

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03905

研究課題名(和文) マグネターの観測に立脚した超強磁場における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 Based on Magnetar Observations

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・研究プラットフォーム運用開発部門・特任研究員

研究者番号：50513454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：マグネターは量子臨界磁場を超える $\sim 10^{15}$  Gの超強磁場を持つ中性子星である。太陽フレアとの類推から提案した「マグネターの定常放射はマイクロバーストの重ね合わせ」とする「マイクロバーストモデル」をバーストのデータを用いて観測的に検証した。その結果、95%の有意水準でバーストは6.1 msの継続時間を持つ同一の確率過程の現象(マイクロバースト)の重ね合わせであること、ファイアーボールの速度は $v \sim 0.5c$ でありローレンツ因子が $\sim 1.1$ であることを見出した。そのため本研究により、マイクロバーストモデルが観測事実を矛盾無く説明可能であるという結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグネターのX線放射を説明するために、複数の物理モデルが提案されている。マイクロバーストモデルは広いエネルギー帯域のX線放射を説明することができる先駆的な物理モデルであり、観測事実と矛盾が無い。そのため、本研究の中核となるマイクロバーストモデルは、最も有力な物理モデルであり、マイクロバーストモデルの証明は先駆的な研究である。

研究成果の概要(英文)：Magnetars are highly magnetized neutron stars with field strengths of  $\sim 10^{15}$  G exceeding the quantum critical field. I verified the "micro-burst model" using burst data which I proposed by analogy with solar flares. The micro-burst model explains that the persistent emission of magnetars is superposition of micro-bursts. I found that the bursts are superpositions of identical stochastic processes (micro-bursts) with a duration of  $\sim 6.1$  ms at the 95% significance level. In addition, I found that the velocity and the Lorentz factor of the fireball are  $\sim 0.5c$  and  $\sim 1.1$ , respectively. In conclusion, this study shows that the "micro-burst model" can explain the observational facts without contradiction.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：超強磁場中性子星 宇宙物理学 X線天文学

1. 研究開始当初の背景

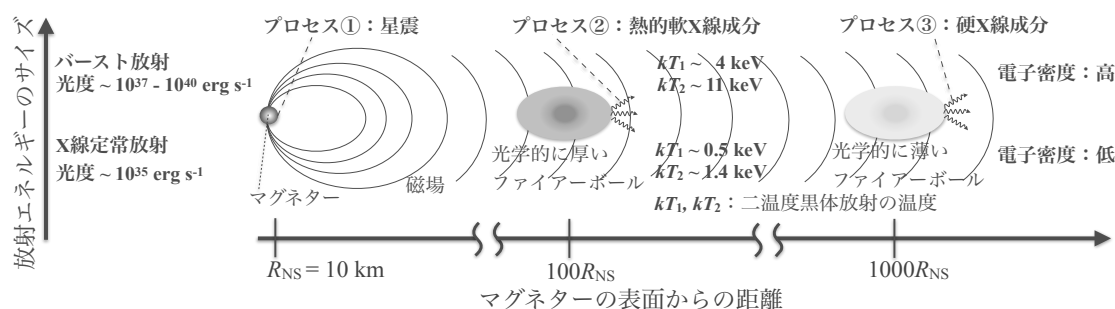
宇宙には表面磁場が $\sim 10^{15}$  G の中性子星「マグネター」の存在が提案されている [①]。回転周期 (2~12 秒) に伴い明るさが変化する点ではパルサー ( $\sim 10^{12}$  G の中性子星) と似ているが、磁気エネルギーの解放により X 線で輝くという明確に異なる性質がある。量子臨界磁場を超える  $> 4.4 \times 10^{13}$  G の極限環境では、電子のサイクロトロン半径が古典電子半径程度になり、量子電磁力学の非摂動効果が重要となる。そのためマグネターは磁場と光子の相互作用などの重要課題を研究できる唯一の「宇宙の超強磁場実験場」と言える。

X 線で輝くマグネター ( $\sim 2 \times 10^{11}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) は現象論的に明確に定義され、軟ガンマ線リピーター (Soft Gamma Repeater; SGR, 9 天体)、異常な X 線パルサー (Anomalous X-ray Pulsar; AXP, 16 天体) に分類される。両者には多くの共通点があり現在では同種族だと認識されている。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」を中心とした研究により、エネルギースペクトルは定常放射 [⑤,⑥,⑨] とバースト [③,④,⑩] によらず、二温度黒体放射で近似できる熱的軟 X 線成分と、冪が -2~0 と異常な硬 X 線成分から成る事を確立した。さらに、定常放射の強度変動がポアソン分布からの推定値より有意に大きい事を示し、強度変動の数学的なモデルを構築した [①]。そこで、理論モデルを取り込み、太陽フレアとの類推から「定常放射はマイクロバーストの重ね合わせ」とする物理モデルである「マイクロバーストモデル」(図 1) を提唱した [①,⑥]。マイクロバーストモデルでは、定常放射もバーストも同じ機構で生成されており、定常放射は多数のファイアーボール (マイクロバースト) で構成される。最初にマグネターの表面で星震 [①] が起こる。星震により、マグネターから遠ざかる方向へ運動量を持った電子・陽電子対プラズマのファイアーボールが生成される (図 1・プロセス①)。ファイアーボールは相対論的速度で磁気圏を進みながら、 $\sim 100R_{NS}$  ( $R_{NS}=10$  km は中性子星の半径) まで光学的に厚いために黒体放射を示す (図 1・プロセス②)。単温度の黒体放射が真空偏極や屈折による強い偏光を受けて [⑦]、二温度黒体放射 (熱的軟 X 線成分) として観測される。ファイアーボールが  $\sim 1000R_{NS}$  を過ぎると光学的に薄くなり、 $\sim 1000R_{NS}$  までシンクロトロン放射 (硬 X 線成分) を示す (図 1・プロセス③)。

このように観測的な研究は急進展しつつあり、マイクロバーストモデルはマグネターの広帯域エネルギースペクトルを説明できる有力な物理モデルである。本研究により「マイクロバーストモデルはあらゆる観測事実と矛盾が無いか?」という事を明らかにする。

図 1: マイクロバーストモデルの模式図。



2. 研究の目的

本研究の目的は、HETE-2 衛星、「すざく」衛星などによる X 線観測に立脚し、マグネターの特異な性質を超強磁場の物理の立場から首尾一貫して解釈する事により、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。目的達成のためマイクロバーストモデルの証明を行う。

私はこれまでの研究成果に基づき、本研究の中核となるマイクロバーストモデルを提唱した。これにより、有力な 2 種類の理論モデルのうち、1 種類 [e.g., ⑧] を棄却した。マイクロバーストモデルを証明できれば、観測的にマグネター及びその周辺環境における物理量 (磁極での表面磁場強度、星間物質の電子数密度など) を明らかにできる。マグネターは地球および近傍天体では実現できない極限磁場における、量子電磁力学に基づく放射輸送の観測的な検証が可能な唯一の天体である。そのため、本研究は、宇宙物理学だけでなく、原子核物理学 (超強磁場下での原子核の振舞) や宇宙線物理学 (超高エネルギー宇宙線の加速源) へ大きな影響を与える成果となる。

### 3. 研究の方法

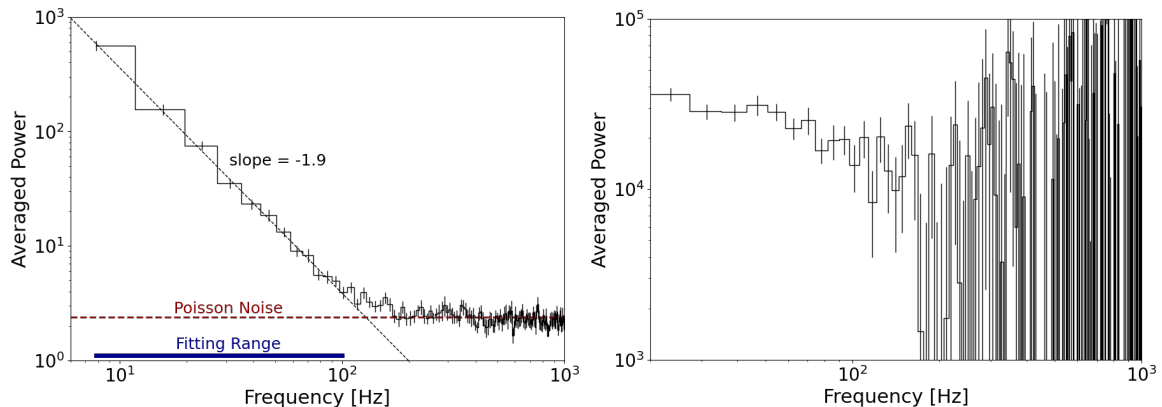
研究開始時点においてマイクロバーストモデルは観測事実と矛盾が無かった。しかし、マイクロバーストモデルから導いた下記の4つの予想(①~④)の検証が課題として残っていた。これらの課題を下記の方法により解決することで全ての観測事実を矛盾無く説明可能だと証明できるため、マイクロバーストモデルを証明できる。解析にはHETE-2衛星(50個; 1天体)で観測されたバーストのデータを用いた。

- (1) 観測から判明したバーストの数ミリ秒でのエネルギーの再注入と冷却[⑩]を説明可能な、バーストもマイクロバーストの重ね合わせという予想を検証する。バーストの時系列データをフーリエ変換して得られるPower Density Spectra (PDS)を用いて複数のバーストのパワーのばらつきが $\chi^2$ 分布(自由度2; フーリエ変換のsin成分とcos成分に起因)に従う事が分かれば、バーストは同一の確率過程(マイクロバースト)の重ね合わせだと言える[cf., ⑫]。
- (2) マイクロバーストの放射の継続時間( $\delta t$ )は数ミリ秒と予想しており[①]、 $\delta t$ を推定する。現在および近い将来の観測装置では感度不足のため、マイクロバーストの直接的な検出は難しい。そこで課題1の統計量が多いバーストのPDSを用いて $\delta t$ を推定する。PDSにおいてポアソンノイズを有意に超えるパワーがマグネターに固有の変動であり、その時の周波数 $f$ から $\delta t=1/f$ が分かる。 $\delta t$ の下限値はパワーがポアソンノイズと同程度になる時の $f_{\max}$ から計算でき、上限値はバーストの継続時間である。複数のバーストのPDSを足し合わせて、高い精度で $\delta t$ を推定する。
- (3) ファイアーボールの速度は光速( $c$ )に近いと予想しており[①]、速度 $v$ とローレンツ因子 $\gamma$ を推定する。課題2の $\delta t$ は、熱的軟X線成分が優勢であるバースト[⑩]から推定するため、熱的軟X線成分の放射時間と考えて良い。マイクロバーストモデルでは、ファイアーボールが $\sim 100R_{\text{NS}}$ に達するまでに大部分の熱的軟X線成分が放射される。そのため、 $v=100R_{\text{NS}}/\delta t'$ ( $\delta t'=\gamma\delta t$ )となり、ローレンツ因子は $\gamma=[1/\{1-(v/c)^2\}]^{1/2}$ より推定できる。
- (4) 観測から判明した明るいバーストほど硬X線成分より熱的軟X線成分が卓越する[③, ④]仕組みは、2成分の放射領域が最大で $900R_{\text{NS}}$ ほど離れていることにより、硬X線成分は熱的軟X線成分と比べて $900R_{\text{NS}}/v \sim 50$  msほど遅れることで説明可能だと予想している。実際にHETE-2衛星のバースト(熱的軟X線成分が優勢)の直後に硬いエネルギースペクトルを持つ成分を発見しており[⑩]、これは遅れて到達した硬X線成分だと考えている。そこで、HETE-2衛星のデータを用いて、熱的軟X線成分が暗くなった後も含めて解析を行う。

### 4. 研究成果

マイクロバーストモデルに基づく予想の検証のため、HETE-2衛星が観測したマグネターであるSGR 1806-20の50個のバーストの光度曲線のPower Density Spectrum (PDS)を調べた。図2において、左側の図はすべてのバーストについて積算したPDS(黒色の実線)を示しており、ポアソンノイズを赤色の破線で示している。青色の実線で示した周波数の範囲において、PDSを冪関数でフィッティングしたところ、冪の値は-1.9となった。右側の図は積算したPDSからポアソンノイズを差し引いて、 $f^{1.9}$ を乗算したPDSである。予想(1)については、95%の有意水準でバーストは $\delta t \geq 6.1$  ms(図2において $\sim 164$  Hz)の継続時間を持つことがわかった。予想(2)については、アンダーソン-ダーリング検定によりパワーのばらつきが $\chi^2$ 分布に従うか検証した。図3に周波数ごとのアンダーソン-ダーリング統計量を示している。赤色の破線を越える値は、パワーのばらつきが指数分布と異なっている確率が5%未満であることを示している。したがって、95%の有意水準で、バーストは同一の確率過程の現象(マイクロバースト)の重ね合わせであることを見出した。予想(3)については、 $\delta t$ を用いてローレンツ因子を計算した。図4にファイアーボールが大部分の熱的軟X線成分を放射するまでの移動距離 $L$ (マグネターの表面から

図2: HETE-2衛星が観測したSGR1806-20の50個のバーストについて積算したPDS(左)、ポアソンノイズを差し引いて、 $f^{1.9}$ を乗算したPDS(右)。



の距離) ことのローレンツ因子を示す。 $l=100R_s$ として、ファイアーボールの速度は  $v\sim 0.5c$  であり、ローレンツ因子が  $\gamma\sim 1.1$  であることを見出した。予想(4)については、明るいバーストでも硬 X 線成分の光度は、熱的軟 X 線成分の光度と同程度になりそうであることを見出した。そのため、本研究により、マイクロバーストモデルが観測事実を矛盾無く説明可能であるという結果が得られた。

図 3 : 周波数ごとのアンダーソン-ダーリング統計量。

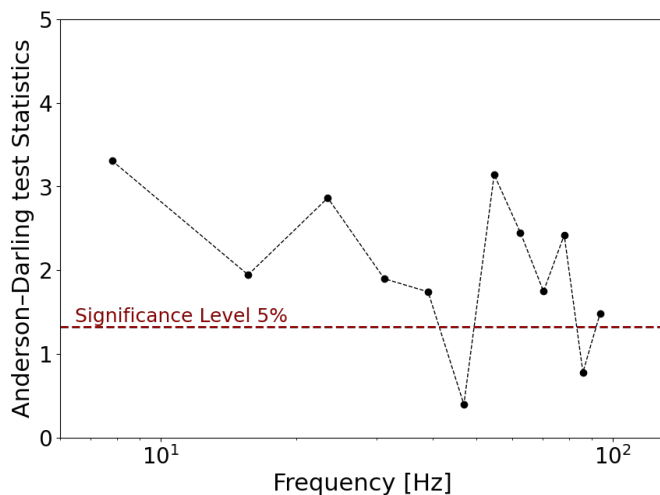
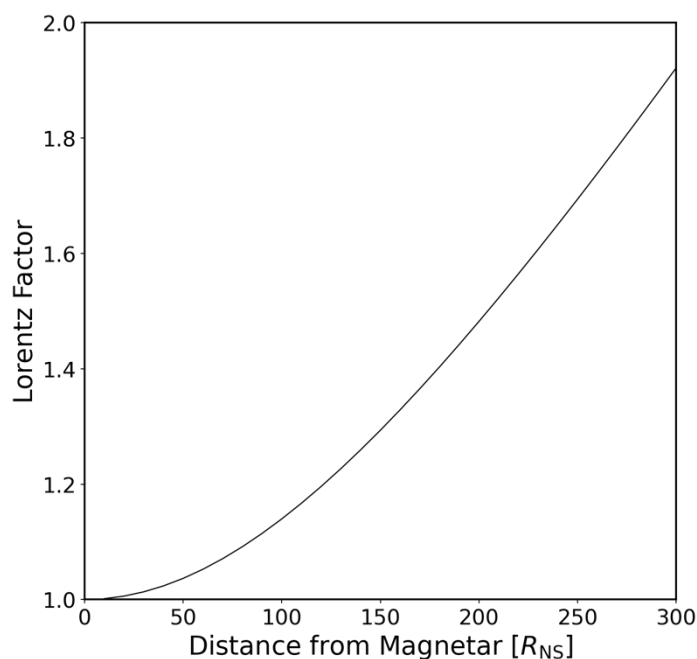


図 4 : ファイアーボールが大部分の熱的軟X線成分を放射するまでの移動距離ごとのローレンツ因子。



<引用文献>

- ① Duncan & Thompson 1992, ApJ, 392, L9
- ② Nakagawa Y., Ebisawa K., Enoto T., Energy-dependent intensity variation of the persistent X-ray emission of magnetars observed with Suzaku, PASJ, 70(2):32, 2018
- ③ Y. E. Nakagawa et al., Wide-band spectra of magnetar burst and persistent emission, MmSAI, 84:560, 2013.
- ④ Nakagawa Y. E., Makishima K., Enoto T., The Suzaku Discovery of A Hard Power-Law

- Component in the Spectra of Short Bursts from SGR 0501+4516, PASJ, 63, S813-S820, 2011
- ⑤ Enoto T., Makishima K., Rea N., Nakagawa Y. E., Nakazawa K., Sakamoto T., Wide-band X-ray Studies of Magnetars with Suzaku, ASSP, 275-278, 2011 (ISBN 978-3-642-17250-2)
  - ⑥ Nakagawa Y. E., Yoshida A., Yamaoka K., Shibasaki N., Uniting the Quiescent and Burst Emission Spectra of Magnetar Candidates, PASJ, 61, 109-122, 2009
  - ⑦ Thompson & Duncan 1995, MNRAS, 275, 255
  - ⑧ Thompson & Beloborodov 2005, ApJ, 634, 565
  - ⑨ Nakagawa Y. E. et al., Suzaku Observations of SGR 1900+14 and SGR 1806-20, PASJ, 61, S387-S393, 2009
  - ⑩ Nakagawa Y. E. et al., The Swift Discovery of X-Ray Afterglows Accompanying Short Bursts from SGR 1900+14, ApJ, 681, L89-L92, 2008
  - ⑪ Nakagawa Y. E. et al., A Comprehensive Study of Short Bursts from SGR 1806-20 and SGR 1900+14 Detected by HETE-2, PASJ, 59, 653-678, 2007
  - ⑫ Beloborodov et al. 1998, ApJ, 508, L25

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中川友進                           |
| 2. 発表標題<br>超強磁場中性子星「マグネター」のバーストの時間的な性質(3) |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2020年秋季年会                |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中川友進                           |
| 2. 発表標題<br>超強磁場中性子星「マグネター」のバーストの時間的な性質(3) |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第76回年次大会(2021年)          |
| 4. 発表年<br>2021年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yujin Nakagawa                       |
| 2. 発表標題<br>Suzaku Observations of Magnetars     |
| 3. 学会等名<br>Frascati Workshop 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yujin Nakagawa                       |
| 2. 発表標題<br>Temporal Behavior of Magnetar Bursts |
| 3. 学会等名<br>Physics 2019 (招待講演) (国際学会)           |
| 4. 発表年<br>2019年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>中川 友進                       |
| 2. 発表標題<br>超強磁場中性子星「マグネター」のバーストの時間的な性質 |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2019年秋季年会             |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>中川 友進                       |
| 2. 発表標題<br>超強磁場中性子星「マグネター」のバーストの時間的な性質 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年秋季大会             |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中川 友進                          |
| 2. 発表標題<br>超強磁場中性子星「マグネター」のバーストの時間的な性質(2) |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2020年春季年会                |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中川 友進                          |
| 2. 発表標題<br>超強磁場中性子星「マグネター」のバーストの時間的な性質(2) |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会                 |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|