

平成30年6月18日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05117

研究課題名(和文) マグネターの超強磁場におけるX線放射機構の研究

研究課題名(英文) Studies of X-ray Emission Mechanisms in High Magnetic Fields using Magnetars

研究代表者

中川 友進 (NAKAGAWA, Yujin)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球情報基盤センター・特任技術副主幹

研究者番号：50513454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁場強度が $\sim 10^{14}$ Gにも達する中性子星であるマグネターは、定常的にX線を放射し、ときおり強烈にX線を放出するバーストを起こす。私は「すざく」衛星が観測したマグネターの光度曲線のRMS Variationは、ポアソン分布から推定される値よりも有意に大きな値を持つことを示した。本研究では、マグネターの回転に伴い、RMS Variationが変化することを示した。また、数学的なモデルでRMS Variationを説明できることを示した。さらに、主要な理論モデルと比較して、定常放射とバーストの両方を説明する物理モデルである「マイクロバーストモデル」を構築した。

研究成果の概要(英文)：Magnetars, which are highly magnetized neutron stars with field strengths of $\sim 10^{14}$ G, show persistent X-ray emission as well as sporadic bursts. I found that the RMS variations for magnetars observed by Suzaku are significantly greater than the values expected from the Poisson distribution. In this study, I found that the RMS variations vary according to rotations of the magnetars. In addition, the RMS variations are well explained by a mathematical model. I proposed a unified view ("Micro-Burst Model") of both the persistent X-ray emission and the burst emission from magnetars, based on these results and theoretical models.

研究分野：天文学

キーワード：マグネター 超強磁場中性子星 パルサー

1. 研究開始当初の背景

宇宙には表面磁場が $\sim 10^{14}$ G の中性子星「マグネター」の存在が提案されている (Duncan & Thompson 1992, ApJ, 392, L9)。回転周期 (2~12 秒) に伴い明るさが変化する点ではパルサー ($\sim 10^{12}$ G の中性子星) と似ているが、磁気エネルギーの解放により X 線で輝くという明確に異なる性質がある。量子臨界磁場を超える $> 4.4 \times 10^{13}$ G の極限環境では、電子のサイクロトロン半径が古典電子半径程度になり、量子電磁力学の非摂動効果が重要となる。そのためマグネターは磁場と光子の相互作用などの重要課題を研究できる唯一の「宇宙の超強磁場実験場」と言える。

X 線で輝くマグネター ($\sim 2 \times 10^{-11}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$) は現象論的にはっきりと定義され、軟ガンマ線リピータ (Soft Gamma Repeater; SGR、9 天体)、異常な X 線パルサー (Anomalous X-ray Pulsar; AXP、12 天体) に分類される。両者には多くの共通点があるため同種族であるという認識が深まりつつある。これらの天体は、静穏期では一定光度の X 線放射を示すが、活動期では増光を示し、さらに SGR や一部の AXP は数十ミリ秒の間に強烈に X 線を放出するバーストを繰り返し起こす。

私はこれまで SGR や AXP の X 線観測を専門としてきた。その過程で、日本の X 線天文衛星「すざく」、日本・アメリカ・フランスの国際協力による突発天体探査衛星「HETE-2」を中心とした研究を行ってきた。その結果、HETE-2 衛星と「すざく」衛星で観測した 3 天体のバーストは基本的に二温度黒体放射で近似でき、一部のバーストに定常放射にのみ報告されていた硬 X 線成分を初めて発見し、定常放射と同じ二成分で説明できる事を示した。また、バースト・定常放射によらずスペクトルは二温度黒体放射 + 硬 X 線成分という良く似た形状を持つ事を明らかにした。そこでバーストも定常放射も含め二温度黒体放射の温度を比較したところ、二温度が相関する事を発見した。さらに、二温度黒体放射の光度、硬 X 線成分の光度を比較し、両成分の間に 5 桁以上の相関関係を発見した。

これらの結果は、バースト放射と定常放射が基本的に同じ機構 (例えば突発的な磁気エネルギーの解放) で生成される事を示し、太陽フレアとの類推から得た「定常放射はマイクロバーストの重ね合わせ」とする私の仮説 (以後、「マイクロバースト仮説」と呼称する) を強力に支持する。

私の仮説が正しければ、定常放射は様々なサイズの微小バーストで構成されており、光度曲線の強度揺らぎはポアソン分布から推定される値よりも大きくなるはずである。そこで、「すざく」衛星が観測したマグネター (11 天体・21 観測) の解析を行い、RMS Variation により定量的に強度揺らぎを調べた。RMS Variation (R) の定義を以下に示す。

$$R = \frac{\left[\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_i (x_i - \bar{x})^2 - \sum_i \delta_{x_i}^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{x}}$$

ここで、 x_i は光度曲線の 1 ビンあたりの光子数、 \bar{x} は光子数の平均値、 δ_{x_i} は x_i の誤差、 N はビン数である。解析の結果、0.2-12 keV では 11 天体・21 観測について $R=1.3-18.8\%$ となり、10-70 keV では 5 天体・8 観測について $R=17-99\%$ となり、RMS Variation はポアソン分布から推定される値より有意に大きい事を発見した。さらに 0.2-12 keV (二温度黒体放射) より 10-70 keV (硬 X 線成分) での RMS Variation が有意に大きいというエネルギー依存性を発見した。これは私の仮説を支持する結果である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、日本が誇る Astro-H 衛星や MAXI などによる X 線観測に立脚し、真にマグネターが強磁場を持ち、磁気エネルギーの解放により X 線で輝くというモデルを確立する事である。目的達成のため、太陽フレアとの類推から私が独自に提唱した「マイクロバースト仮説」の証明を行う。マグネターは極限磁場での放射輸送を検証可能な唯一の天体であり、本研究の成功は天体物理学や原子核物理学などへ影響を与える革新的な成果となる。

3. 研究の方法

バースト放射と定常放射が同じ機構 (例えば突発的な磁気エネルギーの解放) で生成される事を確立し、私が太陽フレアとの類推から提唱した「マイクロバースト仮説」の検証を行う。

RMS Variation と物理量との間に相関関係があるかを明らかにする。磁気エネルギーの解放によりマイクロバーストが発生するならば、磁場強度と相関すると考えている。また HETE-2 衛星を用いた研究成果によると、定常放射の光度が明るいほどマイクロバーストのサイズのバラつきが小さくなり、RMS Variation は小さくなると考えている。さらにマイクロバースト仮説が正しければ、RMS Variation は微小バーストの発生頻度と相関すると考えている。

回転周期の位相に伴う RMS Variation の変化を明らかにする。私のマイクロバースト仮説、および HETE-2 衛星によるバーストのサイズ分布の活動時期による違いから、回転周期に伴う光度の変化は、マイクロバーストのサイズ分布の違いによると考えている。これが正しければ RMS Variation は位相のピークほど小さくなるはずである。

本研究ではマグネターの新たな観測も重要となるので、研究期間を通して、突発天体監視網 (Inter Planetary Network) を用い

たバースト活動の監視、MAXI による定常放射の監視を行い、新たなマグネターを発見、または活動期を察知したら「すざく」衛星や Astro-H 衛星による観測を実施する。

4. 研究成果

RMS Variation と物理量(回転周期、磁場強度、光度、二温度黒体放射の温度、硬 X 線成分の冪)を比較したところ、有意な相関は見られなかった。

マイクロバースト仮説に基づくと、マグネターの自転に伴う光度の変化は、マイクロバーストのサイズ分布の違いによるものである。「すざく」衛星のデータを用いて、回転周期の位相の変化に伴う RMS Variation の変化を調べた。その結果、Pulse Profile の山では RMS Variation が小さくなり、Pulse Profile の谷では RMS Variation が大きくなることを示した。マイクロバーストのサイズが累積分布関数 ($N=KS$ 、 N : マイクロバーストの累積個数、 K : Normalization、 S : マイクロバーストのフルーエンス、 α : 冪)に従うとすると、Pulse Profile の山では α が大きくなることにより RMS Variation が小さくなり、Pulse Profile の谷では α が小さくなることにより RMS Variation が大きくなることを示した。

統計学に基づき、RMS Variation を再現する数学的なモデルを構築した。数学的なモデルに基づく RMS Variation (R_M) は以下の式で表せる。

$$R_M = (\sigma_c^2 - \sigma_p^2)^{\frac{1}{2}} S_a^{-1}$$

ここで、 σ_c^2 は定常放射がマイクロバーストで構成される場合の累積分布関数の分散、 σ_p^2 は定常放射がポアソン分布に従う場合の分散、 S_a はマイクロバーストの平均フルーエンスである。 σ_c^2 は以下の式で表せる。

$$\begin{aligned} \sigma_c^2 &= E[S_c^2] - (E[S_c])^2 \\ &= \int_{S_1}^{S_2} S_c^2 P(S_c) dS_c - \left\{ \int_{S_1}^{S_2} S_c P(S_c) dS_c \right\}^2 \\ &= -\alpha A_c f_m^{-1} \int_{S_1}^{S_2} S_c^{\alpha+1} dS_c - \left\{ \alpha A_c f_m^{-1} \int_{S_1}^{S_2} S_c^{\alpha} dS_c \right\}^2 \\ &= \begin{cases} \frac{\alpha}{\alpha+2} A_c f_m^{-1} (S_1^{\alpha+2} - S_2^{\alpha+2}) - \left\{ \frac{\alpha}{\alpha+1} A_c f_m^{-1} (S_1^{\alpha+1} - S_2^{\alpha+1}) \right\}^2 & (\alpha \neq -1 \wedge 0 > \alpha > -2) \\ A_c f_m^{-1} (S_1 - S_2) - \{ A_c f_m^{-1} (\log |S_1| - \log |S_2|) \}^2 & (\alpha = -1) \end{cases} \end{aligned}$$

ここで、 A_c は累積分布関数の Normalization、 α は累積分布関数の冪、 S_c はマイクロバーストのフルーエンス、 $E[S_c^2]$ は S_c^2 の期待値、 $E[S_c]$ は S_c の期待値、 $P(S_c)$ は累積分布関数の密度関数、 S_1 と S_2 ($S_1 < S_2$) は累積分布関数の密度関数を満たす S_c の範囲の最小値と最大値、 $f_m = -A_c(S_2 - S_1)$ はフルーエンスが S_1 から S_2 の間にあるマイクロバーストの発生頻度である。また、 σ_p^2 は以下の式で表せる。

$$\sigma_p^2 = \lambda^{-1} S_a^2$$

ここで、 λ は光度曲線の 1 ピンあたりのカウント数である。 $\lambda = 1.1$ 、 $A_c = 7 \times 10^{-9}$ bursts day⁻¹、 $S_1 = 10^{-14}$ erg cm⁻²、 $S_2 = 10^{-11}$ erg cm⁻²、 $\lambda = 12.2$ counts (2s)⁻¹、 $S_a = 7.54 \times 10^{-13}$ erg cm⁻² とし、数学的なモデルから RMS Variation を計算すると、 $R_M = 14\%$ となった。これは、観測から得られた $R = 1.3\% - 18.8\%$ (0.2-12 keV) と一致する。したがって、数学的なモデルで観測から得られた RMS Variation を説明できることを明らかにした。また、マグネターによる R の違いは、マイクロバーストの累積分布関数の冪 (α) の違いで説明できることを示した (図 1)。

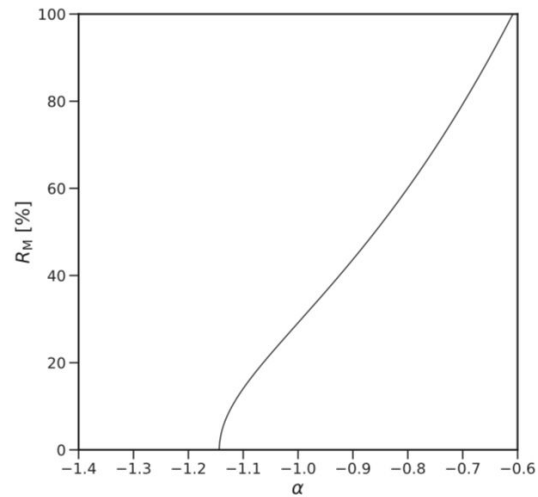


図 1. α と R_M の関係。

マイクロバーストの累積分布関数からフラックスを計算したところ、 $\sim 1.1 \times 10^{-11}$ erg cm⁻² s⁻¹ となった。この値は、SGR 1806-20 の定常放射のフラックスである $\sim 9.9 \times 10^{-12}$ erg cm⁻² s⁻¹ と同程度である。この結果は、過去の研究 (Nakagawa et al. 2011, PASJ, 63, S813; Enoto et al. 2012, MNRAS, 427, 2824) と一致する。

マイクロバースト仮説に基づき、研究成果と主要な理論モデルを比較して、バーストと定常放射の両方を説明する物理モデルである「マイクロバーストモデル」を構築した。マイクロバーストモデルに基づくと、最初に星震 (Duncan & Thompson 1992, ApJ, 392, L9) により、マグネターから離れる方向に運動量を持った電子・陽電子プラズマのファイアーボールが生成される。このファイアーボールは磁気圏を通り、 $\sim 100 R_{NS}$ ($R_{NS} = 10$ km は典型的な中性子星の半径) において黒体放射を示す (Heyl & Hernquist 2005, MNRAS, 362, 777)。超強磁場における 2 つの異なる偏光モードにより、二温度黒体放射として観測される (Thompson & Duncan 1995)。その後、ファイアーボールは光学的に薄くなり、 $\sim 1000 R_{NS}$ においてシンクロトロン放射 (硬 X 線成分)

を示す (Heyl & Hernquist 2005, MNRAS, 362, 777)。マグネターから離れる方向へ向かって磁気擾乱が大きくなることにより、二温度黒体放射より硬 X 線成分の RMS Variation の方が大きくなると考えている。

RMS Variation の数学的なモデル、およびマイクロバーストモデルを中心とした研究成果について、Publications of the Astronomical Society of Japan 誌へ査読付き学術論文として出版した。

新たに発見されたマグネター、および活動期を示したマグネターについて、「ひとみ」衛星 (Astro-H 衛星) による観測を行う計画であったが、事故により運用が停止したために、観測を行うことが出来なかった。また、「すざく」衛星も運用を停止したため、観測を行うことが出来なかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Nakagawa Yujin, Ebisawa Ken, Enoto Teruaki, Energy-dependent intensity variation of the persistent X-ray emission of magnetars observed with Suzaku, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70 (2), 2018, 32 (1-10), DOI: 10.1093/pasj/psy013

Nakagawa Yujin E., Ebisawa Ken, Energy Dependent Intensity Variations of Persistent X-ray Emission of Magnetars, Proceedings of Science, 査読有, Pos(SWIFT10), 2016, 150-154, <https://pos.sissa.it/233/150/pdf>

〔学会発表〕(計 2 件)

中川友進、「すざく」衛星によるマグネターの X 線定常放射の強度揺らぎの研究、中性子星の観測と理論: 研究活性化ワークショップ、2015 年

中川友進、海老沢研、「すざく」衛星によるマグネターの X 線定常放射のエネルギー依存性のある強度揺らぎの研究 (2)、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 友進 (NAKAGAWA, Yujin)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球情報基盤センター・特任技術副主幹

研究者番号: 5 0 5 1 3 4 5 4