

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008~2010

課題番号：20244022

研究課題名(和文) 不安定核構造の統一的記述

研究課題名(英文) Unified Description of Structure of Unstable Nuclei

研究代表者

大塚 孝治 (OTSUKA TAKAHARU)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：20201379

研究成果の概要(和文)：

核力の多様な性質、特にテンソル力部分や、3体力が、エキゾチックな不安定核の構造にどのような役割をはたすかを明らかにし、不安定核構造の統一的な記述をめざす。

研究成果の概要(英文)：

The nuclear force has various aspects, such as tensor force and three-body force. We investigate how these parts play important roles in neutron-rich nuclei and aim at the unified description of exotic structure of unstable nuclei.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2009年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2010年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：原子核理論

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理、原子核(理論)

キーワード：不安定核、魔法数、殻模型、平均場模型、核力、テンソル力、3体力、相互作用するボゾン模型

1. 研究開始当初の背景

地上の物質は安定核と呼ばれ寿命が十分に長い約300種の原子核によって構成される。一方、寿命がはるかに短い不安定核は約1万種あるとされ、安定核に比べ陽子数(Z)と中性子数(N)がアンバランスで、既知のものでもその比は3:1に達する。それ故に安定核に比べて様々なエキゾチックな性質を持ち、また、超新星爆発のRプロセスなどで一時的に多種多量に生成されて元素合成に重要な役割を果たす。

核図表では個々の原子核は(N,Z)を(x,y)座標とした点で表され、安定核の集まりはベータ安定線を成す。中性子数を増やしていくと、それ以上には加えられない限界があり、核図表上で中性子ドリップラインを成す。不

安定核物理の初期(90年代初頭)には軽い不安定核が主に研究され、中性子を少し加えるだけですぐにドリップラインに届いた。ドリップラインでは「最後の」中性子はゆるく束縛されおり、中性子ハローなどが主な話題であった。一方、重い原子核ではベータ安定線とドリップラインの間に多数の不安定核がある。そこでは構造を決定する主要な要素は「ゆるい束縛」ではない。NとZがアンバランスになり、核力がこれまで見せなかった側面を表し、どのような新しい効果を生むかが問題となる。その結果として起こる興味深い新しい現象が見つかった。理研のRIBF、フランスGANILのSPIRALなど、世界の新しいRIBF加速器が運転を開始したことも実験の面からこのフロンティアを拓げ

ている。そのような現象の中で現在最も顕著なものが、魔法数の消長である。このような現象を理解するため、不安定核においても、核力、特にそのスピンアイソスピン依存性に起因する特質を適切に反映した理論を展開する必要があった。

2. 研究の目的

核力は、テンソル力成分などを通じて、以前考えられていたよりもはるかに豊富な多様性を不安定核の構造にもたらしていることがはっきりした。それは、炭素のような軽い原子核のニュートリノ反応断面積から、質量数が300にもなる超重元素の魔法数まで至るところに影響を与えている。さらに3体力に起因する殻構造の変化が重要であることの示唆が研究代表者らの研究によって得られている。現象論との比較から、これで殻構造を変える主要な基本メカニズムは全て判明したと思われる。このような殻構造の変化をより定量的、系統的に、広範な原子核に対して解明するのが第一の目的である。それに必要な改良された平均場モデルを構築する。さらに、その展開として変形した原子核での殻構造、魔法数の解明も目指す。並行して、不安定核構造の全体像を、原子核殻模型に基づいて核力に忠実に、基底状態や励起状態に対してエネルギーやモーメント、種々の励起強度などの物理量を求め、その原子核の形などを調べる。

これにより、不安定核という量子多体系の構造秩序がどのようなものであるかを探究する。旧来の原子核モデルの仮定や常識にはとらわれずに、核力の特質に基いた統一的な枠組みでの記述を行なう。有効核力としては幾つか提案されている最先端のものを試すが、決定版は現在のところ存在しないので、現象論的な補正を含め、有効核力の研究にも寄与する。

3. 研究の方法

有効相互作用理論により、核力のテンソル力部分、3体力を適切に模型空間に繰り込んだ、原子核殻模型計算を中心として、相互作用するボゾンモデル、時間依存ハートリーフォック法を併用することにより、統一的な理解を目指す。

4. 研究成果

まず、p殻原子核については炭素-17 およびその殻構造の進化の性質を調べ、テンソル力を適切に含むように改良した有効核力が重要であることを示した。(雑誌発表⑩) また、N=20魔法数についての研究をさらに

発展させ、カリウム、塩素、マグネシウム、アルミニウムなどの原子核の構造を計算して実験と比較議論し、テンソル力による殻進化が観測可能なデータに反映されるのが示した。(雑誌発表：⑩)

その後、pf-殻原子核についてはニュートリノ反応を調べて、(雑誌発表：⑪)を発表した。テンソル力を適切に含むように有効核力を改良することが重要であった。N=20魔法数についての研究をひきつづき発展させ、酸素、マグネシウム、シリコンなどの原子核の構造を計算、最新の実験と比較しつつ議論をおこなった。テンソル力による殻進化が観測可能なデータに反映されるのが示され、(雑誌発表：⑫)を発表した。特にテンソル力がbareのものとは核内のものとはほとんど変わらないことも示した。

もうひとつの核力の中でキーとなる要素である3体力とよばれるものの研究をすすめた。酸素の不安定核のドリップラインは、2体力だけの理論計算では再現されないことが知られていたが、デルタ粒子に起源をおく藤田宮沢3体力の効果をもノポール部分に取り入れた殻模型計算をおこなった。(雑誌発表：⑬、その他：②)カルシウム領域での効果をあきらかにし、モノポール部分以外の効果も取り入れた殻模型計算をおこなうなどの進展もあり、論文準備中である。

また、質量数60を超える領域では、pf殻にg_{9/2}軌道をくわえた原子核殻模型における新しい模型空間での有効相互作用を構築し、この質量領域での統一的記述に成功した。(雑誌発表：⑭)

さらに重い質量領域の原子核では、平均場模型から励起エネルギーなどを求めるのは難しいので、ポテンシャルエネルギー面から相互作用するボゾン模型のハミルトニアンを決める方法を提案し、多くの原子核で成功をみた。さらにウェーブレット解析によって、恣意的なパラメータ調整なしに発展させて多くの原子核で成功をみた。(雑誌発表：⑯、⑰)この方法をさらに改良し、回転運動に付随する補正を見つけて、そこまで含んだフェルミオン-ボゾン射影法を提案した。これにより、集団運動すべてをカバーする、ボゾン模型の基礎が得られた。

また、時間依存ハートリーフォック法によって重イオン反応を研究史、荷電交換反応プロセスのかかわり方を衝突エネルギーとの関係で議論し、簡単な関係を得ることができた。(雑誌発表：⑰)

これらのうち最も重要な成果を解説記事(雑誌論文①)にまとめるとともに、プレスリリース2件(その他①、②)をおこなうことによって、本研究成果の広報活動につとめている。

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20件)

- ① 大塚孝治, 鈴木俊夫, 核力中のテンソル力が引き起こす原子核のシェル進化, 日本物理学会誌, 66, 195-200, (2011) 査読あり
- ② N. Shimizu, Y. Utsuno, T. Miuzsaki, T. Otsuka, T. Abe, and M. Honma, Novel extrapolation method in the Monte Carlo shell model, Physical Review C 82, 061305 (2010) 査読あり
- ③ P. Vingerhoests, T. Otsuka(20番目)他, Nuclear spins, magnetic moments, and quadrupole moments of Cu isotopes from N=28 to N=46: Probes for core polarization effects, Physical Review C 82, 064311 (2010) 査読あり
- ④ A.N.Deacon, T. Otsuka(20番目)他, Cross-shell excitations near the “island of inversion”: Structure of ^{30}Mg , Physical Review C 82, 034305 (2010) 査読あり
- ⑤ T. Otsuka, T. Suzuki, J. D. Holt, A. Schwenk, Y. Akaishi, Three-Body Forces and the Limit of Oxygen Isotopes, Physical Review Letters 105, 032501 (2010) 査読あり
- ⑥ A. Gade, T. Otsuka(11番目)他, Collectivity at N=50: ^{82}Ge and ^{84}Se , Phys. Rev. C 81, 064326 (2010) 査読あり
- ⑦ Y. Iwata, T. Otsuka, J. A. Maruhn, N. Itagaki, Suppression of Charge Equilibration Leading to the Synthesis of Exotic Nuclei, Physical Review Letters, 104, 252501 (2010) 査読あり
- ⑧ P. Fallon, T. Otsuka(26番目)他, Two-proton knockout from ^{32}Mg : Intruder amplitudes in ^{30}Ne and implications for the binding of $^{29,31}\text{F}$, Physical Review C 81, 041302(R) (2010) 査読あり
- ⑨ K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka, Formulating the interacting boson model by mean-field methods, Physical Review C 81, 044307 (2010), 査読あり
- ⑩ Y. Iwata, T. Otsuka, J. A. Maruhn, N. Itagaki, Geometric classification of nucleon transfer at moderate low-energies, Nuclear Physics A 836, 108 (2010) 査読あり
- ⑪ R. Kanungo, T. Otsuka(26番目)他, Structure of ^{33}Mg sheds new light on the N=20 island of inversion, Physics Letters B 685, 253, (2010) 査読あり
- ⑫ T. Otsuka, T. Suzuki, M. Honma, Y. Utsuno, N. Tsunoda, K. Tsukiyama, M.H-Jensen, Novel Features of Nuclear Forces and Shell Evolution in Exotic Nuclei, Physical Review Letters 104, 012501 (2010) 査読あり
- ⑬ T. Nakamura, T. Otsuka(22番目)他, Halo Structure of the Island of Inversion Nucleus ^{31}Ne , Physical Review Letters 103, 262501 (2009) 査読あり
- ⑭ M. Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. H.-Jensen, New effective interaction for f5pg9-shell nuclei, Physical Review C 80, 064323 (2009) 査読あり
- ⑮ G. A. Lalazissis, S. Karatzikos, M. Serra, T. Otsuka and P. Ring, Covariant density functional theory: The role of the pion, Physical Review C 80, 041301 (2009) 査読あり
- ⑯ T. Suzuki, M. Honma, K. Higashiyama, T. Yoshida, T. Otsuka, H. Umeda, K. Nomoto, Neutrino-induced reactions on ^{56}Fe and ^{56}Ni , and production of ^{55}Mn in population III stars, Physical Review C 79, 061603 (2009) 査読あり
- ⑰ T.Suzuki, T.Otsuka, Exotic Magnetic Properties in C-17, Physical Review C78, 061301 (2008) 査読あり
- ⑱ K.Nomura, N.Shimizu, T.Otsuka, Mean-field derivation of the interacting boson model Hamiltonian and exotic nuclei, Physical Review Letters, 101, 142501 (2008) 査読あり
- ⑲ Y. Iwata, N. Itagaki, J. A. Maruhn, and T. Otsuka, The Competitive Reaction Mechanism in Exotic Nuclear Reactions, Int. J. Mod. Phys. E, 17, 1660 (2008) 査読あり
- ⑳ V. Tripathi, T. Otsuka(9番目)他, Intruder Configurations in the A=33 Isobars: ^{33}Mg and ^{33}Al , Physical Review Letters 101, 142504 (2008) 査読あり

[学会発表] (計20件)

- ① 大塚孝治, Halo nuclei and shell evolution by nuclear forces, Symposium of 25th Anniversary of the Discovery of Halo Nuclei (Halo2010), 2010年12月9日、Hayama, Kanagawa,

- Japan
- ② 大塚孝治、原子核の新しい顔、東京大学理学部公開講演会、2010年11月7日、東京大学安田講堂
 - ③ 大塚孝治、Shell evolution in exotic nuclei, 3rd Int. Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics, and Reactions (FINUSTAR3), 2010年8月23日、Rhodos, Greece
 - ④ 大塚孝治、Nuclear forces and shell evolution in exotic nuclei, Nuclear Structure 2010, 2010年8月9日、Berkeley, USA
 - ⑤ 大塚孝治、The nuclear three-body force and exotic nuclei, Workshop of the Espace de Structure Nucleaire Theorique, Nuclear magic numbers: New features far from stability, Confronting theoretical approaches and experiment, 2010年5月4日、Saclay, France
 - ⑥ 大塚孝治、Role of tensor and three-body forces and exotic nuclei, ECT* Workshop Reactions and Nucleon Properties in Rare Isotopes, 2010年4月8日、ECT*, Trento, Italy
 - ⑦ 大塚孝治、Physics of Exotic Nuclei and Roles of Nuclear Forces, EFES-Iowa workshop on the ab initio Monte Carlo shell model, 2010年2月26日、Iowa State University, USA
 - ⑧ 大塚孝治、Spin-isospin 2- and 3-body forces and exotic nuclei, 2010年2月20日、東京大学
 - ⑨ 大塚孝治、Exotic nuclei and modern shell model, Workshop on exotic nuclei and modern shell models, 2010年2月9日、東京工業大学
 - ⑩ 大塚孝治、The nuclear three-body force and exotic nuclei, EFES-NSCL Workshop on Perspectives on the modern shell model and related experimental topics, 2010年2月5日、East Lansing, Michigan State University, USA
 - ⑪ 大塚孝治、Shell evolution and existence limit of exotic nuclei and the nuclear force, 2009年11月18日、神戸
 - ⑫ 大塚孝治、New Aspects of Nuclear Structure, 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 2009年10月14日、Waikoloa, Hawaii
 - ⑬ 大塚孝治、Nuclear 3-body Force and M1 Excitation, EST* Workshop Strong, Weak and Electromagnetic

- Interactions to Probe Spin-Isospin Excitations, 2009年9月29日、ECT*, Trento, Italy
- ⑭ 大塚孝治、Microscopic approaches -brief overview of achievements in the past and basic points of present studies-, 5th Workshop on Shape-Phase Transitions and Critical Point Phenomena in Nuclei, 2009年9月17日、Istanbul, Italy
- ⑮ 大塚孝治、Nuclear Forces and Exotic Nuclei, EST* workshop on Confrontation and Convergence in Nuclear Theory, 2009年7月29日、ECT*, Trento, Italy
- ⑯ 大塚孝治、Monte Carlo Shell Model for atomic nuclei, EST* workshop on Linking Nuclei, Molecules, and Condensed Matter: Computational Quantum Many-Body Approaches, 2009年7月7日、ECT*, Trento, Italy
- ⑰ 大塚孝治、Shell structure of exotic nuclei and Hadronic interactions, Gordon Conference, 2009年7月7日、ECT*, Trento, Italy
- ⑱ 大塚孝治、Shell structure of exotic nuclei and Hadronic interaction, Gordon Conference on Nuclear Chemistry, 2009年6月22日、Colby-Sawyer College, New London
- ⑲ 大塚孝治、Structure of exotic nuclei and the nuclear force, Carnegie 2008 Conference "Nuclear Structure at the Extremes", 2008年5月8日、Paisley, University of the West of Scotland
- ⑳ 大塚孝治、ハドロン間相互作用とエキゾチック原子核の殻構造・ドリフトライン、日本物理学会、2008年9月21日、山形市

〔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〕(計2件)

- ① プレスリリース：「3体力と物質の存在限界」
2010年7月14日
発表者：大塚孝治
参考ページ：
<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/press/press-2010-25.html>

- ② プレスリリース：「原子核の力の解明と

エキゾチック原子核の構造進化」

2010年1月5日

発表者：大塚孝治

参考ページ：

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/press/press-2010-01.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 孝治 (OTSUKA TAKAHARU)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：20201379

(2) 研究分担者

清水 則孝 (SHIMIZU NORITAKA)

東京大学・大学院理学系研究科・特任准教授

研究者番号：30419254

(3) 連携研究者

鈴木 俊夫 (SUZUKI TOSHIO)

日本大学・文理学部・教授

研究者番号：70139070

本間 道雄 (HONMA MICHIO)

会津大学・コンピューター理工学部・上級准教授

研究者番号：40264569

宇都野 穰 (UTSUNO YUTAKA)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：10343930