

2023年 原子核理論研究室 年次報告

1. メンバー

准教授 野村 昂亮

DC3 槇口 雄仁、Ya Min Htet

DC2 渡辺 証斗

MC2 三浦 和玖也

MC1 本間 雅也

B4 坂下 陽亮、鈴木 健太、小島 弓空

2. 研究成果

<原子核集団運動の微視的記述>

原子核の集団運動において、表面の変形による振動が起きたり、核全体の楕円体変形による回転運動が起きる。有限量子多体系の古典的な形状を決定する微視的なメカニズムの解明は Bohr, Mottelson (1975年ノーベル物理学賞) による統一模型の提唱以来核物理学の中心的な問題の一つである。我々は、核子多体系の密度汎関数理論 (DFT) と、代数模型の相互作用するボソン模型 (IBM) を融合させた手法をオリジナルに提唱・発展させており、特に重い原子核の構造と集団運動を微視的かつ統一的に記述するための理論的枠組みの構築に取り組んでいる。世界中の大型加速器実験が研究対象とする重い不安定核のこれらの現象に関して、国際的な理論・実験共同研究を展開している。

《変形共存》 野村

重い不安定核において基底状態近傍に複数の変形状態が現れる変形共存と呼ばれる現象が知られており、実験・理論ともに大きな注目を集めている。変形の共存は核子多体系の平均場模型においてはポテンシャルエネルギー上の複数の最小点となって現れるが、これをボソン系の IBM ハミルトニアンに写像することにより、変形共存とそれを特徴づける低エネルギー 0^+ 励起状態やその電氣的単極子 (E0) 遷移などの分光学的性質を解析する研究を進めている。代表的な成果として $N=28$ 領域の比較的軽い核にこの方法を応用し、特に 44S の 0^+ 第一励起状態の起源として、球形・変形状態の強い混合が起きている可能性を示唆した。Zagreb 大学の B. Maheshwari 博士との共同研究であり *Physical Review Letters* 誌に投稿中である (arXiv: 2401.11729)。

《8重極変形》 野村

核変形においては4重極モードが最も支配的であるが、ある特定の核子数をもつ原子核において洋梨型変形の8重極変形モードの自由度が重要となる。安定な8重極変形は荷電・パリティ不変性の破れをもたらす、素粒子の標準模型を超えた新しい物理を示唆する電気双極子モーメントの観測実験に必要な知見を与える。近年の不安定核ビームを用いた実験研究で盛んに研究されている主要なトピックスの一つである。我々は、4重極自由度に加え8重極変形の効果を考慮した IBM を導入し、その相互作用強度を密度汎関数平均法計算から決定する方法を開発・発展させている。これにより、正・負パリティ状態とそれらの間の電磁遷移を微視的に計算することが可能となっている。現在は、実験研究において重要な不安定核

における 8 重極変形・集団運動の系統的な解析に向けた準備を進めている。

《 1 6 重極変形 》 野村

通常の集団励起における回転バンドなどの状態は正パリティを持ち、ほとんどの場合は 4 重極変形自由度によって説明できる。その一方、基底バンドの高スピン状態では 4 重極自由度だけでは記述できない場合があり、さらに高次の核変形自由度として 1 6 重極モードを導入する必要があると示唆される。8 重極集団運動を扱ったものと同様の見地から 4 重極・1 6 重極両方の自由度を含む IBM 計算を行い、Gd 同位体において見られる、核子数の変化に伴う核構造の遷移を記述した。主な知見としては、特に球形に近い Gd 原子核の高スピン状態の記述において 1 6 重極変形の効果が必要であることが示された。これは Zagreb 大学の大学院生 L. Lotina 氏との共同研究であり、成果は Physical Review C 誌に再録決定済みである。

＜原子核の基本的崩壊過程＞

中性子と陽子が互いに交換される基本的な放射性崩壊である β 崩壊は、原子核構造の情報のみならず、初期宇宙における重い原子核の生成をはじめとする天体核現象を理解する上で重要である。隣り合う偶偶核の間で二つの陽子（中性子）が二つの中性子（陽子）に同時に交換される二重 β 崩壊は特に、電弱相互作用の種々の対称性や不変性の検証やニュートリノ質量とその性質に関する知見を提供するため、世界中の素粒子・原子核の研究者に共通の大きな課題である。

《中性子過剰核の β 崩壊 》 野村

密度汎関数理論計算を微視的インプットとして相互作用するボソン・フェルミオン模型の相互作用強度を決定する方法を発展させている。これを中性子過剰なジルコニウム領域の原子核に適用することで、この質量領域の偶偶・偶奇・奇奇核の低エネルギー励起を系統的に記述する計算を進めている。それに基づいて Gamow-Teller 遷移強度を計算し $\log(ft)$ 値など β 崩壊の種々の物理量を計算する枠組みを整備している。関連する成果は現在 Physical Review C 誌に投稿中である (arXiv: 2312.17456)。これは、個々の核種の低励起状態と核変換を統一的に記述する理論的枠組みを指向している。

《二重 β 崩壊の核行列要素の計算 》 野村

ニュートリノレス二重 β 崩壊の遷移行列の理論計算には用いる模型によって大きなばらつきがあり、理論的不定性の解析が求められる。密度汎関数に基づいた微視的な核構造模型を用いることで、いわゆる closure approximation を仮定しない、二重 β 崩壊の遷移確率計算の統一的な記述に取り組んでいる。

＜密度汎関数のパラメータ最適化＞ 野村

原子核構造・反応を記述するための模型にはパラメータが含まれ、信頼できる理論的予言のためには、機械学習などを駆使してそれらのパラメータを最適化し理論的不定性を評価することが求められる。核子多体系の密度汎関数理論で用いられるエネルギー密度汎関数は通常、いくつかの二重閉殻核の核物質特性を再現するようにパラメータが決められる。本研究では、情報幾何学的手法とベイズ統計を応用することで、相対論的な密度汎関数のパラメー

タの不定性を評価し、球形近傍の原子核の場合においてその有効性を確かめた。Zagreb 大学の院生 M. Imbrisak 氏と共同で進め、成果は Physical Review C 誌より出版されている。

<原子核におけるクラスター現象>

軽い原子核のクラスター状態の研究は原子核構造や原子核の多体問題を理解する上で新たな視点を与える重要なテーマである。さらに、宇宙核反応ではその中間状態としてクラスター共鳴状態をとることが多いため、核構造以外の側面からも重要なテーマである。本年は微視的なクラスター模型を用いて軽元素のクラスター状態を研究した。核構造の理解という点では REM と GCM を用いて ^{24}Mg の励起状態に $^{16}\text{O}+2\alpha$ の gas-like な状態を発見した。また、宇宙核反応についてはクラスター模型を用いて $^7\text{Be}+t$ 閾値近傍に複合核の共鳴状態が存在する可能性を示唆した。

《Gas-like bosonic states formed around $^{16}\text{O}_{\text{core}}$ nucleus close to the 2α decay threshold energy》 Htet

I studied alpha condensation situation in multi-alpha system (6 alpha system) by assuming the presence of the attractive Core nucleus oxygen16. As a theoretical method, I used Volkoff No.2 nucleon-nucleon interaction and real-time evolution method (REM) with Generator Coordinate method wavefunction. I investigated the alpha condensation situation by analyzing the time evolution of the $^{16}\text{O}+2\alpha$ system with the excitation energy of 30MeV, 50MeV and 70MeV, respectively.

《 $\alpha+^3\text{He}+t$ 共鳴状態によるリチウム問題の解決に向けた研究》 本間

現在、宇宙初期の進化を記述するモデルとしてビッグバン理論が幅広く支持されている。その理由の一つとして、ビッグバン後およそ 1000 秒までに合成される軽元素の存在量が理論と観測の間でよく一致していることが挙げられる。しかし、 ^7Li については理論により見積もられる存在量が実際に観測された存在量のおよそ 3 倍と、他の元素と比べて見積もりの精度が低い。これを解決するために $^7\text{Be}+t$ による反応を提案し、その実現可能性を複合核である ^{10}B の励起状態に $\alpha+^3\text{He}+t$ からなる共鳴状態を探ることにより調べた。

<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。中でも高イオン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予測を行った。

《2 クラスター原子核を用いた反応における蝕効果》 樋口

重陽子散乱や $^{44}\text{Ti}(^4\text{He}+^{40}\text{Ca})$ などの 2 つのクラスターで構成される原子核を用いた散乱では、反応断面積がそれぞれのクラスターのみを反応させた断面積の和より減少することがあり、これ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るもの(蝕効果)と考えられる。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、各クラスター単体との反応断面積の合計と比較した断面積の減少を求めた。2 クラスター間距離の波動関数の種類や半径を変化させる、クラスターが反応を完全吸収する球体と仮定して計算するなどによって断面積減少がどのように変化するかを調べることで、2 クラスター原子核の反応で見られる断面積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。実験データを再現するように最適化した核反応モデルのパラメータの値を用いて、機械学習を用いて回帰問題を解いた。中心力の深さを示す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できることが分かった。また、広いエネルギーでデータ数が豊富な全断面積の実験値を使い、機械学習に与える訓練データと推定の精度の関係を調べた。現在、核反応モデルのエネルギー依存性、標的核、入射粒子の依存性を同時に推定する試みを行っている。今後は上記の研究を進めるとともに、同時に最適値を求めるパラメータの数も増やすことを目指す。

3. 成果発表

<原著論文>

(査読あり)

- Kosuke Nomura,
“Microscopic formulation of the interacting boson model for reflection asymmetric nuclei”,
Invited contribution to the Special Issue “Reflection Asymmetry in Atomic Nuclei”,
Int. J. Mod. Phys. E (2023) 2340001
- M. Imbrisak, and K. Nomura,
“Stability of the manifold boundary approximation method for reductions of nuclear structure models”
Phys. Rev. C 107 (2023) 034304
- N.T. Brewer, E.H. Wang, W.A. Yzaguirre, J.H. Hamilton, K. Nomura, A.V. Ramayya, S.H. Liu, J.K. Hwang, B.M. Musangu, J.M. Eldridge, C.J. Zachary, Y.X. Luo, J.O. Rasmussen, S.J. Zhu, C. Goodin, G.M. Ter-Akopian, A.V. Daniel, and Yu.Ts. Oganessian,
“Octupole deformation in $^{143,145,146}\text{Ba}$ ”,
Nucl. Phys. A 1039 (2023) 122738
- M. Imbrisak, and K. Nomura,
“Classical and Bayesian error analysis of the relativistic mean-field model for doubly

magic nuclei”

Phys. Rev. C 108 (2023) 024321

- A. Pfeil, K. Nomura, N. Gavrielov, J.-M. Regis, U. Koster, Y.H. Kim, A. Esmaylzadeh, A. Harter, J. Jolie, L. Knafla, and M. Ley,
“Lifetime measurements in ^{99}Nb and ^{99}Zr : Investigation of shape coexistence”,
Phys. Rev. C 108 (2023) 034310
- R. Russell, J. Heery, J. Henderson, C. Hoffman, T. Beck, C. Cousins, P. Farris, A. Gade, S.A. Gillespie, A. Hill, H. Iwasaki, S. Kisyov, A. Kuchera, B. Longfellow, C. Müller-Gatermann, K. Nomura, E. Rubino, R. Salinas, A. Sanchez, D. Weisshaar, C.Y. Wu, J. Wu,
“Coulomb excitation of ^{96}Mo ”,
Phys. Rev. C 108 (2023) 064311

4. 学術講演

4.1. 国際学会・国際シンポジウム

<招待講演>

- Workshop on Shape Coexistence, E0 Transitions, and Related Topics, [University of Guelph, Guelph, Canada, 2023.05.01-05]
 - K. Nomura, “Shape coexistence and coupling of pairing and shape vibrations” (online)
- Chirality and Wobbling in Atomic Nuclei (CWAN’23), [Huizhou, China, 2023.07.10-14]
 - K. Nomura, “Structure of odd-mass γ -soft nuclei within the IBFM” (online)
- 17th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS17), [Grenoble, France, 2023.07.17-21]
 - K. Nomura, “Quadrupole-octupole coupling and the onset of octupole collectivity”
- Microscopic approach from pair correlation to pair condensation, [RCNP, Ibaraki, Japan, 2023.09.04-06]
 - K. Nomura, “Coupling of pairing and shape vibrations in nuclei”
- International Workshop “Shapes and Dynamics of Atomic Nuclei: Contemporary Aspects” (SDANCA-23), [Sofia, Bulgaria, 2023.09.21-23]
 - K. Nomura, “Onset of octupole shapes and its microscopic realization”
- International workshop on “The theoretical and experimental approaches for nuclear matrix elements of double-beta decay” (NME-23), [RCNP, Ibaraki, Japan, 2023.12.21-22]
 - K. Nomura, “Two-neutrino double- β decay within the mapped IBM”

<一般講演>

《口頭発表》

- A3F-CNS Summer School 2023, [RIKEN, Wako, Japan, 2023.08.04-10]

- *S. Watanabe, F. Minato, M. Kimura, N. Iwamoto and S. Yoshida “Nuclear data generation by machine learning”

《ポスター》

- Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2023), [Osaka University, Toyonaka, Japan, 2023.11.27-29]
 - *M. Homma, M. Kimura and S. Kubono, “Possible solution of ${}^7\text{Li}$ problem with dilute gas-like $\alpha+{}^3\text{He}+t$ resonance”

4.2. 国内学会・国内その他

＜一般講演＞

《口頭発表》

- 日本原子力学会 2023 年秋の年会大会, [名古屋大学東山キャンパス, 2023.09.06-08]
 - *渡辺証斗, 湊太志, 木村真明, 岩本信之, 吉田聡太, “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Ⅱ”
- 2023 年度核データ+PHITS 合同研究会, [東海村産業・情報プラザ「アイヴィル(iVi)」, 2023.11.15-17]
 - *渡辺証斗, 湊太志, 木村真明, 岩本信之, 吉田聡太, “Nuclear data generation by combining machine learning and nuclear reaction models”

5. 表彰

- 渡辺証斗、北海道大学理学院優秀研究奨励賞 [2023.07.11]
- 渡辺証斗、核データ部会奨励賞 “Nuclear data generation by machine learning (I) application to angular distributions for nucleon-nucleus scattering.” [2023.09.08]

6. 科研費、助成金取得状況

- 野村昂亮、科研費・研究成果公開促進費(代表)、2023.04-2024.03、1,000 千円、“原子核反応データファイル”