

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05436

研究課題名(和文)中性子星内殻と中性子過剰原子核の対相関ダイナミクス

研究課題名(英文)Pairing dynamics in inner crust of neutron stars and neutron-rich nuclei

研究代表者

松尾 正之(Matsuo, Masayuki)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70212214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：中性子過剰原子核と希薄な中性子超流体とが共存する中性子星の内殻物質を対象に、原子核密度汎関数を主たる手法として、超流動性の微視的起源である対相関が引き起こす低エネルギー集団モードを解明する理論研究を行なった。中性子超流体の素励起モードである超流体音波と中性子過剰原子核の集団励起(並進運動・表面振動)との結合が弱いという新たな知見を得た。また、中性子過剰原子核と非束縛中性子の相互作用が対相関によって影響を受け、通常のポテンシャル共鳴とは異なる特異な性質を持つ準粒子共鳴が現れることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主要な結論は、中性子星内殻における2つの素励起モード、中性子超流体の音波と原子核の集団運動の間の結合が弱い可能性を理論的に指摘したことである。このモード間結合が弱い場合、内殻物質の熱伝導率が大きくなることが推定され、中性子星内殻の熱伝導が関与する現象を理解する上で新たな視点を与える可能性がある。また、本研究は、内殻中では原子核と中性子の散乱が対相関によって大きく影響を受けることも指摘するものである。これらは、中性子星内殻における中性子対相関の役割がこれまで認識されていた以上に広範であり、さらなる研究の必要性を示すものである。

研究成果の概要(英文)：The inner crust of neutron stars is a unique matter consisting of neutron-rich nuclei and neutron superfluid. We have studied theoretically the pairing correlation and low-lying collective excitations of the inner crust matter by means of the nuclear density functional theory. It is found that the coupling between the superfluid phonon, an elementary mode of excitation in neutron superfluid, and the collective modes of nuclei (the displacement and the surface vibration) may be weak. We also studied the role of the pairing correlation in forming the neutron quasiparticle resonance, and revealed its novel features.

研究分野：原子核理論

キーワード：中性子星内殻 中性子超流体 中性子過剰核 集団励起 対相関

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

中性子星は、大質量星が超新星爆発を起こした後に出現する半径 10km 程度の超高密度天体である。その密度は原子核内部の密度と同じ程度であり、巨視的な核物質と言えるが、その性質には未解明の点が多く、原子核理論の手法で予測することが不可欠となっている。本研究が対象としている中性子星の内殻は、中性子超流体と格子状に配列した原子核が共存する非一様核物質であり、その物性は核子の対相関・超流動性によって大きな影響を受ける。中でも、低エネルギーの励起モードの理解が不可欠であり、近年では超流体音波である Anderson-Bogoliubov モードが注目されている。また、中性子星内殻を構成する原子核は中性子過剰であり、近年実験的な研究が進んでいる中性子過剰原子核の実験によって中性子内殻物質の性質を探ることができれば、中性子星内殻物質の研究進展に大きな寄与ができると期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、中性子内殻物質における中性子の対相関に着目し、内殻物質ではどのような集団励起を生じるのか、特に、低励起集団モードである超流体音波 (Anderson-Bogoliubov モード) が内殻においてどのような性質を有するのかを明らかにすることを主たる目的としたものである。この非一様系における集団励起と、原子核の励起や中性子流体の励起との違い、その特質の解明を目指した。また、中性子過剰原子核における対相関現象にも着目し、中性子対相関の密度依存性や対相関に起因する中性子と原子核の相互作用について知見を得ることも目指した。

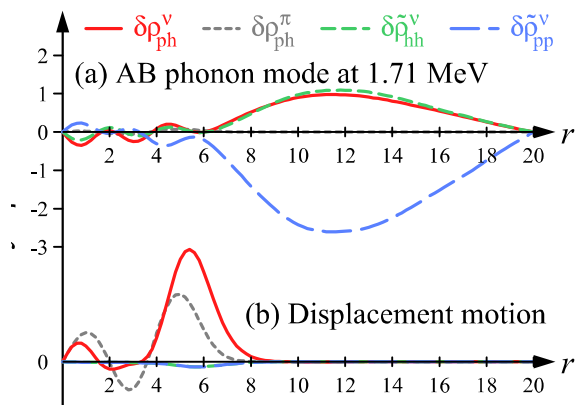
### 3. 研究の方法

研究代表者は従前から、核子多体系に対する密度汎関数理論 (原子核密度汎関数理論と呼ばれる) を用いて中性子過剰原子核の対相関と集団励起を記述する線形応答理論を開発してきた。また、この手法の中性子星内殻物質への拡張を進めてきた。そこで本研究では、この手法を用いて、内殻物質の対相関と集団励起を系統的な数値計算により分析することとした。なお、内殻物質の結晶構造をそのまま扱うのではなく、球形 Wigner-Seitz 近似を採用し、一つのセルを記述対象とすることで、この拡張を実現した。また、Skyrme 模型による密度汎関数模型と密度依存デルタ相互作用で表された対相互作用模型を採用した。

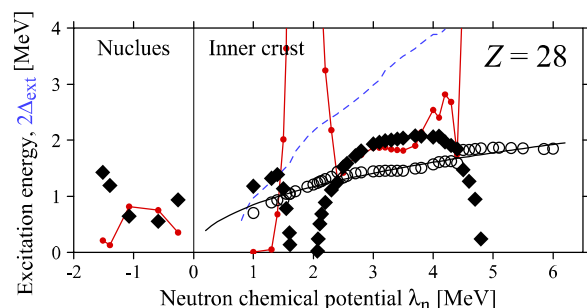
### 4. 研究成果

(1) 中性子星内殻物質に現れる低エネルギー集団励起を解明する目的で、まず最初に双極型励起、次に、四重極型励起を記述し分析した。

内殻物質を構成する原子核は中性子流体中で並進運動することが可能であるが、この並進運動はゼロエネルギーの双極型励起として現れる。したがって、内殻物質の双極型励起を調べることによって、Anderson-Bogoliubov モードと原子核並進運動の共存あるいは結合について知見を得ることができる。数値計算は、双極チャネルの Anderson-Bogoliubov モードは原子核の内部に侵入することはほとんどないという結果を示した (右図)。これは、中性子超流体の音波である Anderson-Bogoliubov モードと原子核並進運動の結合が弱いことを示唆するものである。この結合が弱い場合、内殻物質の熱伝導率が大きくなることが推測されることから、この結論は中性子星の観測との関係でも重要になると考えられる。本成果は、Physical Review C 誌に発表した (Phys. Rev. C96, 025806 (2017))。図は同文献 Fig.6 より改変して引用。) (a) AB phonon mode at 1.71 MeV (b) Displacement motion



次に行った四重極型励起の研究では、原子核の低励起集団モードである表面振動励起と Anderson-Bogoliubov モードの結合も着目した。系統的な数値計算は、1) この2つの励起モードは共存して存在すること、2) また、2つのモードの間の混合は小さく、したがって、モード間結合も弱いことが示された (右図)。この結果は、双極型励起で得た結論と定性的には同じであり、原子核の集団励起と中性子超流体の結合が弱いことは普遍的な性質である可能性を示すものである。なお、本研究からは、新たな発見を得た。右図に示すように、原子核の四重極励起 (黒い点) は中性子フェルミエネルギーの特定の値で不安定性、すなわち4重極変形が自発的に生じる。詳細な分析から、非束縛中性子と原子核の間の共鳴現象がこの不安定性をもたらす機構が明らかに



なった。本成果は Phys. Rev. C 誌上で発表した (Phys. Rev. C99,045801(2019). 図は同文献 Fig.7 より改変して引用)

#### (2) 現実的な中性子内殻配位での中性子対相関と集団励起の研究

研究(1)では、数値計算手法の限界から Wigner-Seitz セルの大きさは小さな値に限定されていたが、より現実的な内殻配位での分析を可能にするため、大きなセルサイズで数値計算を可能にすべく対角化手法による拡張を行った。この拡張により、内殻物質の中性子対相関をより詳細に調べることが可能になった。原子核と中性子超流体の相互作用が基底状態がどのように現れるか調べるため、原子核が近傍の中性子超流体にまで影響を及ぼす範囲(近接効果)を分析した。この研究から、近接効果は、原子核の密度端からのコヒーレンス長で理解できることを確認したことに加え、この近接効果距離はほとんどの場合セルサイズより小さいこと、を明らかにした。これも上記(1)の研究結果と整合するものである。この結果は、学会等での発表のほか予備研究結果を JPS Conf. Proc 誌に発表した。

#### (3) 中性子過剰原子核における準粒子共鳴の研究

対相関が原子核と非束縛中性子の間の相互作用に影響を与える一例が準粒子共鳴である。我々は、中性子分離エネルギーが小さい中性子過剰核では顕著な影響が現れると予想して、詳しい分析を行った。s 波軌道が関与する  $^{21}\text{C}$ ,  $^{23}\text{C}$  を想定し、ポゴリューボフ準粒子として中性子散乱状態を記述する枠組みを用いて、中性子の散乱行列の極(複素運動量空間上の共鳴状態)の振舞いを分析する。この解析から、閾値近傍の2つの極で記述される特殊な共鳴を生じさせることを解明した。本成果は、Prog. Theor. Exp. Phys. 誌上で発表した。

#### (4) 関連研究

最終年度には、研究分担者として本研究課題に参加した関澤一之氏とともに、時間依存密度汎関数理論により、スラブ構造を持つ中性子星内殻物質の並進運動を記述し、並進運動の慣性質量の分析を行った。この慣性質量はスラブに束縛された核子質量よりも小さな値となること、その起源として反エンタインメント効果が生じていることを見出した。この成果は現在投稿準備中である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Inakura, M. Matsuo	4. 巻 99
2. 論文標題 Coexistence of Anderson-Bogoliubov phonon and quadrupole cluster vibration in the inner crust of neutron stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 45801
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.99.045801	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 Yoshihiko Kobayashi, Masayuki Matsuo	4. 巻 2020
2. 論文標題 s-wave quasiparticle resonance in neutron-rich drip-line nuclei	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 013D03
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz136	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 Toshiyuki Okihashi, Masayuki Matsuo	4. 巻 31
2. 論文標題 Proximity Effect of Pair Correlation in the Inner Crust of Neutron Stars with Hartree-Fock-Bogoliubov Theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.31.011024	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 Tsunenori Inakura and Masayuki Matsuo	4. 巻 96
2. 論文標題 Anderson-Bogoliubov phonons in the inner crust of neutron stars: Dipole excitation in a spherical Wigner-Seitz cell	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 025806 (1-11)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.96.02580	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24件(うち招待講演 6件/うち国際学会 13件)

1. 発表者名 松尾正之
2. 発表標題 密度汎関数理論でr過程中中性子捕獲過程を記述する
3. 学会等名 基研研究会「原子核物理でつむぐrプロセス」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斉藤照之、松尾正之
2. 発表標題 連続状態RPA理論による直接中性子捕獲過程反応の記述：励起状態間遷移の記述
3. 学会等名 基研研究会「原子核物理でつむぐrプロセス」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Okihashi, M. Matsuo
2. 発表標題 Proximity effect of pair correlation in the inner crust of neutron stars with Hartree-Fock-Bogoliubov theory
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kobayashi, K. Sekizawa, M. Matsuo
2. 発表標題 Self-consistent band calculations for nuclear slabs with Skyrme energy density functionals
3. 学会等名 The 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear models (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Okihashi, M. Matsuo
2. 発表標題 Proximity effects in the inner crust of neutron stars using Hartree-Fock-Bogoliubov theory
3. 学会等名 The 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear models (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Okabe, M. Matsuo
2. 発表標題 A fully self-consistent QRPA calculation with BCPM functional for Ni isotopes
3. 学会等名 The 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear models (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Saito, M. Matsuo
2. 発表標題 Transition between collective states in the framework of continuum RPA
3. 学会等名 The 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear models (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kobayashi, M. Matsuo
2. 発表標題 s-wave quasiparticle resonance in neutron-rich drip-line nuclei
3. 学会等名 The 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear models (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Saito, M. Matsuo
2. 発表標題 Transition between excited states within continuum RPA: toward microscopic description of direct neutron capture
3. 学会等名 The international workshop on nuclear physics for astrophysical phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Inakura, M. Matsuo
2. 発表標題 Anderson-Bogoliubov mode in inner crust of neutron star
3. 学会等名 The international workshop on nuclear physics for astrophysical phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斉藤照之、松尾正之
2. 発表標題 連続状態乱雑位相近似による励起状態間遷移への相関効果：ソフト双極子と四重極振動状態間の遷移に関して
3. 学会等名 日本物理学会第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 起橋俊之、松尾正之
2. 発表標題 現実的なベアギャップを考慮した中性子星内殻における近接効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松尾正之
2. 発表標題 Pair correlation and collectivity in neutron-rich nuclear systems
3. 学会等名 20th Northeastern Asia Symposium 2018 on Nuclear Physics in the 21st Century (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲倉恒法、松尾正之
2. 発表標題 Coexistence of Anderson-Bogoliubov Phonon and Cluster Quadrupole Vibration in Neutron Star Inner Crust
3. 学会等名 Recent Advances in Nuclear Structure Physics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松尾正之
2. 発表標題 Quadrupole excitations in inner crust of neutron stars
3. 学会等名 The 4th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear models
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松尾正之
2. 発表標題 Neutron pairing from drip-line to neutron star inner crust
3. 学会等名 The 50th Reimei workshop "Universal Physics in Many-Body Quantum Systems --- from Atoms to Quarks --- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 稲倉恒法、松尾正之
2. 発表標題 中性子内殻物質における集団運動：原子核クラスターの4重極モード
3. 学会等名 日本物理学会第74回年会 九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林良彦、松尾正之
2. 発表標題 超流動原子核における低エネルギー波散乱のS行列による分析
3. 学会等名 基研研究会「Threshold Rule 50」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲倉恒法、松尾正之
2. 発表標題 Coexistence of Anderson-Bogoliubov phonon and cluster quadrupole vibration in neutron star inner crust
3. 学会等名 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 起橋俊之、松尾正之
2. 発表標題 Hartree-Fock-Bogoliubov理論を用いた中性子星内殻における対相関の近接効果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年会 九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林良彦、松尾正之
2. 発表標題 低エネルギーs波散乱がうける対相関効果のS行列による分析III
3. 学会等名 日本物理学会第74回年会 九州大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsunenori Inakura, Masayuki Matsuo
2. 発表標題 Anderson-Bogoliubov phonon in inner crust of neutron star
3. 学会等名 Interdisciplinary symposium on modern density functional theory (iDFT) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 稲倉恒法、松尾正之
2. 発表標題 中性子星内殻における超流動中性子と原子核の集団運動
3. 学会等名 新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」第6回「中性子星の核物質」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 稲倉恒法、松尾正之
2. 発表標題 中性子星内殻における超流動中性子と原子核の集団運動：双極モードと四重極モード
3. 学会等名 新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」理論班主催研究会「中性子星核物質」2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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	関澤 一之  (Sekizawa Kazuyuki)  (00820854)	新潟大学・研究推進機構・特任助教    (13101)	