

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

c 平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340053

研究課題名（和文） 不安定核の分解反応による非束縛な核子多体系の研究

研究課題名（英文） Study of unbound nucleonic systems using breakup reactions of unstable nuclei

研究代表者

中村 隆司（NAKAMURA TAKASHI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50272456

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、強く束縛した安定核から非束縛状態の中性子超過剰核（非束縛核）にいたる核子多体系の統一的な理解を目指し、とりわけ研究の遅れている中性子過剰な非束縛核に焦点を絞り、その特異構造を解明することである。そのため、1) 高精細な中性子検出器を開発し、また、2) 高強度の不安定核ビームを用い、分解反応によって非束縛核を生成し、不変質量法によりそのエネルギー準位と崩壊幅を決定する実験を行った。大立体角の中性子検出器 NEBULA を完成させ、不安定核ビームの分解反応を用いて三体力の解明にも重要とされる非束縛核²⁵O, ²⁶O を生成し、また、殻構造の破れやハロー構造の解明にも繋がる非束縛核¹³Be の核分光にも成功した。さらに、本研究では、より高分解能で、3 中性子以上の同時測定を目指し、高精細化されたプラスチックシンチレータから成る新型の中性子検出器 (HIME) を開発した。そのプロトタイプを完成させ、設計通りの時間・位置分解能が得られることを確認した。さらに、モジュール化された中性子検出器に特化したシミュレーションコードを開発した。これらは非束縛核の研究の飛躍的な展開の契機となる成果である。

研究成果の概要（英文）：

The final goal of this study is to understand the structure of nucleonic systems beyond the neutron drip line (unbound nuclei), thereby understanding the atomic nuclei with large isospin asymmetry. For such purposes, 1) we have developed neutron-detector arrays with high granularity, 2) we have performed experiments to produce unbound nuclei by using intense RI beams. We have constructed the large acceptance neutron detector array NEBULA at RIBF, and have performed experiments to produce ²⁵O and ²⁶O, which are crucial to understand the three-body force in nuclei. We have also successfully made spectroscopy of ¹³Be, the constituent of the Borromean halo nucleus ¹⁴Be. Furthermore, we have developed HIME neutron detector array, which has higher granularity than NEBULA, and can detect more than 2 neutrons in coincidence for the near-future experiments on ²⁸O. We have successfully constructed the proto-type of HIME, which has been found to work with expected specifications about the timing and position resolutions. In addition, we have developed the simulation code for such neutron detector array with high granularity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2011 年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			0
年度			0
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）

1. 研究開始当初の背景

重イオン加速器と不安定核ビーム技術の進展により、中性子数と陽子数の比が大きく異なる不安定核の研究が急速に進みつつある。束縛限界に至る不安定核の研究から、ハロー核の発見などがみられたが、束縛限界を超える非束縛核の研究は遅れていた。最近、第一原理計算が炭素 12 までの軽い原子核で進みつつあるが、中性子数と陽子数の比が非常に高い（アイソスピン非対称度の高い）非束縛系の実験的研究はこうした理論の検証に不可欠である。また、中性子星などの高密度核物質の解明には、アイソスピンに依存した核力成分の理解が望まれており、ここでも非束縛核のスペクトロスコピーが重要と考えられている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強く束縛した安定核から弱束縛系としての中性子過剰核、さらにはより中性子超過な非束縛核に至る核子多体系を統一的に理解するため、とりわけ研究の遅れている非束縛核の構造を解明することである。これらの非束縛核は、中性子星などの高密度核物質の理解にも不可欠な核力のアイソスピン依存性や3体力を探る上で鍵となる量子多体系であるが、未だにその構造がよくわかっていない。そのため、1) 高精細な中性子検出器を開発し、また、2) 高強度の不安定核ビームを用い、その分解反応によって非束縛核を生成し、不変質量法によりそのエネルギー準位とその崩壊幅を決定する実験を行った。

3. 研究の方法

非束縛核は、中高エネルギー不安定核ビームの分解反応により準安定状態として生成する。準安定状態にある非束縛核はすぐに荷電粒子と1-4個程度の中性子に崩壊する。これら放出粒子の4元運動量をすべて同時測定し、不変質量を組むことによって非束縛準位のエネルギーと幅を求める。この手法は我々のグループが世界の先頭を切って開発してきたものである。本研究では、この手法を最大限に効率良く利用すべく高精細・高立体角の中性子検出器(NEBULA)を開発し、準安定状態にある非束縛核の崩壊を精度よく測定した。また、将来の多中性子同時測定をめざし、より高精細化された中性子検出器(HIME)を開発した。

4. 研究成果

非束縛核や非束縛準位を生成するいくつかの実験を行い、重要な結果を得ている。ここでは、そのハイライトである1) ボロミアン核を構成する非束縛核 ^{13}Be の生成、2) 酸素同位体の非束縛核 ^{25}O , ^{26}O の生成実験について述べる。さらに、3) 高精細中性子検出器 HIME の開発について述べる。

1) ^{13}Be の生成：中性子ハロー核 ^{14}Be の1中性子分離反応により、 ^{13}Be の分光を行った。 ^{13}Be は基底状態が非束縛であり、実験の困難さから、これまでは確固とした準位の特特定が行われていなかった。一方、 ^{13}Be は、 ^{14}Be の3体ハロー構造を解明する上でも、Be 同位体にしばしば現れる変形現象や魔法数の破れを見る上でも、鍵となる重要な核としてその精密研究が待たれていた。

本実験では、液体水素標的(陽子標的)を用いて ^{14}Be の中性子を一個分離し、中間準安定状態として ^{13}Be を生成した。非束縛状態にある ^{13}Be は直ちに分解し ^{12}Be と中性子が放出されるが、この2粒子の同時測定を行い、 ^{13}Be の相対エネルギースペクトル(図1)を精度よく導出することに成功した。また、この実験では ^{13}Be の横方向運動量を組み合わせたスペクトルの解析法を初めて導入し、 ^{14}Be が少なくとも3つの異なる量子状態の重ね合わせであることをつきとめた。また、 ^{13}Be の最も顕著なピークは基底状態であり、p波中性子の一粒子状態としてスピン・パリティを $1/2^-$ と特定した。すなわち従来の殻模型で予想される正パリティでなく、負パリティの Intruder 準位であることが判明したことになる。このことは中性子数8の魔法数が破れ、

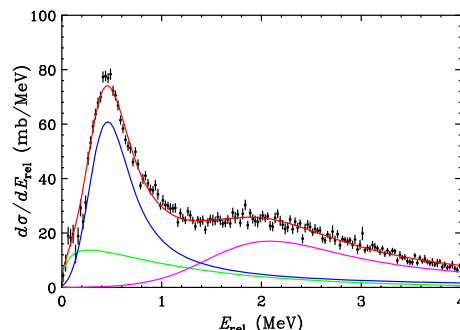


図1. $^{13}\text{Be}(^{12}\text{Be}+n)$ の相対エネルギースペクトル。横方向運動量分布の解析と組み合わせることにより、3つの異なる状態の存在が示された。

閉殻構造が崩れていることを示すものとして注目されている。

2)^{25,26}Oの生成：原子核の束縛限界（ドリップライン）はどこにあるのだろうか。中性子過剰側の中性子ドリップラインは、ほとんどわかかっておらず、これまで水素(Z=1)から酸素同位体(Z=8)まで確定しているのみである。しかも、酸素同位体はまわりの同位体に比べそれほど中性子過剰ではない²⁴O(Z=8, N=16)が束縛限界核となっており、謎となっている。フッ素同位体では少なくとも³¹Fまでが束縛していることが判明しており、中性子数で6個以上も安定性が伸びている。このアノマリー（異常性）は中性子過剰領域での核構造や核力の変化に起因する可能性があり、これを理解する上で、束縛限界を超えた²⁵Oや²⁶O、さらには二重閉殻核としては最後の砦と言われている²⁸Oを人工的に生成し、そのエネルギー準位を決定することが重要である。本研究では、不安定核の世界的拠点研究所となっている理研のRIBF(RI ビームファクトリ)で得られる高強度の不安定核ビーム(²⁶F, ²⁷F, ²⁷Ne, ²⁸Ne)を用いて、核力分解反応の一種である、1陽子分離反応、および2陽子分離反応を起こし、²⁵O, ²⁶Oを生成した。これらの生成量は先行研究を1桁以上も上回るものであった。現在、詳細な解析を進めており、エネルギー準位の精密決定が期待される。最近²⁶Oは3体斥力効果で非束縛になるという理論もあり、その検証も可能となる。また、最近²⁶Oが2中性子放射性を持つ可能性が指摘され、注目されているが、そのことについても重要な情報を与えるものと期待される。

3) 中性子検出器HIMEの開発

非束縛核の生成は、核力分解反応で行うが、分解粒子の運動量の測定、特に中性子の運動量の測定が不可欠となる。中性子のエネルギーは100–300 MeV程度で、複数の中性子が同時に放出されることもある。複数の中性子の同時測定は、従来、クロストークの問題があり困難であった。これを解決するとともに、さらに分解能を高めた検出器を本研究では開発した。これがHIME(HIGH resolution detector array for Multi-neutron Events)である。HIMEは2cmx4cmx100cm 500本のプラスチックシンチレータから成る高精細な中性子検出器である(本研究ではそのプロトタイプとして50本を製作)。検出器中の陽子の反跳によって測定するが、この反跳陽子は3本程度のシンチレータにシグナルを残すので、トラッキングが可能になる。トラッキングを利用すると、クロストークの判別が可能となり、最大4個程度の中性子の測定が実現される見込みである。放射線医学総合研究所のHIMAC加速器で陽子ビームを用いてHIME

のテスト実験を行い、その性能を調べた。さらに宇宙線ミュオンを使ったテスト実験も行い、時間分解能が陽子やミュオンに対して100ps程度となることがわかった。また、GEANT4によるシミュレーションプログラムを構築し、複数の中性子を分離して測定できることを確認した。

以上のように、いくつかの鍵となる非束縛原子核を新たに測定し、殻構造や核力が非束縛核でどのように変化するかを精度良く調べた。さらに、近い将来に²⁸Oのような4中性子崩壊が重要になる非束縛系の実験に向けて高精細中性子検出器の開発を進め、ほぼそれを完成させることができた。本研究により、非束縛核の研究を飛躍的に進展させる契機ともなる実りある成果が得られたと言える。

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 18 件)

- ① T. Aumann, T.Nakamura, “The electric dipole response of exotic nuclei”, *Physica Scripta* **T152**, 014102 (2013). 査読有 doi:10.1088/0031-8949/2013/T152/014012
- ② S. Sakaguchi, T. Nakamura et al., “Shallow and diffuse spin-orbit potential for proton elastic scattering from neutron-rich helium isotopes at 71~MeV/nucleon”, *Phys. Rev. C* **87**, 021601 (2013). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevC.87.021601
- ③ D. Kameda, T.Nakamura et al., “Observation of new microsecond isomers among fission products from in-flight fission of 345 MeV/nucleon ²³⁸U”, *Phys.Rev. C* **86**, 054319 (2012). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevC.86.054319
- ④ N. Kobayashi, T. Nakamura et al., “One- and two-neutron removal reactions from the most neutron-rich carbon isotopes”, *Phys.Rev. C* **86**, 054604 (2012). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevC.86.054604
- ⑤ S.Takeuchi, T.Nakamura et al., “Well Developed Deformation in ⁴²Si”, *Phys.Rev.Lett.* **109**, 182501 (2012). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevLett.109.182501
- ⑥ Y.Togano, T.Nakamura et al., “Hindered Proton Collectivity in ²⁸₁₆Si₁₂: Possible Magic Number at Z=16”, *Phys.Rev.Lett.* **108**, 222501 (2012). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevLett.108.222501
- ⑦ K. Tshoo, T.Nakamura et al., “N=16 Spherical Shell Closure in ²⁴O”, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 022501 (2012). 査読有 doi:

- 10.1103/PhysRevLett.109.022501
- ⑧ Z.X.Cao, Y.L.Ye, T.Nakamura et al., " Recoil proton tagged knockout reaction for ^8He ", Phys. Lett. B **707**, 46-51 (2012). 査読有 doi: 10.1016/j.physletb.2011.12.009
- ⑨ J.L.Lou, Y.L.Ye, T.Nakamura et al., " Quasielastic scattering of ^6He from ^{12}C at 82.3 MeV/nucleon", Phys. Rev. C **83**, 034612 (2012). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevC.83.034612
- ⑩ A.Ozawa, T.Nakamura et al., " One- and two-neutron removal reactions from $^{19,20}\text{C}$ with a proton target", Phys. Rev. C **84**, 064315 (2011). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevC.84.064315
- ⑪ Y.Togano, T.Nakamura et al., " Resonance states in 27P using Coulomb dissociation and their effect on the stellar reaction $26\text{Si}(p, \gamma)27\text{P}$ ", Phys. Rev. C **84**, 035808 (2011). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevC.84.035808
- ⑫ T.Yamaguchi, T.Nakamura et al., " Nuclear reactions of $^{19,20}\text{C}$ on a liquid hydrogen target measured with the superconducting TOF spectrometer", Nucl. Phys. A **864**, 1-37 (2011). 査読有 doi: 10.1016/j.nuclphysa.2011.05.095
- ⑬ Y.Satou, T.Nakamura et al., " $^{14}\text{Be}(p, n)^{14}\text{B}$ reaction at 69 MeV in inverse kinematics", Phys. Lett. B **697**, 459-462 (2011). 査読有 doi: 10.1016/j.physletb.2011.02.045
- ⑭ Y.Kondo, T.Nakamura et al., " Low-lying intruder state of the unbound nucleus ^{13}Be ", Phys. Lett. B **690**, 245-249 (2010). 査読有 doi: 10.1016/j.physletb.2010.05.031
- ⑮ N.Aoi, T.Nakamura et al., " Enhanced collectivity in ^{74}Ni ", Phys. Lett. B **692**, 302-306 (2010). 査読有 doi: 10.1016/j.physletb.2010.05.031
- ⑯ P. Doornenbal, T.Nakamura et al., " Exploring the "island of inversion" by in-beam γ -ray spectroscopy of the neutron-rich sodium isotopes $^{31, 32, 33}\text{Na}$ ", Phys. Rev. C **81**, 041305 (2010). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevC.81.041305
- ⑰ E.Yu.Nikolskii, T.Nakamura et al., " Search for ^7H in $^2\text{H}+^8\text{He}$ collisions", Phys. Rev. C **81**, 064606 (2010). 査読有 doi: 10.1103/PhysRevC.81.064606
- ⑱ T.Ohnishi, T.Nakamura et al., " Identification of 45 New Neutron-Rich Isotopes Produced by In-Flight Fission of a ^{238}U Beam at 345 MeV/nucleon", JPSJ **79**, 073201 (2010). 査読有 doi: 10.1143/JPSJ.79.073201_

[学会発表] (計 31 件)

1. T.Nakamura, " Exotic Nuclear Structures at the Limit of Stability" Eleventh Conf on the Intersections of Particle and Nuclear Physics (CIPANP 2012) (招待講演), 2012年05月29日~2012年06月03日 St. Petersburg, Florida, USA,
2. T.Nakamura, " Coulomb breakup of halo nuclei", Nobel Symposium NS152 "Physics with Radioactive Beams" (招待講演) 2012年06月10日~2012年06月15日, Goteborg, Sweden
3. T.Nakamura, " Neutron Halo Structure at the Limit of Stability Probed by Breakup Reactions", The 20th Int. IUPAP Conf. ON FEW-BODY PROBLEMS IN PHYSICS (招待講演) 2012年08月20日~2012年08月25日, 福岡市
4. T.Nakamura, " Coulomb and nuclear breakup of neutron drip line nuclei", Zakopane Conference on Nuclear Physics (招待講演), 2012年08月27日~2012年09月02日, Zakopane, Poland
5. T.Nakamura, " Breakup Reactions of Exotic Nuclei at the large acceptance spectrometer SAMURAI at RIBF", International Workshop on Nuclear Symmetry Energy and Reaction Mechanisms (ASY-EOS 2012) (招待講演), 2012年09月04日~2012年09月07日, Syracuse, Sicily Italy
6. T.Nakamura, " Deformed halo nuclei probed by breakup reactions", International Symposium "Exotic Nuclear Structure From Nucleons (ENSNF)" (招待講演), 2012年10月10日~2012年10月12日, 東京
7. T.Nakamura, " Breakup reactions and

- halo structures of neutron drip line nuclei”, The 3rd international symposium on Frontiers in Nuclear Physics (招待講演), 2012年11月01日～2012年11月03日, 2012年11月01日～2012年11月03日, Beijing, China
8. 中村隆司, ” ハロー核の分解反応で探るダイニュートロン相関”, 日本物理学会秋の分科会 (招待講演), 2012年09月11日～2012年09月14日, 京都産業大学 (京都府)
 9. 田中隆己、中村隆司他、 “不安定核反応測定のための中性子検出器NEBULAの性能評価実験” 日本物理学会秋の分科会、2012年09月11日～2012年09月14日, 京都産業大学 (京都府)
 10. 田中隆己、中村隆司他 “AMURAIを用いた ^{14}Be の分解反応実験” 日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日～2013年03月29日、広島大学 (広島県)
 11. 生越駿、中村隆司他, “ ^{19}B の分解反応” 日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日～2013年03月29日、広島大学 (広島県)
 12. 南方亮吾、中村隆司他, “ ^{22}C の分解反応” 日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日～2013年03月29日、広島大学 (広島県)
 13. 小林信之、中村隆司他, “Island of Inversion 近傍核の分解反応の測定” 日本物理学会第68回年次大会、2013年03月26日～2013年03月29日、広島大学 (広島県)
 14. 近藤洋介, “中性子ドリップライン領域での分解反応実験” 日本物理学会第68回年次大会 (招待講演)、2013年03月26日～2013年03月29日、広島大学 (広島県)
 15. Takashi Nakamura, “Breakup reactions and exotic structures of neutron drip line nuclei”, Advances in Radioactive Isotope Science (招待講演), 2011.6.1, Leuven, Belgium
 16. Takashi Nakamura, ” Breakup reactions and exotic structures of neutron-rich nuclei at the limit of stability”, Gordon Research Conference: Intersections Between Structure and Reactions: Pushing the Frontiers of Nuclear Science (招待講演), 2011.6.14, Colby Sawyer College, New London, NH, USA
 17. 中村隆司, ” 分解反応で探るダイニュートロン相関”, クラスターストラスターガス状態探索のための研究戦略会議 (招待講演), 2011.9.7大阪大学核物理研究センター (大阪府)
 18. 中村隆司, “中性子過剰な中低密度核物質の物性”、研究会「中性子星核物質」(招待講演)、2011.9.13、理化学研究所 (埼玉県)
 19. Takashi Nakamura, ” Neutron Drip Line Nuclei probed by Breakup Reactions”, Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011) (招待講演), 2011.10.13, 京都大学基礎物理学研究所 (京都府)
 20. Takashi Nakamura, “Probing Neutron Halo Nuclei by Breakup Reactions”, Advances in Nuclear Physics 2011 (招待講演), 2011.11.5, Goa, India
 21. Takashi Nakamura, ” Halo Structures near $N=20$ and $N=28$ probed by breakup reactions”, Int. Symposium on Physics of Unstable Nuclei (招待講演), 2011.11.25, Hanoi, Vietnam

22. 中村隆司, ” 中性子過剰核を用いた中性子星核物質の研究”, 日本物理学会シンポジウム「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」(招待講演), 2012. 3. 26, 関西学院大学、西宮市(兵庫県)
23. 近藤洋介, ” 1 中性子分離反応を用いた非束縛核 ^{13}Be の分光”, 日本物理学会秋の分科会(招待講演), 2011. 9. 17, 弘前大学、弘前市(青森県)
24. 田中隆己、中村隆司、近藤洋介ほか, ” 非束縛核測定のための高精細中性子検出器の開発”, 日本物理学会秋の分科会”, 2011. 9. 16, 弘前大学、弘前市(青森県)
25. 佐古貴行、中村隆司、近藤洋介ほか, ” 不安定核反応実験のための大立体角中性子検出器の開発と性能評価”, 日本物理学会秋の分科会, 2011. 9. 16, 弘前大学、弘前市(青森県)
26. T. Nakamura, “Breakup reactions of Neutron Drip Line Nuclei Near $N=20$ ”, International Nuclear Physics Conference(招待講演), 2010. 7. 6, UBC, Vancouver, Canada
27. T. Nakamura, ” Breakup reactions of neutron-rich nuclei near the limit of existence”, Halo 2010 Symposium, 2010. 12. 9, 湘南国際村、葉山、(神奈川県)
28. T. Nakamura, ” Coulomb Breakup and Soft E1 Excitation of Halo Nuclei”, U. of Aizu-JUSTIPEN-EFES Symp. “Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei”, 2010. 11. 23, 会津大学(福島県)
29. T. Nakamura, ” Spectroscopy of Nuclei at the limit of stability”, International Symposium “Nanoscience and Quantum Physics 2011”, (nanoPHYS’ 11), 2011. 1. 27, 国際文化会館(東京都)
30. 中村隆司, ” 分解反応で探る不安定核のエキゾチック構造”, 研究会「原子核研究の進化とその応用」2010. 10. 16, 東京工業大学(東京都)
31. 小林信之、中村隆司、近藤洋介ほか, ” 分解反応による新中性子ハロー核の探索および微視的構造の研究”, 日本物理学会2010年秋季大会, 2010. 10. 16, 九州工業大学(福岡県)
- [図書](計1件)
- ① T. Nakamura, Y. Kondo, Clusters in Nuclei Vol.2 (Springer, 2012), p67-p119.
- [その他]
- ホームページ
<http://www.phys.titech.ac.jp/~nakamura>
<http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/~nebula/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 中村 隆司 (NAKAMURA TAKASHI)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号: 50272456
- (2) 研究分担者
 なし
- (3) 連携研究者
 近藤 洋介 (KONDO YOSUKE)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号: 00455346