

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 7 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22540266

研究課題名（和文） 微視的核子間相互作用に基づく不安定原子核の殻構造の解明

研究課題名（英文） Elucidation of Shell Structure in Unstable Nuclei Based on Microscopic Nucleon-Nucleon Interactions

研究代表者

中田 仁 (NAKADA HITOSHI)

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80221448

研究成果の概要（和文）：

微視的核子間相互作用を基にした新しい有効相互作用を開発し、これを用いた自己無撞着平均場計算によりカルシウム同位体の準位逆転現象が定量的に再現できることを確認した上、中質量核から超重核に至る広い質量領域の球形核の殻構造を調べて、不安定核に特有の新しい魔法数が現れる場合を見出した。また、対相関におけるクーロン力の影響や低エネルギー励起の性質、球形核から変形核への転移の様子について調べた。

研究成果の概要（英文）：

We have developed new effective interactions based on the microscopic nucleon-nucleon interaction. After confirming that the level inversion in the calcium isotopes is quantitatively reproduced by the self-consistent mean-field calculations using these interactions, we have investigated shell structure of spherical nuclei in wide mass range from medium-mass to super-heavy nuclei, and have found several cases in which new magic numbers specific to unstable nuclei may emerge. We have also investigated Coulombic effects on the nuclear pairing, properties of low-energy excitations, and transition from spherical to deformed nuclei.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2011 年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2012 年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：半現実的核子間有効相互作用，原子核の殻構造，自己無撞着平均場理論，テンソル力

1. 研究開始当初の背景

原子核の構造を理解する上で、殻構造及びそれにより生ずる magic number は基本的概念である。近年、短寿命核ビームを用いた実

験が進むにつれ、不安定核の殻構造が安定核と異なることが明らかになってきた。その原因として、tensor 力に代表される核子間相互作用が重要な役割を担うことが明らかにな

っている。

原子核の殻構造は、核子間相互作用を用い自己無撞着に平均場を構成することによって、微視的に調べることができる。しかし、従来の現象論的相互作用による平均場計算では不安定核の殻構造に関する実験データを必ずしも再現できない。

研究代表者は本研究開始までに、tensor力や π 中間子交換中心力の効果をexplicitに取り入れた自己無撞着平均場計算やRPA計算により、微視的相互作用を基にして中性子過剰核での殻構造変化とそれに伴い現れる新magic number $N=32$ 等が自然に説明されることを示した。同様の approach をより広範に応用する素地が整いつつあった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、微視的核子間相互作用に基づき不安定核を含む原子核の殻構造の全体像を解明することであった。具体的には次のような課題について研究を遂行することが重要と考えられる。

- (1) 陽子数・中性子数の変化に伴い殻構造がどのように変化するか。その殻構造変化(殻進化)の mechanism。
- (2) 不安定核、超重核領域における未知の magic number の予言。
- (3) 変形及び対相関に対する magic number の安定性。2体相関の影響。
- (4) 励起状態、特に第1励起状態の性質 (spin-parity, energy, 基底状態への遷移確率)。
- (5) 核子間有効相互作用の再検討。

3. 研究の方法

陽子数または中性子数 8-180 領域の原子核に対し、微視的な核子間相互作用に基づく自己無撞着な平均場及びRPA計算等を実行し、殻構造の陽子数や中性子数に対する変化、magic number, その対相関等に対する安定性を調べる。

数値計算コードの開発・整備、特に並列化を進めることも重要である。

4. 研究成果

主な研究成果は次の通りである。

- (1) 微視的核子間相互作用を基に、二重閉殻核の束縛エネルギーや球形核の対相関等の有限核の諸性質に加え、中性子物質の状態方程式についての微視的計算結果を再現する、半現実的核子間有効相互作用の新しい parameter-set を開発した。それにより、対称エネルギーの密度依存性が改善され、また広い密度領域でスピン自由度まで通常核物質の安定性が保持される等、一層信頼性が高まったことを確認した。

- (2) 上記の有効相互作用を用いて自己無撞着平均場計算 (Hartree-Fock 及び Hartree-Fock-Bogolyubov 計算) を実行し、中質量核から超重核に至る広い質量領域の球形核の殻構造を調べて、対相関から magic number や sub-magic number を特定した。少数ながら、tensor力の効果等により不安定核特有の magic number または sub-magic number が現れる場合を見出した。中質量核での結果は過去の実験とよく整合している。本研究のように広い質量領域で殻構造に焦点を当てて調べた研究は今までなされておらず、また類似の計算に比べ相互作用の信頼度が高いと考えられる。

- (3) 上記の核子間有効相互作用を用いた球対称平均場計算により、従来の相互作用を用いた計算では不十分であった Ca 同位体の $d_{3/2}$ 及び $s_{1/2}$ 陽子空孔状態の準位逆転現象が定量的に再現されることを示した。その際、現実的 tensor力が重要な役割を果たす。さらに、対相関等のため準位逆転にもかかわらず Ar 同位体では陽子泡構造が現れるとは考えにくいこと、他方 ^{34}Si では陽子泡構造の可能性があると指摘した。

- (4) 球形核を例として陽子間 Coulomb 力の対相関に対する影響を調べ、pairing gap や質量の偶奇性による staggering を 25% 程度抑える効果があることを確認し、さらに、中性子数によらず対相関力に約 0.9 の因子を乗じることでその影響を簡便に取り入れられることを発見した。

- (5) RPA 計算により不安定核を含む二重閉殻核等を例として低励起 E1 遷移の性質を調べ、励起エネルギーが高くなるにつれて skin モードから陽子・中性子モードへ徐々に推移すること、また skin モードの比率が核種にほとんど依存しないことを見出した。

- (6) 殻模型モンテカルロ法により希土類核の球形・変形クロスオーバー転移を再現し、微視的理解の進んでいない集団運動による核準位密度の増大現象について調べた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① H. Nakada, “Mean-Field and RPA approaches to stable and unstable nuclei with semi-realistic MV interactions”, to be published in Journal of Physics: Conference Series, “Exotic Nuclear Structure From

- Nucleons”, 査読有
- ② H. Nakada, T. Inakura and H. Sawai, “Crossover from skin mode to proton-neutron mode in *E1* excitations of neutron-rich nuclei”, *Physical Review C* 87, No. 3, 034302 (6 pages) (2013), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.87.034302
- ③ H. Nakada, “Semi-realistic nucleon-nucleon interactions with improved neutron-matter properties”, *Physical Review C* 87, No. 1, 014336 (9 pages) (2013), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.87.014336
- ④ C. Oezen, Y. Alhassid and H. Nakada, “Crossover from vibrational to rotational collectivity in heavy nuclei in the shell-model Monte Carlo approach”, *Physical Review Letters* 110, No. 4, 042502 (5 pages) (2013), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.042502
- ⑤ Y. Alhassid, A. Mukherjee, H. Nakada and C. Oezen, “Recent developments in the shell model Monte Carlo approach to nuclei”, *Journal of Physics: Conference Series* 403 “HITES2012: Horizons of Innovative Theories, Experiments, and Supercomputing in Nuclear Physics”, 012012 (7 pages) (2012), 査読有, doi:10.1088/1742-6596/403/1/012012
- ⑥ H. Nakada, “Effects of Realistic Tensor Force on Nuclear Structure”, *AIP Conference Proceedings* 1491 “Nuclear Structure and Dynamics 2012”, pp. 246–249 (2012), 査読無, doi: 10.1063/1.4764249
- ⑦ Y. Alhassid, C. Oezen and H. Nakada, “Signatures of phase transitions in nuclei at finite excitation energies”, *AIP Conference Proceedings* 1488 “Beauty in Physics: Theory and Experiment: In honor of Francesco Iachello on the occasion of his 70th birthday” pp. 386–393 (2012), 査読無, doi: 10.1063/1.4759421
- ⑧ H. Nakada, “Mean-Field and RPA Approaches to Stable and Unstable Nuclei with Semi-Realistic *MV* Interaction”, *Progress of Theoretical Physics Supplement* No. 196, “Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei”, pp. 371–376 (2012), 査読無
- ⑨ C. Oezen, Y. Alhassid and H. Nakada, “Nuclear Level Density of ^{161}Dy in the Shell Model Monte Carlo Method”, *EPJ Web of Conferences* 21 “CNR* 11 – 3rd International Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics”, 05002 (4 pages) (2012), 査読無, DOI: 10.1051/epjconf/20122105002
- ⑩ H. Nakada, “Mean-Field and RPA Approaches to Stable and Unstable Nuclei with Semi-Realistic *MV* Interaction”, *AIP Conference Proceedings* 1355 “International Symposium on New Faces of Atomic Nuclei”, pp. 281–284 (2011), 査読無, doi: 10.1063/1.3584078
- ⑪ Y. Alhassid, L. Fang and H. Nakada, “Shell model Monte Carlo approach: the heavy nuclei”, *Journal of Physics: Conference Series* 267 “10th International Spring Seminar on Nuclear Physics: New Quests in Nuclear Structure”, 012033 (6 pages) (2011), 査読有, doi:10.1088/1742-6596/267/1/012033
- ⑫ H. Nakada and M. Yamagami, “Coulombic effect and renormalization in nuclear pairing”, *Physical Review C* 83, No. 3, 031302(R) (4 pages) (2011), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.83.031302
- ⑬ H. Nakada, “Shell structure in neutron-rich Ca and Ni nuclei under semi-realistic mean fields”, *Physical Review C* 81, No. 5, 051302(R) (5 pages) (2010), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.81.051302
- [学会発表] (計 11 件)
- ① 中田 仁, “The crossover from vibrational to rotational collectivity in heavy nuclei in the shell-model Monte Carlo approach”, 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日, 広島大学)
- ② H. Nakada, “Shell Model Monte Carlo Methods and their Applications to Nuclear Level Densities”, Workshop on “Computational approaches to nuclear many-body problems and related quantum systems” (2013 年 2 月 14 日, 理化学研究所)
- ③ H. Nakada, “Mean-Field and RPA Approaches to Stable and Unstable Nuclei with Semi-Realistic *MV* Interaction”, *International Symposium “Exotic Nuclear Structure From Nucleons”* (2012 年 10 月 11 日, 東京大学)
- ④ 杉浦 桂介, “平均場近似による中質量核における bubble の構造の研究”, 日

研究者番号：

- 本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 12 日, 京都産業大学)
- ⑤ 中田 仁, “PDR の理論的課題について”, RCNP Mini Workshop on Pygmy Dipole Resonance (2012 年 8 月 2 日, 大阪大学核物理研究センター)
 - ⑥ H. Nakada, “Effects of Realistic Tensor Force on Nuclear Structure”, International Conference on Nuclear Structure and Dynamics II (2012 年 7 月 12 日, Opatija, Croatia)
 - ⑦ 中田 仁, “低エネルギー-E1 強度のアイソスピン構造”, 基研研究会「E0, E1 励起を通じて探る原子核の低いエネルギーのエキゾチックな構造」(2011 年 12 月 8 日, 京都大学基礎物理学研究所)
 - ⑧ H. Nakada, “Mean-Field and RPA Approaches to Stable and Unstable Nuclei with Semi-Realistic MV Interaction”, The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2011 (2011 年 11 月 25 日, Hanoi, Vietnam)
 - ⑨ H. Nakada, “Mean-Field and RPA Approaches to Stable and Unstable Nuclei with Semi-Realistic MV Interaction”, Yukawa International Seminar 2011 “Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei” (2011 年 10 月 14 日, 京都大学基礎物理学研究所)
 - ⑩ H. Nakada, “RPA and QRPA calculations with Gaussian expansion method”, YIPQS Long-term Workshop “Dynamics and Correlations in Exotic Nuclei” (2011 年 9 月 26 日, 京都大学基礎物理学研究所)
 - ⑪ H. Nakada, “Mean-Field and RPA calculations with Gaussian expansion methods”, Aizu-JUSTIPEN-EFES Symposium “Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei” (2010 年 11 月 11 日, 会津大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 仁 (NAKADA HITOSHI)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：80221448

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()