

## 2022年 原子核理論研究室 年次報告

### 1. メンバー

教授: 木村 真明

DC3: 本木 英陽, 森谷 元, Seung Heon Shin, Ya Min Htet

DC2: 槇口 雄仁

DC1: 渡辺 証斗

MC1: 三浦 和玖也

B4: 本間 雅也

### 2. 研究成果

従来の原子核物理学は自然界に存在する原子核を対象とし、それらの構造・反応・崩壊の研究を通して、原子核の基本的な性質や核子多体系のダイナミクスを明らかにしてきた。近年、新しい原子核を人工的に合成することが可能になったことで、原子核物理学の研究対象は大きく広がっている。例えば不安定核・ハイパー核の生成により束縛限界での核子多体系の性質やバリオン物質の物性を調べることができるようになった。現在の原子核物理学は我々の自然観を深め自然・物質に対する認識の新しい段階へと進むべく、そのフロンティアを日々拡大している。

本研究室では原子核のクラスター構造・不安定原子核の性質に主眼をおいた構造・反応論及び、少数体精密計算による核子ダイナミクスの研究を行っている。これらの知見を基に原子核物質、元素合成過程の理解を進めるとともに、ハイペロンや中間子まで含めたバリオン多体系、ハドロン物質の量子物性の理解という観点から幅広く研究を行っている。

#### <原子核におけるクラスター現象>

The study of cluster states of light nuclei has always been an important subject in nuclear physics, which provides us with a new perspective for understanding nuclear structure and many-body problems in atomic nuclei. In this fiscal year, we have investigated the clustering of light nuclei using several microscopic and semi-microscopic cluster models: A few  $\alpha$  systems in the free space and medium have been investigated and new multi-cluster basis were proposed showing its efficiency for the calculation. The clustering in Be and B isotopes have been investigated by AMD+GCM analyzing the spectroscopic factors. The resonance states above thresholds have been studied by REM with ACCC for  ${}^8\text{Be}$  and  ${}^5\text{He}$  as the benchmark.

#### 《冷中性子媒質中における少数アルファクラスター系の研究》 森谷

元素合成や原子核構造の理解に重要なアルファクラスターは、宇宙環境において通常プラズマや核物質などの媒質中に現れる。真空中で非束縛な共鳴状態となる二体、三体アルファ系は、希薄な冷中性子媒質中においては束縛状態になりうることを指摘した。この結果は関連する宇宙物理へ大きな影響を与えると考えられる。研究成果は誌上論文として既に出版され、研究会や学会で発表された。

#### 《炭素 12 原子核の幾何学的構造の研究》 森谷

炭素 12 原子核における第一  $0^+$  励起状態(ホイール状態)と第一  $2^+$  励起状態のアルファクラスターの幾何学的配位についてクラスター模型を用いて議論した。いずれの状態も  ${}^8\text{Be}(0^+) + \alpha$  の構造に

よる鋭角三角形が支配的であることを示した。また  $2^+$  第一励起状態はほとんど  ${}^8\text{Be}$  と  $\alpha$  の相対運動によって励起されていることを示した。したがって第一  $2^+$  励起状態は理想的なホイール回転バンドではないと結論した。研究成果は誌上論文として出版された。

#### 《パウリ原理を考慮した新しい多クラスター系基底関数》 森谷

原子核クラスターを点粒子として扱う巨視的クラスターモデルでは、クラスター間のパウリ原理を考慮するため、禁止状態との直交条件を課す直交条件モデルがしばしば用いられる。そのような計算は数値的な不安定性をもたらすため、多数の禁止状態を含む多クラスター系に適用するための大きな障害となっている。パウリ原理が明示的に満たされる微視的クラスターモデルの相対波動関数の性質を利用した新しい基底関数を提案し、その有効性を示した。現在、誌上論文に投稿準備中である。

#### 《中性子過剰な Be と B 同位体におけるクラスター形成》 本木、鈴木、川合、木村

錫同位体の核表面近傍におけるアルファクラスターの存在確率が、錫同位体の中性子数の増加に伴い減少することが実験的に報告された。一方、軽い原子核であるベリリウムやホウ素同位体においては、中性子数の増加に伴うアルファクラスター形成の増加が理論的に議論されてきた。本研究では、アルファ ( $\alpha={}^4\text{He}$ ) クラスターに加えヘリウム 6 ( ${}^6\text{He}$ ) やヘリウム 8 ( ${}^8\text{He}$ ) クラスターの形成確率を解析することで、ベリリウムとホウ素同位体におけるアルファクラスター形成を説明した。本成果は誌上論文として出版された。

#### 《 $\alpha$ cluster resonances in the $1/2^-$ states of ${}^{13}\text{C}$ studied by the analytic continuation in the coupling constant》 Shin, Kimura

The excited  $1/2^-$  states of  ${}^{13}\text{C}$  were investigated because some experiments reported that there are very well-developed  $3\alpha$  plus one neutron cluster structures, implying they could be Bose-Einstein condensate candidates. We focused on these states to determine their characteristics, study their cluster structures, and search for the Hoyle-analog state. Because they are basically resonance states above the thresholds, we introduced the analytic continuation in the coupling constant. This method clearly identified the resonance states, and calculated matrix elements by this method provided a candidate of the Hoyle-analog state in  ${}^{13}\text{C}$ .

#### 《Gas-like bosonic states formed around oxygen16 core nucleus close to the two alpha decay threshold energy》 Htet

The alpha-condensation in atomic nuclei has attracted increased interest nowadays. The gas-like state means that condensate states may exist in excited states of dilute density composed of weakly interacting gas of particles. I am investigating the possible Gas-like states formed around oxygen 16 core nucleus close to ( ${}^{16}\text{O}$  core + alpha + alpha) threshold energy.

#### <原子核反応>

国内外で不安定同位体ビームを用いた原子核の研究が盛んに行われているが、中でも高エネルギー重イオン反応を用いた断面積測定は、理化学研究所に代表される最新の加速器により質量領域を拡大している。このような観測量は原子核の大きさ、空間的広がり深く関係しており、実験的、理論的にも重要な研究課題となっている。

また、理論と実験を結び付ける研究課題として、近年機械学習を用いた核データ評価にも期待が集まっている。その利用範囲は反応モデルの最適化や核分裂による収率の予測など多岐に渡り、

実験的にも理論的にも重要な研究課題として注目されている。

本年は2クラスター原子核の反応で見られる断面積の減少について議論を行った。

また機械学習を用いた反応断面積の再現、予測といった核データ評価を行った。

### 《2クラスター原子核を用いた反応における蝕効果》 槇口

重陽子-原子核散乱において、その反応断面積は、陽子-原子核散乱と中性子-原子核散乱の断面積の合計よりも小さくなることが知られている。この現象は重陽子を構成する陽子と中性子による蝕効果によって断面積の減少が起きていると考えられる。蝕効果とは一方の原子核や核子がもう一方の原子核や核子の影に隠れることにより断面積が減少することである。同様の現象は  $8\text{Be}(4\text{He}+4\text{He})$  や  $44\text{Ti}(4\text{He}+40\text{Ca})$  のような2つのクラスターで構成される原子核でも見られる。

本研究では、重陽子や2クラスター原子核を用いた原子核反応について、Glauber 模型を用いて反応断面積を計算し、それぞれのクラスターのみ反応断面積の合計との差を求めた。2 クラスター間距離の波動関数をその半径を調整するように変え、半径依存性を調べた。また、クラスターを完全吸収をする球体とみなした場合の断面積も計算し、そのクラスター間距離依存性を調べた。これらの結果を比較し、2 クラスター原子核の反応で見られる断面積の減少と古典的な蝕効果との関連性を議論した。

### 《機械学習を用いた任意の入射エネルギーにおける核データの予測》 渡辺

核反応データの評価に機械学習を導入することで、核反応モデルのパラメータの最適値の推定を試みた。

すでに、ガウス過程を用いたベイズ最適化によって、実験データを再現するように、核反応モデルのパラメータを最適化することに成功していたため、こうして得られたパラメータの最適値を用いて、機械学習を用いて回帰問題を解いた。

1つのエネルギー依存性のあるパラメータに対してこの手法を用いた結果、推定した最適値を用いることで実験データを十分な精度で再現する核データを作成することができることを明らかにした。今後、同時に最適値を求めるパラメータの数も増やすほか、任意の標的核、入射粒子においても最適値を推定することが可能か明らかにする。

### 《機械学習を用いた衝突反応におけるパラメータの最適化》 三浦

本研究では衝突反応における光学ポテンシャルのパラメータの最適値を機械学習を用いて求めることを目指している。

ccone (原子核反応の理論計算ライブラリ、核反応モデルコード) と GpyOpt (機械学習ライブラリ) を組み合わせ、鉄原子核に対する中性子の衝突反応における2つのパラメータを、ccone の計算値と実験値との差異が最小になるように調整した。

しかし、このアプローチでは実験データがない反応については評価することができない。今後は実験データに依存しない計算 (教師なし学習) を行い、その結果を実験データと比較し精度を評価することを目指す。

それにより、宇宙空間や天体内部における超高エネルギー領域における反応など、実験結果が存在しないが科学的に重要な反応についても理論的に評価できるようになることを期待している。

## 3. 成果発表

<原著論文>

(査読あり)

- “Microscopic calculations of  ${}^6\text{He}$  and  ${}^6\text{Li}$  with real time evolution method”  
Q. Zhao, B. Zhou, M. Kimura, H. Motoki, and S. Shin, *Eur. Phys. J. A* 58, 25 (2022)
- “Cluster formation in neutron-rich Be and B isotopes”  
H. Motoki, Y. Suzuki, T. Kawai, and M. Kimura, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022, 113D01 (2022)
- “Incomplete absorption reactions at high energy”  
K. Makiguchi and W. Horiuchi, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022, 073D01(2022)
- “Resonance-to-bound transition of  ${}^5\text{He}$  in neutron matter and its analogy with heteronuclear Feshbach molecule”  
H. Tajima, H. Moriya, W. Horiuchi, K. Iida, E. Nakano, *Phys. Rev. C* 106, 045807 (2022)
- “Three- $\alpha$  configurations of the second  $2^+$  state in  ${}^{12}\text{C}$ ”  
H. Moriya, W. Horiuchi, J. Casal, L. Fortunato, *Eur. Phys. J. A* 59, 37 (2023)
- “ $\alpha$  formation probability in  ${}^{10}\text{Be}$  and  ${}^{12}\text{Be}$  within a microscopic cluster model”  
Q. Zhao, M. Kimura, B. Zhou, and S. Shin, *Phys. Rev. C* 106, 054313 (2022)
- “ $4\alpha$  linear-chain state produced by  ${}^9\text{Be} + {}^9\text{Be}$  collisions”  
T. Baba, Y. Taniguchi, and M. Kimura, *Phys. Rev. C* 105, L061301 (2022)
- “Two-Neutron Halo Structure and Anti-halo Effect in  ${}^{31}\text{F}$ ”  
H. Masui, W. Horiuchi, M. Kimura, *Few-Body Syst.* 63, 20 (2022)
- “Nuclear data generation by machine learning (I) application to angular distributions for nucleon-nucleus scattering”  
S. Watanabe, F. Minato, M. Kimura, N. Iwamoto, *J. Nucl. Sci. Technol.* 59 1399 (2022)
- “Erosion of  $N = 28$  shell closure: Shape coexistence and monopole transition”  
Y. Suzuki, W. Horiuchi, and M. Kimura, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022 063D02 (2022)
- “Observation of the  $\pi^2\sigma^2$ -bond linear-chain molecular structure in  ${}^{16}\text{C}$ ”  
J. X. Han et al., *Phys. Rev. C* 105, 044302 (2022)
- “Description of isospin mixing by a generator coordinate method”  
M. Kimura, Y. Suzuki, T. Baba and Y. Taniguchi, *Phys. Rev. C* 105, 014311 (2022)

<会議抄録等>

- “The structure of  $0^+$  states in  ${}^{16}\text{O}$  using real-time evolution method”  
H. Motoki and M. Kimura, *EPJ Web Conf.* 260, 11019 (2022)

4. 学術講演

4.1. 国際学会・国際シンポジウム

<招待講演>

- Korean Physical Society Spring meeting 2022, [2022.04.06]
  - \*M. Kimura, “Alpha cluster formation at the surface of stable and unstable nuclei”

- Annual Topical Meeting of IReNA - FA1 Nuclear reaction measurements in Underground Laboratories, [2022.04.06]
  - \*M. Kimura, “Astrophysical S-factor for  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  fusion reaction from a full-microscopic nuclear model”
- Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b), [2022.05.25]
  - \*M. Kimura, “Monopole transitions as a probe for nuclear shape and clusters”
- ECT\* workshop, Advances On Giant Nuclear Monopole Excitations And Applications To Multi-Messenger Astrophysics, [2022.07.12]
  - \*M. Kimura, “Low energy monopole strength: A novel approach to the astrophysical fusion reactions”

<一般講演>

《口頭発表》

- Yukawa International Seminar: Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b), [Yukawa Institute for Theoretical Physics + online, 2022.05.23-27]
  - \*H. Motoki, Y. Suzuki, T. Kawai, and M. Kimura, “Cluster formation in light neutron-rich nuclei”
  - \*S. Shin, B. Zhou, and M. Kimura, “Resonance states in light nuclei studied by analytic continuation in the coupling constant”
- 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022) [オンライン, 2022.07.24-29]
  - \*渡辺証斗, 木村真明, 湊太志, 吉田聡太, 岩本信之, “Generating nucleon-nucleus scattering data by Gaussian process regression”
- The 16th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG16), [La Thanh Hotel, Hanoi, Vietnam + online, 2022.10.28]
  - \*H. Motoki, Y. Suzuki, T. Kawai, and M. Kimura, “Cluster formation in neutron-rich Be and B isotopes”

《ポスター》

- The 2nd International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2022), [Sendai International Center in Sendai, Japan + online, 2022.11.01]
  - \*H. Motoki, Y. Suzuki, T. Kawai, and M. Kimura, “Cluster formation in neutron-rich Be and B isotopes”

#### 4.2. 国内学会・国内その他

<招待講演>

- RCNP 研究会「微視的系と巨視的系における核子対凝縮相」, [RCNP, 2022.09.26]
  - \*木村真明 “核表面でのアルファクラスター形成、その理論的記述の課題”

<一般講演>

《口頭発表》

- Workshop on “Progress in nuclear structure and reaction theories”, [Hokkaido University, 2022.01.25]
  - \*H. Motoki, Y. Suzuki, T. Kawai, and M. Kimura, “Clustering in light neutron-rich nuclei”
- 日本物理学会 2021 年 第 77 回年次大会, [オンライン, 2022.03.15-19]
  - \*森谷元, 田島裕之, 堀内渉, 飯田圭, 仲野英司, “冷中性子物質中における少数アルファクラスター系の構造研究”
- YIPQS long-term workshop “Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022)”, [京都大学, 2022.05.09-06.17]
  - \*渡辺証斗, 木村真明, 湊太志, 吉田聡太, 岩本信之, “ Nuclear data generation by machine learning ”
- おのころプロジェクト戸隠夏合宿, [長野, 2022.07.29-30]
  - \*H. Moriya, H. Tajima, W. Horiuchi, K. Iida, E. Nakano, “Structure of two- and three-alpha systems in cold neutron matter”
- RCNP 研究会「低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で読み解く中性子星」,[オンライン, 2022.08.03-05]
  - \*森谷元, 田島裕之, 堀内渉, 飯田圭, 仲野英司, “媒質中におけるアルファクラスター系の構造変化”
- 日本原子力学会 2022 年秋の年会大会, [茨城大学, 2022.08.06-09]
  - \*渡辺証斗, 木村真明, 湊太志, 吉田聡太, 岩本信之, “機械学習を用いた核データ生成”
- 日本物理学会 2022 年秋季大会, [岡山理科大学岡山キャンパス, 2022.09.06-08]
  - \*本木英陽, 鈴木祥輝, 川合毅, 木村真明, “中性子過剰な Be と B 同位体におけるクラスター形成”
  - \*槇口雄仁, 堀内渉, “高エネルギー原子核衝突での不完全吸収反応”
  - \*森谷元, 堀内渉, J. Casal, L. Fortunato, “直交条件模型を用いた炭素 12 第二 2<sup>+</sup>状態の研究”
- 素粒子原子核三者若手夏の学校, [オンライン, 2022.09.07-09]
  - \*渡辺証斗, 木村真明, 湊太志, 吉田聡太, 岩本信之, “ 機械学習を用いた核子-原子核散乱に対する最適なポテンシャルの予測”
- 大阪公立大研究会「原子核におけるクラスター物理の新展開」, [大阪公立大学杉本キャンパス, 2022.10.19-20]
  - \*本木英陽, 鈴木祥輝, 川合毅, 木村真明, “中性子過剰な Be と B 同位体におけるクラスター形成”
  - \*森谷元, 堀内渉, J. Casal, L. Fortunato, “直交条件模型を用いた炭素 12 の幾何学的配位の研究”
- 研究会「核反応シミュレーションと機械学習による核反応模型の発展」, [北海道大学札幌キャンパス, 2022.12.14]

- \*本木英陽, 鈴木祥輝, 川合毅, 木村真明, “ $^{11}\text{B}$  基底状態のクラスター構造”
- \*森谷元, 堀内渉, 周波, “パウリ原理を満たす基底関数を用いた巨視的クラスター模型の新たな手法”

## 5. 国際学会及び国際シンポジウムの組織

<組織・運営委員>

- “Physics of RI: Recent progress and perspectives”, RIKEN, 2022.05.30-06.01
- IPQS long-term workshop “Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022)”, YITP Kyoto Univ., 2022.05.09-06.17

## 6. 在外研究

該当なし

## 7. 科研費、助成金取得状況

- 木村真明, 堀内渉, 2022年度北海道大学情報基盤センター萌芽型共同研究(分担), 2019.05-2020.03, 300千円, “大規模数値計算による原子核反応シミュレーションとデータベース構築”
- 木村真明, 科研費・基盤 C(代表), 2019.04-2023.03, 4,160千円, “ $\alpha$ 非弾性散乱を用いた新しいアプローチによる炭素燃焼過程の研究”
- 木村真明, 科研費・基盤 B(代表), 2019.04-2023.03, 4,160千円, “分子動力学による多体量子トンネル現象と天体核融合反応への新しいアプローチ”
- ○ 木村真明, 科研費・研究成果公開促進費(代表), 2022.04-2026.03, 5,000千円, “原子核反応データファイル”
- ○ 木村真明, 科研費・新学術領域研究(研究領域提案型) 量子クラスターで読み解く物質の階層構造公募研究(代表), 2021.04-2023.03, 2000千円, “光核反応からのクラスター崩壊の理論研究と最高エネルギー宇宙線への応用”

## 8. その他の活動

<学外委員>

- 木村真明, 大阪大学原子核研究センター 運営委員会委員
- 木村真明, 京都大学基礎物理学研究所 共同利用委員会委員
- 木村真明, 素粒子論グループ 核理論談話会 核理論委員会委員
- 木村真明, Asia Pacific Center for Theoretical Physics(APCTP), 運営委員
- 木村真明, Chinese Physics C, 編集委員
- 木村真明, Progress of Theoretical Physics, 編集委員