

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：32427

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800124

研究課題名（和文）多体相関が引き起こす原子核の劇的な構造変化

研究課題名（英文）Drastic changes of nuclear structure induced by many-body correlations

研究代表者

谷口 億宇（TANIGUCHI, Yasutaka）

日本医療科学大学・保健医療学部・助教

研究者番号：60529064

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：原子核がエネルギーを与えられた時に起きる構造変化の機構を、クラスター構造という多体相関に注目して明らかにした。質量数が30を超える領域でも、クラスター構造は重要であった。34Sではエネルギーの低い安定な状態（基底状態）では陽子と中性子が一体となった構造をしているが、エネルギーを与えると2つの160芯の周りに残りの2つの中性子が周る構造が現れることを示した。42Caでは、基底状態では球形であるが、エネルギーを与えると多彩な変形構造が現れ、その中には α -38Ar クラスター構造もあることを示した。

他にも、クラスター構造と核反応や、第一原理的な光物性の研究も行った。

研究成果の概要（英文）：Mechanism of nuclear-structure changes has been studied focusing on cluster correlations. Cluster structure is important even in region where mass number is more than 30. In 34S, the ground-state band has one-body system but 160 + 160 core structure appear in excited states, where two valence neutrons are around the cores. In 42Ca, the ground state is spherical but various deformed states appear in excited states including α -38Ar cluster structure. Effects of cluster structure for nuclear reactions, and light-matter interactions have been also studied.

研究分野：原子核理論

キーワード：クラスター構造 変形構造

1. 研究開始当初の背景

原子核は陽子と中性子が集まった物質であり、エネルギーを与えたり陽子や中性子の数を変化させたりすると多彩に構造が変化する(図1)。原子核に現れる構造は、原子核反応にも密接に関係している。そのため、我々の世界にある元素の成り立ちといった基礎から、核分裂を用いた発電(原子力発電)のような実用まで、原子核構造の理解は様々な分野で重要である。

従来から、変形とクラスター概念は原子核構造の理解に用いられてきた。原子核が最もエネルギーの低い安定な状態では、球形に近い構造をとることが多い。しかし、エネルギーを与えると多彩な変形をする。近年のガンマ線分光実験などで、変形は多くの原子核で起きることが明らかになってきていた。

クラスター構造は、原子核が複数の塊に分かれた構造であり、質量数が10-20程度までの非常に軽い核で顕著に発達することが知られていた。クラスター構造は原子核の生成や崩壊に関係するなど、原子核反応の面からも重要である。

質量数が30-40を超えるような領域では、変形の観点から構造を理解する試みは多くされてきたのに対し、クラスターの観点からの理解は不十分であった。多様な構造が現れる機構を明らかにするためには、幅広い質量領域で、変形とクラスターの両方を扱った研究が必要であるが、そのような研究は発展途上であった。

研究代表者らによる、変形とクラスター相関を同時に微視的に扱った研究などで、質量数30-40領域の励起状態に発達する変形状態に、クラスター構成成分が量子力学的に混合することが分かってきた。それから類推すると、質量数が40を越えるような領域でもクラスター構造の効果は重要であると考えられる。しかし、このような領域では平均場模型による研究が主でクラスター構造などの様々な構造の効果を取り入れた研究は進んでい

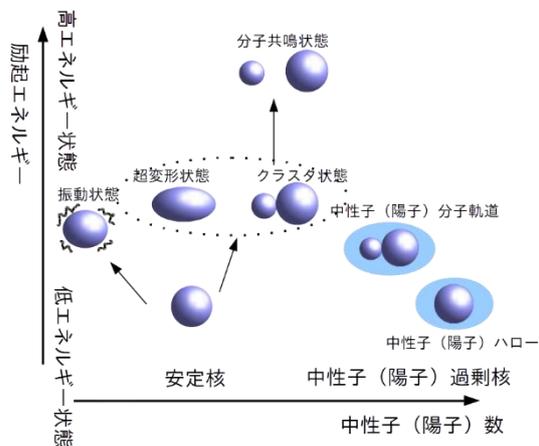


図1: 原子核に現れる様々な構造。

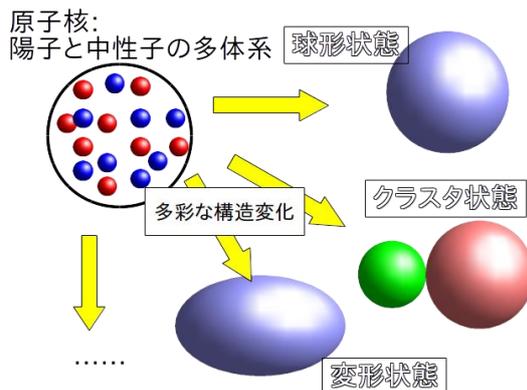


図2: 陽子や中性子の運動をあらわに扱って、原子核全体の様々な構造変化を表現する。

かった。

クラスター構造の研究の問題として、その指標となる観測量がまだ必ずしも明らかにされておらず、実験的検証が難しい点があった。例えば、変形状態にクラスター構成成分が含まれることが研究代表者らの研究などにより、理論的に示されていたが、その指標となる観測量の理解は不十分であった。従来の構造の研究は、クラスター構造に敏感な観測量まで踏み込んだものは少なかったが、実験的検証のためには、その指標となる観測量を理論的に明らかにすることが重要であった。

2. 研究の目的

原子核の励起により起こる劇的な構造変化の機構を、微視的理論で解明することを目的とした(図2)。微視的理論とは、原子核を構成する粒子である陽子や中性子の1つ1つの運動を扱う理論である。特に、変形とクラスターをどちらもあらわに扱うことで、変形状態におけるクラスター構造の寄与などを明らかにすることを特徴とする。さらに、クラスター構造の原子核反応への寄与も明らかにする。

3. 研究の方法

原子核を構成する陽子や中性子の運動を、ガウス波束を用いて表現する反対称化分子動力学を用いて研究した。まず、様々な変形やクラスター構造をとる波動関数を、拘束条件を付けた上でエネルギー最小化する計算を用いて用意した。そして、それらを回転の効果や、量子力学的な状態の混ざりの効果を取り入れる計算を行って、様々な状態を計算した。得られた状態を分析あるいは原子核反応計算に用いることで、核構造や核反応へのクラスター構造の寄与を明らかにした。

4. 研究成果

(1)原子核構造

^{34}S は最もエネルギーの低い安定な状態では全ての陽子と中性子が集まって球に近い構造をしているが、エネルギーを与えると $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 芯の周りに残り 2 つの中性子が分布する分子的構造が現れることを示した (図 3 及び 4)。このような分子的構造は質量数が 10 程度のベリリウム同位体で知られていたが、本研究により質量数 30 領域においても分子的構造が存在し得ることを示した。

^{42}Ca は最もエネルギーの低い状態では球形をしているが、エネルギーを与えると多彩な変形構造が現れ、その中に α - ^{38}Ar クラスタ構造成分を含む状態群があることを示した。その状態は ^{38}Ar へのアルファ移行反応で選択的に生成される実験事実を説明するものである。実験技術の進歩により質量数 40 領域にいくつも変形状態が発見されているが、この研究はそれら変形状態の構造をクラスター構造の観点から理解する重要性を示したものである。

(2)原子核反応

^{16}O へのアルファ移行反応により ^{20}Ne が生成する反応の確率は、 ^{20}Ne の表面付近にアルファ粒子が分布するクラスター構造成分が増

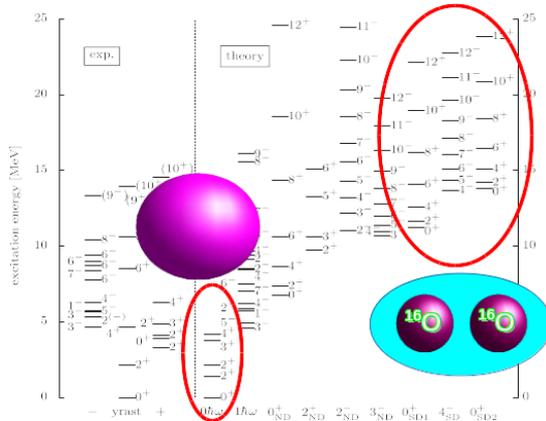


図 3: ^{34}S に現れる構造。エネルギーの低い状態では全ての陽子や中性子が一体となっているが、エネルギーを与えると 2 つの ^{16}O の芯ができ、その周りに残りの 2 中性子が分布する。

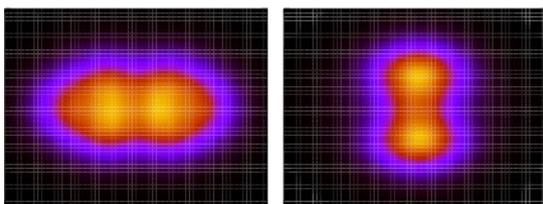


図 4: $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 分子的構造の $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 芯部分 (左) と残りの 2 中性子 (右) の密度分布。

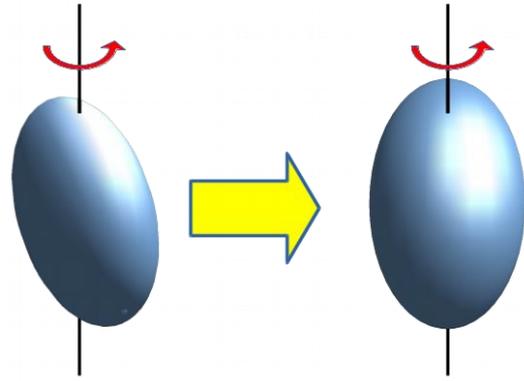


図 5: 高精度な角運動量射影のためには、対称性のいい軸を選ぶことが重要である。

大させることが分かった。アルファ移行反応のような多核子移行反応はクラスター構造と密接な関係があり、クラスター移行反応確率という観測量により、クラスター構造の発達具合を評価できることを示したものである。

異なる種類の原子核が結合したクラスター構造成分があると、アイソスカラー型双極遷移強度が増大することを解析的に示した。また、 ^{28}Si において、 α - ^{24}Mg 、 ^8Be - ^{20}Ne 、 ^{12}C - ^{16}O クラスタ構造が発達する状態があり、それらへのアイソスカラー型双極遷移強度は強いことを予言した。

(3)研究手法開発

原子核の構造を詳細に理解するためには、その回転の効果を取り入れる角運動量射影という演算を用いる。その演算を数值的に実行する際に、高精度に行う方法を開発した。角運動量射影は、原子核を色々な向きに回転させる演算があるが、数值的に高精度に計算するためには最初に対称性のいい方向に回すことが重要であり (図 5)、その方向を見つける手法を開発したものである。この手法は複雑な構造の状態にも適用出来るため、多様な構造をとる原子核の詳細な研究へと発展すると期待される。

(4)光物性

高強度超短パルスレーザーを物質に照射した時の応答を、ハイブリッド汎関数を用いた時間依存密度汎関数法を用いて第一原理シミュレーションを行った。ハイブリッド汎関数は、信頼性は高いものの、計算時間がかかることが使う上での障害となっていた。それを通常は画像処理に用いられる GPU を用いて高速計算することで解決した。

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 Y. Chiba, Y. Taniguchi, and M. Kimura, “Inversion doublets of reflection-asymmetric clustering in ^{28}Si and their isoscalar monopole and dipole transitions”, *Phys. Rev. C* **95**, 044328 (2017). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.95.044328

② Y. Taniguchi, “Alignment of wave functions for angular momentum projection”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2016**, 103D01 (2016). 査読有
DOI: 10.1093/ptep/ptw140

③ Y. Chiba, M. Kimura, and Y. Taniguchi, “Isoscalar dipole transition as a probe for asymmetric clustering”, *Phys. Rev. C* **93**, 034319 (2016). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.034319

④ Tokuro Fukui, Yasutaka Taniguchi, Tadahiro Suhara, Yoshiko Kanada-En'yo, and Kazuyuki Ogata, “Probing surface distributions of α clusters in ^{20}Ne via α -transfer reaction”, *Phys. Rev. C* **93**, 034606 (2016). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.034606

⑤ Shunsuke A. Sato, Yasutaka Taniguchi, Yasushi Shinohara and Kazuhiro Yabana, “Nonlinear electronic excitations in crystalline solids using meta-generalized gradient approximation and hybrid functional in time-dependent density functional theory”, *J. Chem. Phys.* **143**, 224116 (2015). 査読有
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4937379>

⑥ Y. Taniguchi, “ $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ molecular structures of positive- and negative-parity superdeformed bands in ^{34}S ”, *Phys. Rev. C* **90**, 054308 (2014). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.054308

⑦ Y. Taniguchi, “Deformation and α clustering in excited states of ^{42}Ca ”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2014**, 073D01 (2014). 査読有
DOI: 10.1093/ptep/ptu086

⑧ Y. Kanada-En'yo, T. Suhara, and Y. Taniguchi, “Approximation of reduced width amplitude and application to cluster decay width”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2014**, 073D02 (2014). 査読有
DOI: 10.1093/ptep/ptu095

⑨ M. Kimura, Y. Taniguchi, Y. Kanada-En'yo, H. Horiuchi, and K. Ikeda, “Prolate,

oblate, and triaxial shape coexistence, and the lost magicity of $N=28$ in ^{43}S ”, *Phys. Rev. C* **87**, 011301(R) (2013). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.011301

[学会発表] (計 31 件)

① Y. Taniguchi, “Cluster correlations in deformed states”, Proton-neutron pairing and alpha-like quartet correlations in nuclei, Trento (Italy), September 19-23, 2016.

② Y. Taniguchi, “Coupling of α - and t-cluster structures in excited deformed states of ^{35}Cl ”, The 26th International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide (Australia), September 11-16, 2016.

③ Y. Taniguchi, “ $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ molecular structures of superdeformed states in S isotopes”, The 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster16), Naples (Italy), May 23-27, 2016.

④ Y. Taniguchi, “Cluster structures of superdeformed states in light nuclei”, Frontier of γ -ray spectroscopy (Gamma15), Toyonaka (Japan), October 1-3, 2015.

⑤ Y. Taniguchi, “Molecular structures of superdeformed states in ^{34}S ”, Hokkaido Workshop on Many Nucleons Correlations and Clustering, Sapporo (Japan), August 27-28, 2015.

⑥ Y. Taniguchi, “ $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ molecular structures of positive- and negative-parity superdeformed bands in ^{34}S ”, The 12th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2015), Catania (Italy), June 21-26, 2015.

⑦ Y. Taniguchi, S. A. Sato, Y. Shinohara, and K. Yabana, “Parallel-GPU calculation of electron dynamics using a hybrid density functional”, Quantum Dynamics Research Meeting, Nashville (USA), March 10-12, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷口 億宇 (TANIGUCHI, Yasutaka)
日本医療科学大学・保健医療学部・助教
研究者番号：60529064

(2) 研究協力者

緒方 一介 (OGATA, Kazuyuki)