

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740177

研究課題名(和文) 強磁場中性子星モデルを用いた巨大フレア現象の解明

研究課題名(英文) Understanding the giant flare phenomena with strongly magnetized neutron star models

研究代表者

祖谷 元 (Sotani, Hajime)

京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員

研究者番号：70386720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：軟ガンマ線リピーターにおける巨大フレア現象で観測された準周期的振動と系統的に調べた中性子星クラスト領域のズレ振動数を比較することで、原子核飽和パラメータに制限を与えることに成功した。地上における原子核実験とは、全く質の異なる天体観測からの制限であり、宇宙物理学のみならず原子核物理学にも資する成果である。さらに、低質量中性子星の質量公式の導出にも成功した。中性子星を上手く記述する原子核飽和パラメータの組み合わせの発見により、中性子星の観測から原子核物理学を直接議論できることが可能となった。

研究成果の概要(英文)：We systematically examined the crustal torsional oscillations with the phenomenological equation of state, which are compared with the frequencies of quasi-periodic oscillations in the giant flares observed from soft-gamma repeaters. Then, we succeeded in making a constraint on the nuclear saturation parameter. This is a completely different constraint in quality from that obtained from the terrestrial nuclear experiments, which contributes not only astrophysics but also nuclear physics. We also succeeded in deriving the mass formulas for low-mass neutron stars. The finding of a new combination with nuclear saturation parameters describing neutron stars, enables us to discuss the nuclear physics directly from the neutron star observations.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理 中性子星 巨大フレア現象 状態方程式

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。近年、通常の中性子星より磁場の強さが1,000倍以上ある、いわゆる強磁場中性子星の存在が観測的に示唆されている。一方で、ガンマ線やX線を散発的に放出する軟ガンマ線リピーターと呼ばれる天体から、これまでに巨大フレア現象が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。軟ガンマ線リピーターは強磁場中性子星の有力な候補天体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かもしれない。さらに、巨大フレア現象における最高高度は10の44~46乗 erg/secにも達するため、観測可能なレベルの重力波が放出されることも十分期待される。

2. 研究の目的

中性子星内部は地球上で実現困難な程、超高密度となる。そのため、極限状態における物理を調べる上で、中性子星は絶好の「実験室」と言える。中性子星に関連する現象の観測を通して、高密度下での物質の振舞いや、強磁場の効果、重力理論の検証等が可能と考えられる。その中でも、特に軟ガンマ線リピーターにおける巨大フレア現象で発見された準周期的振動は、中心天体として考えられる中性子星の振動と密接に関連している。

そこで本研究では、これまで上手く説明できなかった巨大フレア現象に伴う準周期的振動を理論的に説明することを目指すとともに、観測された振動数から中性子星に関する情報を引き出すことを目的とする。また、巨大フレア現象に伴い放出される重力波のエネルギーを見積もることで、重力波波源としての有望性を評価する。

3. 研究の方法

巨大フレア現象に伴う準周期的振動では、数十ヘルツという非常に低い振動数が観測されている。一方、中性子星動径方向の変動を伴う極性振動では、典型的な振動数がキロヘルツとなるため、観測された低周波振動を理論的に説明する振動機構は余りない。実際、中性子星表面付近の固体層であるクラストでのズレ振動か、磁気張力による磁気的な振動のどちらかに起因していると考えられている。しかし、いずれの場合も、観測された全ての振動数を理論的に説明することには成功していない。

本研究では特にクラスト領域におけるズ

レ振動に着目し、系統的に振動数を調べることで、観測された振動数の理論的説明の可能性を探る。

中性子星の構造は、状態方程式に強く依存する。これまで多数の状態方程式が提案されてきたが、未だ統一的な見解は得られていない。特に、クラスト領域より内側の高密度領域では、その不確定性も大きい。そこで、高密度領域での状態方程式に関連する不確定性を避けるために、中性子星の構造を決める方程式を星の表面から積分し、クラスト領域を構築する。

このようなクラスト領域において、エネルギー保存則を線形化することで、ズレ振動の従う基礎方程式を導出する。適当な境界条件を星の表面とクラスト領域の境界とに課すことで解くべき問題は、固有値問題となる。

さらに、クラスト領域の密度が高い部分では中性子の漏れ出しと呼ばれる現象が起こると考えられている。原子核から漏れ出した中性子は超流動として振る舞うと考えられるため、結果的に振動数に影響を及ぼさずであろう。本研究では、このような超流動の効果も考えるとともに、これまでほとんど取り入れられていない、電子遮蔽の効果を考慮し、ズレ振動数の系統的な解析を行う。

4. 研究成果

現象論的な状態方程式を用いて、クラスト領域を構築した。特に、地上における原子核実験から制限の困難な原子核飽和パラメータである非圧縮率(K_0)と核物質の対称エネルギーに関するパラメータ(L)に着目し、振動数依存性を調べた。その結果、ズレ振動の基本振動では K_0 依存性はほとんど見られず、振動数は基本的 L にのみ依存することが分かった。

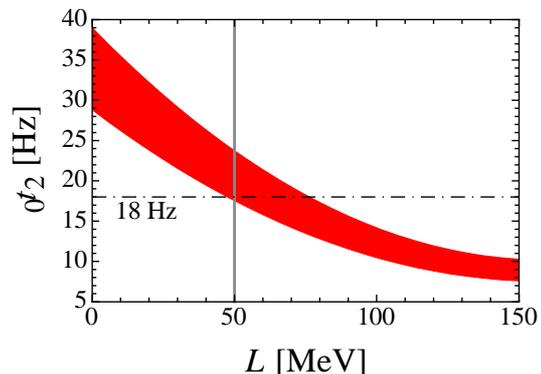


図1: 中性子星のクラスト領域におけるズレ振動で理論的に期待される最低振動数(赤い部分)と観測された準周期振動での最低振動数(18Hz)。

この結果、理論的に考えられる最低振動数である $l=2$ の基本振動数(${}_0t_2$)と巨大フレア現象で観測された最低振動数とを比較するこ

とで、原子核飽和パラメータである L に制限を与えることに成功した(図 1)。つまり、観測された準周期的振動がクラスト領域でのズレ振動に起因すると仮定すると、星の半径や質量を変えた場合に理論的に予想される ν_{f_2} の値(図 1 の赤い部分)は、観測された最低振動数(18Hz)より小さくなる必要があるため、結果的に $L \geq 50\text{MeV}$ と制限される。この制限は、地上における原子核実験とは全く質の異なる天体観測からの制限であり、非常にインパクトのある結論である。

また、複数の準周期的振動が観測されている巨大フレア現象はこれまで2例ある。そこで、それぞれにおいて観測された複数の振動数を全て説明するように、ズレ振動での振動数との比較を試みた。特に、クラスト領域の高密度領域で起こり得る中性子の漏れ出し効果を取り入れた解析を行った。その結果、図 2 のように、中性子星の半径が $10\sim 14\text{km}$ かつ質量が $1.4\sim 1.8$ 太陽質量であれば2つの巨大フレア現象を上手く説明できる原子核飽和パラメータは $100 \leq L \leq 130\text{MeV}$ であるべし、という制限が得られた。

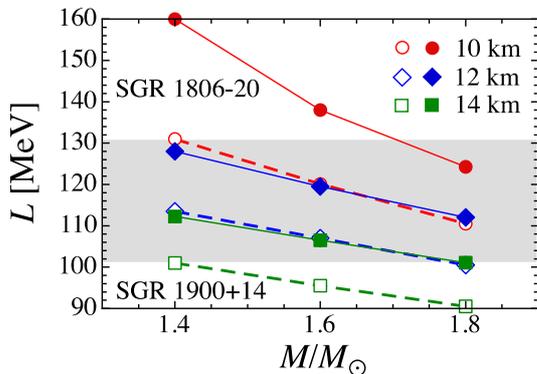


図 2 : SGR 1806-20 と SGR 1900+14 から制限される原子核飽和パラメータ L の値。

さらに、ズレ振動数を特徴付ける物理量であるズレ弾性率に、これまで余り考慮されていない電子遮蔽の効果を取り入れ、ズレ振動の解析を行った。その結果、用いた状態方程式や星の半径や質量に依存せず、振動数は6%減少することが分かった(図 3)。この結果、上述のようにして得られた原子核飽和パラメータに関する制限は、約 15%シフトすると期待される。

このように、クラスト領域における振動の系統的な解析は、宇宙物理学のみならず原子核物理学にも資するものである。また、ズレ振動数の高調波はクラストの厚さに依存することが知られているが、クラストの厚さは k_0 に依存すると期待されるため、今後高調波の解析を通して、原子核飽和パラメータ k_0 への制限も可能かもしれない。

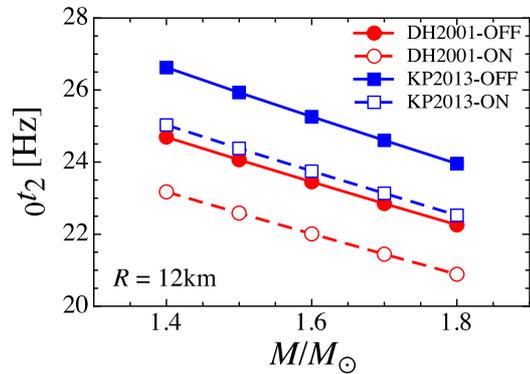


図 3 : 2つの異なる状態方程式から成る中性子星で予想されるクラスト振動数。実線は電子遮蔽の効果を見逃した場合、破線は電子遮蔽の効果を取り入れた場合。

この他、(1)低質量中性子星における質量公式の導出、(2)強磁場中性子星から放出される重力波に励起される電磁波の解析、(3)中性子星の深部で生じる可能性のあるハドロン・クォーク混合相でのズレ振動、(4)修正重力理論であるスカラーテンソル理論における中性子星の解析も行っている。

特に、低質量中性子星の質量公式の導出では、中性子星を記述する上手い原子核飽和パラメータの組み合わせ $\rho = (K_0 L^2)^{1/3}$ を発見した。これまで様々な理論に基づく状態方程式が提案されてきたが、図 4 に記すようにどの状態方程式を用いても、中心密度を固定した場合中性子星の質量は M/M_\odot と線形関係にあることが分かる。この結果、低質量中性子星の質量を、中心密度と ρ の関数として表すことに成功した。同様に、重力赤方偏移も中心密度と ρ で表せた。つまり、質量と重力赤方偏移(もしくは中性子星半径)の観測から、 ρ への制限も可能である。このように、 ρ の発見により、中性子星観測から原子核物理を直接議論することが可能となった。

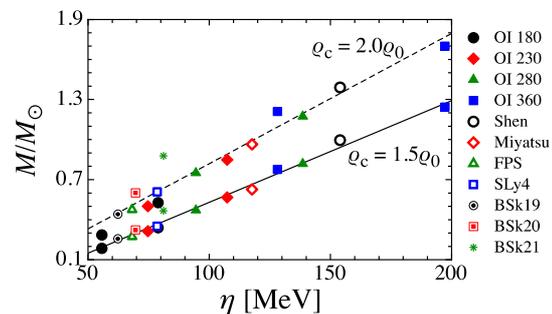


図 4 : 様々な状態方程式から予想される中性子星の質量と原子核飽和パラメータ η の関係。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

(1) Hajime Sotani, Kei Iida, Kazuhiro Oyamatsu, and Akiira Ohnishi, “Mass and

- radius formulas for low-mass neutron stars,” Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2014, 051E01-1~051E01-8, DOI:10.1093/ptep/ptu052
- (2) Hajime Sotani, “Scalar gravitational waves from relativistic stars in scalar-tensor gravity,” Physical Review D, 査読有, 89巻, 2014, 064031-1~064031-9, DOI:10.1103/PhysRevD.89.064031
- (3) Hajime Sotani, Kostas D. Kokkotas, Pablo Laguna, and Carlos F. Sopuerta, “Electromagnetic waves from neutron stars and black holes driven by polar gravitational perturbations,” General Relativity and Gravitation, 査読有, 46巻, 2014, 1675-1~1675-16, DOI:10.1007/s10714-014-1675-5
- (4) Hajime Sotani, “Electron screening effects on crustal torsional oscillations,” Physics Letters B, 査読有, 730巻, 2014, 166~170, DOI:10.1016/j.physletb.2014.01.054
- (5) Hajime Sotani, Ken’ichiro Nakazato, Kei Iida, and Kazuhiro Oyamatsu, “Possible Constraints on the Density Dependence of the Nuclear Symmetry Energy from Quasiperiodic Oscillations in Soft Gamma Repeaters,” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 434巻, 2013, 2060~2068, DOI:10.1093/mnras/stt1152
- (6) Hajime Sotani, Toshiki Maruyama, and Toshitaka Tatsumi, “Shear oscillations in the hadron-quark mixed phase,” Nuclear Physics A, 査読有, 906巻, 2013, 37~49, DOI:10.1016/j.nuclphysa.2013.03.011
- (7) Hajime Sotani, Kostas D. Kokkotas, Pablo Laguna, and Carlos F. Sopuerta, “Gravitationally driven electromagnetic perturbations of neutron stars and black holes,” Physical Review D, 査読有, 87巻, 2013, 084018-1~084018-14, DOI:10.1103/PhysRevD.87.084018
- (8) Hajime Sotani, Ken’ichiro Nakazato, Kei Iida, and Kazuhiro Oyamatsu, “Effect of superfluidity on neutron star crustal oscillations,” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters, 査読有, 428巻, 2013, L21~L25, DOI:10.1093/mnrasl/sls006
- (9) Hajime Sotani, “Slowly Rotating Relativistic Stars in Scalar-Tensor Gravity,” Physical Review D, 査読有, 86巻, 2012, 124036-1~124036-8, DOI:10.1103/PhysRevD.86.124036
- (10) Hajime Sotani, Ken’ichiro Nakazato, Kei Iida, and Kazuhiro Oyamatsu, “Probing the Equation of State of Nuclear Matter via Neutron Star Asteroseismology,” Physical Review Letters, 査読有, 108巻, 2012, 201101-1~201101-4, DOI:10.1103/PhysRevLett.108.201101
- [学会発表](計14件)
- (1) Hajime Sotani, “Neutron stars and nuclear matter parameters,” The Structure and Signals of Neutron Stars, from Birth to Death, 2014年3月26日, Florence, Italy
- (2) 祖谷元, “低質量中性子星の質量公式,” 日本天文学会, 2014年3月21日, 国際基督教大学(東京都)
- (3) Hajime Sotani, “Neutron stars and nuclear symmetry energy,” XXVII Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, 2013年12月11日, Dallas, USA
- (4) Hajime Sotani, “Neutron stars and symmetry energy,” International symposium on “Neutron star matter in view of nuclear experiments and astronomical observations,” 2013年10月25日, YITP, Kyoto, Japan
- (5) 祖谷元, “クラスト振動における電子遮蔽の効果,” 日本物理学会, 2013年9月20日, 高知大学(高知県)
- (6) 祖谷元, “巨大フレア現象とクラスト振動,” 日本天文学会, 2013年9月12日, 東北大学(宮城県)
- (7) Hajime Sotani, “Possible constraints on density dependence of symmetry energy from oscillations in Magnetar Giant Flares,” 3rd International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM13), 2013年7月23日, NSCL/FRIB, East Lansing, Michigan, USA
- (8) 祖谷元, “ハドロン・クォーク混合相におけるシアー振動,” 日本物理学会, 2013年3月26日, 広島大学(広島県)
- (9) 祖谷元, “ハドロン・クォーク間の表面張力とシアー運動,” 日本天文学会, 2013年3月23日, 埼玉大学(埼玉県)
- (10) Hajime Sotani, “Possibility to restrict on neutron star matter by using asteroseismology,” International Symposium on ‘Quarks to

Universe in Computational Science
(QUCS 2012), ' 2012年12月16日, Nara,
Japan

- (11) 祖谷元, “ 巨大フレア現象と中性子星クラスタの超流動性, ” 日本天文学会, 2012年9月20日, 大分大学(大分県)
- (12) 祖谷元, “ 中性子星クラスタのずりモードにおける超流体の効果, ” 日本物理学会, 2012年9月13日, 京都産業大学(京都府)
- (13) Hajime Sotani, “ Constraints on the nuclear symmetry energy via asteroseismology, ” NEB 15 - Recent Developments in Gravity, 2012年6月20日, Crete, Greece
- (14) Hajime Sotani, “ Probing the nuclear EOS via neutron star asteroseismology, ” CompStar 2012, 2012年6月8日, Tahiti, French Polynesia

〔図書〕(計1件)

- (1) Nobutoshi Yasutake, Tsuneo Noda, Hajime Sotani, Toshiki Maruyama, Toshitaka Tatsumi, Nova Science Publishers, Recent Advances in Quarks Research (Physics Research and Technology), 2013, 63~112

〔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)

京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員

研究者番号: 7 0 3 8 6 7 2 0

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者