

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

密度汎関数計算の **Order-N** の計算量をもつ方法として知られる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。さらに、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することができた。この手法を用いて、本年度はまずスラブ相と呼ばれる密度変化が1次元方向に限られる系について非一様核物質への応用の可能性を探るため、数値計算を実行した。その結果、最も計算量が大きくなると考えられるゼロ温度極限においても実施が可能であることがわかった。この結果を論文にまとめ現在投稿中であり、内容の一部はプロシーディングスに出版された(④)。

また、前年度において開発した局所 α 除去強度関数を拡張し、局所 α 付与強度関数を定義し、重い原子核の α ノックアウト反応に加えて α 移行反応に関する研究を可能にするための開発を実施した。対応する数値計算コードを開発し、Hartree-Fock-plus-BCS (HF+BCS)理論の枠組みにおける α 移行反応に関する核構造情報を提供できるよ

うにした。さらに、これまで α 粒子の定義として陽子・中性子（スピン上下）の4粒子が同一座標に存在することとしてきたが、より現実的な有限の広がりを持った α 粒子の波動関数を利用することで定量的な評価を可能にすることができた。この拡張により、クラスター構造の研究において α 換算幅振幅（ α -reduced width amplitude）と呼ばれている物理量を計算することが可能となり、今後、核反応模型に対する微視的インプットとして利用することを検討中である。この preliminary な成果は、クラスター国際会議 SOTANCP5 において発表し、プロシーディングスに出版された (③)。

5次元集団運動ハミルトニアン of 微視的構築に関して大きな進展があり、局所準粒子乱雑位相近似（Local QRPA）に基づく集団慣性質量の計算を可能とすることで、これまで無視されてきた残留相互作用の効果、特に時間反転に対して符号を変える平均場の time-odd 成分の効果の自己無撞着に取り入れるスキームを確立した。これに基づく数値計算コードの開発を実施し、110Pd の低エネルギー・スペクトルを見事に再現できることを示した。この成果は、Physical Review C のレター・セクションに出版された (①)。

異種粒子間の対相関であるアイソスカラー型およびアイソベクトル型の陽子・中性子対の相関について、生成座標法（GCM）を用いて統一的に取り入れる研究についても成果があった。陽子数と中性子数が等しい $N=Z$ の原子核、特にその数が奇数である odd-odd 核について対相関の効果、実験データとの比較等を行った。その結果、アイソスカラー型の相関に関する情報を取り出す上で重要な実験データ等に関して提言を行うことができた。この成果は、Progress of Theoretical and Experimental Physics に出版した (②)。

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、Wisteria-O 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、Cygnus や 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

上で述べた成果はどれも発展途上段階であり、今後計算コードの多次元化やより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。また、現在対回転の性質に関する研究がまとまりつつあり、論文出版に向けた準備が進められている。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① K. Washiyama, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa, “Five-dimensional collective Hamiltonian with improved inertial functions”, Phys. Rev. C 109, L051301 (2024).
- ② K. Uzawa, N. Hinohara, T. Nakatsukasa, “Generator Coordinate Method with Proton–Neutron Pairing Fluctuations and Magnetic Properties of $N=Z$ Odd–Odd Nuclei”, Prog. Theor. Exp. Phys., 2024, 053D02 (2024).
- ③ C. Yu, “Study on axial fields in the dynamically assisted Schwinger effect”, Phys. Rev. D 111, 056017 (2025).
- ④ T. Nakatsukasa and N. Hinohara, “Local alpha strength functions for alpha knockout reactions”, EPJ Web Conf. 311, 00021 (2024).
- ⑤ T. Nakatsukasa and C. Yu, “Energy density functional approaches to inhomogeneous superfluid neutron-star matter”, PoS(QNP2024) 465, 170 (2025).
- ⑥ C. Ruike, K. Wen, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa, “Collective-subspace requantization for sub-barrier fusion reactions: Inertial functions for collective motions”, EPJ Web Conf. 306, 01006 (2024).
- ⑦ K. Washiyama, “Spontaneous fission half-life in Fm isotopes with nuclear energy density”, EPJ Web Conf. 306, 01026 (2024).

(2) 学会発表（以下、国際会議での招待講演を抜粋）

- ① T. Nakatsukasa, “Energy density functional approaches to inhomogeneous superfluid neutron-star matter”, QNP2024, Barcelona, Spain, July 8-12, 2024（招待講演）.
- ② T. Nakatsukasa, “ α knockout and transfer strengths in heavy nuclei”, SSNET'24, Orsay, France, November 4-8, 2024（招待講演）.
- ③ T. Nakatsukasa, “Structure of neutron-star crust: Inhomogeneous matters and superfluid neutrons”, MPQCP 2025, Kobe, Japan, January 21-22, 2025（招待講演）.
- ④ N. Hinohara, “Nuclear collective excitation based on the finite-amplitude method for the quasiparticle random-phase approximation”, Single-particle and collective motions from nuclear many-body correlation (PCM2025), Aizu-Wakamatsu, Japan, March 4-7, 2025（招待講演）.
- ⑤ K. Washiyama, “Microscopic description of collective inertia and fission path for spontaneous fission”, ESNT workshop: Dynamics of Nuclear Fission, Saclay, France, December 16-19, 2024（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*	追加配分
Cygnus	○	3000	-3000	
Pegasus	○	1000	+1500	
Wisteria/BDEC-01	○	40000		
	※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			