

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、まず核物質や原子核内部におけるアルファ粒子の存在確率の指標となる局所 α 強度関数 (Local α strength function) を定義し、核物質中の α 粒子の探索、特に α 粒子を特定の場所から取り除いた時に残される原子核の励起エネルギーを指定した強度関数の計算を行った。原子核は Skyrme 型エネルギー汎関数を用いて記述し、対相関を BCS 近似で扱った。 α 粒子の種になる構造は核内に広がっており、中心付近においても十分な強度があることが分かった。しかしながら、中心付近から α 粒子を取り出すと、残留核は非常に高く励起される。残留核の励起エネルギーを制限すると、核表面近傍に強度が集中する。また、局所 α 強度関数は密度分布だけでなく対密度 (pair/abnormal density) の分布・強さに非常に敏感であり、特に核表面付近で α 粒子が析出するという現象論的解釈に整合する性質は、この対密度分布の性質を色濃く反映している。局所 α 強度関数を陽子・中性子 (スピン上向き・下向き) の4種類の密度で割った量、局所 α 確率 (local α probability) によって、このことは顕著に示されることが分かった。最近阪大 RCNP で行われた錫アイソトープにおける α ノックアウト実験は、中性子数の増加によって断面積が減少することを示している。この系統

的性質は、低密度によるアルファ粒子析出という現象論的モデルで理解されていたが、我々の微視的研究においても実験と矛盾のない結果を得ており、新たな解釈では、本質的なのは低密度核物質という性質ではなく、対密度分布と残留核の励起エネルギーということになる。この研究は、中性子星のクラスト領域に現れる非一様核物質中における α 粒子の存在確率の解析にも応用でき、今後も発展を目指している。

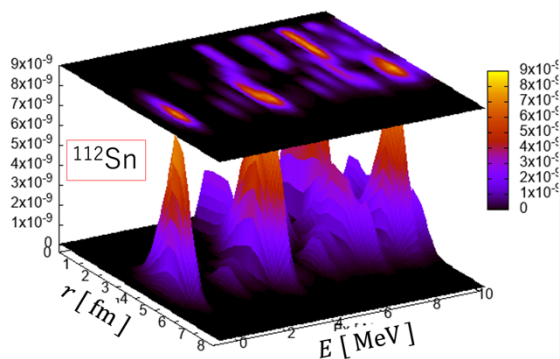


図 1: 計算された ^{112}Sn の局所 α 強度関数。

また、これ以外にも 5 次元集団ハミルトニアン法における集団慣性質量の新たな計算手法や陽子・中性子間の対密度（対ギャップ）を生成座標とした生成座標法（GCM）の計算などに成果が出ており、論文にまとめる作業を行った。

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、2023 年度の成果においては、局所 α 強度関数の数値計算において Wisteria-O を中心とした計算資源の活用が不可欠であった。また、研究成果の内容では割愛したが、フェルミ演算子展開法の HFB 理論への適用に関して、テスト計算や実証実験を行う際にも非常に重要な役割を果たした。

4. 今後の展望

実験データが得られる原子核から中性子星物質までの様々な大規模数値計算プロジェクトが現在進行中であり、様々な成果が得られている。これらをまとめる作業を実施するとともに、より高精度・高効率なコード開発を実施している。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① T. Nakatsukasa and N. Hinohara, “Local α -removal strength in the mean-field approximation”, Phys Rev. C 108, 014318 (2023).
- ② K. Hagihara, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa, “Quantum binding effect for nuclei at neutron dripline”, accepted for publication in Springer Proceedings in Physics.
- ③ K. Washiyama, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa, “Five-dimensional

collective Hamiltonian with improved inertial functions”, arXiv: 2403.00214, submitted to Phys. Rev. C.

(2) 学会発表

- ① T. Nakatsukasa, “Nuclear pairing and alpha particle formation”, Reimei Workshop “Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction”, Tokai, Japan, February 28-March 1, 2024 (招待講演) .
- ② T. Nakatsukasa, “Transport properties of neutrons in neutron-star crust”, Workshop on Bridging the Gaps: Interdisciplinary Collaborations in Constraining the Physics of Finite Nuclei, Neutron Stars, and Dark Matter, National Institute of Technology Rourkela, India, Online, July 3-7, 2023 (招待講演) .
- ③ T. Nakatsukasa and N. Hinohara, “Local alpha strengths in the HF+BCS calculation”, Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2023), Osaka University, Toyonaka, Japan, Nov. 27-29, 2023 (招待講演) .

上記の国際会議招待講演以外に、国内会議招待講演 8 件、国際会議講演 10 件、ポスター発表 4 件

(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 | 追加配分 |
| Cygnus | ○ | 1,000 | 0 |
| Pegasus | ○ | 1,000 | 0 |
| Wisteria/BDEC-01 | ○ | 50,000 | 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。 | | | |