

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21740209

研究課題名(和文) 原子核におけるガスのクラスター構造、及びクラスターによる量子凝縮状態の研究

研究課題名(英文) Cluster structures and its quantum condensation in nuclei

研究代表者

船木 靖郎 (Funaki Yasuro)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・準研究員

研究者番号：00435679

研究成果の概要(和文)：原子核における新しい構造形態である α クラスターによる量子凝縮状態が、 ^{12}C 核の第二 0^+ 状態で実現されていることが明らかになっている。本研究ではその一般的存在の確立を目指して、 ^{16}O 核及び ^{11}B 核励起状態での存在の可能性を理論的に追求した。微視的模型、半微視的模型を用いた計算により、 ^{16}O 核及び ^{11}B 核のそれぞれ 4α 分解閾値、 $2\alpha+t$ (トライトン) 分解閾値近傍の励起状態に、 ^{12}C 核の第二 0^+ 状態に類似の状態が存在することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is well established that a quantum condensation composed of finite number of alpha particles, which is a new type of nuclear structure, is realized in the second 0^+ state in ^{12}C . In this study, as a second step to a goal of its universality, the possibility of the existence in ^{16}O and ^{11}B was pursued. With the use of microscopic and semi-microscopic models, the analogous states to the second 0^+ state in ^{12}C were found in the excited states around the 4α and $\alpha+\alpha+t$ breakup thresholds, in ^{16}O and ^{11}B , respectively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合 計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総 計	1,700,000	510,000	2,210,000

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：クラスター構造、 α 凝縮

1. 研究開始当初の背景

有限の原子核の通常の状態は基底状態で代表されるように、密度の飽和性を満たす液体的性質を有しているが、励起状態においては α クラスターがガスの状態を形成し、しかもガス状態としてエネルギーの最も低い軌道に全ての α クラスターが凝縮した状態 (BEC 状態) が出現するという革新的な理論的予言

が提唱された。具体的には、 ^{12}C の基底状態は液体的な性質を有するが、 3α 閾値近傍にある第二 0^+ 状態 (ホイール 状態) では、3 つの α 粒子がガスの運動し、しかもエネルギー的に最も低い S 軌道を占有している凝縮状態 $[(0S)^3]$ 配位を持つということである。その後、我々による凝縮型の微視的波動関数を用いた詳細な構造分析と $^{12}\text{C}(e, e')$ 反応の形状因子の分析、 3α 直交条件模型 (OCM) を

用いた α 凝縮成分と単一 α 粒子軌道の計算などにより、 ^{12}C の第二 0^+ 状態が α 凝縮的構造を持つことが確立された。

このクラスターからなるガスの量子状態は ^{12}C に留まらずに、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 、・・・と、原子核の幅広い領域に一般的に存在する新たな物質形態であることは、十分に予想される事である。現在すでに 4α 直交条件模型による ^{16}O 構造研究が第一段階を終えており、 4α 凝縮状態の候補として、 4α 分解閾値近傍に観測されている、励起エネルギー15.1 MeVの6番目 0^+ 状態を同定している。

2. 研究の目的

本研究の大きな目的は、 ^{12}C のホイル状態を代表とする、新しい原子核の物質形態である、ガスのクラスター構造、及びクラスターからなる量子凝縮状態、の存在及び運動様式の広がりや深さを探究するために、 ^{12}C 以外の原子核において、クラスター凝縮状態の存在を理論的に確立することにある。本研究計画では ^{16}O 原子核の励起状態の構造研究を中心に、凝縮したクラスターガス状態の存在を、他の様々なクラスター構造状態との関連を含め、実験家と協力しながら、2年計画で理論的に確立することを目指す。また ^{11}B 等 $4n$ 核（中性子数=陽子数=2n）以外の核についても調べ、ガス状態の存在の普遍性を探求する。

3. 研究の方法

^{16}O 原子核の 4α 凝縮状態の存在を探るため、核子の自由度を完全に取り扱った微視的枠組みの中で、 4α 凝縮タイプの模型波動関数を用いる。その際、我々が開発した、ACCC法（解析接続法）を利用した、共鳴状態を簡潔に取り扱う方法を同時に採用し、単なる束縛状態近似を超えた方法を用いる。また微視的クラスター模型波動関数から α 粒子の自由度を抜き出し、 α 粒子の一体密度行列を導出し、波動関数の解析を行う。

^{11}B 原子核に対しては、 $\alpha + \alpha + t$ の3体直交条件模型を用いる。その際、クラスター間相対運動をガウス基底関数で展開することで、クラスターからなる低密度でガスの構造を有した状態の記述を容易に行えるようにして、解析を行う。

4. 研究成果

(1) 3. で述べた α 凝縮状態を最適に記述するための微視的模型波動関数を用いて、その有用性をいくつかの核で詳細に調べた。その

結果、 ^{12}C を含め、 ^{16}O 原子核の励起状態で α 凝縮描象が非常によく成り立っていることを、核子間の自由度に基づいて多角的側面から示した。特に ^{16}O 原子核においては我々が開発した共鳴状態の取り扱い処方箋を用いて、4つの α 粒子からなる 4α 凝縮状態の存在を微視的側面から示した。それと共に、その波動関数の性質を一体密度行列等を用いて詳細に調べ、 α 凝縮度等を定量的に議論した。結果はPhysical Review誌に掲載されている。

(2) 一体密度行列の定義は、重心自由度を含まない有限系について今まで不十分にしかなされていなかった。有限系での α 凝縮度の評価を正しく行うため、一体密度行列を有限系でいかに定義すべきかの議論を行った。Jacobi座標を用いた定式化を行うことで無限系での定義につながるごく自然な定義が可能であることを示した。結果はPhysical Review誌に掲載されている。

(3) 半微視的模型を用いて、 ^{11}B 原子核励起状態における $\alpha + \alpha + t$ からなるガスの構造状態の可能性を調べた。これについても、 α 凝縮度の評価を中心として、ホイル状態との類似の状態として、 $\alpha + \alpha + t$ 閾値近傍に2番目 $(1/2)^+$ 状態が存在しかつ大きな核半径とガスの構造を持っていることを示した。結果はPhysical Review誌に掲載されている。

(4) 半微視的模型を用いて、4つの α 粒子による4体問題をこれまでより格段に広い模型空間を用意し解く計算コードを開発した。これは ^{16}O における 4α 閾値近傍程度までの励起スペクトルを $J^\pi \neq 0^+$ の状態に対しても再現し、かつ複素回転法等の境界条件を付した研究を行うために必要である。またこれにより従来存在が予言されている 4α 直線鎖構造状態とガスの構造状態を同時に再現することも可能になると考えられる。計算コードは超並列計算用にチューニングしており、今後の発展を望んでいる。

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 12 件）

1. T. Yamada and Y. Funaki Cluster structures in $(3/2)^-$ and $(1/2)^+$ states of ^{11}B , Modern Physics Letters A 25, 1943-1946 (2010). (査読無)
2. Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki, Alpha clustering and condensation in ^{16}O , Modern Physics Letters A 25, 1939-1942 (2010). (査読無)

3. Y. Funaki, M. Girod, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki, T. Yamada, Open problems in alpha particle condensation, Journal of Physics G -Nuclear and Particle Physics 37, 064012-1-064012-11 (2010). (査読無)
 4. T. Yamada and Y. Funaki, $\alpha + \alpha + t$ cluster structure and $^{12}\text{C}(0_2^+)$ -analogue states in ^{11}B , Physical Review C 82, 064315-1 - 064315-13 (2010). (査読有)
 5. Y. Funaki, T. Yamada, A. Tohsaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, Microscopic study of 4 α -particle condensation with inclusion of resonances, Physical Review C 82, 024312-1-024312-15 (2010). (査読有)
 6. Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki, α -particle condensed state in ^{16}O , International Journal of Modern Physics E 18, 2083-2087 (2009). (査読無)
 7. Tohsaki, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and T. Yamada, Microscopic wave function of alpha condensation, International Journal of Modern Physics A 24, 2003-2018 (2009). (査読無)
 8. T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, K. Ikeda and A. Tohsaki, Alpha clustering and monopole strengths in light nuclei, International Journal of Modern Physics A 24, 2043-2052 (2009). (査読無)
 9. Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki, Alpha clustering and condensation in ^{16}O , International Journal of Modern Physics A 24, 1995-2002 (2009). (査読無)
 10. Y. Funaki, H. Horiuchi, W. von Oertzen, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki and T. Yamada, Concepts of nuclear α -particle condensation, Physical Review C 80, 064326-1 - 064326-14 (2009). (査読有)
 11. T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki, Internal One-Particle Density Matrix for Bose-Einstein Condensates with Finite Number of Particles in a Harmonic Potential, Physical Review C 79, 054314-1 - 054314-11 (2009). (査読有)
 12. Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki, α -Particle Condensation in ^{16}O Studied with a Full Four-Body Orthogonality Condition Model Calculation, RIKEN Accelerator Progress Report 42, xvi (2009). (査読無) Selected for GRAVURES & HIGHLIGHTS OF THE YEAR
- [学会発表] (計 10 件)
1. Y. Funaki, Alpha clustering and condensation in nuclei, 2nd Workshop on ``State of the Art in Nuclear Cluster Physics`` (SOTANCP2) (招待講演), 26 May, 2010, Université Libre de Bruxelles, Belgium
 2. Y. Funaki, Alpha clustering and condensation in nuclei, EFES-IN2P3 Conference, ``Many-body correlations from dilute to dense nuclear systems (MBC2011)`` (口頭発表), 18 February, 2011, Institut Henri Poincare, France
 3. 船木靖郎, 4 α 直交条件モデルを用いた ^{16}O のクラスター構造研究, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 14 日, 九州工業大学戸畑キャンパス
 4. 船木靖郎, 共鳴の条件を取り入れた ^{16}O における 4 α 凝縮状態へのアプローチ, 日本物理学会第 65 回年次大会 (口頭発表), 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学津島キャンパス
 5. Y. Funaki, Alpha clustering and condensation in nuclei, International Symposium on ``Forefronts of Researches in Exotic Nuclear Structures (Niigata2010)`` (口頭発表), 3 March, 2010, ホテル・ベルナティオ十日町、新潟
 6. Y. Funaki, Alpha-particle condensed states in nuclei, Workshop on ``Hadron and Nuclear Physics (HNP09)`` (口頭発表), 16 November, 2009, 大阪大学核物理研究センター
 7. Y. Funaki, Alpha-particle clustering in nuclei and 4-alpha-particle condensation in ^{16}O , Sixth Workshop on "Aspects of alpha correlations and alpha condensation in nuclear systems" (口頭発表), 6 August, 2009, Institute of Physics, Rostock University, Germany

8. Y. Funaki, Present status of α -particle condensed states in 4n self-conjugate nuclei, 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (JCS2009) (口頭発表), 11 November, 2009, 筑波大学
9. Y. Funaki, Alpha-particle clustering in nuclei and four-alpha-particle condensation in ^{16}O , 12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms (口頭発表), 16 June, 2009, Varenna, Italy
10. Y. Funaki, Alpha particle clustering in nuclei and 4-alpha-particle condensation in ^{16}O , 3rd International Conference on Collective Motion in Nuclei Under Extreme Conditions (COMEX3) (招待講演), 3 June, 2009, Mackinac Island, Michigan, USA

〔図書〕(計 1 件)

1. Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki, Cluster Structure of Atomic Nuclei, Research Signpost/Transworld Research Network (2010) pp.1-42.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rikenresearch.riken.jp/jpn/research/5621>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船木 靖郎 (FUNAKI YASURO)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・準
研究員

研究者番号 : 00435679