

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400288

研究課題名(和文) ガスのクラスター構造、反応の理論研究

研究課題名(英文) Theoretical study of gaslike cluster structure and reaction

研究代表者

船木 靖郎 (Funaki, Yasuro)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・協力研究員

研究者番号：00435679

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)：拡張型凝縮模型波動関数を用いて、ハイパー核を含む様々な原子核(^{12}C , $^{160,9}\text{Be}$, ^{13}C)におけるクラスター構造、特にガスのクラスター構造の出現について調べた。 ^{12}C 核においては、有名な第二 $0+$ 状態(ホイール状態)の数MeV上に存在が指摘されている二つの不思議な $0+$ 状態、ホイールバンドと呼ばれる $2+$ 、 $4+$ 状態についてその物理的本質を明らかにした。特に三番目 $0+$ 状態はホイール状態がモノポール励起した類似状態であり、四番目 $0+$ 状態は三つの粒子が直線状に並んだ特異な構造を持つ。またハイパー核においても、クラスター相関が非常に重要であることを示した。

研究成果の概要(英文)：By using the extended version of the THSR wave function, we studied the emergence of gaslike cluster states and other cluster structure states in several nuclei including Lambda hyperon, such as ^{12}C , $^{160,9}\text{Be}$, and ^{13}C . In particular, in ^{12}C , two mysterious $0+$ state located above the famous Hoyle state, the second $0+$ state, and the so-called Hoyle band states ($2+$, $4+$ states) are investigated and the essential physics of them was clarified. The third $0+$ state was shown to be monopole-like excitation from the Hoyle state. The fourth $0+$ state was shown to have 3-alpha linear-chain structure. In Lambda hyper nuclei, it was shown that the cluster correlation is crucially important.

研究分野：原子核理論

キーワード：クラスター 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。例えば ^{12}C の基底状態は液体的な性質を有するが、3 閾値近傍にある第二 0^+ 状態 (Hoyle 状態) では、3つの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。さらに、 ^{12}C の第二 0^+ 状態と同じエネルギー領域に理論的に存在が予言された第二 2^+ 状態も希薄凝縮構造を持つことが明らかにされた。阪大 RCNP の実験で実際にこの状態は観測され、凝縮状態と関連した特別な状態であること、天体核での ^{12}C 元素合成反応率へ大きな影響を与える可能性もあることが指摘された。また、第二 0^+ 状態の数 MeV 上に第三 0^+ 状態、第四 0^+ 状態の存在が理論的、実験的に指摘されているが、その構造については、3 直線鎖状構造等様々な議論があるが未だはっきりとは結論付けられていない。

2. 研究の目的

凝縮研究に用いられてきた、凝縮型微視的模型波動関数 (THSR 波動関数) は非常に柔軟であることから、近年様々に拡張され、二中性子凝縮への応用、 ^{16}O 等従来のクラスター構造への応用と、広がりを見せている。またこの模型はクラスターが幾何学的配位を持つのではなく、平均場ポテンシャルの中を自由にクラスターが運動する描像 (container 描像) を提供する模型波動関数である。 ^{12}C 核、 ^{16}O 核において、クラスター構造との関連が強く指摘されていながら、未だその構造が理解されていない、3、4 閾値領域の励起状態について、拡張型凝縮模型を用いて構造を明らかにする。一方今後日本で J-PARC が本格稼働することも相まって、ストレンジネスを含んだハイパー核へ応用しクラスター構造、及びガスの凝縮状態との構造変化を探る。

3. 研究の方法

凝縮研究に大きな威力を発揮した凝縮型の微視的模型波動関数は数学的に非常に柔軟であり、現在様々に拡張が試みられている。この中でクラスターガス

+ 粒子、の形で拡張することも容易である。これを ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^9Be 、 ^{13}C 核に適用し、過去のクラスター模型による計算と比較検討しつつ、新たなクラスター構造形態の可能性について調べる。また粒子がコア核に付くことによる効果、及びハイパー核においてどのようにガスのクラスター構造状態が現れるかを調べる。

4. 研究成果

(1) ^9Be ハイパー核における THSR 波動関数を用いた研究 -

従来なされてきた微視クラスター模型による計算結果を、THSR 波動関数は単一配位で完璧に再現することを示した。これは (拡張型) THSR 模型が示すクラスターの container 描像が正しいことを示すものである。

(2) - 3、4 直線鎖状構造状態の研究 -

クラスターの container 描像に基づく THSR 波動関数を用いて、一次元上を運動する 3、4 クラスター状態について調べた。これらは幾何学的配位に基づく局在クラスター構造の典型であるが、クラスターの一次元凝縮状態と考えるべきであることを示した。

(3) - 拡張された THSR 波動関数を用いた ^{12}C の研究 -

拡張型 THSR 波動関数に核半径拘束法を用いて ^{12}C の共鳴状態に適用した。実験で観測されているホイル状態の回転バンドを再現し、通常回転バンドとは違う特異性が存在することを明らかにした。また、

^{12}C 基底状態に対して、3 RGM/GCM と呼ばれるフル計算の解が単一拡張型 THSR 波動関数で記述できることを示した。これは ^{12}C 基底状態に対しても、3つのクラスターによる、container 描像が成り立つことを示すものである。

ホイル状態上に存在する三番目 0^+ 状態、四番目 0^+ 状態を議論し、その性質を明らかにした。三番目 0^+ 状態は、基底状態、ホイル状態に直交した条件を加えることにより、単一の THSR 波動関数で 90% 以上表現されること (ホイル状態のファミリー)、四番目 0^+ 状態は 3つの粒子がガスのように直線状に配位した構造 (3 直線鎖状構造) を有することを示した。

(4) - 拡張された THSR 波動関数を用いた ^{13}C の研究 -

粒子が ^{12}C にくっついた際の、 ^{12}C からの構造変化、クラスター構造について議論した。ホイル状態に粒子がつくと、 $^9\text{Be}+$ 構造が生じ、 ^{12}C の三番目 0+状態に粒子が付くことにより、ホイルアナログの $+ + ^5\text{He}$ の三体クラスターガス状態が生じることを明らかにした。また直線鎖状構造を持った ^{12}C の四番目 0+状態に粒子がついても、そのまま 3 直線鎖状構造状態が維持されることを示した。

(5) - 拡張された THSR 波動関数を用いた ^{16}O の研究 -

$^{12}\text{C}+$ の閾値、 ^{16}O の基底状態をよりよく再現するため、核子間有効 3 体力を取り入れた核力を用いた、拡張型 THSR 波動関数による ^{16}O 構造研究の計算コード開発を行った。従来の THSR 波動関数を用いた結果に比べ、より実験で観測された 0+状態の再現性が良く、 $^{12}\text{C}+$ 、4 凝縮状態共に良く再現する予備計算結果を得ている。

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)

Y. Funaki: “Monopole excitation of the Hoyle state and linear-chain state in ^{12}C ”, *Physical Review C* **94**, 024344 (2016). (published: August 30) 8p 査読有

M. Lyu, Z.Z. Ren, B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, and T. Yamada: “Investigation of ^{10}Be and its cluster dynamics with the nonlocalized clustering approach”, *Physical Review C* **93**, 054308 (2016). (published: May 5, 2016) p8. 査読有

C. Xu, Z. Z. Ren, G. Röpke, P. Schuck, Y. Funaki, H. Horiuchi, A. Tohsaki, T. Yamada, and B. Zhou: “ α -decay width of ^{212}Po from a quartetting wave function approach”, *Physical Review C* **93**, 011306(R) (2016) 査読有

T. Yamada, Y. Funaki: “Alpha cluster structures and monopole excitations in ^{13}C ”, *Physical Review C* **91**, 014313 (2015). (published: 25 September 2015) 17p. 査読有

T. Akahori, Y. Funaki, K. Yabana:

“Imaginary-time formalism for triple-alpha reaction rate”, *Physical Review C* **92**, 022801(R) (2015). (published: 7 August 2015) 5p 査読有

Y. Funaki: “Hoyle band and condensation in ^{12}C ”, *Physical Review C* **92**, 021302(R) (2015). (published: 3 August 2015) 5p. 査読有

Y. Funaki, H. Horiuchi, and A. Tohsaki: “Cluster models from RGM to alpha condensation and beyond”, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **82**, 78-132 (2015). 査読有

E. Hikota, Y. Funaki, E. Hiyama, M. Oka: “The radiative capture reaction rate from ^9Be to H dibaryon in the imaginary time method”, *Physical Review C* **92**, 015205 (2015). (published: 13 July 2015) p10. 査読有

M. Lyu, Z.Z. Ren, B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, and T. Yamada: “Investigation of ^9Be from nonlocalized clustering concept”, *Physical Review C* **91**, 014313 (2015). (published: 16 January 2015) p9. 査読有

Y. Funaki, T. Yamada, E. Hiyama, B. Zhou, and K. Ikeda: “Container structure of ^9Be clusters in ^9Be ”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2014**, 113D01 (published: Nov.1) 16p 査読有

G. Röpke, P. Schuck, B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, Z. Z. Ren, A. Tohsaki, C. Xu, and T. Yamada: “Bound clusters on top of doubly magic nuclei”, *Physical Review C* **90**, 034304 (2014) (published: September 8) 24p 査読有

B. Zhou, Y. Funaki, A. Tohsaki,
H. Horiuchi, and Z.Z. Ren:
"The container picture with two-alpha
correlation for the ground state of ^{12}C ",
Progress of Theoretical and Experimental
Physics **2014**, 101D01 7p. 査読有

[学会発表](計 11件)

Y. Funaki: "Gaslike clusters in light
nuclei" Mini-Workshop on Nuclear
Clustering (MWNC2016), Peking
University, China, July 2, 2016

Y. Funaki: "Cluster structures in
the excited states above the Hoyle
state" 11th International Conference on
Clustering Aspects of Nuclear
Structure and Dynamics, Napoli, Italy,
May 25, 2016 (招待講演)

Y. Funaki: "Cluster states in ^{12}C
and ^{13}C " International workshop on
"Clustering effects of nucleons in
nuclei and quarks in multi-quark
states", KITPC, Beijing, China, April 7,
2016 (招待講演)

Y. Funaki: "Cluster model
approaches to nuclear many-body
dynamics" Symposium on Quarks to
Universe in Computational Science
(QUCS2015), Nara Kasugano
International Forum, IRAKA, Nara,
Japan, Nov.4, 2015 (招待講演)

Y. Funaki: "Structure of the Hoyle
band studied with the extended THSR
model" International Workshop on
Clusters in Nuclear Systems, Rostock
University, Rostock, Germany, Aug. 4,
2015 (口頭発表)

Y. Funaki: "Clustering aspects in
nuclear structure and reaction"
9th APCTP-BLTP JINR Joint
Workshop at Kazakhstan on "Modern
problems of nuclear and particle
physics", Almaty Institute of Physics
& Technology, Almaty, Kazakhstan,
July 3, 2015 (招待講演)

Y. Funaki: "Hoyle band and
condensation in ^{12}C " 21st International
Conference on Few-body Problems in
Physics, Crowne Plaza Metro, Chicago,
IL, USA, May 19, 2015 (口頭発表)

Y. Funaki: "Cluster structures in
excited states in ^{12}C ", International
Conference on Cluster structure of
unstable nuclei and its decay, Nanjing,
Jiangsu, China, December 3, 2014 (口頭
発表)

Y. Funaki: "Cluster states and
container picture in light nuclei, and
triple-alpha reaction rate" Nuba
conference Series-1: Nuclear Physics
and Astrophysics, Akdeniz University,
Antalya, Turkey, September 15, 2014
(招待講演)

Y. Funaki: "Alpha condensates and
nonlocalized cluster structures" The
international Workshop on "Multi
facets of Eos and
Clustering(IWM-EC2014)", Catania,
Italy, May 8, 2014 (口頭発表)

Y. Funaki: "Alpha condensates and
nonlocalized cluster structures"
The 3rd International Workshop on
"State of the Art in Nuclear Cluster
Physics(SOTANCP3)", KGU Kannai
Media Center, Yokohama, Japan, May
26, 2014 (招待講演)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船木 靖郎 (Funaki, Yasuro)
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器
器研究センター・協力研究員
研究者番号：00435679

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()