

令和 3 年度卓越研究員事業 申請概要

1. 研究者_様式 2「卓越研究員として取り組みたい研究テーマ」に記載する研究内容等の概要を記載してください。

研究 内 容

研究題目 相対論的エネルギー密度汎関数 (REDF) 理論と原子核のダイナミクス

研究手法 REDF 理論を起点とした理論および計算科学的アプローチ。具体的には自己無撞着な相対論的平均場計算、乱雑位相近似、時間発展計算など。

原子核の集団励起や、核子放出を伴う放射性崩壊は、核子多体系のダイナミクスに分類される。その解明は未だ発展途上であり、今後も多くの新知見獲得が期待されている。また天体核反応や中性子星の物理とも密接な関連がある。本研究ではこれらの核子ダイナミクスを研究対象とし、相対論的フェルミオン多体系という描像にもとづいた、統一的な理解を目指す。ダイナミクスの記述のため、従来の REDF 計算を越えた拡張と精緻化を遂行する。

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{REDF}} &= \bar{\psi}(x) [i \not{\partial} - m] \psi(x) \\ &\quad + \mathcal{L}_{\text{meson}} + \mathcal{L}_{\text{int}}, \text{ where} \\ \psi(x) &\cdots \text{ nucleon,} \\ \mathcal{L}_{\text{meson}} &\cdots \text{ free mesons,} \\ \mathcal{L}_{\text{int}} &\cdots \text{ interactions.}\end{aligned}$$



Properties of the (Z,N) nucleus
Z = proton number, N = neutron number

REDF 理論はフェルミオン (核子) と複数のボソン (中間子) を含む有効ラグランジアンによって定義される量子場の理論である。REDF 理論にもとづいた多体計算は、核図表上の広い範囲にわたって、束縛エネルギー等の物理的性質を記述することに成功してきており、核構造の普遍理論の有力な候補といえる (参考: P.-G. Reinhard, Reports on Progress in Phys. 52, 439, 1989)。また核ニュートリノ反応や元素合成プロセス、中性子星物性などを正確に議論するためには、核図表の安定線から離れた、数千種の原子核の特性を、入力情報として必要とする。本研究が提唱する拡張・精緻化された REDF 理論計算によって、このような需要にも応え得る、普遍的な核子多体系フレームワークの完成を目指す。

2. 研究機関に対する自身のアピールポイントを自由に記載してください (自身の研究に対するこれから及びこれまでの姿勢・スタンス、研究に関連する経験、取得している資格・技術、取扱いできる機器、今後の自身の研究リーダーとしての方向性、キャリアの展望など)。また、必要に応じて、希望勤務地や異分野への挑戦意欲、これまでの研究業績等を記載することも可能です。

アピールポイント

申請者 (大石知広) は 2014 年 3 月に原子核理論物理学分野の研究によって博士号を取得した。日本での博士号取得後、フィンランド、イタリア、クロアチアにて、公募型のフェローシップによるポストドクターとして研究を継続してきた。原子核スケールにおける密度汎関数理論、相対論的な多体理論、平均場計算、少数多体系、非平衡系、時間発展系など、多彩な研究対象に関する業績を挙げてきた。また国際的な発表機会、英語による研究発表を重視した活動を続けてきた。各種プログラミング言語 (FORTRAN, C++, Python, HTML)、並列計算 (Open-MP, MPI)、大規模数値計算、機械学習など、現代の科学研究に必要とされる各種技術を習得してきた。副メンターとしての博士課程学生の指導等、教育関連の経験も積んできた。

全ての原子核の物理的性質を網羅的に説明可能な理論を打ち立てることは、原子核物理学の創始以来、最重要課題の一つである。今回提案する研究計画の諸課題の完遂によってそれに貢献したい。また核物理分野に限定されない、高インパクトかつ universal な知見をもたらすべく、分野間交流を積極的におこなっていききたい。後進人材の育成に関して、国籍等にしばられない人材発掘と交流を第一に考え、申請者自身の海外経験も活用しつつ、取り組んでいきたい。

本ページは、申請書情報の一部として研究機関及び当事者間交渉支援機関へ提供します。このため、秘密情報等の公表できない情報は含めずに作成してください。様式の変更・ページの追加は不可とします。

令和3年度卓越研究員事業研究計画等

① 卓越研究員として取り組みたい研究テーマ

<<研究目的・内容（課題設定・問題意識等を含む）>>

本欄には、取り組みたい研究に関する全体構想の具体的な目的及びその内容について記載してください。特に次の点については、焦点を絞り、具体的かつ明確に記載してください。

- 研究の学術的又は社会的背景（本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ、着想に至った経緯、課題設定・問題意識）
- 問題の核心は何であり、どのように明らかにしようとするのか
- 当該研究の背景となる課題設定・問題意識。また、これらによりどのような成果が見込まれるか。また、その成果を踏まえて、どのような新たな研究領域等の開拓につなげていくのか。これまでの研究成果を他分野・業種、あるいは社会的に活用・展開していく場合はその内容。

※なお、卓越研究員の研究内容については、ポストを提示した機関との当事者間交渉の中で機関と調整していくものであり、本欄記述の研究に必ず従事できることを示すものではありません。

※様式の変更・ページの追加は不可とする。

【研究目的・内容】

※以下、本申請書においては、次の英文字略称を用いる。(1) REDF = 相対論的エネルギー密度汎関数 (relativistic energy-density functional)。 (2) HFB = Hartree Fock Bogoliubov。 (3) QCD = 量子色力学 (quantum chromodynamics)。 (4) QRPA = 準粒子乱雑位相近似 (quasi-particle random phase approximation)。

研究題目 相対論的エネルギー密度汎関数 (REDF) 理論と原子核のダイナミクス

研究目的

原子核の集団励起や、核子放出を伴う放射性崩壊を研究対象とし、REDF 理論による統一的な理解を目指す。また中性子星の構造や天体核反応などに必要な核子多体系の情報を、理論計算によって提供するための枠組みを整備する。

研究手法

REDF 理論を起点とした理論および計算科学的アプローチ。具体的には自己無撞着な相対論的平均場 HFB や QRPA、時間発展計算など。

原子核構造論の全般的な研究背景

原子核固有の物理学的性質としては束縛エネルギー、放射能、電磁場や他粒子との反応特性などが重要である。これらの性質は、原子力工学や天体物理学の諸問題と密接に関連している。核図表上の全核種の物理的情報を、共通のフレームワークによって記述することは、原子核構造論の目標の一つである(図1も参照)。しかし、このような"Universal Theory"の完成のためには、未だ多くの問題が山積しており、現在も試行錯誤が続けられている。

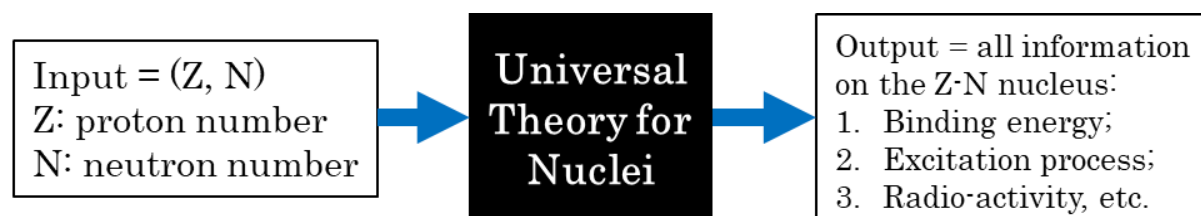


図1 原子核構造の"Universal Theory"の模式図。

相対論的エネルギー密度汎関数 (REDF) 理論は、未だ発展途上であるが、将来この要求に応え得る有力な候補理論である (参考文献 D. Vretenar, A. V. Afanasjev, G. A. Lalazissis, and P. Ring, Phys. Rep. 409, 101-259, 2005)。REDF 理論はフェルミオン (核子) と複数のボソン (中間子) を含む有効ラグランジアンによって定義される量子場の理論である (P.-G. Reinhard, Reports on Progress in Phys. 52, 439, 1989)。

【研究目的・内容（つづき）】

本研究計画では（１）原子核の集団励起、および（２）核子放出を伴う放射性崩壊に焦点を当て、REDF 理論に基づいた説明を目指す。この２つを研究対象として選択するにあたり、以下の理由が存在する。

- どちらも核子多体系の動力学的現象（ダイナミクス）に分類される。従来の REDF をはじめとした理論計算は、原子核の静力学的な性質（束縛エネルギー、荷電半径など）の再現にはかなりの威力を発揮してきた。一方で、ダイナミクスに関しては、その説明は未だ発展途上であり、多くの新知見獲得が期待されている。その説明のためには、核子と外場との相互作用、時間発展、相対論的效果、多体相関などを漏らすことなく取り入れる必要がある。これらの計算手法の開発・実装は本研究の主要活動となる。
- 中性子星の内部構造や超新星爆発、核ニュートリノ反応、新元素の合成プロセス等を正確に評価するためには、核図表の安定線から離れた、数千種の原子核のダイナミクスを、入力情報として必要とする。これらの不安定核種の多くは、現在の実験技術ではアクセスできない。そのため、核図表全体のさまざまな集団励起や反応特性を予測できる理論的枠組みが求められている。
- 最近、磁気双極子型の励起モードをはじめとした、従来は測定困難であった観測データのデータが利用可能になってきている（[S. Bassauer et. al., Phys. Rev. C 102, 034327, 2020](#)）。これらの新しい実験データは、理論側にとって重要な参照元であり、これを利用した理論的フレームワークの評価・改良はますます活発になると期待される。

REDF 理論を基本アプローチとして選択する動機

- 現在実用化されている核理論計算手法には、EDF 計算の他にも、大規模殻模型や第一原理計算が代表的なものとして挙げられる。しかし EDF 計算は、現在においても、核図表上において最大の適用範囲を誇っている（[H. Nam et al, J. of Phys. Conf. Series 401, 012033, 2012](#)）。即ち、多くの核種を統一的な枠組みの中で取り扱うことが出来る。また REDF 計算に特有のメリットとして、以下に述べるような相対論的效果を自然に記述できる。
- フェルミオンである核子の記述には、本来 Dirac 方程式を備えた現象論的フレームワークを必要とする。高エネルギー領域への応用（中性子星や超新星爆発など）を考える際にも、相対論的效果や因果律を保持できる利点がある。
- 原論文（[J. D. Walecka, Ann. of Phys. 83, 491, 1974](#)）において、REDF 理論の原型を導入した J.D. Walecka の動機は、中性子星の Einstein 方程式に代入されるべきエネルギー運動量テンソルを導出することであった。この目的は必然的に相対論的なフレームワークを要求する。またこの時点で既に、高密度領域で核力が斥力に転ずる性質、いわゆる斥力芯が、自然に導かれていた。これは核子と中間子を含む有効量子場の理論が、実用的な原子核の記述に耐えうることを示した最初の例である。
- 原子核の特徴の一つに、スピン軌道相互作用によるエネルギー準位分裂がある。いくつかの中間子自由度を含んだ REDF ラグランジアンから出発し、さらに平均場近似を行って核子多体系の束縛エネルギーを計算すると、スピン軌道相互作用を自然に記述することができる（[土岐博・保坂淳、“相対論的多体系としての原子核”、大阪大学出版会、2011; J. Meng et. al., Progress in Particle and Nuclear Physics 57, 470, 2006](#)）。
- 核力の中間子交換描像があらわに保持される。考慮する中間子との結合定数が決定されると、原理的には理論体系として「閉じる」ことができる。新たな実験データに合わせて理論を改訂していく際にも、見通しが立てやすい。一例として、パイ中間子を含んだ REDF 理論であれば、テンソル力を自然に記述できる。

本研究がもたらす展開・インパクト

- REDF 理論は、その形式自体はある程度明確であるが、実験データの再現能力等には、未だ多くの課題が残されている。これらの課題に取り組み、必要に応じて理論を改訂していくことで、核構造の一般理論の構築を目指す。
- 超新星爆発、核ニュートリノ反応、元素合成などを正確に議論するためには、不安定核の情報が不可欠である。不安定核の多くは現在の実験技術ではアクセスできず、代替案として、核図表全体のさまざまな集団励起や反応を予測できる理論的枠組みが求められている。この目的のためには、REDF 理論に基づいた量子多体系計算が、適切な選択肢となり得る。

①卓越研究員として取り組みたい研究テーマ

<<研究計画・方法>>

本欄には、研究目的を達成するための具体的な研究計画・方法について直近2年間を想定し記載してください。特に、次の点については、焦点を絞り、具体的かつ明確に記載してください。

- ① 本研究を遂行する上での具体的な工夫（研究を進める上でのアイディアの独自性、創造性、新規性等）
- ② 研究室主宰者としての研究体制の構想（ポストドクターや大学院生の配置等も含め、どのような体制で研究を実施することを想定しているか。企業の場合には、プロジェクトのマネージャーとして、どのようにチームをつくり、どのような体制で実施することを想定しているか。）

※様式の変更・ページの追加は不可とする。

【研究計画・方法】

本研究は2つの主要プロジェクト P1 および P2 から成り、就任後から2年目程度までは、この2つに集中的に取り組む。P1 と P2 は互いに相補的な内容を含んでおり、並行して進行する予定である。主要プロジェクトの完了後の状況次第で、より発展的なプロジェクトとして、追加の P3 にも取り組む可能性がある。以下に各プロジェクトの詳細を記す。尚、可能であれば、各プロジェクトに1名ないし2名ずつポストドクターを配置し、PI である申請者を含め、3人体制で研究グループを構成したい。

P1 集団励起の解析と REDF 理論へのフィードバック

本課題の目的は REDF ベースの準粒子乱雑位相近似 (QRPA) を用いた原子核の集団励起の解析、実験データとの照合、および REDF パラメータの最適化である。計算法の骨子である QRPA はある程度確立されているが (T. Niksic et. al., *Computer Physics Communications*, 107184, 2020)、その活用と理論へのフィードバックは未だ十分ではない。本プロジェクトでは特に以下の課題群に取り組んでいく。

- (0～6ヶ月) 磁気双極子型 (M1) 励起。多彩な集団励起の中でも、M1 は基本的な励起モードであり、最近では高精度な実験データが出揃いつつある。M1 励起は核子のスピン反転を意味し、厳密な記述には Dirac スピノールを備えた相対論的形式が不可欠である。最近では申請者らによる REDF 平均場計算によって、相対論的な M1 励起の系統的解析が、1 粒子 QRPA レベルまでではあるが、実現した (T. Oishi, G. Krucik, and N. Paar, *Journal of Phys. G*, Vol. 47, 115106, 2020)。ただし通常の QRPA を超えた複雑配位や有限温度効果等については、未だ課題が残っており、それらを順次解決する。また M1 励起は Gamow-Teller 型荷電交換反応と密接な関係がある。M1 と Gamow-Teller 遷移を共通の枠組みの中で議論することで、核子のアイソスピン自由度と観測量との関連性を評価する。
- (6～12ヶ月) 変形を含む集団励起の計算。中性子過剰な原子核の場合、平均場計算では変形を考慮する必要がある。しかし変形を取り入れた場合、集団励起の計算コストは大幅に増加する。効率的な計算のため、先行研究 (H. Liang, T. Nakatsukasa, Z. Niu, and J. Meng, *Phys. Rev. C* 87, 054310, 2013) で提唱された FAM-QRPA を利用する。現在、申請者は REDF-FAM-QRPA を用いて変形核の M1 励起などを解析するべく、準備を進めている。現在までの準備計算の結果、非相対論的な平均場計算と比較しても、実験データを遜色なく再現できることを確認済みである。
- (12～24ヶ月以降) 残留相互作用。REDF ラグランジアンにはいくつかの有効パラメータセットがあり、その精密化は重要な課題である。特に even-even 核種の基底状態には反映されない、いわゆる残留相互作用と呼ばれるパラメータには、依然として大きな不定性が残っている。代表例がパイ中間子由来の擬ベクトル型相互作用である。一方で M1 励起や Gamow-Teller 遷移においては、残留相互作用が強く影響する。これらのベンチマーク現象の実験データを利用して、残留相互作用を精密に決定する。その際、膨大な実験データとの照合作業や、高効率な最適化が必要になると予想される。本研究では、例えば機械学習や人工知能の技術を応用することで、これらの作業の効率化も図っていきたい。
- (24ヶ月以降) 開発した REDF 計算フレームワークを活用して、元素合成や超新星爆発プロセスの解明にも貢献したい。特に実験での直接測定が難しい不安定核種の情報を、REDF 計算によって提供していききたい。

P2 相対論的量子多体時間発展系計算と核子放出崩壊

このプロジェクトでは空間格子点上の場の理論に準拠した REDF 平均場計算を実装し、核子放出を伴う放射性崩壊を議論する。陽子・中性子ドリップラインの外側からの核子放出崩壊は、非束縛な原子核が起こすものであり、従って「開いた量子系」としての取り扱いが要求される。REDF をはじめとした平均場計算は、従来は束縛核のみを対象としており、核子放出の記述のためには何らかの拡張が要求される。本研究では時間発展の描像を導入することで、この問題の解決を図る。

24 カ月目までの課題群に対して、これらに一貫して取り組むポストドクターレベルの人材を導入したい。また大規模数値計算が必要と予想されるため、公募制のスーパーコンピュータ利用権にも積極的に応募する。

- （0～4 ヶ月） 格子ベースの REDF 計算。格子計算は基底関数ベースの計算に比べて拡張性に優れており、変形核や時間発展現象への応用を考える際に有利な選択肢となる。核子放出崩壊では広範囲に広がった核子密度分布を正しく評価する必要があり、空間格子ベースの解法が適している。ひな型ではあるが、座標空間ベースの REDF 計算プログラムはいくつか公開されており（[Y. Tanimura, K. Hagino, and H.Z. Liang, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 073D01, 2015](#)）、適宜利用して研究の効率化を図る。安定核の束縛エネルギー等のデータを利用したベンチマークが完了し次第、速やかに次の課題に移行する。
- （4～12 カ月） 時間発展性および量子トンネル効果。近年、REDF 多体計算においても、あらわな時間依存性の導入と応用が試みられてきた（[Z.X. Ren, P.W. Zhao, and J. Meng, Phys. Rev. C 102, 044603, 2020](#)）。本課題では空間格子ベースの REDF 平均場計算を基点とし、これに時間依存性と量子トンネル効果の再現能力を実装することが主課題となる。開発した計算手法を、もっとも単純な核子放出である 1 陽子および 1 中性子放出崩壊に応用し、ベンチマーク計算と REDF パラメーターの性能評価を行う。時間依存平均場計算においては、量子トンネル効果が正しく再現されないという問題がある。これに対する解決策として、時間依存生成座標法を採用・実装する（[N. Hasegawa, K. Hagino, and Y. Tanimura, Phys. Lett. B 808, 135693, 2020](#)）。
- （12～24 ヶ月） 二陽子放出崩壊（2p 崩壊）。核子ペアリング相関に関連する現象として、二陽子放出崩壊は特殊な地位を占める。この崩壊過程では核子クーパペア（陽子ペア）がトンネル効果によって親核から放出される。その際、ペアリング相関が観測量にどれだけ影響しているのかは、現在でも完全には解明されていない。また核図表上の 2p 放出ドリップラインに関しては、様々な理論予想が立てられているが、意見の一致には至っていない。同様の問題は中性子過剰側である 2n ドリップラインにおいても存在する。この課題ではペアリング相関も考慮した時間依存 REDF の枠組みの中で、2p および 2n 放出を議論する。
- （24 ヶ月以降） 時間発展系の量子コンピューター用アルゴリズムの開発。量子コンピューターは量子ビットに準拠した計算機であり、原子核を含む量子系の計算に対して、古典コンピューター以上の性能が期待されている。将来の計算物理学においては、古典コンピューターと量子コンピューターの複合型アプローチが主流になると予想される。本項では原子核 REDF 計算における量子コンピューターの活用法、特に時間発展過程を高効率で計算できるアルゴリズムの開発を行いたい。

P3 中性子星の内部構造への応用（3 年目以降）

中性子星はいかなる巨大な核子多体系であり、その内部構造の解明には、幅広いエネルギー、密度および圧力スケールをカバーできる理論が必要となる。また高エネルギー領域では相対論的效果が巨視的な物理的性質に影響することも予想される。このプロジェクトでは相対論的特性を備えた REDF 理論に基づいて、中性子星の内部構造や状態方程式にアプローチする。

- （24 カ月以降） 核物質の物性と有限核の観測量。中性子性を核物質とみなした際、その物性を有限核の観測可能量から洞察することが重要な課題となる。一例として、最近の申請者らの研究では、核物質の対象エネルギーと、電磁気型の励起モードとの相関性が議論された（[E. Yuksel, T. Oishi, and Nils Paar, Universe Vol. 7\(3\), 71, 2021](#)）。今後はより系統的・包括的な視点に立ちつつ、有限核で最適化した理論を、中性子星の諸問題に外挿・適用した場合の妥当性を、注意深く議論したい。相対論的な各種有効相互作用と中性子星の物性の関係についても、系統的な解析を行いたい。

②多様な研究機関でのリーダーとしての活躍可能性

<<多様な機関での活躍可能性・自身の魅力>>

本欄には、研究主宰者やプロジェクトマネージャー等の研究リーダーとして、機関やセクター、国等を超えて活躍でき、それぞれの機関で自身が魅力的であることを示す裏付けや自己のエピソードを示してください。

※様式の変更・ページの追加は不可とする。

【研究リーダーとしての活躍可能性の裏付け・エピソード】

フィンランドでのポストドク経験（2014年4月～2016年8月）

申請者は日本・東北大学での博士号取得後、フィンランドのヘルシンキ物理学研究所およびユヴァスキュラ大学にポストドクターとして赴任した。申請者が公開されていた公募情報から主メンターの Dr. Markus Kortelainen 氏へ連絡し、ユヴァスキュラ大学側の審査を経て採用となった。当職歴では Kortelainen 氏と副メンター Prof. Jacek Dobaczewski 氏の指導の下で、原子核の密度汎関数理論と平均場計算の研究を開始した。この方法論は、申請者の博士課程時代の研究手法とはかなり異なり、その後の研究範囲を拡大する上で貴重な機会を得た。

ユヴァスキュラ大学では原子核物理学以外にも、数値計算・コンピューター技術に関する教練を受けた。各種プログラミング言語（FORTRAN, C++, Python, HTML）、並列計算（Open-MP, MPI）、機械学習など、現代の科学研究に必要とされる多くの技術を習得した。スーパーコンピューターを用いた大規模並列数値計算にも携わり、必要技術の訓練を受けた。また外国語教育、特に科学分野における英語教育を重点的に受ける機会にも恵まれた。

イタリアでのポストドク経験（2016年9月～2018年8月）

上記期間中はイタリアのパドヴァ大学でポストドクとして研究に従事した。主メンター Prof. Lorenzo Fortunato 氏と副メンター Prof. Andrea Vitturi 氏の指導の下で、時間依存する量子多体問題に取り組んだ。この研究テーマは、申請者の博士課程時のものと類似点が多かったが、当職歴により一層の発展があった。例えばフェルミオン対の量子トンネル効果の一般的な性質や、ラムダ核子を含んだハイパー原子核の陽子放出崩壊などを解明した。

当時のイタリア特有の社会的背景として、若年層の失業率が高く、大学卒業後も社会的な安定が保証されていなかった。そのためイタリアの大学群では、専門教育と学術研究の意義が厳しく問われていた。一般社会への学術研究成果の公開が特に奨励されており、申請者個人に関しても、そのための技能（弁証法、修辞学、発表技巧など）を訓練する機会に恵まれた。一例として、“観客は本当は何が見たいかのを、しかし観客自身は知らない。”という教訓を、当時のメンター達は強調していた。学術研究に応用するなら、研究をデザインする際、真に解決が必要とされる課題は、あらかじめ他者から提示などされておらず、その洞察と設定までが立案者の責務に含まれることを意味する。

またイタリア学術界の伝統として、特定の分野に限定されず、幅広く適用可能な、universal な知見が最重要視されていた。このような環境の下で研究に従事した経験は、現在の研究意識にも反映されている。

クロアチアでのポストドク経験（2018年9月～現在）

クロアチア・ザグレブ大学では REDF 理論の研究を開始した。REDF 理論は原子核構造を網羅的に説明するフレームワークとなり得ることが期待されており、本研究計画においてもその基盤となっている。また当該グループに所属する Prof. Nils Paar 氏（主メンター）の他、Prof. Dario Vretenar 氏、Prof. Tamara Nikšić 氏、Prof. Kosuke Nomura 氏との人脈を構築した。これらの熟練研究者の協力は、本計画を遂行する上で大きなメリットとなる。

当時在籍していた Goran Kruzic 氏の博士号取得のため、M1 励起の研究プロジェクトに副メンターとして参加した（詳細は申請者の業績欄を参照）。この経験で得た研究指導や役割分担、研究リソース管理等に関する知見は、数人規模の研究ユニットを組織する上でのモデルケースとして、本研究計画でも参考にしている。

以上のヨーロッパ三か国における経験を踏まえ、専門である原子核物理学の内容とは別に、いくつかの研究ポリシーを持つに至った。次ページにて詳述する。

研究ポリシー① 分野横断型の研究展開

申請者はこれまで原子核構造の理論研究に専心してきたが、今後は分野横断型の研究展開も志向している。特に最近の理論および計算物理学においては、「AI・機械学習」や「量子コンピュータ」が新たなアプローチとして注目されており、関連する諸分野の連携が一層重要になると考えている。

学術研究、特に物理学分野において、研究の特色を対外的にアピールしやすい要素は「対象」と「手段」である。対象とは大まかな物理スケールにはじまり、注目している系、現象、あるいは理論フレームワークそのものである場合もある。一方、手段としては理論・計算・実験の分類の他、採用している具体的な理論モデル、解析や測定の方法などがあてはまる。本研究計画を例にとるならば、以下の通りとなる。

対象 = 原子核 (MeV および fm のスケール)。

手段 = 従来の数値計算 (REDF 平均場、QRPA、時間発展計算)。

もちろん他の要素も軽視するべきではないが、背景や結論、主張などの要素は、当該分野（原子核物理）特有の内容に終止しがちである。これに対し、対象または手段を若干、拡大解釈することで、研究の多様化の良い起点になると考えられる。申請者の場合は以下の様に画策している。

対象 = フェルミオン多体系（電子系、冷却原子なども含む）。

手段 = AI・機械学習の活用、量子コンピュータ用アルゴリズムの開発。

また研究をデザインする上では、期待される成果のうち、多くの分野に真に敷衍可能なものと、そうでないものは峻別されなければならない。この判断を正しく行うためにも、今後は所属分野にとらわれない活動にも注力していきたい。

研究ポリシー② 多粒子・多自由度な系について

「難問は分割せよ。」の金言が端的に示すように、複雑な系の最小構成要素をまず同定し、要素数の少ない場合から演繹することは、物理学でも普遍的な方法論であり続けてきた。しかしながら、特に現代では、この方法論の万能性には疑問符が投げかけられている。即ち、多数の要素が集団として存在したときに初めて発現する個性を、取りこぼす可能性がある。原子核物理に例を求めると、集団運動や3・4体力効果が挙げられる。生物学や情報工学における「創発」というキーワードにも関連性が見いだせる。多数要素の複合という観点から、既存の研究成果や知識を見直すことで、新知見の獲得を目指す。

研究ポリシー③ 研究成果のオープンアクセス化

現在および将来得られる研究成果・製品（データ、計算用コードなど）は、申請者に知的財産権が帰属するものに関しては、可能な限りオープンアクセス可能にする方針である。本研究のインパクトを一層高めるためには、後進の研究者が、煩雑な行程をスキップして、本研究の成果を再利用できることが、最も有効であると考えている。

研究人材育成および教育活動に関する実績とポリシー

実績： ●大学学部時代に、申請者は高等学校教育免許状（理科）を取得した。●修士および博士課程在籍中、ティーチングアシスタントとしての勤務経験あり。●過去の研究実績のうち、副メンターとして他学生の指導に協力した経験がある。後述「その他業績・経歴・経験等一覧」の文献 [A2](#), [A5](#), [A12](#) が該当する。

情報革命以降、主義思想や国境を越えて、情報と人材のやりとりが普及した。その結果、大学や各種研究機関の活動においても、否応の無い多様化が進んでいる。この状況において、研究および教育従事者が果たすべき役割の一つは、多様化に柔軟に対応しつつ、後進人材を育成することである。特に世界レベルの研究を目指すうえでは、国籍にしばられない人材発掘が急務である。更に、異なる言語・慣習等の障害にしばられず、個々の研究者が主体的に学術研究に取り組めるような環境を整備することが重要である。申請者自身の海外経験も活用しつつ、積極的に取り組んでいきたい。

人材育成の現場においては「ハブ・コンテンツ」を基点とした知的ネットワークを重要視している。一例は量子力学であり、それは物理学の他、応用数学、ナノエレクトロニクス、情報科学などにおいても、その基盤となっている学問である。後進人材の育成の際には、量子力学そのものの知識に加えて、多様な分野・問題群をつなげるハブ・コンテンツとしての役割を伝授すべきである。なぜなら、現在ハブとなっているコンテンツは、将来の科学と社会情勢の変化の中にあっても、依然として需要があると期待されるためであり、後進人材が将来、研究活動を多様化させていく上でも、効果的であると考えている。

③業績等

<<特筆すべき業績・経歴・経験等3件>>

本欄には、今回構想する研究や多様な研究機関での活躍可能性に関連する、2016年以降の特筆すべき業績・経歴・経験等3点以内について、下記の注意事項に沿い、簡潔に記載してください。なお、学術誌へ投稿中の論文を記載する場合は、掲載が決定しているものに限ります。

(例)

- ① 発表論文の場合、論文名、著者名、掲載誌名、査読の有無、巻、最初と最後の頁、発表年(西暦)について記載してください。以上の各項目が記載されていれば、項目の順序を入れ替えても可。著者名が多数にわたる場合は、主な著者を数名記入し、他を省略(省略する場合、その員数と、掲載されている順番を○番目と記入)しても可。なお、申請者には、下線を付してください。
- ② 大学及び大学共同利用機関以外の機関(企業、公設試験研究機関等)における研究者としての勤務経験、最低3カ月以上のインターンシップの経験、あるいは、海外の研究機関(大学を含む)に3カ月以上所属し、研究に従事した経験など、多様な研究機関での経歴・経験等について、時期(年月を含む)及び内容を記載してください。

※様式の変更・ページの追加は不可とする。

【特筆すべき業績・経歴・経験等3件】

キーワード： 原子核理論、原子核構造、相対論的エネルギー密度汎関数理論、場の量子論、自己無撞着平均場、準粒子乱雑位相近似(QRPA)、時間依存量子多体系、開放量子系、核子ペアリング相関。

1. 相対論的エネルギー密度汎関数(REDF)理論と磁気双極子(M1)励起

論文： 発表論文[A4]: T. Oishi, Goran Kruzic, and Nils Paar, “Role of residual interaction in the relativistic description of M1 excitation”, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Vol. 47, 115106 (2020).

背景： ●M1 励起は磁場によって引き起こされる集団励起モードである。基本的な観測可能量であるばかりでなく、スピン・軌道順位分裂、相対論的残留相互作用、核子クーパ対相関と密接な関連がある。●原子核が示す多彩な励起現象を網羅的に説明できる理論を打ち立てることは、原子核物理学の重要課題の一つである。現在、このような一般理論となり得る有力候補の一つが、相対論的エネルギー密度汎関数(REDF)理論である。特に近年、相対論的な準粒子乱雑位相近似(QRPA)等の手法によって、各種の励起現象の計算が実現されてきており、その進歩は目覚ましいものがある。しかしM1 励起については、REDF 理論の妥当性は確かめられていなかった。

目的と方法： REDF 理論に準拠した M1 励起の系統的解析と、相対論的な擬ベクトル型残留相互作用、および核子ペアリング相関の影響の評価を行った。先行研究から引き継いだ相対論的 Hartree-Bogoliubov 計算により、核子ペアリング相関まで取り入れた基底状態を計算した結果、束縛エネルギー等の実験データとの良い一致が保証された。また M1 励起強度の計算には、相対論的な準粒子乱雑位相近似(QRPA)を利用した。

結論・インパクト： ●REDF 理論が M1 励起エネルギーの実験結果を良く再現できることが確認された。今後は通常の QRPA レベルを超えた複雑配位などの影響も考慮した精密解析が期待される。●M1 励起は擬ベクトル型の残留相互作用の影響を強く受ける。これはパイ中間子交換に由来する相互作用であり、従って M1 励起とパイ中間子の性質は密接に関連していることが明らかとなった。将来 M1 励起の精密実験データが出揃えば、核子-パイ中間子の結合等に関して、更なる解明が期待される。●開殻核では対相関の影響も顕著であることが示された。特に M1 和則が核子クーパ対の合成スピンに顕著に依存することを、数学的議論と数値計算の双方から証明した。●核子クーパ対には合成スピン 0 と 1 の二通りのモードが許されているが、原子核内部において真に支配的なのはどちらのモードなのかを、M1 励起の実験データから判定できることが示唆された。現在進行中の研究では、既存の M1 実験データとの照合から、合成スピンを 0 とする対相関モデルの方が正しいことが予想されている。●以上の成果は申請者が現職(2018 年 9 月～現在)に着任中に達成された。

【特筆すべき業績・経歴・経験等3件（つづき）】

2. Skyrme エネルギー密度汎函数理論に基づいた巨大電気双極子 (E1) 共鳴の解析

論文： 発表論文[A10]: T. Oishi, Markus Kortelainen and Nobuo Hinohara, “Finite amplitude method applied to giant dipole resonance in heavy rare-earth nuclei”, Physical Review C 93, 034329 (2016).

背景： Skyrme-QRPA は原子核の集団励起現象を系統的・効率的に計算することに威力を発揮してきた。行列型 QRPA 計算では、励起状態は QRPA 行列を対角化して解かれる。その次元数は使用される基底数に応じて決まるが、特に変形している中重核の場合は、必要な基底および次元数が爆発的に増大し、QRPA 行列の計算と対角化が困難であった。この問題に対する解決策の一つが Finite-Amplitude Method (FAM) である（詳細は上記発表論文中の参考文献を参照）。

目的と方法： 軸対称変形を含んだ希土類核種の巨大 E1 共鳴を解析し、Skyrme-EDF の再現能力を評価する。この目的のため、Skyrme-EDF に準拠した自己無撞着平均場計算および FAM-QRPA を実装した。数値計算はフィンランドの研究施設のスーパーコンピューターを利用した大規模並列計算によって実行された。

結論・インパクト： ●従来の行列 QRPA では困難であった、変形核種の巨大共鳴の系統的解析が実現した。スーパーコンピューターを利用した並列計算により、希土類核種の巨大共鳴を評価した。●巨大共鳴の周波数と、アイソベクトル型の有効質量との相関について、詳細な議論が行われた。有効質量は核物質の状態方程式と密接に関連しているが、計算結果と実験データとの照合から、Skyrme-EDF による予言値が適切であることが示唆された。●計算された光吸収断面積は、多くの核種で、実験データとの良い一致が得られた。その一方、いくつかの核種では計算結果が実験値を過小評価しており、さらなる発展の必要性も明らかとなった。

3. 時間発展描像に準拠した二陽子放出崩壊

論文： 発表論文[A9]: T. Oishi, M. Kortelainen and A. Pastore, “Dependence of two-proton radioactivity on nuclear pairing models”, Physical Review C 96, 044327 (2017).

背景： ●量子力学的な時間発展計算は、原子核の多彩な動力学のプロセスを理解するために有効な方法である。二陽子 (2p) 放出崩壊はそれらのプロセスの一種であり、その解明は、核子対相関や多自由度量子トンネル効果に関して、重要な知見を提供することが期待されている。●真空中では2中性子あるいは2陽子は束縛しない。しかし原子核内部においては、この束縛系“dinucleon”に類似した構造（合成スピン0）が示唆されている（dinucleon 相関）。この相関は非束縛・連続状態における核子クーパー対とも言え、2p 放出過程の初期においても実現している可能性がある。

目的と方法： ●2p 放出崩壊における多粒子トンネル効果や diproton 相関の影響を議論する。この目的のため、崩壊プロセスを再現する時間依存量子三体モデルを開発した（親核+陽子+陽子）。このモデルは多粒子トンネル効果を直感的に理解する上で特に有利である。●核子ペアリング相関を記述するためには、いくつかの異なるモデルが存在する。それらのモデルの特性と、2p 放出崩壊の観測量（崩壊幅など）との関連を詳細に議論した。

結論・インパクト： ●時間依存モデルにより、2p 放出崩壊を直観的に議論することが可能となった。●2p 放出のトンネル確率は、陽子間のペアリング相関によって顕著に左右される。ペアリング相関は引力である核力を起源としており、これにより、放出崩壊確率はペアリング相関を無視した場合に比べて、強く抑制される。●引力的ペアリング相関により、陽子単体での放出はエネルギー的に抑制され、二つの陽子は同時・同一方向に放出される確率が高くなる（true two-proton decay）。この true two-proton decay の過程では、合成スピン0の diproton 的配位が支配的となる。いくつかのモデル計算を比較した結果、崩壊幅の実験データを説明するためには、この diproton 的配位が不可欠であることが判明した。●有効ペアリング駆動力のうち、有限な到達距離を持つモデルの方が、実験の崩壊幅とより良い一致を示した。●以上の成果は、原子核内部におけるペアリング相互作用と、2p 放出崩壊の相関を明確に示しており、いくつかの国際的な招待講演等でも評価を受けた（研究業績の「E.受賞歴」参照）。

③業績等

<<その他業績・経歴・経歴等一覧>>

今回構想する研究に関連する重要な業績・経歴・経歴等について、2016 年以降の業績を中心に、現在から順に年次を過去にさかのぼり、通し番号を付して記載して下さい。そのうち、前頁までに記載した特筆すべき業績・経歴・経歴等（3 件）については、該当する番号に○印を付して下さい。

※様式の変更・ページの追加は不可とする。

【その他の業績・経歴・経歴等】

A. 査読付き原著論文

- A1. Tomohiro Oishi, Goran Kruzic, and Nils Paar, “Discerning nuclear pairing properties from magnetic dipole excitation”, The European Physical Journal A 57 (6), 1-7 (2021).
- A2. Goran Kruzic, Tomohiro Oishi, and Nils Paar, “Evolution of magnetic dipole strength in 100-140Sn isotope chain and the quenching of nucleon g factors”, Physical Review C 103, 054306 (2021).
- A3. Esra Yuksel, T. Oishi, and N. Paar, “Nuclear Equation of State in the Relativistic Point-Coupling Model Constrained by Excitations in Finite Nuclei”, Universe, Vol. 7(3), 71 (2021).
- A4. T. Oishi, Goran Kruzic, and Nils Paar, “Role of residual interaction in the relativistic description of M1 excitation”, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Vol. 47, 115106 (2020).
- A5. G. Kruzic, T. Oishi, and N. Paar, “Magnetic dipole excitations based on the relativistic nuclear energy density functional”, Phys. Rev. C 102, 044315 (2020).
- A6. T. Oishi and Nils Paar, “Magnetic dipole excitation and its sum rule in nuclei with two valence nucleons”, Physical Review C 100, 024308 (2019).
- A7. T. Oishi, Lorenzo Fortunato, and Andrea Vitturi, “Two-fermion emission from spin-singlet and triplet resonances in one dimension”, Journal of Physics G 45 (10), 105101 (2018).
- A8. T. Oishi, “One-proton emission from the ${}^6_\Lambda\text{Li}$ hypernucleus”, Phys. Rev. C 97, 024314 (2018).
- A9. T. Oishi, Markus Kortelainen and Alessandro Pastore, “Dependence of two-proton radioactivity on nuclear pairing models”, Phys. Rev. C 96, 044327 (2017).
- A10. T. Oishi, M. Kortelainen and Nobuo Hinohara, “Finite amplitude method applied to giant dipole resonance in heavy rare-earth nuclei”, Phys. Rev. C 93, 034329 (2016).
- A11. T. Oishi, Kouichi Hagino and Hiroyuki Sagawa, Phys. Rev. C 90, 034303 (2014).
- A12. Takahito Maruyama, T. Oishi, K. Hagino and H. Sagawa, Phys. Rev. C 86, 044301 (2012).
- A13. T. Oishi, K. Hagino and H. Sagawa, Phys. Rev. C 84, 057301 (2011).
- A14. T. Oishi, K. Hagino and H. Sagawa, Phys. Rev. C 82, 024315 (2010).

B. 現在投稿中の論文プレプリント

- B1. T. Oishi and Lorenzo Fortunato, “Correlation Energy of Proton-Neutron Subsystem in Valence Orbit”, arXiv: 1706.06115 (2017).
- B2. L. Fortunato and T. Oishi, “Diagonalization scheme for the many-body Schroe-dinger equation”, arXiv: 1701.04684 (2017).

C. 査読付き国際会議プロシーディング

- C1. T. Oishi, G. Kruzic, and N. Paar, “Relativistic energy-density functional approach to magnetic-dipole excitation”, Journal of Physics: Conference Series 1643, 012153 (2020); 27th International Nuclear Physics Conference (INPC2019), Glasgow, UK.
- C2. Lorenzo Fortunato et al. with T. Oishi, “An overview of the scientific contribution of ANDREA VITTURI to nuclear physics”, The European Physical Journal A, vol. 56, number 49 (2020).
- C3. T. Oishi, and L. Fortunato, Acta Physica Polonica B 49, pp 293-300 (2018); Proceeding of “XXXV Mazurian Lakes Conferences on Phphysics”.
- C4. T. Oishi, Nuclear Physics Review 33 (2), pp 203-206 (2016); Proceeding of PROCON2015, Chinese Academy of Science.
- C5. T. Oishi, K. Hagino and H. Sagawa, JPS Conf. Proc. Vol.1, 013056 (2014); Contribution to the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12); Physical Society of Japan.
- C6. K. Hagino, H. Sagawa, and T. Oishi, Modern Physics Letters A, Vol.25, 1842-1845 (2010).

D. その他出版物（査読無し、出版済み、またはインターネット公開中のみ）

- D1. T. Oishi,「海外通信：イタリアの古都 Padova から」、Genshikaku Kenkyu 63 (2), page 4-7 (2019).
- D2. T. Oishi, Supplemental note for “Two-fermion emission from spin-singlet and triplet resonances in one dimension”, arXiv: 1810.05521 (2018).

【その他の業績・経歴・経験等（つづき）】

D3. T. Oishi, 「スーパーRA としての研究活動と将来の展望」、Outreach journal by the GCOE programme in Tohoku University, Vol. 15, p9 (2012).

D4. T. Oishi, K. Hagino and H. Sagawa, Genshikaku Kenkyu 55 (suppl. 1), page 63-66 (2011).

E. 受賞歴

E1. “Hashimoto prize, with the ANPhA 1st prize, for the best presentation” in the Young Researchers Session of the SNP School 2020, with 10,000 JPY as reward, 6th December, 2020.

[URL: <http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/snpsc2020/>]

E2. “CAEN Best Young Speaker Award” in IVth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure, with 200 euros as reward, Bormio Italy, 25th February 2018.

[URL: <https://sites.google.com/site/wsborniomi2018/home>]

E3. Super Research Assistant award in the GCOE programme “Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy” in Tohoku University, April 2013.

F. 公募型フェローシップ

F1. Post-doctoral fellowship in the University of Zagreb, Croatia

期間：September, 2018 – present. 財源：[1] “Structure and Dynamics of Exotic Femtosystems” (project ID: IP-2014-09-9159) by Croatian Science Foundation; [2] “QuantiXLie Centre of Excellence” (project ID: KK. 01.1.1.01) by Croatian Government and the European Union.

代表者： Prof. Nils Paar (Univ. of Zagreb, Croatia)

分担金額： 1100 ユーロ／月（給与）＋年間 2000 ユーロ（研究支援費）。

F2. Post-doctoral fellowship in the University of Padova, Italy

期間：September, 2016 – August, 2018. 財源：“Inter-disciplinary Applications of Nuclear Theory: from atoms and molecules to stars” (project code: PRAT no. CPDA154713).

代表者： Prof. Lorenzo Fortunato (Univ. di Padova, Italy)

分担金額： 1950 ユーロ／月（給与）＋年間 3000 ユーロ（研究支援費）。

F3. Post-doctoral fellowship in Helsinki Institute of Physics and University of Jyväskylä, Finland

期間：April, 2014 – August, 2016. 財源：[1] Finland Distinguished Professor Programme (FiDiPro) 2012; [2] Centre of Excellence Programme 2012-2017 in Nuclear and Accelerator Based Programme at JYFL.

代表者：[1] Prof. Jacek Dobaczewski (Univ. of York, UK, and Univ. of Jyväskylä, Finland); [2] Dr. Markus Kortelainen (Univ. of Jyväskylä, Finland).

分担金額（上記 2 点の合算）： 3100 ユーロ／月（給与）＋年間 1000 ユーロ（研究支援費）。

G. 国際会議等での招待講演（抜粋）

G1. (Invited Talk) ○T. Oishi, Lorenzo Fortunato, and Andrea Vitturi, “Nucleon-emission process as a time-dependent quantum system”, Theoretical Nuclear Physics in Padova: a meeting in honor of Andrea Vitturi, at Università di Padova, Italy, May 21-22th, 2019.

G2. (Invited Talk) ○T. Oishi, Markus Kortelainen, and Alessandro Pastore, “Dependence of Two-proton Radioactivity on Nuclear Pairing Models”, FiDiPro Winter Symposium on Nuclear Structure Physics, at University of Jyväskylä, Finland, 12-15th December 2017.

G3. (Invited Seminar) T. Oishi, “Analysis of Two-Nucleon Emission with Time-Dependent Three-Body Model”, seminar in the University of Tokyo, Kashiwa Campus, Prof. Naomichi Hatano’s laboratory, 8th August, 2017.

G4. (Invited Talk) ○T. Oishi, Kouichi Hagino, and Hiroyuki Sagawa, “Role of Pairing Correlation in Two-proton Emission”, The 5th International Conference on Proton-emitting Nuclei (PROCON-2015), Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China, 6-10th July 2015.

G5. (Invited Seminar) ○T. Oishi, K. Hagino, and H. Sagawa, “Role of Pairing Correlation in Two-proton Emission”, seminar in the University of Warsaw, Poland, 20th November, 2014.

Z. その他活動実績（抜粋）

Z1. Referee in the journal “Nature Communications” in 2020.

Z2. Referee in the journal “Journal of Physics G: Particle and Nuclear Physics” in 2020.

Z3. Referee in the journal “The European Physical Journal A” in 2018.

Z4. Referee in the journal “Nuclear Physics A” in 2017.

Z5. 日本物理学会（会員番号 54823H）、2010 年 9 月～現在。