

受付 ID	16a54
分野	原子核

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 systems

中務 孝

筑波大学 計算科学研究センター

1. 研究目的

数個から最大で 300 程度の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。ごく軽い原子核では、現実的核力から出発した第一原理的な計算が可能となっており、定量性の高い殻模型による記述も幅広い質量数領域に拡大している。また、全核種の記述が可能となる微視的理論としては密度汎関数理論 (DFT) による記述が発展している。本研究課題では、時間依存密度汎関数理論 (TDDFT) に基づき、原子核の動的性質を解明することを主目的とした計算を実施している。特に、超流動性を考慮に入れた時間依存密度汎関数法により、様々な量子多体系に発現するダイナミクスを解き明かすことを目標とし、冷却原子気体における量子渦のダイナミクス、中性子星クラストの構造・量子渦のピン留め機構、超流動原子核の反応機構、重い原子核の核分裂ダイナミクスの解明等を目的とする。また、GPU や MIC 計算機を最大限に活用できる、汎用性の高い計算コードの開発も目標の一つとする。

2. 研究成果の内容

平成 28 年度には、HA-PACS および COMA を用いて、以下のような成果があった。COMA (NUCLDFT) では、主に、(1) ハイブリッド基底を用いた超流動原子核に対する TDDFT 計算 (2) 核融合における反応経路と集団質量計算、(3) 中性子星のインナー・クラストにおけるパスタ相と呼ばれるエキゾチック相に対するバンド計算、(4) 対振動状態における集団座標の同定、に成果があり、(1)は論文を出版済み、(2)は投稿中、(3)・(4)は論文を準備中である。また、HA-PAC (TDSLDA) では、主に、(5) 低エネルギー原子核反応の 3 次元実空間における超流動原子核に対する TDDFT 計算、(6) 渦・原子核間相互作用に関する計算を実行した。(5)については論文を投稿中、(6)は出版済みである。

これらの計算から、低エネルギーの各衝突現象における様々な側面が明らかになっている。その一つは、これまで研究されて来なかったゲージ位相の効果である。特に、ジョセフソン効果に類似する 2 核子移行反応における「原子核ジョセフソン効

果」の影響、また2つの原子核が触れ合う時に位相差が作り出すソリトン励起の効果などが明らかになった。また、核反応経路を理論的に導出することで、これまで用いられて来た直感的仮定の是非が議論できるようになり、特に核融合反応において、クーロン障壁を越えたあたりでの集団運動は、2つの原子核の相対運動とは大きく異なることが明らかになった。

3. 学際共同利用として実施した意義

我々の開発した簡便な線形応答計算の手法である有限振幅法を、様々な場面で利用したコード開発とその実施が進められた。上記の COMA 利用成果における(2)、(4)でも利用している。3次元空間での超流動性を考慮した量子多体系のダイナミクス TDDFT 計算は、超流動性を考慮に入れない計算に比べ、 10^3 倍以上の計算コストが必要となり(格子点数 643 の場合)、スーパーコンピュータの利用が不可欠である。また、本学際共同利用により、筑波大学とワルシャワ工科大学の間の、新たな共同研究が実現され、より発展する方向に進んでいる。

4. 今後の展望

低エネルギー原子核反応における集団的反応経路、核子の超流動性がもたらす新奇的な効果が明らかとなった。今後、この研究をさらに発展させ、現実的な有効相互作用を用いた計算により定量的な予言を行うことを目指す。

5. 成果発表

(1) 学術論文 12 編 (うち投稿中 2 編)

- ① Shuichiro Ebata and Takashi Nakatsukasa, Octupole deformation in the nuclear chart based on the 3D Skyrme Hartree-Fock plus BCS model, *Physica Scripta* in press.
- ② Kai Wen, Fang Ni, and Takashi Nakatsukasa, Nuclear reaction path and inertial mass in the self-consistent collective coordinate method, *Proceedings of Science (INPC2016)* 211 (2017).
- ③ Takashi Nakatsukasa, Kenichi Matsuyanagi, M. Matsuzaki, and Yoshifumi R. Shimizu, Quantal rotation and its coupling to intrinsic motion in nuclei, *Physica Scripta* 91, 73008 (2016).
- ④ Yukio Hashimoto and Guillaume Scamps, Gauge angle dependence in time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov calculations of $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$, *Physical Review C* 94, 14610 (2016).
- ⑤ Nobuo Hinohara and Witold Nazarewicz, Pairing Nambu-Goldstone Modes within Nuclear Density Functional Theory, *Physical Review*

Letters 116, 152502 (2016).

- ⑥ T. Peach, et al., Effect of ground-state deformation on isoscalar giant resonances in ^{28}Si , *Physical Review C* 93, 064325 (2016).
 - ⑦ K. Yoshida and H. Watanabe, Enhanced collectivity of γ vibration in neutron-rich Dy isotopes with $N = 108\text{--}110$, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2016, 123D2 (2016).
 - ⑧ Gabriel Wlazłowski, Kazuyuki Sekizawa, Piotr Magierski, Aurel Bulgac, and Michael McNeil Forbes, Vortex Pinning and Dynamics in the Neutron Star Crust, *Physical Review Letters* 117, 232701 (2016).
 - ⑨ Kazuyuki Sekizawa, Piotr Magierski, Gabriel Wlazłowski, Solitonic Excitations in Collisions Of Superfluid Nuclei, *Proceedings of Science (INPC2016)* 214 (2017).
 - ⑩ Kazuyuki Sekizawa, Gabriel Wlazłowski, Piotr Magierski, Aurel Bulgac, and Michael McNeil Forbes, Microscopic Calculations of Vortex-Nucleus Interaction in the Neutron Star Crust, *JPS Conference Proceedings* 14, 10807 (2017).
 - ⑪ Piotr Magierski, Kazuyuki Sekizawa, Gabriel Wlazłowski, Novel Role of Superfluidity in Low-Energy Nuclear Reactions, submitted to *Physical Review Letters*.
 - ⑫ Kai Wen and Takashi Nakatsukasa, Adiabatic self-consistent collective path in nuclear fusion reactions, submitted to *Physical Review C*.
- (2) 学会発表 51 件 (うち招待講演 10 件)
- ① Takashi Nakatsukasa, Microscopic determination of reaction path, potential, and inertial mass, ECT* workshop on Towards consistent approaches for nuclear structure and reactions, June 6-10, 2016, Trento, Italy.
 - ② Takashi Nakatsukasa, Nuclear reaction as large-amplitude collective motion, Heavy-Ion Accelerator Symposium 2016, Sep. 18-20, 2016, Canberra, Australia.
 - ③ Takashi Nakatsukasa, Nuclear reaction path and inertial mass in the self-consistent collective coordinate method, International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Sep. 11-16, 2016, Adelaide, Australia.
 - ④ Takashi Nakatsukasa, Time-dependent density functional theory and linear response theory, SERC School on Modern Microscopic Approaches in Nuclear Physics, May 17-June 6, 2016, Srinagar, India.
 - ⑤ S.Ebata, Octupole deformation in the nuclear chart based on the 3D

Skyrme Hartree-Fock plus BCS model, SSNET Workshop 2016, Nov. 7-11, 2016, Gif-sur-Yvett, France.

- ⑥ Kenichi Yoshida, Low-lying excitations in neutron-rich nuclei: Effects of deformation and pairing, The First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on 'Microscopic theories of nuclear structure and dynamics', Dec. 12-16, 2016, Wako and Tsukuba, Japan.
- ⑦ Kai Wen, The Inertial Mass and Collective Path in Nuclear Fusion/Fission Reactions, International Conference "Nuclear Theory in the Supercomputing Era - 2016", Sep. 19-23, 2016, Khabarovsk, Russia.
- ⑧ Kazuyuki Sekizawa, Solitonic Excitations in Collisions of Superfluid Nuclei, The 7th International Conference on Heavy-Ion Collisions at Near Barrier Energies "FUSION17", Feb. 20-24, 2017, Hobart, Tasmania, Australia.

以上、国際会議招待講演のみ記載（詳細は様式2に記載）

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*
HA-PACS	○	1800
HA-PACS/TCA		
COMA	○	900
※配分リソースについては 32node 換算時間をご記入ください。		