

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400270

研究課題名(和文) 微視的效果を取り入れた原子核散乱の記述と原子核反応への応用

研究課題名(英文) Microscopic description of nuclear scattering and application to nuclear reactions

研究代表者

延與 佳子 (Enyo, Yoshiko)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40300678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：不安定核における低エネルギーの isoscalar monopole, isovector/isoscalar dipole を新しい理論手法を用いて解析した。valence neutron oscillation mode, トロイダル、クラスターモードの3つのタイプの低エネルギーモードを示した。
odd-odd核でのpn相関を調べて、Gamow-Teller(GT)遷移におけるpn相関の果たす役割を明らかにした。
 ^{160}O の4四面体構造、 $^{12}\text{C}^+$ クラスター構造を調べ、実験の反応断面積から核表面でのクラスター確率を評価する方法としてこれらの反応が有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)： isoscalar monopole, isovector/isoscalar dipole excitations in light stable and unstable nuclei have been studied with a newly constructed method based on the antisymmetrized molecular dynamics. It was found that three types of modes, valence neutron oscillation, troidal mode, and cluster mode, contributes to the low-energy dipole strengths.
The pn correlations in $Z=N$ odd nuclei have been also studied. The roles of the pn correlation in the Gamow-Teller transitions were discussed.
In the structure study of ^{160}O , various types of cluster structures of the tetrahedral 4-alpha, $^{12}\text{C}^+$ alpha, and 4-alpha gas states, were studied. The alpha cluster probability at the surface was evaluated and discussed in relation with the experimental observations of those cluster states.

研究分野：原子核理論

キーワード：クラスター 不安定原子核 分子動力学

1. 研究開始当初の背景

原子核では、シェル構造や魔法数に代表される“独立粒子描像”(平均場的性質)が成り立つ一方で、核子間の引力で引き起こされる“核子相関”もかなり強い。空間的な核子相関の典型例がクラスター現象(複数の核子が集まってサブグループを作る現象)である。近年の実験技術の進歩により、原子核基底・励起状態の諸性質が明らかになり、新奇な現象が数多く見つかっている。特に、不安定原子核におけるクラスター構造・クラスター励起の出現は原子核の新しい現象として注目されている。

平均場的性質とクラスターの性質の共存が多様な原子核現象の要因の一つであり、励起エネルギーの軸で考えれば「平均場状態(クラスター形成・壊れ) クラスター励起 クラスター共鳴・散乱状態」のように連続的に変遷する。低エネルギー状態から共鳴・散乱状態までの現象を解明するには、平均場的性質とクラスターの性質の共存を記述することが必要不可欠である。実験技術の進歩により安定・不安定原子核の励起状態、散乱・反応の実験データが増大する中で、クラスター形成や壊れを取り入れた微視的理論模型による研究が切望されていた。

2. 研究の目的

本研究では、微視的理論模型の一つである反対称化分子動力学法、および、拡張した微視的クラスター模型を用いて、原子核励起状態に現れるクラスター状態を研究し、核子相関によって引き起こされる核表面でのクラスター形成のメカニズムを解明するとともに、クラスター崩壊の閾値エネルギー近傍でのクラスター発達を研究し、崩壊幅、原子核散乱、原子核反応への寄与を調べることで、未知のクラスター状態の理論的予言を行い、実験的探索に貢献することである。

3. 研究の方法

反対称化分子動力学法は、平均場状態とクラスター構造を同時に記述できる手法である。全ての核子を独立に扱うことでクラスターを仮定しない理論計算が可能である一方で、核子のグループ化によりクラスター形成や壊れを記述することができる。反対称化分子動力学法に適切な拘束条件を課すなどによって、この手法の拡張を行い、高い励起状態を記述できる枠組みを構築する。構築した理論的枠組みを用いて、p 殻、sd 殻領域の安定原子核・不安定原子核の励起状態を調べ、励起状態のクラスター形成・クラスター壊れ、励起モードにおけるクラスター構造の寄与を研究する。反対称化分子動力学で得られた知見に基き、微視的クラスター模型に対してクラスターの壊れを取り入れた拡張を行い、クラスター間の相対運動を精密に記述する。一連の研究により、安定・不安定原子核に現れる道の励起モードの理論的予言を行い、ク

ラスター構造の寄与を調べる。これらの状態について、クラスター崩壊幅の計算、核表面でのクラスター存在確率を求め、クラスター形成と壊れの度合いを定量的に議論する。それらの理論値を用いて、原子核散乱、原子核反応への寄与を調べ、クラスター状態探索の実験の可能性を検討する。

4. 研究成果

(1)

不安定核における低エネルギーの isoscalar monopole, isovector/isoscalar dipole を新しい理論手法を用いて解析した。軽い核では、新しい励起モードとしてクラスターモードが現れ、isoscalar/isovector 遷移が強いという特徴をもつことを示した。dipole モードでは valence neutron oscillation mode, トロイダル、クラスターモードの3つのタイプの低エネルギーモードが存在し、トロイダルモードは変形クラスター(部分系)の回転運動による励起として理解できることを示した。具体的な系としては、 ^{10}Be , ^{12}C , ^{16}O において、low-energy 強度に有意なトロイダルモードを予言した。

(2)

odd-odd 核での pn 相関を反対称化分子動力学法によって調べ、Gamow-Teller(GT)遷移における pn 相関の果たす役割を明らかにした。p-shell の $Z=N=\text{odd}$ に加え、sd-shell 領域に研究を進め、 ^{22}Na の GT を調べた結果、軽い核では GT 遷移が低エネルギーの1つの状態に集中するのに対して、質量数の増加とともに GT 強度分布は fragment しエネルギーが高くなっていく現象(GT-fragmentation)が見られ、観測事実と一致した結果を得た。GT-fragmentation の現象を変形原子核の表面における pn 相関の SU(4) 対称性の破れの観点で説明できるという非常に独創的な知見を得た。

(3)

^{16}O のクラスター構造を調べ、4 四面体構造、 $^{12}\text{C}+$ クラスター構造、および 4 気体状態が励起状態に共存して現れることを理論的に示した。崩壊幅を計算し、実験で観測されている励起状態の対応付けを明らかにした。核表面での存在確率を調べ、移行反応で検証できるかについて移行反応を RCNP グループとの共同研究により行い、実験の反応断面積から核表面でのクラスター確率を評価する方法としてこれらの反応が有効であることを示した。

(1) Gamow-Teller transitions from the ^{14}N ground state to the ^{14}C ground and excited states,
Y. Kanada-En'yo and T. Suhara,
Phys. Rev. C89, no. 4, 044313 (2014)
DOI: 10.1103/PhysRevC.89.044313

(2) Approximation of reduced width

amplitude and application to cluster decay width,

Y. Kanada-En'yo, T. Suhara and Y. Taniguchi,
Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 073D02 (2014)
DOI: 10.1093/ptep/ptu095

(3) Mixing of parity of a nucleon pair at the nuclear surface due to the spin-orbit potential in ^{18}F ,
Y. Kanada-En'yo and F. Kobayashi,
Phys. Rev. C90, no. 5, 054332 (2014)
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.054332

(4) Description of α -cluster tail in ^8Be and ^{20}Ne : Delocalization of α cluster by quantum penetration,
Y. Kanada-En'yo,
PTEP 2014, no. 10, 103D03 (2014)
DOI: 10.1093/ptep/ptu121

(5) Proton radii of Be, B, and C isotopes,
Y. Kanada-En'yo,
Phys. Rev. C 91, 014315 (2015)
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.014315

(6) $2\alpha+t$ cluster feature of third $3/2^-$ state in ^{11}B ,
Y. Kanada-En'yo and T. Suhara,
Phys. Rev. C 91, 014316 (2015)
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.014316

(7) Effects of α -cluster breaking on 3 α cluster structures in ^{12}C ,
T. Suhara and Y. Kanada-En'yo,
Phys. Rev. C 91, 024315 (2015)
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.024315

(8) Analysis of delocalization of clusters in linear-chain α -cluster states with entanglement entropy,
Y. Kanada-En'yo,
Phys. Rev. C91, no. 3, 034303 (2015)
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.034303

(9) $^{10}\text{B}+\alpha$ states with chain-like structures in ^{14}N ,
Y. Kanada-En'yo,
Phys. Rev. C 92, no. 6, 064326 (2015)
DOI: 10.1103/PhysRevC.92.064326

(10)
Proton and neutron correlations in ^{10}B
Y. Kanada-En'yo, H. Morita and F. Kobayashi
Phys. Rev. C 91, 054323 (2015)
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.054323

(11)

Quantum decoherence in the entanglement entropy of a composite particle and its relationship to coarse graining in the Husimi function
Y. Kanada-En'yo, H. Morita and F. Kobayashi
PTEP 2015, no. 5, 051D01 (2015)
DOI: 10.1093/ptep/ptv060

(12) Entanglement entropy and Schmidt number as measures of delocalization of α clusters in one-dimensional nuclear systems
Y. Kanada-En'yo
PTEP 2015, no. 4, 043D04 (2015)
DOI: 10.1093/ptep/ptv050

(13)
Analysis of the effect of core structure upon dineutron correlation using antisymmetrized molecular dynamics
F. Kobayashi and Y. Kanada-En'yo
Phys. Rev. C 93, 024310 (2016)
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.024310

(14)
Isovector and isoscalar dipole excitations in ^9Be and ^{10}Be studied with antisymmetrized molecular dynamics
Y. Kanada-En'yo
Phys. Rev. C 93, 024322 (2016)
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.024322

(15)
Probing surface distribution of α -cluster in ^{20}Ne via α -transfer reaction
T. Fukui, Y. Taniguchi, T. Suhara, Y. Kanada-En'yo and K. Ogata
Phys. Rev. C 93, 034606 (2016)
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.034606

(16) Antisymmetrized molecular dynamics studies for exotic clustering phenomena in neutron-rich nuclei,
M. Kimura, T. Suhara, Y. Kanada-En'yo
Eur. Phys. J. A52 no.12, 373 (38 pages) (2016)
DOI: 10.1140/epja/i2016-16373-9

(17) Structure and monopole transition in ^{12}C and ^{14}C
Yuta Yoshida, Yoshiko Kanada-En'yo
Prog Theor Exp Phys 2016, 123D04 (2016)
DOI: 10.1093/ptep/ptw178

(18) Colored-hadron distribution in hadron scattering in $\text{SU}(2)$ lattice QCD
Toru T. Takahashi, Yoshiko Kanada-En'yo
Phys.Rev. D94 (2016) no.9, 094011 (10

pages) DOI: 10.1103/PhysRevD.94.094011

(19) Isospin Projected Antisymmetrized Molecular Dynamics and its Application to ^{10}B

Hiroyuki Morita, Yoshiko Kanada-En'yo
PTEP 2016 (2016) no.10, 103D02 (14 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptw144

(20) Monopole transitions to cluster states in ^{10}Be and ^9Li

Yoshiko Kanada-En'yo
Phys.Rev. C94 (2016) no.2, 024326 (14 pages)
DOI: 10.1103/PhysRevC.94.024326

(21) Isoscalar monopole and dipole excitations of cluster states and giant resonances in ^{12}C

Yoshiko Kanada-En'yo
Phys.Rev. C93 (2016) no.5, 054307 (11 pages)
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.054307

(22) α -cluster excited states in ^{32}S
Y. Yoshida, Y. Kanada-En'yo, and F. Kobayashi

PTEP 2016 (2016) no.4, 043D01 (22 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptw016

(23) Gamow-Teller transitions and proton-neutron pair correlation in $N=Z$ odd p -shell nuclei

Morita and Y. Kanada-En'yo
Phys. Rev. C 96, no. 4, 044318 (10 pages) (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevC.96.044318

(24) Toroidal, compressive, and $E1$ properties of low-energy dipole modes in ^{10}Be

Y. Kanada-En'yo and Y. Shikata
Phys. Rev. C95, no. 6, 064319 (14 pages) (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevC.95.064319

(25) Effect of $^{12}\text{C}+$ α clustering on the $E0$ transition in ^{16}O

H. Matsuno, N. Itagaki, T. Ichikawa, Y. Yoshida and Y. Kanada-En'yo
PTEP 2017, no. 6, 063D01 (2017)
DOI: 10.1093/ptep/ptx065

(26) Tetrahedral 4α and $^{12}\text{C}+$ α cluster structures in ^{16}O

Y. Kanada-En'yo
Phys. Rev. C96, no. 3, 034306 (12 pages) (2017)

DOI: 10.1103/PhysRevC.96.034306

(27) Cluster and toroidal aspects of isoscalar dipole excitations in ^{12}C

Y. Kanada-En'yo, Y. Shikata and H. Morita
Phys. Rev. C 97, 014303 (9page) (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevC.97.014303

(28) Excitation energy shift and size difference of low-energy levels in p -shell Λ hypernuclei

Y. Kanada-En'yo
Phys. Rev. C97, no. 2, 024330 (2018) (16 page)
DOI: 10.1103/PhysRevC.97.024330

(29) Structures of p -shell double- Λ hypernuclei studied with microscopic cluster models

Y. Kanada-En'yo
Phys. Rev. C 97, no. 3, 034324 (14page) (2018)
DOI: 10.1103/PhysRevC.97.034324

[学会発表](計22件)

(1) Y. Kanada-En'yo
Cluster Phenomena in Stable and Unstable Nuclei
The 2nd Conference on "Advances in Radioactive Isotope Science" (ARIS2014) Tokyo, Japan, June 1-6, 2014

(2) Y. Kanada-En'yo
Cluster features of stable and unstable nuclei in p -shell region
International Workshop on Multi facets of Eos and Clustering IWM-EC 2014, Catania, Italy, on May 6th - 9th 2014

(3) Y. Kanada-En'yo
Cluster structures in stable and unstable nuclei
The 4th International Workshop on Nuclear Dynamics in heavy ion reactions (IWND2014), Lanzhou, China, August 15 - 19, 2014

(4) Y. Kanada-En'yo
Cluster states and their rotation in light nuclei
One-day intensive workshop on "di-neutron and α -cluster correlations in exotic nuclei", RIKEN, Wako, Japan, July 10, 2014

(5) 延与佳子
Be, B, C アイソトープにおける陽子分布半

径の中性子数依存性

日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 東京, 2015年3月21-24日

(6)Y. Kanada-En'yo

Analysis of delocalization of clusters with entanglement entropy
Workshop on "Clusters in Nuclear Systems", Rostock, Germany, August 3-6, 2015

(7)Y. Kanada-En'yo

pn correlation in 10B
2nd international workshop on neutron-proton correlations, Hong-Kong, China, July 6-9, 2015

(8)Y. Kanada-En'yo

pn correlation in 18F and 10B
Workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model, Niigata, Japan, 24-25 August, 2015

(9)

Y. Kanada-En'yo

Effects of clustering in dipole and monopole transitions
Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on "Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics", Sep. 21-Oct.30, 2015

(10)延与佳子

160核表面におけるNN対の
T=0, T=1対の競合と対内部のparity混合
日本物理学会2015年秋季大会, 大阪市立大学, 大阪, 9/25-28, 2015

(11)延与佳子

shifted AMD法によるISO, E1, ISD遷移強度の計算
日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学, 仙台, 3月19-22日, 2016

(12)Y. Kanada-En'yo

Closing remarks from a theoretical perspective
11th International Conference on Clustering aspects of nuclear structure and dynamics (Cluster'16), Napoli, Italy, 23-27 May, 2016

(13)Y. Kanada-En'yo

Monopole and dipole transitions in 12C and 9,10Be
First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics, Dec 12-15, 2016, Wako/Tsukuba, Japan

(14)延与佳子

160の四面体構造とE3励起
日本物理学会第72回年次大会, 大阪大学, 大阪, 2017年3月17日(金) - 20日(月)

(15)Y. Kanada-En'yo

Monopole and dipole transitions in light nuclei
Advances in Radioactive Science (ARIS2017), 2017.5.28-6.2, Keystone, US

(16)Y. Kanada-En'yo

Clustering in light neutron-rich nuclei
International School of Physics "Enrico Fermi" of Varenna, the Course "Nuclear Physics with Stable and Radioactive Ion Beams", 2017.7.14-19, Varenna, Italy

(17)Y. Kanada-En'yo

Clustering in light neutron-rich nuclei
YITP international school
Recent Progress of Nuclear Structure and Reaction Physics', 2017.12.18-22, YITP, Kyoto, Japan

(18)Y. Kanada-En'yo

Isoscalar monopole and dipole excitations in light nuclei
Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2017)
October 25th-27th, 2017
Hokkaido University, Sapporo, Japan

(19)Y. Kanada-En'yo

Isoscalar monopole and dipole excitations in light nuclei
Ito International Research Center (IIRC) symposium
"Perspectives of the physics of nuclear structure", 2017.11.1-4, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

(20)Y. Kanada-En'yo

Toroidal and compressive properties of isoscalar dipole excitations
日本物理学会2017年秋季大会, 2017.9/12-15, 宇都宮

(21)Y. Kanada-En'yo

Clustering aspects in nuclear systems
日本物理学会2017年秋季大会, 2017.9/12-15, 宇都宮
(シンポジウム講演)

(22)Y. Kanada-En'yo

p-shell ハイパー核の励起状態における励起エネルギー変化と核サイズの違い
日本物理学会2018年春季大会,

2018.3/22-25,東京理科大野田

〔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〕

ホームページ等

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

延與 佳子(YOSHIKO ENYO)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号:40300678