

令和 3 年 6 月 29 日現在

機関番号：24402

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05863・19K21046

研究課題名（和文） $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 共鳴の構造及びその炭素燃焼過程への寄与の解明研究課題名（英文）Study on structure and impact in carbon-burning process of $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ resonance

研究代表者

千葉 陽平 (Chiba, Yohei)

大阪市立大学・大学院理学研究科・特任助教

研究者番号：20829832

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の主要な成果は以下の3点である。(1)従来的手法を拡張することで反対称化分子動力学を用いて任意の遷移強度分布を記述可能なクラスター相関を取り入れた手法を開発した。これにより遷移強度分布を用いた系統的なクラスター構造研究を可能にした。(2) ^{24}Mg における 0^+ 状態、 1^- 状態、 2^+ 状態に現れるクラスター共鳴の構造を明らかにした。(3) 構造を仮定しない微視的理論モデルによる ^{24}Mg の崩壊幅・ ^{12}C 崩壊幅の定量的評価を初めて行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が対象とする $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴は炭素燃焼過程に深く関与しており、赤色巨星や超新星爆発のシナリオに大きく影響する。また、その性質解明は元素の起源を理解するうえで不可欠である。しかし、性質の実験的解明は困難であり、不定性が非常に大きかった。そのため、本研究によって、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴のエネルギーや崩壊幅といった性質が信頼のおける理論によって初めて定量的に予言されたことは学術的に非常に意義深い。

研究成果の概要（英文）：There are three major achievements. We have developed antisymmetrized molecular dynamics to describe any multipole transition strength distribution with cluster correlation. This enabled systematic analysis on nuclear clustering based on transition strength distribution. We have revealed that cluster structure of the excited 0^+ , 1^- and 2^+ states of ^{24}Mg with the developed method and compared them to experimental data. We have also evaluated alpha and carbon reduced decay widths based on full microscopic model in first time.

研究分野：原子核理論

キーワード：元素合成 クラスター クラスター共鳴

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

^{24}Mg のクラスター共鳴、とりわけ、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴 (炭素原子核が弱束縛した準安定状態) は恒星内で起きる炭素燃焼過程 ($^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応) への寄与が大きいため、その重要性はよく知られていた。具体的には $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴が炭素燃焼過程におけるガモフウィンドウ内に存在すると $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応率が増大し、その共鳴の崩壊モードにより反応生成物が決定する。しかしながら、炭素燃焼過程に影響する、低エネルギー領域における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合断面積を実験的に直接観測することは非常に困難であり、従来の研究では高エネルギー領域から低エネルギー領域へと外挿した値を用いたために不定性が大きかった。低エネルギー領域における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合断面積を観測するために代替反応を用いた実験研究なども進展したが、代替反応に起因する不定性や信頼性の問題があった。そのため、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴のエネルギーや崩壊モード決定することが長年の重要課題であった。一方で、 ^{24}Mg を始めとする安定核では非弾性散乱を用いたクラスター共鳴を探索する手法が確立し、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴を実験的に生成可能になりつつあった。しかし、非弾性散乱の観測データをから得られるのは共鳴エネルギーや遷移強度であり、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応断面積を求めることは困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、 ^{24}Mg に励起状態に現れる $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴を同定し、それらが恒星内で起きる炭素燃焼過程に対する寄与を理論的に明らかにすることである。特に、炭素燃焼過程に寄与しうる、 ^{24}Mg が $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ に崩壊する閾値エネルギー近傍に存在する低スピン状態のエネルギーや崩壊幅を理論的に予言することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では ^{24}Mg の 0^+ 状態、 1^- 状態、 2^+ 状態を反対称化分子動力学によって記述し、非弾性散乱で観測されたアイソスカラー型遷移強度分布を理論的に再現することで、その信頼性を確認した。そのうえで、得られた励起状態の波動関数を解析することで観測された励起状態を持つクラスター構造を同定した。これにより、クラスター共鳴のエネルギーを決定した。また、従来の手法では記述が困難なアイソスカラー型四重極遷移強度分布を記述する手法の開発も行った。得られたアイソスカラー型遷移強度分布を解析し、励起状態の換算幅振幅を計算することで崩壊幅や ^{12}C 崩壊幅などを理論的に予言した。

4. 研究成果

本研究では ^{24}Mg の 0^+ 状態、 1^- 状態、 2^+ 状態の構造を理論的に解明した。 0^+ 状態の構造解析とアイソスカラー型単極遷移強度分布に関しては実施者の先行研究で解析済み[1]であり、その結果と本研究で得られた成果を比較・検討することで下記の知見が得られた。

(1) ^{24}Mg の 1^- 状態のクラスター構造と渦励起モードの競合と結合の解明

0^+ 状態に非対称なクラスター構造を持つ共鳴が存在すると必ず同じクラスター構造を持つ 1^- 状態 (反転二重項) が 0^+ 状態近傍に存在する。そのため、 1^- 状態を調べることで 0^+ 状態の構造をより詳細に議論可能になる。また、 ^{24}Mg は最も軽い孤立した渦励起状態が存在する原子核の候補であり、 1^- 状態の構造とクラスター構造の関係が理論的に示唆されていた[2]。本研究では反対称化分子動力学の理論計算を行い、 1^- 状態解析することで以下を明らかにした。理論的に得られた 1_1^- 状態は渦励起状態であり、 1_2^- 状態はコンパクトな非対称 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター構造を持つ (図 1)。 1_1^- 状態は渦励起状態であるが、 $^{16}\text{O}+2$ クラスター状態と結合した状態とみなすことができる。

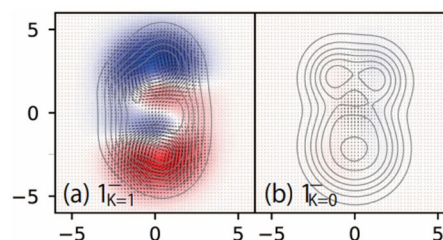


図 1: 反対称化分子動力学で求めた ^{24}Mg の 1_1^- 状態 (左図) と 1_2^- 状態 (右図) の確率密度分布 (等高線) と確率密度流 (矢印)

(2) 任意の遷移強度分布の記述可能な手法の開発

反対称化分子動力学による遷移強度分布の記述法は原子核中の一粒子励起や集団励起、クラスター励起を統一的に記述可能なモデルであるものの、双極遷移強度分布以外の記述が理論的に困難であるという問題があった。そこで、任意の遷移強度分布を記述可能な手法を開発した。具体的には従来の手法が差分法を用いているのに対し、コーシー・リーマンの積分公式を使うことで任意の遷移に対して精度よくかつ効率的に計算可能な手法へと拡張した。これにより、クラスター相関を取り入れた、任意の遷移強度分布の記述法が確立し、原子核の遷移強度分布とクラスター構造の微視的研究の系統的研究を可能にした。

(3) ^{24}Mg の 2^+ 状態のクラスター構造と生成機構の解明

^{24}Mg の 2^+ 状態に現れるクラスター共鳴とアイソスカラー型双極遷移による生成機構を明らかにした。非弾性散乱で観測された 0^+ 状態がクラスター共鳴であると、そのエネルギー近傍にスピンパリティが 2^+ の回転励起状態が存在するはずであり、その候補がアイソスカラー型四重極遷移強度分布に観測されている。しかしながら、理論的にはアイソスカラー型四重極遷移によって基底状態からクラスター共鳴を生成する機構は知られていなかった。そこで(2)で開発した手法を用いて、 ^{24}Mg の 2^+ 状態のクラスター構造を理論的に解析し、その生成メカニズムの解明を行った。その結果、観測された 2^+ 状態は観測された 0^+ の $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴の回転励起状態であることがわかった。また、基底状態における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター相関が強いために、基底状態から 2^+ の $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴への遷移が起きていることを明らかにした。

(4) ^{24}Mg の $0^+, 1^-, 2^+$ 状態の崩壊幅の予言

得られた 0^+ 状態、 1^- 状態、 2^+ 状態の波動関数から換算幅の評価を行った (図 2)。それにより ^{12}C 崩壊・崩壊が大きい状態が $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 崩壊エネルギー閾値近傍に存在することを、構造を仮定しない微視的理論に基づき定量的に初めて明らかにした。

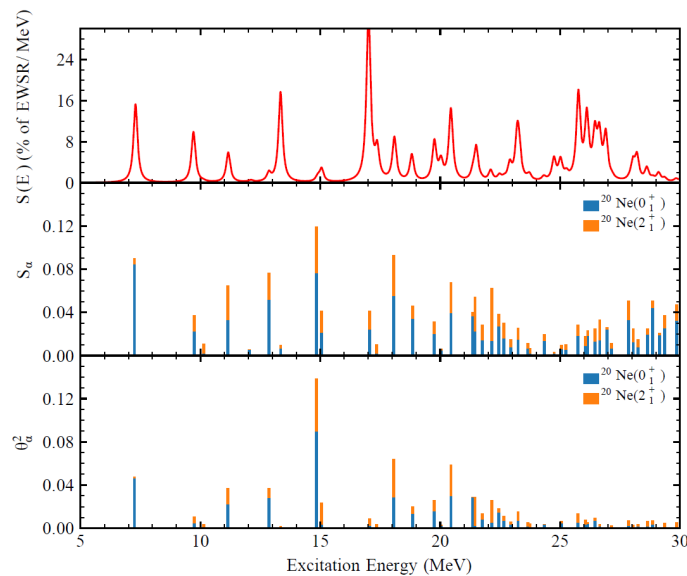


図 2: 反対称化分子動力学で求めた ^{24}Mg の 0^+ 状態のアイソスカラー型単極遷移強度分布 (上) と 換算幅 (中)・ ^{12}C 崩壊幅 (下)

参考文献

[1] Y. Chiba and M. Kimura, Phys. Rev. C **91**, 061302(R) (2015).
[2] J. Kvasil, V. O. Nesterenko, W. Kleinig, P.-G. Reinhard, and P. Vesely, Phys. Rev. C **84**, 034303 (2011).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Chiba Yohei, Kanada-En'yo Yoshiko, Shikata Yuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Cluster correlation and nuclear vorticity in low-lying 1^{π} states of Mg^{24}	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64311
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.103.064311	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yohei Chiba
2. 発表標題 Description of collective and cluster excitations with antisymmetrized molecular dynamics
3. 学会等名 International workshop for graduate students and young physicists on nuclear physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toan Phuc;Nguyen Tri, Mengjiao Lyu, Yohei Chiba and Kazuyuki Ogata
2. 発表標題 Spatial manifestation for the molecular orbit in $9Be$ through the $9Be(p,pn)8Be$ knockout reaction
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千葉陽平
2. 発表標題 反対称化分子動力学を用いた3体クラスター構造の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千葉陽平
2. 発表標題 24Mgのアイソスカラー双極励起強度とクラスター励起
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Chiba
2. 発表標題 Description of cluster correlation and strength function with antisymmetrized molecular dynamics
3. 学会等名 The 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Chiba
2. 発表標題 12C+12C cluster states in sub-Coulomb barrier region
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉陽平
2. 発表標題 sd殻核におけるクラスター構造とアイソスカラー型遷移
3. 学会等名 基研研究会「Threshold rule 50」, 京都大学基礎物理学研究所, 京都
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yohei Chiba
2. 発表標題 Probing cluster states of ^{24}Mg by alpha inelastic scattering
3. 学会等名 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, Huizhou, China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 緒方一介、千葉陽平、櫻木弘之
2. 発表標題 ^{24}Mg の非弾性散乱断面積と単極遷移強度分布の対応
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学, 福岡
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉陽平
2. 発表標題 ^{24}Mg における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター回転帯とその崩壊モード
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学, 福岡
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Chiba
2. 発表標題 Probing cluster states of ^{24}Mg by α -inelastic scattering
3. 学会等名 NITEP One-day Workshop "Recent Advances in nuclear cluster physics", Nambu Yoichiro Institute of Theoretical and Experimental Physics, Osaka (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉陽平、緒方一介、櫻木弘之
2. 発表標題 非弾性散乱とクラスター励起モード
3. 学会等名 NITEP研究会「微視的理論でつなぐ散乱観測量と核構造」, 大阪市立大学南部陽一郎研究所, 大阪
4. 発表年 2019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1件

国際研究集会	開催年
NITEP One-day Workshop "Recent advances in nuclear cluster physics"	2019年 ~ 2019年

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