

## 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、(1) 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、(2) 低エネルギー核融合反応の微視的記述、および (3) 5次元集団モデルパラメータの微視的計算において成果があった。まず、(1) のフェルミ演算子展開法は、フェルミ・ディラック分布関数をチェビシェフ多項式で展開することで、ハミルトニアン  
の有限回の演算によって一体密度行列を構成する方法である。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いられているが、通常の原子核では核子数はせいぜい 300 程度であり、手法の優位性が発揮できないため未開発であった。一方、有限温度での中性子星クラストを対象とした場合には、十分に優位性が発揮できる可能性があり、これをテストする計算を実行した。その結果、高温におけるオーダー $N$ のスケールリングが確認でき、低温においても行列対角化を用いない手法として十分に高いパフォーマンスを確認した。(2) では、核内において核子が有効質量を獲得し、真空中の核子よりも 30%程度軽くなると考えられているが、これが引き起こす問題について研究した。例えば、原子核の並進運動の慣性質量をよく知られたクランキ

グ公式を用いて計算すると、 $Am$  ( $A$ :核子数、 $m$ :真空中での核子質量) となるべきところ、有効質量効果でこの 0.7 倍程度になってしまう (図参照)。これは、平均場ポテンシャルがガリレイ不変性を破っていることに起因しているが、原子核を有限の運動量で並進させた時に生じるカレントの効果によって、本来この不変性は回復すべきである。この破れた対称性の回復効果を取り入れることができる理論に基づく計算を実行し、核反応を記述するモデルハミルトニアンに入るべき慣性質量やポテンシャルを自己無撞着に計算することに成功した。(3) では、(2)と同様の手法を用いて、微視的集団慣性質量計算を実行し、5次元集団模型を微視的に構築し、形状揺らぎの大きな原子核の低エネルギースペクトル計算を実行した。これまでの研究において数値的な問題となっていたいくつかの点を解決することができ、より信頼性の高い計算を実行できる足固めができたと考えている。

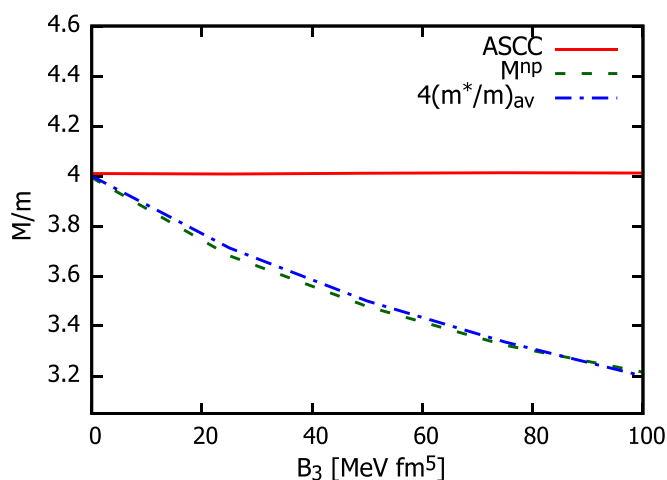


図 微視的に計算されたアルファ粒子の質量。 $B_3 \neq 0$ の場合には核子有効質量が真空中の質量よりも軽くなる。本研究の理論手法 (ASCC) では、 $B_3$ の値によらず常に正しい値 $4m$ となることが示される。

### 3. 学際共同利用が果たした役割と意義

2021 年度は、コロナ禍による課題チームの立て直し期間と位置付けたため、HPCI 一般利用課題などにプロジェクト申請を行うことができなかった。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、決定的に重要な役割を果たしている。新たなコード開発・テスト計算などに大きな貢献があっただけでなく、プロダクトランによる核反応・核構造における物理的洞察を可能にする結果を得る上でも重要な役割を果たした。

### 4. 今後の展望

2020 年度にはコロナ禍によって課題全体の立て直しを強いられたが、2021 年度において今後の発展に繋がる重要な成果があり、これらの成果のもと、2022 年度にはその発展を進めていく。特に、安定した数値計算コード開発に大きな進展があり、引き続き

順調な進展が得られれば、2023 年度移行、再び HPCI 一般利用課題のプロジェクトを含めた大規模な申請を検討したいと考えている。

## 5. 成果発表

### (1) 学術論文

- ① T. Nakatsukasa, “Self-consistent energy density functional approaches to the crust of neutron stars”, EPJ Web of Conf. 260, 11041 (2022).
- ② K. Wen and T. Nakatsukasa, “Microscopic collective inertial masses for nuclear reaction in the presence of nucleonic effective mass”, Phys. Rev. C 105, 034603 (2022).
- ③ Y. Hashimoto, “Isospin equilibration in reaction  $^{20}\text{O} + ^{34}\text{Mg}$  by Gogny-TDHF method”, INFORMATION 24, 189 (2021).

### (2) 学会発表

- ① T. Nakatsukasa, “Self-consistent energy density functional approaches to the crust of neutron stars”, 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, Chengdu, China & Online, Sep. 21-25, 2021 (Poster).
- ② K. Wen, “Adiabatic self-consistent collective coordinate (ASCC) in nuclear fusion reactions”, RCNP workshop on “Cluster phenomena in knockout and astrophysical reactions”, Online, Oct. 14-15, 2021.
- ③ T. Nakatsukasa, “Cluster formation & dynamics in low-energy nuclear reaction”, 13th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Online, Oct. 8, 2021.
- ④ T. Nakatsukasa, “Computational nuclear data for various applications”, 2022 LBNL/CSA-Tsukuba/CCS Collaboration Meeting, Online, March 23-24, 2022.
- ⑤ 中務、「フェルミ演算子展開法による中性子星クラスト計算」、日本物理学会 2021 年秋季大会、オンライン、2021 年 9 月 14-17 日。
- ⑥ 鷲山、日野原、中務「密度汎関数法による四重極集団ハミルトニアン of 集団慣性質量の記述」、日本物理学会 2021 年秋季大会、オンライン、2021 年 9 月 14-17 日。
- ⑦ 中務、日野原、「核内における局所的アルファ粒子生成指標」、日本物理学会 第 77 回年次大会、オンライン、2022 年 3 月 15-19 日。
- ⑧ 日野原、「対回転慣性モーメントの全核種計算」、日本物理学会 第 77 回年次大会、オンライン、2022 年 3 月 15-19 日。

- ⑨ 鷺山、日野原、中務、「FAM-QPRA に基づく四重極集団模型による遷移領域核の記述」、日本物理学会第 77 回年次大会、オンライン、2022 年 3 月 15-19 日。
- ⑩ 中務、「パルサー・グリッチ機構解明に向けた有限温度非一様核物質と大規模並列計算」、京都大学原子核理論セミナー、2021 年 12 月 17 日（招待講演）。
- ⑪ 鷺山、「微視的集団慣性質量の記述に基づく核分裂の研究とその応用」、京都大学原子核理論セミナー、2021 年 12 月 17 日（招待講演）。

(3) その他

- ① T. Nakatsukasa, “Nuclear dynamics and energy density functional theories”, Online lectures, Lanzhou University, China, March 30-April 1, 2022.

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	○	900	0
Oakforest-PACS	○	206,550	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。			