

令和元年5月14日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05342

研究課題名(和文)核構造論の試金石：微視的理論によるZr領域核の構造の多面的研究

研究課題名(英文)A touchstone of nuclear structure theories: Versatile study on Zr-region nuclei via microscopic theories

研究代表者

中田 仁(Nakada, Hitoshi)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：80221448

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)：Zr領域の原子核は、中性子数と共に頻りに形状が変化することが知られており、この形状変化を中心とするZr領域核の諸性質を適切に再現できるかどうかは核構造論の1つの試金石となり得る。主として自己無撞着な平均場計算を実行して、質量数80-110程度の範囲で実験的に知られているZr核の形状変化が半微視的核子間相互作用によりほぼ再現できることを示し、さらに質量数120程度までの形状変化を予言した。また、核子間のテンソル力がそれらの形状変化に果たす役割を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核子間相互作用のレベルからの原子核構造の微視的理解が深まり、自己無撞着平均場理論に基づく数値計算による今後の一層精密な記述の進展が期待できる。将来的には、中性子星の構造や超新星爆発・中性子星合体時の元素合成、また核分裂・核融合を含む地上の核反応に対するより信頼性の高い記述に繋がる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：As changing their shapes depending on neutron numbers, the Zr-region nuclei can be a touchstone of nuclear structure theories. Mainly by implementing the self-consistent mean-field calculations, it has been shown that the observed shape evolution of the Zr nuclei from mass number 80 to 110 can be reproduced with the semi-realistic nucleonic interaction, and prediction on shape evolution up to around 120 has been given. Roles of tensor interaction in the shape evolution has been investigated.

研究分野：理論核物理

キーワード：平均場近似 軸対称変形 テンソル力 3体スピン・軌道力 対相関 中性子ハロー RPA 対称エネルギー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子核は、陽子・中性子の2種類の粒子が主として強い相互作用の下で構成する有限量子多体系であり、それらが多様な物性を織り成す。核子数が一定以上になると平均場の下での独立粒子運動が支配的となるが、その平均場は magic number に代表される殻構造をもたらす一方でしばしば自発的対称性の破れにより変形する。核造論の発展により、このような平均場を核子間有効相互作用から自己無撞着に構成したり、さらに量子相関を取り入れた大規模数値計算を実行することが現実的となってきた。

しかしながら、自己無撞着平均場計算の input たる核子間有効相互作用の理解にはまだ大いに議論の余地がある。近年、tensor 力や3体LS力の役割等、核構造の核子間相互作用の level からの理解が進んできた。その中で、Zr 領域核は次に述べるような注目すべき特徴を持ち、これらの理解を進める上でよい試金石になる。

- (1) 陽子過剰側から中性子過剰側まで実験 data が豊富である。 $N \geq 60$ で基底状態の変形を示す新しい data が得られており、実験的に hot な領域の1つである。
- (2) $Z=40$ を持つ Zr 核は、 $N=50$ で magic number に近い振舞いをするのがよく知られているが、陽子過剰側 ($N \approx 40$) でも中性子過剰側 ($N \approx 60$) でも四重極変形を与える。これら中性子数の増加に伴う構造変化の統一的理解は challenging な課題である。
- (3) $N=70$ では有効相互作用により球形になる可能性や正四面体形状の可能性等が指摘されている。
- (4) $N=82$ では $Z=40$ が再び magic number になると言われているが、その当否は r 過程元素合成の理解に影響を及ぼすので、理論の信頼性の検討が望まれる。
- (5) ^{96}Zr , ^{100}Mo は二重崩壊核であり、その核構造は二重崩壊実験結果からの neutrino 質量の算出に関連する。

2. 研究の目的

本研究の最大の目的は、現在の核構造論、特に中質量以上の原子核の系統的研究に用い得る理論の検証である。基底状態の形状さえ理論的予言が困難な点に象徴されるように、理論的 approach の問題点が Zr 領域核に端的に現れており、Zr 領域核における諸問題の解決が今後の核構造論の展開の鍵になるという認識に基づき、Zr 領域核の中性子数の増加に伴う基底状態の形状変化、低励起 mode 等を微視的理論を用いて調べ、最新の実験 data と比較する。それを通じて核構造論の検証を行い、核子間有効相互作用や核子相関という観点からそれらのうちの各成分が核構造にどのような影響を持つか、また今までの approach で不十分な点があるなら何かを洗い出す。具体的な内容は次の通りである。

- (1) $40 \leq N \leq 82$ における Zr 核の基底状態の、中性子数による形状変化の原因を明らかにする。 $N \approx 40$ 及び $N \approx 60$ での変形を consistent に理解する必要がある。特に tensor 力の shell structure や変形に対する役割、またその他の相互作用 channel との協同や競合の様子を詳しく調べる。
- (2) 特に ^{90}Zr 及びその近傍核において、低励起 mode の性質を明らかにする。Neutron skin の影響、pairing や四重極・八重極相関の強さ等についての理解を深める。

3. 研究の方法

主として、核子間有効 Hamiltonian のみを input とする自己無撞着平均場 (Hartree-Fock 及び Hartree-Fock-Bogolyubov) 理論、RPA 理論 (QRPA 理論を含む) による大規模数値計算を実行して研究を進める。Bare な核力から導出された tensor 力等を含む有限 range の半微視的有効相互作用を用い、必要に応じて他の相互作用との比較や拡張を行う。数値計算 code は Gauss 関数展開法に基づく既存のものを、必要に応じて拡張・改良しながら用いる。

4. 研究成果

- (1) M3Y 型半微視的相互作用を用いた軸対称 Hartree-Fock (HF) 計算及び拘束条件付き HF 計算を実行して、陽子 drip 線近傍から中性子 drip 線近傍に至る広い領域で Zr 原子核の構造変化を調べた。従来の平均場計算では困難であった ^{80}Zr の変形が自然に再現された他、 ^{96}Zr の二重閉殻性、 ^{100}Zr の prolate 変形が確認され、また ^{114}Zr での oblate 変形への転移、 ^{120}Zr での球形への転移が予言された。HF+BCS 計算により対相関がこれらの結論を大きく変えないことも確認した。これらの形状変化において、tensor 力は球形極限での shell structure に影響するだけでなく、 $Z=40$ が spin 軌道閉殻を成し得ることによる変形抑制の効果や、高 j 軌道の混入が変形を妨げるといった効果を持ち、中性子数依存性に多様な関与の仕方をすることが分かった。なお、これらの計算のため、Gauss 関数展開法を用いた平均場計算 code を改良し共役勾配法による energy 最適化の routine を実装した。
- (2) 陽子数 Z が magic number の原子核に対して、HFB 計算を実行すると共に核子の有限 size 効果及び重心補正を施して荷電半径を算出し、中性子数 N が magic number の時に kink が現れること、それが3核子LS力により説明できることを指摘した。これは Zr 領域での $N=56$ の二重閉殻性と関連する。
- (3) 軸対称 HFB 計算を実行して中性子 halo 形成に対する対相関と変形の役割を調べ、odd-N 核での対相関による halo 増進の効果を明らかにした。

- (4) RPA 方程式の解が 2 種類の双対性を持つことを見出し、不安定解まで含めた RPA 解の全貌、及び対称性の破れの和則への寄与を解析的に明らかにした。また、準粒子 RPA 計算 code を分散メモリ型並列計算用に改良し、 $N=50$ 近傍の Zr 原子核の低励起状態を調べて、M3Y 型半微視的相互作用による $N=56$ の二重閉殻性の確認や低励起 0^+ 状態の出現等、実験 data と整合する結果を得た。
- (5) 対称 energy に関する高次項の影響を解析的及び数値的に調べ、核子間有効相互作用に用いる関数形、及び中性子物質に対する微視的計算との関わりを明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

- S. Miyahara and H. Nakada, "Shape evolution of Zr nuclei and roles of the tensor force", *Physical Review C* 98, 064318-1 - 11 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevC.98.064318, 査読有
- H. Nakada and K. Takayama, "Intertwined effects of pairing and deformation on neutron halos in magnesium isotopes", *Physical Review C* 98, 011301(R)-1 - 5 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevC.98.011301, 査読有
- Y. Tsukioka and H. Nakada, "Analytical and numerical assessment of the accuracy of the approximated nuclear symmetry energy in the Hartree-Fock theory", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2017, 073D02-1 - 15 (2017), DOI: 10.1093/ptep/ptx090, 査読有
- H. Nakada, "Influence of the Nambu-Goldstone mode on the energy-weighted sum of excitation strengths in the random-phase approximation", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2017, 023D03-1 - 10 (2017), DOI: 10.1093/ptep/ptx004, 査読有
- H. Nakada, "Addendum: Physical and unphysical solutions of the random-phase approximation equation", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2016, 099101-1 - 3 (2016), DOI: 10.1093/ptep/ptw114, 査読有
- Y. Suzuki, H. Nakada and S. Miyahara, "Effects of a realistic tensor force on nuclear quadrupole deformation near the 'shore' of the island of inversion", *Physical Review C* 94, 024343-1 - 14 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevC.94.024343, 査読有
- H. Nakada, K. Sugiura, T. Inakura and J. Margueron, "Can Realistic Interaction be useful for Nuclear Mean-Field Approaches?", *The European Physical Journal A* 52, 185-1 - 8 (2016). DOI: 10.1140/epja/i2016-16185-y, 査読有
- H. Nakada, "Physical and unphysical solutions of the random-phase approximation equation", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2016, 063D02-1 - 20 (2016), DOI: 10.1093/ptep/ptw073, 査読有

[学会発表](計 12 件)

- H. Nakada, "Nuclear structure problems solved by realistic nucleonic interaction", Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan (2018)
- H. Nakada, "Evidence for three-nucleon spin-orbit interaction in nuclear charge radii", International Conference on Simplicity, Symmetry and Beauty of Atomic Nuclei (2018)
- H. Nakada, "Solution to long-standing puzzles on nuclear charge radii via 3N interaction", ECT* Workshop on "Probing exotic structure of short-lived nuclei by electron scattering" (2018)
- H. Nakada, "Complete RPA solutions and Nambu-Goldstone modes", Second Gogny Conference "Recent developments in microscopic theories for nuclear structure", (2017)
- H. Nakada, "Tensor-force effects on nuclear quadrupole deformation in proton-deficient $N=20$ and 28 nuclei", The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2017 (2017)
- H. Nakada, "Tensor-force effects on nuclear quadrupole deformation and $N=20$ and 28 magic numbers", The Thirty-Sixth International Workshop on Nuclear Theory (2017)
- 中田 仁, "核力から現象論へ, 現象論から核力へ", 軽井沢研究会「原子核多体問題の進展と展望」(2017)
- H. Nakada, "Manifestation of three-nucleon spin-orbit interaction in nuclear charge radii", The third International Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (2017)
- 中田 仁, "原子核の平均場と非中心力", 基研研究会「核力に基づく核構造・核反応物理の展開」(2017)

H. Nakada, “ On the completeness of RPA solutions ” , First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on Microscopic Theories of Nuclear Structure and Dynamics, (2016)
Y. Tsukioka and H. Nakada, “ Influence of higher-order terms on approximation of nuclear symmetry energy ” , YITP Workshop “ Compact stars and gravitational waves ” (2016)
H. Nakada, “ Evidence for three-nucleon interaction in isotope shifts of Z = magic nuclei ” , The Thirty-Fifth International Workshop on Nuclear Theory (2016)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

宮原 聡(MIYAHARA, Satoshi),月岡 遙(TSUKIOKA, Yo),高橋 眞輝(TAKAHASHI, Masaki),高山 桂輔(TAKAYAMA, Keisuke),鈴木 優香(SUZUKI, Yuka)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。