

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01209

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Unified high-precision calculations of nuclei and neutron stars with a massively parallelized density-functional solver

研究代表者

中務 孝 (Nakatsukasa, Takashi)

筑波大学・計算科学研究センター・教授

研究者番号：40333786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：量子性・揺らぎ・超流動性を共通課題とするスケールの異なる核子・ハドロン多体系を対象に、(時間依存)密度汎関数理論((TD)DFT)という一貫した理論手法を用いて、ミクロな原子核構造・反応からマクロな中性子星クラストの構造・素励起の間の関係を明らかにする。特に、低エネルギー核反応と核構造における量子的な形状揺らぎが果たす役割、中性子星インナー・クラスト領域に出現するエキゾチック相における中性子超流体とクーロン格子の間の相互作用の性質解明に成果があった。また、このために必要となる大規模並列計算を可能にする新たな有限温度3次元DFTソルバのための計算手法・アルゴリズム・プログラム開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パルサーと呼ばれる高速回転する中性子星からの電磁パルスに見られる不規則性(グリッチ)の起源は未だ謎のままであるが、解明には中性子星表面に近いクラスト領域における原子核と中性子超流体の間の相互作用解明が不可欠である。本研究ではこれまで無視されていた自己無撞着性を厳密に考慮した計算を実施し、この相互作用が中性子の可動性を真空中よりもむしろ増大させるという驚くべき結果に至った。この結果は過去の結果と逆であるが、その後の別グループの異なるアプローチによる解析でも同様の結果が得られている。グリッチの解釈に重大な影響がある結果として、今後さらに注目される可能性があり学術的意義が高い。

研究成果の概要(英文)：We study multi-scale many-nucleon (many-hadron) systems, using an universal theoretical framework, the (time-dependent) density functional theory ((TD)DFT). We aim at connecting microscopic nuclear structure/reaction with structure and elementary excitations in neutron-star crusts. Particularly, there are significant progresses in discovering roles of quantum shape fluctuations in low-energy nuclear reaction, and interplay between neutron superfluid and Coulomb lattice in exotic phases appearing in inner crust of neutron stars. In addition, we have also developed new computational methods and algorithms, and succeeded to achieve new three-dimensional solvers for finite-temperature DFT calculations which are required by these studies.

研究分野：理論核物理

キーワード：密度汎関数理論 集団運動 中性子星 原子核反応 原子核構造

1. 研究開始当初の背景

原子核は、フェルミ粒子である核子の自己束縛系であり、量子性が強く発現した有限系である。マクロスケールでは量子流体的性質が顕著であり、飽和密度の一樣核物質は、絶対零度においても結晶化しない。また、核子間相互作用（核力）には強い状態依存性、スピン・アイソスピン依存性があり、近距離において強い斥力が働く。原子核のバルクの性質と励起・応答の性質を同時に記述するためには、これら量子性と核力の複雑性・非自明性を反映する（練り込む）ことが求められる。この条件を満たす実用・汎用的理論として、密度汎関数理論(DFT)が挙げられる。同一のエネルギー密度汎関数を用いて、有限核から中性子星内部のマクロな核物質・中性子物質までを統一的に記述できる点が他のモデルにない強みである。原子核応答関数の時間依存密度汎関数理論(TDDFT)は、巨大共鳴状態を代表とする比較的高い振動数(エネルギー)領域で大きな成功を収め、核子の核内有効質量、原子核の硬さ、陽子・中性子の対称エネルギーとその密度依存性といった核物質の基本的な性質が、実験データとの比較を通して研究されてきた。TDDFT計算(またはTDHF計算)はまた、重イオン反応シミュレーションにおいても大きな成功を収めている。これら比較的高いエネルギーでの核応答・核反応の理解が進んでいるのとは対照的に、低エネルギー領域では数々の疑問・問題が未解決のまま残されている。「クーロン障壁以下(サブバリア)のエネルギーにおける核融合反応や自発核分裂の過程は、どのような経路、どんな形状を經由しているのか?」「その際のエネルギー散逸の強さは?」「中性子過剰核の余剰中性子、変形核の変形は、核融合を助長/阻害するのか?」「超重核の崩壊モード(アルファ崩壊 or 核分裂)は何が決めしているのか?」。また、「理論的に、これらの運動を記述する集団正準変数はどのように定義・決定することができるか?」これらの問いは依然として残されたままである。

マクロな原子核とも言える中性子星の構造においても同様の問題が関わってくる。一樣な核物質(コア)の外側の内殻(インナー・クラスト)領域では、低密度中性子物質(自由中性子)の海の中に原子核が規則的なクーロン格子を作っていると考えられている。マクロな格子振動と考えられる中性子星(マグネター)からの準周期的振動が発見されるなど、クーロン格子のずれに対する弾性率、質量などの微視的な評価が求められている。また、中性子の海は超流体になっており、観測されるパルサー・グリッジ(回転周期の不連続な変化)の起源だとする説が有力であるが、クーロン格子と超流動中性子の回転に対する応答の差を定量的に明らかにする必要があるのである。これらの問題では、自由中性子が格子にどの程度引きずられているのかという未解決問題が立ちほだかり、明確な答えが得られていない。

2. 研究の目的

ミクロな原子核構造・反応からマクロな中性子星クラストの構造・素励起まで、スケールの異なる核子・ハドロン多体系において、量子性・揺らぎ・対相関・超流動性というキーワードでこれらがお互いに密接に関連している(図1)。本研究では、これらを一貫した手法(拡張された(TD)DFT計算)によって研究することで、異なるスケールでの実験データ・観測データとの比較・検討を通し、地上の実験データに裏打ちされたミクロな様相からマクロな高密度天体現象へのフィードバックを可能にするスキームを確立する。また、具体的な研究を可能にする大規模並列数値計算プログラムの開発とそれに必要な理論手法・計算アルゴリズム開発を実施する。

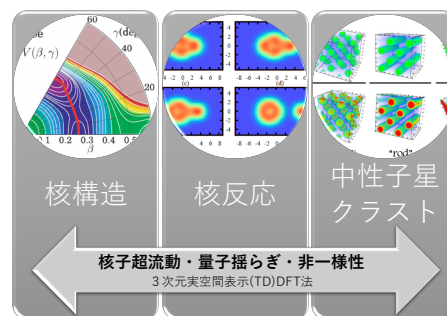


図1: マルチスケール核子・ハドロン多体系

3. 研究の方法

研究手法としては、(TD)DFTに基づく理論をベースにしているが、これを超えた相関を取り入れるための拡張を施した理論手法を用いている。まず、核子対凝縮による超流動性を導入した有限温度3次元DFTソルバを開発し、開発したプログラムを用いた研究を実施した。通常のDFT計算では、Kohn-Sham(-Bogoliubov)方程式の自己無撞着な解を求めるため、行列対角化を用いた反復解法が主流である。しかし、3次元の非制限計算では計算コストが大きく、また対角化の並列効率も上がらないことから、新たな手法開発が必要とされる。本研究では、4.の研究成果に述べる2つの理論計算手法を開発し、それぞれその手法に基づくソルバ開発を実行した。それぞれに長所・短所をもつ相補的な特徴があり、これらの開発をベースに原子核構造・反応、および中性

子星物質の物性に関わる物理を研究した。また、原子核大振幅集団運動理論である断熱型自己無撞着集団座標 (ASCC) 法を、原子核構造・反応ダイナミクスの解明に応用した。

4. 研究成果

有限温度 3 次元 DFT ソルバ開発に向けた新たな理論手法として、以下の 2 つの理論手法・コード開発に成功した。

(1) 1 つ目は、密度の構築においてグリーン関数を用いる方法である[1]。有限温度での 1 体密度を計算するには、フェルミ・ディラック分布関数 $f_T(E) = 1/(1 + e^{\beta E})$ の重みの占有率を計算するため、ハミルトニアン行列の対角化を行うのが一般的であるが、我々はグリーン関数 $G(E)$ を用いて、複素エネルギー面上での数値積分 $\int_C f_T(z)G(z)dz$ から密度を得る方法を考案し、3 次元座標空間表示によるコード開発を実施した。各複素エネルギー点におけるグリーン関数の計算には、方程式を反復法で解く方法を採用した。この方法が成功した鍵は次の 2 つの性質である。数値積分のために非常に多くの点でこの反復計算を実施する必要があるが、実際にはシフト法を応用することができ、実質的にエネルギー点 1 点での計算コストで多数のエネルギー点のグリーン関数が計算可能である。もう 1 つは、この反復計算の際、3 次元座標空間の格子点毎に独立な計算が可能であるため、格子点数までの並列効率が非常に高い点である。この手法の弱点としては、どれだけ計算量が必要なのか、計算前にはわからない点である。反復手法によって方程式の解が必要なため、どれだけ早く解に収束するのかという点に計算量が依存するため、実際に計算してみないとわからない。また、与えられた温度における平衡状態を求めた後、エントロピーの計算などにはエネルギー固有値が必要となり、行列対角化が必要となる。

(2) 上記の弱点を克服する方法として、フェルミ・ディラック分布関数 $f_T(E)$ を多項式展開する手法にもトライした[2]。物性分野でフェルミ演算子展開法として知られ、チェビシエフ多項式が良く用いられる。我々もチェビシエフ多項式を採用し、同様の手法を原子核エネルギー密度汎関数に初めて適用した。3 次元座標空間の各格子点上の密度をハミルトニアン演算で得ることができる。この手法も(1)と同様、行列対角化は不要であり、格子点毎に独立な計算ができるため並列効率が非常に高い。また、チェビシエフ多項式展開を他の物理量に応用することで、(1)では行列対角化が必要とされたエントロピーの計算なども対角化を一切使わずに計算することが可能となった。これは計算上のメリットとして非常に大きい。一方で弱点としては、チェビシエフ多項式は非常に優れた性質を持つものの、基本的に多項式展開であるため、低温で階段関数のような非連続な振る舞いをもつ場合は、必要な展開の次数が非常に大きくなる。一方、温度を決めれば必要な展開次数が決まるため、計算前に必要とされる計算量(計算時間)を見積もることが可能である。

これらの開発の応用例として、中性子星インナー・クラスト構造の解明が挙げられる。最適構造の検索アルゴリズムを確立できれば、様々な温度・密度における構造を明らかにすることができる。図 2 には、面心立方構造 (fcc) を仮定し空間の大きさを $(45 \text{ fm})^3$ に固定する条件のもとで、中性子の化学ポテンシャルを $\mu_n = 10 \text{ MeV}$ 、温度 $k_B T = 200 \text{ keV}$ での最適構造を求めた結果を示す。中性子対凝縮を示す中性子超流動体の中に変形した Se の原子核が出現することが計算で明らかになった。変形を持つ原子核が出現するかどうかを判定するためには、3 次元ソルバが必要となる。図の計算で扱っている粒子数は 4000 粒子以上になる。例え対凝縮を無視したゼロ温度の計算であったとしても、Kohn-Sham 軌道を 4000 以上求める必要があり、これまでの対角化による方法では大きな困難を伴う計算である。この研究では、10 万次元程度の行列を扱った計算に成功している。

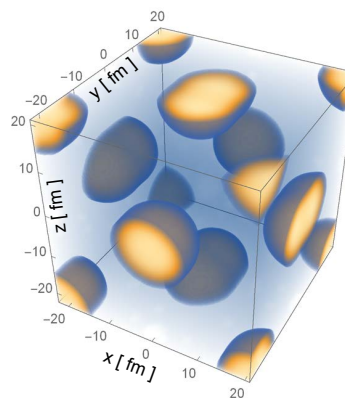


図 2: fcc 構造を初期配置として計算された構造

また、1 次元のスラブ相と呼ばれるインナークラスト構造に対して、中性子の可動性を調べる研究を実施し、自由中性子が大きな可動性を持つ (有効質量が真空中の中性子質量よりも小さくなる $m^*/m < 1$) ことを、自己無撞着計算で示した[3]。これまでは中性子の運動は阻害され可動性が小さくなる ($m^*/m > 1$) と一般に考えられてきたため、中性子がクラスト領域に蓄えることができる角運動量の大きさと観測されているパルサー・グリッチの大きさの間に矛盾が発生していた。本研究の結果は、この矛盾を解決する可能性を示唆しており、パルサー・グリッチ現象の解釈において重要な結果となる可能性が高い。

また、別の例として、有限温度における ^{40}Ca の原子核の核子密度分布を図 3 に示す。低温では

中心付近が盛り上がる殻効果を示しているが、やがてスムーズな分布に変化し、さらに高温の温度 $k_B T = 8.5 \sim 8.6$ MeV において原子核は液相から気相へと転移し、空間全体に広がった一様分布へと変化する。ただし、この転移点温度は閉じ込めた箱の大きさに依存するため注意が必要である。

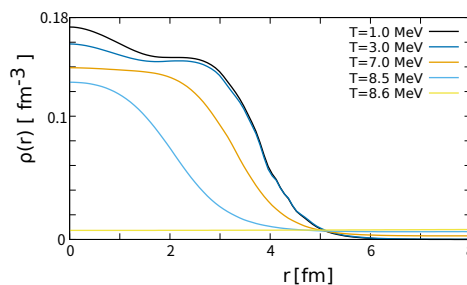


図 3: ^{40}Ca 核子密度分布の温度依存性

一方で、低エネルギー原子核反応における研究にも成果が得られている。特に、原子核集団運動論の応用によって、様々な反応における集団慣性質量を微視的に計算することに成功した点大きい。過去の研究では、クランキング公式と呼ばれる簡便な方法で計算されていることが多いが、この公式はよく知られた並進運動の全質量を再現しないという問題が知られており、理論的には正しくないことが明らかとなっている。今回の研究で、我々の微視的理論ではこの重心の全質量を正しく再現することが確かめられ、微視的に決定された反応経路上において入射核と標的核の間の相対運動の質量を計算し、核融合反応を解析した[4]。その結果、相対運動の質量は2つの原子核が遠方に離れる極限において換算質量を正しく再現すること、一方で原子核同士が触れ合い融合すると、2つの原子核間の相対運動から1つの原子核の形状運動に変化することで質量が急激に増大することが示された。この結果は、融合団面積を押し下げる効果 (fusion hindrance effect) として働くため、実験で観測された hindrance を定量的に再現できるか、今後さらに詳細な計算が求められる。

また、核分裂現象における集団質量の研究[5]では、やはりクランキング公式と比較して、質量の大幅な増大が微視的計算で得られ、これによって自発核分裂の寿命に大きな影響があることが示唆された。これまでの研究では、理論(計算)値は実験の寿命を過小評価しており、今回の質量の増大によって実験値が再現できるようになるのか、興味を持たれる課題である。現在米国ミシガン州立大学の研究者等と、多次元核分裂経路上での集団質量計算に理論を拡張し、この問題解決に向けた共同研究を実施中である。

これら以外にも、比較的集団性が低い運動にも適用が可能な理論手法として、経路積分と集団運動理論を組み合わせたハイブリッド理論手法の開発[6]にも成果があった。1次元の集団運動経路を確定することにより、可積分系にのみ適用が可能であった量子化法をより一般的に利用することができ、集団ダイナミクスの再量子化の有力な方法として提案した。また、簡単な対相関モデルに対して数値計算を実施し、その有用性を示した。

References

- [1] Y. Kashiwaba and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 101, 045804 (2020).
- [2] T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 107, 015802 (2023).
- [3] T. Kashiwaba and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 100, 035804 (2019).
- [4] K. Wen and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 105, 034603 (2022).
- [5] K. Washiyama, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 103, 014306 (2021).
- [6] F. Ni, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 98, 064327 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takashi Nakatsukasa	4. 巻 107
2. 論文標題 Fermi operator expansion method for nuclei and inhomogeneous matter with a nuclear energy density functional	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 15802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.015802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kai Wen, Takashi Nakatsukasa	4. 巻 105
2. 論文標題 Microscopic collective inertial masses for nuclear reaction in the presence of nucleonic effective mass	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.034603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Nakatsukasa	4. 巻 260
2. 論文標題 Self-consistent energy density functional approaches to the crust of neutron stars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 11041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226011041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Washiyama, Nobuo Hionohara, Takashi Nakatsukasa	4. 巻 103
2. 論文標題 Finite-amplitude method for collective inertia in spontaneous fission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.014306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. C. Das, A. Kumar, B. Kumar, S. K. Biswal, T. Nakatsukasa, A. Li and S. K. Patra,	4. 巻 495
2. 論文標題 Effects of dark matter on the nuclear and neutron star matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4893-4903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1435	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Kashiwaba and T. Nakatsukasa	4. 巻 100
2. 論文標題 Self-consistent band calculation of the slab phase in the neutron-star crust	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 35804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.035804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Nakatsukasa, Y. Kashiwaba, F. Ni, K. Washiyama, K. Wen, and N. Hinohara	4. 巻 32
2. 論文標題 Nuclear structure and reaction with quantum shape fluctuation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 10024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.32.010024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Wen and T. Nakatsukasa	4. 巻 8
2. 論文標題 Collective inertial masses in nuclear reactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 16 (8 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2020.00016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Abdul Quddus, Grigorios Panotopoulos, Bharat Kumar, Shakeb Ahmad and S. K. Patra	4. 巻 31
2. 論文標題 GW170817 constraints on equations-of-states of a neutron star in the presence of WIMP dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 B. Kumar	4. 巻 31
2. 論文標題 Neutron skins of heavy nuclei and tidal deformability of neutron star	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fang Ni, Nobuo Hinohara, and Takashi Nakatsukasa	4. 巻 98
2. 論文標題 Low-lying collective excited states in nonintegrable pairing models based on the stationary-phase approximation to the path integral	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064327 (12p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.064327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 24件)

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Requantizing the time-dependent density functional dynamics
3. 学会等名 YITP Workshop "Fundamentals in density functional theory (DFT2022)" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Requantizing of TDDFT on collective subspace
3. 学会等名 The 21st international conference on Recent progress of many-body theories (RPMBT-XXI) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Alpha particle distribution in nuclei
3. 学会等名 Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Mass parameters for nuclear reaction models and nucleonic effective mass
3. 学会等名 YIPQS long-term workshop ``Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Microscopic construction of a model Hamiltonian for low-energy nuclear reaction
3. 学会等名 Fudan open seminar in frontier of nuclear physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中務 孝
2. 発表標題 Shape and K-isomers in nuclei
3. 学会等名 理研ワークショップ「反応断面積研究の新しい展望」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中務 孝
2. 発表標題 Microscopic collective inertial masses in nuclear reaction
3. 学会等名 第3回クラスター階層領域研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Basic concepts of nuclear energy density functional theories
3. 学会等名 International School for Nuclear Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中務 孝
2. 発表標題 原子核の平均場描像: 密度依存相互作用と3体力
3. 学会等名 第2回分野横断インフォーマルミーティング (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中務孝、日野原伸生
2. 発表標題 核内における局所的アルファ粒子生成指標
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Futamura, Tetsuya Sakurai
2. 発表標題 Efficient Contour Integral-based Eigenvalue Computation Using an Iterative Linear Solver with Shift-Invert Preconditioning
3. 学会等名 HPC Asia 2021: The International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Yano, Yasunori Futamura, Akira Imakura, Tetsuya Sakurai
2. 発表標題 Efficient Implementation of a Dimensionality Reduction Method Using a Complex Moment-Based Subspace
3. 学会等名 HPC Asia 2021: The International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasunori Futamura, Tetsuya Sakurai
2. 発表標題 Parallel Contour Integral-Based Eigenvalue Computation using a Block Krylov Linear Solver with Shift-Invert Preconditioning
3. 学会等名 SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Collective motion, GCM, and requantization of TD mean field
3. 学会等名 Nuclear Physics Symposium "Challenges in theory of heavy nuclei" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Self-consistent description of the inner crust of neutron stars
3. 学会等名 International workshop "Microscopic Approaches to Nuclear Structure and Reactions" (Gogny2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Green's function method in nuclear structure theory
3. 学会等名 International workshop on new generation nuclear density functionals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Energy density functional approach to nuclear dynamics
3. 学会等名 XVII Workshop on Nuclear Physics (WONP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bharat Kumar
2. 発表標題 Neutron skins of heavy nuclei and tidal polarizability of neutron star
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Quddus, G. Panotopoulos, B. Kumar
2. 発表標題 GW170817 constraints on the properties of a neutron star in the presence of WIMP dark matter
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bharat Kumar
2. 発表標題 New effective interactions IOPB-I and G3
3. 学会等名 The 18th CNS International Summer School (CNSSS19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bharat Kumar
2. 発表標題 Neutron star astrophysics from gravitational waves and nuclear theory
3. 学会等名 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear models
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bharat Kumar
2. 発表標題 Tidal deformability for neutron and hyperon stars
3. 学会等名 Quark and Compact Star 2019 (QCS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bharat Kumar
2. 発表標題 GW170817: Constraints on the moment of inertia PSR J0737-3039A
3. 学会等名 Centenary Celebration Conference on Nuclear Structure and Nuclear Reaction (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中務孝
2. 発表標題 中性子星内殻シミュレーションとパルサー・グリッジ
3. 学会等名 シンポジウム「シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Dipole response in exotic nuclei
3. 学会等名 ECT* workshop on Probing exotic structure of short-lived nuclei by electron scattering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Theories of nuclear large amplitude collective motion
3. 学会等名 1st APCTP-TRIUMF joint workshop on understanding nuclei from different theoretical approaches (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Nuclear structure and reaction with quantum shape fluctuation
3. 学会等名 13th International Conference on nucleus-nucleus collisions (NN2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Selfconsistent band calculation for 1D neutron-star crust
3. 学会等名 Workshop on Nonequilibrium phenomena in superfluid systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Nakatsukasa and Fang Ni
2. 発表標題 Multi-reference EDF theory alternative to GCM: Application to the pairing model
3. 学会等名 2nd Tsukuba-CCS workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fang Ni and Takashi Nakatsukasa
2. 発表標題 Collective coordinate for pairing dynamics and requantization of TDHFB
3. 学会等名 Fifth joint meeting of the Nuclear Physics Divisions in APS and JPS (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Michael Bender, Aurel Bulgac, Thomas Duguet, Jean-Paul Ebran, Jon Engel, Michael McNeil Forbes, Markus Kortelainen, Takashi Nakatsukasa, Nicolas Schunck	4. 発行年 2018年
2. 出版社 IOP Publishing	5. 総ページ数 474
3. 書名 Energy density functional methods for atomic nuclei	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	櫻井 鉄也 (Sakurai Tetsuya) (60187086)	筑波大学・システム情報系・教授 (12102)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	日野原 伸生 (Hinohara Nobuo) (80511435)		
研究 協力者	温 凱 (Wen Kai)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	柏葉 優 (Kashiwaba Yu)		
研究協力者	倪 放 (Ni Fang)		
研究協力者	クマー バラット (Kumar Bharat)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 2nd Tsukuba-CCS workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics	開催年 2018年～2018年
--	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
インド	Institute of Physics, Bhubaneswar	Homi Bhabha National Institute	
中国	廈門大学		