

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月28日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654026

研究課題名（和文） “Brueckner-AMD” による軽い核の構造変化の現実的核力からの解明

研究課題名（英文） Study of Structure Change of Light Nuclei Based on “Brueckner-AMD” for Realistic Nuclear Force

研究代表者

加藤 幾芳 (KATO Kiyoshi)

北海道大学・大学院理学研究院・特任教授

研究者番号：20109416

研究成果の概要（和文）：

「原子核におけるクラスター構造とG行列有効核力の相互規定性」を明らかにするために、「現実的核力に基づいて構築されたG行列有効相互作用によるクラスター構造状態形成の機構」を研究してきた。2010年度は $^8\text{Be}$ の $\alpha$ - $\alpha$ クラスター構造がエネルギー的に安定化するメカニズムを核力のテンソル力の状態依存性によって説明されることを示し、2011年度は現実的核力のもとで $^{12}\text{C}$ 核における殻構造状態を持つ基底状態と同時に励起 $0^+$ 状態の $3\alpha$ クラスター構造状態が閾値近傍に出現することを世界に先駆けて示した。

研究成果の概要（英文）：

In order to understand “interdependence of the G-matrix interaction and the cluster structure in nuclei”, we have studied the mechanism of clustering of nuclear states based on the G-matrix interaction for a realistic nuclear force. In 2010, we have shown that the  $\alpha$ - $\alpha$  cluster structure of the  $^8\text{Be}$  nucleus can be explained by the state-dependence of the tensor force. In 2011, it has been shown first in the world that both of the shell structure in the ground state and the  $3\alpha$  cluster structure in the excited  $0^+$  state of  $^{12}\text{C}$  can be reproduced by the Brueckner-AMD calculation based on the realistic nuclear force.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	0	1,300,000
2011年度	600,000	180,000	600,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	180,000	2,080,000

研究分野： 数理系科学

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：第一原理計算、Brueckner-AMD、クラスター構造、構造変化、有効相互作用、テンソル力

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 現実的核力は近距離領域に強い特異性を持ち、また、パイ中間子交換による強い状態依存性をもたらすテンソル力成分を持っている。そのため、模型波動関数では現実的核

力を用いることが出来ず、有効相互作用を用いた模型研究がなされてきた。有効相互作用は基本的に実験・観測データに基づいて決め

られるため、一つの模型空間と有効相互作用で説明できる状態に限界が生ずることを避けられない。一方、最近、不安定原子核の実験的研究が進展し、実験データが存在しない不安定核の性質を解明して理解することが必要になってきており、第一原理計算の必要性が極めて高くなってきている。そして、現実的核力を用いた第一原理計算による原子核の理論的研究が進展来ている。しかし、現在の第一原理計算では、軽い核に普遍的に観測されるクラスター構造状態を再現することに成功していない。

(2) 一方、日本のクラスター研究は著しく進展し、「反対称化分子動力学 (AMD)」(PRC 52 (1995), 628) は広い波動関数の空間を持ち、殻模型状態だけでなく分子的構造状態も記述・再現することに成功してきた。しかし、「反対称化分子動力学 (AMD)」は有効相互作用による計算であり、現実的核力による研究への発展が焦眉の課題であった。

(3) 我々は、現実的核力にもとづく AMD 計算を可能にする新しい枠組み「Brueckner-AMD」の定式化に成功し、軽い核の広い領域に渡る「Brueckner-AMD」の計算を可能にした。(T. Togashi and K. Kato, PTP 117(2007), T. Togashi, T. Murayama and K. Kato, PTP 121(2009), 299)

## 2. 研究の目的

「Brueckner -AMD」の研究の基本課題を「クラスター構造と G 行列有効核力の相互規定性 (依存性) の実践的解明」に置き、現実的核力に基づき構築された「G 行列有効相互作用によるクラスター構造状態の導出の道を確認する」ことをこの研究の目標としてきた。その目的を達成するため、「Brueckner -AMD」を用いて、 $^{12}\text{C}$  核における殻構造状態を持つ基底状態と同時に励起  $0^+$  状態の  $3\alpha$  クラスター構造状態を解きあげ、これを世界に先駆けて行うが課題である。

## 2. 研究の方法

(1) 計画：前半と後半に分け、前半は① $^8\text{Be}$  における  $\alpha$ - $\alpha$  構造をもたらす G 行列有効相互作用を取り組み、後半に ② $^{12}\text{C}$  における基底状態における殻構造と励起状態における  $3\alpha$  クラスター構造をもたらす構造依存の G 行列有効相互作用、を主に取り組み。

(2) 方法：研究の主な遂行は研究代表者 (加藤) と研究協力者 (富樫) が行う。数値計算を行う上で大学院生 (1 名) の協力を求める。また、研究協力者 (池田) とは、緊密に研究情報の交換を行い、国外の第一原理計算による研究との研究の位置づけや、国内の研究者との情報交換などを議論する。本研究での成果について、国内、国外の研究者と議論し、情報交換を行うため国際会議での報告・発表

を積極的に行う。

## 3. 研究成果

(1) 最新の現実的相互作用 ( $\text{AV8}'$ ) を用いて、 $^8\text{Be}$  における  $\alpha$ - $\alpha$  構造をもたらす G 行列有効相互作用の研究を行った結果、一中心原子軌道 (殻模型構造) 状態におけるテンソル力の抑制効果のためにクラスター構造がエネルギー的に低くなることを定量的に示すことができた。AMD 波動関数は、クラスター構造の形成道筋を 1 粒子波動関数の構造変化「一中心原子軌道状態 (殻模型構造) → 二中心分子軌道状態 (クラスター構造) → 二中心原子軌道状態 (2 核分子的構造)」として明確に記述することが出来るを示した。

「Brueckner-AMD」によって、その道筋に沿って G 行列相互作用が決定され、その G 行列相互作用によって道筋が決定される、という「構造と相互作用の自己無同着的機構」が解明することができ、その成果を国際会議での発表および論文として公表してきた。

(2) 現実的核力 ( $\text{AV8}'$ ) のもとで、 $^{12}\text{C}$  核における殻構造状態を持つ基底状態と同時に励起  $0^+$  状態の  $3\alpha$  クラスター構造状態を世界に先駆けて求めることを行った。3 つの  $\alpha$  クラスターが取りうるさまざまな幾何学的配位を設定して、各配位での G 行列有効相互作用を求めた。さらに、その G 行列有効相互作用を用いて、生成座標法方程式を解きあげ、 $^{12}\text{C}$  核の基底状態及び励起状態を求めた。その結果は、励起  $0^+$  状態は  $3\alpha$  閾値 (7.367 MeV) の近傍 (7.654 MeV) に観測される  $0^+$  状態よりおよそ 3 MeV 程度高く得られた。この 3 MeV 程度高いエネルギー値の問題を解決するためには  $\alpha$ - $\alpha$  間距離が (5 fm より) 大きな配位を取り込むことを行った。その計算で、5 fm より大きな  $\alpha$ - $\alpha$  間距離を持った配位で G 行列有効相互作用を 5 fm で求めた G 行列を距離依存性ないとして用いて行った。このクラスター間距離が大きな状態での G 行列が求め方が今後の課題になった。

## 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 10 件)

①Takayuki Myo, Yuma Kikuchi and Kiyoshi Katō, Five-body resonances of  $^8\text{C}$  using the complex scaling method, Physical Review C, 査読有, Vol. 85, 2012, 034338-1-8, DOI: 10.1103/PhysRevC.85.034338.

②Yuma Kikuchi, Nozomi Kurihara, Atsushi Wano, Kiyoshi Kato, Takayuki Myo and Masaaki Takashina, Three-body model analysis of  $\alpha + d$  elastic scattering and the  ${}^2\text{H}(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$  reaction in complex-scaled solutions of the Lippmann-Schwinger equation, Physical Review C, 査読有, Vol.84, 2011, 064610-1-10, DOI:10.1103/PhysRevC.84.064610.

③T. Matsumoto, D. Ichinkhorloo, Y. Hirabayashi, K. Katō, and S. Chiba, Systematic description of the  ${}^6\text{Li}(n, n'){}^6\text{Li}^* \rightarrow d + \alpha$  reactions with the microscopic coupled-channels method, Physical Review C, 査読有, Vol.83, 2011, 064611-1-6, DOI: 10.1103/PhysRevC.83.064611

④T. Yoshida, N. Itagaki and K. Katō, Symplectic structure and monopole strength in  ${}^{12}\text{C}$ , Physical Review C, 査読有, vol. 83, 2011, 024301-1-8, DOI: 10.1103/PhysRevC.83.024301.

⑤Yuhei Yamamoto, Tomoaki Togashi and Kiyoshi Katō, BRUECKNER-AMD STUDY OF LIGHT NUCLEI, International Journal Modern Physics E, 査読有, vol. 20, 2011, 863-869, DOI: [10.1142/S021830131101885X](https://doi.org/10.1142/S021830131101885X).

⑥Yuma Kikuchi, Kiyoshi Katō, Takayuki Myo, Masaaki Takashina and Kiyomi Ikeda, Two-neutron correlations in  ${}^6\text{He}$  in a Coulomb breakup reaction, Physical Review C, 査読有, Vol.81, 2010, 044308-1-8, DOI: 10.1103/PhysRevC.81.044308.

⑦Kazuyuki Yamamoto, Kiyoshi Katō, Takahiro Wada and Masahisa Ohta, Effect of Uncertainties in Nuclear Reaction Rate on Nucleosynthesis Paths, Progress of Theoretical Physics, 査読有, vol.123, 2010, 1029-1039, DOI : 10.1143/PTP.123.1029.

⑧Takayuki Myo, Ryosuke Ando and Kiyoshi Katō, Five-body resonances of  ${}^8\text{He}$  using the complex scaling method, Physics Letters B, 査読有, Vol.691, 2010, 150-155, Doi:[10.1016/j.physletb.2010.06.034](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2010.06.034).

⑨Takuma Matsumoto, Kiyoshi Katō, and Masanobu Yahiro, New description of the four-body breakup reaction, Physical Review C, 査読有, Vol. 82, 2010, 051602-1-5,

DOI: 10.1103/PhysRevC.82.051602.

⑩Yuhei Yamamoto, Tomoaki Togashi and Kiyoshi Katō, Tensor Force Effects on  $\alpha - \alpha$  Clustering of  ${}^8\text{Be}$ , Progress of Theoretical Physics, 査読有, Vol.124, 2010, 315-330, DOI : 10.1143/PTP.124.315.

[学会発表] (計 6 件)

①Kiyoshi Katō, Unified Study of Nuclear Structure and Reaction, International workshop on Recent Development of Nuclear Physics, 2011.10.24, Hokkaido University (Japan).

②Kiyoshi Katō, Unified Description of Bound and Unbound States, and Astrophysical Reactions, International Scientific Workshop "Nuclear Physics and Nuclear Astrophysics - International cooperation", 2011.9.27, Kazakh National Pedagogical University(Kazakhstan).

③Kiyoshi Katō, History of JCPRG and JSPS Program, 2<sup>nd</sup> Asian Nuclear Reaction Database Development Workshop, 2011.9.5, Beijing Phoenix Palace Hotel (China).

④Kiyoshi Katō, Bruckner-AMD Study of Light Nuclei, International EFES-IN2P3 conference Many Body Correlations from Dilute to Dense Nuclear Systems, 2011.2.15, パリ大学 (フランス) .

⑤Kiyoshi Katō, Bruckner-AMD Study of Light Nuclei, Second International Ulaanbaatar Conference on Nuclear Physics and Applications, 2010.7.27. モンゴル国立大学 (モンゴル) .

⑥Kiyoshi Katō, Bruckner-AMD Study of Light Nuclei, 2nd Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics" SOT ANCP2, 2010.5.26, ブラッセル自由大学(ベルギー) .

[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  
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 幾芳 (KATO KIYOSHI)  
北海道大学・大学院理学研究院・特任教授  
研究者番号：20109416

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし