

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03694

研究課題名(和文) マグネター級の強磁場中性子星を含む連星系の探査

研究課題名(英文) Search for Binary Neutron Stars with Magnetar-Class Strong Magnetic Fields

研究代表者

牧島 一夫 (Makishima, Kazuo)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・名誉教授

研究者番号：20126163

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、宇宙X線の公開データの解析を通じ、マグネター級の超強磁場をもつ中性子星(NS)を連星中に探査することである。研究遂行の結果、以下の3つの新しい成果を挙げ、目的を十分に達成した。(1) X線連星パルサーX PerseiのNSが、10の14乗を超える超強磁場をもつことを確認できた。(2) 代表的ガンマ線連星LS 5039のコンパクト天体がNSであることを示すと同時に、それがマグネター級の超強磁場をもつことを明らかにした。(3) 孤立マグネターが磁気変形して自由歳差運動を行うという描像を強化し、特にマグネターSGR 1900+14からは3例目となる自由歳差運動を発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は、以下の学術的な意義・波及効果をもつ。(1) マグネター級の双極子磁場をもつNSは連星中にも存在し、それらが特殊な天体ではないことを明かにした。(2) X PerseiとLS 5039で、連星運動から導かれたNSの質量は、典型的な1.4太陽質量よりやや大きく、2.0太陽質量程度である。これはNS内部での核物質の状態方程式にとって、新しい知見である。(3) LS 5039では、超磁場における粒子加速の結果、強いMeV帯のガンマ線が生成されることがわかった。(4) 孤立マグネターの内部には、さらに強いトロイダル磁場が普遍的に潜むことを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：This research aimed at discovering, in binary systems, neutron stars (NS) that have ultra-strong magnetic fields comparable to those of magnetars. The objective has been fulfilled by the following results. (1) We confirmed that the NS in the binary X-ray pulsar system X Persei has a strong dipole field exceeding $1e14$ Gauss. (2) We discovered that the MeV-brightest gamma-ray source LS 5039 contains an NS as its compact component, and the NS has as strong dipole magnetic fields as isolated magnetars. (3) We successfully reinforced the view that isolated magnetars harbor, in their interior, still stronger toroidal magnetic fields reaching $1e16$ Gauss. (4) The NSs in X Persei and LS 5039 are both likely to have a mass of about 2.0 Solar masses, which is possibly higher than those of typical NSs.

研究分野：X線宇宙物理学

キーワード：マグネター 中性子星 強磁場 連星系 宇宙X線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

強磁場は中性子星(NS)の特徴の一つであり、通常のパルサーの場合、双極子磁場の強さは $B_p=10^{12}$ G である。マグネターと呼ばれる約 30 個の孤立 NS は、さらに強い $B_p=10^{14-15}$ G という超強磁場(USMF)をもち、磁気エネルギーで駆動される。しかし NS のうちマグネターがなぜ USMF をもつか、通常のパルサーの磁場とマグネターの USMF は同一の機構で生成・保持されるのか、マグネターの誕生機構は他の NS のものと違うのかなどの問いは、未解決のままだった。

2. 研究の目的

本研究では上記の問いに迫るべく、USMF をもつ NS を連星中に探査することを目的とする。これにより、既知のマグネターはすべて孤立天体だが、(ア) 連星中の NS でマグネター並みの USMF をもつものは存在するのか否かを明らかにし、(イ) 通常パルサーからマグネターまで磁場強度は連続的に分布するかどうかの見通しを得る。また USMF をもつ NS が連星中に見出された場合は連星環境を利用し、(ウ) マグネターの質量は通常 NS の質量である $\sim 1.4 M$ (M は太陽質量)と同程度かどうかを探る。

3. 研究の方法

すでに予備的な研究で、連星中の NS (ないし NS 候補) のうち、USMF をもつ可能性のあるものが数天体ほど、候補として浮上していた。そこで本研究では、X線衛星「すざく」や NuSTAR (米国) のアーカイブデータを用い、また稼働中の全天 X 線監視装置 MAXI を利用することで、これら候補天体の磁場強度を探ることとした。これで質・量ともに十分なデータが確保できる見通しが得られたため、稼働中の NuSTAR 衛星などへの新規の観測提案は行わなかった。研究の遂行に際しては、東京大学と理化学研究所の連携協力者などの協力を得た。

本課題は4年間の課題として出発したが、3年間で終了し、発展的に基盤研究(C)「中性子星の内部に潜む磁場の観測的推定」(2021~2023年度、21K03624)に引き継がれた。その理由は、研究目的が3年間で達成される見通しが得られたこと、研究の過程でNSのもつ B_p に加え内部トロイダル磁場 B_t を考える必要があると気づいたこと、そして B_t を推定する手掛かりとなる硬 X 線パルスの位相変調現象に、強いエネルギー依存性が発見され、その探求が必要となったことによる。

4. 研究成果

[1] 予備研究で筆頭候補となっていた、840 秒の長いパルス周期をもつ連星 X 線パルサー X Persei の、パルス周期 P と X 線光度 L_x を、おもに MAXI のデータを用いて 11 年にわたり追跡し、 P の時間変化率が L_x と良く相関することを見出した。この相関は B_p に関する情報を含んでいる。なぜなら L_x (よって質量降着率) が同じでも B_p が大なほど、降着物質は NS から遠方で磁場に堰止められ、 P がそこでの降着物質の長いケプラー周期と一致した時にトルク平衡が達成されるからである。この相関を定量的に説明する Ghosh & Lamb (1979) の古典的降着トルク理論を、観測データと比較した結果、 $B_p = (0.4-2.5) \times 10^{14}$ G と USMF が示唆された。

[2] 第2の候補天体は、全天で最も明るい MeV ガンマ線を放射する、代表的なガンマ線連星 LS

5039である。「すざく」と *NuSTAR* で得られた LS 5039 の硬 X 線データで周期探査を行った結果、前者では周期 8.95645 秒、後者では 9.05381 秒にパルスが検出された。従来この系のコンパクト天体が NS かブラックホールか論争が続いていたが、NS であることが判明し、論争に終止符を打つことができた。約 9 秒というパルス周期は、マグネターの自転周期として典型的である。さらに質量降着の兆候は無く、 P と dP/dt から回転駆動でもないことから、この NS はマグネター級の USMF をもち、その磁気エネルギーが、TeV に達するガンマ線放射を駆動していることがわかった。主星からの星風がマグネターの強磁場に衝突する際、NS の磁気エネルギーで電子が加速されていると考えられ、宇宙での粒子加速の新形態が発見されたことになる。

[3] X-Persei と LS 5039 という 2 例ではあるが、マグネター級の USMF をもつ NS が連星中に存在することを観測的に立証し、目的(ア)に肯定的に答えることができた。とくに X Persei では、長いパルス周期と低い X 線光度という特徴が、ともに USMF の結果として説明された。ここから類推すると、X Persei と同様に低光度と長いパルス周期をもつ一群の X 線連星パルサーたち、すなわち 4U 0114+65 ($P=2.6$ 時間)、4U 2206+54 ($P=1.5$ 時間)、4U 1954+32 ($P=5.4$ 時間)なども同様に、 10^{12} G より強い磁場をもつ可能性が高い。これらの天体が、より通常な連星 X 線パルサーと画然と異なるとは考えにくいので、磁場強度は通常パルサーの 10^{12} G からマグネターの 10^{14-15} G まで、途切れず連続的に分布する可能性が高い。これが目的(イ)に対する答である。

[4] 目的(ウ)に挑戦するため、X Persei では降着理論モデルに含まれる NS の質量 M を振った結果、 $M=1.86-2.20 M_{\odot}$ であればデータが良く再現できることがわかった。これは M が大なほど、NS の慣性率が増え、同じ降着トルクでも $|dP/dt|$ が小さくなるからである。他方 LS 5039 では 9 秒パルスの軌道ドップラー効果と光学観測による主星の動きを組み合わせる通常の手法で、 $M=1.23-2.35 M_{\odot}$ という制限が得られた。X Persei の M は標準的な NS 質量である $M=1.4 \pm 0.3 M_{\odot}$ を越えており、LS 5039 では標準値と矛盾はしないが、やはり大きめの M が示唆される。これらは従来まったく手が出なかった、マグネター(および類似天体)の質量を推定した貴重な結果である。得られた質量が標準値より大ききなことから、USMF が核物質の状態方程式を変え、その影響が NS の質量-半径関係に現れている可能性がある。これは NS の磁場の起源にとっても、原子核物理学にとっても、重要な示唆を含む。

[5] 本課題の提案以前に「すざく」の観測により、2 つのマグネター 4U 0142+61 および 1E 1547-5084 において、硬 X 線成分のパルスが、自転周期の約 1 万倍の長周期で位相変調されている現象が発見された。これは星内部に $B_{\text{r}} \sim 10^{16}$ G に達する超強トロイダル磁場が内在し、その磁気応力により星がわずかに軸対称に変形した結果、自由歳差運動が発生し、自転周期と歳差周期との微小 ($\sim 10^{-4}$) な差が長周期のビートを生み、それがパルスの位相変調として観測されたと解釈できる。本研究では *NuSTAR* 衛星の公開データを用い、これらの結果を追認するとともに、3 つ目のマグネター SGR 1900+14 からは「すざく」と *NuSTAR* で、同様な現象を検出することに成功した。さらに 1E 1547-5408 と SGR 1900+14 ではパルス位相変調のパラメータが、エネルギーに強く依存することを発見した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Makishima K., Enoto T., Yoneda H., Odaka H.	4. 巻 502
2. 論文標題 A NuSTAR confirmation of the 36 ks hard X-ray pulse-phase modulation in the magnetar 1E 1547.0-5408	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2266, 2284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab149	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 Yoneda, H., Makishima, K., Enoto, T., Khangulyan, D., Matsumoto, T., and Takahashi, T.	4. 巻 125
2. 論文標題 Sign of Hard-X-Ray Pulsation from the -Ray Binary System LS 5039	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 id.111103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.111103	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 Sugizaki, M., Oeda, M., Kawai, N., Mihara, T., Makishima, K., and Nakajima, M.	4. 巻 896
2. 論文標題 X-Ray Emission Evolution of the Galactic Ultraluminous X-Ray Pulsar Swift J0243.6+6124 during the 2017-2018 Outburst Observed by the MAXI GSC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab93c7	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 Makishima, K., Murakami, H., Enoto, T., and Nakazawa, K.	4. 巻 71
2. 論文標題 A NuSTAR study of the 55 ks hard X-ray pulse-phase modulation in the magnetar 4U 0142+61	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 ID 15, 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy129	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 Makishima, K.	4. 巻 2319
2. 論文標題 Observations of Magnetic Deformation of Magnetars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 14th Asia Pacific Physics Conference, AIP publisher	6. 最初と最後の頁 6 pp, ID040003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0036975	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 Yatabe, F., Makishima, K., Mihara, T., Nakajima, M., Sugizaki, M., Kitamoto, S., Yoshida, Y., & Takagi, T.	4. 巻 70
2. 論文標題 An application of the Ghosh & Lamb model to the accretion-powered X-ray pulsar X-Persei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.89, 11 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy088	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10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 牧島一夫, 榎戸輝揚, 米田浩基, 小高裕和
2. 発表標題 マグネター 1E 1547.0-5408 のパルス位相変調における強いエネルギー依存性
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会 (オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makishima, K., Tamagawa, T., and Enoto, T.
2. 発表標題 New Clues to the Hard X-ray Emission from Magnetars and Prospects for Their X-ray Polarimetric Observations
3. 学会等名 The 43rd COSPAR Scientific Assembly (Online), Session E1.7 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧島一夫, 米田浩基, 榎戸輝揚, Dmitry Khangulyan, 高橋忠幸, 松元崇弘
2. 発表標題 ガンマ線連星 LS 5039 の9秒パルスの検証とマグネター仮説
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 牧島一夫、會澤優輝、丹波翼、榎戸輝揚
2. 発表標題 マグネターSGR 1900+14 における硬X線パルスの位相変調の発見
3. 学会等名 日本天文学会 2019年秋の年会 (熊本大学)、W30a
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makishima, K.
2. 発表標題 Observations of Magnetic Deformation of Magnetars
3. 学会等名 14th Asia Pacific Physics Conference, Kuching, Malaysia (Nov. 18, 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧島一夫
2. 発表標題 マグネター1E 1547.0-5408における陽子サイクロトロン共鳴の徴候
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理連絡会、春の研究会 (2020年3月3日、オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sugizaki, M., Mihara, T., Nakajima, M., Makishima, K., Takagi, T., & Yatabe, F.
2. 発表標題 Observational tests of accretion-driven spin-up/down process in X-ray binary pulsars with 7-year MAXI and Fermi/GBM data
3. 学会等名 42nd COSPAR Scientific Assembly, 14-22 July 2018, Pasadena, California, id. E1.10-3-18. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 牧島一夫, 丹波翼, 榎戸輝揚
2. 発表標題 マグネター硬X線パルスの周期的な位相変調：三例目SGR1900+14からの発見
3. 学会等名 日本物理学会2019年春の年会、九州大学、16pK403
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米田浩基, 牧島一夫, 松元崇弘, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 馬場彩, 高橋忠幸
2. 発表標題 X線衛星「すざく」とNuSTAR衛星を用いた、ガンマ線連星LS5039からのパルス探索
3. 学会等名 日本天文学会2019年春の年会、法政大学、W04a
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷田部史堯, 牧島一夫, 三原建弘, 杉崎睦, 高木利紘, 中島基樹
2. 発表標題 Ghosh & Lamb 降着トルクモデルのX線連星パルサーX Perseiへの適用
3. 学会等名 日本天文学会2018年春の年会、千葉大学、W120a
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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0件

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
---------	---------