

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540275

研究課題名(和文)原子核構造と分子共鳴の統一的記述と中性子過剰核のクラスター現象

研究課題名(英文)Description of cluster structures and molecular resonances and understanding of cluster phenomena in neutron-rich nuclei

研究代表者

延與 佳子(Enyo, Yoshiko)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40300678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：微視的数値計算の一つである反対称化分子動力学法を用いて原子核の理論研究を行った。主に軽い安定原子核および不安定原子核の基底・励起・共鳴状態の構造を調べ、クラスター状態の解明を行った。具体的な成果としてベリリウム(Be)、ホウ素(B)、炭素(C)同位体における新しいクラスター励起状態の理論的予言を行うとともに、最新の実験値対応させて議論し、変形構造やクラスター励起状態に関する新たな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We theoretically studied structures of light nuclei with a microscopic method of antisymmetrized molecular dynamics. We investigated excited and resonance states having cluster structures of stable and unstable nuclei in light mass number (p-shell and sd-shell) regions and clarify cluster features. For instance, I studied cluster states of Be, B, and C isotopes and succeeded to predict new excited states having developed cluster structures. I discussed correspondence between our theoretical results and recent experiments on cluster scattering and cluster decay states in excited states of stable and unstable nuclei, and extracted information on nuclear deformation and clustering from the experimental data. We also gave new insights on cluster phenomena in nuclear systems.

研究分野：原子核理論

キーワード：原子核構造 不安定原子核 クラスター

1. 研究開始当初の背景

中性子過剰な原子核におけるクラスター現象は不安定原子核物理における注目されたテーマの一つである。特に、軽い質量数領域のクラスター研究は、理論と実験の両面で著しく発展しており、国内外の実験グループによって高励起クラスター状態の探索がさかんに行われる中、その理論的解明が急務である。

2. 研究の目的

原子核における低励起状態と高励起のクラスター共鳴状態を統一的に記述する微視的理論を構築し、幅広い励起エネルギー領域のクラスター現象を系統的に研究する。微視的な構造模型の一つである反対称化分子動力学法を進展させて、原子核-原子核散乱や共鳴状態を記述し、その手法を不安定原子核の研究に適用する。このようにして不安定原子核の励起状態に出現するクラスター現象を微視的に解明するとともに、陽子と中性子数のアンバランスなアイソスピン非対称な核子多体系の新しい存在様式を提案する。さらに、クラスター状態の出現機構を明らかにする。

3. 研究の方法

申請者らが開発した反対称化分子動力学法 (AMD法) を拡張し、原子核-原子核の共鳴状態へ適用可能な枠組みを構築し、低励起の変形状態とクラスター励起状態、および、高い励起エネルギーの分子共鳴状態を理論的に記述する。低励起状態と分子共鳴状態を一つの枠組みで同時に記述することが特徴である。一つの原子核の波動関数を AMD法によって求め、その AMD 波動関数を複数重ね合わせることによって基底状態と励起状態を記述する。このように記述した原子核を一つのクラスターと見なし、2 クラスター間距離を新たな変数として波動関数の重ね合わせを行うことで、クラスター内部の励起を取り入れた分子共鳴状態の記述する。この手法を適用し、クラスター励起状態の理論的解明および新しい励起状態の理論的予言を行う。共鳴は正のエネルギーで束縛しない解であるが、仮想ポテンシャルを手で加え、その仮想ポテンシャルの強度変化に対する結果の依存性を調べることで現実的な系での共鳴状態の性質を探る。さらに核表面でのクラスター存在確率を求めることで、共鳴状態からクラスター崩壊を起こす確率を理論的に評価し、既存の実験データと比較するとともに、理論的予言を行う。

4. 研究成果

(1) [総括]

不安定原子核におけるクラスター励起状態の研究を進めた。クラスターとは空間的な多粒子相関を広く意味し、発達したクラスターを含む不安定核励起状態の研究を中心的

に進めたが、クラスターに限らず t クラスター、二核子対など多彩なクラスターを含む励起状態へと研究対象を広げ、新しいタイプの励起状態を理論的に予言するとともに、クラスター励起状態の出現機構を明らかにした。不安定原子核の新しい存在様式を提案する成果であり、また、クラスター構造は不安定原子核の励起状態に頻りに現れる普遍的性質であることを明らかにした。本研究の成果は、国内外で活発に行われている新しい励起状態の探索実験に大きな貢献を果たしただけでなく、核子多体系におけるクラスター構造すなわち空間的な多核子相関の重要性を示す意義をもつ。空間的な多核子相関を取り入れて系統的に不安定原子核を研究する理論研究は世界的にも限られており、独創的な結果としてインパクトを与え、国際会議にたびたび招待されるなど国際的な評価も受けている。

(2) [He 同位体における二中性子対]

He 同位体では クラスター芯が形成されその周りに余剰中性子が束縛された構造が出現する。2つの余剰中性子がスピンゼロの対を形成したダイニュートロン相関を調べるために、波動関数における2体密度を解析し、核表面において空間的に強い相関をもつ2中性子対 (ダイニュートロン) が見られることを示した。

(3) [t-6He クラスター励起状態]

9Li において、t-6He クラスターの発達した構造が励起状態に現れる可能性を理論的に予言した。この状態は 10Be の第二 0+状態に知られている ^{-6}He クラスター構造と類似した大きな変形構造をもつ状態で、回転体を形成することを示した。9Li 励起状態におけるクラスター励起状態は、triton 粒子を放出して崩壊する準安定状態で、連続状態との結合を調べ崩壊に対する不安定性を評価した。この状態は、2つの不安定核が共鳴した状態であり、不安定核クラスターで構成される新しいタイプのクラスター励起状態という点で新奇な予言であり、不安定核同士の相互作用や散乱に新しい知見を与えうる重要な成果である。

(4) [Be, B, C の低励起状態]

ベリリウム (Be)、ホウ素 (B)、炭素 (C) 同位体において基底状態および励起状態に見られるクラスター現象を研究した。これまで 11Be や 12Be などの中性子過剰核において2 クラスター構造が発達し、その結果として中性子数 $N=8$ の魔法数の消滅が起こることが知られているが、さらに中性子過剰な 13Be に AMD法を適用した結果、13Be においても多くの状態で2 クラスター芯が形成されることを明らかにした。さらに発達したクラスター構造によって、異常な中性子配位をもつ状態が低エネルギー近傍に縮退して出現し、13Be に

おいても魔法数の消滅が起こっているという非常に興味深い結果を得た。これらの状態は、 $^{12}\text{Be}+n$ の中性子共鳴状態として理解できることを示した。得られた理論結果は、最近の不安定核実験での研究報告を説明づけるものであった。

(5)[3体クラスター励起状態]

^{11}B においてに $2 + t$ の3体クラスター構造をもつ cluster gas や linear chain が示唆した。特に、3番目の $3/2^-$ 状態は Hoyle 状態として知られている ^{12}C の2番目の 0^+ 状態に類似したクラスター気体状態であることを示した。また、また、 ^{12}C について、鈍角三角形の3配位をもつ幾何学的な 0^+ 状態を提案しており、この状態に対応すると見られる状態が、最近の ^{12}C の実験で見つかった。このように、励起状態に3つのクラスターで構成された多様な状態が存在することを指摘した。

また、 ^{11}B 励起状態の $2 + t$ クラスター状態と、 ^{12}C 励起状態の3体クラスター状態の類似性と相違点について考察した。ボゾン粒子と見なせるクラスターに対して、他のクラスターと同種でない t クラスターが含まれた ^{11}B では、粒子交換の観点で相違点があるが、3次元空間での運動を2次元平面に射影した場合には、 $2 + t$ クラスター状態と3体クラスター気体に対応づけられることを明らかにした。クラスター気体状態のダイナミクスに粒子の統計性が影響することを示すものであり、一般的な量子多体系の物理現象の観点でも興味をもたれる結果である。

(6)[二核子相関]

中性子 - 中性子相関および陽子 - 中性子相関(pn 相関)を統一的に考え、これらの二核子対が原子核表面で現れる現象について研究を進めた。二核子対にはアイソスピン $T=0$ および $T=1$ の対があり、これらの競合が近年世界的に注目された話題になっている。この課題に関して、申請者は ^{18}F における pn 相関を調べ、核表面における $S=0(T=1)$, $S=1(T=0)$ の2核子対のエネルギーや芯からの1体LSポテンシャルに大きく影響をうけることを明らかにし、 $T=1$ 対では対の相対運動について正パリティのS波状態に負パリティのP波状態が混合したパリティ混合対という新しい物理的解釈を提案した。このパリティ混合対の現象は、 ^{18}F に限らず一般の原子核表面で起こりうる普遍的な現象であり、今後の大きく発展しうるテーマである。

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 19 件)

F.Kobayashi and Y.Kanada-En'yo
Dinucleon correlations in the ground states

of ^9Li , ^{10}Be , and $^9,^{10}\text{C}$
Physical Review C 89, 024315-1-13, 2014
査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.89.024315

Y.Kanada-En'yo

Cluster states and monopole transitions in ^{16}O
Physical Review C 89, 024315-1-13, 2014
査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.89.024315

F.Kobayashi and Y.Kanada-En'yo

Dineutron formation and breaking in ^8He
Physical Review C 88, 034321-1-17, 2013
査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.88.034321

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

T.Suhara, Adiabatic internuclear potentials obtained by energy variation with the internuclear-distance constraint
Progress of Theoretical Experimental Physics 2013, 043D04-1-10, 2013
査読有
DOI:10.1093/ptep/ptt002

F.Kobayashi and Y.Kanada-En'yo

Novel cluster states in ^{10}Be
Physical Review C 86, 064303-1-11, 2012
査読有
10.1103/PhysRevC.86.064303

Y. Kanada-En'yo, Breaking of $N=8$ magicity in ^{13}Be

Physical Review C 85, 044320-1-9, 2012
査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.85.044320

T. Suhara and Y. Kanada-En'yo

Cluster structures in ^{11}B
Physical Review C 85, 054320-1-9, 2012
査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.85.054320

Y. Kanada-En'yo, M. Kimura and A. Ono,

Antisymmetrized molecular dynamics and its applications to cluster phenomena,
Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2012, 01A202-1-41, 2012
査読有
DOI:10.1093/ptep/pts001

Y. Kanada-En'yo, and T. Suhara,

^6He -triton cluster states in ^9Li ,
Physical Review C 85, 024303-1-9, 2011,
査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.85.024303

Y. Kanada-En'yo,

Proton dominance in the $^2\text{He}^+ \rightarrow ^0\text{He}^+ + ^1\text{H}$ transition of

$N=Z\pm 2$ nuclei around 28Si ,
Physical Review C 84, 024317-1-7, 2011, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.84.024317

Fumiharu Kobayashi and Yoshiko Kanada-En'yo,
A New Approach to Investigate Dineutron Correlation and Its Application to 10Be ,
Progress of Theoretical Physics 126, 457-482, 2011, 査読有
DOI:10.1143/PTP.126.457

Yoshiko Kanada-En'yo and Yoshimasa Hidaka,
alpha-cluster structure and density waves in oblate nuclei,
Physical Review C 84, 54301-1-16, 2011, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.84.014313

Y. Kanada-En'yo, H. Feldmeier, and T. Suhara,
Two-neutron correlations in microscopic wave functions of 6He , 8He and 12C
Physical Review C 84,54301-1-11, 2011, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.84.054301

T. Suhara and Y. Kanada-En'yo,
Be-alpha correlations in the linear-chain structure of C isotopes,
Physical Review C 84, 24328-1-9, 2011, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.84.024328

Yoshiko Kanada-En'yo, Hans Feldmeier, and Tadahiro Suhara,
Dineutron correlations in He isotopes,
Modern Physics Letters A 25,1850-1853,2010, 査読無
DOI: 10.1142/S0217732310000472

Tadahiro Suhara and Yoshiko Kanada-En'yo,
Cluster structures of excited states in 14C
Physical Review C 82, 044301-1-13, 2010, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.82.044301

Yoshiko Kanada-En'yo and Masaaki Kimura,
Cluster structure of neutron-rich nuclei studied with Antisymmetrized Molecular Dynamics model,
Lecture Notes in Physics 818,129-164, 2010, 査読有
DOI:10.1007/978-3-642-13899-7_4

Yoshiko Kanada-En'yo, Cluster aspect of nuclear systems
Physica E, 43, 811-814, 2010, 査読有
DOI:10.1016/j.physe.2010.07.058

Yoshiko Kanada-En'yo, Gamow-Teller transitions from $Li-9, Li-11$ to $Be-9, Be-11$
Physical Review C 82, 034321-1-7, 2010, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.81.034321

〔学会発表〕(計 15 件)

延与佳子,
16O 励起状態のクラスター構造とクラスター気体状態の回転,
日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月 27-30 日.

Yoshiko Kanada-En'yo,
Cluster formation and breaking, and cluster excitation in light nuclei
the 25th International Nuclear Physics Conference (INPC 2013),
Firenze, Italy, June 2-7, 2013.

Yoshiko Kanada-En'yo,
Cluster gas states in 11B , 12C , and 16O , and their rotation,
The ECT* - JINA Workshop Reactions Involving 12C :
Nucleosynthesis and Stellar Evolution, ECT*, Trento, Italy
October 7-11, 2013.

Yoshiko Kanada-En'yo
Cluster and shape in stable and unstable nuclei
GCOE Symposium "Development of emergent new fields", Kyoto, Japan,
February 12-14, 2013.

Yoshiko Kanada-En'yo
Structures of ground and excited states in C isotopes,
International Symposium "Exotic Nuclear Structure From Nucleons" (ENSNF 2012)
University of Tokyo, Japan,
October 10-12, 2012.

Yoshiko Kanada-En'yo,
Two-neutron correlation and Cluster correlation in light nuclei,
the 10th International Conference on Clustering Aspects
of Nuclear Structure and Dynamics,
Debrecen, Hungary,
September 24-28, 2012.

Yoshiko Kanada-En'yo,
Cluster and deformation in C isotope,

The second International Conference
:Nuclear Structure and Dynamics
(NSD2012), , Opatija, Croatia, July 9-13,
2012.

延与佳子,

9Li における 6He-t クラスター状態
日本物理学会年次大会, 2012/3/24, 関西学
院大学, 西宮, 日本

Yoshiko Kanada-En'yo, Cluster and
density wave,
"YIPQS Long-term workshop Dynamics
and Correlations in Exotic Nuclei
(DCEN2011)", 2011/9/23, Kyoto, Japan

Yoshiko Kanada-En'yo,
Vanishing of magic number and cluster
structures in Be isotopes
"The International Symposium on Physics
of Unstable Nuclei 2011 (ISPUN11)"
2011/11/23, Hanoi, Vietnam

Yoshiko Kanada-En'yo, Present status
of AMD studies,
Gordon Research Conference "Nuclear
Chemistry, Intersections Between
Structure and Reactions: Pushing the
Frontiers of Nuclear Science"
2011/6/13, New London, United states

Y. Kanada-En'yo,
Cluster states in 11B, 11C and 8He and
their similarity to 12C
Many-body correlations from dilute to
dense nuclear systems, 2011年2月15日, パ
リ、フランス

Yoshiko Kanada-En'yo, Cluster Aspects
of Stable and Unstable Nuclei
International Symposium New Faces of
Atomic Nuclei, 2010年11月15日, OIST、沖
縄

Yoshiko Kanada-En'yo,
Deformation and cluster in nuclei near
28Si,
International workshop "Clustering and
Nucleon Correlations", 2010年10月1日, 北
海道大学、札幌

Yoshiko Kanada-En'yo, Cluster
features in ground and excited states of
12C and 8He
Second EMMI-EFES Workshop on
Neutron-Rich Exotic Nuclei (EENEN
10), 2010年6月7日, 理研、和光

{図書}(計 0 件)

{産業財産権}
出願状況(計 0 件)
取得状況(計 0 件)

{その他}

(1)レクチャー、市民講演等
サマースクール「クオークから超新星爆発
まで」にて講義"反対称化分子動力学法によ
る原子核クラスター現象の解明",
7月29日, 2012, 京都大学基研, 京都

高校生向け授業: 最先端の物理を高校生に
Saturday Afternoon Physics 2012
"原子核・素粒子の世界への旅立ち - ミクロ
な世界の不思議 - " 2012年11月17日, 大
阪大学, 大阪

ELCAS 最先端科学の体験型学習講座体験
学習コース物理: 物理実習(理論ゼミ)
2014年1月11日, 京都大学, 京都

6. 研究組織

(1)研究代表者
延与佳子 (Enyo, Yoshiko)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 40300678