

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800133

研究課題名(和文) 星震学で探る中性子星物質の特性

研究課題名(英文) Probing the neutron star matter properties with asteroseismology

研究代表者

祖谷 元 (Sotani, Hajime)

国立天文台・理論研究部・特任助教

研究者番号：70386720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：超新星爆発後に残される中性子星内部は非常に高密度になるため、地上実験からその内部を知ることは非常に困難である。そこで、我々は中性子星の振動に着目し、特徴的な振動数と内部の状態を比較することで、外からは見えない中性子星内部の情報を引き出すことを目指した。実際、巨大フレア現象で見つかった準周期的振動数と中性子星クラストでのスレ振動数を比較することで、クラスト領域における原子核飽和とパラメータへの制限に迫った。特に、これまで考えられてない、クラスト内部の空孔層(パスタ層)での振動に着目した。我々のシナリオが正しいとすると、パスタ層の存在を観測的に示した初の事例かもしれない。

研究成果の概要(英文)：Neutron stars, which form via supernovae, are in extreme conditions. The density inside the stars becomes significantly over the standard nuclear density. So, via terrestrial nuclear experiments it is very difficult to make an constraint on the interior information of neutron stars. Thus, we focus on the oscillations of neutron stars to extract the interior information. By comparing the quasi-periodic oscillations observed in the giant flares with the crustal torsional oscillations, we set out to get the constraint on the nuclear saturation parameters. In particular, we consider the oscillation in the bubble phase. If our scenario is correct, our results show the evidence of the pasta structure in the neutron star crust observationally.

研究分野：宇宙物理

キーワード：中性子星 状態方程式 星震学

1. 研究開始当初の背景

質量が太陽質量の 8~25 倍程度の重たい星は進化の最終段階に於いて超新星爆発を起こし、最終的に中性子星が残る。その内部密度は 10^{15}g/cm^3 を超えるため、地上実験から決まる核物質の性質だけでは不十分であり、未だその構造は不確定である。このような高密度な状態は地上で再現することが非常に困難であることから、中性子星は高密度における物理を知る上で絶好の“実験室”であると言える。これまでに、 γ 線や X 線を散発的に放出する軟 γ 線リピーターと呼ばれる天体から、通常のフレア現象とは異なる巨大フレア現象が 3 例観測されている。2006 年には、巨大フレア現象の減衰過程において準周期的振動の存在が初めて発見された。その特徴的な振動数は数十ヘルツからキロヘルツにおよぶ。軟 γ 線リピーターは強磁場を伴う中性子星と考えられることから、発見された準周期的振動は中性子星の振動を直接捉えた初の観測事例と期待される。

2. 研究の目的

中性子星はこの世で最も高密度な状態を実現する天体であるが、内部構造は未だ不確定である。しかし、中性子星の振動や放出される重力波は、その内部構造に強く依存したものであるため、逆問題として中性子星の観測を通じて星内部の情報を知ることができる。そこで本研究では、中性子星の表面付近の固体層（クラスト）での振動に焦点を当てる。特に、最近観測された巨大フレア現象における準周期的振動数を用いて、クラストにおける中性子星物質の特性を明らかにすることを目指す。さらに、放出される重力波のエネルギーを見積もり、その観測可能性を探るとともに、重力波観測を用いた核物質パラメータへの制限の可能性に迫る。宇宙物理学と原子核物理学の両分野に資する研究であり、非常にユニークな研究内容と言える。

3. 研究の方法

物質の持つ固有振動数と同じように、中性子星にも固有の振動モードがある。天体からの異なる振動モードを観測することで、星内部の情報を引き出そうという試みが星震学である。太陽における日震学や地球での地震学と同様に、星震学は中性子星内部の情報を知る強力な手段である。しかし、星震学的立場から、これまで中性子星の形状に対する制限の可能性は議論されているが、内部の中性子星物質に関するパラメータへの直接的な制限の可能性についてはほとんど議論されていない。そこで、中性子星内部の物理を系統的に変えながら、応答する振動数を線形解析により調べる。実際には、考える中性子星内部の振動領域で適当な境界値を与えることにより、固有値問題を解くことで固有振動数が決まる。得られた振動数の特性を調べたり、観測事実と

比較することで中性子星内部の物理への理解を試みる。

4. 研究成果

本研究課題を推進した結果、主に以下のような研究成果をあげることができた。

- (a) 中性子星の質量と半径の同時観測例は非常に少なく、これまでの観測例は典型的な中性子星質量である 1.4 倍の太陽質量以上のものに限られていた。これに対して、スライマノフ等は X 線バースター (4U 1724-30) における減光過程をうまく説明するような理論モデルを用いて、中心天体である中性子星の半径と質量の両方に制限を与えることに成功した。特に、質量が太陽質量程度と小さい可能性が示されている。一方、我々は低質量中性子星を上手く記述する原子核飽和密度パラメータの組み合わせを見つけることに成功し、このパラメータを用いて、低質量中性子星の半径や質量を記述できた。そこで、X 線バースターで得られた観測結果を用いて、原子核飽和パラメータへの制限を行った。得られた制限は、これまで我々が示してきた軟 γ 線リピーターにおける準周期的振動から得られているものと矛盾しない。
- (b) 中性子星の高密度領域では、通常のハドロン物質からクォーク物質へ相転移する可能性が理論的に指摘されている。このように中性子星の中心部でクォーク物質が存在する天体を特にハイブリッド星というが、我々はハイブリッド星において強磁場の効果を調べた。特に、強磁場の効果としてランダウ準位が無視できない場合、状態方程式は急激に固くなる可能性があり、その結果これまで構築が困難であった「重たい」ハイブリッド星も、考えられることになった。さらに、このような星は、白色矮星、中性子星に続く、第三のコンパクト天体となる可能性を示すことにも成功した。
- (c) 超新星爆発直後や連星中性子星合体直後にできた中性子星では、内部磁場は単純ではなく複雑に絡み合っている可能性がある。この場合、中性子星における磁気的な振動は、単純な大局的磁場を仮定した冷たい中性子星のものと異なるであろう。そこで、我々は複雑に絡み合った磁場構造を持った中性子星における振動解析を行った。その結果、このような星からの振動スペクトルは離散的となり、連続スペクトルとなる大局的磁場を伴う中性子星とは質的に異なる振動スペクトルとなることがわかった。
- (d) 中性子星クラスト領域に於けるズレ振動の解析では、クラスト領域の大部分を占める球形原子核層についてこれまで解析をしてきた。しかし、球形原子核層と中性子星コアの間に理論的な存在が示唆されている非球形原子核 (パスタ原子核) の層の効果を考えることは重要かもしれない。実

際、ズレ振動に対して板状原子核では非線形応答となるため、線形解析においてはズレ振動を記述するズレ弾性率はゼロと考えられる。つまり、クラスト領域において、板状原子核層を挟んで2つの領域が独立に振動し得ることになる。そこで、板状原子核より内側の(特に空孔層での)ズレ振動を、様々な中性子星モデルに対して系統的に調べた。その結果、得られたズレ振動数を軟γ線リピーターで観測された準周期的振動数と比較すると、原子核飽和パラメータへの制限に成功した。また、このシナリオが正しいとすると、中性子星におけるパスタ構造の存在が初めて観測的に示されたことになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

- ① [Hajime Sotani](#) and [Kostas D. Kokkotas](#), “Maximum mass limit of neutron stars in scalar-tensor gravity”, *Phys. Rev. D* 95, 044032 (6 pages) (2017), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.95.044032
- ② [Hajime Sotani](#) and [Toshitaka Tatsumi](#), “Quark matter with strong magnetic field and possibility of the third family of compact stars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 467, 1249-1258 (2017), 査読有
DOI: 10.1093/mnras/stx219
- ③ [Hajime Sotani](#), “Effect of nuclear saturation parameters on a possible maximum mass of neutron stars”, *Phys. Rev. C* 95, 025802 (5 pages) (2017), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.95.025802
- ④ [Hajime Sotani](#), [Kei Iida](#), and [Kazuhiro Oyamatsu](#), “Probing nuclear bubble structure via neutron star asteroseismology”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 464, 3101-3107 (2017), 査読有
DOI: 10.1093/mnras/stw2575
- ⑤ [Hajime Sotani](#) and [Tomoya Takiwaki](#), “Gravitational wave asteroseismology with protoneutron stars”, *Phys. Rev. D* 94, 044043 (11 pages) (2016), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.044043
- ⑥ [Hector O. Silva](#), [Hajime Sotani](#), and [Emanuele Berti](#), “Low-mass neutron stars: universal relations, the nuclear symmetry energy and gravitational radiation”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 459(04), 4378-4388 (2016), 査読有
DOI: 10.1093/mnras/stw969
- ⑦ [Hajime Sotani](#), “Empirical formula of crustal torsional oscillations”, *Phys. Rev. D* 93, 044059 (8 pages) (2016), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.044059
- ⑧ [Hajime Sotani](#), [Kei Iida](#), and [Kazuhiro Oyamatsu](#), “Possible identifications of newly observed magnetar quasi-periodic oscillations as crustal shear modes”, *New Astronomy* 43, 80-86 (2016), 査読有
DOI: 10.1016/j.newast.2015.08.003
- ⑨ [Hajime Sotani](#), “Torsional oscillations of neutron stars with highly tangled magnetic fields”, *Phys. Rev. D* 92, 104024 (10 pages) (2015), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.104024
- ⑩ [Hajime Sotani](#) and [Umpei Miyamoto](#), “Strong gravitational lensing by an electrically charged black hole in Eddington-inspired Born-Infeld gravity”, *Phys. Rev. D* 92, 044052 (10 pages) (2015), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.044052
- ⑪ [Hajime Sotani](#), “Magnetized relativistic stellar models in Eddington-inspired Born-Infeld gravity”, *Phys. Rev. D* 91, 084020 (10 pages) (2015), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.084020
- ⑫ [Hajime Sotani](#) and [Toshitaka Tatsumi](#), “Massive hybrid quark stars with strong magnetic field”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 447, 3155-3161 (2015), 査読有
DOI: 10.1093/mnras/stu2677
- ⑬ [Hajime Sotani](#), [Kei Iida](#), and [Kazuhiro Oyamatsu](#), “Constraining the density dependence of the nuclear symmetry energy from an X-ray bursting neutron star”, *Phys. Rev. C* 91, 015805 (5 pages) (2015), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.015805
- ⑭ [Hajime Sotani](#) and [Umpei Miyamoto](#), “Properties of an electrically charged black hole in Eddington-inspired Born-Infeld gravity”, *Phys. Rev. D* 90, 124087 (9 pages) (2014), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.124087
- ⑮ [Hector O. Silva](#), [Hajime Sotani](#), [Emanuele Berti](#), and [Michael Horbatsch](#), “Torsional oscillations of neutron stars in scalar-tensor theory of gravity”, *Phys. Rev. D* 90, 124044 (13 pages) (2014), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.124044
- ⑯ [Hajime Sotani](#), “Stellar oscillations in Eddington-inspired Born-Infeld gravity”, *Phys. Rev. D* 89, 124037 (5 pages) (2014), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.89.124037
- ⑰ [Hajime Sotani](#), “Observational discrimination of Eddington-inspired Born-Infeld gravity from general relativity”, *Phys. Rev. D* 89, 104005 (6 pages) (2014), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.89.104005
- ⑱ [Hajime Sotani](#), [Kei Iida](#), [Kazuhiro Oyamatsu](#), “Possible identifications of newly observed magnetar quasi-periodic oscillations as crustal shear modes”, *New Astronomy* 43, 80-86 (2016), 査読有
DOI: 10.1016/j.newast.2015.08.003

Oyamatsu, and Akira Ohnishi, “Mass and radius formulas for low-mass neutron stars”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 051E01 (8 pages) (2014), 査読有 DOI: 10.1093/ptep/ptu052

〔学会発表〕(計 20 件)

- ① 祖谷元, 飯田圭, 親松和浩, “巨大フレア現象と中性子星における空孔相の痕跡”, 日本物理学会, 大阪大学(大阪府豊中市), 2017年3月17日
- ② Hajime Sotani, “Protonneutron star properties via gravitational wave asteroseismology”, Quarks and Compact Stars 2017 (QCS2017), YITP, Kyoto, Japan, Feb. 20, 2017
- ③ Hajime Sotani, “Gravitational waves from protonneutron stars”, Testing Gravity 2017, SFU Harbour center, Vancouver, BC, Canada, Jan. 26, 2017
- ④ Hajime Sotani, “Probing the nuclear symmetry energy via neutron star asteroseismology”, International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016), Tohoku Univ., Sendai, Japan, Nov. 23, 2016
- ⑤ Hajime Sotani, “Gravitational wave asteroseismology in protonneutron stars”, NEB 17 - Recent Developments in Gravity, Mykonos, Greece, Sep. 19, 2016
- ⑥ Hajime Sotani, “Scalar-gravitational waves from relativistic stars in scalar-tensor gravity”, Gravitational Waves from modified gravity theories (招待講演), Athens, Greece, Sep. 15, 2016
- ⑦ Hajime Sotani, “Gravitational waves of core-collapse supernova at post-bounce phase”, 21st International Conference on General Relativity and Gravitation (GR21), New York, USA, Jul. 13, 2016
- ⑧ Hajime Sotani, “Crustal torsional oscillations and nuclear symmetry energy”, Nuclei in the Cosmos XIV (NIC2016), Toki Messe, Niigata, Japan, Jun. 22, 2016
- ⑨ Hajime Sotani, “Nuclear symmetry energy and crustal torsional oscillations in neutron stars”, 6th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM16) (招待講演), Beijing, China, Jun. 17, 2016
- ⑩ 祖谷元, 巽敏隆, “高密度星の系列における第三の分枝の可能性”, 日本物理学会, 東北学院大学(宮城県仙台市), 2016年3月19日
- ⑪ 祖谷元, 飯田圭, 親松和浩, “中性子星クラスト振動と電子遮蔽効果”, 日本物理学会, 大阪市立大学(大阪府大阪市), 2015

年9月28日

- ⑫ Hajime Sotani, “Identifications of Quasi-Periodic Oscillations Observed in Soft-Gamma Repeaters with Crustal Torsional Oscillations”, Fourteenth Marcel Grossmann Meeting (MG14), Rome, Italy, Jul. 13, 2015
- ⑬ Hajime Sotani, “Prospect for Observational Discriminant of the Gravitational Theories”, Fourteenth Marcel Grossmann Meeting (MG14), Rome, Italy, Jul. 13, 2015
- ⑭ Hajime Sotani, “Nuclear equation of state and crustal torsional oscillations”, COMPACT STARS AND BLACK HOLES (招待講演), Tuebingen, Germany, Jul. 8, 2015
- ⑮ Hajime Sotani, “Mass formula for low-mass neutron stars and its application”, 5th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM15) (招待講演), Krakow, Poland, Jun. 30, 2015
- ⑯ Hajime Sotani, “Neutron star oscillations and equation of state”, International Symposium on “Physics and Astronomy of Neutron Stars and Supernovae” (招待講演), NAOJ, Tokyo, Japan, Jun. 22, 2015
- ⑰ Hajime Sotani, “Constraints on the nuclear saturation parameters via neutron star observations”, Quarks and Compact Stars (招待講演), KIAA at Peking University, Beijing, China, Oct. 21, 2014
- ⑱ Hajime Sotani, Kei Iida, Kazuhiro Oyamatsu, and Akira Ohnishi, “Finding of a new nuclear matter parameter characterizing low-mass neutron stars”, HAWAII2014 -4th JOINT MEETING OF THE NUCLEAR PHYSICS DIVISIONS OF THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY and The PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN-, HAWAII ISLAND, USA, 2014年10月9日
- ⑲ Hajime Sotani, “Possible constraint on nuclear saturation parameters via neutron star observations”, NEB 16 - Recent Developments in Gravity, Mykonos, Greece, Sep. 18, 2014
- ⑳ 祖谷元, 飯田圭, 親松和浩, “中性子星観測による状態方程式の制限”, 日本天文学会, 山形大学(山形県山形市), 2014年9月12日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

祖谷 元 (SOTANI, Hajime)
国立天文台・理論研究部・特任助教
研究者番号：70386720

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者 なし