

令和元年6月26日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05351

研究課題名(和文) 変革したクラスター模型での研究の推進とクラスター状態の第一原理計算

研究課題名(英文) Study of cluster states by innovated cluster model and ab initio theory

研究代表者

堀内 昶 (Horiuchi, Hisashi)

大阪大学・核物理研究センター・招へい教授

研究者番号：60027349

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)：THSR波動関数を用いる変革したクラスター模型により12C核の正負パリティ励起状態が良く再現され、3つのクラスターの多彩な構造がクラスターのContainer描像により統一的に記述されることが示された。また中性子過剰のBe、B、C核も2つのクラスターとその周りの核子群のContainer描像によりよく記述されることが示された。

生の核力を用いた核構造の第一原理計算の新理論としてTOAMD(テンソル最適化AMD理論)が開拓され、さらにそれと並んでHMAMD(高運動量対AMD理論)も研究されて、S殻核が見事に再現された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

変革したクラスター模型は局在化したクラスターに基づくクラスター構造の考えを変革したもので、クラスター構造は非局在化クラスターとクラスター間パウリ排他律がその動力学の基本であるとする革新的理論である。安定核並びに不安定核に於ける新しい実験的事実をも統一的に記述することを可能としている。

核構造の第一原理計算の新理論としてTOAMD理論やHMAMD理論は、両者の結合理論も含めて我国で開発された第一原理計算の新理論であり、平均場的構造だけでなくクラスター構造をも良く記述できるといふ重要な特徴を持っている。

研究成果の概要(英文)：We showed that the innovated cluster model by the use of THSR wave function describes well 12C excited states with plus and minus parities, which means that the various cluster structures of 3 alpha can be unifiedly described by the container model of alpha clusters. Also the neutron-rich Be, B, and C nuclei were shown to be well described by the container picture of 2 alphas and nucleons..

We developed a new ab initio theory of nuclear structure by the bare nuclear force which we call TOAMD (tensor optimized AMD) and also another ab initio theory named HMAMD (high momentum AMD). By these theories s-shell nuclei were shown to be well described.

研究分野：原子核理論

キーワード：THSR波動関数 Container描像 非局在化クラスター 不安定核 Ab initio理論 TOAMD理論 HMAMD理論 生の核力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

THSR 波動関数は クラスターのボーズ凝縮的なガスの構造を表現するものとして筆者達により提唱されたものであったが、ガスのではないクラスター状態を表現することも可能であるという驚くべき事実が分かって来た。そこで、当初は様々な原子核のクラスター状態に対して、THSR 波動関数の普遍的有用性がどれほど妥当であるのか検証する必要があった。

生の核力を用いて核構造の第一原理計算を行うことが原子核理論の新しい潮流として大きくなっていった。ところが、平均場の構造だけでなくクラスター構造をも第一原理的に記述するには十分な理論が存在しなかった。そこで、AMD (反対称化分子動力学) 波動関数を用いての新しい第一原理計算理論の TOAMD (テンソル最適化 AMD) を構築した。

### 2. 研究の目的

THSR 波動関数がガスの状態に限らずあらゆるクラスター状態を良く記述するという事実の意味するところは、クラスター動力学の本質が非局在的であることである。局在的なクラスター構造が存在するのはクラスター間パウリ排他律に起因することなど、クラスター動力学の本質を明らかにする。

AMD 波動関数を用いることによってクラスター構造を第一原理理論によって生の核力に基づいて記述する。その為に、TOAMD 理論を HMAMD 波動関数(高運動量対を含む AMD 波動関数)による記述と組み合わせるなど新理論の一層の発展を目指す。

### 3. 研究の方法

THSR 波動関数は元来は 1 つの Container の中にクラスターを収容するのであるが、それを拡張発展させて複数の Container を含むものとする。Container の間の距離の自由度も導入する。

TOAMD 波動関数を HMAMD 波動関数に組み合わせた TO-HMAMD 波動関数をも柔軟に活用して、エネルギー変分原理による第一原理理論の一層の発展を目指す。

### 4. 研究成果

$^{12}\text{C}$  核の正負パリティの励起状態として現れる 3 の多様な構造を 2 つの変形 Container を表現する THSR 波動関数によって成功裡に再現した。クラスター動力学の本質が非局所的であることを示す重要な成果である。不安定核に於いても Be、B、C の質量数  $A=9-11$  の領域のクラスター構造が複数の変形 Container の THSR 波動関数によって成功裡に再現されることが示された。

生の核力による第一原理計算を新たに考案された TOAMD 波動関数や TO-HMAMD 波動関数を用いて行うと言う独創的な新理論が従前の第一原理計算と同等な結果を生むことが示され、その成果の上に S-shell 核を越えた質量数領域に於いて平均場の状態とクラスター状態を追究する研究が開始された。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 件)

\*1. Qing Zhao, Mengjiao Lyu, Zhongzhou Ren, Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi

Ikeda, Hisashi Horiuchi, Masahiro Isaka, and Taiichi Yamada, Contact representation of short range correlation in light nuclei studied by the High-Momentum Antisymmetrized Molecular Dynamics, Phys. Rev. C, **査読有**, **99** (2019), 034311, pp.1-6.

DOI: 10.1103/PhysRevC.99.034311

\*2. Takayuki Myo, Hiroki Takemoto, Mengjiao Lyu, Niu Wanx, Chang Xu, Hiroshi Toki,

Hisashi Horiuchi, Taiichi Yamada, and Kiyomi Ikeda, Variational calculation of nuclear matter in the  $n$ -ite number approach using unitary correlation operator and high-momentum pair methods, Phys. Rev. C, **査読有**, **99** (2019), 024312, pp.1-12. DOI:

10.1103/PhysRevC.99.024312

\*3. Mengjiao Lyu, Takayuki Myo, Masahiro Isaka, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi

Horiuchi, Tadahiro Suhara, and Taiichi Yamada, The tensor-optimized high-momentum antisymmetrized molecular dynamics with bare interaction and its application in  $^4\text{He}$  nucleus, Phys. Rev. C, **査読有**, **98** (2018), 064002, pp.1-10.

DOI: 10.1103/PhysRevC.98.064002

\*4. Qing Zhao, Zhongzhou Ren, Mengjiao Lyu, Hisashi Horiuchi, Yasuro Funaki, Gerd

Roepke, Peter Schuck, Akihiro Tohsaki, Chang Xu, Taiichi Yamada, and Bo Zhou, Investigation

- of  $^9\text{B}$  and its cluster-nucleon interaction, *Phys. Rev. C*, **査読有**, **97** (2018),054323, pp.1-7.  
DOI: 10.1103/PhysRevC.97.054323
- \*5. Mengjiao Lyu, Masahiro Isaka, Takayuki Myo<sup>1</sup>, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Tadahiro Suhara, and Taiichi Yamada, Hybridization of tensor-optimized and high-momentum antisymmetrized molecular dynamics for light nuclei with bare interaction, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **査読有**, **2018** (2018), 011D01, pp.1-9.  
DOI: 10.1093/ptep/ptx192
- \*6. Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Tadahiro Suhara, Mengjiao Lyu, Masahiro Isaka, and Taiichi Yamada, High-momentum antisymmetrized molecular dynamics compared with tensor-optimized shell model for strong tensor correlation, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **査読有**, **2017** (2017),111D01, pp.1-10.  
DOI: 10.1093/ptep/ptx143
- \*7. Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and Tadahiro Suhara, Power series expansion method in tensor optimized antisymmetrized molecular dynamics beyond the Jastrow correlation method, *Phys. Rev. C*, **査読有**, **96** (2017), 034309, pp. 1-6.  
DOI: 10.1103/PhysRevC.96.034309
- \*8. Gerd Roepke, Peter Schuck, Chang Xu, Zhongzhou Ren, Mengjiao Lyu Bo Zhou, Yasuro Funaki, Hisashi Horiuchi, Akihiro Tohsaki, and Taiichi Yamada, Alpha-like clustering in  $^{20}\text{Ne}$  from a quartetting wave function approach, *Journal of Low Temperature Physics*, **査読有**, **189** (2017), pp. 383-409.  
DOI 10.1007/s10909-017-1796-9
- \*9. Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and Tadahiro Suhara, New successive variational method of tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics for nuclear many-body system, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **査読有**, **2017** (2017),073D01, pp. 1-23.  
DOI: 10.1093/ptep/ptx089
- \*10. Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and Tadahiro Suhara, Successive variational method of the tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics for central interaction in finite nuclei, *Phys. Rev. C*, **査読有**, **95** (2017), 044314, pp.1 - 8.  
DOI: 10.1103/PhysRevC.95.044314
- \*11. Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, and Tadahiro Suhara, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics as a successive variational method in nuclear many-body system, *Phys. Lett. B*, **査読有**, **769** (2017), pp. 213-218.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2017.03.059>
- \*12. Bo Zhou, Akihiro Tohsaki, Hisashi Horiuchi, and Zhongzhou Ren, Breathing-like excited state of the Hoyle state in  $^{12}\text{C}$ , *Phys. Rev. C*, **査読有**, **94** (2016), 044319, pp.1-7.  
DOI: 10.1103/PhysRevC.94.044319
- \*13. Mengjiao Lyu, Zhongzhou Ren, Bo Zhou, Yasuro Funaki, Hisashi Horiuchi, Gerd Roepke, Peter Schuck, Akihiro Tohsaki, Chang Xu, and Taiichi Yamada, Investigation of  $^{10}\text{Be}$  and its cluster dynamics with the nonlocalized clustering concept, *Phys. Rev. C*, **査**

読有、93 (2016), 054308, pp.1-8.

DOI: 10.1103/PhysRevC.93.054308

[学会発表](計 13 件)

- \*1. 明孝之, 竹本宏輝, Lyu Mengjiao, Wan Niu, Xu Chang, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, 山田泰一, 高運動量成分を持つ核子対を取り入れた核物質の有限核子数による新しい変分計算法, 日本物理学会, 2019年03月14日 ~ 2019年03月17日, 九州大学伊都キャンパス
- \*2. Qing Zhao, Zhongzhou Ren, Mengjiao Lyu, Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Masahiro Isaka, Taiichi Yamada, Contact representation of short range correlation in light nuclei studied by the High-Momentum Antisymmetrized Molecular Dynamics, 日本物理学会, 2019年03月14日 ~ 2019年03月17日, 九州大学伊都キャンパス
- \*3. 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, 日本物理学会, 2017年09月12日 ~ 2017年09月15日, 宇都宮大学峰キャンパス
- \*4. 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, 日本物理学会, 2017年09月12日 ~ 2017年09月15日, 宇都宮大学峰キャンパス
- \*5. 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, 日本物理学会, 2017年09月12日 ~ 2017年09月15日, 宇都宮大学峰キャンパス
- \*6. 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, 日本物理学会, 2017年09月12日 ~ 2017年09月15日, 宇都宮大学峰キャンパス
- \*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03月22日 ~ 2017年03月25日, 東京理科大学野田キャンパス
- \*8. 明孝之, 土岐博, 堀内昶, 池田清美, 須原唯広, 軽い核におけるテンソル最適化AMDとジャストロー法の比較, 日本物理学会, 2017年03月22日 ~ 2017年03月25日, 東京理科大学野田キャンパス
- \*9. 土岐博, 明孝之, 須原唯広, 堀内昶, 池田清美, J. Hu, テンソル最適化反対称化分子動力学による相対論的核物質の記述, 日本物理学会, 2016年09月21日 ~ 2016年09月24日, 宮崎大学木花キャンパス
- \*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) による非相対論的核物質の研究, 日本物理学会, 2016年09月21日 ~ 2016年09月24日, 宮崎大学木花キャンパス
- \*11. 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おける多重相関関数の効果, 日本物理学会, 2016年09月21日 ~ 2016年09月24日, 宮崎大学木花キャンパス
- \*12. B.Zhou, A.Tohsaki, H.Horiuchi, and Zz.Ren, Breathing-like excited state of the Hoyle state in  $^{12}\text{C}$ , 日本物理学会, 2016年09月21日 ~ 2016年09月24日, 宮崎大学木花キャンパス
- \*13. H. Horiuchi, An Overview of the History of Cluster Conferences, 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (招待講演) (国際学

会)2016年05月23日～2016年05月27日, イタリア ナポリ大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。