

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400255

研究課題名(和文)非束縛原子核の存在形態と崩壊様式に対する動力学的研究

研究課題名(英文)Dynamical studies on the formation and decay of unbound nuclei

研究代表者

緒方 一介(Ogata, Kazuyuki)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：50346764

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)：束縛しない原子核(核子多体系)が、散乱観測量の中にどのような形(姿)で現れるか、また、どのように崩壊するかを特定する動力学的研究を行った。主要な成果としては、 ^{22}C 原子核の第2励起状態が示すエネルギースペクトルの特異性(Fano効果)の発見、 ^6He 原子核の $2+$ 共鳴状態の崩壊モードの特定、また、 ^5He 原子核の生成反応の記述とそれによる ^6He 中の2中性子相関の実証などがある。

研究成果の概要(英文)：Dynamical studies on the specification of the form of unbound nuclei (nucleon many-body states) in reaction observables and their decay mode have been carried out. Some main results are 1) discovery of the peculiar shape of the second excited state of ^{22}C in the breakup energy spectrum (cf. the Fano effect), 2) specification of the decay mode of the $2+$ state of ^6He , and 3) verification of the di-neutron correlation in ^6He through the formation cross section of ^5He .

研究分野：原子核反応論

キーワード：非束縛状態 不安定核 共鳴状態 粒子崩壊 崩壊モード

1. 研究開始当初の背景

ドリップライン(原子核の存在限界線)の外に位置する非束縛原子核の性質の解明は、原子核研究の最先端の課題のひとつである。これは、原子核の存在領域の定義を非束縛領域に拡大するという、有限量子多体系に対する新しい概念を提示する試みとも言える。

非束縛原子核は、核子(陽子・中性子の総称)の放出に対して不安定な、いわゆる粒子共鳴状態として存在する。その寿命は 10^{-20} 秒程度であり、通常不安定核の典型的な寿命(数ミリ秒から数秒)と比して、極めて短い。したがって非束縛原子核は、標的核としてはもちろん、入射ビームとしても利用することができず、核反応で生成・放出される“粒子”(正確には粒子系の連続状態)として観測される。

単純な理解に基づけば、非束縛原子核は粒子系の励起エネルギー分布中に、幅を持ったピークとして存在すると予想される。しかし非束縛原子核は粒子崩壊に対する閾値よりも高いエネルギーにあるため、非共鳴連続状態との強い結合により、その形態は全く非自明なものとなり得る。また、非束縛核の性質の解明のためには、それがどのように崩壊するかを特定する必要がある。特に3体に崩壊する核については、様々な崩壊モードが考えられ、そのどれが実現しているかは全く未解明の状態である。

2. 研究の目的

本研究は、非束縛原子核およびドリップライン近傍核の非束縛励起状態が、原子核反応によって形成され、核子群と残留原子核に崩壊して観測に掛かるまでの一連のダイナミクスを、最新の原子核理論計算によって追跡することにより、それら非束縛状態の存在形態(観測量の形状や連続状態との共存の様子など)と崩壊様式(経路する中間状態の同定など)を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

原子核の束縛状態・非束縛状態・連続状態を統一的に取り扱う広義の核構造計算と、その核が別の原子核と衝突して励起される(または核種変換がなされる)動的過程を記述する核反応計算とを、波動関数のレベルで接続し、反応後の崩壊粒子系の励起エネルギー分布を理論的に求める。なお、反応に係るポテンシャル(歪曲ポテンシャル)は2核子間有効相互作用に基づいて微視的に求め、調整パラメータは導入しない。さらに、非束縛原子核が崩壊してばらばらに飛んでいく確率(多重微分断面積)の計算を行い、複素スケール法と呼ばれる手法を駆使することにより、非束縛状態およびその各崩壊モードからの寄与を定量化する。

4. 研究成果

(1) 炭素 22 の第 2 励起状態(0^+ 状態)が、その

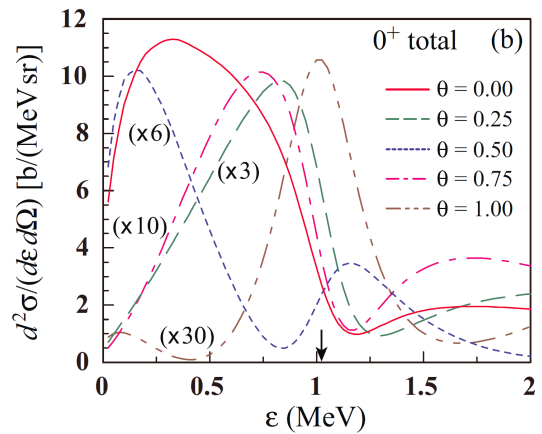


図 1: 分解断面積における炭素 22 の 0^+ 状態の姿。横軸は分解エネルギー(矢印は共鳴のエネルギー)。炭素 22 の散乱角度によって分布の形状が劇的に変化する。下記雑誌論文より引用。

分解断面積において、極めて特異なエネルギースペクトルとして観測されるという結果を見出し、これを共鳴・非共鳴状態の干渉(Fano 効果)と関連付けて分析した(図 1)。特に、複素スケール法を用いて断面積の共鳴成分(理論上の計算量)を引き出すと、Fano 効果の典型的な形状が、炭素 22 の散乱角度に応じてバラエティ豊かに現れることを明らかにした。さらに、この Fano 効果が実際の観測量においてどのように現れるかを実験に先駆けて予言した。

(2) 粒子と 2 つの中性子からなるヘリウム 6 原子核の第 1 励起状態(2^+)が崩壊する断面積を最新の反応計算によって算出し、分解断面積の分析より、ヘリウム 6 の 2^+ 状態の崩壊

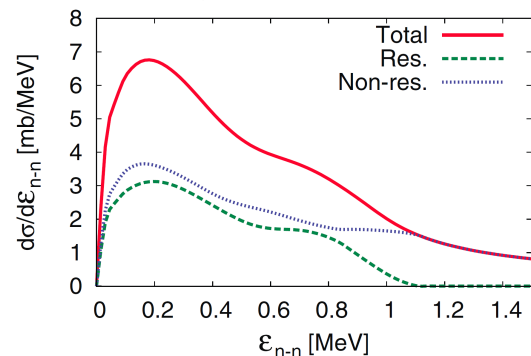


図 2: ヘリウム 6 の 2^+ 状態の崩壊断面積。横軸は放出される 2 中性子の相対エネルギー。左の山がダイニュートロン崩壊モードに、右のバンプがバックトゥバック崩壊モードに対応。下記雑誌論文より引用。

モードは、1) 2 つの中性子が相関を持ちながら放出されるダイニュートロン崩壊、2) 2 つの中性子が相関を持たず逆方向に放出されるバックトゥバック崩壊の重ね合わせであることを示した(図 2)。特に 2) の崩壊モードは今回新たに発見されたものであり、 2^+ 状態の中にある 2 中性子の構造に対する新しい知見を与えるものと考えられる。

(3) 酸素 24 の低エネルギー励起状態に対する分析を、連続状態粒子振動結合法によって行い、スピン-パリティの構造に対する予想を示した。

(4) 非束縛核であるヘリウム 5 原子核に関し、反応観測量(積分量)との関係に焦点を絞って分析を行った。ヘリウム 5 を生成する手段としては、炭素 12 並びに鉛 208 によるヘリウム 6 の分解反応を採用した。剥離する中性子が 1 つの場合と 2 つの場合を統一的に記述するモデルの構築に成功し、測定データとの極めて良い一致を得た。

(5) 非束縛核の生成から崩壊までを記述するにあたって必要となる核反応理論の様々な課題を遂行した。主な内容は、分解反応の系統分析、低エネルギーにおけるアイコンナル近似の補正法、始・終状態ともに連続状態との結合を取り入れた移行反応計算の遂行等である。また、相互作用の不定性を最小化すべく、2 核子間相互作用を積み上げて原子核反応を記述する、微視的反應論の研究を推進した。

(6) ヘリウム 6 から中性子をロックアウトして非束縛核ヘリウム 5 が生成される反応に着

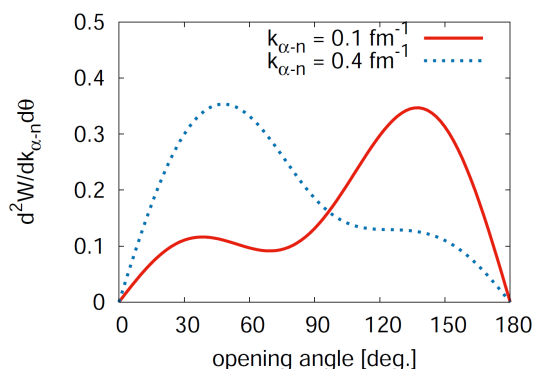


図 3: ヘリウム 6 からの中性子ロックアウト反応の微分断面積。 -中性子系のエネルギーを適切に選択することで、ヘリウム 6 の中にいる 2 中性子の相関距離(角度)が観測できる。下記雑誌論文 より引用。

目し、ヘリウム 5(共鳴状態)と -中性子の非共鳴状態を包括的に取り扱いつつ、ヘリウム 5 が微分断面積にどのような形態で出現するかを明らかにした(図 3)。その上で、このロックアウト反応は、2 中性子ハロー核内におけるダイニュートロン相関のプロープとなり得ることが明らかとなり、ロックアウト反応の新しい展開への道筋を付けることに成功した。

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 31 件)

K. Ogata, T. Myo, T. Furumoto, T. Matsumoto, and M. Yahiro, "Interplay

between the 0_2^+ resonance and the nonresonant continuum of the drip-line two-neutron halo nucleus ^{22}C ", *Physical Review C*, Vol. 88, 024615-1-5, 2013.
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.024616 [査読有]

Y. Kikuchi, T. Matsumoto, K. Minomo, and K. Ogata, "Two neutron decay from the 2_1^+ state of ^6He ", *Physical Review C*, Vol. 88, 021602-1-4, 2013.
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.021602 [査読有]

K. Mizuyama and K. Ogata, "Low lying excited states of ^{24}O investigated by self-consistent microscopic description of proton inelastic scattering", *Physical Review C*, Vol. 89, 034620-1-5, 2014.]DOI: 10.1103/PhysRevC.89.034620 [査読有]

K. Minomo, T. Matsumoto, K. Egashira, K. Ogata, and M. Yahiro, "Eikonal reaction theory for two-neutron removal reactions", *Physical Review C*, Vol. 90, 027601-1-4, 2014.
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.027601 [査読有]

K. Yoshida, T. Fukui, K. Minomo, and K. Ogata, "Extracting the electric dipole breakup cross section of one-neutron halo nuclei from inclusive breakup observables", *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Vol. 2014, 053D03-1-12, 2014.
DOI: 10.1093/ptep/ptu063 [査読有]

T. Fukui, K. Ogata, and P. Capel, "Analysis of a low-energy correction to the eikonal approximation", *Physical Review C*, Vol. 90, 034617-1-8, 2014.
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.034617 [査読有]

T. Fukui, K. Ogata, and M. Yahiro, "Breakup and finite-range effects on the $^8\text{B}(d, n)^9\text{C}$ reaction", *Physical Review C*, Vol. 91, 014604-1-8, 2015.
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.014604 [査読有]

Y. Kikuchi, K. Ogata, Y. Kubota, M. Sasano, and T. Uesaka, "How to determine a dineutron correlation in Borromean nuclei via a quasi-free knockout (p, pn) reaction?", *arXiv1603.03858*, 1-19, 2016.
[査読無]

[学会発表](計 41 件)

K. Mizuyama, "Self-consistent description of the nuclear reaction based on the continuum particle-vibration coupling method", JUSTIPEN-JUSEIPEN Workshop, 2013 年 12 月 09 日 ~ 2013 年 12 月 12 日, RIKEN Wako campus. [招待講演]

Y. Kikuchi, "Structure of two-neutron halo nuclei through breakup reactions", JUSTIPEN-JUSEIPEN Workshop, 2013年12月09日~2013年12月12日, RIKEN Wako campus [招待講演]

K. Ogata, "Dynamical Studies of the Formation and Decay of Particle-Unbound States", The 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 2014年06月01日~2014年06月06日, International Research Center, University of Tokyo, Tokyo. [招待講演]

K. Ogata, "Some recent developments in the description of breakup, removal, and knockout reactions of unstable nuclei", The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014 (ISPUN14), 2014年11月03日~2014年11月08日, Ho Chi Minh City, Vietnam. [招待講演]

T. Matsumoto, "CDCC Studies on Cluster Physics", 3rd International Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics" (SOTANCP3), 2014年05月26日~2014年05月30日, KGU Kannai Media Center, Kanagawa. [招待講演]

T. Matsumoto, "Systematical analysis of three- and four-body breakup reactions with CDCC", Breakup Reactions of Exotic Nuclei and Related Topics, 2014年07月16日~2014年07月18日, ECT*, Italy. [招待講演]

K. Ogata, "Probing nuclear correlations via (p,pX) reactions", The 2nd International Workshop of Neutron-Proton Correlations, 2015年07月07日, The University of Hong Kong, China. [招待講演]

K. Ogata, "Microscopic effective reaction theory for direct nuclear reactions", The 5th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics, 2015年10月21日, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Tokyo. [招待講演]

K. Ogata, "Nuclear reaction studies with RI-beams", Physics with Fragment Separators -25th Anniversary of RIKEN Projectile Fragment Separator-, 2015年12月07日, Shonan Village Center, Kanagawa. [招待講演]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

緒方 一介 (OGATA, Kazuyuki)

大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号：50346764

(2) 研究分担者

明 孝之 (MYO, Takayuki)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号：20423212

松本 琢磨 (MATSUMOTO, Takuma)
九州大学・理学研究院・助教
研究者番号：60415304

(3) 連携研究者

菊地 右馬 (KIKUCHI, Yuma)
大阪大学・核物理研究センター・特任研究員
研究者番号：00648024