

## 1 研究目的、研究方法など

本研究計画調書は「小区分」の審査区分で審査されます。記述に当たっては、「科学研究費助成事業における審査及び評価に関する規程」（公募要領19頁参照）を参考にすること。

本研究の目的と方法などについて、4頁以内で記述すること。

冒頭にその概要を簡潔にまとめて記述し、本文には、(1)本研究の学術的背景、研究課題の核心をなす学術的「問い」、(2)本研究の目的および学術的独自性と創造性、(3)本研究の着想に至った経緯や、関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ、(4)本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか、(5)本研究の目的を達成するための準備状況、について具体的かつ明確に記述すること。

本研究を研究分担者とともに行う場合は、研究代表者、研究分担者の具体的な役割を記述すること。

### （概要）

キーワード： 原子核理論、核子多体系、相対論的エネルギー密度汎函数 (REDF) 理論、場の量子論、自己無撞着平均場計算、準粒子乱雑位相近似 (QRPA)、核子集団励起、核子放出を伴う放射性崩壊、時間依存量子多体系。

核子集団励起や放射性崩壊など、原子核の動力的現象は、現在でも核物理学のフロンティアである。本研究では相対論的エネルギー密度汎函数 (REDF) 理論に基づいた理論・計算科学的アプローチを採用し、これらの統一的理解を目指す。REDF理論による平均場計算は、多くの原子核の束縛エネルギー等の説明に成功してきており、核構造のUniversal Theoryの有力候補といえる。研究計画の前半では、REDFベースの準粒子乱雑位相近似 (QRPA) を用いた原子核の磁気双極子 (M1) とGamow-Teller (GT) 励起の解析、実験データとの照合、およびREDFパラメーターの最適化を行う。計画後半では、発展的課題として、相対論的な時間依存計算による核子放出の研究に挑戦する。これらの研究を通じて、REDF理論を核構造のUniversal Theoryへと進化させるための突破口を開く。

### （本文）

(1) 本研究の学術的背景、研究課題の核心をなす学術的「問い」



図1: 原子核のUniversal Theoryの完成予想図。

### REDF理論は原子核のUniversal Theoryとなり得るのか？

原子核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。これらの性質を解明することは基礎物理学の使命であり、また、原子力工学や天体物理学の諸問題とも密接に関連している。全ての核種の物理的情報を、一意の現象論的フレームワークによって記述することは、原子核理論の目標の一つである(図1)。しかし、このようなUniversal Theoryの完成のためには問題が山積しており、現在も試行錯誤が続けられている。尚、強い相互作用の基礎理論としては量子色力学(QCD)が存在するが、低エネルギー領域では非摂動的であるため、有限サイズの原子核の計算は現在でも困難である。その一方で、仮にQCDが原子核の理論としても妥当であるなら、何らかの極限や近似を経ることで、図1が描くUniversal Theoryに収束するはずである。このゴール地点を明確化するという意味でも、核子多体系のUniversal Theoryを完成させておくことは有意義である。

将来完成するであろうUniversal Theoryの原型となり得る有力候補としては、第一原理計算[1, 2]、

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

シェルモデル[3, 4]、カイラル有効場理論[5]、エネルギー密度汎函数 (EDF) 理論[6, 7]、あるいはそれらの複合理論が有望視されている。

本研究は原子核EDF理論、なかでも相対論的なバージョンであるREDF理論に立脚している[8, 9]。

数学的には、REDF理論は一種の有効量子場理論であり、核子 (フェルミオン場) といくつかの中間子 (ボソン場) との結合を含むラグランジアン密度によって定義されている。このラグランジアン密度から出発して、核子多体系の束縛エネルギー等を具体的に計算するため、相対論的なHartree-Bogoliubov法などの計算手法も発展してきた[9]。特筆すべき成果として、最新のREDF計算からは、核子数20から200程度までの安定核の束縛エネルギーを、誤差数%の精度で再現できる。

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

(2) 本研究の目的および学術的独自性と創造性

本研究ではREDF理論による磁気双極子 (M1) 励起、Gamow-Teller (GT) 励起、さらに発展的課題として、核子放出をともなう放射性崩壊の研究を行い、REDF理論を核構造のUniversal Theoryへと進化させるための突破口を開く。原子核の物理的特徴のうち、束縛エネルギーや対ギャップなどの静力学的な特徴に関しては、REDFやその他の理論計算は一定の成功を収めてきた。その一方、M1/GT励起や放射性崩壊など、時間依存する動力学的な現象は、多くの課題が残されたフロンティアといえる (表1)。最大の問題は、励起状態や時間依存性を考慮した多体計算の複雑さである。それでも、動力学的現象の説明能力は、Universal Theoryの必要条件である。本研究計画はREDF理論にこの能力を実装するためにデザインされた。

他の理論計算と比較すると、REDF理論に準拠した平均場計算は、束縛エネルギー等の再現に関しては、核図表上において最大の有効範囲を誇っている[9]。即ち、多くの核種を統一的に扱うことが出来る。加えて、REDF平均場計算は、現時点ではほとんど唯一の、相対論的なDirac-Lorentz形式を保持した計算手法である。他の主要な理論モデルと異なり、核子はDirac方程式で記述される。そのため、核構造において重要なスピン軌道相互作用を自然に記述することができる。高エネルギー領域への応用を考える際にも、相対論的效果や因果律を保持できる利点がある。さらにラグランジアン形式から、密度汎函数のいわゆるtime-evenとtime-odd成分が一意に定義できる利点もある。

(3) 本研究の着想に至った経緯や、関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

本研究は代表者がクロアチア・ザグレブ大学で行っていた議論を端緒にしている (詳細は次章)。原子核のM1やGT励起は、核子のスピン自由度が関与する現象であり、精密な評価にはDirac-Lorentz形式を備えたREDF理論が有利だと期待していた。しかし実際にREDF計算を行った結果、残留相互作用や核子ペアリング相関、変形などの要素が複雑に絡み合っている事情が判明した。これらの不確定要素が残っているために、M1/GT励起の実験データを満足に再現できるレベルには達していない。そのためには計算手法の更なる発展と実験データの検証、そこからのフィードバックによるREDF理論の精密化が必要である。幸い、実験技術の進歩により、従来よりも精密なデータが出揃いつつある。例えば大阪大学のハドロンプローブを利用した実験は、M1/GT励起のアイソスピン対称性や微細構造、超許容型のGT遷移などに関するデータを提供してきている[10, 11]。ドイツを中心とした欧州の実験グループからも、精密なデータが今後も提供される見通しである[12]。M1/GT励起は

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

研究対象	計算手法	REDFで再現できるか?
(静力学的) 束縛エネルギー	自己無撞着平均場 (Hartree-Bogoliubovなど)	◎
半径 (密度分布)		○
対ギャップ		○
(動力学的) 励起現象 (M1/GTを含む)	集団励起モデル (QRPAなど)	△
核子放出崩壊	時間依存計算	?

表1: 原子核の物理的特徴(研究対象)と、現在のREDF理論の能力。

元素合成プロセスや中性子星の磁気的特性、超新星爆発、ニュートリノ反応といった話題とも密接に関係しており[13]、それらの解明にも本研究の知見が役立つ可能性がある。

代表者は過去に核子放出型の放射能の研究にも従事していた。ただし当時の研究内容はREDF理論とは独立なものであった。核子放出については信頼性の高い実験データが蓄積されている[14]。一方で、理論的には時間依存性や量子トンネル効果を正しく評価する必要があり、挑戦的な課題といえる。本研究ではREDF理論に核子放出崩壊の説明能力をも実装することで、Universal Theory実現への標石としたい。尚、代表者の過去研究の詳細については次章にまとめた。

(4) 本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか

従事期間である3年間を通して、以下の課題群に取り組んでいく。

- (1年目前半) M1とGT遷移のアイソスピン対称性の破れと残留相互作用。M1やGT遷移は核子のスピン反転を含む動力学的プロセスである。最近では代表者らによって、REDF-QRPAによるM1とGT励起の計算が、1粒子QRPAレベルまで実現した。この両者は演算子レベルではアイソスピン対称性を備えているように見える。しかし代表者の最新の研究では、相対論的な残留相互作用などにより、両者の対称性は破れていることが示唆された。その一方、REDFラグランジアン改善の必要性も明らかとなった。本プロジェクトでは新たに擬スカラー・擬ベクトル型の残留相互作用を追加し、実験データの再現能力向上を図る。これらの残留相互作用は、基底状態の観測量への影響は小さいが、集団励起や天体核反応等においては不可欠な要素であり、その精密化は重要である。また研究の展開次第では、より高次のスピン・アイソスピン型の集団励起も取り扱い、包括的な議論と成果につなげる。
- (1年目後半) 有限核中の陽子・中性子のスピン相関。ハドロンプローブを用いたM1遷移の測定[15]から、核内部では陽子と中性子のスピン相関が有限値をとっている可能性が提示されている。一方で、いくつかの理論計算は、この相関値について結果の一致に至っておらず、その理由も定かではない。本件ではREDF-QRPAを適用して、有限スピン相関を議論する。核子クーパー対の合成スピン問題も議論する。
- (2年目前半) 変形を含むM1やGT遷移の計算。中性子過剰な原子核では変形を考慮する必要

## 【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

がある。しかし変形を取り入れた場合、QRPA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[16]で提唱されたFAM-QRPAを採用する予定である。REDF-FAM-QRPAのコードはオープンソース版が公開されているが[17]、M1/GT遷移の計算には残留相互作用などの追加実装が必要である。また天体核反応が起きる環境下では、ゼロ温度近似が必ずしも妥当ではないため、温度効果の追加も計画している。

- (2年目後半) 中性子星物性と原子核の橋渡し。中性子星はいわば巨大な核子多体系である。強い重力により相対論的效果も無視できない。ここまで得られる知見により、信頼性が向上したREDF理論に基づき、M1/GT励起と中性子星物性の関係を議論する。
- (3年目) 相対論的な量子トンネル効果と核子ドリップライン。REDF理論が核子放出型の放射能を説明できるか否かについては、現在でも議論が紛糾している。本課題ではまず時間依存Dirac方程式による量子トンネル計算を実装し、核子放出の観測量とスカラー/ベクトル型平均場の関係などを議論する。その成果を足掛かりとして、本格的なREDF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を最終目標とする。尚、最近のREDF計算においても、時間依存性の導入と応用が試みられてきた[18]。しかし量子トンネル効果をあらわに再現した成功例は未だに存在せず、挑戦的な課題であると言える。

## (5) 本研究の目的を達成するための準備状況

本研究ではREDF理論に準拠した数値計算が主要な活動になる。計算に必要なコードやプログラムのうち、基幹をなす部分は、代表者の過去研究において開発が完了している(詳細は次ページ)。追加に必要なコードの開発は代表者が行う。国内の協力者ではないが、代表者がかつて所属していたクロアチア・ザグレブ大学のNils Paar氏のグループと、フィンランド・ユヴァスキュラ大学のMarkus Kortelainen氏のグループとの間では、これまでに議論や情報交換を行っており、良好な協力関係が構築できている。必要な場合には、両グループから技術的支援を受けられる内約も得ている。申請する予算による計算機環境の増強などを加味すれば、本計画は十分に遂行可能である。

## 参考文献

- [1] S.C. Pieper and R.B. Wiringa, Annual Review of Nuclear and Particle Science 51, 5390, 2001. [2] B.R. Barrett et al, Progress in Particle and Nuclear Physics 69, 131181, (2013). [3] E. Caurier et al, Review of Modern Physics 77, 427 (2005). [4] L. Coraggio et al, Progress in Particle and Nuclear Physics 62(1), 135182 (2009). [5] R. Machleidt and D.R. Entem, Physics Report 503, 1-75 (2011). [6] W. Kohn, Rev. Mod. Phys. 71 (1999) 1253. [7] M. Bender, P.-H. Heenen, and P.-G. Reinhard: Rev. Mod. Phys. 75 (2003) 121. [8] P.-G. Reinhard, Reports on Progress in Phys. 52, 439, 1989. [9] D. Vretenar, A.V. Afanasjev, G. A. Lalazissis, and P. Ring, Phys. Rep. 409, 101-259, 2005. [10] Y. Fujita et al, Phys. Rev. Lett. 112, 112502 (2014). [11] H. Fujita et al, PHYSICAL REVIEW C 100, 034618 (2019). [12] C. B. Hinde et al, Nature 486, 341-345 (2012). [13] K. Langanke et al, Phys. Rev. Lett. 93, 202501 (2004). [14] M. Pfützner, M. Karny, L. V. Grigorenko, and K. Riisager, Rev. Mod. Phys. 84, 567 (2012). [15] H. Matsubara et al, Phys. Rev. Lett. 115, 102501 (2015). [16] H. Liang, T. Nakatsukasa, Z. Niu, and J. Meng, Phys. Rev. C 87, 054310 (2013). [17] A. Bjelcic and T. Niksic, Comp. Phys. Com. 253, 107184 (2020). [18] Z.X. Ren, P.W. Zhao, and J. Meng, Phys. Rev. C 102, 044603 (2020).

## 2 応募者の研究遂行能力及び研究環境

応募者（研究代表者、研究分担者）の研究計画の実行可能性を示すため、(1)これまでの研究活動、(2)研究環境（研究遂行に必要な研究施設・設備・研究資料等を含む）について2頁以内で記述すること。

「(1)これまでの研究活動」の記述には、研究活動を中断していた期間がある場合にはその説明などを含めてもよい。

### (1) これまでの研究活動

研究計画に関連する代表者の原著論文

A16. Tomohiro Oishi, Ante Ravlic, and Nils Paar, “Symmetry breaking of Gamow-Teller and magnetic-dipole transitions and its restoration in calcium isotopes”, *Phys. Rev. C* 105, 064309 (2022).

A15. T. Oishi, Goran Kruzic, and Nils Paar, “Discerning nuclear pairing properties from magnetic dipole excitation”, *The European Physical Journal A*, Vol. 57 (6), page 1-7 (2021).

A12. T. Oishi, G. Kruzic, and N. Paar, “Role of residual interaction in the relativistic description of M1 excitation”, *Journal of Physics G: Particle and Nuclear Physics*, Vol. 47, 115106 (2020).

A7. T. Oishi, “One-proton emission from the  ${}^6_{\Lambda}\text{Li}$  hypernucleus”, *Phys. Rev. C* 97, 024314 (2018).

A6. T. Oishi, Markus Kortelainen and Alessandro Pastore, “Dependence of two-proton radioactivity on nuclear pairing models”, *Phys. Rev. C* 96, 044327 (2017).

A5. 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).

代表者(大石知広)はこれまで原子核構造論の分野において、理論および計算科学的アプローチを駆使した研究に従事してきた。特に量子力学的な多体問題、エネルギー密度汎函数理論、核子集団励起、放射性崩壊を主要な研究テーマとして取り扱ってきた。

原著論文[A12, A15]ではREDF理論に準拠した相対論的な自己無撞着平均場計算と、REDF-QRPAによるM1励起の系統的な計算を行った。さらに核子ペアリング相関や、擬ベクトル型の残留相互作用の影響を議論した。M1励起の実験データの再現能力を評価し、REDF改良の方向性を議論した。主な成果として、(1)REDF理論がM1励起の実験結果をある程度の精度で再現できること、すなわち、スピン反転型励起の現象論としても有望であることが確認された。(2)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る。本研究によって、パイ中間子・核子結合とM1励起という観測可能量の関係が明示された。(3)開殻核では核子のクーパー対相関の影響も顕著である。特にM1和則が核子クーパー対の合成スピンの依存することを、数学的議論と数値計算の双方から証明した。核子クーパー対には合成スピン=0と1の二通りのモードが考えられるが、既存のM1実験データとの照合から、合成スピンをゼロとする対相関モデルの方が正しいことが、本研究結果から示唆されている[A15]。この結果は、原子核や中性子星の磁性を議論する上で、重要な手がかりを与える。

論文[A16]ではGTとM1励起のアイソスピン対称性とその破れを議論した。この二つの集団励起は演算子レベルではアイソスピン対称性が存在するが、実際には残留相互作用により、この対称性が破れている可能性が、REDF-QRPA計算から示唆された。一方で実験データの定量的な再現能力には未だ問題が残っており、REDF理論の刷新のためにいくつかの着想を得た。それらは本計画中に盛り込まれている。

論文[A5]ではSkyrme-EDF理論にもとづいたFAM-QRPA計算を行った。有効核力であるSkyrme力を一般化したSkyrme-EDFは、微視的な核構造の理解に重要な役割を果たしてきた。一方で、電気双極子(E1)型などの集団励起に応用する場合、変形している中重核種のQRPA計算は、必要な

## 【2 応募者の研究遂行能力及び研究環境 (つづき)】

基底および次元数が爆発的に増大するため、QRPA行列の評価と対角化が困難であった。これに対する解決策の一つがFinite-Amplitude Method (FAM) である。本研究ではSkyrme-FAM-QRPAの採用により、変形核種の巨大E1共鳴の系統的解析が実現した。並列化FAM-QRPA数値計算から、Skyrme-EDFの予言するアイソベクトル有効質量と、巨大E1共鳴による光吸収断面積との関係を明らかにした。この結果は、中性子星をはじめとした巨視的核物質の物性パラメーターと、地上で観測可能な物理量との関係を示した一例である。また計算された光吸収断面積は、多くの核種で、実験データとの一致が得られた。

論文[A6]では陽子放出を伴う放射性崩壊を研究した。陽子あるいは中性子ドリップラインより外側の核種は、核子放出型の放射性崩壊を起こす。その中でも、二陽子 (2p) 放出崩壊は2個の陽子の放出を伴う崩壊モードであり、核子クーパー対相関、量子もつれ、多自由度の量子トンネル効果に関して、重要な情報を提供する。2p放出は非束縛かつ時間依存する現象であり、束縛系を想定しているモデルや解析手法は適用できない。本研究では2p放出崩壊を、時間依存性をあらわに保持した開放量子多体問題としてとらえ、数値計算を実装した。2p放出崩壊の確率が、陽子のクーパー対相関によって強く抑制されている点を明らかにした。この結果は、二個の独立粒子の量子トンネル効果だけでは説明できないが、引力である核力起源の対相関と、フェルミオンである陽子に対するパウリ排他律との組み合わせから理解できることを示した。放出過程のシミュレーションによれば、二つの陽子は同時に、かつ同一方向に放出される確率が高い。その際には合成スピンのゼロのdiproton的配位が支配的であることも示唆されており、量子もつれ状態の一例であると期待される[A6]。このような二つの陽子の量子もつれ状態は、真空中では束縛系として存在できないが、2p放出崩壊では実現している可能性を示した点は、本研究の成果といえる。

論文[A7]では上記の時間発展計算をハイパー核の陽子放出にも応用した。ハイパー核ではストレンジを含むラムダ粒子などのハイパー核子と、通常の核子の相互作用 (YN相互作用) が大きな問題として残されている。本論文ではラムダ粒子を含む親核からの陽子放出の確率 (寿命) を計算し、それがYN相互作用に顕著に依存することを示した。将来ハイパー核からの核子放出の実験が可能になれば、YN相互作用の解明にとって重要な情報源になると期待される。

## (2) 研究環境

本研究は京都大学基礎物理学研究所を拠点として遂行する。同拠点は理論物理学研究に関して国内有数の人的資源を備えている。必要な資料や文献、実験データに随時アクセスが可能であり、かつ、研究遂行に十分な事務的サポートも受けられる環境が整っている。その一方で、以下の項目については、申請予算にもとづいた増強・整備が必要である。

- REDF平均場計算用のコード開発と数値計算の実行が、実際の研究活動の大部分を占める。そのため、十分な計算速度および記憶容量を備えた計算機が必要である。コンパイラーや解析用のソフトウェアも必要である。論文執筆や成果発表に利用するサブ計算機、プリンター、オンラインでの情報交換を円滑に遂行するための付属備品も必要である。これらの計算機および周辺設備のための予算を計上する。
- 研究成果を広く宣伝し、また国内外の研究者と実際に交流しつつ議論するためには一定の経済的支援が必要であるが、現在の研究拠点内部の予算には限界がある。そのため、旅費をはじめとした諸経費を計上する。国内外の研究者を招聘するための予算も含む。

以上の申請が認められ、環境が整備できれば、本研究は十分に遂行可能である。

### 3 人権の保護及び法令等の遵守への対応（公募要領4頁参照）

本研究を遂行するに当たって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など指針・法令等（国際共同研究を行う国・地域の指針・法令等を含む）に基づく手続が必要な研究が含まれている場合、講じる対策と措置を、1頁以内で記述すること。

個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査・行動調査（個人履歴・映像を含む）、提供を受けた試料の使用、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、研究機関内外の倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となります。

該当しない場合には、その旨記述すること。

本研究は該当しない。

**4 研究計画最終年度前年度応募を行う場合の記述事項**（該当者は必ず記述すること（公募要領27頁参照））

本研究の研究代表者が行っている、令和5(2023)年度が最終年度に当たる継続研究課題の当初研究計画、その研究によって得られた新たな知見等の研究成果を記述するとともに、当該研究の進展を踏まえ、本研究を前年度応募する理由（研究の展開状況、経費の必要性等）を1頁以内で記述すること。  
 該当しない場合は記述欄を削除することなく、空欄のまま提出すること。

研究種目名	課題番号	研究課題名	研究期間
			平成 年 度～令和 5年度

当初研究計画及び研究成果

前年度応募する理由