

平成 30 年 6 月 23 日現在

機関番号：32704  
 研究種目：基盤研究(C) (一般)  
 研究期間：2014～2017  
 課題番号：26400283  
 研究課題名(和文) 軽い核におけるクラスターガスの状態の構造研究

研究課題名(英文) Cluster-gas-like states in light nuclei

研究代表者

山田 泰一 (YAMADA, TAIICHI)

関東学院大学・理工学部・教授

研究者番号：70200722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：クラスターガス状態という新しい原子核の存在形態の広がりや深さを解明するために、典型的なガス状態である $^{12}\text{C}$ ホイル状態に中性子が結合した $^{13}\text{C}$ と、 $\Lambda$ 粒子が結合した $^{13}\Lambda\text{C}$ の構造分析を中心に、関連課題も含めて研究を進めた。通常核とハイパー核における4体系( $^{13}\text{C}=3\alpha+n$ および $^{13}\Lambda\text{C}=3\alpha+\Lambda$ )の動力学的考察により、クラスターガス状態が両者に出現することを発見した。後者では $\Lambda$ が一つの $\alpha$ に結合した「 $5\alpha+2\Lambda$ 」3体ガス状態が、前者では「 $3\alpha+n$ 」4体ガス状態が出現することを見出した。さらに、クラスター自由度の考慮により、 $^{13}\text{C}$ の $1/2^-$ 状態間の $\text{C}0$ 遷移強度の問題が解決されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The basic purpose of the present project was to disclose the novel properties of the cluster-gas-like states in light nuclei. The typical one is the Hoyle state of  $^{12}\text{C}$  ( $2^{\text{nd}} 0^+$ ) with an  $\alpha+\alpha+\alpha$  gas-like structure. We have focused on studying the structures of  $^{13}\text{C}$  and  $^{13}\Lambda\text{-Carbon}$  with  $\alpha+\alpha+\alpha+n$  and  $\alpha+\alpha+\alpha+\Lambda$  models, respectively, together with the related topics. It was confirmed that the cluster-gas-like states exist in both  $^{13}\text{C}$  and  $^{13}\Lambda\text{-Carbon}$ . In the hypernucleus a “ $(5-\Lambda\text{-He})+\alpha+\alpha$ ” gas-like state ( $1/2^+$ ) appears just below its threshold, where the  $\Lambda$  particle is bound to one of the three alphas. On the other hand, a “ $\alpha+\alpha+\alpha+n$ ” gas-like state ( $1/2^+$ ) comes out around its threshold in  $^{13}\text{C}$ . In addition, the  $\text{C}0$  (longitudinal electric monopole) transition strengths in  $^{13}\text{C}$ , which is a longstanding problem in  $^{13}\text{C}$ , was resolved by taking into account cluster degree of freedom in the relevant  $1/2^-$  states.

研究分野：数物系科学

キーワード：クラスターガス状態 アルファ凝縮状態 ホイル状態 ホイル類似状態 モノポール遷移  $\text{C}0$ 遷移強度  
ハイパー核

### 1. 研究開始当初の背景

強相関係である原子核には、平均場描像では理解できない様々な多粒子相関が現れるが、クラスター状態はその代表例である。最近クラスターガス状態という新しい存在形態が明らかにされ、宇宙における元素合成で重要な役割をしている<sup>12</sup>C ホイル状態(炭素12原子核の2<sup>nd</sup> 0+状態)はその典型例である。このホイル状態では粒子の一体場描像が良く成立し、「最低軌道の0S軌道に粒子が3個占有した配位を70%持ったクラスターガスの凝縮の状態である」ことが代表者らの研究などにより分かっている。さらに、<sup>12</sup>Cから1個陽子を抜いたボロン11原子核(<sup>11</sup>B)においても、クラスター凝縮的な状態が出現することが理論的に示唆されている。

一方、酸素16核(<sup>16</sup>O)の構造については大きな進展があった: 4直交条件模型により、基底状態を含めて、4閾値近傍までの、励起エネルギーで約15MeVまでの6つの0+状態のエネルギー準位、崩壊幅、単極遷移強度を全て理解することが初めて可能となった。特に6番目の0+状態がホイル状態と同様に4ガス凝縮的な状態であることが示された(ホイル類似状態)。この構造理解は以下に述べるように、代表者らの研究であるアイソスカラー型単極子強度関数の分析により、理論的・実験的に一層強固に裏づけされて、さらに大きな成果が得られることとなった。

原子核の単極子(モノポール)励起は巨大共鳴状態として中重核領域で系統的に観測され、和則のほぼ100%を持つ。この巨大共鳴状態は1粒子1空孔状態のコヒーレントな状態として記述され、強度を含めて平均場理論に基づく乱雑位相近似計算(RPA)で良く記述することができる。しかし、質量数が小さくなると、この単極子強度はエネルギー的に分散してくることが知られている。典型例として<sup>16</sup>Oのアイソスカラー型モノポール強度は50MeVを超える広いエネルギー領域に分散している。この強度関数に対して、相対論および非相対論に基づいた平均場理論計算が行われているが、比較的エネルギーが高い領域(約16MeVから50MeV)のデータを近似的に再現するが、低エネルギー領域(約16MeV以下)の離散的な強度は定性的ですら再現は困難であるという大きな問題があった。

代表者らはこの問題に対して、低エネルギー領域の離散的な単極子強度はクラスター自由度から生じており、クラスター模型により強度を含めて見事に再現されることを初めて示した(T. Yamada et al., Physical Review C 85, 034315 (2012))。さらに、平均場的な構造を持つ基底状態に対して、アイソスカラー型単極子演算子が平均場的な状態とクラスター的な状態を同時に励起する機構を理論的に明らかにした。さらに、軽い核では平均場の状態はエネルギー的に高い領域に強度を主に持ち、クラスター的な状態は

比較的低いエネルギー領域で励起されることを示した(T. Yamada et al., Progress Theoretical Physics 120, 1139 (2008))。これらの研究により、原子核において平均場構造と質的に異なるクラスター状態を実験的に確定するための有効な物理量の一つがアイソスカラー型単極子強度であり、軽い核においてクラスター的な状態を実験的に探る上で重要な物理量であるという認識が得られたことは、非常に大きな研究成果であった。

### 2. 研究の目的

原子核のクラスターガス状態はどの位の拡がりや深さを有するのであるか? 本研究計画の目的はまさにこの点を追究すべく、これまでの<sup>12</sup>Cや<sup>16</sup>Oにおける研究成果を基盤にして、p殻領域の非4n核の代表として、ホイル状態に中性子が結合した炭素13原子核(<sup>13</sup>C)、さらに粒子が結合した炭素13ラムダハイパー核(<sup>13</sup>ΛC)の構造分析を至上課題とし、関連する他の軽い核の構造分析などを目指した。また、研究計画の後半では、現実的核力による核物質の新しい計算方法である、テンソル最適化フェルミ球法(TOFS)の理論の枠組みの構築を目的とした。この研究は低密度核物質においてクラスターガス状態と密接な関係を有する。

### 3. 研究の方法

<sup>16</sup>Oや<sup>12</sup>Cなどの構造研究で成功を収めた半微視的模型である直交条件模型(OCM)に基づいて、殻模型配位、クラスター配位、クラスターガス配位など広い模型空間を張ることができるガウス関数展開法を組み合わせた4体模型3α+nにより、<sup>13</sup>Cの構造分析を行った。この方法の重要な点は微視的模型の場合クラスター閾値の再現は難しいが、直交条件模型はこの再現が容易であり、しかも反対称化の効果的近似的に充分に取り入れて構造計算が可能であるということである。

一方、ハイパー核(<sup>13</sup>ΛC)に対しては、新しいクラスター波動関数であるTHSR波動関数の枠組みを、ハイペロンを含むハイパー原子核の構造分析ができるように拡張した「ハイパーTHSR」波動関数を用いて分析を行った。

現実的核力による核物質の新しい計算方法である、テンソル最適化フェルミ球法(TOFS)の理論の枠組みに関しては、ベキ級数型の相関関数を持つ核物質の波動関数を用いる場合のクラスター展開法の開発とその有効性について研究を進めた。

### 4. 研究成果

(1) <sup>13</sup>Cにおけるクラスターガス状態を調べるために、非常に広汎な模型空間を有する、ガウス関数展開法に基づいた4体直交条件模型3α+nにより、構造分析を行った。この模型空間は部分空間として、<sup>12</sup>C原子核の3α模型空間を含むが、この模型は基底回転帯状態

の重要な模型空間を持ち、さらにホイル状態 ( $2^{nd} 0^+$ 状態) 以外に、最近の実験で示された  $3\alpha$  鎖状状態や高次節状態を良く記述するものである。分析の結果、 $3\alpha + n$  の閾値近傍まで存在する3つの励起  $1/2^-$  状態がクラスターの構造 ( ${}^9\text{Be} + \alpha$  構造) を持ち、さらに C0 強度 (longitudinal electric monopole strength) とアイソスケーラー型モノポール強度を同時に再現することを初めて示すことができた。前者の C0 強度は殻模型では一桁以上小さくなって説明が難しい問題であったが、クラスター自由度を考えることにより再現できることを明らかにした。一方、 $1/2^+$  状態についても構造分析を行い、1番目の  $1/2^+$  状態が中性子ハロー的な構造を持つことを初めて示して、実験で示唆されている結果を理論的に実証した。さらに、 $3\alpha + n$  閾値近傍の  $1/2^+$  状態がホイル類似構造を持つことを明らかにした。Physical Review 誌に掲載された。

(2)  ${}^{12}\text{C}$  のホイル状態や基底回転帯状態などを単一の模型波動関数で良く記述する THSR 波動関数の枠組みを拡張して、原子核に  $\Lambda$  粒子が結合した  $\Lambda$  ハイパー核を取り扱う「ハイパー-THSR」の枠組みを構築した。まずはこの枠組みをベリウム 9 ラムダハイパー核 ( ${}^9\Lambda\text{Be}$ ) に適用し、基底回転帯状態がハイパー-THSR 波動関数で良く記述できることを見出した。従来型のクラスター模型計算では基底関数の重ね合わせが基底回転帯状態の記述には必要不可欠であったが、ハイパー-THSR では単一の模型波動関数で記述できるという結果はこの枠組みのパワーを示すものである。Progress of Theoretical and Experimental Physics 誌に掲載された。

次に、このハイパー-THSR の枠組みを  $3\alpha + \Lambda$  模型に基づいて  ${}^{13}\Lambda\text{C}$  の構造分析に適用した。THSR 波動関数は  ${}^{12}\text{C}$  のホイル状態以外に、 $3\alpha$  鎖状状態や高次節状態を単一の波動関数で良く記述する。 ${}^{13}\Lambda\text{C}$  の先行研究では  ${}^{12}\text{C}$  のホイル状態に  $\Lambda$  粒子が結合すると、引力的な  $\Lambda N$  相互作用により、ホイル状態の半径が縮まることが言われていたが、ハイパー-THSR の枠組みではガスの性質が完全に消えて、 ${}^9\Lambda\text{Be} + \alpha$  クラスター構造が出現することが分かった。しかし、その代わりに  ${}^5\Lambda\text{He} + 2\alpha$  の3体ガスの状態がこの閾値近傍に出現したり、 $3\alpha$  鎖状状態がエネルギー的に安定化したりするなど、 $3\alpha$  と  $\Lambda$  粒子からなる4体系の動力学に関する興味深い結果が得られた。Physics Letter B 誌に掲載された。

(3) THSR 波動関数を用いた  ${}^{20}\text{Ne}$  と  ${}^9\text{Be}$  の構造分析を行い、前者の反転 2 重項および後者の基底回転帯状態がそれぞれ単一の THSR 波動関数で良く記述できることを示した。特に前者の  ${}^{20}\text{Ne}$  の反転 2 重項の研究成果は先行研究での  ${}^{16}\text{O} + \alpha$  ダンベル型描像 (局在化描像) ではなく、非局在型の描像が成立していることを明らかにし、従来の描像を覆したと言う意味で大きな発見であった。さらに、

${}^{10}\text{Be}$  や  ${}^9\text{B}$  に THSR 波動関数を用いた構造研究を進めて、これらの原子核においても単一の THSR 波動関数で記述できることを発見し、非局在的描像がクラスター状態の本質であることを見出した。これらの研究成果は Physical Review 誌などに掲載された。

(4) 核力による CP 対称性の破れを  ${}^{13}\text{C}$  で評価するために、 ${}^{13}\text{C}$  の構造を良く記述する  $3\alpha + n$  直交条件模型を用いて分析を行い、パリティ混合の効果とその機構の詳細な分析を行った。Physical Review 誌に掲載された。

(5)  ${}^{212}\text{Po}$  における崩壊の問題について、4 体相関を頭に記述できる THSR 波動関数に基づく分析を行い、崩壊幅の実験値をよく再現することを示した。Physical Review 誌に掲載された。

(6) 現実的核力から核物質計算を行う新しい枠組みである「テンソル最適化フェルミ球」法を開発した。この枠組みでは核物質の波動関数をベキ級数型の相関関数で記述するが、この場合必要となるクラスター展開法の開発と AV4 核力を用いた数値計算を行った。日本物理学会などで発表した。

## 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)

(1) Q. Zhao, Z. Ren, M. Lyu, H. Horiuchi, Y. Funaki, G. Ropke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, B. Zhou, Investigation of the  $9\text{B}$  nucleus and its cluster-nucleon correlations, Physical Review C, Vol. 97, (2018) 054323-1 ~ 054323-7, 査読有

(2) M. Lyu, M. Isaka, T. Myo, H. Toki, K. Ikeda, H. Horiuchi, T. Suhara, T. Yamada, Hybridization of tensor-optimized and high-momentum antisymmetrized molecular dynamics for light nuclei with bare interaction, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2018, 011D01-1 ~ 011D01-9, 査読有

(3) T. Myo, H. Toki, K. Ikeda, H. Horiuchi, T. Suhara, M. Lyu, M. Isaka, T. Yamada, High-momentum antisymmetrized molecular dynamics compared with tensor-optimized shell model for strong tensor correlation, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2017, 111D01-1 ~ 111D01-10, 査読有

(4) Y. Funaki, M. Isaka, E. Hiyama, T. Yamada, K. Ikeda, Multi-cluster dynamics in  ${}^{13}\Lambda\text{C}$  and analogy to clustering in  ${}^{12}\text{C}$  Physics Letters B, Vol. 773, (2017) 336-343, 査読有

(5) N. Yamanaka, T. Yamada, E. Hiyama, Y. Funaki, Electric dipole moment of  ${}^{13}\text{C}$  Physical Review C. Vol. 95, (2017)

065503-1 ~ 065503-11, 査読有  
 (6) C. Xu, G. Ropke, P. Schuck, Z. Ren, Y. Funaki, H. Horiuchi, A. Tohsaki, T. Yamada, B. Zhou,  $\alpha$ -cluster formation and decay in the quartetting wave function approach, Physical Review, Vol. 95, (2017) 061306-1 ~ 061306-5, 査読有  
 (7) 山田泰一, グリーン関数によるハイパー原子核生成強度関数の定式化、科学と人間、関東学院大学、理工学部建築・環境学部教養学会、2017、pp.199-214, 査読無  
 (8) M. Lyu, Z. Ren, B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Ropke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, Physical Review C, Vol. 93, (2016) 054308-1 ~ 054308-8, 査読有  
 (9) P. Schuck, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Ropke, A. Tohsaki, T. Yamada, Alpha particle clusters and their condensation in nuclear system, Physica Scripta, Vol. 91, (2016) 123001-1 ~ 123001-40, 査読有  
 (10) C. Xu, Z. Ren, G. Ropke, P. Schuck, Y. Funaki, H. Horiuchi, A. Tohsaki, T. Yamada, B. Zhou,  $\alpha$ -decay width of  $^{212}\text{Po}$  from a quartetting wave function approach, Physical Review C, Vol. 95, (2016) 011306-1 ~ 011306-5, 査読有  
 (11) T. Yamada, Y. Funaki,  $\alpha$ -cluster structures and monopole excitations in  $^{13}\text{C}$ , Physical Review C, Vol. 92, (2015) 034326-1 ~ 034326-17, 査読有  
 (12) M. Lyu, Z. Ren, B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Ropke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, Investigation of  $^9\text{Be}$  from a nonlocalized clustering concept, Physical Review C, Vol. 91, (2015) 014313-1 ~ 014313-9, 査読有  
 (13) Y. Funaki, T. Yamada, E. Hiyama, B. Zhou, K. Ikeda, Container structure of  $\alpha$ - $\alpha$ - $\Lambda$  clusters in  $^9\text{-}\Lambda$ -Beryllium, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2014, 113D01-1 ~ 113D01-16, 査読有  
 (14) G. Ropke, P. Schuck, Y. Funaki, H. Horiuchi, Z. Ren, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, B. Zhou, Physical Review C, Vol. 90, (2014) 034304-1 ~ 034304-19, 査読有  
 (15) B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, Z. Ren, G. Ropke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, Physical Review, Vol. 89, (2014) 034319-1 ~ 034319-23, 査読有

〔学会発表〕(計15件)

(1) 山田泰一, 明孝之, 須原唯広, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, Nuclear Matter Calculation with the Tensor Optimized Fermi Sphere, 2018年3月22日~2018年3月25日, 日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学(千葉県、野田市)  
 (2) Mengjiao Lyu, Masahiro Isaka,

Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Tadahiro Suhara, Taiichi Yamada, Hybridization of tensor-optimized and high-momentum antisymmetrized molecular dynamics for light nuclei with bare interaction, 2018年3月22日~2018年3月25日, 日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学(千葉県、野田市)  
 (3) 井坂政裕, Lyu Mengjiao, 明孝之, 土岐博, 池田清美, 堀内昶, 須原唯広, 山田泰一, 高運動量成分を取り入れたAMDによる核力を用いたs殻核の研究, 2018年3月22日~2018年3月25日, 日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学(千葉県、野田市)  
 (4) 明孝之, Lyu Mengjiao, 井坂政裕, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, 須原唯広, 山田泰一, 高運動量成分を取り入れたAMDとテンソル最適化AMD, テンソル最適化殻模型の比較, 2018年3月22日~2018年3月25日, 日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学(千葉県、野田市)  
 (5) 船木靖郎, 山田泰一,  $^{20}\text{Ne}$ におけるガスの  $2\alpha+^{12}\text{C}$  構造状態の研究, 2018年3月22日~2018年3月25日, 日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学(千葉県、野田市)  
 (6) 伊藤誠, 平尾峻馬, 中尾慎人, 船木靖郎, 山田泰一,  $^{13}\text{C}$  生成反応による  $3\alpha$  状態の核半径研究, 2018年3月22日~2018年3月25日, 日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学(千葉県、野田市)  
 (7) 山田泰一, 明孝之, 須原唯広, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, テンソル最適化フェルミ球(TOFS)による核物質の研究, 日本物理学会2017年秋季大会, 2017年9月12日~2017年9月15日, 宇都宮大学(栃木県、宇都宮市)  
 (8) 山中長閑, 船木靖郎, 山田泰一, EDM and Schiff moment of  $^{19}\text{F}$  in the cluster model, 日本物理学会2017年秋季大会, 2017年9月12日~2017年9月15日, 宇都宮大学(栃木県、宇都宮市)  
 (9) T. Yamada, Alpha Cluster States and Monopole Excitations in Light Nuclei, Mini-Workshop on Nuclear Clustering 2016, 2016年7月2日~7月3日, 北京大学(中国、北京市)  
 (10) 山田泰一, 明孝之, 須原唯広, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, テンソル最適化フェルミ球(TOFS)による核物質計算, 2017年3月17日~2017年3月20日, 日本物理学会第72回年次大会、大阪大学(大阪府、豊中市)  
 (11) 山田泰一, 明孝之, 須原唯広, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, テンソル最適化フェルミ球(TOFS)による非相対論的核物質の研究, 2016年9月21日~2016年9月24日, 日本物理学会2016年秋季大会、宮崎大学(宮崎県、宮崎市)  
 (12) 山田泰一, 明孝之, 須原唯広, 土岐博,

堀内昶, 池田清美, テンソル最適化反対称化分子動力学に依拠した変分法による非相対論的核物質の研究、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日～3 月 22 日、東北学院大学（宮城県、仙台市）

(13) 山中長閑、山田泰一、肥山詠美子、船木靖郎、Nuclear electric dipole moment of 4-body systems in the Gaussian expansion method, 日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 25 日～9 月 28 日、大阪市立大学（大阪府、大阪市）

(14) T. Yamada, Cluster structures and monopole excitations in light nuclei, Workshop on Clusters in Nuclear Systems, 2015 年 8 月 2 日～8 月 7 日、ロストック大学（ドイツ、ロストック市）

(15) T. Yamada, International Conference on “Cluster structure of unstable nuclei and its decay”, 2014 年 12 月 1 日～12 月 4 日、南京大学（中国、南京市）

〔図書〕(計 2 件)

(1) 山田泰一、伊藤悦郎、北村美一郎、杉本徹、基礎物理(第 3 版)、東京教学社、2017、総ページ 2 5 2

(2) T. Yamada and Y. Kanada-En'yo, Journal of Physics: Conference Series, Vol.569, Institute of Physics (IOP), United Kingdom, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on “State of the Art in Nuclear Cluster Physics”, (Kanto Gakuin University, Yokohama, Japan, May 26-30, 2014), 2014, 総ページ 4 5 4

〔その他〕

ホームページ等

(1) 関東学院大学・山田研究室 HP

<http://home.kanto-gakuin.ac.jp/~yamada/>

(2) 国際研究集会「SOTANCP3」HP

<http://kguramo.kanto-gakuin.ac.jp/sotan3/>

(3) 国際研究集会「WNCP2016」HP

<http://home.kanto-gakuin.ac.jp/~kg160501/>

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

山田 泰一 (YAMADA TAIICHI)

関東学院大学・理工学部・教授

研究者番号：70200722

(2) 連携研究者

船木 靖郎 (FUNAKI YASURO)

関東学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：00435679