミクスから原子核に至る新しい知見
 - ▶ 量子技術やイノベーション創成に繋がる基礎学理の探求
 - ▶ 波及性の高いビッグデータ収集技術と次世代量子技術の確立
- ▶ 国際的な戦略：
 - ▶ 各国が予算をつけ始めている。日本は、EICの成功を握る測定器やシステムを担当し（TOF/ZDC/DAQ）、その後の物理解析を主導し、物理結果を早期に創出する
- ▶ 組織体制：
 - ▶ 東大QNSIと阪大RCNPを中核とする大学間連携と理研の体制を構築中
 - ▶ 人材育成およびEIC推進のために理研と大学側との連携体制を構築中
 - ▶ アジア間の連携

▶ 前回会議（5月15日）における主なご意見への返答

原子核物理学の新たな展開について

- Fundamental Quantum Scienceと、EICの測定器、加速器への貢献の関係性を明確にする必要がある。
- ① ○ 原子核研究を推進することが、量子コンピューターの発展にも資することだが、もう少し丁寧な説明が必要。
- 核融合とかフュージョンエネルギー研究にも資することだが、原子核の知識を応用できるところはどのようなところか。
- ② ○ 原子核分野と他分野との連携、そのような計画に若手研究者が携われることの意義はすごく大きいと思うが、日本全体の教育・研究全体のマネジメントをどのような体制で行うのか

①-A

①-B

①-C

②

EIC計画について

- 測定器に関する金銭的・人的・技術的な貢献など、日本が期待されていることは何か。
- ③ ○ 前身の計画であるRHICで分からなかった部分で、EIC計画を推進することでクリアになる点はどこか。
- 本計画に参画するに当たっては、日本へのリターンという視点も重要かと思うが、EICの中で、日本主導で検出器を開発すれば日本が物理学の成果も取れるものなのか。

③-A

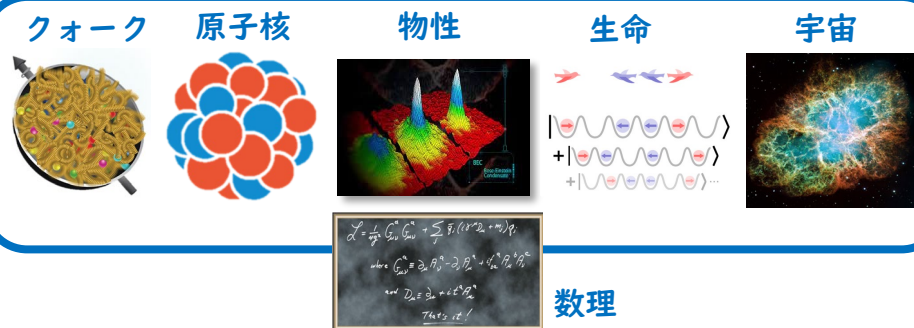
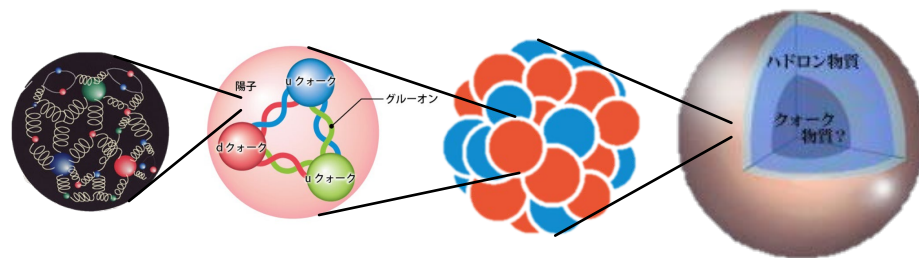
③-B

③-C

- ▶ Q : Fundamental Quantum Scienceと、EICの測定器、加速器への貢献の関係性を明確にする必要がある。
- ▶ A : FQSでは、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が重要である。EICは、理論、実験、計算科学を融合したアプローチにより、核子・原子核内部の3次元構造を解明し、量子色力学の精密な理解や核子から中性子星に至るマルチスケール量子ダイナミクスの創発メカニズムを明らかにすることで、FQSに貢献する。EICでの実験的研究を国際的に先導するためにePIC実験に参加し、測定器の建設を担当する。加速器技術への期待もあるが、今後、検討する。

▶ Fundamental Quantum ScienceとEICの関係性

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、核子から中性子星までの広い階層の量子ダイナミクスを研究



原子核物理学を起点として「クォーク～原子核～物性～生命～宇宙」の階層にまたがる「マルチスケール量子ダイナミクス」研究を創出

量子ダイナミクスの普遍的な法則の解明とエネルギー制約をはじめとした社会課題解決に貢献

EICでは、理論、実験、計算科学を融合したアプローチにより、核子・原子核内部の3次元構造を解明

→ 量子色力学の精密な理解、新たな有効自由度と階層構造の発現の理解

→ 階層間をつなげる普遍的な性質の発見につながる可能性

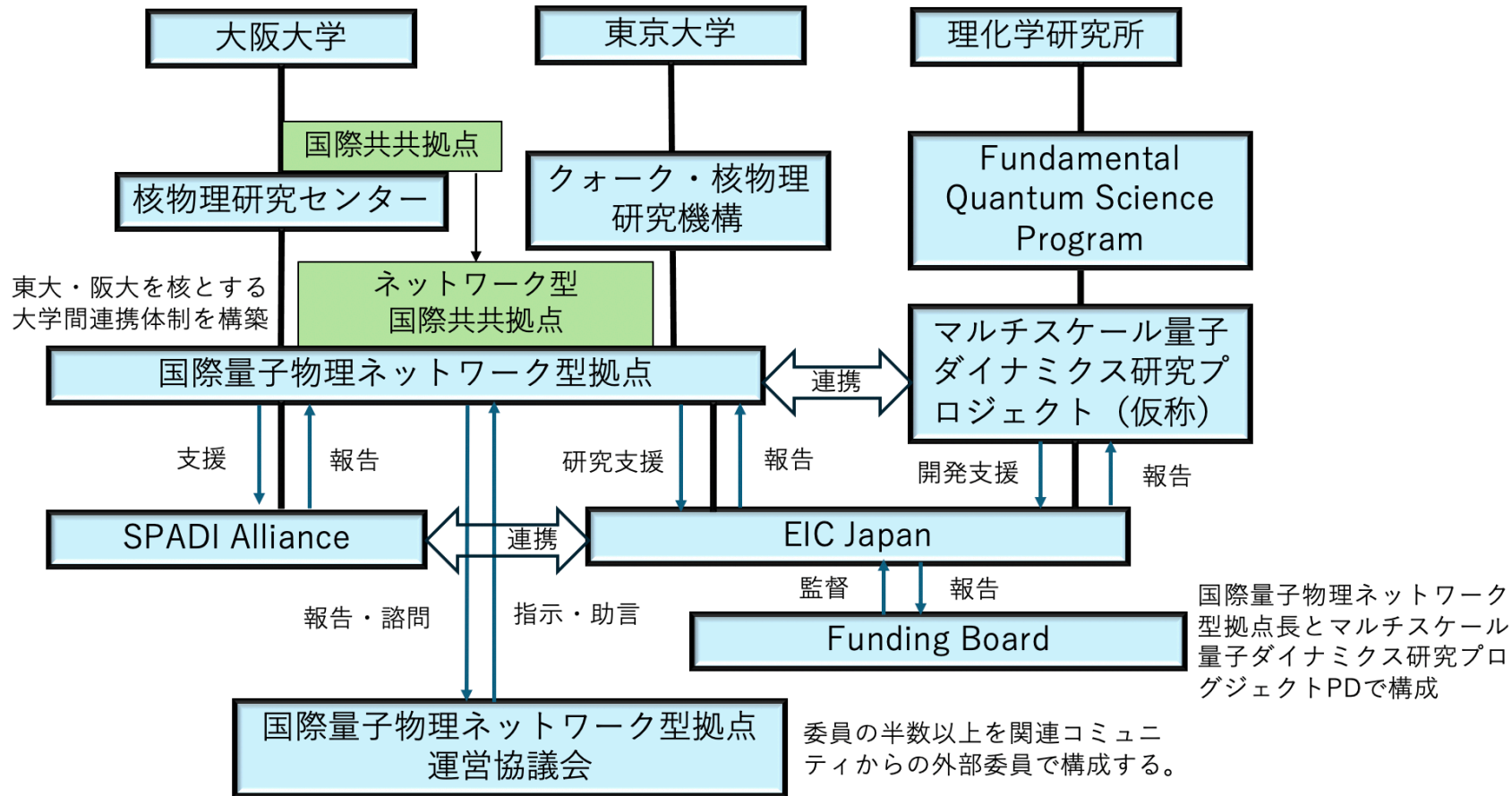
- ▶ Q：原子核研究を推進することが、量子コンピューターの発展にどのように貢献するのか。
- ▶ A：原子核物理学と量子技術の間には高い親和性と共通の課題（スケーラビリティ、エラー訂正）がある。原子核物理学の研究を通じて量子コンピュータのアルゴリズム開発や量子アドバンテージの実証に貢献できる可能性がある。
 - ◆ 核融合・核分裂の量子計算アルゴリズム開発
→量子コンピュータによる実用研究（化学計算や創薬等）の加速
 - ◆ 格子ゲージ理論の基礎研究
→量子計算の誤り訂正機能の開発。量子計算分野の高度人材供給
 - ◆ ビッグデータ収集 × 即時高度計算
→ スケーラビリティのある量子-古典ハイブリッドアーキテクチャ。
特に、量子計算の診断データ処理・制御系

- ▶ Q：核融合とかフュージョンエネルギー研究にも貢献しているが、原子核の知識を応用できるところはどのような点であるか。
- ▶ A：非平衡開放系における輸送現象の解明や、QCDの実時間量子計算手法の開発が、核融合炉運転の理解や先進燃料核融合反応の量子計算手法の進展に寄与する。
 - ◆ 核反応機構と新しい共鳴現象の解明 → 新たな核融合チャンネルの開拓
 - ◆ パートンとカラーグラス凝縮の相互作用 → 核融合炉における α 粒子加熱
 - ◆ 分子動力学(AMD)による核反応の量子計算
→ 先進燃料核融合($p+{}^{11}\text{B}\rightarrow 3\alpha$)の反応率
 - ◆ 「ビッグデータ収集 × 即時高度計算」
→ 核融合プラズマのモニタリングと制御
 - ◆ シミュレーション技術、超伝導技術、イオン源技術、検出器技術、核データ

- ▶ Q：日本全体の教育・研究全体のマネジメントをどのような体制で行うのか。
- ▶ A：理研に「マルチスケール量子ダイナミクス研究プロジェクト（仮称）」を立ち上げて、その中核としてEIC拠点を構築する。東京大学では、EICを推進するクォーク・核物理研究機構(QNSI)を設置し、東京大学QNSIと大阪大学RCNPが中心となって「国際量子物理ネットワーク拠点」を構築する。NPC等を参考にして、個人でEIC計画に参加できる仕組みの構築を検討する。理研と国際量子物理ネットワーク拠点が連携し、拠点のマネジメントを行う。

② マネジメント体制

▶ 組織体制の案



国際量子物理ネットワーク型拠点：色々な大学と研究機関が持つ研究・教育基盤とデータハンドリング・計測技術を国際標準化し、オールジャパン体制で世界規模の大型研究を牽引することが可能なネットワーク型の研究拠点

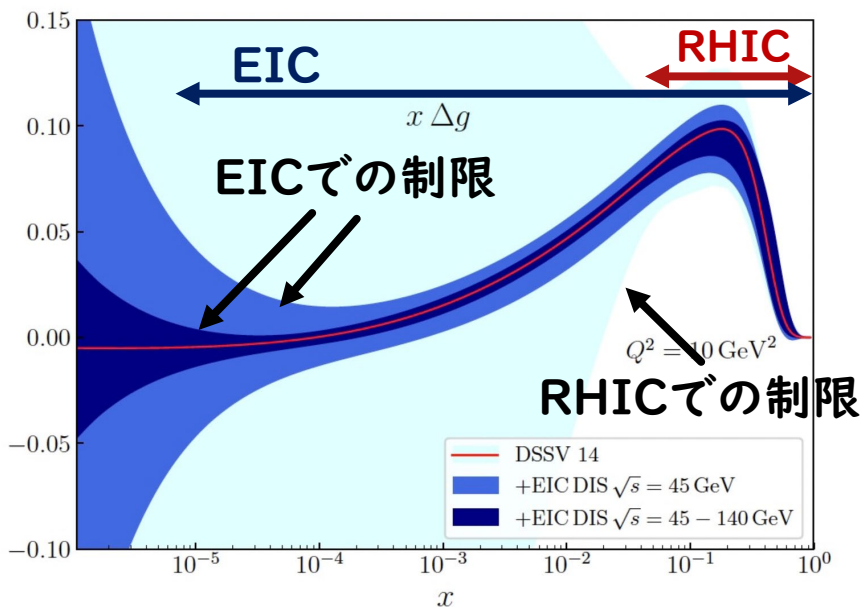
- ▶ Q：測定器に関する金銭的・人的・技術的な貢献など、日本が期待されていることは何か。
- ▶ A：日本グループは測定器・システムの一部を担当し、先端技術の国際標準化を目指すことが期待されている。測定器の基盤技術は日本にある（半導体センサー、ストリーミング型データ収集データ収集）。また、KEKの加速器技術への期待もある。RHICで培った研究力やRBRCを通じた国際頭脳循環に対する期待も大きい。
 - ◆ 建設費（2025年～2030年）：総額45億円程度
 - ◆ 運営費（2025年～2030年）：年間7億円程度
 - ◆ 運営費（2031年～2050/2060年）：年間10億円程度

物理実験の開始は2033年

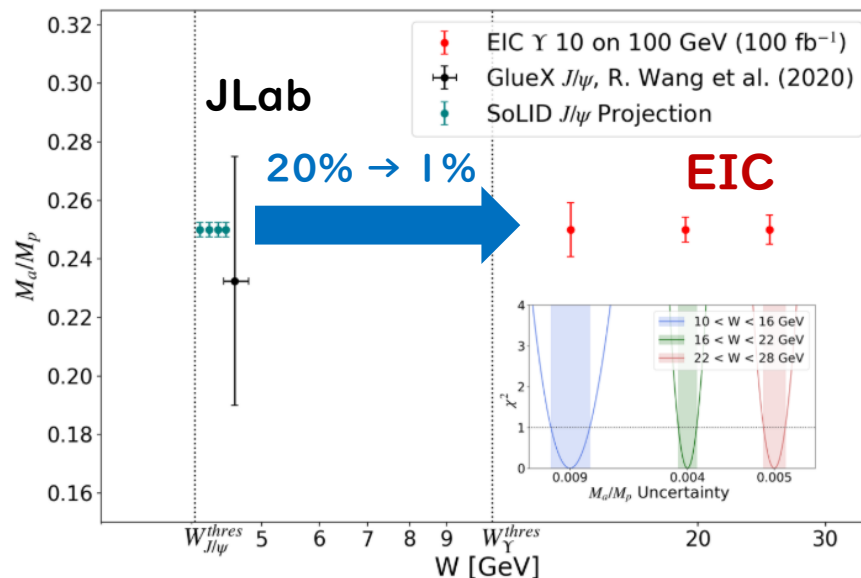
③-B RHICからの飛躍

- ▶ Q：前身のRHICで分からなかった部分で、EIC計画を推進することでクリアになる点はどこか。
- ▶ A：スピンに関する研究では、低運動量のクォークとグルーオン分布に大きな不定性があった。EICではクォーク・グルーオン分布関数を広範な運動学領域で高精度に測定することにより陽子の質量やスピンの起源を解明できる。

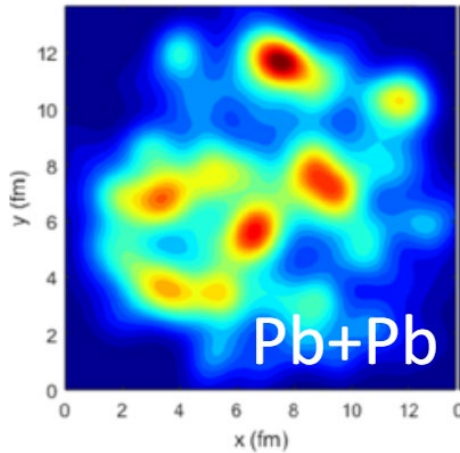
グルーオンスピン



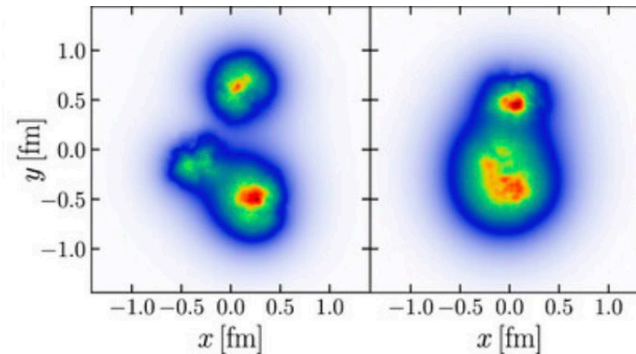
質量 (グルーオン凝縮による割合)



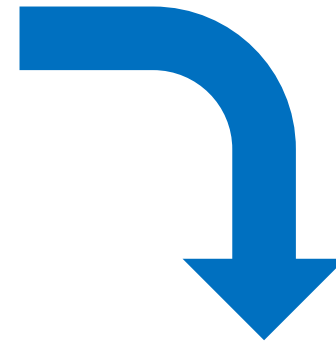
初期条件：グルーオン飽和と量子揺らぎ



鉛原子核

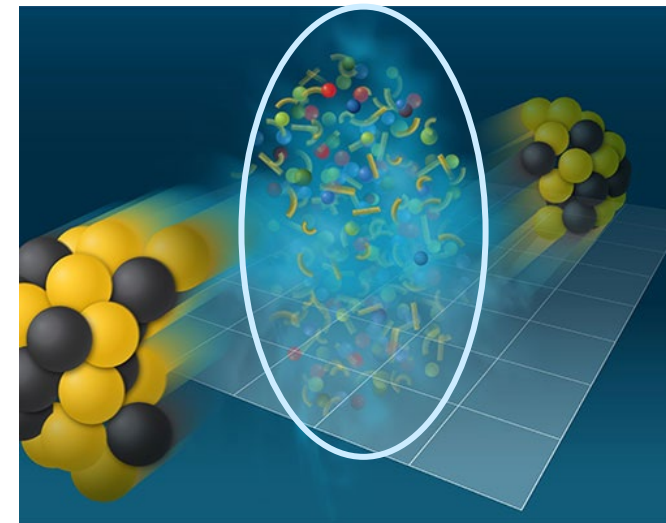


陽子



QGP

EICではプラズマ生成の初期条件に重要な原子核におけるグルーオン飽和状態の性質が解明できる。
クォークグルオンプラズマの生成機構や物性の解明に重要



- ▶ Q：本計画に参画するに当たっては、日本へのリターンという視点も重要かと思うが、EICの中で、日本主導で検出器を開発すれば日本が物理学の成果も取れるものなのか。
- ▶ A：データ解析と物理成果の創出を主導するためには、日本グループが測定器の一部を担当することが必要条件である。計画の鍵となる測定器を担当することで発言権が増す。

日本グループが担当する検出器：

TOF検出器→クォークの3次元分布のフレーバー依存性

ZDC検出器→クォークやグルーオンの空間分布測定

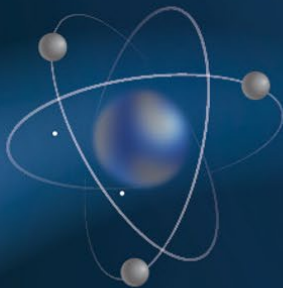
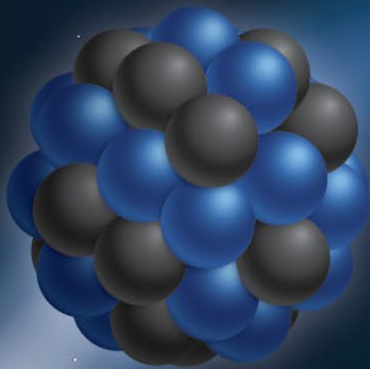
ストリーミング型データ収集→EICのすべての物理成果の基盤

核物理コミュニティへの貢献

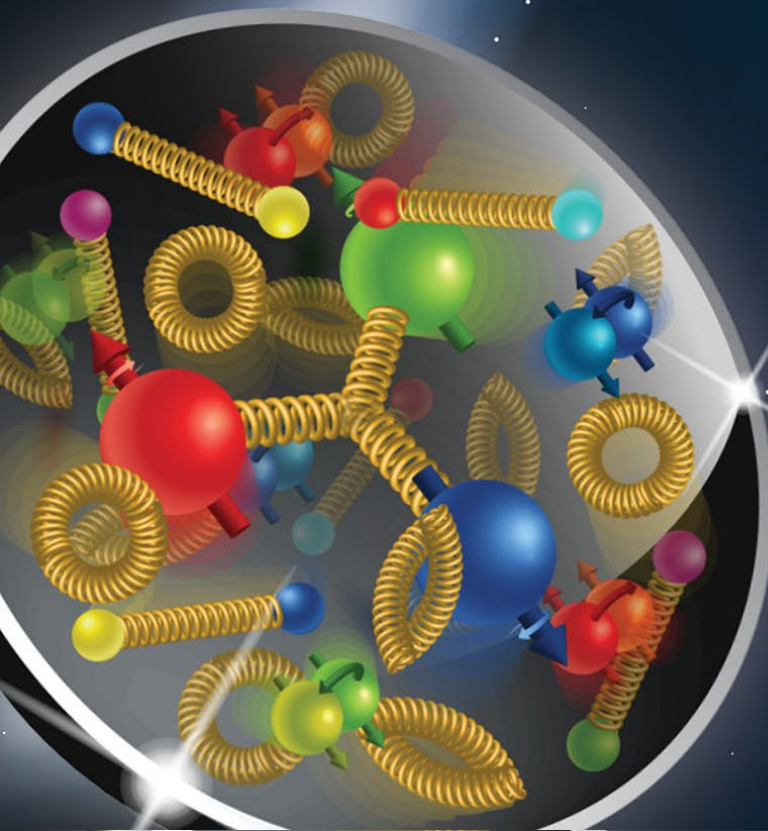
- ▶ 国際的な研究ネットワークの強化による国際頭脳循環の促進
- ▶ 国際標準化によるデータ収集システムや測定器等、先端技術開発の効率化と技術継承
- ▶ 階層を超えて成り立つ普遍性や一般性の理解による新たな学理の創出

マルチスケール量子ダイナミクス研究への貢献

- ▶ 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
- ▶ 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
- ▶ 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



補足資料



Electron-Ion Collider

▶ 「マルチスケールの量子ダイナミクス」

- ▶ 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し、複雑な量子系の本質的な理解を目指す
 - ▶ 原子核反応機構 → 非平衡量子系の普遍的性質の抽出
 - ▶ 格子QCD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 → 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 → 量子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量子現象 → 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
 - ▶ 最先端の加速器・実験技術 → 他の階層の実験技術への応用、社会実装

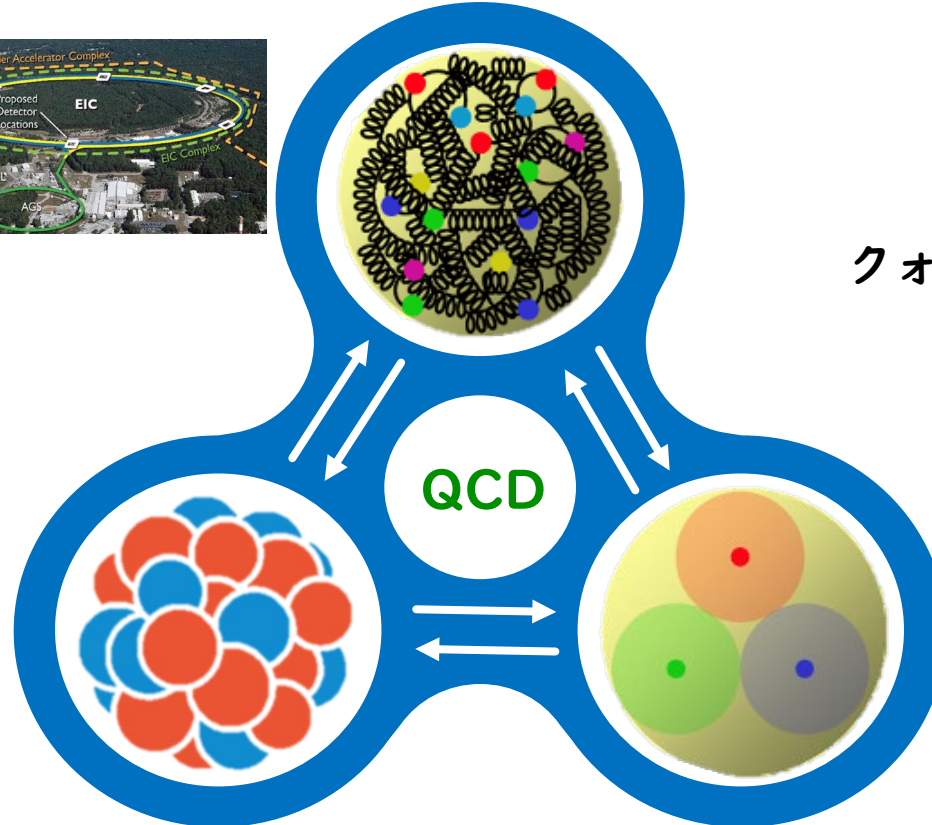
原子核物理は、様々な階層の量子多体問題に対し根源的な概念や法則性を与えうる極めて重要な役割を果たす。原子核物理の振興により、医療分野への応用、産業界へのイノベーション創出、量子計算を含む新たな量子科学、将来のエネルギーの安定供給等への貢献を果たし、課題解決に取り組むマルチスケールな人材育成を行う。

◆クォーク～原子核までの融合的な研究

- ◆異なる階層で共通に成り立つ性質や概念によって、現象の理解が深まり、新たな洞察が得られる

クォーク・核物理研究機構
(R6に理学系研究科に設置予定)

高エネルギーQCD部門



クォーク多体系部門



核子多体系部門



大学間連携により核物理の革新を目指す国際量子物理ネットワーク型拠点



1. 大阪大学と連携し、国際量子物理ネットワーク型拠点を形成
2. 国際大型プロジェクトEIC計画の推進と拠点の機能を実装
3. コミュニティーとの連携により、オールジャパン体制による国際的な研究を主導する体制を確立
4. SPADI-AllianceやEIC-日本グループが開発するデータ収集系や先端半導体センサー技術の国際展開
5. 原子核物理学を中心とした、未来の社会基盤に繋がる量子物理や量子技術の探求
6. 原子核物理の新しい展開により学生や若手研究者を惹きつけ、将来のアカデミックリーダーを育成
7. 国際的な量子研究のトレンド創出