

平成 31 年 4 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05339

研究課題名(和文) 単極、双極遷移をプローブとするクラスター共鳴の探査と炭素燃焼過程への応用

研究課題名(英文) Study of cluster resonances probed by monopole and dipole transitions, and its application to Carbon burning process

研究代表者

木村 真明 (Kimura, Masaaki)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：50402813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の大きな成果は2つある(1)反対称化分子動力学模型を用いてクラスター共鳴を記述する方法を発展させ、さらに崩壊幅を求める新しい方法を開発した。これにより、微視的核構造模型に基づいてクラスター共鳴を定量的に記述することを可能にした。(2)上記の理論模型を用いることで、C+C共鳴、C+O共鳴の性質を示し、既存の実験データとの比較を行うことで、その信頼性を示した。また、炭素同位体の直鎖クラスター構造の性質を示し、実験データと比較することで、直鎖クラスターの実在を証明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が研究対象とするC+C共鳴やC+O共鳴は、赤色巨星や超新星爆発での元素合成に深く関与しており、その性質解明は、我々の身の回りにおける元素の起源を探ることにつながる。従来は、こうした共鳴の性質を調べることは、極めて困難であったが、本研究はその定量的記述を始めて可能にしたものとして学術的意義がある。また、同じ理論手法を用いることで、50年以上も未解決であった直鎖クラスター状態の問題に対して、肯定的解答を示したことも重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：There are two major achievements. We have developed and improved antisymmetrized molecular dynamics to describe cluster resonances. We also developed a new theoretical method to evaluate the cluster decay widths. These developments enabled the quantitative study of cluster resonances based on full microscopic nuclear model. Using above mentioned theoretical models, we have shown the properties of C+C and C+O resonances and compared with the existing experimental data. We also showed the linear-chain states in Carbon isotopes and compared with the experiments to establish the linear-chain formation in Carbon isotopes.

研究分野：原子核理論

キーワード：クラスター 元素合成 不安定核

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

恒星の終末期や連星中性子星の X 線バースト等では、炭素の核融合反応(炭素燃焼過程)が起こり、これら天体現象や宇宙の化学組成に大きく影響する。この反応は、反応エネルギー近傍に $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ や $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ クラスタ共鳴(炭素・酸素原子核が弱く結合した準安定状態)が存在すると、反応率が桁も増大する。また反応生成物は、共鳴の崩壊モードによって決まる。そのため、クラスタ共鳴のエネルギー、共鳴幅、崩壊モードの特定と信頼出来る反応率評価が、長年の課題となっている。ところが、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ のように重イオンから成るクラスタ共鳴が、どのエネルギー領域に存在するのか、長い間議論が続いているが、未だ決着がつかない。従って、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ クラスタ共鳴の問題は、原子核物理、天体物理の双方に大きなインパクトを持つ、重要かつ魅力的な問題である。

2. 研究の目的

本研究では、 ^{24}Mg 、 ^{28}Si 原子核の励起状態に存在する $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ クラスタ共鳴を研究し、得られた知見をクラスタ反応模型に応用することで、以下の2点を達成する。

- (1) 炭素燃焼過程に大きな影響を及ぼす $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ クラスタ共鳴の性質解明
- (2) $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 反応の微視的理論による記述と、理論的不定性のない反応率評価の実現
長年未解決のままになっている、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ クラスタ共鳴を特定し、その性質を明らかにするために、アイソスカラー型単極遷移強度、双極遷移強度をプローブとして導入する。また、新たなクラスタ反応模型を構築し、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ クラスタ共鳴について得た知見を応用することで、炭素燃焼過程に対して、信頼出来る反応率の評価を達成する。

3. 研究の方法

単極・双極遷移強度をプローブとすることで、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ クラスタ共鳴を特定し、そのエネルギー、共鳴幅と崩壊モードを解明する。さらに、クラスタ反応を記述する微視的模型を構築する。クラスタ共鳴の研究で得た波動関数を直接用いる事で、不定性のない炭素燃焼過程の反応率評価を実現する。

反対称化分子動力学 + 基底関数展開法による核構造計算を行い、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ クラスタ共鳴のエネルギーを求める。また換算幅振幅を導出することで、共鳴幅と崩壊モードを求める。さらに、反対称化分子動力学と R-matrix 法を組み合わせ、クラスタ反応模型を新たに構築する。

4. 研究成果

本研究の大きな成果は2つある

(1) 反対称化分子動力学模型を用いてクラスタ共鳴を記述する方法を発展させ、さらに崩壊幅を求める新しい方法を開発した。これにより、微視的核構造模型に基づいてクラスタ共鳴を定量的に記述することを可能にした。

(2) 上記の理論模型を用いることで、C+C 共鳴、C+O 共鳴の性質を示し、既存の実験データとの比較を行うことで、その信頼性を示した。また、炭素同位体の直鎖クラスタ構造の性質を示し、実験データと比較することで、直鎖クラスタの実在を証明した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

1. 【査読有】T. Baba and M. Kimura
“Coulomb shift in the mirror pair of C14 and O14 as a signature of the linear-chain structure”
Phys. Rev. C99, 021303 1-7(2019). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.99.021303>
2. 【査読有】H. Nishibata, S. Kanaya, T. Shimoda, A. Odahara S. Morimoto, A. Yagi, H. Kanaoka, M. R. Pearson, C. D. P. Levy, M. Kimura, N. Tsunoda and T. Otsuka.
“Structure of Mg31: Shape coexistence revealed by α -spectroscopy with spin-polarized Na31”
Phys. Rev. C99, 024322 1-15 (2019). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.99.024322>
3. 【査読有】T. Baba and M. Kimura
“Characteristic α and He6 decays of linear-chain structures in C16”
Phys. Rev. C97, 054315 1-12 (2018). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.97.054315>
4. 【査読有】B. Zhou and M. Kimura
“ 2^+ cluster structure in B11”
Phys. Rev. C98, 054323 1-11 (2018). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.98.054323>
5. 【査読有】Y. Chiba, Y. Taniguchi and M. Kimura
“Inversion doublets of reflection-asymmetric clustering in Si28 and their isoscalar monopole and dipole transitions”,
Phys. Rev. C95, 044328 1-12 (2017). <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.95.044328>
6. 【査読有】Y. Chiba and M. Kimura,
“Laplace expansion method for the calculation of the reduced-width amplitudes”,
Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 053D01 1-20 (2017).
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptx063>
7. 【査読有】T. Baba and M. Kimura,
“Three-body decay of linear-chain states in ^{14}C ”,
Phys Rev. C96, 064318 1-9 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.96.064318>
8. 【査読有】H. Nishibata, T. Shimoda, A. Odahara, S. Morimoto, S. Kanaya, A. Yagi, H. Kanaoka, M. R. Pearson, C. D. P. Levy, and M. Kimura
“Shape coexistence in the $N = 19$ neutron-rich nucleus ^{31}Mg explored by α -spectroscopy of spin-polarized ^{31}Na ”
Physics Letters B767, 81-85 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.01.049>
9. 【査読有】S. Momiyama, P. Doornenbal, H. Scheit, S. Takeuchi, M. Niikura, N. Aoi, K. Li, M. Matsushita, D. Steppenbeck, H. Wang H, H. Baba, E. Ideguchi, M. Kimura, N. Kobayashi, Y. Kondo, J. Lee, S. Michimasa, T. Motobayashi, N. Shimizu, M. Takechi, Y. Togano, Y. Utsuno, K. Yoneda, H. Sakurai,
“In-beam α -ray spectroscopy of Mg35 via knockout reactions at intermediate energies”
Phys. Rev. C96, 034328 1-8 (2017). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.96.034328>
10. 【査読有】M. Kimura, T. Suhara and Y. Kanada-En'yo,
“Antisymmetrized molecular dynamics studies for exotic clustering phenomena in

neutron-rich nuclei ”

Eur. Phys. J A52, 373-410 (2016). <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16373-9>

11. 【査読有】R. Kanungo, W. Horiuchi, G. Hagen, G. R. Jansen, P. Navrátil, F. Ameil, J. Atkinson, Y. Ayyad, D. Cortina-Gil, I. Dillmann, A. Estradél, A. Evdokimov, F. Farinon, H. Geissel, G. Guastalla, R. Janik, M. Kimura, R. Knöbel, J. Kurcewicz, Yu. A. Litvinov, M. Marta, M. Mostazo, I. Mukha, C. Nociforo, H. J. Ong, S. Pietri, A. Prochazka, C. Scheidenberger, B. Sitar, P. Strmen, Y. Suzuki, M. Takechi, J. Tanaka, I. Tanihata, S. Terashima, J. Vargas, H. Weick, and J. S. Winfield, “ Proton Distribution Radii of 12-19C Illuminate Features of Neutron Halos ” , PRL 117, 102501 1-6(2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.102501>
12. 【査読有】Y. Chiba, M. Kimura and Y. Taniguchi, “ Isoscalar dipole transition as a probe for asymmetric clustering ” , Phys. Rev. C93, 034319 1-12 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.93.034319>
13. 【査読有】T. Baba and M. Kimura, “ Structure and decay pattern of the linear-chain state in ^{14}C ” , Phys. Rev. C94, 044303, 1-11 (2016). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.94.044303>
14. 【査読有】M. Kimura, “ Structure and decay of the pygmy dipole resonance in ^{26}Ne ” , Phys. Rev. C95, 034331 1-15 (2016). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.95.034331>

〔学会発表〕(計 11 件)

1. M. Kimura, “ Nuclear Molecules in neutron-rich nuclei ”
Fourth International Workshop on “ State of the Art in Nuclear Cluster Physics ” (Invited talk, Texas, 2018).
2. M. Kimura, “ Structure and decay of pattern of Pygmy dipole resonance ”
Nuclear Structure and Related Topics (Invited talk, Burgus, 2018)
3. M. Kimura, “ Probes for clustering in neutron-rich nuclei ”
ECT* workshop: Probing exotic structure of short-lived nuclei by electron scattering (Invited talk, Trento, 2018)
4. M. Kimura, “ Structure and Responses studied by time evolution method ”
6th International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (Invited talk, Capetown, 2018)
5. M. Kimura “ Shape of Carbon-12 ”
Workshop on Nuclear Cluster Physics (Invited talk, Chengdu, 2018).
6. M. Kimura, “ Nuclear Clustering Probed by the Isoscalar Responses ”
International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2017 (Invited talk, Vietnam

2017)

7. M. Kimura,
“ Nuclear Clustering Probed by Nuclear Responses ”
Ito International Research Center (IIRC) Symposium “ Perspectives of the Physics
of Nuclear Structure (Invited talk, Tokyo, 2017)
8. M. Kimura,
“ Nuclear clustering probed by monopole and dipole responses ”
Clustering effects of nucleons in nuclei and quarks in multi-quark states (Invited
talk, Beijing, 2016)
9. M. Kimura,
“ Probing asymmetric clusters by isoscalar monopole/dipole transitions ”
The 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and
Dynamics (Invited talk, Naples, 2016)
10. M. Kimura,
“ Nuclear responses and Clustering phenomena ”
Workshop on Nuclear Cluster Physics (Invited talk, Yokohama, 2016)
11. M. Kimura,
“ Clustering and Nuclear responses ”
First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure
and dynamics (Invited talk, Tsukuba, 2016)

〔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〕

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：千葉 陽平

ローマ字氏名：Chiba Yohei

研究協力者氏名：谷口 億宇

ローマ字氏名：Taniguchi Yasutaka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。