

原子核・フェルミ多体系の量子ダイナミクス

Quantum dynamics in nuclear and fermion many-body dynamics

中務 孝

筑波大学 計算科学研究センター

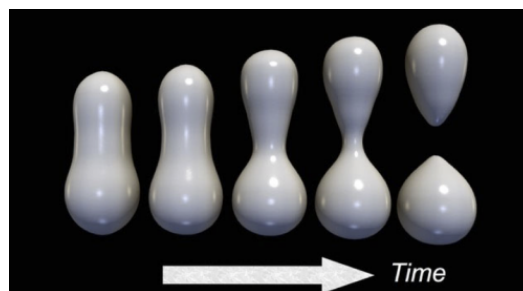
1. 研究目的

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。軽い原子核に対する第一原理的アプローチに加えて、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)による記述が発展している。我々は、DFTに基づく原子核の励起構造・反応機構の研究を進め、これら核子多体系の量子ダイナミクスを微視的観点から理解することを目標に、本研究課題を推進している。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、また、強相関フェルミ多体量子系として共通する課題であるトラップ中の冷却原子ガスの対相関・超流動ダイナミクスの研究を進め、フェルミ粒子多体系の統一的観点から理解することを目的としている。この目的のため、メニーコア・プロセッサを用いた高効率のコード開発を行う。

2. 研究成果の内容

COMA

2017年度に引き続き、対凝縮相にある原子核同士の衝突における核子移行、および核分裂反応について研究を推進した。特に、後者の核分裂反応の解析において大きな成果があり、重いアクチノイド領域の原子核の誘起核分裂反応で観測されている分裂片の質量分布、特にキセノンなどのフラグメントが多く出現する理由を解明することができた。この研究は、我々が開発してきた正準座標 TDHFB (Cb-TDHFB) 理論と呼ばれる計算手法を用いて行われ、分裂途中の殻効果、特にヒョウタン型の変形である八重極変形に伴う殻効果が重要であることを大規模並列シミュレーションで示した。これは、これまで理解できていなかった実験データを理解する画期的な成果として、Nature 誌に掲載され、筑波大学においてもプレスリリースされた (2018年12月)。



子核の誘起核分裂反応で観測されている分裂片の質量分布、特にキセノンなどのフラグメントが多く出現する理由を解明することができた。この研究は、我々が開発してきた正準座標 TDHFB (Cb-TDHFB) 理論と呼ばれる計算手法を用いて行われ、分裂途中の殻効果、特にヒョウタン型の変形である八重極変形に伴う殻効果が重要であることを大規模並列シミュレーションで示した。これは、これまで理解できていなかった実験データを理解する画期的な成果として、Nature 誌に掲載され、筑波大学においてもプレスリリースされた (2018年12月)。

また、同様の理論に基づく、原子核基底状態および光応答に関する系統的計算の成果をまとめ、これを理論計算核データとして、**InPACS (Interactive Plot of Atomic nuclei and Computed Shapes)** という名前のウェブサイト¹⁾に公開した。実験データが存在しない核種を含め、およそ4,000核種の計算データを、基礎科学のみに限らず、原子力工学等の応用にも資するよう公開した。この成果についても、2019年1月に筑波大学においてプレスリリースを行った。



Oakforest-PACS

2018年度では、メニーコアプロセッサ (**Knights Landing** アーキテクチャ) でのコード開発を進め、原子核の非制限計算を進める上での重要な成果があった。対称性の制限を一切排除したフル3次元実空間基底のコード開発を進め、特に、有限温度での計算を可能にするコード開発に成功した。この方法は、2017年度に開発を行った、準粒子軌道を用いない新たな **HFB** 計算コードに温度を導入したものであり、新しい理論に基づく計算手法・その計算の実行可能性を証明することができた。拡張されたグリーン関数を用いて、複素エネルギー平面上での周回積分から通常密度・対密度を決定する理論であり、最大で空間格子点の数までのノード数において、これまでになく高い並列効率が得られることを示した。また、2017年度には無視していたスピン・軌道相互作用を導入したフルの **HFB** 計算のコード開発を実行した。このコードを用いて、有限温度におけるいくつかのテスト計算に加えて、水銀核のアイソトープを対象としたプロダクトランを実行した。現在、この成果をまとめている段階である。

3. 学際共同利用として実施した意義

これらの成果は、学際共同利用によるスパコンの無償利用無しには実現できなかった成果である。2019年度からは、**HPCI** プロジェクトにおいても **Oakforest-PACS** を用いたプロジェクトを始動させることができたが、こちらも、2017-2018年度の学際共同利用において実行してきた、3次元実空間基底 **HFB** 計算の新たなコード開発を基礎としており、学際共同利用無しには実現できなかったプロジェクトである。

4. 今後の展望

スパコン **COMA** を用いた計算で多くの成果をあげることができたが、**COMA** が稼働を停止したため、今後は **Oakforest-PACS** を中心にした計算・コード開発を実行していく。**COMA** を中心にチューニングされたコードについても、今後、**Knights Landing** アーキテクチャでのチューニングを進めていく予定である。また、物理の内容としては、核構造・核反応・中性子星において、核子超流動性がもたらす様々な集団的現象を徹底的・統一的観点から解明していく予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① F. Ni, N. Hinohara, T. Nakatsukasa, “Low-lying collective excited states in nonintegrable pairing models based on the stationary-phase approximation to the path integral”, *Phys. Rev. C* 98, 064327 (2018).
- ② K. Washiyama, T. Nakatsukasa, “Multipole modes for triaxially deformed superfluid nuclei”, *JPS Conf. Proc.* 23, 13012 (2018).
- ③ K. Wen, T. Nakatsukasa, “Nuclear reaction path and requantization of TDDFT”, *JPS Conf. Proc.* 23, 12024 (2018).
- ④ F. Ni, T. Nakatsukasa, “Comparative study of requantization of time-dependent mean-field for dynamics of nuclear pairing”, *Phys. Rev. C* 97, 044310 (2018).
- ⑤ K. Wen, M. C. Barton, A. Rios Huguet, P. Stevenson, “Two-body dissipation effect in nuclear fusion reactions”, *Phys. Rev. C* 98, 014603 (2018).
- ⑥ G. Scamps, C. Simenel, “Impact of pear-shaped fission fragments on mass-asymmetric fission in actinides”, *Nature* 564, 382 (2018).

(2) 学会発表

- ① T. Nakatsukasa, “Selfconsistent band calculation for 1D neutron-star crust”, Workshop on Nonequilibrium phenomena in superfluid systems, Mar. 1-3, 2019, Warsaw, Poland (招待講演) .
- ② T. Nakatsukasa, F. Ni, N. Hinohara, “Multi-reference EDF theory alternative to GCM: Application to the pairing model”, 2nd Tsukuba-CCS workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics, Dec. 10-12, 2018, Tsukuba, Japan.
- ③ T. Nakatsukasa, “Nuclear structure and reaction with quantum shape fluctuation”, 13th International Conference on nucleus-nucleus collisions (NN2018), Dec. 4-8, 2018, Saitama, Japan (招待講演) .
- ④ T. Nakatsukasa, “Self-consistent determination of nuclear reaction path and clustering”, ECT* workshop on indirect methods in nuclear astrophysics, Nov. 5-9, 2018, Trento, Italy (招待講演) .
- ⑤ T. Nakatsukasa, “Theories of nuclear large amplitude collective motion”, 1st APCTP-TRIUMF joint workshop on understanding nuclei, Sep. 14-19, 2018, Pohang, Korea (招待講演) .
- ⑥ T. Nakatsukasa, “Dipole response in exotic nuclei”, ECT* workshop on

Probing exotic structure of short-lived nuclei by electron scattering, Jul. 16-20, 2018, Trento, Italy (招待講演) .

- ⑦ T. Nakatsukasa and F. Ni, “Collective coordinate for pairing dynamics and requantization of TDHFB”, Fifth joint meeting of the Nuclear Physics Divisions in APS and JPS, Oct. 23-27, 2018, Waikoloa, HI, USA.
- ⑧ K. Yoshida, “Analog pygmy-dipole resonance and low-lying charge-exchange dipole state in neutron-rich nuclei”, 6th International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions, Oct.29-Nov.2, 2018, Cape Town, South Africa (招待講演) .
- ⑨ K. Yoshida, “Beta-decay around 78Ni : $N=50$ magic number and shell structure”, YITP workshop on Recent advances in nuclear structure physics 2018 (RANSP2018), Nov.29-Dec.3, Kyoto, Japan.
- ⑩ N. Hinohara, “Binding-energy differences of even-even nuclei and pairing correlation”, 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018), Dec. 4-8, 2018, Saitama, Japan.
- ⑪ N. Hinohara, “Nuclear density functional theory for description of collective excitation”, 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJNP2018), Nov. 18-23, 2018, Huizhou, China (招待講演) .
- ⑫ N. Hinohara, “Nuclear density functional theory for collective excitation”, Fifth joint meeting of the Nuclear Physics Divisions in APS and JPS, Oct. 23-27, 2018, Waikoloa, HI, USA (招待講演) .
- ⑬ N. Hinohara, “Application of finite-amplitude method for nuclear collective motion”, PKU-CUSTIPEN workshop on Low-Energy Nuclear Dynamics and Effective Nuclear Interactions, Sep. 17-19, 2018, Beijing, China (招待講演) .
- ⑭ N. Hinohara, “Collective motion in stable and unstable nuclei within nuclear density functional theory”, IX International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2018), Sep. 10-15, 2018, Petrozabovdsk, Russia (招待講演) .
- ⑮ N. Hinohara, “Neutron-proton DFT”, The 4th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model (SADO2018), Aug. 18-20, 2018, Sato, Japan.
- ⑯ K. Wen, T. Nakatsukasa, “Collective coordinates in nuclear fusion reactions”, IOP (Institute of Physics) Nuclear Physics Conference, Apr. 4-6, 2018, Paisley, UK.
- ⑰ K. Wen, “Dissipation dynamics of nuclear fusion reactions”, Zakopane

Conference 2018 on Nuclear Physics, Aug. 26 – Sep. 02, 2018, Zakopone, Poland.

- ⑱ G. Scamps, “Dynamical effects of superfluidity on multi-nucleon transfer, fusion and fission”, ECT* workshop on Spontaneous and induced fission of very heavy and super-heavy nuclei, Apr. 9-13, 2018, Trento, Italy (招待講演) .
- ⑲ G. Scamps, “Role of octupole deformed shell effects on the fission of actinides”, PKU-CUSTIPEN workshop on Low-Energy Nuclear Dynamics and Effective Nuclear Interactions, Sep. 17-19, 2018, Beijing, China (招待講演) .
- ⑳ G. Scamps, “Impact of pear-shaped fission fragments on mass-asymmetric fission”, 2nd Tsukuba-CCS workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics, Dec. 10-12, 2018, Tsukuba, Japan (招待講演) .

以上、課題参加者による国際会議での成果発表のみ記載。これ以外に15件の国内会議での発表あり。

(3) その他

- ① プレスリリース「非対称核分裂をめぐる謎の解明 ～洋ナシ型原子核の出現～」、2018年12月20日、筑波大学。
- ② プレスリリース「レモン、キウイ、パンケーキ? 原子核の形を回して見る～未知同位体の計算核データ「さわれる核図表」を公開～」、2019年1月9日、筑波大学。
- ③ 新聞記事「核分裂の謎を解明」、新聞赤旗、2019年1月8日。
- ④ 新聞記事「未知同位体の計算核データ公開」、科学新聞2019年1月25日。

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
COMA	○	40,000	
Oakforest-PACS	○	305,000	61,000
※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。			