

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540309

研究課題名(和文) マグネターの観測に立脚した超強磁場でのX線放射の研究

研究課題名(英文) Studies of X-ray Emissions in High Magnetic Fields based on Magnetar Observations

研究代表者

中川 友進 (Nakagawa, Yujin)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50513454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000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、ときおり間欠泉のように強烈にX線を放出するバーストを起こす。私が太陽フレアとの類推から提唱した「定常放射は微小バーストの重ね合わせ」とする仮説が正しければ、定常放射は大小さまざまなサイズの微小バーストで構成されており、定常放射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いと考えられる。そこで、「すざく」衛星が観測した11天体・21観測のマグネターの光度曲線について、RMS Variationを用いて強度揺らぎを定量的に評価した。その結果、ポアソン分布から推定される値よりも有意に大きい値となった。

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 have been proposing a model that the persistent emission consists of numerous micro bursts of various sizes. In our model, intensity variations of the persistent emission should be larger than the values expected from the Poisson distribution. I thus quantitatively calculated intensity RMS variations for 11 magnetars (21 observations) observed by the Suzaku satellite. As a result, the RMS variations are significantly greater than the values expected from the Poisson distribution.

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、回転駆動型パルサーや降着駆動型パルサーとは明確に異なる性質がある。それは磁気エネルギーの解放により X 線で輝くという点である。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物理学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。

定常的に 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ー (Soft Gamma Repeater; SGR, 7 天体)、異常な X 線パルサー (Anomalous X-ray Pulsar; AXP, 10 天体) が知られている。両者には多くの共通点があり、同種族という認識が深まりつつある。普段は一定光度の X 線放射を示すが (静穏期)、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「High Energy Transient Explorer 2 (HETE-2)」を中心とした SGR や AXP の X 線観測に基づく研究を行ってきた。その結果、バースト・定常放射によらずエネルギースペクトルは、二温度黒体放射+硬 X 線成分という良く似た形状を持つことを発見した。さらにバーストと定常放射によらず、二温度黒体放射の光度、硬 X 線成分の光度が 5 桁以上にわたり、相関することを明らかにした。これは、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ており、太陽フレアとの類推から得た「定常放射は微小バーストの重ね合わせ」とする私の仮説を強力に支持する。一方、明るいバースト (二温度黒体放射の光度が $\sim 10^{42}$ erg s⁻¹) では硬 X 線成分が頭打ちになっているように見える。これは、基本的には硬 X 線成分と二温度黒体放射は足並みを揃えて大きくなるが、明るいバーストでは硬 X 線成分よりも二温度黒体放射が卓越する機構が存在することを示唆している。

2. 研究の目的

本研究は、日本が誇る「すざく」衛星や国際宇宙ステーションに搭載されている全天 X 線監視装置 (Monitor of All-sky X-ray Image; MAXI) などを用いた X 線観測に立脚し、太陽フレアとの類推から私が独自に提唱した「定常放射は微小バーストの重ね合わせ」とする仮説の証明を目的とする。これにより、マグネターの特異な性質を超強磁場物

理により解釈し、磁気エネルギーの解放により X 線で輝く可能性を強固に出来ると考えている。マグネターは極限磁場における放射輸送の検証が可能な唯一の天体であり、本研究の成功は、天体物理学だけでなく、原子核物理学や宇宙線物理学へ大きな影響を与える革新的な成果となる。

3. 研究の方法

現象論的な手法により、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「定常放射は微小バーストの重ね合わせ」とする仮説の検証を行う。

空白地帯が多い光度相関の精密化を行う。「すざく」衛星のデータアーカイブにある活動期・静穏期の観測データなどを解析し、光度相関がバーストと定常放射で途切れなく繋がるか、明るいバーストでは硬 X 線成分の光度が $\sim 2 \times 10^{39}$ erg s⁻¹ で頭打ちになるか、を明らかにする。また、暗いバーストのフルエンス S と頻度 N の関係を求め、S = 0 へ外挿した時に、微小バーストの放出エネルギーで定常放射を説明できるかを検証する。さらに、定常放射の光度曲線の強度ゆらぎを調べる。

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」衛星による観測を実施する。

4. 研究成果

「すざく」衛星のデータアーカイブで公開されているマグネターを解析し、光度相関をアップデートした。また、暗いバーストのフルエンス S と頻度 N の関係を求め、S = 0 へ外挿した時の微小バーストの放出エネルギーを見積った。

私が提唱しているマグネターの「微小バースト仮説」が正しければ、X 線定常放射は大小さまざまなサイズの微小バーストで構成されており、X 線定常放射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いと考えられる。そこで、「すざく」衛星のデータアーカイブで公開されている 11 天体・21 観測 (表 1 に示す) のマグネターの光度曲線 (0.2-12 keV、10-70 keV) について、RMS Variation (R_v) を用いて強度揺らぎを定量的に評価した。

$$R_v = \frac{\left[\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_i (x_i - \bar{x})^2 - \sum dx_i^2 \right\} \right]^{1/2}}{\bar{x}}$$

ここで、 x_i は光度曲線の1ピンあたりの光子数、 \bar{x} は光子数の平均値、 $d x_i$ は x_i の誤差、 N はピン数である。正味の観測時間は 11-107 ks であり、光度曲線の時間ピンは 8 s (0.2-12 keV) と 128 s (10-70 keV) である。光度曲線からは5以上のバーストを除去した。RMS Variation の評価について、マグネターの回転や活動状態による光度変化が影響しないこと、バックグラウンドの強度揺らぎは無視出来ることを確認した。

RMS Variation を評価した結果(それぞれの観測の RMS Variation を表1に示す)ポアソン分布から推定される値よりも、0.2-12 keV では11天体(1.3-18.8%)、10-70 keV では5天体(16-99%)が有意に大きい値となった。さらに、5天体についてはエネルギーが高くなるほど、RMS Variation が大きくなる、エネルギー依存性を見出した。エネルギーがある値(概ね3-6 keV)より高くなると、RMS Variation が急激に大きくなる傾向が見られた。このエネルギーは、二温度黒体放射と硬X線成分のエネルギースペクトルが交差するエネルギーであり、硬X線成分が二温度黒体放射より激しく変動する可能性を見出した。

表1 本研究に用いた「すざく」衛星で観測したSGRとAXPの一覧、および各々の観測におけるRMS Variationを示す。誤差は68%の有意性である。

天体名	R_v [%] (2-10 keV)	R_h [%] (10-70 keV)
AXP 1E 1547.0-5408	8.4+/-0.6	20+/-12
	15.6+/-0.3	28+/-3
AXP 1E 2259+586	4.1+/-0.1	-
AXP 1RXS J170849.0-400910	7.85+/-0.07	23+/-16
	9.25+/-0.06	<36
AXP 4U 0142+614	2.0+/-0.1	<40
	1.3+/-0.3	33+/-20
	1.8+/-0.3	<42
SGR 0501+4516	9.2+/-1.1	50+/-6
	7.2+/-2.5	99+/-86
	7.37+/-0.07	-
SGR 1806-20	6.5+/-0.8	17+/-13
	4.2+/-0.5	<55
	16.4+/-0.4	-
	6.4+/-4.8	31+/-19
SGR 1833-0832	18.8+/-1.1	-
SGR 1900+14	6.8+/-2.7	-
	9.6+/-3.5	-
Swift J1822.3-1606	6.0+/-0.3	-
CXOU J164710.2-455216	3.3+/-0.7	X
AXP 1E 1048.1-5937	3.2+/-0.9	-

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 6 件)

Yasuda Tetsuya, Iwakiri Wataru B., Tashiro Makoto S., Terada Yukikatsu, Kouzu Tomomi, Enoto Teruaki, Nakagawa Yujin E., Bamba Aya, Urata Yuji, Yamaoka Kazutaka, Ohno Masanori, Shibata Sinpei, Makishima Kazuo, The Suzaku-WAM team, Sub-MeV Band Observation of a Hard Burst from AXP 1E 1547.0-5408 with the Suzaku Wide-band All-sky Monitor, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、Vol.00、2015、00(1-12)、DOI:10.1093/pasj/psv011
Nakagawa Yujin E., Ebisawa Ken, Suzaku Discovery of Energy Dependent Intensity Variations in Persistent X-ray Emission of Magnetars, Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda, 査読無、2014、p190-191、http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/SuzakuMAXI2014/pdf/2014SM_conf_P190-P191.pdf
Nakagawa Y. E., Makishima K., Enoto T., Sakamoto T., Mihara T., Sugizaki M., Yamaoka K., Hurley K., Yoshida A., Gandhi P., Tashiro M., Morii M., Wide-band spectra of magnetar burst and persistent emission, Memorie della Societa Astronomica Italiana, 査読無、v.84、2013、p.560-p.563、<http://sait.oat.ts.astro.it/MmSAI/84/PDF/560.pdf>
Ohno M., Hanabata Y., Kawano T., Takaki K., Nakamura R., Tanaka Y., Fukazawa Y., Ueno H., Tashiro M., Terada Y., Iwakiri W., Yasuda T., Asahina M., Kobayashi S., Sakamoto A., Ishida Y., Sugimoto S., Akiyama M., Ohmori N., Yamauchi M., Nakagawa Y. E., Sugita S., Yamaoka K., Kokubun M., Takahashi T., Urata Y., Tssai P., Nakazawa K., Makishima K., the Suzaku-WAM team, All-sky observations by Suzaku wide-band all-sky monitor, Memorie della Societa Astronomica Italiana, 査読無、v.84、2013、p.735-p.736、<http://sait.oat.ts.astro.it/MmSAI/84/PDF/735.pdf>
Enoto T., Makishima K., Shibata S.,

Nakagawa Y., Sakamoto T., Suzaku View of Recent Magnetar and Magnetar-related Objects, The Fast and the Furious: Energetic Phenomena in Isolated Neutron Stars, Pulsar Wind Nebulae and Supernova Remnants, held 22-24 May, 2013 in Madrid, Spain, 査読無、2013、id.54、http://xmm.esac.esa.int/external/xmm_science/workshops/2013_science/presentations/TEnoto_p.pdf
T. Enoto, Y. E. Nakagawa, T. Sakamoto and K. Makishima, Spectral comparison of weak short bursts to the persistent X-rays from the magnetar 1E 1547.0-5408 in its 2009 outburst, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有、427, 2012, 2824-2840, DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.22086.x

〔学会発表〕(計 10 件)

Yujin E. Nakagawa, Energy Dependent Intensity Variations of Persistent X-ray Emission of Magnetars, Swift 10 Years Discovery, 2014 年 12 月、ローマ(イタリア)

中川友進、「すざく」衛星によるマグネターの X 線定常放射のエネルギー依存性のある強度揺らぎの研究、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月、山形大学(山形県・山形市)

中川友進、「すざく」衛星を用いたマグネターの X 線定常放射におけるエネルギー依存性のある強度揺らぎの研究、日本天文学会 2014 年春季年会、2014 年 3 月、国際基督教大学(東京都・三鷹市)

Yujin E. Nakagawa, Suzaku Discovery of Energy Dependent Intensity Variations in Persistent X-ray Emission of Magnetars, Suzaku-MAXI 2014, 2014 年 2 月、愛媛大学(愛媛県・松山市)

Yujin E. Nakagawa, X-ray Emission in Magnetar Short Bursts, マグネター研究交流会、2013 年 12 月、理化学研究所(埼玉県・和光市)

中川友進、「すざく」によるマグネターの X 線定常放射の強度揺らぎの研究、日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月、東北大学(宮城県・仙台市)

Yujin E. Nakagawa, Energy Dependent Intensity Variations in Persistent X-ray Emissions of Magnetars, Explosive Transients: Lighthouses of the Universe, 2013 年 9 月、サントリーニ(ギリシャ)

中川友進、「すざく」による活動期の AXP 4U 0142+614 の X 線観測、日本天文学会 2013 年春季年会、2013 年 3 月、埼玉大

学(埼玉県・さいたま市)

Yujin E. Nakagawa, Wide-Band Spectra of Magnetar Burst and Persistent Emission, X-ray Astronomy: towards the next 50 years!, 2012 年 10 月、ミラノ(イタリア)

中川友進、「すざく」衛星による活動期の AXP 4U 0142+614 の観測的研究、2012 年 9 月、大分大学(大分県・大分市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 友進 (NAKAGAWA, Yujin)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号： 5 0 5 1 3 4 5 4