

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03658

研究課題名(和文)非局在型クラスター描像に基づいたクラスター構造形成の動力学

研究課題名(英文)Dynamics of cluster formation on the concept of non-localized clustering

研究代表者

船木 靖郎 (Funaki, Yasuro)

関東学院大学・理工学部・准教授

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)：原子核に現れるクラスター構造として、クラスターが空間的に局在するという従来の見方と大きく異なる、空間非局在のアイデアに基づきガスのクラスター構造状態が存在する可能性についていくつかの理論模型を用いて調べた。12C原子核励起状態に現れる負パリティ状態、9B, 10Be, 10C及び9 Be, 13 Cにおける複数のアルファ粒子(粒子)に余剰核子や粒子がくっ付いた状態において、クラスターが非局在的に配位している可能性が示された。20Neの励起状態に2 +12Cによる3体のガス状態、及び5 凝縮状態の存在を理論的に予言した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子核におけるクラスター構造は従来空間局在するものとして、核子による平均場描像に基づく殻模型とは一線を画した全く異なる原子核構造形態として認識されてきた。これに対し最近、アルファクラスターがガスの配位した凝縮状態を始めとして、クラスターの空間的非局在化が原子核クラスター構造において非常に重要な点が指摘されてきた。本研究はこのクラスターの空間的非局在化の視点を中心として新たな核構造形態の可能性を探ることを目的としており、本研究結果により従来の認識より広範な原子核領域において、その視点が一層重要であることが示された。

研究成果の概要(英文)：Gaslike cluster states in nuclei are investigated by using several theoretical models, which is based on the concept of non-localized motion of constituent clusters and is far from the conventional idea of spatial localization of nuclear clustering. Negative parity states in 12C and some quantum states in 9B, 10Be, 10C, and 9LBe, 13LC, which are composed of a few alpha clusters and additional nucleons or Lambda particle, are shown to have a nature of non-localized clustering. It is also predicted theoretically that gaslike 2-alpha+12C cluster state and 5-alpha condensate state exist in 20Ne.

研究分野：原子核理論

キーワード：アルファクラスター クラスター構造 アルファ凝縮

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子核のクラスター構造は、殻模型構造に代表される核子の平均場構造とは大きく異なっており、複数の核子集団がクラスターを形成し、それらが空間的に局在化するという理解をされてきた。ところが2013年頃より、アルファクラスター(クラスター)が最低エネルギー軌道に凝縮するアルファ凝縮構造のアイデアを拡張した形で、従来空間的局在化すると理解されてきたクラスター構造に対しても、ガスの空間非局在の見方が成立する可能性が指摘されてきた。この可能性は実際、従来空間的局在化がその本質的性質であると考えられてきた、 ^{20}Ne に存在する $+^{16}\text{O}$ 構造状態、 ^{12}C や ^{16}O における3直線鎖状構造、4直線鎖状構造等に対して確かめられ、新たに空間的非局在性が非常に重要な役割を果たしていることが示されてきた。また ^{16}O においては、励起エネルギーの増加と共に、殻模型構造を持った基底状態から、 $+^{12}\text{C}$ 構造状態を経由して4凝縮状態が4閾値近傍に形成されるまでの一連のパスが、拡張型 THSR 模型と呼ばれる非局在型微視的クラスター模型により明確に示されてきた。

2. 研究の目的

クラスターが空間非局在化するというのは、クラスターが空間的に幾何学的に配置するのではなく、原子核中でクラスターが自由に運動する平均ポテンシャルが形成され、その中でクラスターが独立に軌道を占有する、という描像である。これは従来のクラスター構造の概念を大きく変革するものであり、本研究ではその可能性をより多くの原子核において調べその一般性について追及する。またそのような非局在化を生むクラスター平均場ポテンシャルの空間的広がりや形の変化が、クラスターをどのように形成発展させていくかについて模型を用いて調べるところを目的とする。

3. 研究の方法

クラスター凝縮構造を記述する際に用いられてきた、全ての クラスターが同一の軌道を占有した模型である THSR 模型波動関数を拡張し、 クラスター構造以外の構造状態や、余剰核子や余剰の 粒子がくっついた状態も記述することを可能とした、拡張された THSR 模型波動関数を利用する。クラスターが平均場により非局在化して比較的自由に運動するとした描像は、原子核の中であたかもクラスターを内包する器(「container」と呼ぶ)が存在し、そのサイズや形を変えることで様々な非局在型クラスター構造が形成されるとするものである。拡張型 THSR 模型はこの「container」のサイズや形をパラメータとする微視的クラスター模型波動関数である。またそれと相補的に、核子間の反対称化を近似するがクラスターの相対運動をフルに解く直交条件模型を用いて、クラスター構造の詳細について調べる。

4. 研究成果

(1) 「container」描像に基づいた微視的クラスター模型波動関数の拡張

軽い自己共役 $4n$ 核の基底状態からクラスター構造を持った励起状態までを統一的に記述できる高い可能性を秘めた n^- -THSR 波動関数は、従来内部に正パリティ成分のみを含むものが考案され適用されてきた。この従来型 THSR 波動関数を、内部に負パリティ成分を含む形に拡張することに成功し、 ^{12}C 核の励起状態に適用した。角運動量・パリティが 1^- の状態が、核半径が基底状態に比べ特に大きく、3つの クラスターがガスのように配位した構造を持つことが示された。これはこの 1^- 状態が、凝縮状態のファミリーであることを強く示唆する結果である。また角運動量、パリティが 3^- 、及び 4^- の状態について、従来議論されていた3つの 粒子が正三角形に配置された状態というのは正確ではなく、3粒子間相対自由度に相当する2種類の「container」の中を3つの 粒子がその中を比較的自由に運動している状態と結論付けることができた。

(2) クラスターガス状態に余剰核子が付加された系への「container」型模型波動関数の適用

2^- -THSR 波動関数を基にして、それに余剰核子が付加された形に THSR 波動関数を拡張し、 $^9\text{B}(2^-+p)$ 、 $^{10}\text{Be}(2^-+nn)$ 、 $^{10}\text{C}(2^-+pp)$ に適用した。従来型の模型は、余剰核子の運動として、パイ軌道に対応する運動に制限されたものが考案され適用されてきた。これに対し、新たにシグ

マ軌道に対応する運動を含むように拡張した。これは余剰核子の運動する「container」の空間位置を、2つのクラスター間でシフトすることを可能にする形で実現したものである。この拡張による効果は大きく、全体として束縛エネルギーに1 MeV以上のエネルギー利得が得られ、より実験データに一致する結果が得られた。更に上記モデルの2核子部分にペアリング型配位を加えた拡張を行うことで、 ^{10}B 、 ^{10}Be 、 ^{10}C のすべてにわたり、エネルギーが大きく改良されることが明らかになった。

(3) 5 粒子凝縮状態を含む ^{20}Ne の励起状態

拡張型 5 THSR 波動関数を用いた 5 凝縮状態の探索

^{20}Ne において、「container」描像に基づく2種類の拡がりパラメータを導入した拡張型 THSR 波動関数を用いて5凝縮状態の探索を行った。連続状態成分を近似的に取り除くことができる r^2 拘束法を同時に用いることで物理的な共鳴状態のみを近似的に抽出してより精度の高い計算を行った。計算の結果、5 閾値(励起エネルギー19.2 MeV)の約4 MeV上の励起エネルギー領域に、5凝縮状態の候補を発見した。これは同エネルギー領域に最近観測された5凝縮状態の候補とされる状態を再現するものである。実験で観測された状況同様、部分系である4凝縮状態に更に粒子が一つ加わった配位を強く持つことが示された。また得られた5凝縮状態は単一の5凝縮波動関数の成分を大きく(65%程度)含んでいることが明らかになり、これは5つの粒子が65%程度は単一の軌道を占有していることを示している。

$^{12}\text{C} + 2$ 直交条件モデルを用いたガスの状態の探索

^{20}Ne において、5凝縮状態の候補は励起エネルギー19.2 MeVの5分解数居値の上に存在すると考えられ、かなり高い励起エネルギーを持った励起状態である。これは ^{12}C における3凝縮状態が基底状態の上の第二 0^+ 状態として比較的低いエネルギー領域に現れるのとはかなり異なった状況である。 ^{20}Ne においては5分解数居値の下に、 $^{12}\text{O} +$ 分解数居値、 $^{12}\text{C} + 2$ 分解数居値が存在し、5凝縮状態以外の様々なクラスター構造状態が存在することが予想される。従って、の拡張型 THSR 波動関数と相補的に、 $^{12}\text{C} + 2$ の3体クラスター間の相対運動をフルに解く方法として $^{12}\text{C} + 2$ 直交条件モデルを採用し、 $^{12}\text{C} + 2$ 分解数居値付近までに現れるクラスター構造状態を調べた。またクラスター間相対運動の空間部分にはガウス基底関数を採用し、より広い空間をモデル空間に取り入れることで、3体のガスの構造状態が存在するかどうかについても着目した。クラスター間相対角運動量チャンネルとして、角運動量8(合計78チャンネル)のチャンネルまで取り入れた広いモデル空間を取り扱い、 $^{12}\text{C} + 2$ 分解数居値より低い励起状態を再現することに成功した。換算幅振幅の解析により、同数居値より上に3体ガス構造を持った新たなクラスター状態を理論的に発見した。

(4) ガス状態 + 粒子系

^9Be におけるガスの $2 +$ 構造

直交条件モデル + 複素スケールリング法を用いて $2 +$ 粒子系の共鳴状態について調べた。これは通常束縛状態近似を超えて共鳴の境界条件を正しく付けた計算であり、非物理的な非共鳴状態成分が混ざることの無い精密な計算である。物理的には「container」描像に基づいて理論的に存在を予言した、3凝縮状態に粒子が付加された状態の部分系としての側面に着目し検討を行った。非束縛状態のエネルギー領域におけるクラスター構造状態、殻模型的状态のスペクトルを分類し実験との比較検討を詳細に行った。拡張型 THSR 模型を用いて束縛状態近似で得られていた第二 0^+ 状態が共鳴状態としては現れないことが明らかになった。

^{13}C におけるガスの $3 +$ 構造

^{12}C 原子核に粒子がくっついた ^{13}C について、 $3 +$ からなる4体直交条件モデルによるシュレディンガー方程式をフルに解き、 ^{12}C に現れるクラスター構造状態との比較を行った。また以前行った「container」型 $3 +$ クラスターモデル計算との比較も行い、この理論計算同様、 ^{12}C の3つのスピン $0 \cdot$ パリティプラスのクラスター状態に粒子のくっついた状態がそれぞれ計3つ得られた。更に、 ^{13}C に新たに $^9\text{Be} +$ の2体クラスター構造の相対S波が励起したhigher nodal 状態が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Q. Wu, Y. Funaki, E. Hiyama, H. Zong	4. 巻 102
2. 論文標題 Resonant states of ^9Be with $++$ three-body cluster model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.054303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 M. Lyu, Z.Z. Ren, H. Horiuchi, B. Zhou, Y. Funaki, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada	4. 巻 57
2. 論文標題 Properties of 8-11Be isotopes with isospin-dependent spin-orbit potential in a cluster approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-021-00363-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Funaki	4. 巻 57
2. 論文標題 Alpha condensate and dynamics of cluster formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-020-00321-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhou Bo, Funaki Yasuro, Horiuchi Hisashi, Kimura Masaaki, Ren Zhongzhou, Roepke Gerd, Schuck Peter, Tohsaki Akihiro, Xu Chang, Yamada Taiichi	4. 巻 99
2. 論文標題 Nonlocalized motion in a two-dimensional container of particles in 3- and 4- states of ^{12}C	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 051303:1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.051303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhao Qing, Ren Zhongzhou, Lyu Mengjiao, Horiuchi Hisashi, Kanada-En'yo Yoshiko, Funaki Yasuro, Roepke Gerd, Schuck Peter, Tohsaki Akihiro, Xu Chang, Yamada Taiichi, Zhou Bo	4. 巻 100
2. 論文標題 Investigation of isospin-triplet and isospin-singlet pairing in the A=10 nuclei B10, Be10, and C10 with an extension of the Tohsaki-Horiuchi-Schuck-Roepke wave function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014306:1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.014306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Bo, Funaki Yasuro, Horiuchi Hisashi, Tohsaki Akihiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Nonlocalized clustering and evolution of cluster structure in nuclei	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers of Physics	6. 最初と最後の頁 14401:1-64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11467-019-0917-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lee Jehhee, Wu Qian, Funaki Yasuro, Zong Hongshi, Hiyama Emiko	4. 巻 60
2. 論文標題 Three-Body Structure of ^9Be with α - α Cluster Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 30:1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-019-1502-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhao Qing, Ren Zhongzhou, Lyu Mengjiao, Horiuchi Hisashi, Funaki Yasuro, Roepke Gerd, Schuck Peter, Tohsaki Akihiro, Xu Chang, Yamada Taiichi, Zhou Bo	4. 巻 97
2. 論文標題 Investigation of the ^9B nucleus and its cluster-nucleon correlations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054323-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.054323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Funaki Yasuro	4. 巻 194
2. 論文標題 Container evolution and dynamics of cluster formation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06002-1 ~ 06002-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201819406002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Funaki Y.	4. 巻 2038
2. 論文標題 Container evolution and dynamics of cluster formation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020019-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5078838	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Y. Funaki
2. 発表標題 Hoyle analogs and rotational states in 16O
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body problems in Physics (APFB2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 船木靖郎、山田泰一
2. 発表標題 12C+2 直交条件模型を用いた20Ne励起状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会オンライン開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 船木靖郎、山田泰一
2. 発表標題 20Neにおける12C+2 ガス状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会2021年年次大会オンライン開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuro Funaki
2. 発表標題 Alpha condensates and dynamics of cluster formations
3. 学会等名 ECT* Workshop on Light clusters in nuclei and nuclear matter, Trento, Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 船木 靖郎
2. 発表標題 12C+2 直交条件模型を用いた20Ne励起状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会、山形大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Funaki
2. 発表標題 Container evolution and dynamics of cluster formation
3. 学会等名 4th International Workshop on State of The Art in Nuclear Cluster Physics (SOTANCP4), Galveston, Texas, USA, 14-18 May, 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Funaki
2 . 発表標題 Container evolution and dynamics of cluster formation
3 . 学会等名 International Conference on Nuclear Structure and Related Topics (NSRT18), Burgas, Bulgaria, 3-6 June, 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Funaki
2 . 発表標題 Alpha condensates and dynamics of cluster formation
3 . 学会等名 Chengdu Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2018), Chengdu, China, 9-13 November, 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Funaki
2 . 発表標題 Alpha condensates and dynamics of cluster formation
3 . 学会等名 Tsukuba-CCS workshop on ``microscopic theories of nuclear structure and dynamics ' ', Center for Computational Sciences, Univ. of Tsukuba, Japan, 10-12 December, 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Funaki
2 . 発表標題 Alpha condensates and container evolution in nuclear cluster formation
3 . 学会等名 The 50th Reimei Workshop ``Universal Physics in Many-Body Quantum Systems: From Atoms to Quarks ' ', Ibaraki Quantum Beam Research Center (IQBRC), Japan, 12-14 December, 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Funaki
2. 発表標題 `Container` evolution of nuclear clustering in 160
3. 学会等名 The fifth Joint Meeting of the NPD of APS and JPS, Hawaii, USA, Oct. 23-27, 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 船木 靖郎
2. 発表標題 極限状況下でのアルファ粒子凝縮とクラスター形成の動力学
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会、シンポジウム「極端条件における量子現象 -宇宙・物質・生命-」、九州大学伊都キャンパス, 3月14日-17日, 2019 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	Nanjing University, Nanjing	Tongji University, Shanghai		
フランス	Institut de Physique Nucleaire, Orsay			
ドイツ	Universitat Rostock, Rostock			