

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03964

研究課題名(和文)原子核密度汎関数理論による中性子過剰不安定核の対相関の研究

研究課題名(英文) Study on pairing correlations in neutron-rich unstable nuclei within nuclear density functional theory

研究代表者

日野原 伸生 (Hinohara, Nobuo)

筑波大学・計算科学研究センター・助教

研究者番号：80511435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：原子核密度汎関数理論を用いて核図表の広い領域にわたり対相関の性質を研究した。原子核の対相関は質量の偶奇差を用いて議論されてきたが、対回転の慣性モーメント、荷電半径、 α ノックアウト反応での粒子除去の強度など様々な実験観測量が対密度汎関数と相関していることを示した。また、スピン一重項型の対密度汎関数以外にFayans型やスピン三重項型などの特異な対密度汎関数を用いた分析も行い、様々な実験観測量の分析を通して対密度汎関数の形を決められる可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子核対相関は原子核基底状態での最も基本的な相関の一つであり、多くの原子核は基底状態で核子対が凝縮していると考えられている。質量の偶奇性を用いた従来の議論だけでは対密度汎関数の形を決定することができず、これまで対相関の理解に大きな進展が見られていなかった。本研究により様々な実験観測量に対相関の影響が強く見えることが明らかとなった。この成果は対密度汎関数のさらなる理解につながり、将来の対密度汎関数の決定にも貢献できる。

研究成果の概要(英文)：We have studied the nuclear pairing correlation in a wide range of the nuclear chart based on the nuclear density functional theory. The nuclear pairing correlation has been conventionally analyzed using the odd-even mass staggering. We have shown that various experimental observables such as the pairing rotational moment of inertia, the charge radius, and the alpha-removal amplitude of the alpha-knockout reaction correlate with the pair energy density functional (EDF). In addition to the standard spin-singlet pair EDFs, we have also performed analyses using other types of pair EDFs such as the Fayans EDF and the spin-triplet one. We have shown that it is possible to determine the form of the pair EDF by using various experimental observables.

研究分野：原子核理論

キーワード：不安定核 対回転 原子核密度汎関数法 対相関

1. 研究開始当初の背景

原子核内の2核子が対を組んで凝縮する核子対相関は原子核の基底状態を中心として低エネルギー領域で見られ、多くの原子核基底状態が対凝縮を起こしていることから原子核の基底状態の質量を理解する上で重要な相関である。原子核の質量は基本的な実験観測量であるが、特に自然界に安定に存在する原子核よりも中性子数の多い中性子過剰原子核領域は、現在宇宙に存在する原子核の多くを生成したとされる元素合成過程であるrプロセスにおいて重要な役割を果たしていると考えられる。安定核とは様々な側面で異なった性質を示す、中性子過剰原子核の質量を正確に予言することは元素合成過程の理解につながり、そのためには原子核対相関の、特に安定核から離れた領域での理解を進めることが重要である。rプロセスによる元素合成では様々な質量の原子核が関与するため、原子核密度汎関数理論を用いることにより質量領域に制限なく計算が実行可能である。原子核密度汎関数理論は与えられたエネルギー密度汎関数を最小化する密度を求めることで原子核基底状態の密度と質量を計算する手法であるが、エネルギー密度汎関数の形状は明らかではないため、既知の実験データを再現するようにエネルギー密度汎関数を決定する現象論的なアプローチが広くとられている。最近複数の研究グループにより、Skyrme型(局所密度型)のエネルギー密度汎関数の結合定数が多くの既知の実験データを用いて決定され、全質量領域を記述可能な原子核密度汎関数が利用可能である。しかしながら、対相関部分についてはまだ大きな不定性が残っている。

2. 研究の目的

本研究の目的は原子核内での中性子や陽子が対を組んで安定化する対相関の中性子過剰不安定核特有の性質を明らかにしつつ、不安定核の質量を精密に計算してrプロセスの元素合成過程の全貌を明らかにすることである。

3. 研究の方法

原子核密度汎関数理論の計算コードであり、Skyrme型密度汎関数で軸対称変形と対相関を扱うことができる調和振動子基底のHFBTH0およびその有限振幅法の拡張を主に用いて計算を行った。球形核のみを議論する場合は球対称座標基底の原子核密度汎関数理論計算コードであるHFBRADを用いた。

4. 研究成果

(1) 荷電半径の同位体依存性の分析

カルシウム同位体の荷電半径の同位体依存性(アイソトープシフト)が ^{40}Ca と ^{48}Ca の間で放物線的な振る舞いにより増大する、という実験データをほとんどの既存の原子核構造理論では説明できないことが知られているが、唯一Fayans密度汎関数を用いた計算では理論的に説明することができる。Fayans密度汎関数では対密度汎関数の結合定数に標準的な粒子密度依存に加えて粒子密度の空間微分に関する依存性を含む。この微分項の粒子空孔ポテンシャルへの再配置効果により荷電半径が変化するため、中性子の対相関によって $^{40}\text{-}^{48}\text{Ca}$ 領域での荷電半径の増大が説明できる。荷電半径を精密に計算するため、原子核の電荷密度分布を相対論的定式化に基づいて計算する手法を用い、核内の陽子密度分布からの寄与に加えて、中性子密度分布からの寄与、スピン-軌道密度からの寄与および相対論的な効果が入った電荷密度分布をHFBRADおよびHFBTH0に実装した。二重魔法核で2つのコードのベンチマーク計算を行った。Fayansの対密度汎関数を用いてCa, Ni, Sn, Pb同位体等の荷電半径を計算し、閉殻付近での荷電半径の同位体依存性に見られるキルクを再現した。特にCa同位体の荷電半径の放物線的な増加はFayansの中性子対密度汎関数に含まれる密度の空間微分項由来である、陽子のポテンシャルの振る舞いによってよく再現できるが、同じ振る舞いによって ^{40}Ca よりも軽い領域の荷電半径の実験データが説明できず、両方の質量数領域を統一的に記述できることが重要であることを指摘した[1]。

(2) 対回転の慣性モーメントの分析

引力である対相関が強い系では対凝縮が起こり、基底状態の性質が質的に変化することが知られている。特に、対凝縮に伴って基底状態の束縛エネルギーの系統性に変化が現れる。中性子数と陽子数がともに偶数個からなる偶々核の近傍の、中性子数、陽子数が偶数個異なる同位体の基底状態は、基準となる偶々核が対回転励起した集団状態とみなすことができる。この対回転の性質を用いて束縛エネルギーの実験値から得られる指標により、どの同位体で対凝縮が起こっ

ているかを特定し、対凝縮が核図表の全質量領域にわたって広範に実現していることを示した。また、対回転のエネルギーパターンを示さない同位体について、その理由が閉殻構造にあるのか、変形転移にあるのかを分析した。この指標によって中性子あるいは陽子が対凝縮しているときみなせる既知の偶々核同位体は約 300 程度であり、これら全ての同位体について、対回転の実験観測量である対回転の慣性モーメントを原子核密度汎関数および有限振幅法を用いて系統的に計算した。実験値との比較を行い、対密度汎関数の密度依存性に依存性があることを示した。特に密度依存項によって核表面付近で結合定数が大きくなる対密度汎関数を用いると全質量領域の対回転の慣性モーメントをよく説明できることを示した。また、対回転の慣性モーメントの秩序変数である対振幅依存性を、対八ミルトニアンを用いて分析した。対凝縮している系では対振幅と慣性モーメントの間に逆相関があり、空間回転の場合の変形度と慣性モーメントの間の関係とは異なることを示した。

(3) ノックアウト反応断面積における原子核対相関の寄与

ノックアウト反応断面積は原子核表面にどの程度 粒子が形成されているかの手がかりとなるが、錫同位体の反応断面積の実験値は中性子数と共に減少し、中性子過剰領域にいくに従って核表面での 粒子形成が少なくなっていることを示唆している。平均場理論に基づいて核内で局在化した 粒子の遷移振幅の評価を行った。核内のある位置における 粒子除去の強度を測る指標として局所 除去強度を提案した。またこれを正規化した局所 確率を提案した。局所 確率はノックアウト反応が起こると考えられる原子核表面で中性子数と共に減少し、実験値と傾向が一致することを示した[2]。この計算では簡略化のため、 粒子をデルタ関数によって点粒子で近似し、原子核の再配置効果を無視し、平均場計算は Hartree-Fock+BCS 近似で行っていたが、これらの近似を改良する計算を進めた。基底状態間の遷移に限って再配置効果を取り入れた計算、すなわち反応の始状態原子核と終状態原子核それぞれの基底状態を平均場理論で計算し、 粒子除去の強度を点粒子近似および Hartree-Fock-Bogoliubov 近似で行った。原子核表面での 粒子除去の強度は中性子数とともに減少し、鉛同位体の反応断面積の実験値の傾向を再現できた。中性子 - 陽子の混合のない平均場波動関数を用いた遷移振幅は中性子と陽子部分の積で表わされ、 粒子はスピンの向きが逆向きの中性子、陽子ペアから構成されていることから、特に錫同位体の ノックアウトでは中性子の対相関が重要な役割を果たすことが明らかとなった。さらに 粒子の有限サイズ効果を取り入れる定式化を行い、密度行列展開を行うことによって、 粒子を構成する 4 つの核子がガウス型の波動関数で分布している場合でも平均場理論に基づいた計算が可能となった。この定式化では 粒子の重心の自由度を分離することが可能であるため、今後ノックアウトの反応理論計算に用いることができる 粒子除去の振幅の計算が可能となる。

(4) スピン三重項対相関

有限核で支配的な対相関はスピンの向きが逆向きの核子ペアの間に引力が働くスピン一重項対相関であるが、中性子星内部の中性子の高密度領域では 2 核子のスピンの向きが揃ったスピン三重項の対相関によっても超流動が起きることが知られている。有限核での同種粒子間のスピン三重項の対凝縮を示す指標を明らかにした。局所密度近似の範囲内ではスピン三重項の対凝縮を示す秩序変数はスピнкаレント(テンソル)対密度であり、スピン - 軌道密度汎関数によって、スピン一重項の対凝縮の秩序変数である局所対密度と連動して、スピнкаレント対密度が誘発されて有限となる、つまり、対凝縮状態にある有限核ではスピン一重項とスピン三重項の対凝縮は混合して存在することが明らかとなった。また、スピнкаレント対密度は局所対密度とは異なる軌道依存性を持っているため、スピン三重項対相関は質量の異なる不安定核領域の対相関の性質を、安定核領域のものとは異なったものとする可能性があることがわかった。標準的ではないスピン三重項の対密度汎関数を用いた場合においても、スピン - 軌道スプリッティングおよびスピン一重項の対凝縮が誘発されることを示した。スピン一重項またはスピン三重項の対密度汎関数のどちらを用いるかで Ca 同位体の一粒子軌道の占有率に大きな違いはみられなかったが、中性子過剰領域の対回転の慣性モーメントには対密度汎関数依存性が見られることを示した[3]。

[1] T. Inakura, N. Hinohara, and H. Nakada, arXiv:2404.13635.

[2] T. Nakatsukasa and N. Hinohara, Phys. Rev. C **108**, 014318 (2023).

[3] N. Hinohara, T. Oishi, and K. Yoshida, Phys. Rev. C **109**, 034302 (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hinohara Nobuo, Engel Jonathan	4. 巻 105
2. 論文標題 Global calculation of two-neutrino double- decay within the finite amplitude method in nuclear density functional theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.044314	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Gil Hana, Hinohara Nobuo, Hyun Chang Ho, Yoshida Kenichi	4. 巻 81
2. 論文標題 KIDS density functional for deformed nuclei: examples of the even-even Nd isotopes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Korean Physical Society	6. 最初と最後の頁 113 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40042-022-00504-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kanada-En'yo Yoshiko, Hinohara Nobuo	4. 巻 106
2. 論文標題 Collective model for cluster motion in 8Be, 12C, and 16O systems based on microscopic 2 , 3 , and 4 models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.054312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shi Yue, Hinohara Nobuo, Schuettrumpf Bastian	4. 巻 102
2. 論文標題 Implementation of nuclear time-dependent density-functional theory and its application to the nuclear isovector electric dipole resonance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.044325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Washiyama Kouhei、Hinohara Nobuo、Nakatsukasa Takashi	4. 巻 103
2. 論文標題 Finite-amplitude method for collective inertia in spontaneous fission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.014306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uzawa K、Hinohara N、Nakatsukasa T	4. 巻 2024
2. 論文標題 Generator Coordinate Method with Proton-Neutron Pairing Fluctuations and Magnetic Properties of N = Z Odd-Odd Nuclei	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 053D02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptae072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Gil Hana、Hinohara Nobuo、Hyun Chang Ho、Yoshida Kenichi	4. 巻 108
2. 論文標題 Nuclear mass table in density functional approach inspired by neutron-star observations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.108.044316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakatsukasa Takashi、Hinohara Nobuo	4. 巻 108
2. 論文標題 Local γ -removal strength in the mean-field approximation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.108.014318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hinohara Nobuo, Oishi Tomohiro, Yoshida Kenichi	4. 巻 109
2. 論文標題 Triplet-odd pairing in finite nuclear systems: Even-even singly closed nuclei	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.109.034302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liu Qunqun, Engel Jonathan, Hinohara Nobuo, Kortelainen Markus	4. 巻 109
2. 論文標題 Effects of quasiparticle-vibration coupling on Gamow-Teller strength and decay with the Skyrme proton-neutron finite-amplitude method	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.109.044308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Washiyama Kouhei, Hinohara Nobuo, Nakatsukasa Takashi	4. 巻 109
2. 論文標題 Five-dimensional collective Hamiltonian with improved inertial functions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 L051301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.109.L051301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Global analysis of nuclear pairing rotation
3. 学会等名 Physics of RI: Recent progress and perspectives (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日野原 伸生
2. 発表標題 平均場理論によるアルファノックアウト反応の遷移振幅の計算
3. 学会等名 RCNP研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日野原 伸生
2. 発表標題 ノックアウト反応遷移振幅の平均場理論による評価
3. 学会等名 おのころ戸隠夏合宿（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日野原 伸生、中務 孝
2. 発表標題 粒子遷移振幅への対相関の影響
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日野原 伸生
2. 発表標題 核子対凝縮に伴う南部ゴールドストーンモードとその観測量
3. 学会等名 RCNP研究会「微視的系と巨視的系における核子対凝縮相」（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Role of neutron pairing in alpha-knockout amplitude of Sn isotopes
3. 学会等名 International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Recent progress in nuclear DFT
3. 学会等名 YITP Workshop "Fundamentals in density functional theory" (DFT2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara, Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Role of neutron pairing in alpha-knockout amplitude
3. 学会等名 International Symposium on Nuclear Spectroscopy for Extreme Quantum Systems (NUSPEQ2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日野原 伸生、大石 知広、吉田 賢市
2. 発表標題 有限核での同種粒子間スピン三重項対凝縮の分析
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日野原 伸生
2. 発表標題 対回転慣性モーメントの全核種計算
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日野原 伸生
2. 発表標題 原子核密度汎関数法による対振動・対移行反応の記述
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日野原 伸生
2. 発表標題 Effect of pairing and deformation on nuclear charge distribution
3. 学会等名 ELPH研究会C028「電子散乱による原子核研究」－原子核の電荷密度・陽子・中性子の分布と半径－（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Reduced basis method for DFT linear response
3. 学会等名 2023 NUCLEI Collaboration Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Nuclear pairing and related phenomena in nuclear dynamics
3. 学会等名 FRIB Theory Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Recent development and application of finite-amplitude method for QRPA
3. 学会等名 DNA-OMEG Workshop on Nuclear structure, reaction and astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara, Sylvester Agbemava, Kyle Godbey, Witold Nazarewicz, Ante Ravlic, Jhilm Sadhukhan
2. 発表標題 Local QRPA inertia for symmetric-asymmetric fission dynamics
3. 学会等名 International Conference on Heavy-Ion Collisions at near-barrier energies (FUSION23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Alpha-particle formation and nuclear pairing
3. 学会等名 Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日野原 伸生
2. 発表標題 スピン三重項対相関と関連実験量
3. 学会等名 原子核におけるスピン自由度の織り成すダイナミクス (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Collective phenomena related to neutron-proton pairing in the ground and excited states around $N=Z$
3. 学会等名 Advancing physics at next RIBF (ADRI24) (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Spin-triplet pairing in nuclear DFT
3. 学会等名 RIKEN Symposium Second Workshop on Fundamentals in Density Functional Theory (DFT2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara
2. 発表標題 Pairing rotation and pairing properties in ground states
3. 学会等名 Reimei Workshop "Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction" (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 日野原 伸生, Xilin Zhang, Jonathan Engel
2. 発表標題 有限振幅法のエミュレータ
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 類家 千怜, 日野原 伸生
2. 発表標題 対回転慣性モーメントの分析を通じた中性子対相関に関する考察
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nobuo Hinohara, Tomohiro Oishi, Kenichi Yoshida
2. 発表標題 Energy-weighted sum rule for multipole and spin-M1 transitions and ground-state properties
3. 学会等名 The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Chisato Ruike, Nobuo Hinohara, Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Neutron pairing rotational moments of inertia in Ni, Sn, and Pb isotopes
3. 学会等名 The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中務 孝 (Nakatsukasa Takashi)		
研究協力者	吉田 賢市 (Yoshida Kenichi)		
研究協力者	大石 知広 (Oishi Tomohiro)		
研究協力者	稲倉 恒法 (Inakura Tsunenori)		
研究協力者	中田 仁 (Nakada Hitoshi)		
研究協力者	類家 千怜 (Ruike Chisato)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	ノースカロライナ大学	ミシガン州立大学		
フィンランド	ユバスキュラ大学			
韓国	高麗大学	大邱大学		