

III. 原子核物理研究部門

1. メンバー

教授	中務 孝、矢花一浩（量子物性研究部門兼務）
講師	橋本幸男
助教	日野原伸生
研究員	温凱
学生	大学院生 4名

2. 概要

本部門では、核子（陽子・中性子）の多体系である原子核や中性子星の構造・反応・応答などの多核子量子ダイナミクスの研究を推進している。安定線（ハイゼンベルグの谷）から離れた放射性アイソトープの原子核の構造と反応、エキゾチックな励起状態の性質、様々な集団運動の発現機構など、未解決の謎の解明に取り組んでいる。原子核の研究は、フェルミ粒子の量子多体系計算という観点で、物質科学や光科学、冷却原子系の物理と密接なつながりをもつ。また、クォーク・グルーオンのダイナミクスを記述する格子 QCD に基づく核力の計算、軽い原子核の直接計算などが進展する中、素粒子物理学との連携も重要性が増している。ニュートリノの解明に向けたニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測実験や、素粒子標準模型のテストに関わる実験などにも原子核理論の精密計算が不可欠とされている。また、元素の起源や星の構造、中性子星の誕生にも関わる爆発的天体現象にも原子核の性質は深く関わり、宇宙物理学とも密接に関係している。原子核は、地球上において、強い相互作用が支配する有限量子多体系として特異な系として存在しているが、宇宙においては、巨視的な原子核である中性子星が存在し、その構造と現象の関係を微視的なアプローチで解決することも、本部門における重要な研究テーマと位置付けている。

本部門のメンバーはこのような幅広い課題に取り組み、分野の枠を超えた研究を推進している。

3. 研究成果

[1] フェルミ演算子展開による有限温度密度汎関数計算のコード開発（中務）

原子核に対する有限温度平均場理論に基づく計算は、高励起状態の記述や準位密度の計算などに応用されてきた。通常この計算の手続きは、まず一体演算子である平均場ハミルトニアン固有状態・固有エネルギー（1粒子エネルギー）を求め、その1粒子エネルギーのフェルミ・ディラック分布関数を重みとした一体密度を計算し、ハミルトニアンを再構築することを反復することで、自己無撞着に状態を決定する。しかしながら、自己無撞着解に到達するまでに反復計算を要するため、ハミルトニアンの対角化を何度も行う必要があり、球対称

性 (spherical symmetry) などを仮定することで対角化次元を大幅に削減した計算がほとんどである。本研究では、フェルミ・ディラック分布関数を有限次の多項式展開する方法を用いることで、ハミルトニアンを有限回の演算によって密度を直接構築する手法を核子多体系に初めて適用し、その有効性を確かめた。行列・ベクトル積だけの演算で、有限温度平均場状態を決定することができ、数値的に負荷が大きい行列対角化を避けることができる。また、分散メモリ型の並列計算にも向いている点が長所としてあげられる。短所としては、フェルミ・ディラック関数が階段関数になるゼロ温度の系を直接計算できない点があるが、フェルミ面にギャップがある場合には十分に低温にすることで実質ゼロ温度の計算ができ、ギャップがない場合でも有限温度からの外挿を利用するなど、この問題を回避することはできる。数千～数万核子に対する計算が必要となるような、有限温度中性子星クラストの自己無撞着計算などに威力を発揮できると期待している。

[2] ゲルマニウム核の3次元回転運動 (橋本)

原子核の形は、多くの場合球形よりも楕円体型に変形することはよく知られている。その回転スペクトルから内部構造の変化を理解する研究の歴史は長い。回転運動は、楕円体の主軸まわりの一様な運動として考えるのが簡単であるが、量子力学的には、回転軸が楕円体の主軸から離れて傾いている場合も考えられる。このような、原子核のより一般的な回転運動である“斜交軸回転運動”を、時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov (TDHFB) 法で記述することを考える。そのために、天頂角と方位角による原子核のエネルギーと内部構造の変化を Gogny HFB 法によって計算することから始めた。対象は三軸非対称性 (triaxial) の基底状態が期待されるゲルマニウム核同位体とした。図1 (左) の例はゲルマニウム 64 について、三軸非対称の基底状態から主軸 x 軸、 y 軸、 z 軸それぞれのまわりにクラッキング計算を行い角運動量ごとのエネルギーの変化を表す。同様に図1 (右) では、角運動量 $J = 4.0$ と $J = 8.8$ の場合に、回転軸を y 軸から x 軸に傾けた時のエネルギーの変化を表す。エネルギー変化の曲線にポケットが見られれば、安定な三次元的回転運動が期待できるが、この時点ではまだポケットを見つけるには至っていない。

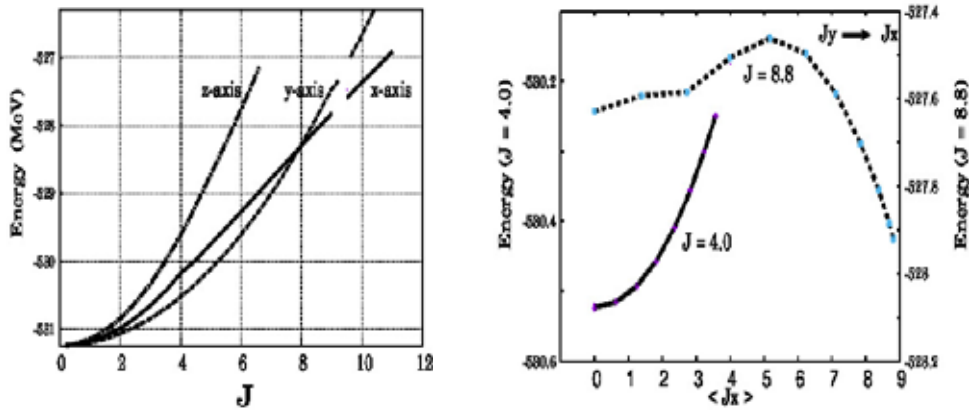


図1 (左図) ゲルマニウム ^{64}Ge のx軸、y軸、z軸まわりのクラッキングによるエネルギー変化。(右図) 回転軸をy軸からx軸に傾けた時のエネルギー変化(角運動量が $J = 4.0$ と $J = 8.8$ の場合)。

[3] ニュートリノを2つ放出する二重ベータ崩壊原子核行列要素の大域的な計算 (日野原、Engel (ノースカロライナ大))

ニュートリノを2つ放出する二重ベータ ($2\nu\beta\beta$) 崩壊は半減期が測定されているため、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素を計算する際に用いられる中性子-陽子間の有効相互作用を決定するために使われてきた。ベータ崩壊やガモフ・テラー巨大共鳴、スピン双極子巨大共鳴などの二重ベータ崩壊の半減期以外の荷電交換過程を再現するように大域的に決定された原子核密度汎関数を用いて、有限振幅法によって $2\nu\beta\beta$ 崩壊の原子核行列要素を、半減期が測定されている 11 種類の同位体について計算した。用いた原子核密度汎関

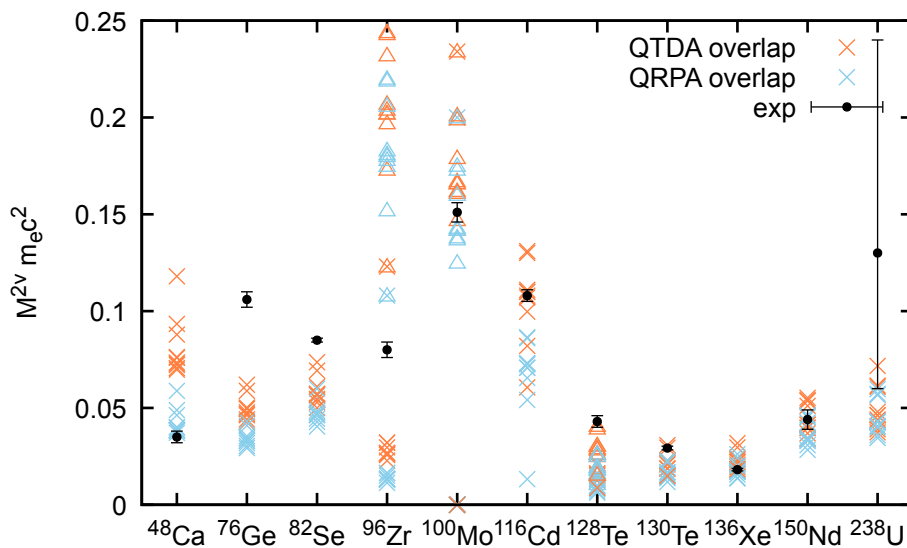


図2 : 原子核密度汎関数による $2\nu\beta\beta$ 崩壊の原子核行列要素の値と実験の半減期から導出された値との比較。

数の結合定数は $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期を合わせるように決定されていないにもかかわらず、半減期から導出された原子核行列要素値をよく再現することができた。一部の同位体では実験値と計算値の間にずれが見られるため、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期を用いることで今後さらに原子核密度汎関数を改良することができると考えられる。また、半減期が未測定だがエネルギー的に $2\nu\beta\beta$ 崩壊が可能な 27 種類の同位体についても原子核行列要素値の予言を行った。

[4] 混合基底を用いた 3 次元 Skyrme Hartree-Fock-Bogoliubov 計算コード開発 (Shi (ハルビン工業大)、日野原)

軸対称性を課さない 3 次元 Skyrme Hartree-Fock-Bogoliubov 方程式を効率的に解くため、 z 方向は有限差分基底、 x, y 方向には調和振動子基底を用いた混合基底による計算コードの開発を行った。対相関がない場合の球形核 (^{16}O , ^{208}Pb)、軸対称変形核 (^{24}Mg)、非軸対称変形核 (^{64}Ge)、また対相関を含んだ球形核 (^{120}Sn)、軸対称変形核 (^{34}Mg)、非軸対称変形核 (^{110}Mo) について 3 次元調和振動子基底コードとの結果のベンチマークを行い、非常によい一致を得た。また、調和振動子基底では計算が困難である、大きく一方向に変形した ^{240}Pu 核の核分裂経路上での核分裂アイソマーや第一、第二核分裂障壁付近の状態の計算を行い、開発したコードの有用性を示した。

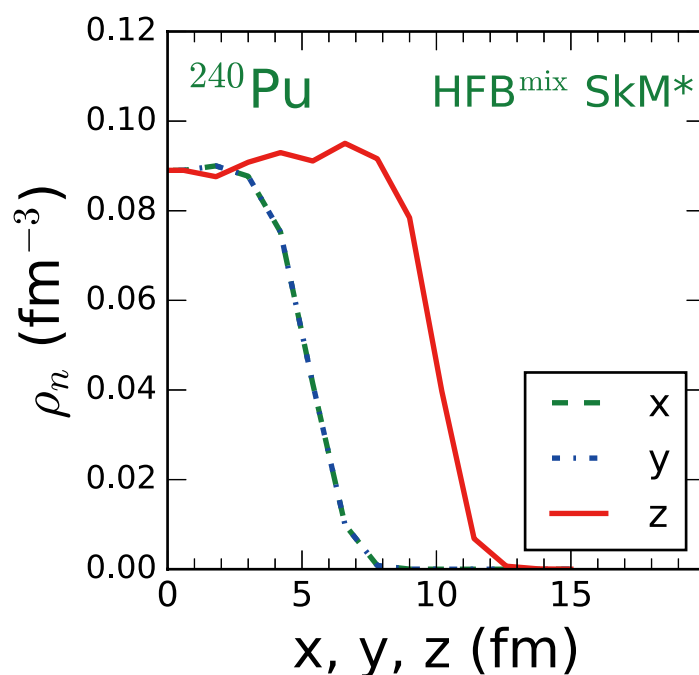


図 3: 混合基底 HFB で計算した ^{240}Pu 核分裂アイソマーの密度分布

[5] Microscopic collective inertial masses for nuclear reaction in the presence of nucleonic effective mass (Wen、中務)

In order to understand the microscopic mechanism of nuclear fusion/fission reactions, we calculated the collective inertial mass coefficients with respect to translational, relative, and rotational motions for nuclei, along the collective reaction path self-consistently determined, based on the adiabatic self-consistent collective coordinate (ASCC) method. The impact of the time-odd component of the mean-field potential on the inertial masses is investigated. The results are compared with those calculated with the cranking formulas.

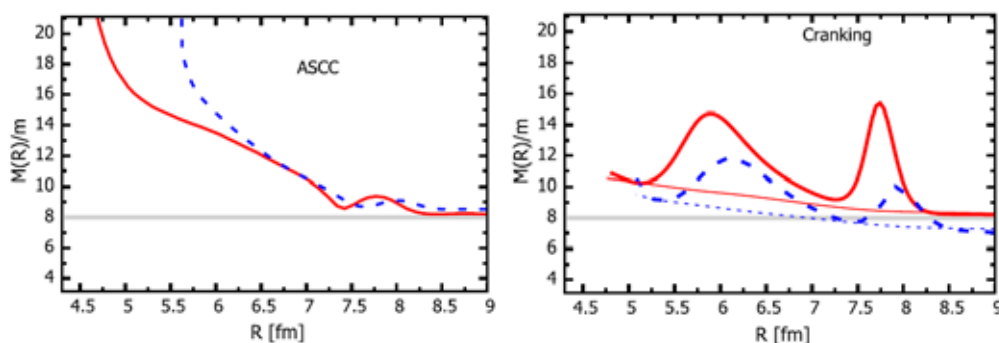


図 4 : Inertial mass $M(R)$ for the reaction $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ as a function of the relative distance R . The left panel shows the results of the ASCC method, and the right panel shows those of the perturbative (thinner curves) and Nonperturbative (thicker curves) cranking formulas. Solid (red) and dashed (blue) lines indicate those of $B_3=0$ and 75MeV fm^5 , respectively.

The inertial masses based on the ASCC method reproduce the exact total nuclear mass for the translational motion as well as the exact reduced masses as the asymptotic values for the relative and rotational motions. In contrast, the cranking formulas fail to do so. This is due to the fact that the (local) Galilean invariance is properly restored in the ASCC method but violated in the cranking formulas. A model Hamiltonian for low-energy nuclear reaction is constructed with the microscopically derived potentials and inertial masses. The astrophysical S factors are calculated, which indicates the importance of microscopic calculation of proper inertial masses.

[6] Adiabatic self-consistent nuclear dynamics with superfluidity (Wen、日野原、中務)

Pairing interactions among the nucleons always play important roles and bring in many interesting features to the nuclei. To understand how this superfluid property could change the microscopic dynamics of nuclear fusion/fission reactions, we launched a new study to investigate the adiabatic self-consistent collective coordinate (ASCC) in the presence of pairing interactions. The ASCC method is being applied to the Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) model, where the introduction of quasiparticle concept could give us a more realistic picture of low-energy nuclear dynamics. Based on our knowledge and experience of the ASCC method, upon the HFBTHO code, we have translated “particle” to

“quasiparticle” from the theoretical point of view. We are gradually making progress, and soon a new picture of nuclear fusion/fission dynamics is to be revealed.

4. 教育

学位

1. 尾崎翔太 修士 (理学)

クォークの分子動力学における相対論的效果の導入

集中講義など

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

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

外部資金

1. 日本学術振興会科学研究費・基盤研究(B)、中務 孝、代表、2018–2021 年、全年度直接経費：13,200,000 円 (2021 年度直接経費：800,000 円)、「密度汎関数超並列ソルバの開発と原子核から中性子星までの統一的高精度計算」.
2. 日本学術振興会科学研究費・新学術領域研究(研究領域提案型：研究領域「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」)(公募研究)、中務 孝、代表、2019–2020 年、全年度直接経費：2,300,000 円 (2021 年度直接経費 (繰越)：1,200,000 円)、「量子クラスター出現機構と低エネルギー核反応の非経験的記述」.
3. 日本学術振興会科学研究費・基盤研究(C)、日野原 伸生、代表、2020–2023 年、前年度直接経費：3,300,000 円 (2021 年度直接経費：800,000 円)、「原子核密度汎関数理論による中性子過剰不安定核の対相関の研究」.
4. 日本学術振興会科学研究費・新学術領域研究(研究領域提案型：研究領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」)(公募研究)、日野原 伸生、代表、2020–2021 年、全年度直接経費：1,800,000 円 (2021 年度直接経費：900,000 円)、「有限振幅法を用いた原子核密度汎関数理論による二重ベータ崩壊行列要素計算」.
5. 日本学術振興会科学研究費・国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(A))、日野原 伸生、代表、2020–2022 年、全年度直接経費：6,300,000 円、「中性子-陽子対密度汎関数の最適化」.
6. 日本学術振興会科学研究費・若手研究、温 凱、代表、2020–2023 年、全年度直接経費：2,300,000 円 (2021 年度直接経費：500,000 円)、「Macroscopic Nuclear Dynamics with Microscopic Foundations」.

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. T. Nakatsukasa, “Self-consistent energy density functional approaches to the crust of neutron stars”, EPJ Web 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-TDHFB method”, INFORMATION 24, 189 – 196 (2021).
4. K. Hossain, K. Kobuszewski, M.M. Forbes, P. Magierski, K. Sekizawa (共同研究員), and G. Wlazłowski, “Rotating quantum turbulence in the unitary Fermi gas”, Phys. Rev. A 105, 013304 (2022).

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. T. Nakatsukasa, “Computational nuclear data for various applications”, 2022 LBNL/CSA-Tsukuba/CCS Collaboration Meeting, Online, March 23-24, 2022.

B) 一般講演

1. T. Nakatsukasa, “Self-consistent energy density functional approaches to the crust of neutron stars”, 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC-XVI), Online, September 21-25, 2021 (Poster).
2. T. Nakatsukasa, “Cluster formation and dynamics in low-energy nuclear reaction”, 13th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Online, October 8, 2021.
3. N. Hinohara, “Systematic calculation of two-neutrino double-beta decay nuclear matrix elements with the finite-amplitude method of nuclear density functional theory”, 13th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Online, October 8, 2021.
4. K. Wen, “Adiabatic self-consistent collective coordinate (ASCC) path in nuclear fusion reactions”, Workshop on “Cluster phenomena in knockout and astrophysical reactions”, Online, October 14-15, 2021.

C) セミナー等

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 中務孝、「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研究室コロキウム、京大理学部物理学教室+Zoom、2021年12月17日.
2. 日野原伸生、「 $2\nu\beta\beta$ 崩壊原子核行列要素の原子核密度汎関数理論による計算」、新学術「地下宇宙」2021年領域研究会、オンライン、2021年5月19–21日.

B) その他の発表

1. 中務孝、「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.
2. 中務孝、「原子核および中性子星における超流動ダイナミクス」、第8回HPCIシステム利用研究課題成果報告会、オンライン、2021年10月28–29日(ポスター発表).
3. 中務孝、日野原伸生、「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.
4. 日野原伸生、「有限振幅法による2ニュートリノ二重ベータ崩壊原子核行列要素の系統的計算」、日本物理学会2021年秋季大会、オンライン、2021年9月14–17日.
5. 日野原伸生、「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.
6. 鷺山広平、日野原伸生、中務孝、「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. 鷺山広平、日野原伸生、中務孝、「FAM-QRPA 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.
8. 飯田崇史、伏見賢一、吉野将生、鎌田圭、細川佳志、中島恭平、日野原伸生、水越慧太、「PIKACHU 実験による Gd-160 の二重ベータ崩壊探索」、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. 吉野将生、飯田崇史、鎌田圭、伏見賢一、細川佳志、中島恭平、日野原伸生、水越慧太、吉川彰、「GAGG、HR-GAGG、GFAG シンチレータにおける波形弁別性能の比較分析」、第69回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス+オンライン、2022年3月22–26日.

7. 異分野間連携・産学官連携・国際連携・国際活動等

異分野間連携（センター内外）

1. 量子物性部門との密度汎関数理論計算手法に関する協力.
2. ニュートリノレス二重ベータ崩壊実験に関する素粒子理論、素粒子・原子核実験分野との連携.

国際連携・国際活動

1. 日中韓フォーサイト事業「21世紀の原子核物理」2019-2023（中務）.
2. 韓国・高麗大・大邱大と KIDS 密度汎関数を用いた変形核計算の共同研究を日中韓フォーサイト事業「21世紀の原子核物理」の一環として実施（日野原）.

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

該当無し

9. 管理・運営

中務 孝

計算科学研究センター 原子核物理研究部門 部門主任

計算科学研究センター 運営委員会委員

計算科学研究センター 人事委員会委員

計算科学研究センター 運営協議会委員

計算科学研究センター 共同研究担当主幹

計算科学研究センター 共同研究委員会および共同研究運用委員会 委員長

計算科学研究センター 学際計算科学連携室員

計算科学研究センター 情報セキュリティ委員

数理物質系物理学域 運営委員会委員

理工学群物理学類 学務委員・カリキュラム委員長

全学教育課程委員会委員

最先端共同 HPC 基盤施設 大規模 HPC チャレンジ審査委員会 副委員長

HPCI コンソーシアム機関代表

日野原伸生

計算科学研究センター 先端計算科学推進室員

計算科学研究センター 情報セキュリティ委員

10. 社会貢献・国際貢献

中務 孝

Editor for European Physical Journal A

Editor for International Journal of Modern Physics E

JAEA タンデム専門委員会委員

JAEA-ASRC 国際評価委員会委員

素粒子論奨学会運営委員・中村誠太郎賞選考委員

HPCI システムの利用研究課題選定レビュアー

核理論委員会委員

日野原伸生

RIBF-UEC 委員 (Chair: 2020 年 4 月 – 2022 年 3 月)

日本物理学会理論核物理領域運営委員 (2020 年 10 月 – 2021 年 9 月)

11. その他

該当無し