

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03650

研究課題名（和文）分解反応精密解析による原子核存在限界近傍での新奇な共鳴状態の解明

研究課題名（英文）Study of resonances near the neutron-drip line via microscopic analyses of breakup reactions

研究代表者

松本 琢磨 (Takuma, Matsumoto)

九州大学・理学研究院・学術研究員

研究者番号：60415304

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）：本研究では、特に不安定核と呼ばれる領域の原子核における共鳴状態について理論的に研究を行い、また実験とも協同で研究を続けてきた。その成果として、2中性子ハロー核である $^{11}\text{Li}$ の共鳴状態として、フェッシュバッハ共鳴の性質を持った共鳴状態の存在を示唆し、さらには同じく2中性子ハロー核の $^6\text{He}$ における2つの共鳴状態について、その共鳴状態の構造の性質、および、共鳴状態が実験結果に与える影響を明らかにした。本研究で得られた結果は、今後の原子核物理の研究を進展させる重要な成果であると期待している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子系における共鳴現象は、原子核だけでなく原子分子、ハドロン、クォーク系にも普遍的に現れる物理現象である。特に原子核では多様な核子相関により、クラスター、集団運動、弱束縛系といったさまざまな共鳴状態が確認されている。現在では、核子間相互作用の理解も深まり、第一原理的に共鳴状態の理論計算が進み、また、実験技術の発展に伴って、共鳴状態の観測もできるようになっている。原子核物理の共鳴状態の理解は、そのような観点から、量子系の共鳴現象を知るのの一つの良い指標となると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have theoretically studied resonant states in nuclei of the region called unstable nucleus, and have continued the research in collaboration with the experimentalists. As a result, it suggests the existence of a resonant state with the properties of Feshbach resonance in  $^{11}\text{Li}$ , which is a two-neutron halo nucleus. Furthermore, we have also investigated the two resonant states of  $^6\text{He}$  and clarified the properties and the effect on the experimental results. We expect that it will be an important result for advancing future studies of nuclei.

研究分野：理論核物理

キーワード：共鳴状態 不安定核 原子核反応理論 精密少数計算

### 1. 研究開始当初の背景

原子核物理学の分野は、加速器技術の発展により、地上に存在しない不安定な原子核の生成が可能になり、そのような不安定核の研究が注目を浴びてきた。特に中性子過剰領域の不安定核は、天体での元素合成過程、中性子星の内部構造の研究など、原子核物理分野とは異なる宇宙物理分野にも関連しており、そのような面からも研究が盛んに行われている。

### 2. 研究の目的

本研究では、特に中性子過剰領域の不安定核に現れる新奇な共鳴状態の探索、その構造の解明を目的とする。

### 3. 研究の方法

原子核少数系の精密計算、および、原子核反応計算を通して、共鳴状態が反応の観測量にどのように反映されるか、また、観測断面積の精密解析から、共鳴の構造の情報を引き出す。特に不安定核の共鳴状態は分解反応により探索される為、分解反応を精密に記述できる離散化チャンネル結合法(CDCC)を用いて行い、少数系の共鳴状態探索に成功を収めている複素スケールリング法により共鳴状態の構造解明を行う。

### 4. 研究成果

- (1)  $^{11}\text{Li}$  は最初に発見されたハロー核で実験的にも理論的にも研究が進められてきた。その基底状態の束縛エネルギーや半径については良く理解されてきているが、その励起共鳴状態の有無についてはまだ未解決である。本研究では、近年測定された  $^{11}\text{Li}(p, p')$  反応を微視的模型により解析することで、 $^{11}\text{Li}$  の共鳴状態を探索した。解析では  $^{11}\text{Li}$  におけるスピンを無視した  $^9\text{Li}+n+n$  の三体模型で記述し、 $p$  散乱における分解過程を離散化チャンネル結合法により取り扱う。計算された、弾性散乱微分断面積、分解断面積、励起エネルギースペクトルの実験値を定量的に再現できた。また共鳴状態の解析において、その構造が  $^{10}\text{Li}+n$  として記述されることを示し、この共鳴状態を Borromean Feshbach 共鳴と名付けた。さらにこの模型での Coulomb 分解結果について、 $B(E1)$  遷移のエネルギー分布と実験値を比較し議論した。この結果は Progress of Theoretical and Experimental Physics に掲載された。
- (2)  $^6\text{He}$  核は 2 中性子ハロー核として知られ、 $^4\text{He}$  と 2 つの中性子の 3 体系として記述される。本研究では  $^6\text{He}$  のクーロン分解反応を通して、 $E1$  遷移、共鳴状態を探索した。本研究は実験との共同研究で、実験で得られた断面積を CDCC 法により解析を行ない、 $^6\text{He}$  の構造の情報を引き出した。結果として、 $^6\text{He}$  のハロー構造を確認し、さらに 2 中性子相関の情報についても議論した。本研究は、実験部分は Y.L. Sun 氏を中心とした理化学研究所の実験グループが中心となって推進され、成果は Physics Letters B に掲載された。
- (3) 不安定核のような弱束縛核の研究において分解反応は重要な研究手法である。特に重い標的を用いたクーロン分解ではハロー構造の探索に用いられる。その際に様々な高次の分解効果、多段階結合、核力分解、クーロン核力の干渉などが反応過程においては重要になる。ただし、このような効果は無視した近似計算を実験の解析に用いられることも多い。そこで本研究ではこのような高次の分解効果が断面積にどの程度影響を与えるかを、入射エネルギー、入射粒子に関して系統的に調査した。本研究では CDCC を用いて、 $^{11}\text{Be}$ 、 $^{17}\text{F}$  と  $^{208}\text{Pb}$  標的の反応を解析した。結果として、多段階結合の効果は核力分解において重要であること、クーロン分解では  $^{11}\text{Be}$  に関してはその効果が小さく、 $^{17}\text{F}$  ではクーロンと核力分解の効果として現れることが示された。その他の効果についても調査し、この成果は Progress of Theoretical and Experimental Physics に掲載された。
- (4) 中性子過剰領域では価中性子がコアとなる原子核に弱く束縛され、薄く広がった密度分布をもつハロー構造を持つ。より中性子過剰になるとコアとなる核も不安定で変形などの効果を考える必要がある。このような変形ハロー核の分解反応は通常の CDCC にコアの変形効果を取り入れた計算を行なう必要があり、現在の最先端の研究の一つである。コア核の変形を考慮すると、分解後に放出される終状態としてコアが基底、または励起した状態の多チャンネル分解を考える必要がある。これは例えば変形コア核と中性子の 2 体系とした場合は、それぞれコア核の状態に対し放出チャンネルの波動関数を正確に記述できるが、より多体系になると複数の崩壊チャンネルへの分離が難しくなる。そこで本研究では、近似的に各崩壊チャンネルの断面積を記述する方法を提案し、その近似の正当性を 2 体系の場合に確認した。本研究は渡邊氏を中心して推進され、成果は Physical Review C に掲載された。

- (5) 近年、加速器の発展により不安定核領域の原子核に関する多くの研究が行われ、その基底状態だけでなく共鳴状態までも理解が進みつつある。最近では、中性子ドリップライン近傍に存在する原子核の共鳴状態が精力的に調べられ、その例として、2 中性子ハロー核として知られている  ${}^6\text{He}$  は逆運動学的な  $(p, p')$  反応により研究されてきた。 ${}^6\text{He}$  の共鳴状態としては  $1^{\text{st}} 2^+$  が最も低い状態として良く知られており、分解断面積に鋭いピークとして現れることがわかっている。また最近では、 $1^{\text{st}} 2^+$  の次に低い状態として  $2^{\text{nd}} 2^+$  が調べられているが、幅が広いことため顕著なピークとして断面積に現れないため、詳細な議論がほとんどされていない。本研究では、不安定分解反応を精密に記述する連続状態離散化チャネル結合法を用いて  ${}^6\text{He}(p, p')$  反応を解析し、 $2^{\text{nd}} 2^+$  による寄与が断面積にどのように現れるか議論した。この成果は Physical review C に掲載された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ogawa Shoya, Matsumoto Takuma	4. 巻 102
2. 論文標題 Investigation of contributions of the 22+ resonance in He6 via analysis of the He6(p,p ) reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 21602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.021602	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 Singh Jagjit, Matsumoto Takuma, Ogata Kazuyuki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Systematic study on the role of various higher-order processes in the breakup of weakly-bound projectiles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 073D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab055	査読の有無 無
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 Sun Y.L., Nakamura T., Kondo Y., Satou Y., Lee J., Matsumoto T., Ogata K., Kikuchi Y., Aoi N., Ichikawa Y., Ieki K., Ishihara M., Kobayashi T., Motobayashi T., Otsu H., Sakurai H., Shimamura T., Shimoura S., Shinohara T., Sugimoto T., Takeuchi S., Togano Y., Yoneda K.	4. 巻 814
2. 論文標題 Three-body breakup of 6He and its halo structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136072 ~ 136072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136072	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 Watanabe Shin, Ogata Kazuyuki, Matsumoto Takuma	4. 巻 103
2. 論文標題 Practical method for decomposing discretized breakup cross sections into components of each channel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 L03601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.L031601	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 Matsumoto Takuma, Tanaka Junki, Ogata Kazuyuki	4. 巻 2019
2. 論文標題 Borromean Feshbach resonance in $^{11}\text{Li}$ studied via $^{11}\text{Li}(p,p')$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123D02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz126	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 Ogawa Shoya, Horinouchi Ryo, Toyokawa Masakazu, Matsumoto Takuma	4. 巻 2019
2. 論文標題 Microscopic optical potentials including breakup effects for elastic scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123D04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz128	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 Guo Hairui, Watanabe Yukinobu, Matsumoto Takuma, Nagaoka Kohei, Ogata Kazuyuki, Yahiro Masanobu	4. 巻 99
2. 論文標題 Analysis of nucleon and triton emissions from nucleon- $^{7}\text{Li}$ collisions below 20 MeV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.034602	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33件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 松本琢磨
2. 発表標題 $^{12}\text{C}(\text{ , } ^{\prime})$ 反応解析による共鳴・非共鳴状態の効果の研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川翔也
2. 発表標題 6He(p,p')反応解析を通した6Heの共鳴状態2+2に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jagjit Singh
2. 発表標題 Systematic study on the breakup of the weakly-bound projectiles on heavy target using the CDCC method - II
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本琢磨
2. 発表標題 CDCC解析による $^{11}\text{Li}$ のBorromean Feshbach共鳴の研究
3. 学会等名 RCNP研究会 原子核における多様な共鳴現象とそれを探る核反応機構
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川翔也
2. 発表標題 6He(p,p')反応を通した共鳴状態の解析
3. 学会等名 RCNP研究会 原子核における多様な共鳴現象とそれを探る核反応機構
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川翔也
2. 発表標題 分解反応による $6\text{He}$ 共鳴状態の構造解析
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊慎
2. 発表標題 多チャンネル分解反応における正確な連続状態と離散化した連続状態
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jagjit Singh
2. 発表標題 Four-body CDCC calculation of $9\text{C}$ breakup
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本琢磨
2. 発表標題 Study of resonances via CDCC analysis with the complex-scaling method
3. 学会等名 Yamada Conference LXXII: 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 小川翔也
2. 発表標題 Study on the 2 + 2 resonance in 6He via analysis of 6He(p, p ) reactions
3. 学会等名 Yamada Conference LXXII: 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 小川翔也
2. 発表標題 6He+p反応における共鳴状態の微視的解析
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 小川翔也
2. 発表標題 Analysis of resonances in 6He via 6He(p,p ) reactions
3. 学会等名 Workshop on RI-beam Spectroscopy by Innovative Gaseous Active Targets (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本琢磨
2. 発表標題 Study of resonances via CDCC analyses of (p,p ) and ( , ) reactions
3. 学会等名 Workshop on RI-beam Spectroscopy by Innovative Gaseous Active Targets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 松本琢磨
2. 発表標題 Application of CDCC to many-body breakup reaction
3. 学会等名 2019年度核データ研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本琢磨
2. 発表標題 12C散乱のエネルギースペクトルと共鳴位置の研究
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 小川翔也
2. 発表標題 6He+p 反応を通じた共鳴状態の微視的解析
3. 学会等名 第125回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川翔也
2. 発表標題 6He+p反応を通じた共鳴状態による断面積への影響の解析
3. 学会等名 第75回日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本琢磨
2. 発表標題 共鳴エネルギーと遷移スペクトルの関係性についての研究
3. 学会等名 第75回日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 琢磨
2. 発表標題 Borromean Feshbach resonance in $^{11}\text{Li}$ studied via $^{11}\text{Li}(p,p')$
3. 学会等名 10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本 琢磨
2. 発表標題 $^{11}\text{Li}(p,p')$ 反応解析による $^{11}\text{Li}$ 共鳴状態の研究
3. 学会等名 Threshold Rule 50
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本 琢磨
2. 発表標題 $^{12}\text{C}$ 共鳴・非共鳴状態を含む微視的反應解析
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川 翔也
2. 発表標題 Microscopic optical potentials for nucleus-nucleus scattering based on the Glauber model
3. 学会等名 10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川 翔也
2. 発表標題 分解効果を含む微視的核 - 核間相互作用の性質と応用
3. 学会等名 原子核三者若手 夏の学校2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川 翔也
2. 発表標題 Microscopic optical potentials including breakup effects for unstable nucleus scattering
3. 学会等名 The 17th CNS International Summer School (CNSSS18)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川 翔也
2. 発表標題 Microscopic analysis based on g-matrix folding model for reactions involving unstable nuclei
3. 学会等名 The Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川 翔也
2. 発表標題 入射核分解効果を含む微視的光学ポテンシャルの構築
3. 学会等名 理研-九大ワークショップ -- 素粒子・原子核から宇宙へ -
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川 翔也
2. 発表標題 入射核分解効果を考慮した微視的光学ポテンシャルの6He入射反応への応用
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川 翔也
2. 発表標題 6He分解反応における微視的光学ポテンシャルとその応用
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 悠真
2. 発表標題 The study of resonant states in $^{12}\text{C}$ via $^{12}\text{C}+\text{nucleon}$ scattering
3. 学会等名 The 17th CNS International Summer School (CNSSS18)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 悠真
2. 発表標題 12C散乱における12Cの共鳴状態の研究
3. 学会等名 Threshold Rule 50
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 悠真
2. 発表標題 12C散乱における12Cの共鳴状態の解析
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木 宏平
2. 発表標題 複素スケーリング法によるS行列の極と連続準位密度の関係
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳永 航
2. 発表標題 量子散乱における仮想状態と共鳴状態の探索
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会
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
---------	---------