

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400240

研究課題名(和文)ドリップライン近傍での変形共存と新しいタイプの中性子ハローの研究

研究課題名(英文)Study of Neutron-halo and shape coexistence near the neutron-drip line

研究代表者

木村 真明 (KIMURA, Masaaki)

北海道大学・理学(系)研究科(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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、中性子過剰核の核半径と変形に関する研究を行った。また、束縛限界に近い核で形成される中性子ハローにも注目した。理論手法として主に反対称化分子動力学を用いた研究を行い、次の様な成果を得た。(1)中性子過剰核で起こる原子核の大きな変形と反応断面積の間に強い相関があることを示した。(2) ^{37}Mg などいくつかの原子核において中性子ハロー形成の可能性を指摘した。(3)中性子過剰核でのクラスター構造の発達と荷電変化断面積の間に相関がありうることを指摘した。

研究成果の概要(英文)：In this study, I investigated the radii and deformation of neutron-rich nuclei. I also focused on the neutron halo which can be formed in the drip-line nuclei. I employ the theoretical model of antisymmetrized molecular dynamics and studied various isotopes. The obtained results are follows. (1) The relationship between the nuclear deformation of neutro-rich nuclei and the increase of the reaction cross section was found. (2) It was found that several nuclei such as ^{37}Mg may have neutron-halo. (3) The relationship between the development of clustering and the increase of charge changing cross section was pointed out.

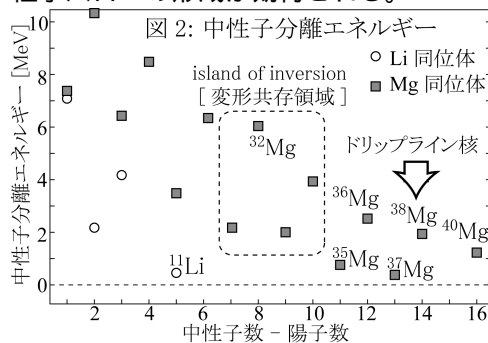
研究分野：原子核理論

キーワード：中性子過剰核 変形共存 中性子ハロー 原子核半径

1. 研究開始当初の背景

中性子過剰核は極めて特異な構造を持ち、原子核研究の中心的課題となっている。なかでも、 ^{11}Li に代表されるドリップライン核では、最も弱く束縛された数個の中性子がコアとなる核の外に大きく広がって存在する中性子ハローが現れる。中性子ハロー核を調べることで、核の束縛限界で現れる新しい束縛様式、中性子過剰な環境下での中性子軌道の性質、またそこでの非常に強い中性子間相関を知ることができる。

近年、質量数が大きいドリップライン核の実験が可能になった。例えば Mg 同位体では ^{35}Mg より質量数の大きな同位体が調べられる。下図のように、中性子過剰 Mg 同位体でも、余剰中性子が非常に弱く束縛されるため、中性子ハローの形成が期待される。



中性子過剰 Mg 同位体は、より質量数が多い系であるため、以下の様な新たな課題が生じた。

- 1) Mg 同位体は余剰中性子の数が従来よりもはるかに多いため、多くの中性子からなるハローが存在する可能性がある。
- 2) Mg 同位体などでは、様々な変形状態の共存が起こる (変形共存)。従って、変形共存したコア核の周りに形成されるハローの構造を知る必要がある。

2. 研究の目的

そのため、質量数の大きな系での中性子ハローを記述可能な理論的枠組みを発展させ、上記の問題に答える必要がある。そこで、本研究では以下を目的とした。

- (1) ドリップライン核の変形共存と 1 中性子ハロー核の研究

Mg 同位体を始めとする中性子過剰核において、コア核の変形共存を示すと同時に、変形共存が中性子ハローの発生メカニズムに及ぼす影響、また変形共存による従来のハローとの差異を明らかにする。

具体的には、反対称化分子動力学を用いて、励起スペクトル・中性子軌道・核半径・遷移確率などの核構造に関する情報を求めると同時に、変形共存やハロー構造に最も敏感な陽子非弾性散乱や全反応断面積を示す。現象論的なパラメータを一切含まない反応計算を実現し、理論的な不定性のない解析を行う。

- (2) ドリップライン核の非束縛状態の記述と多中性子ハローの研究

反対称化分子動力学をさらに発展させ、R-matrix 法と組み合わせることで、非束縛状態 (共鳴状態・散乱状態) の記述を行う。この方法によって、ハロー中での中性子相関に最も敏感な、中性子分解反応の運動量分布を示し、ハロー中での中性子相関を明らかにする。

3. 研究の方法

ドリップライン核を含む Mg 同位体を主たる研究対象とし、これらの核が持つ変形共存とハロー構造を束縛状態、非束縛状態の両面で調べる。また、核構造計算の結果を直接用いた反応計算を行い、観測量との直接比較によって、変形したコアを持つハロー核の性質を定量的に明らかにする。

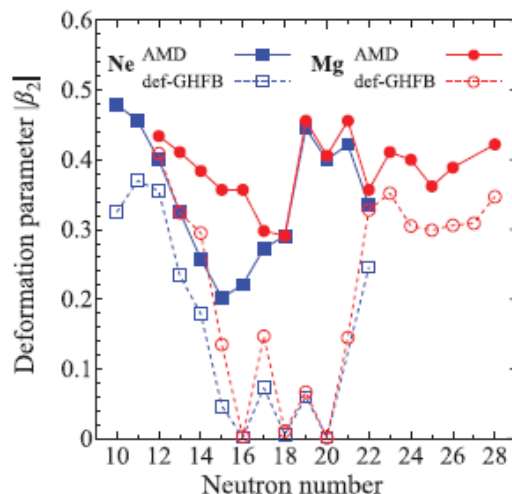
課題(1)では、反対称化分子動力学を用い束縛状態を調べ、変形共存の様相を明らかにする。更に共鳴群法と組み合わせることで、変形共存したコアを持つ 1 中性子ハロー構造を明らかにする。

課題(2)では、反対称化分子動力学と R-matrix 法を組み合わせた理論手法を開発することで、非束縛状態の構造を解析する。

4. 研究成果

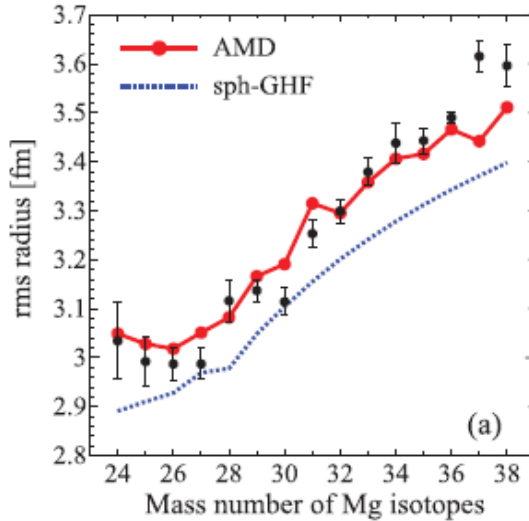
(1) Mg 同位体の変形と反応断面積の関係
原子核が変形すると、見かけ上半径が増大したかのように振舞い、反応断面積が増加すると期待できる。そのため、反対称化分子動力学を用いる事で、Mg 同位体の基底状態を系統的に求める事で、その変形を調べ、さらに反応断面積を求めることで両者の関係を明らかにした。この研究は九州大学の研究者との協同研究によって行われた。

下図に示したのが、反対称化分子動力学 (AMD) によって求められた、Mg 同位体の変形度である。明らかに中性子数 18 を境にして



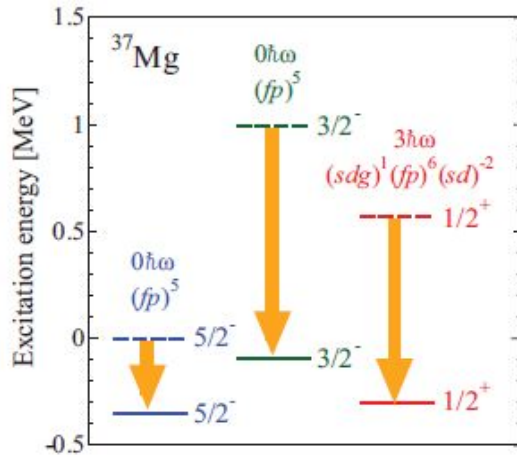
核の変形度が増加していることを見て取れる。次に、反対称化分子動力学で得た波動関数を元に求めた反応断面積を示す。

こちらでも中性子数 18(30Mg と 31Mg)を境にし

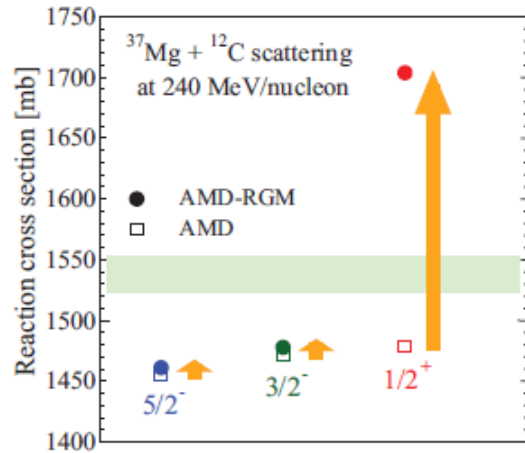


て、反応断面積が顕著に増加していることを見て取れる(理論値は赤線)。また理論値は実験値(黒点)を良く説明していることも判る。このようにして、原子核の変形と反応断面積との間に顕著な相関があることが示された。同様の解析は Mg 同位体だけでなく、C,N,O,Ne 同位体に対しても行われた。

(2) ^{37}Mg での中性子ハローの形成
 上図の反応断面積の図で、 ^{37}Mg だけ理論値と実験値の間に大きな差異がある。このため、この原子核では中性子ハローが形成されていると考えられた。そのため、反対称化分子動力学と共鳴群法を組み合わせた計算を行い、中性子ハロー形成の可能性を調べた。理論計算の結果を下図に示す。



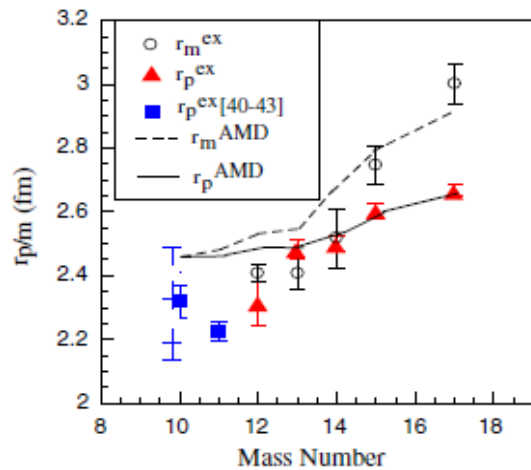
図で、破線で示されているのが通常の反対称化分子動力学による結果、実線で示されているのが、反対称化分子動力学+共鳴群法による結果である。共鳴群法により、明らかに $1/2+$ 状態のエネルギーが大きく下がっている。この状態は、中性子が角運動量の小さな軌道を占有するため、中性子ハローが形成される可能性が高い。そのため、反対称化分子動力学+共鳴群法を用いて、この状態の反応断面積を求めた。それを下図に示す。



図で、四角で示されているのが、通常の反対称化分子動力学で求めた反応断面積、丸で示されているのが、反対称化分子動力学+共鳴群法による結果である。明らかに反対称化分子動力学+共鳴群法を用いる事で $1/2+$ 状態の反応断面積が極端に大きくなっており、実験を説明することが可能である。そのため、 ^{37}Mg で中性子ハローが形成されている可能性が高くなった。

(3) 核変形と陽子半径、荷電変化断面積の関係

変形した原子核の周りに、過剰中性子が加わるとその影響で核変形が変化すると考えられる。それを検証するには陽子半径に着目するのが良い。また、陽子半径は荷電変化断面積に関係する可能性がある。そのため、核変形と陽子半径さらに荷電変化断面積に注目し、研究を行った。まず最も核変形の変化が大きいと期待される Be 同位体に注目した。



上図は、荷電変化断面積から求めた陽子半径と実験値と反対称化分子動力学で求めた陽子半径の比較である。中性子数が増え、Be 同位体の変形が大きくなり、その結果陽子半径が増大する。陽子半径の増大はさらに荷電変化断面積の増大を引き起こす。これら一連の相関が Be 同位体で確かめられた。同様の解析が B,C 同位体などでも行われた。

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 15 件)

Y. Chiba, M. Kimura and Y. Taniguchi, "Isoscalar dipole transition as a probe for asymmetric clustering", Physical Review C93 034319 (2016), pp1-12. 査読有
doi: 10.1103/PhysRevC.93.034319

Y. Chiba and M. Kimura, "Cluster states and isoscalar monopole transitions of ^{24}Mg ", Physical Review C91, 061302 (2015), pp1-5. 査読有
doi: 10.1103/PhysRevC.91.061302

S. Ebata and M. Kimura, "Low-lying 2^+ states generated by pn-quadrupole correlation and $N = 28$ shell quenching", Physical Review C91, 014309 (2015), pp1-7. 査読有
doi: 10.1103/PhysRevC.91.014309

T. Baba, Y. Chiba and M. Kimura, " 3α clustering in excited states of ^{16}C ", Phys.Rev. C 90, 064319 (2014), pp1-7. 査読有
doi: 10.1103/PhysRevC.90.064319

Y. Chiba and M. Kimura, "Collectivity and instability of the $N=Z=28$ shell gap and strongly deformed bands with $g_{9/2}$ configuration in ^{56}Ni ", Physical Review C89, 054313 (2014), pp1-9. 査読有
doi: 10.1103/PhysRevC.89.054313

S.Watanabe, K.Minomo, M. Kimura, 他 9 名 "Ground-state properties of neutron-rich Mg isotopes", Physical Review C89, 044610 (2014), pp1-13. 査読有
doi: 10.1103/PhysRevC.89.044610

M. Kimura, Y.Taniguchi, Y.Kanada-Enyo, H.Horiuchi, K.Ikeda, "Prolate, oblate, and triaxial shape coexistence, and the lost magicity of $N=28$ in ^{43}S ", Physical Review C87, 011301 (2013), pp1-5. 査読有
doi: 10.1103/PhysRevC.87.011301

[学会発表](計 20 件)

M. Kimura, "Nuclear response functions and clustering aspects studied by antisymmetrized molecular dynamics", International Symposium on High resolution Spectroscopy and Tensor interactions, 大阪大学(大阪府大阪市) 2015.11.16-11.19.

M. Kimura, "Exotic Nuclear Clustering near the Neutron Drip-Line Studied by

Antisymmetrized Molecular Dynamics", Gordon Research Conference Nuclear Chemistry, Colby-Sawyer College, New Hampshire, (USA), 2015.5.31-06.5.

M. Kimura, "Formation of Clusters in stable and unstable nuclei explored by antisymmetrized molecular dynamics", Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS, Hilton Waikoloa Village, Big Island, Hawaii, (USA). 2014.10.07-14.

M. Kimura, "Clustering Aspects of $N=Z$ nucleus ^{24}Mg studied by antisymmetrized molecular dynamics", 3rd international workshop on State-of-Art of Cluster Physics, KGU Kannai Media Center, (神奈川県横浜市). 2014.05.26-05.30.

M. Kimura, "Shape coexistence and non-yrast states in neutron-rich $N \sim 28$ nuclei " The 12th Asia Pacific Physics Conference, MakuhariMesse, (千葉県千葉市) 2013.07.14-07.19.

[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]
ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

木村 真明(KIMURA, Masaaki)
北海道大学 大学院理学院 准教授
研究者番号: 50402813