

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

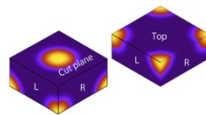
1. 研究目的

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

本年度は、昨年度からの継続で、フェルミ演算子展開法を用いた有限温度密度汎関数計算のコード開発を推進し、論文発表を行なった。また、「局所アルファ強度」(local alpha strength) という量を提唱し、この計算を実施することで原子核内のアルファ粒子の分布を調べることができることを示した。5次元集団模型パラメータの微視的計算も推進し、Pd アイソトープにおいて様々な励起状態を記述することに成功した。

もう少し詳細を説明すると、まず、フェルミ演算子展開法では、チェビシェフ多項式展開によりハミルトニアン H の有限回の演算によって有限温度における一体密度行列を構成する。オーダー N 法の一つとして固体中の電子を記述する手法として用



EDITORS' SUGGESTION

Fermi operator expansion method for nuclei and inhomogeneous matter with a nuclear energy density functional

Calculations for nuclear structure at high excitation energy or of nuclear matter in explosive stellar phenomena and neutron stars require intensive computations. The author tests the performance of a numerical method based on Fermi operator expansion that requires neither diagonalization nor Gram-Schmidt orthonormalization. The approach is suitable for massively parallel computing with distributed memory, and the calculations promise to scale well for large space sizes. Applied to finite nuclei and inhomogeneous nuclear matter, the method is efficient at high temperature, and the calculations clearly show the liquid-gas phase transition.

Takashi Nakatsukasa

Phys. Rev. C **107**, 015802 (2023)

図 1 Phys. Rev. C における Editors' suggestion 選出

いられているが、原子核および核物質に対する計算はこれまで皆無であった。有限温度での中性子星クラストを対象とした計算で、十分に優位性が発揮できることを示した成果として、*Physical Review* 誌に出版した論文が *Editors' suggestion* に選ばれた (図1)。また、局所アルファ強度を用いた核内アルファ粒子の探索においては、錫のアイソトープを対象に平均場計算を実行し、最近阪大 RCNP で行われたアルファ・ノックアウト実験との *consistency* を確認した。この結果は対相関を取り入れた平均場理論において、原子核表面付近におけるアルファ粒子の出現が記述できる可能性を示している。

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、2022年度の成果においては、温度・密度変化による新規の核物質相の解明、原子核構造に関する新規の計算手法開発において重要な役割を果たした。

4. 今後の展望

コロナ禍の後遺症が残っており、大規模計算を系統的に実施する体制がまだ完全には回復できていない。コロナ禍以前の状態に戻りつつあるが、これが課題の一つとして残っている。コード開発に関しては順調に進んでおり、新たな物理を目指した計算を実施する準備は整いつつあり、次年度以降に成果が期待できる状況である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① T. Nakatsukasa, “Fermi operator expansion method for nuclei and inhomogeneous matter with a nuclear energy density functional”, *Phys. Rev. C* 107, 15802 (2023).

(2) 学会発表

- ① N. Hinohara, “Global analysis of nuclear pairing rotation”, Invited talk at Physics of RI: Recent progress and perspectives, Wako, Japan, May 30-June 1, 2022.
- ② N. Hinohara, “Recent progress in nuclear DFT”, Invited talk at YITP workshop on Fundamentals in density functional theory (DFT2022), Kyoto, Japan, Dec. 7-20, 2022.
- ③ T. Nakatsukasa, “Mass parameters for nuclear reaction models and nucleonic effective mass”, Invited talk at YIPQS long-term workshop “Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022),

Kyoto, Japan, May 9-June 17, 2022.

- ④ T. Nakatsukasa, “Alpha particle distribution in nuclei”, Invited talk at International Conference on Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory (SSNET 2022), Orsay, France, May 30-June 3, 2022.
- ⑤ T. Nakatsukasa, “Requantization of TDDFT on collective subspace”, Invited talk at 21st international conference on recent progress in many-body theories (RPMBT-XXI), Chapel Hill, NC, USA, Sep. 12-16, 2022.
- ⑥ T. Nakatsukasa, “Requantizing the time-dependent density functional dynamics”, YITP workshop on Fundamentals in density functional theory (DFT2022), Kyoto, Japan, Dec. 7-20, 2022.

上記の国際会議招待講演以外に、国内会議招待講演 4 件、国際会議講演 5 件、ポスター発表 7 件

(3) その他

- ① 中務孝、「原子核の観点から見る量子多体系：有限系における量子現象」、数理科学、サイエンス社 714 巻 12 号 pp. 36-43.

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Wisteria/BDEC-01	○	153,000	0
※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。			