

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400241

研究課題名(和文) 9Be核の三体共鳴状態

研究課題名(英文) Three-body resonant states in the 9Be nucleus

研究代表者

加藤 幾芳 (KATO, KIYOSHI)

北海道大学・理学研究院・名誉教授

研究者番号：20109416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：原子炉中の中性子反射材としても用いられる 9Be核の特異な性質を、 $\alpha + n$ 3体クラスター模型と複素座標スケールリング法を用いて分析した。結果、基底状態以外はずべて共鳴状態であり、 $\alpha + n$ ボロミン系(どの2体部分系も結合状態を持たない)として、観測されたエネルギー準位すべて再現することを確かめた。最近観測された光分解反応断面積についても、複素座標スケールリング法を用いて計算され、実験結果をよく説明することを示した。光分解反応で $8\text{Be}+n$ 閾値の上に大きな断面積を持つのは共鳴状態によるものではなく、仮想状態によることを示した。それらの成果を多くの国際会議等で発表し、13編の論文として公表した。

研究成果の概要(英文)：Using an $\alpha + n$ three-cluster model and the complex scaling method (CSM), we investigated the characteristic properties of the 9Be nucleus which is also used as a neutron reflector in nuclear reactors. As a result, observed energy levels of 9Be can be understood as resonant states of a Borromean system which is a three-body system having no bound subsystems except for the ground state. As for the recently observed photo-disintegration cross section, the experimental data can be shown to be explained by the calculation using the CSM. The peak of cross section can be understood to be due to a $8\text{Be}+n$ virtual state but not a resonant state. These results have been reported in many international conferences and 13 published papers.

研究分野：原子核物理学

キーワード：9Be光分解反応 $\alpha + n$ クラスター模型 複素座標スケールリング法 多体共鳴状態 仮想状態 クラスターダイポール共鳴

1. 研究開始当初の背景

私達は荷電粒子核反応データベース(NRDF)を作成し、国内の核反応データを収集・蓄積すると共に、国際的核データベース活動の中で国際核反応データベースの作成・発展に参加・寄与してきた。最近、新たな課題として核データ評価の取り組みを開始した。核データ評価の課題は、原子力分野だけでなく、宇宙における元素合成の解明や、粒子線癌治療など医療の面からもその重要性がますます高くなってきている。

私達の核データ評価研究の特徴は、軽い核を対象として、その構造研究を基礎に核反応を研究するところにある。本研究は、原子力、元素合成、癌治療などの分野から信頼できる核反応データが求められている ${}^9\text{Be}$ 核に注目し、その核構造・反応の研究を行い、信頼できる核データを求めることを目的とする。

${}^9\text{Be}$ 核は基底回転バンド($K = 3/2^-, J = 3/2^-, 5/2^-, 7/2^-$)と励起回転バンド($K = 1/2^+, J = 1/2^+, 5/2^+, 3/2^+$)が観測されている。それらの回転バンド構造は2つの α クラスターに中性子 n が付加した $\alpha+\alpha+n$ 3体クラスター模型で理解できると考えられてきた。一方、 ${}^9\text{Be}$ 核は基底状態のみが束縛状態で、他のすべての励起状態が $\alpha+\alpha+n$ 閾値より上に存在する共鳴状態であり、励起状態を調べるためには3体共鳴状態を記述することが必要である。3体共鳴状態を記述する研究はこれまで困難であったが、私達の複素座標スケールリング法の研究・発展によって容易にできるようになった。

2. 研究の目的

(1) ${}^9\text{Be}$ 核の励起回転バンドの $J = 1/2^+$ 状態が $\alpha+\alpha+n$ 3体共鳴状態であるか、あるいは $(\alpha+\alpha)$ 構造を持つ ${}^8\text{Be}$ に中性子が s 波(零軌道角運動量状態)で付け加わった共鳴状態を解明することが第1の課題である。

(2) 第2の課題は、最近、新しく行われた ${}^9\text{Be}$ 核の $\alpha+\alpha+n$ 3体光分解反応の実験で観測

された $J = 1/2^+$ 状態に対応する断面積のピークを共鳴状態あるいは仮想状態(virtual state)として説明できるか信頼できる $\alpha+\alpha+n$ 模型で答えを出すことである。

(3) 励起 $J = 1/2^+$ 状態が ${}^8\text{Be} + n$ 構造を持つ場合、中性子が s 波であるために遠心力もクーロン力が働かず、中性子の波動関数は他の共鳴状態とは異なり内部に溜まることができず、仮想状態になると考えられる。仮想状態は複素座標スケールリング法では記述できないとこれまで考えられてきた。そこで、複素座標スケールリング法で仮想状態を記述する新たな方法を確立することが第3の課題である。

3. 研究の方法

(1) 平成25年度; $\alpha + \alpha + n$ 3体共鳴状態を解き、 ${}^9\text{Be}$ のエネルギー・スペクトルを求めて観測データと比較し、すべての励起状態が $\alpha+\alpha+n$ 模型で説明できることを示す。

そのためにモンゴル国立大学のM.Odsurenの協力を得て、 $\alpha + \alpha + n$ 3体共鳴状態を求める数値計算を行う。3体問題を解く方法はこれまでの研究の中で確立してきた複素座標スケールリング法を用いて求める。複素座標スケールリング法の最近の進展については、レビュー論文(S.Aoyama, T. Myo, K. Kato and K. Ikeda, Prog. Theor. Phys. 116 (2006) 1-35.)で詳細な説明を行った。

問題は、複素運動量面上で、共鳴の位置の角度 $\theta = (1/2) \tan^{-1} (\text{Im}(E_r) / \text{Real}(E_r))$ が 45° を越えると、複素座標スケールリング法では解を求めることが難しくなることである。特に、 $J = 1/2^+$ 状態が仮想状態($\theta = 1/2$)の場合、複素座標スケールリング法では扱うことは出来ない。そこで、我々はクーロン・ポテンシャルに関する解析接続の方法を用いる。

$\alpha + \alpha + n$ 系の中性を陽子に置き換えると、核力部分は荷電独立性から変わらずクーロン力だけが付け加わることになる。斥力のクーロン・ポテンシャルは外側に壁をもたらす

ために、 $\alpha + p$ 系の $J = 1/2^+$ 状態は幅の狭い共鳴状態になり、 $\alpha + p$ 系の共鳴状態が複素座標スケーリング法で容易に求められる。次に、陽子の電荷を徐々に小さくして、クーロン・ポテンシャルを弱め、電荷をゼロにした極限で $\alpha + n$ 共鳴の位置を求める。(2) 平成 26 年度; ${}^9\text{Be}$ 核の 3 体分解反応を計算し、その反応断面積を求める。

実験で得られた ${}^9\text{Be} + n$ 光分解反応断面積を複素座標スケーリングされた $\alpha + n$ 模型で計算する。方法は上で述べたレビュー論文にある複素座標スケーリングされたグリーン関数法を用いる。この方法では、孤立した共鳴状態の固有状態だけでなく、2 線上に得られる離散化された連続状態の解を用いて断面積が計算される。得られた光分解反応断面積の計算結果と観測された実験データとの比較し、実験データが再現されることを確かめる。さらに、断面積のピーク構造と励起共鳴状態の対応を調べ、反応断面積の物理的根拠を解明する。

(3) 平成 27 年度; 2 つの α の周りの中性子の状態(分子的、原子的)を調べ、 ${}^9\text{Be}$ の低励起状態の構造を解明する。

${}^8\text{Be}$ は $\alpha + \alpha$ の 2 原子分子的構造をしている。中性子が 1 つ付け加わった ${}^9\text{Be}$ の中の中性子が α クラスタ構造をどう変えるか、逆に中性子はどのような軌道状態をとるか、明らかにする。

本研究では、 $\alpha + n$ 共鳴状態が複素座標スケーリング法を用いて解いて得られるので、共鳴状態を束縛状態と同様に期待値や遷移確率を計算することができる。そこで、得られた共鳴状態の構造を束縛状態と同じように調べ、 $\alpha - n$ クラスタ構造と中性子の運動の結合を解明する。

(4) 平成 28 年度; 複素座標スケーリング法を用いて仮想状態の記述方法の開発を行う。

仮想状態は 2 体系で現れるので、 $\alpha + n$ 模型ではなく、 ${}^8\text{Be}+n$ 状態を記述する 2 体

模型に複素座標スケーリング法を適用して仮想状態の詳細な分析を行う。

最終年度、3 年間の研究成果に基づき、 ${}^9\text{Be}$ の共鳴状態の構造と ${}^9\text{Be} + n$ 光分解反応断面積について、実験データとの比較を行い、信頼できるデータ評価を行う。

4. 研究成果

${}^9\text{Be}$ 核は基底状態以外はすべての励起状態が共鳴状態であり、どの 2 体部分系も結合状態を持たない $\alpha + n$ ボロミン系である。本研究は、 $\alpha + n$ 3 体クラスター模型と複素座標スケーリング法を用いて、 ${}^9\text{Be}$ 核の特異な性質が理解できることを示し、それに基づき信頼できる光分解反応断面積の計算結果を得た。また、閾値近傍の $1/2^+$ 状態は共鳴ではなく仮想状態であるという結果を得て、その結論の妥当性を詳細に検討した。

すなわち。本研究において 3 つの目的すべて達成することが出来た。

(1) 25 年度の成果

${}^9\text{Be}$ の励起 $1/2^+$ 状態が $\alpha + n$ 3 体共鳴状態か、 ${}^8\text{Be}+n$ 2 体仮想状態か、明らかにするため、次の 2 つの課題を実行した。

複素座標スケーリング法で求められた共鳴状態が散乱断面積にどのように影響を与えるか 2 体系で分析した。散乱位相を共鳴状態とバックグラウンドからの寄与に分解して散乱断面積を計算する新たな方法を開発し、その結果を論文()に発表した。複素座標スケーリング法を $\alpha + n$ 3 体直交条件模型に適用して、基底状態と励起 $1/2^+$ 状態を求め、E1 遷移強度の計算を行った。3 体クラスター間ポテンシャルを導入し、低エネルギー準位がよく再現されることを確かめた。 $\alpha + n$ 閾値近傍に共鳴状態は出現しないことが分かり、E1 遷移強度が励起 $1/2^+$ 状態の 3 体クラスター間ポテンシャルの強さに依存することを確認した。この結果は国際会議()で発表・報告された。

(2) 26 年度の成果

元素合成プロセスで重要な $\alpha + n$ ${}^9\text{Be} +$ 反応断面積を逆反応から評価するため、光分解反応断面積を計算した。 ${}^9\text{Be}$ の光分解反応断面積の実験で、 ${}^8\text{Be} + n$ 閾値の直ぐ上に鋭いピークが観測されているが、その値について実験の間で不一致が指摘されている。 $\alpha + n$ 模型を用いて、 ${}^9\text{Be}$ の光分解反応断面積を計算し、ピークの起源を分析した。その結果から、共鳴状態ではなく、 ${}^8\text{Be} + n$ s 波仮想状態による可能性が高いことが分かった。その研究結果は、国内での学会発表(,)を始め、国際会議(, ,)で報告され、国際的学術雑誌()に発表された。

(3) 27 年度の成果

${}^9\text{Be}$ の光分解反応の 6 MeV 以下のエネルギーで観測されるピーク構造は、主に ${}^8\text{Be} + n$ 構造を持つ共鳴状態として理解できることが示された。また、6 - 16 MeV のエネルギー領域意に観測される幅の広い光分解反応断面積の構造を分析し、その断面積は ${}^8\text{Be}(2^+) + n$ のクラスター励起によるものであることが分かった。最近の実験観測でもクラスター・ダイポール共鳴として注目されているものであり、原子核全体の集団励起による巨大ダイポール共鳴に至る前の励起としてクラスター自由度によるダイポール励起の存在が理論的に確かめられた。その結果は、学会(,), 論文()で発表された。

(4) 28 年度の成果

これまで、仮想状態は複素座標スケールリング法で固有状態として求めることが出来ないと考えられてきた。そこで、 ${}^9\text{Be}$ 基底状態と励起 $1/2^+$ 状態をシミュレートする 2 体模型を用いて、s 波仮想状態について詳細な分析を行った。その結果、複素座標スケールリング法では孤立した解として仮想状態は求められないが、位相差、散乱長などの量を通して、連続状態の複数の解にまたがって得られていることを確かめる事が出来た。さらに、連続状態密度の相互作用依存性を利用して、仮

想状態の状態密度を求め、仮想状態の極の位置を求めることが出来ることを示した。

それらの結果を学会(,)で報告すると共に、論文に投稿中である。

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 13 件)

K. Kato, M. Odsuren, Y. Kikuchi, T. Myo, V. S. Vasilevsky and N. Takibayev, Photo disintegration and Virtual State in the Complex Scaling Method, Physical Sciences and Technology, 査読有, 3 巻, 2016, 4-10, ISSN 2409-6121

Yuma Kikuchi, Myagmarjav Odsuren, Takayuki Myo and Kiyoshi Kato, Photodisintegration cross section of ${}^9\text{Be}$ up to 16 MeV in the $\alpha + \alpha + n$ three-body model, PHYSICAL REVIEW C, 査読有, 93 巻, 2016, 54605-1~8
DOI:10.1103/PhysRevC.93.054605

D. Ichinkhorloo, M. Aikawa, S. Chiba, Y. Hirabayashi and K. Kato, Low energy scattering cross sections for $n + {}^5,7\text{Li}$ reactions using the continuum discretised coupled channel method, 査読有, 93 巻, 2016, 064612-1~7
DOI:10.1103/PhysRevC.93.064612

Myagmarjav Odsuren, Yuma Kikuchi, Takayuki Myo, Masayuki Aikawa and Kiyoshi Kato, Virtual-state character of the ${}^9\text{Be}$ $1/2^+$ state in the ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ reaction, PHYSICAL REVIEW C, 査読有, 92 巻, 2015, 014322-1~6
DOI:10.1103/PhysRevC.92.014322

Takayuki Myo, Yuma Kikuchi, Hiroshi

Masui, Kiyoshi Kato, Recent development of complex scaling method for many-body resonances and continua in light nuclei, Progress of Particle and Nuclear Physics, 査読有, 79 巻, (2014), 1-56.
DOI:10.1016/j.pnpnp.2014.08.001

Takahiro Mizusaki, Takayuki Myo, and Kiyoshi Kato, A new approach for many-body resonance spectroscopy with the complex scaling method, Progress Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2014 巻, (2014), 091D01(7pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptu124

Takayuki Myo and Kiyoshi Kato, Mirror symmetry breaking in He isotopes and their mirror nuclei, Progress Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2014 巻, (2014), 083D01 (13 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptu112

M. Odsuren, K. Kato, and M. Aikawa, Analysis of Three-Body Resonances in the Complex Scaled Orthogonal Condition Model, Nuclear Data Sheets, 査読有, 120 巻, (2014), 126-128
DOI: 10.1016/j.nds.2014.07.025

Myagmarjav Odsuren, Kiyoshi Kato, Masayuki Aikawa, and Takayuki Myo, Decomposition of scattering phase shifts and reaction cross sections using the complex scaling method, PHYSICAL REVIEW C, 査読有, 89 巻, (2014), 034322-1~10
DOI: 10.1103/PhysRevC.89.034322

H. Masui, K. Kato, N. Michel, and M. Ploszajczak, Precise comparison of the

Gaussian expansion method and the Gamow shell model, PHYSICAL REVIEW C, 査読有, 89 巻, (2014), 044317-1~7
DOI: 10.1103/PhysRevC.89.044317

N. Takibayev, K. Kato, M. Takibayeva, A. Sarsembayeva, and D. Nasirova, Neutron Resonances in Few-Body Systems and the EOS of Neutron Star Crust, Few-Body Systems, 査読有, 54 巻, (2013), 1587-1590
DOI: 10.1007/s00601-013-0598-0

J. Cseh and K. Kato, ultichannel dynamical symmetry and cluster-coexistence, PHYSICAL REVIEW C, 査読有, 87 巻, (2013), 067301-1~4
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.067301

Yuma Kikuchi, Takayuki Myo, Kiyoshi Kato and Kiyomi Ikeda, Coulomb breakup reactions of ${}^{11}\text{Li}$ in the coupled-channel ${}^9\text{Li}+n+n$ model, PHYSICAL REVIEW C, 査読有, 87 巻, (2013), 034606-1~13
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.034606

〔学会発表〕(計 17 件)
加藤幾芳, 菊地右馬, 明 孝之, M. Odsuren, V. Vasilevsky, N. Takibayev, ${}^9\text{Be}$ 核における仮想状態, 日本物理第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17-20 日, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府・豊中市)

Kiyoshi Kato, Yuma Kikuchi, Myagmarjav Odsuren, Takayuki Myo, Victor S. Vasilevsky and Nurgali Takibayev, Virtual States in ${}^9\text{Be}$, Workshop on Nuclear Cluster Physics (国際会議), 2016 年 11 月 14-17 日, KGU KannamiMedia Center (神奈川県, 横浜市)

菊地右馬, Myagmarjav Odsuren, 明 孝之, 加藤幾芳, 複考座標スケ - リングされた $+n$ 3 体模型による ${}^9\text{Be}$ の励起共鳴状態の構造, 日本物理学会・2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21-24 日, 宮崎大学花木キャンパス (宮崎県・宮崎市)

Kiyoshi Kato, Yuma Kikuchi, Myagmarjav Odsuren, Takayuki Myo, Victor S. Vasilevsky and Nurgali Takibayev, Resonance or virtual state causing cross section peaks just above thresholds, Resonance and non-hermian quantum mechanics 2016 (国際会議), 2016年8月3-6日, Osaka University (大阪府、茨木市)

Yuma Kikuchi, Myagmarjav Odsuren, Takayuki Myo, Kiyoshi Kato, Photo-disintegration cross section of ^9Be up to $E = 16$ MeV in $^9\text{Be} + n$ three-body model, The 11th Int. Conf. on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (国際会議), 2016年5月23-27日, Napoli University (Napoli, Italy)

M. Odsuren, Y. Kikuchi, T. Myo, M. Aikawa, G. Khuukhenkhuu, and K. Kato, Virtual State in a Two-Body System Using the Complex Scaling Method, The 11th Int. Conf. on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (国際会議), 2016年5月23-27日, Napoli University (Napoli, Italy)

K. Kato, Photodisintegration and Virtual State in the Complex Scaling Method, III International Workshop on "Nuclear Physics and Astrophysics" (国際会議), 2016年4月14-16日, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)

Kiyoshi Kato, Many-Body Decays of Cluster States just above Threshold Energies, Clustering effects of nucleons in nuclei and quarks in multi-quark states (国際会議), 2016年3月28日-4月22日, Kavli Institute of Theoretical Physics China, Beijing University (Beijing, China)

加藤幾芳, 双極子分解反応断面積における閾値近傍のピークについて, 日本物理学会・2016年春季大会, 2016年3月19-22日, 東北学院大学 (宮城県, 仙台市)

K. Kato, Resonant States and Scattering Cross Sections, Sapporo International Workshop on Nuclear Physics (国際会議), 2015年8月27-28日, Hokkaido University, (Sapporo, Hokkaido, Japan)

K. Kato, Resonant states of many-cluster systems, International Workshop on Clusters in Nuclear Systems (国際会議), 2015年8月3-6日, Rostock University (Rostock, Germany)

加藤幾芳, $^9\text{Be}(\alpha, n)^8\text{Be}$ 反応断面積と ^9Be の $1/2^+$ 仮想状態, 日本物理学会・第70回年次大会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学早稲田キャンパス (東京都, 新宿区西早稲田)

Kiyoshi Kato, Many-Body Resonances and Continuum States above Many-Body Decay Thresholds, The 3rd International Workshop on State of the Art in Nuclear Cluster Physics (国際会議), 2014年5月26-30日, KGU Kannami Media Center (神奈川県, 横浜市)

Kiyoshi Kato, A three-body virtual state in the $^9\text{Be}(\alpha, n)^2$ reaction, International Conference on Cluster Structure of Unstable Nuclei and Its Decay (国際会議), 2014年3月21-24日, Nanjing University (Nanjing, China)

K. Kato, M. Odsuren, M. Aikawa and T. Myo, Scattering Phase Shifts of Two-Body Systems in the Complex Scaling Method, 日本物理学会・第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学湘南キャンパス (神奈川県, 平塚市)

K. Kato, Electro-magnetic dissociation of neutron-rich nuclei -- Nuclear Data Evaluation of ^9Be --, The 4th Asian Nuclear Database Development Workshop (国際会議), 2013年10月23-25日, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)

K. Kato, Scattering Problems in the Complex Scaling Method, The 5-th Int. Conf. on Contemporary Physics, ICCP-V, (国際会議), 2013年6月3-6日, Mongolia National Univ. (Ulaanbaatar, Mongolia)

〔図書〕(計 1件)

K. Kato 他、Nova Science Publishers, Inc. New York, USA, Neutron Stars: Physics, Properties and Dynamics, 2017, 274 (173-226),

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 幾芳 (KATO, Kiyoshi)
北海道大学・理学研究院・名誉教授
研究者番号: 20109416