

令和元年6月21日現在

機関番号：55201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17662

研究課題名(和文) 余剰中性子によるクラスター構造安定化機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of the stabilization mechanism of cluster structures owing to excess neutrons

研究代表者

須原 唯広 (Tadahiro, Suhara)

松江工業高等専門学校・数理科学科・講師

研究者番号：10708407

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：余剰中性子が存在するゆえに安定化するクラスター構造の代表例として、 $^{14}\text{C}$ におけるリニアチェイン構造を以前の研究において予言した。これの存在を実験グループとの共同研究により確認した。反応を通して構造を実証するための手法を研究し、クラスターの空間的な発達程度を見るためには、移行反応が有用であることを複数の系で示した。また、現実的核力を用いて原子核構造の研究を行うための理論モデルを開発、改良し、その有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

余剰中性子によって安定化するクラスター構造が実証されたことは重要な学術的意義を持つ。特にそれが半世紀以上に渡って研究されてきたリニアチェイン構造であったことは原子核物理分野へのインパクトは大きかったと評価できる。我々の研究によって発展した様々な理論モデルや実験データと構造の情報を結びつけるための手法は、今後原子核構造の理解を進展させていく上で、非常に有用である。特に、クラスター構造の空間的な発達程度が、移行反応の断面積から直接理解できる可能性を示したことは、クラスター構造研究で得た知見を実証するための方法を新たに与えたと評価できる。

研究成果の概要(英文)：In the previous work, we predicted the existence of the linear-chain structure in  $^{14}\text{C}$ , which is a typical example of the exotic cluster structures stabilized by excess neutrons. We confirmed the existence of this structure by the collaboration studies with experimental groups. We studied methods for demonstrating the structure through reactions and showed that transfer reactions are useful to investigate the spatial distribution of the cluster. We developed and improved theoretical models for studying nuclear structure using realistic nuclear forces, and confirmed those are effective.

研究分野：原子核理論

キーワード：核構造 クラスター構造 分子動力学

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

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 実験技術の発展により、自然界に存在する安定な原子核より中性子が多く、不安定な中性子過剰核の性質が熱心に研究されるようになってきた。クラスター構造の観点に立つと、安定核では存在しないと考えられている構造が、余剰中性子の様々な効果で安定化し、出現する可能性がある。その代表例は $^{14}\text{C}$ におけるリニアチェイン構造である。この構造は本研究以前には理論的に予言していただけで、本当に存在するのかどうかは疑問であった。これを実験的に検証することは、不安定核の理解を進める上で不可欠であった。

(2) 理論的に予言された構造を実験データとどのように比較すれば、実証したことになるか、というのは難しいが重要な問題である。特にクラスター構造では、クラスターの空間的な発達程度をどのように実験データと対応させるのか、ということをはっきりさせる必要があった。

(3) 現実的核力に立脚した理論模型を用いて、様々なクラスター構造を研究することは、中性子過剰核の研究を進める上で不可欠である。これまでクラスター構造研究で用いられてきた模型は有効相互作用に基づいていたので、新しい理論模型の構築が求められていた。

### 2. 研究の目的

今回の研究の目的は3つである。

- (1) 余剰中性子による安定化機構のために現れた $^{14}\text{C}$ のリニアチェイン構造の存在を実証する
  - (2) クラスター構造の空間的な発達程度を示すために、どのような反応の実験データのどの部分を見ればよいのかを明らかにする
  - (3) 現実的核力に基づいたクラスター構造の記述に有用な模型を開発、改良し、現象論的ではないクラスター構造研究への道筋をつける
- これらの目的を達成することで、余剰中性子によって安定化し出現するクラスター構造の発見や、その安定化機構の解明を進めていく。

### 3. 研究の方法

(1) 実験的に構造の存在を実証するためには実験グループと共同研究を行い、実験で比較すべき物理量を計算し、提供すればよい。我々は2つの実験グループと共同研究を行い、角度に対するクラスターの存在確率や崩壊幅を計算し、それらを用いて $^{10}\text{Be}^+$  共鳴散乱実験のデータとの比較を行った。

(2) クラスター構造の空間的な発達程度を見積もるための反応として、移行反応に着目することにした。移行反応は、崩壊閾値よりも下の励起状態のクラスター構造の生成に有用であるため、励起状態に現れると考えられる中性子過剰核のクラスター構造の研究に役立つ可能性が高い。安定核ではあるが、 $^{20}\text{Ne}$  と  $^{16}\text{O}$  を最初の研究対象とし、微分断面積のどの部分にクラスター構造の空間的な発達の情報が見られるのかを調べた。

(3) 現実的核力に立脚した理論模型の開発において、これまでに用いてきた反対称化分子動力学に基づいて研究を進めることにした。反対称化分子動力学はクラスター構造の記述を非常に得意としている模型である。我々はまず、相関関数を用いる方法、次に波動関数の虚部を大きく取ることによって高運動量成分を効果的に取り込む方法を試した。

### 4. 研究成果

(1) 理論での予言と実際の実験データの間で良い一致を見たので、 $^{14}\text{C}$ のリニアチェイン構造の実証は成功したと言える。崩壊閾値からのエネルギーの位置と回転バンドの慣性モーメントは驚くほど一致していた。また崩壊幅も理論、実験ともに不定性は残ってはいるものの、よく一致しており、リニアチェイン構造存在の有力な証拠である。リニアチェイン構造は半世紀以上に渡って、安定核を中心に研究されてきたが未発見の構造であった。それが中性子過剰核において、余剰中性子の安定化機構により出現することが明らかになったことは、クラスター構造研究において大きな進歩であると評価できる。

(2) 移行反応を用いてクラスター構造の空間的な発達程度を見積もる研究では、微分断面積の前方部分に着目することで、原子核中のどの領域にクラスターが大きな存在確率を持つかが判断できることが分かった。具体的な方法としては、クラスターの発達程度が違う波動関数を用意し、それらを用いて移行反応の微分断面積を計算して、実験データと比較した。すると、ある領域にクラスターの存在確率のピークを持つもの以外では移行反応の断面積を再現できないことから、クラスターの存在する位置が判定できた。これは基底状態だけでなく、励起状態に対しても有効であった点が、余剰中性子の効果によって現れる励起状態中のクラスター構造研究に役立つ有力な方法であると評価できる。

(3) 現実的核力に基づいた模型の開発では、まずテンソル最適化反対称化分子動力学を開発した。これは反対称化分子動力学に相関関数を掛けることで、テンソル相関と短距離相関をきち

んと取り込むという手法である。本研究では相関関数をベキ級数で展開するという方法を利用しており、よく用いられるジャストロー法と比べ模型空間が広く、効率よく相関を取り込めるようになっており、有力な方法であると評価できる。また、我々は高運動量反対称化分子動力学をも開発した。反対称化分子動力学では、波動関数の虚部部分は核子が持つ運動量に対応している。この虚部を非常に大きく取ることで、核子同士がテンソル相関によってエネルギーを稼ぐために必要な高運動量成分を効率よく取り入れることができることが分かった。この手法は非常に単純であり、既存の模型と並立させるのが容易であるという点が優れている。我々はこれらの2つの模型を同時に利用した場合の模型の振る舞いも調べた。結果として、計算を効率よく収束させるために模型の両立が有用であることが分かった。今後、これらの手法をさらに発展させ、現実的核力に基づいたクラスター構造研究を推し進めたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計16件)

Tokuro Fukui, Yoshiko Kanada-En'yo, Kazuyuki Ogata, [Tadahiro Suhara](#), and Yasutaka Taniguchi, Investigation of spatial manifestation of  $\alpha$  clusters in  $^{16}\text{O}$  via  $\alpha$ -transfer reactions, Nucl. Phys. A 983, 38 (2019), 査読あり.

DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2018.12.024

Mengjiao Lyu, Takayuki Myo, Masahiro Isaka, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, [Tadahiro Suhara](#), and Taiichi Yamada, Tensor-optimized high-momentum antisymmetrized molecular dynamics with a bare interaction, and its application to the  $^4\text{He}$  nucleus, Phys. Rev. C 98, 064002 (2018), 査読あり.

DOI: 10.1103/PhysRevC.98.064002

Takenori Furumoto, [Tadahiro Suhara](#), and Naoyuki Itagaki, Effect of channel coupling on the elastic scattering of lithium isotopes, Phys. Rev. C 97, 044602 (2018), 査読あり.

DOI: 10.1103/PhysRevC.97.044602

Mengjiao Lyu, Masahiro Isaka, Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, [Tadahiro Suhara](#), and Taiichi Yamada, Hybridization of tensor-optimized and high-momentum antisymmetrized molecular dynamics for light nuclei with bare interaction, Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 011D01 (2018), 査読あり.

DOI: 10.1093/ptep/ptx192

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, [Tadahiro Suhara](#), Mengjiao Lyu, Masahiro Isaka, and Taiichi Yamada, High-momentum antisymmetrized molecular dynamics compared with tensor-optimized shell model for strong tensor correlation, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 111D01 (2017), 査読あり.

DOI: 10.1093/ptep/ptx143

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and [Tadahiro Suhara](#), Power series expansion using the correlation functions for nuclei beyond the Jastrow method, Phys. Rev. C 96, 034309 (2017), 査読あり.

DOI: 10.1103/PhysRevC.96.034309

須原唯広,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  のリニアチェーン構造における一次元凝縮, 原子核研究 第62巻1号 P. 30-41 (2017), 査読あり.

<http://www.genshikaku.jp/backnumber.php?vol=62&issue=01>

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and [Tadahiro Suhara](#), New successive variational method of tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics for nuclear many-body system, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 073D01 (2017), 査読あり.

DOI: 10.1093/ptep/ptx089

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and [Tadahiro Suhara](#), Successive variational method of the tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics for central interaction in finite nuclei, Phys. Rev. C 95, 044314 (2017), 査読あり.

DOI: 10.1103/PhysRevC.95.044314

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and [Tadahiro Suhara](#), Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics as a successive variational method in nuclear many-body system, Phys. Lett. B 769, 213 (2017), 査読あり.

DOI: 10.1016/j.physletb.2017.03.059

H. Yamaguchi et al. ([Tadahiro Suhara](#), the 7th author), Experimental investigation of a linear-chain structure in the nucleus  $^{14}\text{C}$ , Phys. Lett. B 766, 11 (2017), 査読あり.

DOI: 10.1016/j.physletb.2016.12.050

Masaaki Kimura, [Tadahiro Suhara](#), and Yoshiko Kanada-En'yo, Antisymmetrized molecular dynamics studies for exotic clustering phenomena in neutron-rich nuclei, Eur. Phys. J. A 52, 373 (2016), 査読あり.

DOI 10.1140/epja/i2016-16373-9

Naoyuki Itagaki, Hideaki Matsuno, and Tadahiro Suhara, General transformation of  $\alpha$  cluster model wave function to jj-coupling shell model in various 4N nuclei, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 093D01 (2016), 査読あり.  
DOI: 10.1093/ptep/ptw125  
Tokuro Fukui, Yasutaka Taniguchi, Tadahiro Suhara, Yoshiko Kanada-En'yo, Kazuyuki Ogata, Probing surface distribution of  $\alpha$  clusters in  $^{20}\text{Ne}$  via  $\alpha$ -transfer reaction, Phys. Rev. C 93, 034606 (2016), 査読あり.  
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.034606  
A. Fritsch et al. (Tadahiro Suhara, the 20th author), One-dimensionality in atomic nuclei: a candidate for linear-chain  $\alpha$  clustering in  $^{14}\text{C}$ , Phys. Rev. C 93, 014321 (2016), 査読あり.  
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.014321  
Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and Tadahiro Suhara, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics in nuclear physics, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 073D02 (2015), 査読あり.  
DOI: 10.1093/ptep/ptv087

[学会発表](計20件)

古本猛憲, 須原唯広, 板垣直之,  $^{10}\text{Be}$  原子核の非弾性散乱断面積の計算とその励起状態の大きさについて, 日本物理学会第74回年次大会, 2019  
Takenori Furumoto, Tadahiro Suhara, and Naoyuki Itagaki, Reduction of channel coupling effect on Li isotope elastic scatterings by glue-like behaviour of excess neutron, AIP Conf. Proc. 2038, 020039 (2018)  
Takayuki Myo, Mengjiao Lyu, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Tadahiro Suhara, Masahiro Isaka, and Taiichi Yamada, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics with bare forces for light nuclei, AIP Conf. Proc. 2038, 020028 (2018)  
Tadahiro Suhara, Linear-chain and gas-like structures in nuclei near  $^{12}\text{C}$ , AIP Conf. Proc. 2038, 020009 (2018)  
H. Yamaguchi et al. (Tadahiro Suhara, the 12th author), Indirect studies on astrophysical reactions at the low-energy RI beam separator CRIB, AIP Conf. Proc. 1947, 020022 (2018)  
須原唯広, クラスタ構造とクラスタの壊れ, 市大ワークショップ「原子核のダイナミクスの現状と展望」 ~Highlights and Outlooks on Dynamics of Atomic Nuclei~, 2018  
明孝之, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, 須原唯広, 軽い核におけるテンソル最適化 AMD とジャストロー法の比較, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017  
須原唯広, 炭素周辺核のクラスタ構造, RCNP 研究会「核子・ストレンジネス多体系におけるクラスタ現象」, 2017  
明孝之, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, 須原唯広, テンソル最適化 AMD 法による核力を用いた軽い核の研究, RCNP 研究会「核子・ストレンジネス多体系におけるクラスタ現象」, 2017  
Tadahiro Suhara, Linear-chain and gas-like structures in nuclei near  $^{12}\text{C}$ , Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2017), 2017  
Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Tadahiro Suhara, Mengjiao Lyu, Masahiro Isaka, and Taiichi Yamada, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics for light nuclei with bare nuclear forces, Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2017), 2017  
Takenori Furumoto, Tadahiro Suhara, and Naoyuki Itagaki, Channel coupling effect for elastic scattering of Li isotope, Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2017), 2017  
須原唯広, 凝縮状態における平均場の変形とクラスタの変形, RIBF 理論若手放談会: エキゾチック核物理の広がり, 2017  
須原唯広,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  のリニアチェーン構造における一次元凝縮, 日本物理学会第72回年次大会, 2017  
須原唯広, 延与佳子, クラスタ・シェル競合によるクラスタ構造の変化, 研究会「クラスタ・平均場の両側面からみる原子核構造の多様性とそのダイナミクス」, 2017  
須原唯広, TOAMD によるクラスタ構造, 研究会「原子核と核力」, 2016  
Tadahiro Suhara and Yoshiko Kanada-En'yo,  $\alpha$ -cluster breaking effects on cluster structures in  $^{12}\text{C}$ , 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster16), 2016  
須原唯広, 明孝之, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, テンソル最適化反対称化分子動力学によ

る  ${}^4\text{He}$  の励起状態, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016  
須原唯広, 明孝之, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, テンソル最適化反対称化分子動力学を用いた p 殻核の研究, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015  
須原唯広,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  におけるクラスター構造とモノポール遷移, RCNP 研究会「アイソスカラー型単極遷移で探る原子核の励起状態とクラスター構造」, 2015

〔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〕

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

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。