

中間報告に向けたディスカッションペーパーに対する御意見

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？

○御意見

- 世界の原子核物理学の研究動向は、LHC ALICE 実験を中心として進められている高エネルギー重イオン衝突反応による高温のクォーク・グルーオンプラズマの研究を一つの大きな軸として進められている。衝突初期における熱化のメカニズムなどの未解明なテーマを残しながら、高温における QGP の様子が徐々に解明されるにつれて、有限密度下での様子が次の興味もたれてきている。ハドロン物理においては、ストレンジネス・ハドロンについて我が国の J-PARC においてトップクラスの研究が進められており、Super-KEKB、LHC-B, JLab などの加速器実験で行われている異なるフレーバー自由度に拡張しながら、新しいハドロンの探索（チャームの入ったテトラクォーク）チャームの入ったペンタクォーク、グルーボール、）などが行われている。原子核物理学におけるもう一つの特徴ある研究テーマは、不安定原子核ビームを使った中性子過剰な不安定原子核の核構造研究がある。我が国でも理研に RIBF が稼働しており、これまで原子核魔法数の消失などの研究が進められてきている。今後も適切なアップグレードを行うことで、中性子過剰な領域に向けて、研究が着実に広げられていくと期待される。最近になって注目されているのが本 EIC 計画である。高エネルギーの電子と原子核の衝突実験をエネルギー可変により実施することで広いエネルギースケールにおいて陽子の構造を解明する。陽子の中でのパートン同士の相関を見ることで核子と原子核との 3 次元構造を初めてプローブする。特に、最近着目されているのが中性子星コア部のような超高密度クォーク・グルーオン物質である。宇宙における物質の創成と終焉についての人類の知見をさらに広げるものである。
- 核子多体系としての原子核の多様性とその統一的理解を、系統的な不安定核研究より目指す。
- ハドロン分光学および核子構造研究によりクォーク多体系としてのハドロンの構造を解明する。
- 中間エネルギー領域での重イオン衝突を可能にし、中性子星など超高密度の極限状態で初めて顕現する全く新たなハドロン描像を確立する。
- 原子核物理学は理論と実験の両輪での研究が遂行されている。その研究成果は原子核物理学だけでなく、エネルギー分野、量子分野なども関連し、応用分野は多岐にわたっている。このような中、日本発の比較的小規模な体制の実験といったこれまでの研究体制や強みを十分に活かして世界をリードしてだけでなく、国際的で大規模な実験に参画し、各国との協力体制の中で日本の技術や研究成果を活かし、世界の原子核物理学を牽引していくといった、2 つの側面からの展開が大きな柱で

あるように思われる。

- 原子核物理学は、素粒子、宇宙、物性分野などあらゆる分野と結びつきがあり、現代物理の基本的概念が集約された学問で、物理学の重心といえる原子核物理学を起点とした「マルチスケール量子ダイナミクス研究」の創出のビジョンには賛成である。
- 原子核物理分野における世界レベルの研究水準をキープしつつ、原子核分野に留まらず分野を超えた人材や融合的研究を創出する。
- 本委員会でも既出だが、物理学という視点でこの宇宙を見る際、階層毎の理解だけでなく階層を横断する理解も不可欠である。究極的にはこの宇宙は量子の集合体であるため、原子核物理学の研究は、量子物理学の概念を広い階層に渡って汎用的に活用するために重要な役割を果たすことが期待できる。狭義の意味で、原子核物理の研究をクォーク (EIC)・ハドロン(J-PARC)・原子核(RIBF/RCNP)の階層に渡って有機的に進めていくことも大切であり、同時に広義の意味で、原子核の基礎研究から医療・産業・エネルギー分野への階層に渡る知見と人材の展開を意識して展開していくことが重要だと思われる。
- 原子核物理学は、ハドロン階層、原子核階層のそれぞれで基本粒子となるクォークや核子間の相互作用に基づいて、量子多体系の構造やダイナミクスを可能な限り精密に解き明かすことを目指している。粒子間のスピンやアイソスピンに強く依存する相互作用を厳密に取り扱い、さらに理論計算の可能な範囲でダイナミクスに寄与する粒子を対等に取り扱うことで現象を明らかにしようとしてきた計算手法は、周辺領域の量子多体系へも展開可能なものである。近年、量子化学の分野でもプロトン化分子の特性を明らかにするには、電子だけでなく異粒子となる陽子核の運動やスピンの効果も取り入れることが重要になってきていると言われている。原子核物理では、このような違粒子を含んだ量子多体系を取り扱うことが特に発展しており、例えば核子の中にΛ粒子を含んだハイパー核や ud クォークに加えて c クォークを含んだチャームバリオンなどが挙げられると考える。実際にハイパー核の少数厳密計算で用いられる計算手法は、反陽子ヘリウム原子や原子・分子の計算にも応用されており、すでに反陽子の質量の決定に用いられるなど大きな成果があがっている。近年のスーパーコンピュータの著しい発展により厳密計算可能な粒子数の拡大も見込むことができ、また原子核実験の高精度化によりこれらの理論計算の精度を保証することができるようになってくると、最も難しい有限量子多体系である原子核物理で鍛えられた技術が様々な量子多体系を研究する周辺分野の現状を革新する起爆剤に十分なりうると思う。このような事例も原子核物理を起点とした学問領域の創生になるのではないかと考える。また、ハドロン、原子核、原子・分子の各階層で、振動や回転という同様の励起状態が現れるため、それらを融合、統一的に理解することが重要になってくるだろう。さらに、これらの階層がどのように繋がれているかや、上位の階層の物理の本質に迫るにはその下層の物理が必要になって

くることが多々起きている。上述したように原子・分子の現象を理解するために陽子核の自由度の重要性が指摘されている。また原子核を構成する源となる核力を理解するには核子を構成するクォークから理解する必要がある。そしてハドロンについては、なぜクォーク・反クォーク対やグルーオンの膨大な海のように見える核子が、3つの構成子クォークのように振る舞っているように見えるかを理解することが本質的に重要である。このように階層を繋ぐことで物理現象を明らかにしようとするのが重要で、原子核物理はその意味でも起点となり、特にEICで研究される核子の構造の研究はこの階層構造の真の意味での起点であろうと考える。

○今後の課題・留意点

- 我が国の若手研究者の興味を惹きつけるような、世界のトップレベルの実験施設で研究できるように留意すべきである。BNL Centerの運営母体を日米で立ち上げて、速やかに拡充を考えるべき。
- 今後の原子核物理学の大きな流れは、従来のような核子自由度における原子核物理学のみならず、関連する連携分野との協力関係が重要となる。量子計算科学と量子計算を結びつけ、量子コンピュータへの実用化を実現する。また、新たな物質・材料の開発において、トポロジカルな量子物質を開発したり、ということが期待される。
- 原子核物理学の出身者には、学位取得後に他の分野の研究に参加し、そこでリーダーとして活躍している人々が多々見受けられる。
- 我が国から世界的にインパクトのある成果を創出するために、目指す物理の相補性・独立性を重視しながら複数ある大型加速器の将来計画のタイムラインの設定および予算計画をたてるのが重要である。
- 原子核物理学の研究者の減少や論文数、TOP10%論文数の減少など、世界における日本の研究力の弱体化という事実がある。この現実を受け止め挽回していくような体制づくりが必要である。
- 細分化した分野、階層間の隔たりをどのように取り払うことができるか課題になる。原子核物理学も細分化していて、他分野の研究者大学院生及び学部生にその学問的面白さの魅力が伝わっていないと感じる。
- コミュニティに閉じず、他の分野との融合的研究を促すようなシステムをどのように実現をするのか。
- 医療、産業、エネルギー分野への直接的な応用という、原子核研究の出口戦略としては、RIBF/RCNPなどで進められている低エネルギー領域からの原子核研究成果と応用分野との繋がりが重要だと思われる。人材と情報の交流が今まで以上に活性

化される仕組みができること期待する。

- 階層を超えたマルチスケール量子ダイナミクスを研究するために、EIC を最初の起点として、ハドロンや原子核の各階層での研究も合わせて推進することがますます重要になってくると考える。

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？

○御意見

- 人材の育成 (DAQ, Front-End Electronics)
EIC の加速器に関しても我が国の積極的な参画があることが望ましい。
上記のエレクトロニクス製品の供給の強靱化が必要(COVID19 の際には1年以上のロス期間が生じた)
- 計画の規模から言って、低エネルギー原子核分野や他のハドロン物理研究などの関連分野に対する真の意味での波及効果、周辺分野からのフィードバック、さらに融合分野の創出を含んだ計画になることが望ましい。
- 原子核物理学の最大重要課題の解明に取り組むだけでなく、宇宙物理学、ハドロン物理学といった周辺物理、分野融合的な研究を促進させていく。それによって、周辺分野の発展にもつながることが期待できる。国際的大規模実験である EIC 実験において技術開発や研究成果をリードしていくことで、日本発の技術などが世界の標準になっていくと思われる。EIC によってもたらされる新たな研究環境の創成は若い研究者や学生を惹きつけ、人材育成にも繋がり、日本の科学の新たな進展につながっていくことを期待する。
- 「EIC で期待される科学的成果」については、ディスカッションペーパーにある内容に賛成である。新しい物理の発見は最先端のテクノロジーによって生み出されてきたと思う。「究極のフェムトスケール電子顕微鏡」である EIC にモチベートされた新しいアイデアによる研究が行われる事により新しい知見がもたらされることが期待できる。
- EIC 計画における技術的な貢献を量子技術分野の明確な分野やターゲットを絞り、技術や人材を横展開する。
- 今後の我が国の研究・開発力の発展において、分野や階層を超えた知と人材の共有およびそのための人材育成は重要である。例えば、今回 SPADI Alliance として提案されているスケーラブルなデータ収集システムの国際化は理想的な展開図で、EIC が実際に稼働し始めるのはずっと先ですが、それまでの間は RCNP、RIBF、J-PARC が主な使用場所になり、今から開発を進めることができる。また共通の高速データ収集システムをこれらの施設で使用することで、施設の生産性が上がるだけではな

く、その環境で育った人材の国内外での流動性も高まる。国内の学生・若手研究者に対しても、将来的に様々な分野・国で活躍できる多様な選択肢があると示すことで、安心して原子核物理学研究業界への参加を促すことができる。

- 私は、EIC で行う核子構造の研究を詳しく理解しきれていないが、ハドロン原子核研究の立場から EIC への期待と我々の研究分野との関連についてコメントする。私は核力の本質を明らかにするためにストレンジクォークを含んだ核力の研究をしているが、その立場からすると、ハドロンは構成子クォークの描像でよく記述できると言える。例えば、バリオン 8 重項の粒子の磁気モーメントはそれぞれの粒子を構成する構成子クォークの磁気モーメントからほぼ説明できることがわかっている。一方で、核子自体は、核となる 3 つのバレンスクォーク以外にも大量のクォーク・反クォーク対やグルーオンの多体系となっている。この fundamental な描像から核子のスピンや質量を理解し、さらに構成子クォークの描像(階層なのかもしれません)へどう移り変わっていくかを理解することは非常に重要な点であり、EIC で解明される重要なトピックスであると考えている。私自身は、構成子クォーク描像への移り変わりの理解が、原子核を安定にする核力の斥力芯を理解する上で非常に重要だと考えている。また、原子核内の核子のパートン分布関数が、自由空間の核子のものどう変化するかを詳細に調べることができると、核子に質量を与える QCD 真空(とそれが核内でどう変化するか)の理解に大きなインパクトがあるのではないかと推察する。原子核中でのハドロンの質量の変化を調べる研究や、高エネルギー重イオン衝突実験で作られる高温状態でのハドロンの質量変化を調べる実験が展開されているが、EIC の研究はそれらの研究にも大きなインパクトを与えるのではないかとと思われる。

○今後の課題・留意点

- EIC には国際的な協力が不可欠であり、次世代の加速器計画の運営のお手本を示すべき国際加速器計画でなければならない。計画の HQ の国際的な運営がなされるよう、我が国も積極的に参加すべきである。
- EIC 計画に参画する日本コミュニティの拡大が重要である。物理テーマに関心を持つ研究者を増やし、計画における日本の主導的な立場を確立した上で主要な成果を創出する必要がある。
- すでにフェルミラボや CERN など、高エネルギー物理の実験技術などの量子技術分野への横展開は世界的に進められている。どのように実行力を持ってそのような横展開を実行に移せるかが課題。
- 上記の人材活用のためにも、まず人材育成に力を入れることが重要である。広い視野とフットワークの軽さを兼ね備えた人材を育成するためには、環境の変化によって生じるボトムアップの変化だけに頼るのではなく、量子情報やフュージョンエネ

ルギー分野とも連携し、トップダウンの取り組みとして戦略的に実施することが重要である。(米国では Quantum Information Science の中に素粒子・原子核物理学が含まれている。)

- 他分野との連携に関して、単なるアイデアの創出にとどまるだけでなく具体的な境界領域における研究分野への発展へと繋げることが重要である。特に今回の有識者会議でも話題となったフュージョンエネルギー研究分野との協力関係については原子核物理研究分野全体としての貢献が必要になると思われる。その中で、EIC 計画が重要な貢献が行えるように分野間のコミュニケーションが継続的に行われることを期待する。

3. どのような体制で EIC 計画に参画するか？

○御意見

- 検出器系全体について責任を取れる体制が必要。
- 日本側予算は基本的には理研 BNL Center を利用して、EIC プロジェクト間の日米間予算として運用する。(以前の BNL RHIC 時の運営を参考とする。)
- Streaming DAQ の標準化を実現する。(我が国のエレクトロニクス産業の育成を図る。我が国のリーダーシップへと結びつける。)
- 加速器チームによる積極的参加。
- 国内大学と BNL との間で大学院の単位の流動化、Double Degrees などの制度を充実させ、様々な人（キャリア）の動きに対応出来るようにする。
- 有識者会議で示された東大 QNSI と阪大 RCNP を中核とするネットワーク型共同拠点（国際量子物理ネットワーク型拠点）と理研とが連携する体制は妥当と思われる。
- 中心となって進める研究者の基盤組織の形成、かつ優秀な人材の確保および育成が必須である。研究拠点の形成とともに、大学との強力な連携が必要である。
- これまでの日本の研究体制や強みが十分に活かされ、人材育成や教育、産業まで視野に入れた計画が考慮されている。これから実現すれば一つの成功例として日本の科学研究全体のさらなる活性化が見込まれる。
- EIC 計画において実験結果を解析、解釈するための理論研究も重要であるので、理論実験の両者が連携したコミュニティの形成が必要。
- 日本が EIC で担当を目指す検出器やデータ収集システムは最先端のテクノロジーの塊になると考えられる。特にデータ収集システムは大小様々な実験でも使用できるスケラビリティが基本概念として考慮されている。日本の若手がこれを日本での

小規模から中規模のさまざまな実験の中で技術を身につけ、その先で EIC のような大きな実験グループでの使用法を体験し、スキルアップできるような体制を作っていけると良いと思われる。

- 学際的連携による頭脳循環・人流の喚起が必要。多数の分野に分岐した先端科学どうして人材や研究資源を囲い込もうとすると、大国に対抗できない。囲い込み型から連携型にパラダイム転換することが必要。そのためには、複数分野に共通する根本的課題について協創的に取り組む体制が必要。具体的には、計測技術やデータ解析などに関する方法論のイノベーションをもたらす研究課題を定式化し、分野を超えた共同研究を行う「仕掛け」を作るべきである。これは「分業」による異分野連携とは違い、普遍化された課題に対して共に知恵を出し合う（それぞれの分野で蓄積された経験を活かす）協創的な共同研究の機会（場）を作るという意味である。

○今後の課題・留意点

- 理研 BNL センターを活用する場合、東大における機構との役割分担はどうか。量子技術など波及効果は重要であるが、多様な新しいトピックを盛り込むとともに、これまで基盤研究として実績をあげてきた分野がおろそかにならないよう、連携する仕組みが必要である。EIC を中心とした研究拠点を形成し、低エネルギー原子核分野やハドロン物理研究を含むセンターとしてはどうか。
- EIC 計画を牽引する大学や研究所からその周辺大学や研究者へ、情報が十分に行き渡り、個人レベルでも関わられるような仕組みがあると良いように思われる。
- 現在、EIC 実験に関連した理論研究を行っている比較的若い研究者は、日本には少なく、研究者を輩出するような大学のポジションを持っていない。コミュニティ形成のために、次世代の若手を育成する仕組みの整備が必要。特に EIC 実験が走り出す頃までに分野を先導できる理論のリーダーの育成が急務である。
- BNL の理研の拠点に若手を派遣できる仕組みや海外の研究者を日本に招聘できる仕組みがあると良い。

4. EIC 計画への参画に要する経費は妥当か？

○御意見

- 人的資源投入： 理論（50）、実験（100）
財政的支援： TOF, ZDC, DAQ
- 国内の他の将来計画と比して同程度の規模である。このとき参画するコミュニティ

の規模との整合性の観点は重要である。また、金額の妥当性を検討するに当たり、EIC 計画全体の規模、その財源分担の内訳、参画機関の役割などを見た上で判断する必要がある。日本で開発を検討している検出器の開発・製作費用の規模と、その見積もりと財源の検討はされているか。なお、参画に当たっては参加機関からの継続的な資金提供を求められるはずで、この観点も入れる必要がある。

- 予算の詳細は承知していないが、建設に必要なコストだけではなく、研究者が日本と米国を行き来し、循環することに金銭的な面でのハードルをなくすことが、国際的なプロジェクトを指導できる若手研究者の育成に必要不可欠だと思われる。

○今後の課題・留意点

- 日米の大学院におけるカリキュラムを一新する。
BNL-RIKEN graduate courses の publication
Nuclear Physics, Particle physics, Astrophysics, Solid state physics, Soft Matter, Statistics in Nuclear and Particle Physics
- 加速器の人的参画 ? 加速器建設への人的協力
- EIC は米国主導による米国の原子核物理学の計画だが、当該分野の国際コミュニティにおいて期待される日本の役割は経費負担も含め適切に果たすべきである。ただし、国際共同研究に使用される大型研究施設には 1996 年に IUPAP で採択されたガイドラインに準拠した運用がもとめられる。国際的学術研究施設では施設の運転や維持管理に必要な経費はホスト国が支出する必要があるため、EIC への参画が国内の国際的研究施設の運営に関わる財源に影響することは避けるべきであり、EIC へ参画に要する経費は、現在、あるいは将来、日本がホストする国際的学術研究施設とは別の予算で確保される必要がある。あえて議論する必要は全くないが、念のため留意点としては挙げておきたい。

5. その他

○御意見

- 計算機資源
- これまでの会合において度々言及されているように、米国側からは KEK からの加速器技術に関する貢献への期待がある。KEK 加速器研究施設としては、加速器研究者同士の議論やワークショップを通じた情報提供などにおいて可能な限り協力していく。より踏み込んだ技術協力や共同開発を実施することもあり得るが、その場

合にどの程度の貢献が可能となるかは、具体的な研究課題に応じて日本側のリソースの状況にも配慮しながら、慎重に判断する必要があると考えている。

- ディスカッションペーパーにある波及に関する部分の具体例には、関連性や論理に飛びがある部分が多いように感じるので中間報告では書き方を精査したほうが良いと思う。特に核融合に関する部分には違和感を覚える。
- 量子技術分野は、基礎研究開発のフェイズであるにもかかわらず、量子コンピュータや量子センサーなど応用先があるため、社会実装や産業応用について常に厳しく評価・説明・追求されている。原子核物理は基礎科学だと思いますが、大きな予算が投資されるので、量子技術への応用を謳う以上、その達成度や成果、貢献度についてきっちりと評価・説明すべきである。

○今後の課題・留意点

御意見なし