

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03629

研究課題名(和文) クラスタースタートガス状態と低密度核物質

研究課題名(英文) Cluster-Gas States and Low-Density Nuclear Matter

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) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：原子核の新しい物質形態であるクラスタースタートガス状態の拡がりや深さを追究するために、従来のp殻からsd殻に研究対象を拡張し、主に ^{20}Ne に焦点を当てて、基底状態から未知領域である $^{12}\text{C} + 2$ 閾値近傍までの構造分析を実施し、 ^{12}C 芯核の周りに2個の α 粒子がガスのように運動する新しい状態が出現することを示した。

原子核物理の基本問題である無限核物質の理解を目的に、第1原理から状態方程式を導く新しい枠組みであるテンソル最適化フェルミ球法の理論体系を完成させた。この理論の礎となる連結クラスタースタート展開定理の証明とベンチマークテストの実施によりこの理論が有効であることを明らかにし、今後の本格的な研究のための道筋をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子核中のいくつかの核子が互いに強く束縛して複数個のクラスタースタートを形成し、これらが互いにガスのように凝縮的に運動するクラスタースタートガス状態の研究は未知なものに対する探究である。本研究では、sd殻の代表例である ^{20}Ne 核において、 ^{12}C 芯核の周りに2つの ^4He 核がガスのように運動するという原子核の新しい存在様式が出現することを初めて明らかにした。一方、無限系である核物質は謎の多い中性子星の研究と密接な関係があり、原子核物理の基本的課題かつ最先端の研究である。本研究では独創的なアイデアで核力から核物質の状態方程式を導く新しい理論体系を完成させた。この2つの基礎研究は広く量子科学技術の発展に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：In order to disclose the novel properties of the cluster gas state in light nuclei, the research target was expanded from the conventional p-shell region to the sd-shell one. We focused on studying the structure of ^{20}Ne up to the $^{12}\text{C} + \alpha + \alpha$ threshold region. It was founded that a new state in which two α particles move gas-likely around the ^{12}C core nucleus exists in ^{20}Ne .

On the other hand, for the purpose of understanding the nuclear matter related to neutron stars, we developed a theory called as "Tensor-Optimized Fermi Sphere method", which is a new framework for deriving the equation of state of nuclear matter from the first principle. By proving the connected cluster expansion theorem in this theory, and conducting benchmark tests, we confirmed that this theory was valid and paved the path for future full-scale research.

研究分野：原子核理論

キーワード：クラスタースタートガス状態 アルファ凝縮状態 単極子遷移強度 核物質 第一原理計算 指数関数型相関波動関数 テンソル最適化フェルミ球法 連結クラスタースタート展開定理

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 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出現するが、クラスター状態はその典型例である。近年、代表者らの研究グループがクラスターガス状態[1]という新しい存在形態を明らかにし、その典型例が宇宙における元素合成で重要な役割をしている ^{12}C ホイル状態である。また、中性子星の表面などの低密度核物質にはアルファ凝縮状態という特異的な状態が出現すると考えられている。最近の一連の研究により、 ^{12}C ホイル状態は3個のクラスターからなるガスのな構造を持ち、しかも凝縮的な様相を示すことが確定している[1]。この状態は原子における希薄ボーズ凝縮ガス状態と類似した物質形態であり、この原子核のクラスターガス状態は ^{16}O [2,3]や ^{11}B [4]、 ^{13}C [5]などに広く存在することが明らかにされてきた。さらに、クラスター状態探索に有効な物理量の一つが単極子遷移強度であり、この遷移によりその基底状態からクラスター状態が励起されるメカニズムについて代表者らの研究で理論的に明らかにされた[3,6]。例えば、 ^{12}C では単極子遷移強度の和則の約16%程度がクラスター状態への遷移である。また、軽い核の単極子遷移強度関数において、RPA や SRPA などの集団運動模型で再現が難しい低エネルギー領域の状態はクラスター状態に対応していることを、 ^{16}O を例として示した[6]。これらの事実は他の軽い原子核においても成立していることが実験データからも示されており、単極子遷移強度がクラスター状態探索の重要な指針となることを明らかにした。

(2) これまでクラスターガス状態の研究は p 殻領域が主な対象であったが、新たに sd 殻領域に研究対象を拡張し、p 殻領域との同質性・異質性を解明することはクラスターガス状態をさらに理解する上で必要不可欠の課題である。特に、 ^{20}Ne には5 ガス状態と同時に $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ ガス状態も出現する可能性があり、それらを理論的に解明することは重要な課題である。先行研究として、 $[^{16}\text{O} + \text{ } +] + [^{12}\text{C} + 8\text{Be}]$ 模型[7]や反対称化分子運動力学(AMD)[8]による研究があるが、 $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ の模型空間を充分に取り入れることが難しく、 $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ 閾値近傍ですら ^{20}Ne の構造が充分に解明されていなく、空白地帯であった。一方、最近の実験では、5 閾値近傍に焦点は当てられていた。例えば、Freer 氏らのグループが励起エネルギーで 20MeV 領域に殻模型では説明が難しい状態をいくつか発見[9]しており、一方、川畑氏らのグループが大阪大学核物理センターで5 状態探索のために新たな実験を計画・実施中であった[10]。

(3) 現実的核力から核物質の状態方程式を導く新しい枠組みとして指数関数型相関波動関数とその近似である冪級数型相関波動関数を用いる「テンソル最適化フェルミ球法」(TOFS法)を代表者らが提唱した。クラスター状態は通常核密度の約4分の1程度の核物質で出現することが現象論的な取り扱いにより示唆されている。第1原理からのこの出現メカニズムの解明はチャレンジングで興味深い課題であるが、そもそも核物質それ自体にも多体相関やテンソル相関の役割の理解は不十分であり、これらの問題は原子核分野の基本課題である。この状況を踏まえて、TOFS理論の枠組みの発展と厳密化、さらにその適用可能性を追究することは急務の課題であった。

2. 研究の目的

(1) クラスターガス状態の拡がりや深さを p 殻および sd 殻領域において追究する。特に、 ^{20}Ne に焦点を置き、クラスターガスと単極子遷移強度という切り口で、基底状態から $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ 閾値エネルギー領域までの構造の解明を主目的とし、さらに5 閾値エネルギー領域までの構造の解明を目指す。

(2) 第1原理による核物質計算法である TOFS 理論の枠組みを発展させ厳密化する。特に、TOFS理論において出現する無限個の発散項の処理に関する「連結クラスター展開定理」の数学的証明に関する論文掲載を第1目的とする。さらに、現実的2体核力としてアルゴンヌ V18 (AV18) を念頭にして多体項の核物質行列要素の定式化、さらに3体核力としてウルバナ XI (UXI) を用いるための多体項の行列要素の定式化を進める。同時に、AV4核力から順次スタートして核物質の数値計算を実施し、多体相関やテンソル相関の役割を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ^{20}Ne の基底状態から $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ 閾値エネルギー領域までの 0^+ 状態の構造を理論的に解明するために、クラスター状態以外に殻模型的配位 $[\text{SU}(3) (\mu) = (80) \text{ や } (42) \text{ など}]$ を模型空間として含む、ガウス型基底関数を用いた $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ の直交条件模型を採用する。この模型は3体の自由度をフルに取り入れることができる。 ^{12}C については $\text{SU}(3)$ 模型波動関数 $(\mu) = (04)$ で記述し、 ^{12}C の基底回転帯状態 ($0^+, 2^+, 4^+$) とクラスター間の相対軌道角運動量との結合を露わに取り入れる。クラスター間相互作用としては、 ^{16}O の低エネルギー領域の構造を良く記述するフォールディング型の $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ ポテンシャルを用いる。また、2 の低エネルギー散乱を良

く記述する 2 ボテンシャルを採用する。一方、5 ガス状態に焦点を当てて、5 ガス構造の模型空間をフルに持つ THSR 計算を進める。

(2) 第 1 原理での新しい核物質計算法であるテンソル最適化フェルミ球 (Tensor-Optimized Fermi Sphere: TOFS) 法を構築し、厳密化する。この理論では、核子間相関を有する核物質波動関数 Ψ として、無相関のフェルミ球波動関数 Φ_0 に指数関数型の相関因子 $\exp(F)$ を掛けた波動関数を採用する：

$$\Psi = \exp(F) \Phi_0$$

ここで、エルミート型の 2 体相関関数 $F = \sum_{i<j} f_{ij}$ としては、強い短距離斥力とテンソル成分を持つ核力の特徴を考慮して、「スピンに依存したテンソル型 F_D 」と「短距離斥力のための中心力型 F_S 」の和の形を採用する。核物質の一核子あたりの結合エネルギーは次のエルミート形式の式

$$-B = (1/A) \langle \Phi_0 | \exp(F^\dagger) H \exp(F) | \Phi_0 \rangle / \langle \Phi_0 | \exp(F^\dagger) \exp(F) | \Phi_0 \rangle$$

で定義し、現実的核力を用いて、2 体相関関数 F_S と F_D に対するエネルギー変分問題を解く理論の枠組みを構築する。このとき、無限系の性質を反映して発散項が無数個出現するが、その性質と処理について考察する(後述の連結クラスター展開定理につながる)。なお、Coupled-Cluster 法では同じ指数関数型の波動関数を採用するが、結合エネルギーを「非エルミート形式」で定義しているが、今回の方法では「エルミート形式」を採用している点が独創的な点の一つである。

次に、現実的な数値計算の実行のために、指数型因子 $\exp(F)$ を F に関して冪級数展開し、有限冪級数型の相関波動関数、

$$\Psi_N = [\sum_{n=0}^N (1/n!) F^n] \Phi_0,$$

を導入し、指数型相関波動関数の場合と同様に、核物質の一核子あたりの結合エネルギーをエルミート形式で定義し、現実的核力を用いて、2 体相関関数に対するエネルギー変分問題を解く理論の枠組みを構築する。この場合も発散項が出現するが、この処理について指数型相関波動関数の場合と関連付けて調べる。

4. 研究成果

4 年間の研究期間において学部長職就任やコロナ禍などにより研究の進捗状況は遅れ気味であったが、以下に研究成果を要約する。

(1) ^{20}Ne の構造を調べるために、ガウス関数展開法に基づいた $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ の直交条件模型による 0^+ 状態の構造の分析を船木氏と共同研究で行った。3 体系のパウリ禁止状態を数値的に除去するために、 ^{12}C の基底回転帯状態 ($0^+, 2^+, 4^+$) 以外に、 ^{12}C と $\text{ } + \text{ }$ 間の相対軌道角運動量を 8 までという高い角運動量を取り入れる必要がある。この点が従来の p 殻領域のクラスターガス研究と異なって計算コストがかかり、この困難の克服に時間を要した。最終年度後半になってその克服に目途が立ち、この結果、この模型により ^{20}Ne の基底状態が記述されることを確認し、その上で、 $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ の閾値近傍に 3 体ガスのような構造を持つ 0^+ 状態が出現することを明らかにした。この状態は $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ クラスター構造が発達した ^{16}O の $2\text{nd } 0^+$ 状態と残りの $\text{ } + \text{ }$ クラスターとの重なり積分が大きい。つまり、 ^{12}C コアの周りに 2 個の $\text{ } + \text{ }$ 粒子がガスのように運動しているという描像が良く成立する状態であることが分かった。先行する ^{20}Ne の理論的・実験的研究では $^{12}\text{C} + \text{ } + \text{ }$ 閾値近傍の 0^+ 状態についてはほとんど調べられておらず空白地帯であったが、今回の研究で初めてその一端が解明され、この成果はこの領域の構造を理解する上で $\text{ } + \text{ }$ ガスのような描像が重要であることを意味している。これらの成果は近々論文にまとめる予定にしている。一方、5 ガス状態に焦点を当てて、5 ガス構造の模型空間をフルに持つ THSR 計算については、共同研究者の Zhou Bo 氏 (中国復旦大学) らが中心に計算コストのかかる数値計算を実施しており、現時点で予備的な結果が得られている。最終的な結論に達するにはもう少し時間を要するが、この領域の実験データ [9, 10] との比較で興味深い結果が得られつつある。

(2) TOFS 理論の枠組みの発展と厳密化の研究を進めた。この TOFS 法では、相関を持つ核物質波動関数 Ψ として上述した指数関数型を採用しエルミート形式で結合エネルギーを定義する。この際、無限系の性質を反映して発散項が無数個出現するが、これらは全て完全にお互いに打ち消し合い、結果として発散項は出現しないことを数学的に証明した。この結果、連結型クラスター項のみが残り、これらのみを和を考慮すればよいことが判明し、TOFS 法における「連結クラスター展開定理」として、研究雑誌「Annals of Physics」に掲載された [11]。

(3) TOFS 法による核物質の現実的な数値計算の実行のために、指数型因子 $\exp(F)$ を F に関して冪級数展開し、指数関数型の近似として有限冪型の相関波動関数 Ψ_N を用いる枠組みを構築した。このとき、発散項は取り除いて発散しない項、所謂連結型クラスター項のみを考慮すれば良いことを示した。これらの成果は研究雑誌「Annals of Physics」に掲載された [11]。

(4) TOFS 法による対称核物質のベンチマークテストを実施した。相関のある対称核物質の波動関数として、 $\Psi = \exp(F) \Phi_0 \approx (1 + F)\Phi_0 = \Psi_{N=1}$ 、を採用した。核力として短距離斥力を持つ中心力型のアルゴリズム $V4'$ ($AV4'$) を用いて状態方程式 ($E = E(\rho)$) を調べた。この結果、BHF 法や FHNC 法など他の方法による計算結果とほぼ同様な結果が出ることを示した。また、TOFS 法の特徴として核物質中における多体項の効果を調べることが可能であり、核物質の結合エネルギーにおける 1 体項から 6 体項の寄与の密度依存性について興味深い知見を得ることができた。これらの成果は研究雑誌「Progress of Theoretical and Experimental Physics」に掲載された[12]。この論文では核密度 ρ が $\rho \approx 0.20 \text{ fm}^{-3}$ 程度までの状態方程式しか計算していなかったが、その後の数値積分法の改良により、高密度側の $\rho = 0.50 \text{ fm}^{-3}$ まで BHF 法や FHNC 法と同様な結果が得られることが分かった。

(5) 現実的核力として、中心力、テンソル力、スピン軌道力以外に、 L^2 力、 $(L \cdot S)^2$ 力を含むアルゴリズム $V18$ 力 ($AV18$) など念頭に置いた TOFS 法による対称核物質及び中性子物質に対する定式化を行い、本格的な数値計算への道筋をつけることができた。実際の数値計算はガウス基底関数展開による数値積分やモンテカルロ積分などを用いた並列化プログラム開発が必要となるが、その結果については今後発表する予定である。

(6) 日本・中国・フランス・ドイツの国際共同研究として、ホウ素 9 原子核 (9B) に対して THSR 波動関数により構造研究を行った。クラスターとバレンス核子の間の相関の記述を改良し、負パリティ状態のみならず正パリティ状態の構造が非局所化描像により良く理解できることを示した。さらに、質量数 10 の同位体核 (10Be 、 10B 、 10C) について THSR 波動関数による分析を行った。2 個のクラスターの周りを運動する 2 個のバレンス核子対の相関をフルに取り入れるることにより、質量数 10 の同位体構造は非局所化描像に基づいた THSR 波動関数により良く記述されることが明らかにされた。これらの成果は国際研究雑誌に掲載された。また、カルテット波動関数を用いた重い原子核のアルファ崩壊に関する研究も進め、この成果は国際研究雑誌にまとめられた。

< 引用文献 >

- [1] T. Yamada et al., Nuclear Alpha-Particle Condensates, in Cluster in Nuclei – Vol.2 -, ed.by C. Beck, Lecture Notes in Physics **848**, Chap.5, pp.229-298, (Springer-Verlag, Berlin, 2012).
- [2] Y. Funaki et al., Physical Review Letters **101**, 082502 (2008).
- [3] T. Yamada et al., Physical Review C **85**, 034315 (2012).
- [4] T. Yamada et al., Physical Review C **82**, 064315 (2010).
- [5] T. Yamada et al., Physical Review C **92**, 034326 (2015).
- [6] T. Yamada et al., Progress of Theoretical Physics **120**, 1139 (2008).
- [7] Y. Fujiwara et al. Progress of Theoretical Physics **61**, 1629 (1979).
- [8] M. Kimura, Physical Review C **69**, 044319 (2004).
- [9] J.A. Swartz et al., Physical Review C **91**, 034317 (2015).
- [10] S. Adachi et al., Physics Letters B **819**, 136411 (2021).
- [11] T. Yamada, Annals of Physics **403**, 1 (2019).
- [12] T. Yamada et al., Progress of Theoretical and Experimental Physics **2019**, 113D003 (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yamada Taiichi	4. 巻 57
2. 論文標題 A new formalism of nuclear matter: tensor-optimized Fermi sphere method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 73-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-021-00383-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Lyu Mengjiao, Ren Zhongzhou, Horiuchi Hisashi, Zhou Bo, Funaki Yasuro, Roepke Gerd, Schuck Peter, Tohsaki Akihiro, Xu Chang, Yamada Taiichi	4. 巻 57
2. 論文標題 Properties of {8-11}Be isotopes with isospin-dependent spin-orbit potential in a cluster approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 51-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-021-00363-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Inaba K, Sasamoto Y, Kawabata T, Fujiwara M, Funaki Y, Hatanaka K, Itoh K, Itoh M, Kawase K, Matsubara H, Maeda Y, Suda K, Sakaguchi S, Shimizu Y, Tamii A, Tameshige Y, Uchida M, Uesaka T, Yamada T, Yoshida H P	4. 巻 2021
2. 論文標題 Search for alpha condensed states in ^{13}C using alpha inelastic scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 093D01-1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yang Shuo, Xu Chang, Roepke Gerd, Schuck Peter, Ren Zhongzhou, Funaki Yasuro, Horiuchi Hisashi, Tohsaki Akihiro, Yamada Taiichi, Zhou Bo	4. 巻 101
2. 論文標題 decay to a doubly magic core in the quartetting wave function approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024316-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.024316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamada Taiichi	4. 巻 403
2. 論文標題 Tensor optimized Fermi sphere method for nuclear matter - Power series correlated wave function and a cluster expansion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 1~23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2019.01.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamada T, Myo T, Toki H, Horiuchi H, Ikeda K	4. 巻 2019
2. 論文標題 A nuclear matter calculation with the tensor-optimized Fermi sphere method with central interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 113D03-1~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Zhao Qing, Ren Zhongzhou, Lyu Mengjiao, Horiuchi Hisashi, Kanada-En'yo Yoshiko, Funaki Yasuro, Roepke Gerd, Schuck Peter, Tohsaki Akihiro, Xu Chang, Yamada Taiichi, Zhou Bo	4. 巻 100
2. 論文標題 Investigation of isospin-triplet and isospin-singlet pairing in the A=10 nuclei B10, Be10, and C10 with an extension of the Tohsaki-Horiuchi-Schuck-Roepke wave function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014306-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.014306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamanaka Nodoka, Yamada Taiichi, Funaki Yasuro	4. 巻 100
2. 論文標題 Nuclear electric dipole moment in the cluster model with a triton: Li7 and B11	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 055501-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysREvC.100.055501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Bo, Funaki Yasuro, Horiuchi Hisashi, Kimura Masaaki, Ren Zhongzhou, Roepke Gerd, Schuck Peter, Tohsaki Akihiro, Xu Chang, Yamada Taiichi	4. 巻 99
2. 論文標題 Nonlocalized motion in a two-dimensional container of particles in 3- and 4- states of C12	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 051303-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.051303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Myo Takayuki, Takemoto Hiroki, Lyu Mengjiao, Wan Niu, Xu Chang, Toki Hiroshi, Horiuchi Hisashi, Yamada Taiichi, Ikeda Kiyomi	4. 巻 99
2. 論文標題 Variational calculation of nuclear matter in a finite particle number approach using the unitary correlation operator and high-momentum pair methods	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024312-1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.024312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhao Qing, Lyu Mengjiao, Ren Zhongzhou, Myo Takayuki, Toki Hiroshi, Ikeda Kiyomi, Horiuchi Hisashi, Isaka Masahiro, Yamada Taiichi	4. 巻 99
2. 論文標題 Contact representation of short-range correlation in light nuclei studied by the high-momentum antisymmetrized molecular dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034311-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.034311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhao Qing, Ren Zhongzhou, Lyu Mengjiao, Horiuchi Hisashi, Funaki Yasuro, Ropke Gerd, Schuck Peter, Tohsaki Akihiro, Xu Chang, Yamada Taiichi, Zhou Bo	4. 巻 97
2. 論文標題 Investigation of the 9B nucleus and its cluster-nucleon correlations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054323-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.054323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lyu Mengjiao, Myo Takayuki, Isaka Masahiro, Toki Hiroshi, Ikeda Kiyomi, Horiuchi Hisashi, Suhara Tadahiro, Yamada Taiichi	4. 巻 98
2. 論文標題 Tensor-optimized high-momentum antisymmetrized molecular dynamics with a bare interaction, and its application to the He4 nucleus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064002-1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.064002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ito M., Nakao M., Hirao S., Funaki Y., Yamada T.	4. 巻 2038
2. 論文標題 Enhanced 3^- radius in ^{12}C probed by nuclear reactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020016-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5078835	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Myo Takayuki, Lyu Mengjiao, Toki Hiroshi, Ikeda Kiyomi, Horiuchi Hisashi, Suhara Tadahiro, Isaka Masahiro, Yamada Taiichi	4. 巻 2038
2. 論文標題 Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics with bare forces for light nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020028-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5078847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 船木靖郎, 山田泰一
2. 発表標題 ^{20}Ne におけるガスの $^{12}\text{C}+2^-$ 構造状態
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会、オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 船木靖郎, 山田泰一
2. 発表標題 20Neにおける12C+2 ガス状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(2021年)、オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 船木靖郎, 山田泰一
2. 発表標題 12C+2 直交条件モデルによる20Ne励起状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会、オンライン開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yamada Taiichi
2. 発表標題 Nuclear matter calculation with the tensor optimized Fermi sphere method (TOFS)
3. 学会等名 International Workshop on "Light clusters in nuclei and nuclear matter" at European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*), Trento, Italy, September 2-6 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 船木靖郎、山田泰一
2. 発表標題 12C+2 直交条件モデルを用いた20Ne励起状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会、2019 9/17-9/20、山形大学(小白川キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田泰一
2. 発表標題 テンソル最適化フェルミ球法(TOFS)とクラスター展開
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会、2019 3/14-3/17、九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qing Zhao, Zhongzhou Ren, Mengjiao Lyu, Takayuki Myo, Hiroshi Toki, Kiyomi Ikeda, Hisashi Horiuchi, Masahiro Isaka, Taiichi Yamada
2. 発表標題 Contact representation of short range correlation in light nuclei studied by the High-Momentum Antisymmetrized Molecular Dynamics
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会、2019 3/14-3/17、九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会、2019 3/14-3/17、九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Myo, M. Lyu, M. Isaka, H. Toki, H. Horiuchi, K. Ikeda, T. Suhara, T. Yamada
2. 発表標題 New variational method of tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics with bare nuclear force
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 23-27, 2018; Waikoloa, Hawaii, USA (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://home.kanto-gakuin.ac.jp/~yamada/
関東学院大学・理工学部・山田研究室

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	船木 靖郎 (FUNAKI YASURO) (00435679)	関東学院大学・理工学部・准教授 (32704)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Universite Paris-Sud, IN2P3-CNRS			
ドイツ	Universitat Rostock			
中国	Nanjing University	Tongji Unuversity	Fudan University	