

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19740124

研究課題名(和文) 中性子過剰核における非中心力についての研究

研究課題名(英文) Role of non-central interactions in neutron-rich nuclei

研究代表者

板垣 直之 (ITAGAKI NAOYUKI)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：70322659

研究成果の概要(和文)：

原子核系には2つの非中心力、すなわちスピン・軌道力とテンソル力が非常に強く作用することが知られている。これらの競合は、シェル構造やクラスター構造など、原子核が励起エネルギーや陽子・中性子数の関数として構造を変化させる際に決定的に重要な役割を果たしている。本研究では、新しいモデルを提案するとともに種々の原子核構造・反応モデルを組み合わせ、安定核や中性子過剰核においてこれらの競合を研究し、中性子過剰核の励起状態に現れる新しい構造(過剰な中性子によって安定化する幾何学的クラスター状態)についても議論した。

研究成果の概要(英文)：

In nuclear systems, it has been known that two non-central interaction, namely spin-orbit and tensor interactions, strongly act. The competition between their contributions plays an essential role in the structure change of nuclei as functions of excitation energy and proton/neutron numbers. In the present study, we proposed new models to discuss it and also combined conventional nuclear structure/reaction models and shown that, in the excited states of neutron-rich nuclei, a new structure, geometric configurations of clusters stabilized by neutrons, appears.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	800,000	0	800,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,200,000	720,000	3,920,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理(理論)

キーワード：中性子過剰核、原子核構造、クラスター・シェル競合、非中心力

## 1. 研究開始当初の背景

原子核では、一般には陽子や中性子という核子が一体のポテンシャル場を形成しその中を独立粒子運動するという描像が良く成り立つ(原子核のシェル構造)。このような構造は原子核の基底状態付近では支配的である。しかし一方で、 $\alpha$ 粒子( $^4\text{He}$ 原子核)や $^{16}\text{O}$ な

ど強く束縛した原子核が部分系となり、複数の部分系が局在して存在するというモデルもいくつかの軽い原子核に対して有効である。このような原子核のクラスター構造は、この30年あまり精力的に主に $\alpha$ 粒子の整数倍に対応した陽子数・中性子数をもつ核において研究されてきた。これまでの理解では、クラ

スター構造は対応した分離エネルギー付近に現れ、クラスター同士が比較的自由に運動するガスの状態と考えられてきた。

一方、この 20 年あまり、原子核の分野ではいわゆる中性子過剰核が大きな研究テーマとして成長してきた。これは、天然には存在しない、中性子数が陽子数と大幅に異なった  $\beta$  不安定な原子核が実験的に生成可能となったため、この分野においてはこれまでの安定な原子核で知られてきたさまざまな常識が覆されようとしている。

以上のような状況において、シェル構造とクラスター構造は、中性子過剰核においていかに競合するのか、そこにおいて、原子核系においては非常に大きな役割を果たすスピン・軌道力やテンソル力と言った非中心力(相互作用する 2 粒子の相対座標ベクトルが 2 粒子のスピンと結合した相互作用)がどのような役割を果たすのか、を明らかにすることは原子核の統一的理解にとって非常に重要である。スピン軌道力はそれぞれの核子が決まった角運動量を持って原子核中を運動する対称性を助ける相互作用であり、シェル模型の描像に即した相互作用である。しかし、クラスター模型が成り立つ理由である、 $\alpha$  粒子が強く束縛するメカニズムとして、もうひとつの非中心力であるテンソル力が非常に強いことが決定的に重要であることが知られている。すなわち、シェルの状態、クラスターの状態といった原子核のさまざまな構造とその競合を理解するためには、これら 2 つの非中心力の競合を議論することが不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究の大きな目的は、安定核、および軽い中性子過剰核におけるクラスター・シェル競合を核種及びそれぞれの核の励起エネルギーの関数として系統的に研究し、中性子過剰核を含めた軽い原子核における非中心力(スピン・軌道力、テンソル力)の役割を明らかにすることである。また、同時に中性子過剰な原子核において、これまでの理解と異なるクラスター構造の出現機構について明らかにすることが 2 つ目の目標である。この 2 つの目標のために、内外の多くの研究者と協力しながら、様々な手法を組み合わせた原子核構造・反応計算を遂行した。

## 3. 研究の方法

研究の方法は、微視的核構造・核反応理論の種々の計算手法を組み合わせたものである。クラスター・シェル競合に関しては、クラスター模型にシェル模型波動関数を取り入れる模型を新たに構築した。中性子過剰原子核における幾何学的クラスター構造の出現に

関しては、平均場理論を用い、時間に依存した Hartree-Fock 計算を行った。さらに、広い質量数領域における  $\alpha$  粒子のガスの状態の研究に関しても、従来のクラスター模型を拡張した独自の模型を構築して分析を行った。

## 4. 研究成果

(1) 現在までに、原子核におけるクラスター状態とシェル状態の競合を微視的に表現する模型を構築し、いくつかの論文を出版した。発表論文の③が代表的な論文である。ここでは、 $^{20}\text{Ne}$  と  $^{24}\text{Mg}$  原子核に注目し、 $^{16}\text{O}$  原子核のまわりの  $\alpha$  クラスターに崩れのパラメータを導入し、シェル模型的波動関数への転移を可能とした上で、実際の原子核ではどの状態が実現するか、またそれは非中心力であるスピン・軌道力の強さとどのような相関関係になるのかを議論した。また、このようなクラスター・シェル競合を中性子過剰核においても研究した。安定な炭素である  $^{12}\text{C}$  の基底状態は、 $3\alpha$  クラスターの成分とシェル模型的な成分の両方を持つことが知られているが、中性子数の増加と共に、炭素同位体の基底状態ではシェル模型の成分が増加することを示した。これは、最近観測された  $^{16}\text{C}$  の小さな変形と対応している。しかし、そのような場合でも、励起状態にはクラスターを主成分とする状態が現れ、中性子過剰核における幾何学的クラスター状態の発現を示唆した(発表論文の⑩など)。次の段階として、この競合、あるいはクラスター状態からシェル状態への転移を相転移として記述するための群論的手法を用いた分析を、ハンガリーのグループとの共同で進めている。

(2) 中性子過剰核においては、中性子のもたらす糊の効果により、これまでに安定な原子核で知られていたガスのなクラスター状態は、幾何学的構造をもったクラスター構造へと変化する可能性を指摘した。この現象を、いくつかの投稿論文や日本物理学会誌の最近の研究からまとめた。そのような例の最も極端なものとして、3つの  $\alpha$  クラスターが直線状に配置したりニア・チェーン構造をとりあげ、それが、そのまわりに存在する過剰中性子によって安定化する現象をフランクフルトのグループと共同で研究した。ここではクラスター模型とは全く違う、原子核の標準模型である平均場理論を用いた。そのような一般的な模型を用いても、現代的な大規模計算を行うことで、クラスターのようなエキゾチックな構造が議論できるところが大きな進展である(発表論文の⑥, ⑧など)。ここでは、幾何学的クラスター構造を静的な解として得るだけではなく、それに撃力を加えた際にどの程度の安定性を示すか、時間に依存したハートリー・フォック理論(Time

dependent Hartree-Fock, TDHF) を用いて分析を行った。その結果、中性子数の増加と共に、このような幾何学的クラスター状態の安定性が増大すること、また特徴的な振動モードが現れることなどを結論できた。

(3) 従来から知られていた安定核におけるガスのなクラスター状態が、酸素 16 やカルシウム 40 核などの周りでも起こることが最近示唆されている。このような、従来よりもずっと重い原子核におけるクラスターのガスの状態を研究するための新しい方法論を確立し、いくつかの論文を出版した(発表論文の①④⑭⑱など)。最近、非常に軽い核のガスの  $\alpha$  クラスター状態を記述するために、THSR (Tohsaki-Horiuchi-Schuck-Roepke) 波動関数が提案され、 $^{12}\text{C}$  や  $^{16}\text{O}$  の  $3\alpha$ 、 $4\alpha$  構造が議論されている。しかし重い原子核へ適用するためには新たなモデルを構築する必要があった。我々は Monte Carlo 積分を組み合わせた方法を開発し、このような  $\alpha$  クラスターのガスの状態が、非常に限られた軽い原子核の励起状態でのみ実現するのではなく、さらに一般的に広い質量数領域で存在しうる可能性を示した。

(4) 上記の  $\alpha$  相関の研究は軽い安定な原子核についてであるが、中性子数の増えた中性子過剰核においては、弱束縛された中性子同士の間引力相関が重要な働きをすることが最近議論されている。このようなダイニュートロン相関についても上記のモデルを適用し、 $^7\text{H}$ (1 陽子、6 中性子)や  $^8\text{He}$ (2 陽子、6 中性子)といった軽い極端な中性子過剰核に 2 中性子が相関したモデルと、通常の核子の独立運動するシェル模型的な波動関数の両方を結合された分析を行った(発表論文の⑨、⑬など)。

(5) 原子核衝突における荷電平衡反応と、それを利用した未知の重い中性子過剰核の生成方法について Time dependent Hartree-Fock (TDHF)法を用いて分析し、いくつかの論文を出版した(発表論文の⑤、⑦、⑩など)。

#### 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 19 件)

(全て査読付き)

- ① Gas-like state of alpha clusters around  $^{16}\text{O}$  core in  $^{24}\text{Mg}$ , T. Ichikawa, N. Itagaki, T. Kawabata, Tz. Kokalova, W von Oertzen, Phys. Rev. C rapid communication 印刷中
- ② Symplectic structure and monopole strength in  $^{12}\text{C}$ , T. Yoshida, N. Itagaki and K. Kato, Phys. Rev. C **83** 024301 1-8 (2011).
- ③ Simplified modeling of cluster-shell competition in  $^{20}\text{Ne}$  and  $^{24}\text{Mg}$ , N. Itagaki, M. Ploszajczak, and J. Cseh, Phys. Rev. C **83** 014302 1-12 (2011).
- ④ Three-alpha state around  $^{40}\text{Ca}$ , N. Itagaki, Tz. Kokalova, and W. von Oertzen, Phys. Rev. C **82** 014312 1-4 (2010).
- ⑤ Suppression of Charge Equilibration leading to the Synthesis of Exotic Nuclei, Yoritaka Iwata, Takaharu Otsuka, Joachim A. Maruhn, Naoyuki Itagaki, Phys. Rev. Lett. **104** 252501 1-4 (2010).
- ⑥ Microscopic study of the triple-alpha reaction, A. S. Umar, J. A. Maruhn, N. Itagaki, and V. E. Oberacker, Phys. Rev. Lett. **104** 212503 1-4 (2010).
- ⑦ Geometric classification of nucleon transfer at intermediate energies, Yoritaka Iwata, Takaharu Otsuka, Joachim A. Maruhn, and Naoyuki Itagaki, Nucl. Phys. A **836** 108-118 (2010).
- ⑧ Linear-chain structure of three clusters in  $^{16}\text{C}$  and  $^{20}\text{C}$ , J. A. Maruhn, N. Loeb, N. Itagaki, and M. Kimura, Nucl. Phys. A **833** 1-17 (2010).
- ⑨ Di-neutron correlations in  $^7\text{H}$ , S. Aoyama and N. Itagaki, Phys. Rev. C **80** rapid communication 021304 1-5 (2009)
- ⑩ Synthesis of exotic nuclei in heavy-ion collisions at higher energies, Y. Iwata, T. Otsuka, J. A. Maruhn, and N. Itagaki, Eur. Phys. J. A **42** 613-621 (2009).
- ⑪ Cluster structure stabilized by  $s^2$  neutrons in light neutron-rich nuclei, N. Itagaki and M. Kimura, Phys. Rev. C **79** 034312 1-4 (2009).
- ⑫ Appearance of cluster states in  $^{13}\text{C}$ , T. Yoshida, N. Itagaki, and T. Otsuka, Phys. Rev. C **79** 034308 1-6 (2009).

- ⑬ Mixing of di-neutron components in  $^8\text{He}$ , N. Itagaki, M. Ito, K. Arai, S. Aoyama, and Tz. Kokalova, Phys. Rev. C **78** 017306 1-4 (2008).
- ⑭ Covalent isomeric-state in  $^{12}\text{Be}$  induced by two neutron transfers, M. Ito and N. Itagaki, Phys. Rev. C **78** 011602 rapid communication 1-5 (2008).
- ⑮ Coexistence of alpha+alpha+n+n and alpha+t+t cluster structures in  $^{10}\text{Be}$ , N. Itagaki, M. Ito, M. Milin, T. Hashimoto, H. Ishiyama, and H. Miyatake, Phys. Rev. C **77** 067301 1-4 (2008).
- ⑯ Coexistence of Covalent Superdeformation and Molecular Resonances in an unbound region of  $^{12}\text{Be}$ , M. Ito, N. Itagaki, H. Sakurai, and K. Ikeda, Phys. Rev. Lett. **100** 182502 1-4 (2008).
- ⑰ Coupling between alpha-condensed states and normal cluster states, N. Itagaki, Tz. Kokalova, M. Ito, M. Kimura, and W. von Oertzen, Phys. Rev. C **77** 037301 1-4 (2008).
- ⑱ Simplified modeling of cluster-shell competition in carbon isotopes, H. Masui and N. Itagaki, Phys. Rev. C **75** 054309 1-5 (2007).
- ⑲ alpha-condensed state with core nucleus, N. Itagaki, M. Kimura, C. Kurokawa, M. Ito, and W. von Oertzen, Phys. Rev. C **75** 037303 1-4 (2007).

(物理学会誌における解説)

- ① 中性子のもたらす“糊”の効果と $\alpha$ クラスターの結合機構, 板垣直之、J. A. Maruhn、木村真明, 日本物理学会誌「最近の研究から」2009年11月号 840-845 ページ

[学会発表] (計 18 件)

- ① 板垣直之, “コア核の周りでのクラスター状態” 日本物理学会 岡山大学 2010年3月20日
- ② 板垣直之, Nuclear structure studies in JUSTIPEN and EFES activities, 日本物理学会(アメリカ物理学会と共催) ハワイ 2009年10月13日

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

板垣 直之 (ITAGAKI NAOYUKI)  
京都大学・基礎物理学研究所・准教授  
研究者番号: 70322659

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号