

平成22年 6月 2日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2009

課題番号：18540263

研究課題名（和文） クラスターの描像に基づく原子核の弱結合状態の研究

研究課題名（英文） STUDY OF WEAKLY BOUND STATES OF NUCLEI BASED ON CLUSTER PICTURE

研究代表者

延與 佳子（YOSHIKO KANADA-EN' YO）

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：40300678

研究成果の概要（和文）：クラスターの描像の見地から安定原子核および不安定原子核の励起状態の構造を理論的に解明した。特に、クラスター構造をもつ励起状態の探索を行い、非常に発達した3体クラスターの状態の理論的予言を行った。さらに、中性子過剰な原子核の構造について微視的理論計算を行い、2中性子相関の解析を行い、スピンゼロに結合した中性子が原子核表面で空間的に強く相関を持つメカニズムを調べた。

研究成果の概要（英文）：Excited states of stable and unstable nuclei have been investigated theoretically while focusing on cluster aspect. New cluster states have been found in light nuclei. Dineutron correlations have been discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	700,000	0	700,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	780,000	4,080,000

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

キーワード：クラスター、不安定原子核、分子動力学

1. 研究開始当初の背景

最近、不安定原子核（陽子と中性子の数がアンバランスな核）において、クラスター芯（数個の核子が強く結合した塊）の回りを核子が運動する構造や、クラスターが空間的に発達した構造が次々に見つかっている。さらに、安定原子核の励起状態においても、今まで知られてない新しいタイプのクラスター構造が発見・提唱され、注目されているテ

マとなっている。これらの新しいクラスター現象を理論的に解明することは、有限核子多体系の統一的理解をつなげる重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究は、原子核構造をクラスターの描像の見地から理論的に解明する。特に最近注目されている軽い安定核領域および不安定核領

域の弱結合状態に注目し、「新しいタイプのクラスターの状態」、「クラスター化をともなって出現する多様な構造」、「クラスターの性質と平均場的性質の共存」に関する未知現象の解明と理論的予言を行う。

3. 研究の方法

本研究では、波束理論の一つである反対称化分子動力学 (AMD) 法の手法を用いて、軽い領域の安定原子核および不安定原子核の波動関数を数値的に計算し、構造の研究を行った。一粒子波動関数をガウス波束で表した AMD 法は一般原子核のクラスターの構造からシェル模型的な構造までを一つの枠組みで記述することができる強力な微視的模型である。エネルギー変分計算によって、最低エネルギーを与えるパラメータ (ガウス中心と内部スピンの向き) を求める。励起状態は、角運動量射影後の変分計算、および、拘束条件付き変分計算を応用して計算した。エネルギー変分計算およびハミルトニアンの特角化について、主に、KEK および京大基礎物理学研究所のスーパーコンピュータを用いて実行した。数値的に求めた波動関数を解析することにより、核構造の諸量について実験値と比較し、クラスター構造の発達の有無等を調べた。

4. 研究成果

(1) 最近、 ^{12}C の第二 0^+ 状態が 3 つの α クラスタが緩く束縛したクラスター気体的な状態であるという提案が Tohsaki らによってなされ、他の原子核にもこのような励起状態が現れるかが注目された話題になっている。我々は、 ^{11}C や ^{11}B などの原子核の励起状態を系統的に研究し、励起エネルギー $\sim 8\text{MeV}$ 近傍に、非常に発達した 3 体クラスターの構造が表れうることを予言した。理論計算で Gamov-Tellar 遷移や M1 遷移の実験値を非常に良く再現でき、クラスターの状態とシェル模型的な状態の混在を示唆する興味深い結果が得られた。さらに最近の非弾性散乱実験で、基底状態からこの励起状態へ強い単極子遷移が観測されたが、我々の理論計算においてその実験値を再現することに成功した。この 3 体クラスターの状態は強い単極子遷移に特徴づけられ、3 つのクラスター ($2\alpha + t$) が緩く束縛された状態であることを理論的に示し、 ^{12}C の第二 0^+ 状態に類似したクラスターの気体的な状態の候補と考えられるという新たな知見を得た。さらに ^{13}C の励起状態に 3 体クラスターの構造が出現しうるかを調べた結果、第三 $1/2^-$ 状態に $3\alpha + n$ 的なクラスター状態が出現することを理論的に予言した。計算結果は、予言した状態はクラスターが自由に運動する気体的な状態では

なく、むしろ、 3α が幾何学的な三角形配位をもつことが示唆している。

(2) ^{13}B の励起状態の構造を研究し、励起状態に大きな変形構造が表れる可能性を提案した。この変形構造から構成される回転帯として、2 つの中性子が励起した不パリティ回転帯と、2 つの中性子と 1 つの陽子が励起した正パリティ回転帯を予言した。低いエネルギー領域にこのような多粒子-多空孔配位が現れることは驚くべきことであり、 ^{13}B における 2α クラスタと分子軌道の形成が要因であると予想される。また、この理論結果は、最近、実験でみつかった $1/2^+$ 状態に対応するものと考えられる。

(3) 中性子過剰原子核において 2 中性子がスピンゼロの対を構成したクラスターが発達するかという問題は、 α 凝縮状態や 2 中性子凝縮問題として非常に興味深い問題である。我々は、中性子過剰な He 同位体の基底状態および励起状態を理論的に研究し、 ^6He や ^8He において 2 中性子相関について解析を行った。その結果、例えば ^6He 基底状態において発達した 2 中性子クラスターは、 ^8He においてはスピン軌道力の効果で壊れやすいことがわかった。さらに注目すべき結果として、 ^8He にスピンパリティ 0^+ の励起状態が出現することを理論的に予言し、この状態が 2 つの 2 中性子が α クラスタの周りを回る $\alpha + 2n + 2n$ 構造が発達する可能性を示した。2 つの中性子は非常に緩く束縛して密度の薄い気体的な状態であることを示し、2 中性子凝縮状態の候補であることを理論的に示唆した。さらに、中性子過剰な He 同位体の 2 中性子密度の解析を行い、 ^6He および ^8He の核表面には 2 中性子相関に起因した 2 中性子密度の増大が見られることを指摘した。

(4) $^{\text{C}}$ 同位体について、特に励起状態に出現しうるクラスター気体的な状態とポリマー状態の出現の有無に焦点をあてて、励起状態にのクラスター状態の理論的探索を行った。理論的手法としてはプログラムが完成している反対称化分子動力学法 (AMD) を用いた。主に、拘束条件を課した変分計算に基づく AMD 法を適用して基底状態および励起状態の構造計算を行った。四重極変形度に拘束をかけた AMD 法を ^9Li , ^{10}Be , ^{11}B , ^{12}C 原子核に適用し、この手法が有効であることを確かめた。この手法を ^{14}C に適用し、励起状態に 3α のポリマー的な構造が出現する可能性を指摘した。さらに、余剰中性子の影響でポリマー構造が安定化するメカニズムを議論した。

(5) Ne 同位体について、クラスター間距離を

拘束座標に採用して AMD 法を適用した。C 同位体において 3 つの α クラスターから形成されるクラスター気体的な状態およびポリマー状態を研究し、 ^{14}C 原子核における 3 α チェーン構造が励起状態に現れることを理論的に示唆した。Ne 同位体に関しては、 ^{22}Ne の励起状態の構造を理論的に調べた結果、 α クラスターの芯をもつ α クラスター状態の他に、空間的な相関をもつ 2 α クラスターすなわち 8Be クラスターが発達した $^{14}\text{C}+8\text{Be}$ 構造が高い励起状態に現れる可能性を指摘した。これらの結果から、閾値エネルギー近傍に発達したクラスター構造が出現するという性質は安定原子核のみならず、不安定原子核においても普遍的に見られる性質であるという新しい知見を得た。

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 25 件)

① Yoshiko Kanada-En'yo,

"Gamow-Teller transitions from $^9,^{11}\text{Li}$ to $^9,^{11}\text{Be}$ ", *Physical Review C* 81, 034321-1-7 (2010) 査読有.

② Tadahiro Suhara and Yoshiko Kanada-En'yo, "Quadrupole Deformation β and γ Constraint in a Framework of Antisymmetrized Molecular Dynamics" *Progress of Theoretical Physics* 123, 303-325 (2010) 査読有.

③ Yasutaka Taniguchi, Yoshiko Kanada-En'yo, and Masaaki Kimura "Cluster structures and superdeformation in ^{28}Si " *Physical Review C* 80, 044316-1-9 (2009). 査読有.

④ Yoshiko Kanada-En'yo, Nobuo Hinohara, Tadahiro Suhara, and Peter Schuck, "Dineutron correlations in quasi-two-dimensional systems in a simplified model, and possible relation to neutron-rich nuclei", *Physical Review C* 79, 054305-1-14 (2009). 査読有

⑤ N. Furutachi, M. Kimura, A. Dote, and Y. Kanada-En'yo "Structures of light halo nuclei" *Progress of Theoretical Physics* 122, 865-880 (2009). 査読有

⑥ Y. Kanada-En'yo, Y. Taniguchi and M.

Kimura, "Cluster structure in light neutron-rich nuclei", *Jour. Phys. Conf. Series* 111, 012002-1-6 (2008). 査読有

⑦ Y. Kanada-En'yo, M. Kimura, Y. Taniguchi and T. Suhara, "Cluster structure of unstable nuclei studied with AMD", *Int. Jour. Mod. Phys. E* 17, 2336-2344 (2008). 査読有

⑧ Y. Kanada-En'yo, "Cluster aspect of light unstable nuclei", *Nucl. Phys. A* 805, 392c-399c (2008). 査読有

⑨ Y. Kanada-En'yo, O. Morimatsu and T. Nishikawa, "Axial Vector Tetraquark with Two s-quarks", *Prog. Theor. Phys. Suppl.* No.168, 194-197 (2007). 査読有

⑩ Y. Taniguchi, M. Kimura, Y. Kanada-En'yo, H. Horiuchi, "Coexistence of cluster structure and mean-field-type structure in medium-weight nuclei", *Nucl. Phys. A* 787, 547c-552c (2007). 査読有

⑪ T. Kawabata, H. Akimune, H. Fujita, Y. Fujita, M. Fujiwara, K. Hara, K. Hatanaka, M. Itoh, Y. Kanada-En'yo, S. Kishi, K. Nakanishi, H. Sakaguchi, Y. Shimbara, A. Tamii, S. Terashima, M. Uchida, T. Wakasa, Y. Yasuda, H. P. Yoshida, M. Yosoi, "Three-body cluster state in ^{11}B ", *Nucl. Phys. A* 790, 290c-293c (2007). 査読有

⑫ Y. Kanada-En'yo and M. Kimura, "CLUSTER ASPECT IN UNSTABLE NUCLEI IN P-SHELL AND SD-SHELL REGIONS", *Int. J. Mod. Phys. E* 15, 1541-1548 (2006). 査読有

⑬ Y. Taniguchi, Y. Kanada-En'yo and M. Kimura, "Deformations and clustering correlations in p- and sd-shell nuclei using the Gogny and Skyrme interactions", *Prog. Theor. Phys.* 120, 533-553 (2009). 査読有

⑭ Y. Kanada-En'yo, Y. Kawanami, Y. Taniguchi and M. Kimura, "Cluster states in ^{13}C ", Prog. Theor. Phys. 120, 917-935 (2008). 査読有

⑮ D. Jido and Y. Kanada-En'yo, "K-Kbar-N molecular state with $I=1/2$ and $J^{\pi}=1/2^{+}$ studied with a three-body calculation", Phys. Rev. C 78, 035203(1-10) (2008). 査読有

⑯ Y. Kanada-En'yo and D. Jido, "Kbar-Kbar-N molecular state in a three-body calculation", Phys. Rev. C 78, 025212(1-10) (2008). 査読有

⑰ N. Furutachi, M. Kimura, A. Dote, Y. Kanada-En'yo and S. Oryu, "Cluster Structures in Oxygen isotopes", Prog. Theor. Phys. 119,403-420 (2008). 査読有

⑱ M. Takashina and Y. Kanada-En'yo, "Inelastic proton scattering and neutron quadrupole transitions of ^{12}Be ", Phys.Rev.C77, 014604 (2008). 査読有

⑲ Y. Taniguchi, M. Kimura, Y. Kanada-En'yo and H. Horiuchi, "Clustering and triaxial deformations of ^{40}Ca ", Phys. Rev. C76, 044317(1-10) (2007). 査読有

⑳ Y. Kanada-En'yo, "Dineutron structure in ^8He ", Phys. Rev. C76, 044323(1-10) (2007). 査読有

21. Y. Kanada-En'yo, "Structure of Ground and Excited States of ^{12}C ", Prog. Theor. Phys. 117, 655-680 (2007). 査読有

22. T. Kawabata et al., "2alpha+t cluster structure in ^{11}B ", Phys. Lett. B646, 6-11(2007). 査読有

23. Y. Kanada-En'yo, "Negative parity states of ^{11}B and ^{11}C and the similarity with ^{12}C ", Phys. Rev. C 75, 024302-1-7, (2007). 査読有

24. Y. Kanada-En'yo, B. Muller, "Suppression of p-wave baryons in quark recombination", Phys.Rev.C 74, 061901(1-3) (2006). 査読有

25. A. Dote, Y. Kanada-En'yo, H. Horiuchi, Y. Akaishi and K. Ikeda, "Explicit Treatment of the Tensor Force with the Method of Antisymmetrized Molecular Dynamics", Prog. Theor. Phys. 115, 1069-1092 (2006). 査読有

[学会発表] (計 22 件)

① 延與佳子, "Dineutron correlations in He isotopes", INTERNATIONAL SYMPOSIUM Forefronts of Researches in Exotic Nuclear Structures, 2010年3月2日, 新潟県十日町市, 日本.

② 延與佳子, "Dineutron correlations in nuclear surface", 12th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR REACTION MECHANISMS 2009年6月16日, Varenna, Italy.

③ 延與佳子, "Dineutron correlation in neutron systems confined in a slab", 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日, 東京, 日本

④ 延與佳子, Cluster aspect of nuclear systems, "International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics nanoPHYS'09", 2009年2月24日, 東京, 日本

⑤ 延與佳子, Dineutron correlation in light nuclei, Nuclear Physics Meeting on 'Clustering in Dilute Nuclear Matter', 2008年10月18日, 奈良, 日本

⑥ 延與佳子, Shape coexistence in N=14 nuclei, Workshop on "Frontier in Unstable Nuclear Physics", 2008年7月18日, 札幌, 日本

⑦ 延與佳子, sd シェル核領域の変形とクラスター状態について, 基研研究会「原子核の分子的構造と低エネルギー核反応」, 2008年7月3日, 京都市, 日本

⑧ 延與佳子, Cluster structure of unstable nuclei studied with AMD "The first Workshop on State of the Art in Nuclear

Cluster Physics(SOTANCP08)", 2008年5月14日, Strasbourg, フランス

⑨ 延與佳子, 8Heにおけるダイニュートロンの構造, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月23日, 大阪、近畿大学

⑩ 延與佳子, クラスター物理における大規模計算, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月23日, 大阪、近畿大学

⑪ 延與佳子, Structure of light unstable nuclei studied with effective interactions, First EMMI-EFES workshop on neutron-rich exotic nuclei EENEN 09, 2008年2月10日, ダルムシュタット、ドイツ

⑫ 延與佳子, "Cluster structure in light neutron-rich nuclei"
The Cluster Conference(Cluster07), 2007年9月3日, イギリス、Stratford upon Avon

⑬ 延與佳子, "Excited states of B and C isotopes and their cluster aspect",
The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN07), 2007年7月3日, ベトナム、ホイアン

⑭ 延與佳子, "Cluster aspect of light unstable nuclei", The International Nuclear Physics Conference (INPC2007), 2007年6月4日, 東京

⑮ 延與佳子, "Suppression of p-Wave Baryons in Quark Recombination", 日本物理学会春期大会, 2007年3月25日, 首都大学東京, 日本.

⑯ 延與佳子, "Axial Vector Tetraquark with Two s-quarks", YKIS2006, 2006年11月22日, 京都.

⑰ 延與佳子, "12C 2nd 0+ state and its family in the vicinity",
2nd German-Japanese Workshop on Nuclear Structure and Astrophysics, ,2006年10月5日, RIKEN.

⑱ 延與佳子, "12C 2nd 0+ state and its family in the vicinity",
Cluster and nuclear force in light nuclei, 2006年9月25日, 大阪, 日本.

⑲ 延與佳子, "13C励起状態におけるクラスタ一の構造", 日本物理学会秋季大会, 2006年9月21日, 奈良女子大学.

⑳ 延與佳子, "Cアイソトープの奇妙な構造-16Cと13C",
陽子中性子弱結合と α 凝縮に関するミニワークショップ, 2006年7月15日, 理化学研究所、日本.

21. 延與佳子, "CLUSTER ASPECT IN UNSTABLE NUCLEI IN P-SHELL AND SD-SHELL REGIONS",
International Conference on Frontiers of Nuclear Structure (NS 2006),
2006年6月14日, Shanghai, China.

22. 延與佳子, "Three-center clustering in 11C and 13C", Y. Kanada-En'yo,
Osaka Spring Workshop on Cluster Condensation and Nucleon Correlation in Nuclei, 2006年4月27日, 大阪, 日本.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

延與 佳子 (ENYO YOSHIKO)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：40300678

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：