

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：55201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887049

研究課題名(和文)原子核におけるエキゾチッククラスター構造の研究

研究課題名(英文)Study of exotic cluster structures in nuclei

研究代表者

須原 唯広 (Suhara, Tadahiro)

松江工業高等専門学校・数理科学科・助教

研究者番号：10708407

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：複数のエキゾチックなクラスター構造を発見し、その出現機構を明らかにした。12C、16Oのリニアチェーン構造が凝縮構造を持つことを明らかにした。また、12Cのガスのホイル状態やリニアチェーン構造の出現やバンド構造や遷移確率にシェルモデル的構造の混合が本質的な役割を果たしていることを明らかにした。9Li、11B、14C、14Nの性質においてもクラスター構造の発達が大きな影響を与えていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have investigated exotic cluster structures and discussed interesting mechanism for the stabilization of those structures. We presented a new picture that the alpha-linear-chain structure for 12C and 16O has one-dimensional alpha condensate character. We found that alpha-cluster breaking caused by the spin-orbit force gives significant effect on cluster structures, transition strengths, and band structure in 12C. We also found that cluster correlation plays an important role in 9Li, 11B, 14C, and 14N.

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

1. 研究開始当初の背景

クラスター構造の観点に立った研究は、特に陽子数と中性子数の等しい安定な軽い原子核において精力的になされてきた。一方、近年の実験技術の進歩により、天然に存在しない原子核の生成が可能になり、安定核よりも中性子が過剰で不安定な「中性子過剰核」が原子核物理における一大テーマとして成長してきた。このような状況において申請者は中性子過剰核におけるクラスター構造に注目し、研究を行ってきた。その結果、中性子過剰核において余剰中性子の存在により、安定核では存在しなかったエキゾチックなクラスター構造が発達し得ることが分かってきた。例えば、申請者は ^{14}C において 3α 芯を持った非軸対称な構造と $^{10}\text{Be}+\alpha$ 相関を持ったリニアチェーン構造という新しいタイプのクラスター構造を発見した。続く課題として、このようなエキゾチックな構造が他の原子核で現れないのか、現れるとしたら、どのような機構によって現れたのか、という問いに答える必要があった。

2. 研究の目的

最大の研究目的は、原子核において「エキゾチックなクラスター構造を発見し、その出現機構を解き明かす」ことである。これまでに行われてきた研究により、安定核には存在しなかったクラスター構造や、不安定核クラスターそのものを構成要素とする新しいタイプのクラスター構造が、中性子過剰核において出現し得ることが分かってきた。しかしながら、未だ知られているエキゾチックな構造は少なく、体系的な理解が進んでいるとは言えない。そこで申請者は今までの経験を生かし、炭素周辺核の研究を系統的に行い、新しいエキゾチックなクラスター構造を発見することを目指した。そして、その構造が出現する本質的な効果を解き明かし、エキゾチックなクラスター構造の出現法則を確立する手がかりを得ることを目的とした。

3. 研究の方法

主に用いた手法は反対称化分子動力学(AMD)法と生成座標法(GCM)を組み合わせたAMD+GCM法である。AMDは複素数中心のガウス波束を用いて一粒子軌道を記述し、それらに対して反対称化を完全に行うことにより、jj結合的なシェルモデル構造からクラスター構造まで幅広く記述しうる有力な手法である。また、ガウス波束という性質のよい関数を採用したことで、3次元角運動量射影も容易に実行できる点も優れている。このAMD法に、原子核に現れる様々な励起状態を非常にうまく記述できるGCMを組み合わせたAMD+GCM法は原子核の幅広いエネルギー領域の様々な構造を効率よく記述できる優れた手法である。この手法、ないしはこの亜種についてコンピュータ上で数値シミュレーションを実行し、エキゾチックなクラ

スター構造の発見、解析を行った。

4. 研究成果

(1) 中性子過剰な原子核である ^9Li において $\alpha+t$ クラスター構造が発達し、そのまわりの分子軌道を余剰中性子が占めるという構造が現れることを明らかにした。これは 2α クラスター構造が発達し、その回りで分子軌道が構成され、その軌道を余剰中性子が占有する、という構造で理解できるBe同位体と類似していた。この成果は非 α 粒子を構成要素とするクラスター構造においても、分子軌道が形成され得ることを示唆しており、クラスター構造の出現法則確立の上で、手がかりとなる。またこれらの構造が、非弾性散乱の角度分布に影響を与えることも示した。

(2) ^{12}C 、 ^{16}O の励起状態において現れると期待されているリニアチェーン構造に対して新たな知見を得た。リニアチェーン構造は α クラスターが直線状に並んだ構造を持ち、実験、理論の両面から半世紀程度議論されている重要な研究対象である。この構造は伝統的に局在した構造を持つと考えられてきたが、実は α クラスターが一次元上で α 凝縮した構造を持つ、ということを示した。 ^{12}C 、 ^{16}O は安定核であるものの、原子核における一次元 α 凝縮構造は申請者らによって初めて提唱されたものであり、非常に重要な発見と言える。この結果は伝統的に局在していると考えられていた多くのクラスター構造が、実は非局在の描像で理解しなければならない可能性を示唆しており、クラスター物理の新しい局面を開き得る成果である。

(3) ^{11}B における $2\alpha+t$ クラスター構造のガスの性質を議論し、角運動量の制限からくる自明な相関を除くとガスの状態として知られるHoyle状態によく似た構造を持っていることを明らかにした。ガスのクラスター状態に対する研究は多くの場合Na核でなされてきた。また非Na核であっても、クラスター間の相対角運動量は $J=0$ に限られており、 $J\neq 0$ の角運動量に対するガスの状態の可能性を議論したという点で新規性に富む重要な結果と言える。

(4) ^{12}C においてHoyle状態やリニアチェーン状態といったエキゾチックな構造を持った状態が現れるのに、直観的にはクラスター構造とは無関係に思えるクラスターの壊れたシェルモデル的構造の様々な状態への混合が本質的な役割を果たすことを明らかにした。中でも興味深いのは、 0_3^+ 状態が、クラスターモデルで解くと 3α の三角形構造の角度に対する振動モードとして現れるのに対し、クラスターの壊れを適切に取り込むとリニアチェーン構造を主成分とする状態に変化する、という結果である。シェルモデル構造の混合により、クラスター構造が大きく変化

するというを直接的に初めて示した本成果はクラスター構造の出現法則を確立する上で非常に意義が大きい。

(5) 放射性炭素年代測定に使われている ^{14}C から ^{14}N への β 崩壊が起きる確率に基底状態におけるクラスター構造の発達程度が重要な役割を果たしていることを明らかにした。この β 崩壊に関する研究はこれまではシェルモデルを用いたものが主でクラスター相関はあまり考慮されてこなかったが、寿命の決定にかかすことが出来ないことが分かった。

(6) クラスター崩壊の崩壊幅を簡単に求める近似的手法を開発し、 ^{20}Ne における $^{16}\text{O}+\alpha$ チャンネルや ^8Be における $\alpha+\alpha$ チャンネルの崩壊に適用し有用性を確認した。これまではクラスターの壊れを取り込む模型を用いて崩壊幅を計算するのは非常に大変であったが、この手法を用いれば誰でも手軽に幅を求めることができる。理論計算によりエキゾチックな構造を見つけた時に、実験と比較することは不可欠であるが、それを簡単にできるようにした点で、重要な成果であると言える。

(7) 中性子過剰な炭素同位体の ^{13}C や ^{16}C に現れるエキゾチックなクラスター構造の理論的探索を行い、ガスの状態やリニアチェーン状態に類似した状態を発見した。現在、どのような機構で現れたか解析中である。また現実的核力から出発したクラスター構造の研究を行うための模型、テンソル最適反対称化分子動力学法の開発に着手し、成果を上げつつある。これは基底波動関数として相関演算子をかけた反対称化分子動力学波動関数を採用することで効率的にテンソル相関を取り込むという手法である。テンソル力に基づいたクラスター構造の研究は非常に少ないので、完成すれば大きな意義を持つ研究テーマである。

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10件)

Tadahiro Suhara and Yoshiko Kanada-En'yo, Effects of α -cluster breaking on 3α -cluster structures in ^{12}C , Phys. Rev. C 91, 024315 (2015) 1-10, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.024315

Yoshiko Kanada-En'yo and Tadahiro Suhara, $2\alpha+t$ cluster feature of $3/2_3^-$ state in ^{11}B , Phys. Rev. C 91, 014316 (2015) 1-11, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.014316

Tokuro Fukui, Yasutaka Taniguchi,

Tadahiro Suhara, Yoshiko Kanada-En'yo, Kazuyuki Ogata, Probing α -cluster distribution via α -transfer reaction, J. Phys.: Conf. Ser. 569, 012023 (2014) 1-5, 査読無.
DOI: 10.1088/1742-6596/569/1/012023

Hidetoshi Yamaguchi, et al. (Tadahiro Suhara, the 14th author), Nuclear clusters studied with alpha resonant scatterings using RI beams at CRIB, J. Phys.: Conf. Ser. 569, 012019 (2014) 1-6, 査読無.
DOI: 10.1088/1742-6596/569/1/012019

Tadahiro Suhara, Yasuro Funaki, Bo Zhou, Hisashi Horiuchi, and Akihiro Tohsaki, One-dimensional α condensation of α -linear-chain states, J. Phys.: Conf. Ser. 569, 012008 (2014) 1-6, 査読無.
DOI: 10.1088/1742-6596/569/1/012008

Yoshiko Kanada-En'yo, Tadahiro Suhara, and Yasutaka Taniguchi, Approximation of reduced width amplitude and application to cluster decay width, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 073D02 (2014) 1-24, 査読有.
DOI: 10.1093/ptep/ptu095

Yoshiko Kanada-En'yo and Tadahiro Suhara, Gamow-Teller transitions from ^{14}N ground to ^{14}C ground and excited states, Phys. Rev. C 89, 044313 (2014) 1-10, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevC.89.044313

Tadahiro Suhara, Yasuro Funaki, Bo Zhou, Hisashi Horiuchi, and Akihiro Tohsaki, One-dimensional α condensation of α -linear-chain states in ^{12}C and ^{16}O , Phys. Rev. Lett. 112, 062501 (2014) 1-5, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.062501

Yoshiko Kanada-En'yo, Tadahiro Suhara, and Fumiharu Kobayashi, Cluster formation, breaking, and excitation in light nuclei, EPJ W. Conf. 66, 01008 (2014) 1-8, 査読有.
DOI: 10.1051/epjconf/20146601008

Takenori Furumoto, Tadahiro Suhara, and Naoyuki Itagaki, Investigation of $3/2_2^-$ state of ^9Li nucleus with microscopic structure and reaction models, Phys. Rev. C 87, 064320 (2013) 1-10, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.064320

[学会発表](計6件)

須原 唯広, ^{12}C におけるクラスターの壊れとバンド構造, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015.3.21-24.

Tadahiro Suhara, Effects of α -cluster

breaking on cluster structures in ^{12}C ,
International Molecule-type Workshop
"Structure and Reaction of Light Exotic
Nuclei", 京大基研, 2015.1.6-19.

Tadahiro Suhara, One-dimensional α
condensation of α -linear-chain states, 3rd
International Workshop on "State of the Art in
Nuclear Cluster Physics" (SOTANCP3),
KGU Kannai Media Center, 2014.5.26-30.

須原 唯広, ^{12}C , ^{16}O のリニアチェーン構造
における一次元 α 凝縮, 日本物理学会第 69
回年次大会, 東海大学, 2014.3.27-30.

Tadahiro Suhara, One-dimensional α
condensation of α -linear-chain states in ^{12}C
and ^{16}O , Workshop "New aspect of baryon
many-body structure", ますや旅館(長野)
2014.3.8-9.

須原 唯広, ホイル状態に対するクラスタ
ーシェル競合の影響, 日本物理学会 2013 年
秋季大会, 高知大, 2013.9.20-23.

〔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) 研究代表者

須原 唯広 (SUHARA, TADAHIRO)

松江工業高等専門学校・数理科学科・助教

研究者番号: 10708407