

### 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）
准教授	清水 則孝
助教	日野原 伸生
研究員	鷺山 広平、Anil Kumar
学生	大学院生 5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] 局所 $\alpha$ 除去強度関数の密度汎関数計算（中務、日野原）

軽い原子核におけるクラスター構造の研究が広く行われているのに対して、重い原子核に対する研究は限られている。一方、原子核の崩壊様式として $\alpha$ 崩壊がよく知られているように、重い原子核においても核内に $\alpha$ 粒子の存在が強く示唆されている。系統的にこのような核内における $\alpha$ 粒子形成を定量化するため、局所 $\alpha$ 除去強度関数（Local  $\alpha$ -removal strength function） $S_\alpha(\mathbf{r}, E)$ を定義した。この $S_\alpha(\mathbf{r}, E)$ は、核内の特定の場所 $\mathbf{r}$ で $\alpha$ 粒子を消去した際に残留核が励起エネルギー $E$ に遷移する強度を与える。厳密な計算は困難であるが、密度汎関数法を用いて、平均場の再配置効果を見捨てる近似では非常に簡単に計算が可能である。こ

の手法を用いて、Sn のアイソトープにおける局所  $\alpha$  除去強度関数を計算し、 $\alpha$  ノックアウト反応の実験データと比較した。その結果、基底状態に遷移する強度は、核内で表面近傍にピークを持ち、対密度の大きさと強く相関していることが分かった。 $\alpha$  粒子の出現を仮定せずに計算された結果と、実験データは良い一致を示している。

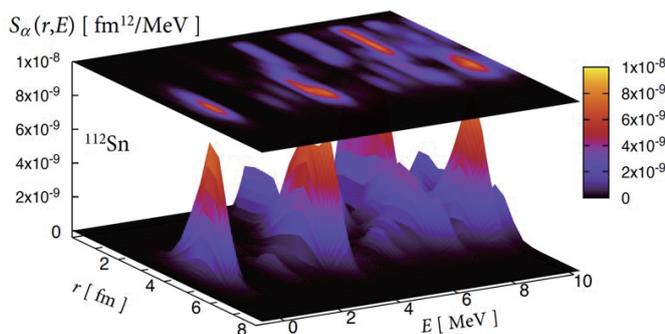


図 1:  $^{112}\text{Sn}$  に対して計算された局所  $\alpha$  除去強度関数

## [2] フェルミ演算子展開法の HFB 理論への応用 (中務)

2022 年度、原子核の有限温度密度汎関数計算に対するフェルミ演算子展開法の適用に成功したが、対密度を取り入れたハートレー・フォック・ボゴリューボフ (HFB) 理論へ拡張するための理論的整備、数値計算の feasibility study を行った。HFB ハミルトニアン固有状態 (準粒子状態) には正エネルギー解と負エネルギー解が存在するため、単純な適用はうまく行かないと予想していたが、検討の結果、理論的にこの問題が解決可能であることを示した。また、その数値計算手法も、対密度がない場合の通常のフェルミ演算子展開法のハミルトニアンを HFB ハミルトニアンに単純に置き換えるだけで良いことも分かった。まずは 1 次元のテスト計算が進行中である。

## [3] 液体ヘリウム系に対する密度汎関数計算 (中務)

今年度からスタートした JST ERATO の関口三  
体核力プロジェクトにおいて、少数系厳密計算の結果を密度汎関数に取り入れる方法を検討することになっている。東北大学を中心とする少数系厳密計算グループでは、フェルミ粒子系である原子核を対象にする前に、比較的計算が簡単であるボソン系を対象にした計算を行うことになり、ヘリウム原子系の基底状態、および励起状態の計算が進行している。これに対応して、筑波大グループでは、ボソン系における密度汎関数計算の準備を行うことになり、適当な汎関数と相互作用のもと、グロス・ピタエフスキー方程式を解くことで対応することとした。ヘリウム原子系も、原子核のような自己束縛状態を形作ることが知られており、ヘリウム・ボールの計算を実行した。原子数を増加させるこ

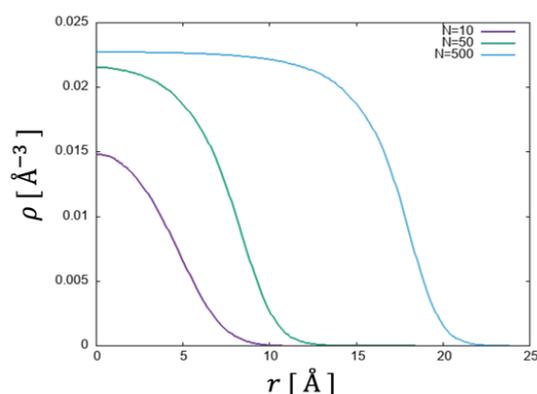


図 2: 束縛したヘリウム原子密度分布の粒子数依存性。原子数を 10, 50, 500 と変化。

とで半径が大きくなる飽和性の性質が見られる一方、中心付近の密度は変化しており、原子核とはやや違う性質も示しているようである。

#### [4] 殻模型計算によるカドミウム同位体の核構造 (清水、宇都野 (原研)、Srivastava(インド工科大学ルーキー校))

カドミウム同位体奇核の $\frac{11}{2}^-$ 状態の四重極能率と磁気能率は、中性子数の変化にともない線形な変化をすることが実験結果から知られている。対を組んでいない中性子が $0h_{11/2}$ 軌道を占有し、球形核におけるセニオリティ近似がよく成り立つ単純な模型が成り立つ証拠ととらえられてきた。

我々は、大規模殻模型計算によりカドミウム同位体の構造を議論した。G行列理論をもとにした殻模型有効相互作用を複数組み合わせる用いることにより、低励起スペクトルや四重極能率・磁気能率の実験値を再現することを確認した。殻模型波動関数を解析すると、セニオリティ近似はそれほど良く成り立っておらず、プロレート変形しており、中性子数変化にともなってK量子数が緩やかに変化していることを明らかにした。

#### [5] 中性子数 126,125 同中性子体のベータ崩壊 (Kumar、清水、他)

太陽系の元素組成の質量数分布において、3か所比較的大きな分布を示す箇所がある。これは、中性子星合体などの天体現象における元素合成 r 過程によって生じると考えられている。このうち、白金近傍の箇所は第3ピークと呼ばれており、中性子過剰領域における中性子数  $N = 126$  魔法数の存在により理解される。r 過程では中性子捕獲とベータ崩壊の繰り返しにより重い核が生成されるので、中性子過剰領域の  $N = 126, 125$  同中性子体のベータ崩壊半減期は重要な物理量であるが、いまだ加速器実験ではこのような核種を生成することができず、理論計算が必要とされている。我々は、富岳などのスパコンを用いた大規模殻模型計算によって、これら同中性子体のベータ崩壊半減期を計算した。ベータ崩壊には許容 (GT) 遷移と第一禁止 (FF) 遷移の両方の寄与を取り込んだ。安定核近傍領域 (陽子数  $Z$  が 80 近傍) では第一禁止遷移が主な寄与となるが、陽子数を減らして中性子過剰領域に移ると、許容遷移が支配的になることを示した。さらに、従来の理論予測より半減期が短い可能性を示唆した (図 3)。

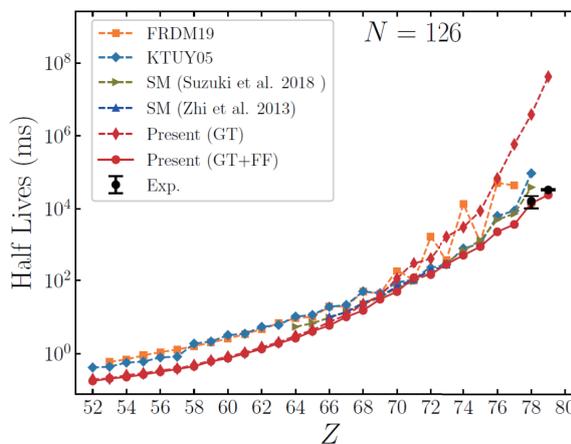


図 3: 中性子数 126 同中性子体のベータ崩壊半減期。横軸に陽子数、実験値 (黒)、我々の計算結果 (赤)、様々な先行研究結果が示されている。

## [6] モンテカルロ殻模型コードの GPU 実装 (清水)

殻模型に基づいた核構造計算手法のひとつであるモンテカルロ殻模型は、近年芯を仮定しない第一原理的な計算に応用され、重要性を増している。我々は、Pegasus スパコンの GPU である H100 向けに、モンテカルロ殻模型用の計算コードのボトルネック部分である角運動量射影ハミルトニアン行列要素計算のチューニング作業をおこなった。この部分の計算時間は、Pegasus スパコンの CPU (Xeon 48core) に比べて、最大で 9.3 分の 1 に短縮された。

## [7] 有限原子核でのスピン三重項対相関 (日野原、大石 (理研)、吉田 (大阪大))

核子対相関にはスピン一重項のものとしてスピン三重項のものがあり、スピン三重項対相関が有限原子核で対凝縮するのかが未解決問題であった。密度行列展開によってスピントラウト対密度がスピン三重項対凝縮の秩序変数となっていることを指摘し、この振る舞いを Ca 同位体および Sn 同位体の球形基底状態で分析した。通常用いられるスピン一重項の対密度汎関数によってスピン一重項の対凝縮のみならずスピン三重項の対凝縮が誘発

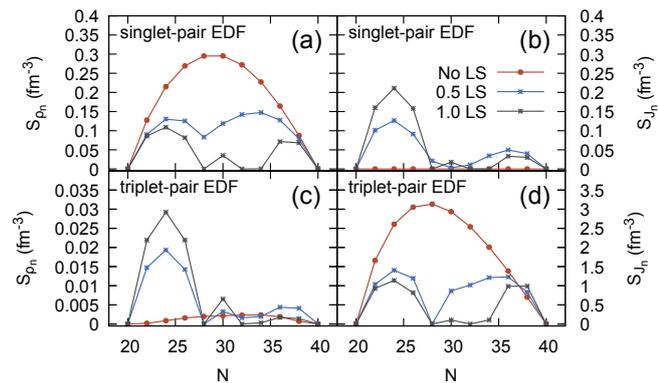


図 4: スピン一重項・三重項対密度汎関数による Ca 同位体での一重項・三重項対凝縮量。

されることを示した。これはスピン・軌道密度汎関数によるスピン軌道スプリッティングによるものであり、スピン・軌道密度汎関数がない場合はスピン三重項の対凝縮は誘発されない。また、スピン三重項の対密度汎関数を用いた場合は、スピン・軌道スプリッティングが誘発されるため、スピン一重項対凝縮も誘発されることを示した。このようにスピン・軌道スプリッティングがスピン一重項と三重項の対凝縮の共存に重要な役割を果たすことを明らかにした。

## [8] ガモフ・テラー強度とベータ崩壊への準粒子振動結合の効果 (Liu、Engel (ノースカロライナ大)、日野原、Kortelainen (ユバスキュラ大))

中性子・陽子チャネルの準粒子乱雑位相近似 (pnQRPA) はガモフ・テラー巨大共鳴の強度分布やベータ崩壊半減期の計算に広く用いられているが、多準粒子励起への結合が理論に含まれておらず、巨大共鳴の共鳴幅の記述などが不十分であることが以前より知られている。準粒子とフォノン振動の結合を取り入れた定式化を行い、Skyrme 型密度汎関数を用いた pnQRPA 計算を中性子・陽子チャネルの有限振幅法を用いて行った。この計算は変形原子核のガモフ・テラー強度とベータ崩壊の計算に QRPA の近似を超えた相関を取り入れた初めての計算である。準粒子・振動結合により、巨大共鳴の強度分布の記述を大幅に改善し、アイソスカラー型中性子-陽子対相関を入れなくともベータ崩壊の半減期が短くなるという結果

を得た。pnQRPA を超えた相関を取り入れることにより、アイソスカラー型対相関の結合定数はこれまで pnQRPA で決定されてきたものとは大きく異なる可能性がある。

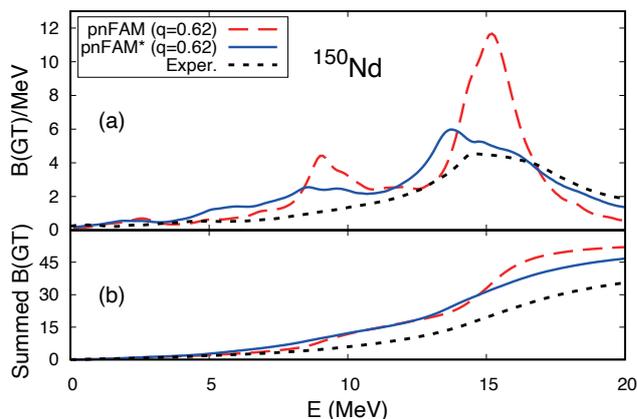


図 5:  $^{150}\text{Nd}$  のガモフ・テラー強度。従来の pnQRPA 計算の結果 (赤)、準粒子振動結合を入れた計算結果 (青)、実験値 (黒) の比較。

### [9] 有限振幅法のエミュレータの開発 (日野原、Zhang (ミシガン州立大学)、Engel (ノースカロライナ大))

有限振幅法は QRPA を反復法で効率的に解く方法である。QRPA 固有値解を求める際には複素エネルギー空間で一位の極となっている QRPA 固有値周りの周回積分を用いるため、積分経路の設定に必要な極の位置の推定に、多くの複素エネルギー点での有限振幅法の計算が必要となる。パラメータを含む固有値問題等のエミュレータである縮減基底法を用い、複素エネルギーをパラメータとして有限振幅法のエミュレータを構成した。任意の複素エネルギーでの有限振幅法の解は、予め求めたいいくつかの複素エネルギー点での解の重ね合わせで書けると仮定し、その重みは Rayleigh-Ritz 法によって変分で求めた。このエミュレータを用いることで、QRPA 固有値解の計算速度の向上が 2 – 3 桁見込まれる。

### [10] 改良した集団慣性による 5 次元四重極集団ハミルトニアン模型 (鷲山、日野原、中務)

平均場近似を超えた大振幅集団運動に付随する原子核の形の揺らぎを記述するために、原子核密度汎関数に基づいた 5 次元四重極集団ハミルトニアンが広く用いられている。ただし、ハミルトニアンの集団慣性に、動的効果を見逃したクランキング近似が用いられてきた。我々は、集団慣性を改良するために、集団慣性に動的効果を含める実用的手法「Skyrme 型密度汎関数法 + 局所乱雑位相近似法」を開発した。四重極変形度  $(\beta, \gamma)$  の関数として集団慣性とポテンシャルを計算し四重極集団ハミルトニアンを構築した。この手法を  $^{110}\text{Pd}$  に応用し、この改良した集団慣性がクランキング近似によるものから大きく増加すること、改良した集団慣性を用いた結果が実験の低励起スペクトルを非常に良く再現することを示した。

### [11] 原子核の非軸対称変形と巨大単極共鳴の進化 (鷲山、江幡 (埼玉大)、吉田 (大阪大))

巨大共鳴は原子核における主要な集団励起モードである。プロレート型に軸対称変形した

原子核では、巨大単極共鳴のピークが二つに分かれ、低エネルギー側のピーク位置が巨大四重極共鳴の  $K=0$  成分 ( $K$  は角運動量の  $z$  成分) のピーク位置に一致することが知られている。本研究では準粒子乱雑位相近似法を用いて巨大単極共鳴と巨大四重極共鳴の混合と軸対称を破る変形の度合いとの関係を調べた。図6に  $^{100}\text{Mo}$  のアイソスカラー型単極 (ISM) および四重極 (ISQ) の強度関数を示した。非軸対称変形度  $\gamma$  が増えるにつれ ( $\gamma = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ )、ISM の  $\omega = 15$  MeV 近傍に新たなピークが出現・発達し、このピーク位置と ISQ,  $K=2$  成分のピーク位置が一致した。これは、非軸対称変形の発達によって新たに発現した機構である。

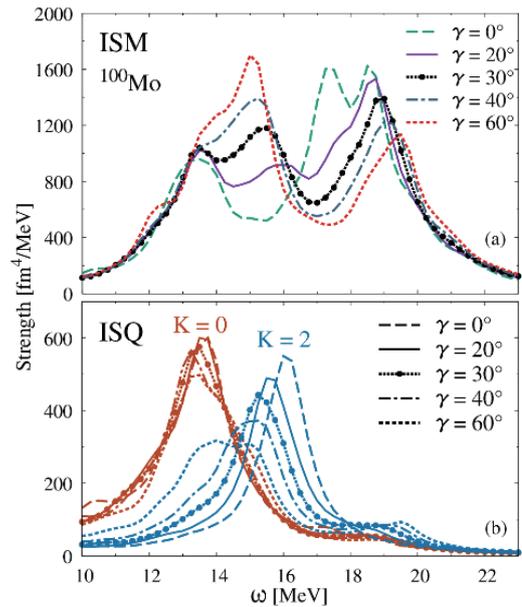


図6:  $^{100}\text{Mo}$  のそれぞれの非軸対称変形度  $\gamma$  に対する ISM (上) 及び ISQ の  $K=0,2$  強度関数 (下)。

#### 4. 教育

##### 集中講義など

1. 日野原 伸生、理学部物理集中講義「原子核密度汎関数理論による原子核構造とダイナミクス」、大阪公立大学、2023年10月23 – 25日。

#### 5. 受賞、外部資金、知的財産権等

##### 受賞

1. C. Ruike, Gamma24 Jury Prize, The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), Minoh Campus, Osaka University, Minoh, Japan, March 26 – 28, 2024.

##### 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、2023 – 2026 年、全年度直接経費：14,000,000 円 (2023 年度直接経費：1,800,000 円) 「非一様中性子星物質の物性とパルサー・グリッチ起源の解明」。
2. JST-ERATO「関口三体核力プロジェクト」(JPMJER2304) 量子多体精密計算グループ、中務 孝、清水 則孝、2023 年 10 月 – 2029 年 3 月。
3. 富岳成果創出加速プログラム・「シミュレーションで探る基礎科学：量子新時代へのアプローチ」(JPMXP1020230411)、研究代表者：橋本 省二 (KEK)、連携機関代表者：清水 則孝、2023 – 2025 年度、(2023 年度：5,500,000 円)。
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、2022 – 2023 年、全年度直接経費：1,400,000 円、(2023 年度直接経費：700,000 円)、「二重ベータ崩壊・二重電子捕獲半減期の全核種精密計算」.

5. 日本学術振興会科学研究費・基盤研究 (C)(一般)、日野原 伸生、代表、2020 – 2023 年、全年度直接経費：3,300,000 円、(2023 年度直接経費：900,000 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」.
6. 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 – 2023 年 (延長)、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. 研究業績

### (1) 研究論文

#### A) 査読付き論文

1. Takashi Nakatsukasa and Nobuo Hinohara, “Local  $\alpha$ -removal strength in the mean-field approximation”, *Phys. Rev. C*, **108**, 014318 (2023).
2. K. Yanase, N. Shimizu, K. Higashiyama, and N. Yoshinaga, “Correlations between nuclear Schiff moment and electromagnetic measurements”, *Phys. Lett. B* **841**, 137897 (2023).
3. Jinbei Chen, Menglan Liu, Cenxi Yuan, Shengli Chen, Noritaka Shimizu, Xiaodong Sun, Ruirui Xu, and Yuan Tian, “Shell-model-based investigation on level density of Xe and Ba isotopes”, *Phys. Rev. C* **107**, 054306 (2023).
4. Soumik Bhattacharya, Vandana Tripathi, E. Rubino, Samuel Ajayi, L. T. Baby, C. Benetti, R. S. Lubna, S. L. Tabor, J. Döring, Y. Utsuno, N. Shimizu, J. M. Almond, and G. Mukherjee, “Coexistence of single-particle and collective excitation in  $^{61}\text{Ni}$ ”, *Phys. Rev. C* **107**, 054311 (2023).
5. E. Kido, T. Inakura, M. Kimura, N. Kobayashi, S. Nagataki, N. Shimizu, A. Tamii, and Y. Utsuno, “Evaluations of uncertainties in simulations of propagation of ultrahigh-energy cosmic-ray nuclei derived from microscopic nuclear models”, *Astropart. Phys.* **152**, 102866 (2023).
6. S. Chen, F. Browne, P. Doornenbal, J. Lee, A. Obertelli, Y. Tsunoda, T. Otsuka, Y. Chazono, G. Hagen, J. D. Holt, G. R. Jansen, K. Ogata, N. Shimizu, Y. Utsuno, K. Yoshida, N.L. Achouri, H. Baba, D. Calvet, F. Châteaueau, N. Chiga, A. Corsi, M. L. Cortés, A. Delbart, J.-M. Gheller, A. Giganon, A. Gillibert, C. Hilaire, T. Isobe, T. Kobayashi, Y. Kubota, V. Lapoux, H. N. Liu, T. Motobayashi, I. Murray, H. Otsu, V. Panin, N. Paul, W. Rodriguez, H. Sakurai, M. Sasano, D. Steppenbeck, L. Stuhl,

- Y. L. Sun, Y. Togano, T. Uesaka, K. Wimmer, K. Yoneda, O. Aktas, T. Aumann, L. X. Chung, F. Flavigny, S. Franchoo, I. Gasparic, R.-B. Gerst, J. Gibelin, K. I. Hahn, D. Kim, T. Koiwai, Y. Kondo, P. Koseoglou, C. Lehr, B. D. Linh, T. Lokotko, M. MacCormick, K. Moschner, T. Nakamura, S. Y. Park, D. Rossi, E. Sahin, P.-A. Söderström, D. Sohler, S. Takeuchi, H. Törnqvist, V. Vaquero, V. Wagner, S. Wang, V. Werner, X. Xu, H. Yamada, D. Yan, Z. Yang, M. Yasuda, and L. Zanetti, “Level Structures of  $^{56,58}\text{Ca}$  cast doubt on a doubly magic  $^{60}\text{Ca}$ ”, *Phys. Lett. B* **843**, 138025 (2023).
7. H. Wang, M. Yasuda, Y. Kondo, T. Nakamura, J. A. Tostevin, K. Ogata, T. Otsuka, A. Poves, N. Shimizu, K. Yoshida, N. L. Achouri, H. Al Falou, L. Atar, T. Aumann, H. Baba, K. Boretzky, C. Caesar, D. Calvet, H. Chae, N. Chiga, A. Corsi, H. L. Crawford, F. Delaunay, A. Delbart, Q. Deshayes, Zs. Dombrádi, C. Douma, Z. Elekes, P. Fallon, I. Gašparić, J.-M. Gheller, J. Gibelin, A. Gillibert, M. N. Harakeh, A. Hirayama, C. R. Hoffman, M. Holl, A. Horvat, Á. Horváth, J.W. Hwang, T. Isobe, J. Kahlbow, N. Kalantar-Nayestanaki, S. Kawase, S. Kim, K. Kisamori, T. Kobayashi, D. Körper, S. Koyama, I. Kuti, V. Lapoux, S. Lindberg, F. M. Marqués, S. Masuoka, J. Mayer, K. Miki, T. Murakami, M. A. Najafi, K. Nakano, N. Nakatsuka, T. Nilsson, A. Obertelli, N. A. Orr, H. Otsu, T. Ozaki, V. Panin, S. Paschalis, A. Revel, D. Rossi, A. T. Saito, T. Saito, M. Sasano, H. Sato, Y. Satou, H. Scheit, F. Schindler, P. Schrock, M. Shikata, Y. Shimizu, H. Simon, D. Sohler, O. Sorlin, L. Stuhl, S. Takeuchi, M. Tanaka, M. Thoennessen, H. Törnqvist, Y. Togano, T. Tomai, J. Tscheuschner, J. Tsubota, T. Uesaka, Z. Yang, and K. Yoneda, “Intruder configurations in  $^{29}\text{Ne}$  at the transition into the island of inversion: Detailed structure study of  $^{28}\text{Ne}$ ”, *Phys. Lett. B* **843**, 138038 (2023).
8. Y. Kondo, N.L. Achouri, H. Al Falou, L. Atar, T. Aumann, H. Baba, K. Boretzky, C. Caesar, D. Calvet, H. Chae, N. Chiga, A. Corsi, F. Delaunay, A. Delbart, Q. Deshayes, Zs. Dombrádi, C. A. Douma, A. Ekström, Z. Elekes, C. Forssén, I. Gašparić, J.-M. Gheller, J. Gibelin, A. Gillibert, G. Hagen, M. N. Harakeh, A. Hirayama, C. R. Hoffman, M. Holl, A. Horvat, Á. Horváth, J. W. Hwang, T. Isobe, W. G. Jiang, J. Kahlbow, N. Kalantar-Nayestanaki, S. Kawase, S. Kim, K. Kisamori, T. Kobayashi, D. Körper, S. Koyama, I. Kuti, V. Lapoux, S. Lindberg, F. M. Marqués, S. Masuoka, J. Mayer, K. Miki, T. Murakami, M. Najafi, T. Nakamura, K. Nakano, N. Nakatsuka, T. Nilsson, A. Obertelli, K. Ogata, F. de Oliveira Santos, N. A. Orr, H. Otsu, T. Otsuka, T. Ozaki, V. Panin, T. Papenbrock, S. Paschalis, A. Revel, D. Rossi, A. T. Saito, T. Y. Saito, M. Sasano, H. Sato, Y. Satou, H. Scheit, F. Schindler, P. Schrock,

- M. Shikata, N. Shimizu, Y. Shimizu, H. Simon, D. Sohler, O. Sorlin, L. Stuhl, Z. H. Sun, S. Takeuchi, M. Tanaka, M. Thoennessen, H. Törnqvist, Y. Togano, T. Tomai, J. Tscheuschner, J. Tsubota, N. Tsunoda, T. Uesaka, Y. Utsuno, I. Vernon, H. Wang, Z. Yang, M. Yasuda, K. Yoneda, and S. Yoshida, “First observation of  $^{28}\text{O}$ ”, *Nature* **620**, 965 (2023).
9. A. Tamii, L. Pellegri, P.-A. Söderström, D. Allard, S. Goriely, T. Inakura, E. Khan, E. Kido, M. Kimura, E. Litvinova, S. Nagataki, P. von Neumann-Cosel, N. Pietralla, N. Shimizu, N. Tsoneva, Y. Utsuno, S. Adachi, P. Adsley, A. Bahini, D. Balabanski, B. Baret, J. A. C. Bekker, S. D. Binda, E. Boicu, A. Bracco, I. Brandherm, M. Brezuanu, J. W. Brummer, F. Camera, F. C. L. Crespi, R. Dalal, L. M. Donaldson, Y. Fujikawa, T. Furuno, H. Haoning, R. Higuchi, Y. Honda, A. Gavrilescu, A. Inoue, J. Isaak, H. Jivan, P. Jones, S. Jongile, O. Just, T. Kawabata, T. Khumalo, J. Kiener, J. Kleemann, N. Kobayashi, Y. Koshio, A. Kuşoğlu, K. C. W. Li, K. L. Malatji, R. E. Molaeng, H. Motoki, M. Murata, A. A. Netshiyi, R. Neveling, R. Niina, S. Okamoto, S. Ota, O. Papst, E. Parizot, T. Petruse, M. S. Reen, P. Ring, K. Sakanashi, E. Sideras-Haddad, S. Siem, M. Spall, T. Suda, T. Sudo, Y. Taniguchi, V. Tatischeff, H. Utsunomiya, H. Wang, V. Werner, H. Wibowo, M. Wiedeking, O. Wieland, Y. Xu, and Z. H. Yang (PANDORA collaboration), “PANDORA Project for the study of photonuclear reactions below  $A=60$ ”, *Eur. Phys. J. A* **59**, 208 (2023).
  10. Toshio Suzuki and Noritaka Shimizu, “Neutrino-induced neutral- and charged-current reactions on  $^{40}\text{Ar}$ ”, *Phys. Rev. C* **108**, 014611 (2023).
  11. Yusuke Tsunoda, Noritaka Shimizu, and Takaharu Otsuka, “Shape transition of Nd and Sm isotopes and the neutrinoless double- $\beta$  decay nuclear matrix element of  $^{150}\text{Nd}$ ”, *Phys. Rev. C* **108**, L021302 (2023).
  12. Deepak Patel, Praveen C. Srivastava, and Noritaka Shimizu, “Systematic shell-model study of  $^{98-130}\text{Cd}$  isotopes and  $8^+$  isomeric states”, *Nucl. Phys. A* **1039**, 122742 (2023).
  13. T. Shizuma, M. Omer, T. Hayakawa, F. Minato, S. Matsuba, S. Miyamoto, N. Shimizu, and Y. Utsuno, “Parity assignment for low-lying dipole states in  $^{58}\text{Ni}$ ”, *Phys. Rev. C* **109**, 014302 (2024).
  14. Deepak Patel, Praveen C. Srivastava, and Noritaka Shimizu, and Yutaka Utsuno, “Systematic shell-model study of  $^{99-129}\text{Cd}$  and isomers in neutron-rich  $^{127-131}\text{In}$  isotopes”, *Phys. Rev. C* **109**, 014310 (2024).
  15. H. Utsunomiya, S. Goriely, M. Kimura, N. Shimizu, Y. Utsuno, G. M. Tveten, T. Renstrøm, T. Ari-izumi, and S. Miyamoto, “Photoneutron emission cross section for  $^{13}\text{C}$ ”, *Phys. Rev. C* **109**, 014617 (2024).

16. Samuel Ajayi, Vandana Tripathi, E. Rubino, Soumik Bhattacharya, L. T. Baby, R. S. Lubna, C. Benetti, Catur Wibisono, MacMillan B. Wheeler, S. L. Tabor, Yutaka Utsuno, Noritaka Shimizu, and J. M. Allmond, “Observation of collective modes of excitations in  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ , and  $^{61}\text{Co}$  and the influence of the  $g_{9/2}$  orbital” , Phys. Rev. C **109**, 014305 (2024).
17. B. D. Linh, A. Corsi, A. Gillibert, A. Obertelli, P. Doornenbal, C. Barbieri, T. Duguet, M. Gómez-Ramos, J. D. Holt, B. S. Hu, T. Miyagi, A. M. Moro, P. Navrátil, K. Ogata, S. Péru, N. T. T. Phuc, N. Shimizu, V. Somà, Y. Utsuno, N. L. Achouri, H. Baba, F. Browne, D. Calvet, F. Château, S. Chen, N. Chiga, M. L. Cortés, A. Delbart, J.-M. Gheller, A. Giganon, C. Hilaire, T. Isobe, T. Kobayashi, Y. Kubota, V. Lapoux, H. N. Liu, T. Motobayashi, I. Murray, H. Otsu, V. Panin, N. Paul, W. Rodriguez, H. Sakurai, M. Sasano, D. Steppenbeck, L. Stuhl, Y. L. Sun, Y. Togano, T. Uesaka, K. Wimmer, K. Yoneda, O. Aktas, T. Aumann, L. X. Chung, F. Flavigny, S. Franchoo, I. Gašparić, R. B. Gerst, J. Gibelin, K. I. Hahn, N. T. Khai, D. Kim, T. Koiwai, Y. Kondo, P. Koseoglou, J. Lee, C. Lehr, T. Lokotko, M. MacCormick, K. Moschner, T. Nakamura, S. Y. Park, D. Rossi, E. Sahin, D. Sohler, P.-A. Söderström, S. Takeuchi, H. Törnqvist, V. Vaquero, V. Wagner, S. T. Wang, V. Werner, X. Xu, Y. Yamada, D. Yan, Z. Yang, M. Yasuda, and L. Zanetti, “Onset of collectivity for argon isotopes close to  $N=32$ ” , Phys. Rev. C **109**, 034312 (2024).
18. Hana Gil, Nobuo Hinohara, Chang Ho Hyun, and Kenichi Yoshida, “Nuclear mass table in density functional approach inspired by neutron-star observation” , Phys. Rev. C **108**, 044316 (2023).
19. Nobuo Hinohara, Tomohiro Oishi, and Kenichi Yoshida, “Triplet-odd pairing in finite nuclear systems: Even-even singly closed nuclei” , Phys. Rev. C **109**, 034302 (2024).
20. Kouhei Washiyama and Kenichi Yoshida, “Triaxial-shape dynamics in the low-lying excited  $0^+$  state: Role of the collective mass” , Phys. Rev. C **108**, 014323 (2023).
21. Kouhei Washiyama, Shuichiro Ebata, and Kenichi Yoshida, “Evolution of the giant monopole resonance with triaxial deformation” , Phys. Rev. C **109**, 024317 (2024).

## B) 査読無し論文

1. 類家 千怜、「BCS 理論を用いた原子核対回転に伴う慣性モーメントに関する研究」、原子核研究 **68**, Supplement 1 (2023 年夏の学校特集号), p. 35.
2. 金井 敦哉、「二重ベータ崩壊に向けた Dirac 方程式による電子波動関数の計算」、原子核研究 **68**, Supplement 1 (2023 年夏の学校特集号), p. 36.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. T. Nakatsukasa, “Nuclear deformation and stability” , CCS–LBNL Collaborative Workshop 2023, Tsukuba, Japan, April 12 – 13, 2023.
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, July 3 – 7, 2023.
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.
4. T. Nakatsukasa, “Nuclear pairing and  $\alpha$  particle formation” , Reimei workshop “Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction” , Tokai, Japan, February 28 – March 1, 2024.
5. N. Shimizu, K. Yanase, Y. Tsunoda, and T. Otsuka, “Shell-model studies of medium-heavy nuclei for the neutrinoless-double-beta-decay matrix element and the nuclear Schiff moment” , 6th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (HAWAII2023), Waikoloa, HI, USA, November 26 – December 1, 2023.
6. N. Shimizu, Y. Utsuno, and S. Yoshida, “Large-scale shell-model study for beta-decay properties of neutron-rich nuclei” , 6th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (HAWAII2023), Waikoloa, HI, USA, November 26 – December 1, 2023.
7. N. Hinohara, “Recent development and application of finite-amplitude method for QRPA” , DNA-OMEG Workshop on Nuclear structure, reaction and astrophysics, Pukyong National University, Busan, Korea, Nov. 9 – 11, 2023.
8. N. Hinohara, “Recent progress in the nuclear matrix element calculation using the finite-amplitude method for QRPA” , Theoretical and experimental approaches for nuclear matrix elements of double-beta decay, Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Ibaraki, Japan, Dec. 21 – 22, 2023.
9. N. Hinohara, “Collective phenomena related to neutron-proton pairing in the ground and excited states around  $N=Z$ ” , Advancing physics at next RIBF (ADRIB24), RIKEN, Wako, Japan, January 23 – 24, 2024.
10. N. Hinohara, “Nuclear matrix element for double-beta decay within density functional theory” , Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2024), Tohoku University, Sendai, Japan, March 4 – 6, 2024.

11. K. Washiyama, “Coupling between the isoscalar giant monopole and quadrupole resonances in triaxially deformed nuclei” , RIKEN workshop “Giant monopole resonances and related topics” , RIKEN Nishina Center, Wako, Japan, May 18, 2023.
12. K. Washiyama, “Microscopic description of large-amplitude collective motion based on nuclear density functional theory” , New Frontiers in Nuclear Physics and Nuclear Astrophysics (NNPA2023), Antalya, Turkey, September 5 – 10, 2023.
13. K. Washiyama, “Collective Hamiltonian method for low-lying states in transitional nuclei” , RCNP Colloquium, Osaka University, Japan, November 1, 2023.
14. K. Washiyama, “Collective inertia and fission half-life in spontaneous fission” , DNA-OMEG Workshop on Nuclear structure, reaction and astrophysics, Pukyong National University, Busan, Korea, November 9 – 11, 2023.
15. K. Washiyama, “Shape coexistence/mixing phenomena in low-lying states: Role of the triaxial deformation and inertial function” , The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), Minoh Campus, Osaka University, Minoh, Japan, March 26 – 28, 2024.

#### B) 一般講演

1. T. Nakatsukasa, K. Hagihara, and N. Hinohara, “Quantum binding effect for nuclei at neutron dripline” , 34th Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe, Japan, August 4 – 8, 2023.
2. T. Nakatsukasa, K. Hagihara, and N. Hinohara, “Coulombic stabilization of nuclei at the neutron dripline” , International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2023, Phu Quoc Island, Vietnam, May 4 – 8, 2023.
3. T. Nakatsukasa and K. Wen, “Collective subspace requantization for sub-barrier fusion reactions” , International Conference on Heavy-Ion Collisions at near-barrier energies (FUSION23), Shizuoka, Japan, November 19 – 24, 2023.
4. N. Shimizu, Y. Tsunoda, and T. Otsuka, “Quasi-particle vacua shell model and shape phase transition of Nd isotopes” , 34th Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe, Japan, August 4 – 8, 2023.
5. N. Hinohara, “Reduced basis method for DFT linear response” , NUCLEI Annual Collaboration Meeting, University of Tennessee, Knoxville, TN, USA, July 24 – 26, 2023.
6. N. Hinohara, “Nuclear pairing and related phenomena in nuclear dynamics” , Theory Seminar, Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University, East Lansing, MI, USA, September 12, 2023.

7. N. Hinohara and T. Nakatsukasa, “Alpha-particle formation and nuclear pairing” , Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNC2023), Osaka University, Toyonaka, Japan, Nov. 27 – 29, 2023.
8. N. Hinohara, “Spin-triplet pairing in nuclear DFT” , RIKEN Symposium Second Workshop on Fundamentals in Density Functional Theory (DFT2024), RIKEN Kobe Campus, Kobe, Japan, February 20 – 22, 2024.
9. N. Hinohara, “Pairing rotation and pairing properties in ground states” , Reimei workshop “Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction” , Tokai, Japan, February 28 – March 1, 2024.
10. K. Washiyama, “Spontaneous fission with nuclear density functional theory” , The 6th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model (Sado2023), Sado, Japan, September 28 – 30, 2023.
11. K. Washiyama, “Microscopic description of spontaneous fission in nuclear energy density functionals” , International Conference on Heavy-Ion Collisions at near-barrier energies (FUSION23), Shizuoka, Japan, November 19 – 24, 2023.
12. K. Washiyama, “Large-amplitude collective dynamics in low-lying states of transitional nuclei with collective Hamiltonian method” , Reimei workshop “Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction” , Tokai, Japan, February 28 – March 1, 2024.
13. A. Kumar, “Shell model studies in nuclear beta decay”, Reimei workshop “Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction” , Tokai, Japan, February 28 – March 1, 2024.
14. K. Yoshinaga, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa “Calculation of radial moments of charge distribution compared to precision spectroscopy data” , A3F-CNS Summer School 2023, Wako, Japan, August 4 – 10, 2023.
15. K. Yoshinaga, “Calculation for radial moments of charge distribution” , The 6th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model (Sado2023), Sado, Japan, September 28 – 30, 2023.
16. K. Yoshinaga, N. Hinohara, T. Nakatsukasa, and N. Shimizu, “Calculation of radial moments of charge distribution” , 6<sup>th</sup> Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (HAWAII2023), Waikoloa, HI, USA, November 26 – December 1, 2023.
17. C. Ruike and N. Hinohara, “Moments of inertia of pairing rotation within the BCS model for Sn and Ni isotopes” , A3F-CNS Summer School 2023, Wako, Japan, August 4 – 10, 2023.
18. A. Kanai and N. Hinohara, “Bound and scattering states of the electron

wavefunctions calculated with the Dirac equation for  $0\nu\beta\beta$ ”, A3F-CNS Summer School 2023, Wako, Japan, August 4 – 10, 2023.

C) ポスター

1. T. Nakatsukasa, “Local alpha strength functions in nuclei”, 15th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Tsukuba, Japan, October 2 – 3, 2023.
2. T. Nakatsukasa and N. Hinohara, “Local alpha strength functions and alpha knockout reactions”, International Conference on Heavy-Ion Collisions at near-barrier energies (FUSION23), Shizuoka, Japan, November 19 – 24, 2023.
3. N. Shimizu, “Microscopic description of quadrupole collective states”, 15th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Tsukuba, Japan, October 2 – 3, 2023.
4. N. Hinohara, S. Agbemava, K. Godbey, W. Nazarewicz, A. Ravlić, and J. Sadhukhan, “Local QRPA inertia for symmetric-asymmetric fission dynamics”, International Conference on Heavy-Ion Collisions at near-barrier energies (FUSION23), Shizuoka, Japan, November 19 – 24, 2023.
5. N. Hinohara, T. Oishi, and K. Yoshida, “Energy-weighted sum rule for multipole and spin-M1 transitions and ground-state properties”, The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), Minoh Campus, Osaka University, Minoh, Japan, March 26 – 28, 2024.
6. A. Kumar, “Shell model study of  $\beta$ -decay properties of  $N = 126, 125$  nuclei”, The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), Minoh Campus, Osaka University, Minoh, Japan, March 26 – 28, 2024.
7. K. Yoshinaga, T. Nakatsukasa, and N. Shimizu, “Shell model calculation using Gogny-type interactions”, The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), Minoh Campus, Osaka University, Minoh, Japan, March 26 – 28, 2024.
8. A. Kanai and N. Hinohara, “Toward a precise calculation of phase space factor in double beta decay”, Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2024), Tohoku University, Sendai, Japan, March 4 – 6, 2024.
9. C. Ruike, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa, “Neutron pairing rotational moments of inertia in Ni, Sn, and Pb isotopes”, The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), Minoh Campus, Osaka University,

Minoh, Japan, March 26 – 28, 2024.

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 中務 孝、「原子核集団運動理論の発展と展望」、九州大学理論核物理研究会「現代核物理の拡がり」と展望」、九州大学伊都キャンパス、2023年7月19–21日。
2. T. Nakatsukasa, “Pair dynamics in nuclei and nuclear matter”, RCNP Workshop on Microscopic approach from pair correlation to pair condensation, RCNP, Osaka University, Ibaraki, Japan, September 4 – 6, 2023.
3. 清水 則孝、「原子核構造計算」、富岳成果創出加速プログラムキックオフミーティング、慶応大学日吉キャンパス、2023年6月20日。
4. 日野原 伸生、「理論からみた RIBF で取得すべきデータ 1」、TRIP-RIBF 実験キックオフミーティング、理化学研究所(ハイブリッド)、2023年4月21日。
5. 日野原 伸生、「スピン三重項対相関と関連実験量」、原子核におけるスピン自由度の織り成すダイナミクス、大阪大学核物理研究センター、2023年12月11–13日。
6. 鷲山 広平、「密度汎関数法に基づく大振幅集団運動」、九州大学理論核物理研究会「現代核物理の拡がり」と展望」、九州大学伊都キャンパス、2023年7月19–21日。
7. C. Ruike, “Neutron pairing rotation within the BCS model”, RCNP Workshop on Microscopic approach from pair correlation to pair condensation, RCNP, Osaka University, Ibaraki, Japan, September 4 – 6, 2023.

B) 一般講演

1. 日野原 伸生、Xilin Zhang、Jonathan Engel、「有限振幅法のエミュレータ」、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024 年 3 月 18 – 21 日。
2. 鷲山 広平、江幡 修一郎、吉田 賢市、「非軸対称変形と巨大単極共鳴の進化」、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024 年 3 月 18 – 21 日。
3. 吉永 孝太、清水 則孝、中務 孝、「Gogny 有効相互作用を用いた殻模型計算」、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024 年 3 月 18 – 21 日。
4. 金井 敦哉、「二重ベータ崩壊に向けた Dirac 方程式による束縛・散乱状態の電子波動関数の計算」、第 69 回原子核三者若手夏の学校、国立オリンピック記念青少年総合センター、2023 年 8 月 17 – 21 日。
5. 類家 千怜、「BCS 理論を用いた原子核対回転に伴う慣性モーメントに関する研究」、第 69 回原子核三者若手夏の学校、国立オリンピック記念青少年総合センター、2023 年 8 月 17 – 21 日。
6. 類家 千怜、日野原 伸生、「対回転慣性モーメントの分析を通じた中性子対相関に関

する考察」、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024 年 3 月 18 – 21 日。

**C) ポスター発表**

1. 類家 千怜、「原子核超流動に起因する対回転慣性モーメントの解析」、計算物理春の学校 2024、沖縄県市町村自治会館、2024 年 3 月 11 – 15 日。

その他

**(4) 著書、解説記事等**

なし

**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。特に、中性子星インナー・クラスト構造に関わるバンド計算の手法について、計算物性分野の知見に関して情報交換を実施。
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・実験、原子核実験分野との連携。

**産学官連携**

なし

**国際連携・国際活動**

1. 中国・浙江大と中性子星のクラスト構造・グリッチ起源に関する共同研究を日中韓フォーサイト事業「21世紀の原子核物理学」の中で実施（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世紀の原子核物理学」の一般として実施（日野原）。

**8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績**

なし

**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  
学群教育会議議員  
理工学群物理学類長  
理工学群運営委員会委員  
理工学群共通数学検討委員  
ダイバーシティ・アクセシビリティ担当教員  
チュートリアル教育推進委員会委員

清水則孝

計算科学研究センター 共同研究委員会委員  
計算科学研究センター 先端計算科学推進室員

日野原伸生

計算科学研究センター 情報セキュリティ委員  
数理物質系情報環境委員会委員  
自然系学類計算機委員会委員長

## 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  
西宮湯川記念賞選考委員会委員 (2021・2022) 委員長 (2023)  
素粒子奨学会運営委員・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  
日本物理学会受賞候補等推薦委員会委員  
日本物理学会若手奨励賞 (理論核物理領域) 選考委員  
第 19 回日本物理学会 Jr. セッション (2023) 審査委員  
第 12 回茨城県高校生科学研究発表会審査委員  
京都大学基礎物理学研究所・運営協議会委員  
高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所運営委員会委員

高エネルギー加速器研究機構自己評価委員会委員  
核理論委員会委員  
日本原子力研究開発機構特定課題推進員研究業績評価会審査員  
日本原子力研究開発機構先端基礎研究評価委員会委員

清水則孝

計算基礎科学連携拠点 運営委員会 委員  
HPCI システムの利用研究課題選定レビュアー  
埼玉大学 テニユア審査委員会 外部委員

日野原伸生

京都大学基礎物理学研究所共同利用運営委員会委員

## 11. その他

### 海外長期滞在、フィールドワークなど

1. 日野原、ミシガン州立大学、米国（国際共同研究加速基金（国際共同研究強化（A））、2023年4月－10月）。