

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 26 日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740175

研究課題名(和文) 軽い不安定核において 中間子が作るテンソル力の働きの解明

研究課題名(英文) Roles of pion-exchange potential and tensor force in light unstable nuclei

研究代表者

明 孝之(Myō, Takayuki)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20423212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：陽子と中性子が 中間子を互いに交換することで原子核は結合する。本研究ではこの 中間子交換が原子核に与える影響を調べた。特に 中間子交換が生む、等方性を破る力「テンソル力」の役割に注目した。研究代表者はテンソル力を扱う原子核模型を独自に構築しており、本研究ではその模型を適用して軽い原子核を系統的に調べた。その結果、原子核のエネルギー準位の再現において、テンソル力の役割が本質であることが判明した。他の成果として中性子が過剰、または陽子が過剰な原子核の性質を双方比較することで対称性の破れを予言した。

研究成果の概要(英文)：The nucleus is bound by the one-pion exchange potential between protons and neutrons. In this study, we investigate the role of this potential, which involves the non-central component "tensor force". We have developed the model of treating the tensor force in nuclear structure. We apply this model to investigate the systematic structures of light nuclei. The tensor force is found to play an essential role to reproduce the energy spectra of nuclei. We also predict the symmetry breaking in the structures between the proton-rich and neutron-rich nuclei.

研究分野：理論核物理

キーワード：核力 テンソル力 不安定核 テンソル最適化殻模型 共鳴 八ロー構造 鏡映対称性 高運動量

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子核は核力によって結合し、一体場的な状態や、分子的なクラスター状態など多様な構造を呈する。一方、それらの構造の形成における核力の働きは不明瞭である。理由の一つは、核力の起源である $\pi$ 中間子交換力をもたらす「テンソル力」が、非等方性を持ち、高運動量を生む特異な力であるために、理論的扱いが困難だからである。そのためテンソル力が原子核の構造に果たす役割が未知であった。この問題は「核力と核構造」という原子核物理の基本課題である。

(2) 原子核は陽子または中性子のどちらかが過剰になりバランスが崩れると、不安定となり、短寿命で核子を放出して崩壊する共鳴となる。このような極限状態にある原子核の性質は未知であり興味深い。不安定原子核の性質を知ることは原子核物理の最先端課題の一つである。

2. 研究の目的

(1) 原子核における核力、特にテンソル力の役割を解明する。そのために研究代表者はテンソル力の効果を発揮できる新しい原子核模型を先行研究にて構築した。その模型を用いて、テンソル力が原子核の構造に生む特徴を理解し、「核力と核構造」の問題を解明する。

(2) 不安定核に特徴的に現れる共鳴の性質を調べる。特に陽子または中性子が過剰な原子核の状態の予言を行う。同時に陽子過剰側と中性子過剰側の構造の比較を行い、不安定核における「鏡映対称性の破れ」を議論する。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者は、核力が持つテンソル力の効果を発揮しうる新しい原子核模型「テンソル最適化殻模型 (tensor-optimized shell model, TOSM)」を構築した。TOSMでは、原子核内において、テンソル力により結合する核子の運動を、原子核の全エネルギーに対する変分問題として頭わに解く。TOSMを用いて、核力に基づく軽い核全体の系統的な構造解析を実行する。

(2) 原子核の共鳴を理論的に扱うために、複素座標スケリング法 (complex scaling method, CSM) を用いる。原子核の模型には $\alpha$ 粒子を芯核としたクラスター模型を用い、 $\alpha$ 粒子の回りを運動する多数の陽子群、または中性子群の運動を解いて、共鳴を求める。

4. 研究成果

(1) テンソル最適化殻模型「TOSM」を用いて、核力に基づいた p 殻領域の不安定核の構造を解析した。特に、先行研究で行った He 同位体の継続として、Li 同位体に焦点を当てた。 $^5\text{Li}$  から  $^9\text{Li}$  までの基底・励起状態におけるテンソル力の働きの特徴を調べ、その結果、エネ

ルギー準位の再現に成功した。更に各状態の主成分となる配位が、テンソル力の非等方性 (テンソル演算子) と密接であることが判明した。この特徴と連動してテンソル力の寄与が各状態で決まり、テンソル力の状態依存性が生まれる。この結論は He 同位体と同様であった。図 1 に Li 同位体の場合のエネルギー準位の結果を示す。

更に核力依存性を調べるため、テンソル力を持たない有効的な核力を用いた解析も同時に行った。その結果、エネルギー準位の再現性に問題があった。これにより、エネルギー準位の理解において、テンソル力を含む核力を用いることの重要性が示された。

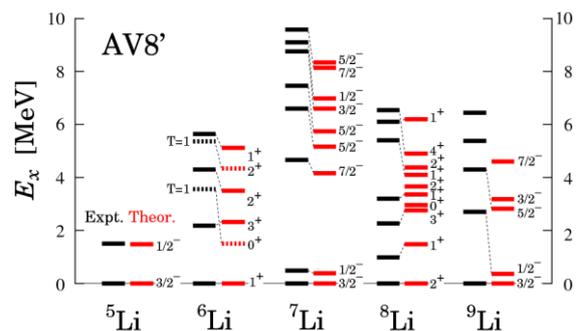


図 1 TOSM を用いた Li 同位体の励起エネルギー準位 (右が実験、左が理論)。

(2) TOSM を用いて Be 同位体の構造を調べた。Be 同位体は $\alpha$ 粒子 ( $^4\text{He}$ ) を 2 個含むため、 $\alpha$ ク

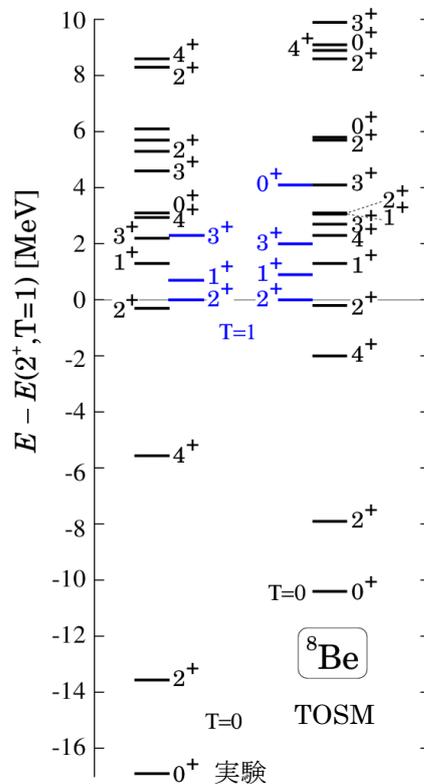


図 2  $^8\text{Be}$  のエネルギー準位。(右が実験、左が TOSM 理論)。 $2^+$ 状態 ( $T=1$ ) を基準とする。

ラスタが発達した分子的状态が期待される。解析の結果、 ${}^8\text{Be}$  において、基底状態近傍には 2 個の  $\alpha$  クラスタの形成を示唆する結果が得られた。一方、高励起状態には一体场的な状態が得られ、実験の傾向と合致する。全体的なエネルギー準位の並びは実験値を再現し、TOSM の有効性が示された。

この結果は、 ${}^8\text{Be}$  には、クラスタの状態と一体场的な状態が、異なるエネルギー領域に存在することを示す。同時に、TOSM は一体场的な状態の記述には成功するが、 $\alpha$  粒子が空間的に発達した分子的なクラスタ状態については、束縛エネルギーの不十分さが示された。これを契機にクラスタ構造を記述する新しい原子核模型の構築を検討した。 ${}^8\text{Be}$  と同様の構造の 2 面性は  ${}^9\text{Be}$  でもみられ、Be 同位体における系統性が得られつつある。

(3) テンソル力は原子核を結合させる際に、核子に高運動量をもたらす。その検証のために、大阪大学核物理研究センターのグループによって  ${}^{16}\text{O}$  から中性子を剥ぎ取り、その運動量分布を測定する実験が行われた。結果を図 3 に示す。運動量が高くなるにつれ、断面積が増加することが確認された。この傾向を TOSM で分析したところ、テンソル力をもたらす高運動量成分の存在により、実験の傾向を再現することが分かった。これにより原子核におけるテンソル力の効果が検証された。

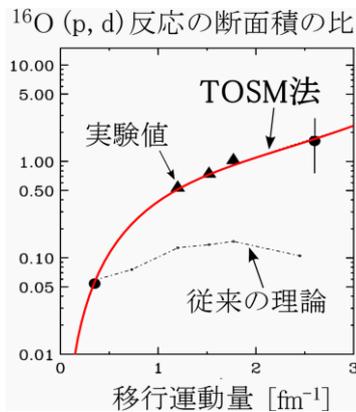


図 3 TOSM による  ${}^{16}\text{O}(p, d)$  反応の解析

(4) 複素座標スケールリング法 CSM を用いて、不安定核に現れる共鳴の予言を行った。理論的には最大で 5 体に崩壊する共鳴を扱う。例えば  ${}^8\text{He} = \alpha$  粒子 + 4 中性子である。その範囲で中性子過剰な He 同位体の共鳴のエネルギー準位を予言し、各状態の配位の特徴を分析した。同様に陽子過剰核の解析も  ${}^6\text{Be}$ ,  ${}^7\text{B}$ ,  ${}^8\text{C}$  と行った。図 4 に He 同位体とその鏡映対称となる陽子過剰核のエネルギー準位の比較を示す。分析結果から不安定核における鏡映対称性を調べた。その結果、分光学的因子と核半径において、クーロン力により対称性が破れることが判明した。今後の実験的な検証が期待される。図 5 に  ${}^8\text{He}$  と  ${}^8\text{C}$  の 2 番目の  $0^+$  状態の半径の値を示す。 ${}^8\text{He}$  と比べて  ${}^8\text{C}$  の半径がクー

ロン障壁のために縮まることが分かる。

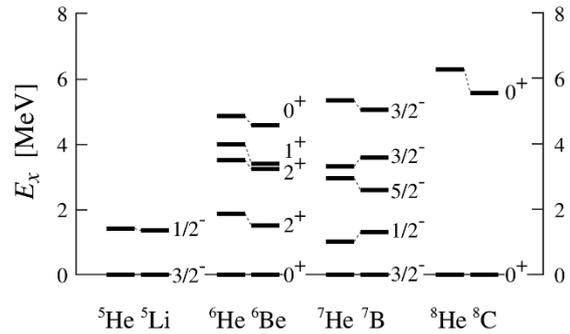


図 4 He 同位体とその鏡映核のエネルギー準位

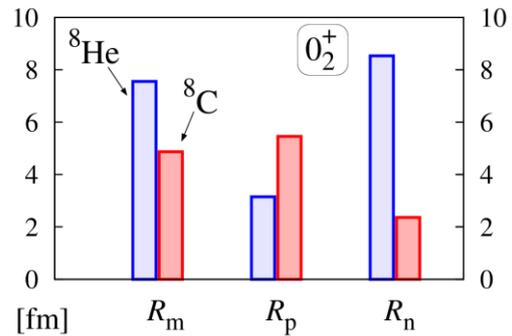


図 5  ${}^8\text{He}$  と  ${}^8\text{C}$  の 2 番目の  $0^+$  状態における半径の比較 (左から質量半径、陽子半径、中性子半径)。

(5) 原子核分野において、CSM は原子核の共鳴・連続状態を記述する有効な理論として認識されつつある。研究代表者はこれまでの CSM の成果をまとめたレビュー論文を出版した。軽い不安定核において多粒子崩壊をする共鳴の構造、中性子ハロー核の分解反応の機構、原子核のエネルギー準位密度における共鳴・連続状態の寄与と散乱位相差との関係などを論文にまとめた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 39 件)

- ① Shell and alpha cluster structures in  ${}^8\text{Be}$  with tensor-optimized shell model, Takayuki Myo, Atsushi Umeya, Kaori Horii, Hiroshi Toki and Kiyomi Ikeda, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2014) 033D01, 査読有, DOI:10.1093/ptep/ptu012
- ② Mirror symmetry breaking in He isotopes and their mirror nuclei, Takayuki Myo, Kiyoshi Kato, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2014) 083D01, 査読有, DOI:10.1093/ptep/ptu112

- ③ Recent development of complex scaling method for many-body resonances and continua in light nuclei, Takayuki Myo, Yuma Kikuchi, Hiroshi Masui, Kiyoshi Kato, Progress in Particle and Nuclear Physics 79 (2014) 1-56, DOI: 10.1016/j.pnnp.2014.08.001
- ④ Decomposition of scattering phase shifts and reaction cross sections using the complex scaling method, Myagmarjav Odsuren, Kiyoshi Kato, Masayuki Aikawa and Takayuki Myo, Physical Review C 89 (2014) 034322, DOI:10.1103/PhysRevC.89.034322
- ⑤ Interplay between the  $0_2^+$  resonance and the nonresonant continuum of the drip-line two-neutron halo nucleus  $^{22}\text{C}$ , Kazuyuki Ogata, Takayuki Myo, Takenori Furumoto, Takuma Matsumoto, and Masanobu Yahiro, Physical Review C 88 (2013) 024616, DOI:10.1103/PhysRevC.88.024616
- ⑥ Probing effect of tensor interactions in  $^{16}\text{O}$  via (p,d) reaction H.J. Ong, I. Tanihata A. Tamii, T. Myo, K. Ogata, M. Fukuda, K. Hirota, K. Ikeda, D. Ishikawa, T. Kawabata, H. Matsubara, K. Matsuta, M. Mihara, T. Naito, D. Nishimura, Y. Ogawa, H. Okamura, A. Ozawa, D.Y. Pang, H. Sakaguchi, K. Sekiguchi, T. Suzuki, M. Taniguchi, M. Takashina, H. Toki, Y. Yasuda, M. Yosoi, J. Zenihiro, Physics Letters B 725 (2013) pp.277-281, 査読有, DOI:10.1016/j.physletb.2013.07.038
- ⑦ Coulomb breakup reactions of  $^{11}\text{Li}$  in the coupled-channel  $^9\text{Li}+n+n$  model, Yuma Kikuchi, Takayuki Myo, Kiyoshi Kato, and Kiyomi Ikeda, Physical Review C 87 (2013) 034606, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevC.87.034606
- ⑧ Tensor-optimized shell model for the Li isotopes with a bare nucleon-nucleon interaction, Takayuki Myo, Atsushi Umeya, Hiroshi Toki, and Kiyomi Ikeda, Physical Review C 86 (2012) 024318, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevC.86.024318
- ⑨ Tensor-optimized few-body model for s-shell nuclei, Kaori Horii, Hiroshi Toki, Takayuki Myo, Kiyomi Ikeda, Progress of Theoretical Physics 127 (2012) pp1019-1032, 査読有, DOI:10.1143/PTP.127.1019
- ⑩ Five-body resonances of  $^8\text{C}$  using the complex scaling method, Takayuki Myo, Yuma Kikuchi and Kiyoshi Kato, Physical Review C 85 (2012) 034338, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevC.85.034338
- ⑪ Resonances and Continuum States, and Energy Spectra of Light Drip-Line Nuclei, Takayuki Myo, Progress of Theoretical Physics Supplement 196 (2012) pp211-218, 査読有, DOI:10.1143/PTPS.196.211
- [学会発表] (計34件)
- ① テンソル最適化殻模型による  $^9,^{10}\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$  におけるテンソル力の役割 明孝之, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2014年3月21日
- ② Role of tensor force in light nuclei studied with tensor-optimized shell model, Takayuki Myo, International Conference on Cluster structure of unstable nuclei and its decay, 南京大学, 中国, 2014年12月1-4日
- ③ Role of tensor force in Be isotopes with tensor-optimized shell model, Takayuki Myo, 第4回日米物理学会合同核物理分科会, ハワイ島, アメリカ, 2014年10月7-11日
- ④ Role of tensor force in light nuclei with tensor-optimized shell model, Takayuki Myo, SOTANCP3, 関東学院大学 KGU 関内メディアセンター, 横浜, 2014年5月29日
- ⑤ テンソル最適化殻模型による Be 同位体におけるテンソル力の役割 明孝之, 日本物理学会第69回年次大会, 東海大学, 2014年3月27日
- ⑥ Many-body resonances and continuum states in He isotopes and their mirror nuclei, Takayuki Myo, RIKEN HPCI workshop on "Multi-particle resonances and astrophysical reaction problems in few-body systems" 理化学研究所, 和光市, 2013年10月21-25日
- ⑦ テンソル最適化殻模型による  $^{12}\text{C}$  におけるテンソル力の役割 明孝之, 日本物理学会2012年秋季大会, 高知大学, 2013年9月21日

- ⑧ 非束縛核  $^8\text{C}$  の 5 体共鳴状態の構造, 明孝之, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学, 2013 年 9 月 20 日
- ⑨ Importance of the tensor forces in light nuclei studied with TOSM, Takayuki Myo, RCNP Workshop on the Importance of Tensor Interactions in Nuclei and Hadron structure, 大阪大学核物理研究センター, 2013 年 7 月 11-12 日
- ⑩ テンソル最適化殻模型による  $^{12}\text{C}$  と  $^8\text{Be}$  におけるテンソル力の役割, 明孝之, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月 26-29 日
- ⑪ Many-body resonances in He isotopes and those mirror nuclei, Takayuki Myo, Resonances and non-Hermitian systems in quantum mechanics (量子力学における「共鳴状態」と非エルミート系), 京都大学基礎物理学研究所, 2012 年 12 月 11-13 日
- ⑫ Role of tensor force in light nuclei with tensor-optimized shell model, Takayuki Myo, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), 福岡コンベンションセンター, 福岡市, 2012 年 8 月 20-25 日
- ⑬ 非束縛核  $^7\text{B}$  の 4 体共鳴状態の構造, 明孝之, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月 11 日
- ⑭ テンソル最適化反対称化分子動力学による核構造の解析, 明孝之, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月 13 日
- ⑮ Role of tensor force in light nuclei with tensor-optimized shell model, Takayuki Myo, 10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster12), Debrecen, Hungary, 2012 年 9 月 24-28 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究協力者

土岐 博 (TOKI, Hiroshi)  
大阪大学・核物理研究センター・名誉教授  
研究者番号: 70163962

池田 清美 (IKEDA Kiyomi)  
理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員研究員  
研究者番号: 40011548

梅谷 篤史 (UMEYA Atsushi)  
日本工業大学・共通教育系・准教授  
研究者番号: 20454580

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