

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740167

研究課題名（和文） 原子核クラスターによる量子凝縮状態の研究

研究課題名（英文） Study of quantum condensates of nuclear clusters

研究代表者

船木 靖郎 (FUNAKI YASURO)

独立行政法人理化学研究所・肥山ストレンジネス核物理研究室・協力研究員

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 クラスターがガス相を形成した量子凝縮状態が、 ^{12}C 核の第二 0^+ 状態及び ^{16}O 核第六 0^+ 状態で実現されていることが強く示唆されている。本研究では、 ^{16}O の 0^+ 以外の角運動量状態や、軽い Λ ハイパー核において、ガスの α クラスター構造状態の可能性を探りその拡がりを示した。更にその際の基礎となるクラスター平均場構造が、ガスのでないクラスター構造状態に対しても一般に実現されていることを示した。

研究成果の概要（英文）：

It is well established that a quantum condensation composed of gas-like alpha particles, which is a new type of nuclear structure, is realized in the second 0^+ state in ^{12}C and the sixth 0^+ state in ^{16}O . In this study, we showed that the gas-like cluster states are realized in a wider region, such as in non-zero spin states in ^{16}O and in light lambda hypernuclei. We further showed that the cluster-type-mean-field structure, which is a basic idea to understand the α cluster condensates, is realized in non-gas-like ordinary cluster-structure states.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,600,000	480,000	2,080,000

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：クラスター構造、 α 凝縮、元素合成、トリプル α 反応、パリティ反転二重項、 Λ ハイパー核

1. 研究開始当初の背景

有限の原子核の通常の状態は、基底状態に代表されるように、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（ α 凝縮状態）が出現することが示されている。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

イル状態）では、3つの α 粒子がガスのように運動し、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。その他、 ^{16}O の第六 0^+ 状態についても、我々による微視的、半微視的クラスター模型波動関数を用いた研究により、 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。

2. 研究の目的

本研究の大きな目的は、 ^{12}C の Hoyle 状態(第二 0^+ 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と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、2年計画で理論的に確立することを目指す。

3. 研究の方法

ガウス型基底関数を用いた直交条件模型や、 α 凝縮型微視的模型波動関数を用いて構造解明を行う。下記の項目について、2年計画で研究を行う。

- 1) ^{16}O について 4α 直交条件模型を用いて 0^+ 以外のスピンパリティ状態を調べる。
- 2) α 凝縮型微視的模型波動関数を拡張し、軽い Λ ハイパー核に適用する。
- 3) α 凝縮型微視的模型波動関数を一般のクラスター状態を扱えるよう拡張子、ガスのでないクラスター構造状態に適用する。
- 4) 虚時間発展法及び直交条件模型に基づいて、星の中での ^{12}C 生成反応等、熱的 α 捕獲反応に適用し反応率を調べる。

4. 研究成果

(1). 4α 直交条件模型を用いた ^{16}O クラスター構造研究

角運動量 $J \neq 0$ 状態の研究、及び大次元での複素スケールリング法適用のための複素対称行列対角化計算コードの開発を行った。これは HPCI ユーザー支援案件の一環であり(株)日立と協力し完成させた。 $J \neq 0$ 状態について、Hoyle 状態 + α 回転バンドと思われる状態の存在、及びそこから 4α 凝縮状態への構造変化についてより詳細な検討を行った。現在論文投稿準備中である。

(2) $^{13}_{\Lambda}\text{C}$ ハイパー核における α ガス状態の構造変化

^{12}C の基底、励起状態を極めて良く記述する THSR 波動関数を拡張し、 $^{13}_{\Lambda}\text{C}$ ハイパー核における α ガス状態について調べた。まず模型の妥当性を調べるため従来なされている微視的クラスター模型を用いた結果との比較を行い、① THSR 波動関数が $3\alpha + \Lambda$ 系を非常に

良く記述すること、② Λ 粒子が加わることによる空間的収縮効果にもかかわらず、 α 凝縮構造はさほど変化がないことを示した。また、 α 凝縮状態の数 MeV 上に $\Lambda + 3\alpha$ 直線鎖構造状態が存在することを示した。

(3). 拡張された THSR 波動関数を用いた ^{20}Ne 構造研究

従来の THSR 波動関数を負パリティの記述を可能にする拡張を行い、 ^{20}Ne の $K^{\pi}=0^{\pm}$ 回転バンドに適用した。通常の Brink 型クラスター模型波動関数が持つクラスター間の相対距離の概念を覆し、原子核中でのクラスター軌道を導入することがクラスター構造の本質であることを突き止めた。基底回転バンドに関する結果は既に論文誌に発表し、拡張型 THSR 波動関数による負パリティバンドについての結果は現在論文投稿中である。

(4). 星の中での熱的 α 粒子捕獲反応の研究

星の中での ^{12}C 生成反応であるトリプル α 反応の低温下での反応率を新たに開発した虚時間発展法を用いて調べた。理論のチェックとして、2体の $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反応の場合に適用し、非常に有効な方法であることを確認し論文誌に発表した。その上で ^{12}C 生成反応率について、① 10GK-0.01GK の温度領域にわたり NACRE compilation とほぼ同じ反応率が得られ、② チャンネル結合法を用いると非常に収束が遅く正しい答えにたどり着けない可能性が高いこと、を示した。現在論文投稿準備中である。

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 13 件)

- ① Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki: Gas-like alpha-cluster states and condensates in nuclei, Journal of Physics, Conference Series, **436**, 012004 (2013). 8 pages. (査読無)
- ② Y. Fukuoka, Y. Funaki, T. Nakatsukasa, K. Yabana: Large scale calculations for cluster structure of light nuclei with Skyrme interaction, Journal of Physics, Conference Series, **436**, 012012 (2013). 3 pages. (査読無)
- ③ Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki: Resonance States and Alpha

- Condensation in ^{12}C and ^{16}O , Few-Body Systems, **54**, 521-525 (2013). (査読無)
- ④ B. Zhou, Z. Ren, C. Xu, Y. Funaki, T. Yamada, A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck, G. Röpke: New concept for the ground-state band in ^{20}Ne within a microscopic cluster model, Physical Review C **86**, 014301 (2012). 8 pages. (査読有)
- ⑤ Y. Funaki, K. Yabana, and T. Akahori: A new theoretical approach to thermonuclear radiative-capture reaction rate, AIP Conf. Proc. 1484, 457-459 (2012). (査読無)
- ⑥ K. Yabana and Y. Funaki: Imaginary-time method for the radiative capture reaction rate, Physical Review C **85**, 055803 (2012). 8 pages. (査読有)
- ⑦ Y. Fukuoka, T. Nakatsukasa, Y. Funaki, K. Yabana: Stochastic approach to correlations beyond the mean field with the Skyrme interaction, AIP Conf. Proc. 1491, 222-225 (2012). (査読無)
- ⑧ T. Yamada, Y. Funaki, T. Myo, H. Horiuchi, K. Ikeda, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki: Isoscalar monopole excitations in ^{16}O : α -cluster states at low energy and mean-field-type states at higher energy, Physical Review C **85**, 034315 (2012). 14 pages. (査読有)
- ⑨ T. Yamada and Y. Funaki: Three-body cluster structures and Hoyle-analogue states in ^{11}B , Progress of Theoretical Physics Supplement, **196**, 388-393 (2012). (査読無)
- ⑩ Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki: Alpha Cluster States and Condensation in ^{16}O , Progress of Theoretical Physics Supplement, **196**, 439-444 (2012). (査読無)
- ⑪ Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki: Alpha clustering and condensation in nuclei, Journal of Physics: Conference Series, **321**, 012033 (2011). 4 pages (査読無)
- ⑫ Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki: Alpha-clustering and condensation in nuclei, International Journal of Modern Physics E **20**(4). 874-879 (2011). (査読無)
- ⑬ T. Yamada and Y. Funaki: Cluster structures and single-cluster motions in ^{11}B and ^{13}C , International Journal of Modern Physics E **20**(4). 910-914 (2011). (査読無)
- [学会発表] (計 16 件)
- ① 船木靖郎: α 凝縮状態研究の現状と将来展望, 日本物理学会第 68 回年次大会、シンポジウム「多種粒子測定実験で拓く原子核物理の展開」、広島大学、広島、2013 年 3 月 26 日-29 日(招待講演)
- ② 船木靖郎: 軽い Λ ハイパー核励起状態のクラスター構造、日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島、2013 年 3 月 26 日-29 日(口頭発表)
- ③ Y. Funaki: Gas-like alpha cluster states in excited states of light nuclei, ‘‘Ab initio understanding of light nuclei workshop’’ , Birmingham, UK, 12 -13 December, 2012. (招待講演)
- ④ Y. Funaki: New concept in clusterings and alpha-particle condensate in nuclei and hypernuclei, ‘‘The 8th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium’’ , Beijing, China, 15 -19 October, 2012. (招待講演)
- ⑤ Y. Funaki: Alpha particle condensate in hypernuclei, ‘‘The 8th JSPS Core-to-Core Symposium’’ , Barcelona, Spain, 5 -6 October, 2012. (口頭発表)
- ⑥ Y. Funaki: Alpha-particle condensation in light hypernuclei, ‘‘XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle

Physics' , Barcelona, Spain, 1 -5 October, 2012. (口頭発表)

- ⑦ Y. Funaki: Gas-like alpha cluster states and condensates in nuclei, ``The 10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster12)'' , Debrecen, Hungary, 24 -28 September, 2012. (招待講演)
- ⑧ 船木靖郎: 熱核融合反応率の虚時間計算
日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、京都、2012 年 9 月 11 日-14 日(口頭発表)
- ⑨ 船木靖郎: ¹⁶O 核に現れる α+Hoyle 状態と 4α 凝縮状態, 日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、京都、2012 年 9 月 11 日-14 日(口頭発表)
- ⑩ 船木靖郎: 軽いハイパー核における α 粒子凝縮状態, 日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、京都、2012 年 9 月 11 日-14 日(口頭発表)
- ⑪ Y. Funaki: Gas-like states in finite nuclei, ``The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20)'' , Fukuoka, Japan, 20 -25 August, 2012. (口頭発表)
- ⑫ Y. Funaki: A new theoretical approach to thermonuclear radiative-capture reaction rate, ``The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11)'' , CNS, Wako, Japan, 14 -17 November, 2011. (ポスター発表)
- ⑬ Y. Funaki: Resonances and alpha-particle condensate in ¹⁶O studied with Complex Scaling Method, ``Dynamics and correlations in Exotic Nuclei (DCEN2011)'' , YITP, Kyoto, Japan, 20 September -28 October, 2011. (口頭発表)
- ⑭ Y. Funaki: Resonances and alpha condensation in ¹⁶O, ``Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011)'' , YITP, Kyoto, Japan, 11

-15 October, 2011. (口頭発表)

- ⑮ Y. Funaki: Resonance states and alpha particle condensation in ¹⁶O, ``The Fifth Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics 2011 (APFB2011)'' , Sungkyunkwan University, Seoul, Republic of Korea, 22 -26 August, 2011. (口頭発表)
- ⑯ Y. Funaki: Alpha particle condensates and cluster structures in nuclei, ECT* workshop on Clusters in Nuclei and Nuclear Matter, Trento, Italy, 13 -17 June, 2011. (口頭発表)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船木 靖郎 (FUNAKI YASURO)

独立行政法人理化学研究所・肥山ストレンジ

ネス核物理研究室・協力研究員

研究者番号：00435679