

原子核および中性子星の量子ダイナミクス

Quantum dynamics in nuclei and neutron stars

中務 孝

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

核子多体系である原子核を、核子の自由度から量子力学的に理解する微視的研究は、最近の計算機能力の発展に伴い質的な変貌を遂げている。特に、重い原子核から中性子星内部の巨大原子核・無限核物質を対象にできる密度汎関数理論(DFT)による記述が近年目覚しく発展している。また、重力波による中性子星合体の観測と重元素合成を示唆するデータの観測など、中性子星の観測データも近年大きな発展を見せている。そこで本研究プロジェクトでは、DFTに基づく原子核の励起構造・反応機構の研究を進め、ミクロな原子核の研究をマクロな中性子星パルサーの観測データと結びつけ、核子多体系の量子ダイナミクスに対する理解を深めることを目的とする。特に、時間依存密度汎関数理論(TDDFT)に基づく核分裂・核融合・移行反応過程の研究、中性子星インナー・クラストの構造と自由中性子の対相関・超流動ダイナミクスの研究を進める。

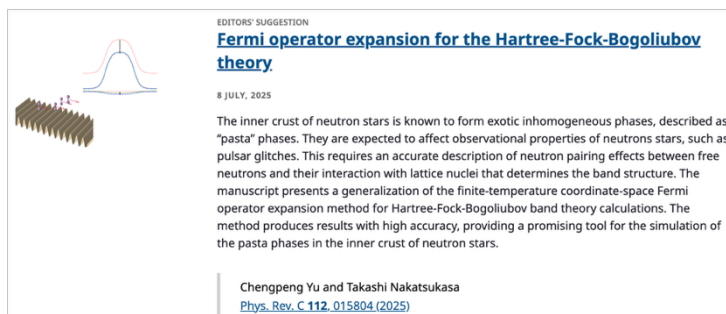
2. 研究成果の内容

主に昨年度の成果として、フェルミ演算子展開法を超流動状態

(Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB)理論)においても適用できるよ

うに拡張したこと、バンド理論と組み合わせた方法を開発し、中性子星インナー・クラストに対して適用可能な形を確立したことを報告済みであるが、この成果論文がジャーナル *Physical Review C* に出版され、ハイライト論文として **Editors' suggestion** に選ばれた (①)。2025 年度は、中性子星インナー・クラストにおける自由中性子の有効質量に対する幾つかの異なるアプローチに関して、お互いの関係を精査し、数値計算を通してその同等性等を検証した。これに関する論文を準備中である。

また、これまで進めてきた密度汎関数理論と殻模型 (CI) 計算を組み合わせたハイブリッド・モデルの開発が進み、pf 殻 (pf-shell) 核において系統的な数値計算を実行し



た。通常の密度汎関数計算では取り扱いが難しい原子核として、陽子数や中性子数が奇数である原子核（奇核・奇々核）があげられるが、殻模型的な制限された模型空間における有効ハミルトニアンに対角化を通して、これらの原子核においても基底状態・励起状態のスペクトルや性質を得ることができた。奇核においては基底状態のスピン・パリティ再現率が 80%程度となり、高い信頼性を持った理論手法が確立できたと考えている。密度汎関数を通した有効ハミルトニアンの簡便な構築法により、様々な質量領域における核種に対して適用可能な殻模型計算が実行できるモデルの構築に成功した。この成果は論文②および③として出版され、筆頭著者である吉永氏が博士号（理学）を取得した。現在、模型空間を拡張した計算によって負パリティ状態や状態密度の計算も進めており、日本原子力研究機構（JAEA）のグループとの協力によって、様々な反応計算への応用も進めている。

また、線形応答計算手法として我々が提案した有限振幅法（FAM: Finite Amplitude Method）に関して計算を進め、レビュー論文を執筆した。連続状態を厳密に扱うグリーン関数法（連続 RPA）に対する応用についても検討を行なっている。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

上記の研究成果を得る上で、学際共同利用プログラムによる計算資源提供は重要な役割を果たした。特に、Miyabi-C を中心とした計算資源の活用が不可欠であり、また、フェルミ演算子展開法の HFB 理論への適用に関しては、Pegasus における GPU を利用した計算を行い、ここでも重要な役割を果たした。

4. 今後の展望

フェルミ演算子展開法については、2次元・3次元の系を扱える計算コードの多次元化を進める必要がある。計算量の大きな増大が予想され、また収束性の問題にも取り組む必要がある。また、現実的な有効相互作用・密度汎関数を用いた計算へと発展させるための準備を進めている。また、ハイブリッドモデルの計算については、準位密度計算を中心に大規模数値計算を予定しており、原子力工学にもつながる応用面への貢献も大いに期待される。

5. 成果発表

(1) 学術論文（以下、全て査読有）

- ① C. Yu and T. Nakatsukasa, “Fermi Operator Expansion for the Hartree-Fock-Bogoliubov Theory”, Phys. Rev. C 112, 015804 (2025).
- ② K. Yoshinaga, N. Shimizu, T. Nakatsukasa, “Shell-model calculation with density-dependent interaction for pf-shell nuclei”, Prog. Theor. Exp. Phys.,

2026, 033D04 (2026).

- ③ K. Yoshinaga, N. Shimizu, T. Nakatsukasa, “Nuclear structure study using a hybrid approach of shell model and Gogny-type density functionals”, *Particles*, 8, 61 (2025).
- ④ K. Hagihara, N. Hinohara, T. Nakatsukasa, “Effect of the Coulomb Interaction on Nuclear Deformation and Drip Lines”, *Particles*, 8, 72 (2025).

(2) 学会発表（以下、国際会議での招待講演を抜粋）

- ① T. Nakatsukasa, “Nuclei and nuclear matter at finite temperature: Fermi operator expansion”, Daegu Theory Workshop on Nuclear Structure, Reaction, and Astrophysics, Daegu, Korea, July 17-18, 2025（招待講演）.
- ② T. Nakatsukasa, “Fermi operator expansion method for nuclei and inhomogeneous nuclear matter at finite temperature”, Nuclear physics across energy scales, Wuhan, China, September 19-21, 2025（招待講演）.
- ③ T. Nakatsukasa, “Nuclear DFT studies on light clusters”, 9th Heavy Ion Accelerator Symposium (HIAS2025), Canberra, Australia, September 8-12, 2025（招待講演）.
- ④ T. Nakatsukasa, “TDDFT for nuclear structure and low-energy reaction”, Workshop on recent developments from QCD to nuclear matter, Taipei, Chhina, December 17-20, 2025（招待講演）.

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	2400		
Miyabi-G				
Miyabi-C	○	4400		
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				