

# 「すぎく」WAMがとらえた マグネター候補天体からの突発バースト



安田 哲也

〈埼玉大学大学院理工学研究科理工学専攻 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255〉

e-mail: yasuda@heal.phy.saitama-u.ac.jp

軟ガンマ線リピータや異常X線パルサーは、 $10^{13-15}$ ガウスもの強い磁気圏をもち、その磁気をエネルギー源とする中性子星「マグネター」の候補天体と考えられている。2009年1月に異常X線パルサー1E 1547.0-5408は多くの突発バーストを放射し、「すぎく」衛星搭載の広帯域全天モニタWAMは0.16-6.2メガ電子ボルトのエネルギー帯域で400個以上もの検出に成功した。うち97個の突発バーストを選別しX線スペクトル解析を行った。そのうち81個のスペクトルは、プラズマ温度が約16キロ電子ボルトの黒体輻射で再現することができ、強磁場で矛盾がないことを示している。その一方で、残りのX線スペクトルは黒体輻射のみでは再現することができず、さらに追加成分を必要とすることが明らかになった。

## 1. はじめに

私たちの住む天の川銀河や隣のマゼラン雲などには、数ミリ秒から数秒の周期で電波やX線で輝く中性子星（パルサー）が少なくとも2,500個以上発見されている<sup>1)</sup>など。これらの放射のエネルギー源は大きく四つで、[A] 中性子星そのものの回転エネルギーや [B] 連星系を形成する伴星からの降着物質の重力エネルギー、[C] 超新星爆発したときの残留熱による熱エネルギー、そして [D] 中性子星のもつ強い磁気圏の磁気エネルギーがある。

本稿では、[D] として考えられている磁石星「マグネター」を紹介するとともに、「すぎく」衛星搭載のWAM検出器を用いたマグネター候補天体の一つ、異常X線パルサー1E 1547.0-5408（以後1E 1547と呼ぶ）の観測結果について報告する。X線観測によるマグネター候補天体を題材

にした記事は何度も登場しているが<sup>2)-5)</sup>、改めて簡単にその特徴を述べたい。

## 2. マグネター候補天体の特徴

マグネター研究は、1979年に250 ms間の突発バーストが観測されたことに始まり今では約30天体はその候補としてあがっている\*1。どのように観測・発見されるかにより、特異X線パルサー AXP (anomalous X-ray pulsar) や軟ガンマ線リピータ SGR (soft gamma repeater) などに分類されるが、どちらも典型的なパルサーより比較的遅いパルス周期 ( $P \sim 2-12$  s) と、大きな時間変化率 ( $\dot{P} \sim 10^{-13}-10^{-9}$  s/s) という特徴がある。いくつかの天体は超新星残骸に付随しているようで、伴星の存在を示す兆候がない。~0.1-100 sの間激しくX線放射する突発バーストや、数時間から数カ月にかけて定期的にX線が増光するアウトバーストが、両種類の天体から観測されてい

\*1 <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>

表1 マグネター候補天体からの突発バースト放射まとめ.

	巨大フレア (Giant flare)	中間規模フレア (Intermediate flare)	短時間バースト (Short burst)
継続時間	～100秒	～10秒	～0.1秒
発見頻度	～1天体/10年	～1天体/2年	～1天体/1年
X線強度	～ $10^{44}$ エルグ/秒	～ $10^{43}$ エルグ/秒	～ $10^{42}$ エルグ/秒
X線スペクトル	黒体放射 or 制動放射	2温度黒体放射 or 制動放射	2温度黒体放射

る。これら多くの共通点から、今では同種の天体であると考えられているおり、本稿で主に取り上げる AXP1E 1547.0 – 5408 も SGR1550 – 5418 とも呼ばれる。

マグネター候補天体は、突発バーストやアウトバーストを活発に放射する活動期がある一方、ひとたび暗くなると今のX線天文衛星の能力では観測できないほど暗く静かな静穏期を示す天体がほとんどである。このような二面性は [A] [C] では説明が難しい。突発バーストの光度はしばしば中性子星のエディントン限界光度よりも明るく、アウトバーストは  $P-\dot{P}$  から見積もる回転エネルギーの消費量よりも大きいため、エネルギー供給の観点からも [A] [B] では説明できない。

Duncan & Thompson によって提唱された「マグネター」仮説は、超新星爆発によって生まれたばかりの原始中性子星が高速自転 ( $P_0 \sim 0.6 - 3$  ms) し、星内部の差動回転によるダイナモ効果で強力な磁気圏を生成するというもので、その磁場強度は  $3 \times 10^{17} (P_0/1 \text{ ms})^{-2} \text{ G}$  にまで増幅される<sup>6)</sup>。これほどの磁場が、トーラス状にねじられ強力なトロイダル磁場として星内部に内在するとともに星表面に双極子磁場を混在させるという説も提唱されている<sup>7)</sup>。アウトバーストはねじれた磁場構造の大局的な組換えにより磁気エネルギーを何らかの方法で放射のエネルギーに変換し、突発バーストは星震などで表層部に亀裂を起こす局所的な組換えで、その活発な活動性やエネルギー問題を解決しようとした。つまり、従来の枠組み [A] [B] [C] を超えた天体を [D] で説明しようとしたのが「マグネター」仮説といえ

る。さらに、 $P-\dot{P}$  から間接的に推定した星表面の双極子磁場強度は  $B_d \sim 10^{13} - 10^{15} \text{ G}$  にも達し典型的な中性子星の10–1,000倍強いことが後押しし、マグネター説が支持されている。

マグネターが実在すれば、強磁場を作り出し保持するための磁場構造や殻構造は、星内部の組成や状態方程式に直結するため、天体物理に限らず強磁場中での強相関物性物理や原子核物理においても重要であろう。さらに磁場強度が  $> 4.4 \times 10^{13} \text{ G}$  の極限の場では光子分裂 (photon-splitting,  $\gamma \rightarrow \gamma + \gamma$ ) やその逆の現象 (photon-merging) が予言されており<sup>8)</sup>、これらの現象の調査場として貴重である。極限の強磁場は加速器実験でも近年達成され始め、加速器実験とマグネター観測は独立して相補的な役割を果たすと期待されている。

マグネター候補天体の研究において (1) 真に強磁場をもつマグネターなのか、(2) その活発な放射機構は何なのか、(3) どのようにマグネターは誕生し進化するのか、いまだ決定的な証拠はなく根本的な謎として残っているが、近年のX線天文衛星の活躍により少しずつ解明されてきている。XMMニュートン衛星によりサイクロトロン共鳴散乱らしき構造がX線スペクトルに発見され<sup>9), 10)</sup>、これが陽子起源だとすれば星表面の局所的な磁場強度が  $\sim 10^{14} \text{ G}$  に達するのではと、面白い結果が出ている。また、従来定常放射のX線スペクトルは黒体放射などの熱的成分で再現されてきたが、インテグラル衛星によって10キロ電子ボルト以上にべき関数で再現される謎の硬X線成分が発見され<sup>11)</sup>、「すざく」衛星のさらなる系統的な高感

度観測によりそのべき関数の傾きが星の年齢に比例していることが示され、放射メカニズムと星（磁気圏）の進化との関係性が示唆された<sup>12)</sup>。さらに磁気圏の時間経過による減衰の効果を取り入れた年齢の推定<sup>13)</sup>や、周辺の超新星残骸の重元素量測定によってマグネター候補天体を生み出した親星の質量を見積もる<sup>14)</sup>など、さまざまな方法でマグネター候補天体の素性が解き明かされようとしている。

### 3. 「すざく」衛星WAMによる1E 1547の観測

#### 3.1 広帯域全天モニタWAM

2005年に打ち上げられた「すざく」衛星には、硬X線検出器（HXD）<sup>15), 16)</sup>が搭載され、広帯域全天モニタ機能WAM（wide-band all-sky monitor, ワム）が施されている。WAMは縦横34 cm、高さ38 cmでHXDの周囲4面をぐるっと囲ったシンチレーション検出器で構成される。「すざく」衛星の周回する宇宙空間には宇宙線が飛び交っていて、それを原因とするHXD主センサーのノイズをアクティブシールドとして除去することがWAMの主な仕事であるが、一方でその大きな面積を活かし宇宙で起こる突発現象を観測する全天モニタとしての顔も持っている。

WAMのX線検出のしやすさを示す「有効面積」は、スウィフト衛星搭載のBAT検出器や

フェルミ衛星のGBM検出器などを含む突発天体観測用のどのX線分光器よりも300-5,000キロ電子ボルトの帯域において優れている。この能力を発揮し、打ち上げから約10年間で約1,200のガンマ線バーストと約700もの太陽フレアの観測に成功している<sup>17), 18)</sup>など。残念ながら現在運用は終了しているが、大森法輔氏らや矢部聖也氏らを中心にガンマ線バーストと太陽フレアのカタログ化が進められ、藤沼洸・杉田聡司氏らはWAM単独によるガンマ線バーストの位置測定の手法を開発しており、まだまだ多くの知見をもたらしてくれるだろう。

#### 3.2 2009年1月22日

この日の世界標準時で、1時32分にスウィフト衛星による1E 1547からの突発バーストの検出報告<sup>19)</sup>を皮切りに、WAMも含めた当時稼働中だったあらゆるX線-ガンマ線観測衛星もこぞってその検出を報告した<sup>20)-24)</sup>など。図1は当日のWAMの光度曲線である。太陽フレアやガンマ線バーストが検出されていないバックグラウンド観測と考えてよい前日の1月21日と比べると、壮絶な放射が観測されていることがわかる。さらに、これらの観測をきっかけに約1週間後に「すざく」の主検出器は緊急観測を実施し、当天体から初めて謎の硬X線成分の検出に成功するなど、多くの成果を上げている<sup>25)-28)</sup>。

詳しくWAMの光度曲線（図1）を解析する

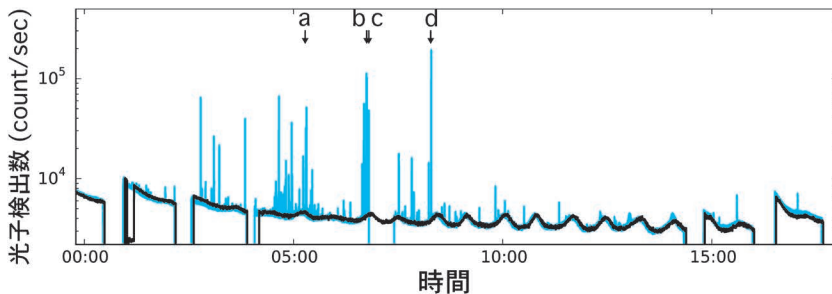


図1 WAMで観測された2009年1月21日（黒線）と22日（青線）の光度曲線。21日（黒）は、典型的なWAMの1日の光度曲線であり、バックグラウンド観測と思ってよい。a-dは図2のa-dに対応する。

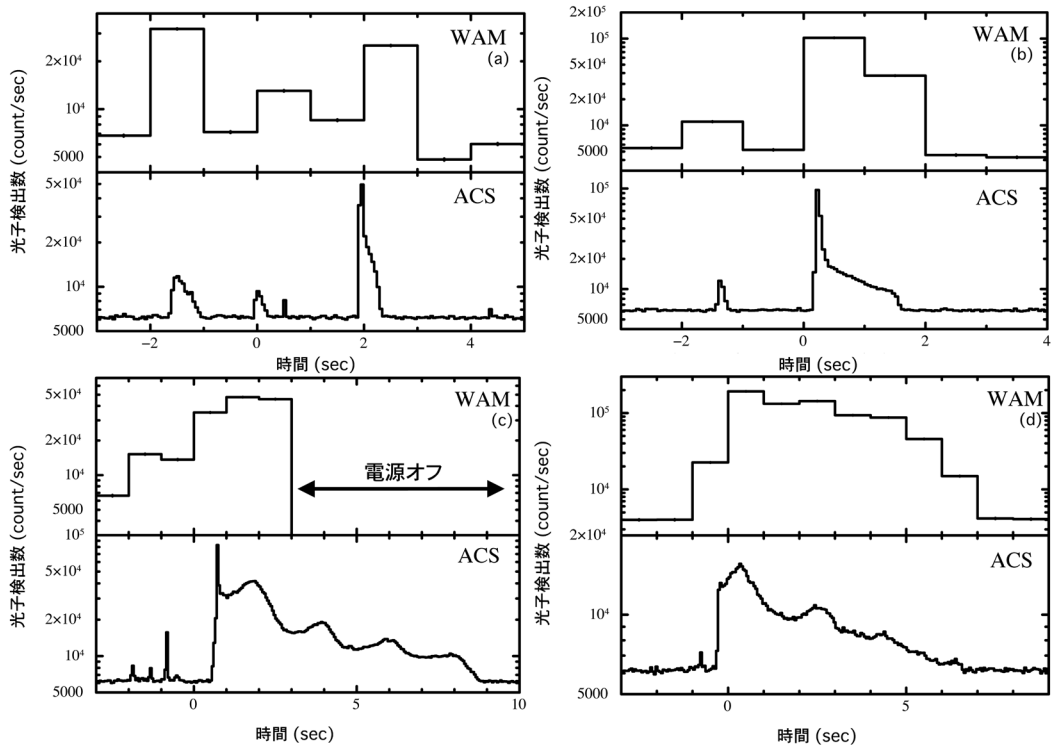


図2 WAMとインテグラル衛星搭載ACS検出器で同時に観測された突発的バーストの例。(c)(d)は、1E 1547の自転周期2.1秒のような周期性が見られ、中間規模フレアのような長い継続時間で見えている。特に、(c)は突発バーストの明るすぎる信号が数秒間連続したため、WAMの検出器保全機能が作動しHXDの電源が落とされてしまうほど明るいイベントであった。a-dは図1のa-dに対応する。

と、404個<sup>\*2</sup>の突発バーストの検出に成功し、その光度曲線をインテグラル衛星のACS検出器のデータを用いて詳細に見ると、図2のようにあらゆる継続時間、明るさのものがあがる。さらに、WAMには天体写真を撮像する機能は装備されておらずほかの天体からの硬X線と1E 1547から放射された硬X線を区別できないため、撮像機能のあるスウィフト衛星のデータを用いて慎重に選別を行った。

WAMで観測に成功した突発バーストの70-160キロ電子ボルトの帯域での明るさ分布は、図3のような指数 $-0.7 \pm 0.1$ のべき関数で再現でき

た。このような分布は、SGR 1806-20からの突発バーストでもすでに報告があり<sup>29)</sup>、地球での地震の規模分布を表す経験則「ゲーテンバーグーリヒター則」と比較され、よく似た分布であることがすでに指摘されている。これは、局所的な星震によって固体表層部 (solid crust) の磁力線にかかる圧力を解放することで短時間バーストを引き起こすとする説<sup>30)</sup>を支持している。

一方で、RXTE衛星、スウィフト衛星、インテグラル衛星による時系列解析によって、当日の前後で4キロ電子ボルト以上のエネルギー帯域でX線パルスの形が変化していることや、パルス周期

<sup>\*2</sup> ここでの1個の突発的なバーストとは、今回用いたWAMの時間分解能1秒のデータで検出された各ビンごとで計上している。仮に2秒の継続時間の突発バーストが検出された場合、2個と計上されている。検出しきい値は、ノイズのカウントレートよりも5 $\sigma$ 以上の有意度で検出されているかどうかで設定している。

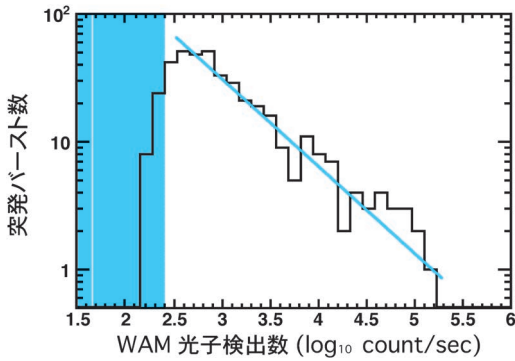


図3 WAMで観測されたショートバーストの明るさ分布. 塗りつぶしの領域は当日のWAMの検出限界の最大値を示している.

の変化率 $\dot{P}$ が突然早くなるグリッチが発見されるなど<sup>31)</sup>, 星震による局所的な磁気圏の変化のみならず大局的な磁場の組み替えも示唆され, 磁気圏が激しく躍動している様子が想像できる.

#### 4. スペクトル解析

3.1節でも述べたようにWAMの最大の武器は, その巨大な面積を活かした300キロ電子ボルト以上での有効面積であり, その性能が最も発揮されるのがスペクトル解析である. ここでは, 3.2節で選別した404個のイベントのうち160キロ電子ボルト以上で統計的に有意に検出されている97個をさらに選別した. 300キロ電子ボルト以上に感度のある分光器で, 当日に突発バースト検出に成功したものはWAMのほかにKonus-WIND衛星と太陽観測衛星RHESSIくらいであるが<sup>32), 33)</sup>, 約17時間にわたってこれほど多く観測できたWAMに系統的なX線スペクトルの調査においてアドバンテージがある.

SGRからの短時間バーストのX線スペクトルは先行研究から, しばしば2温度黒体放射で再現されることがよく知られていて<sup>34), 35)</sup> など, 同日のフェルミ衛星GBM検出器によって得られた8-200キロ電子ボルトのX線スペクトルでも, プラズマの平均温度 $kT \sim 5$ と $\sim 14$ キロ電子ボルト

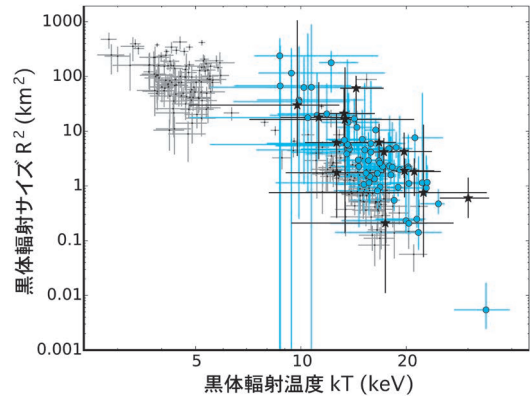


図4 突発バーストを黒体放射で再現したときの温度と放射領域サイズ. WAMで一つの黒体放射(青丸)と, 黒体放射+指数関数で折れ曲がるべき関数で再現されたイベント(黒星). 比較のため, 同日のフェルミ衛星GBM検出器によって観測<sup>36)</sup>された2温度黒体放射の分布も示した(黒丸, 1E 1547までの距離を4 kpc<sup>39)</sup>に規格化してある).

の2温度黒体放射でよく再現されている<sup>36)-38)</sup>. WAMも97個中81個が黒体放射でよく再現でき, その平均温度は $\sim 16$ キロ電子ボルトでGBMの得た高温側の黒体放射と同等であった.

WAMにとって $\sim 100$ ミリ秒という短いタイムスケールで図2のように大量の光子が降り注ぐと, パイルアップ効果が顕著に表れてしまい, 正確な光子のエネルギー測定が難しくなる. すると, 本来観測されるべきX線スペクトルが歪んでしまう. そこで, 信号処理部の仕様をコンピュータ上の計算コードで再現し本解析に適応することで, 歪む前の本来のX線スペクトルを推定する方法を開発した. この補正をかけることで得られた黒体放射の温度と放射領域のサイズが図4であり, WAMとGBMの結果が似た傾向にあり整合性が取れた.

一方で, 黒体放射で再現できた突発バースト以外のうち, 15個は黒体放射だけではX線スペクトルは再現できなかったが, ほとんどが黒体放射ともう一つの放射成分を追加することで再現できた<sup>\*3</sup>. この追加成分を個々の短時間バーストか

ら検出したことはWAMが初めてであり、この発見はWAMの大きな有効面積の賜物である。RHESSI衛星と同時観測された06:48:05 (UT, 図2のc) の突発バーストで、少なくとも400キロ電子ボルトに達する光子が検出されていることから<sup>32)</sup>、謎の追加成分が存在していることはほぼ間違いないだろう。

追加成分のスペクトルの形は、残念ながら今回の観測では光子の統計量の少なから詳細に明らかにすることはできなかったが、黒体放射+指数関数で折れ曲るべき関数で再現した場合を例にとると、そのときの黒体放射の平均温度は~17キロ電子ボルトで、4章の平均温度~16キロ電子ボルトと同等の値が得られた。一方で、べき関数の指数平均は~2.6であった。

#### 4.1 突発バーストのエネルギー

さて、WAMを用いたX線スペクトル解析の結果から、1E 1547からの放射エネルギーをざっくりと計算してみよう。

4章で得た平均温度 $kT \sim 16$ キロ電子ボルトの黒体放射で、WAMで検出されたすべての突発バーストが輝いていたと仮定する。すると70-160キロ電子ボルトの帯域でWAMの検出した光子1個は $1.5 \times 10^{36}$ エルグ/秒のエネルギーに相当する。図3のカウントレートを積算すると $1.8 \times 10^6$ カウント/秒であるため、1E 1547はたった1日の間に突発バーストだけで少なくとも(光子1個相当のエネルギー)×(カウントレートの積算) $= 2.7 \times 10^{42}$ エルグものエネルギーを放出していたことになる。

回転エネルギーの消費量は1E 1547のパルス周期 $P \cdot \dot{P}$ から $L_{\text{rot}} \sim 1 \times 10^{35}$ エルグ/秒とざっくり見積もれる。つまり回転エネルギーでWAMの測定したエネルギーを放出するには、少なくとも約

300日 ( $2.7 \times 10^7$ 秒) 間分のそのエネルギーを1日で解放する必要がある。繰り返すが、このエネルギーはあくまでWAMで観測できた突発バーストのみであることに注意していただきたい。

次に、磁気エネルギーは $P \cdot \dot{P}$ で推定される磁場強度 $B_d \sim 2.2 \times 10^{14}$ Gと中性子星の半径 $R \sim 12$ kmを仮定すると

$$E_{\text{mag}} \sim \frac{B^2}{8\pi} R^3 \\ = 3.4 \times 10^{45} \left( \frac{B}{2.2 \times 10^{14} \text{G}} \right)^2 \left( \frac{R}{12 \text{km}} \right)^3 \text{erg} \quad (1)$$

と見積もれる。そして、WAMの結果で見積もった量は磁気エネルギー全体のたった0.08%程度で十分補える。これらは、1E 1547の活動が磁気エネルギーを源にしていることを支持する結果と言えるだろう。

#### 4.2 磁場によるプラズマの閉じ込め

放射エネルギーを今度は、スペクトル解析した個々の突発バーストについて考えてみる。簡単のため、黒体放射のみで再現できたものだけを用いてその放射領域のサイズと光度の関係を示すと、図5ようになった。その光度のほとんどは、プラズマに対する重力と放射圧の関係から導かれるエディントン限界光度 $L_{\text{edd}} \sim 1.8 \times 10^{38} (M/1.4 M_{\odot}) \text{erg s}^{-1}$ を有意に超えている\*4。つまり重力よりも放射圧が勝ってしまい、単純に中性子星の星表面からX線が放射されていると考え、そのプラズマからの放射によって星表面が吹き飛んでしまっていることになる。

そこで、このようなエディントン限界光度を超える光度と、図2のような中間規模フレア程の長い継続時間や光度の変動を、マグネター星表面の強い磁気圏に束縛されている電子・陽電子

\*3 そのX線スペクトルは、2温度黒体放射、黒体放射+べき関数、黒体放射+指数関数で折れ曲がるべき関数で再現できた。

\*4 重力の計算には陽子の質量を代入したが、マグネターの突発的バーストは星周辺に形成される電子・陽電子プラズマの火の玉モデルがしばしば用いられる。

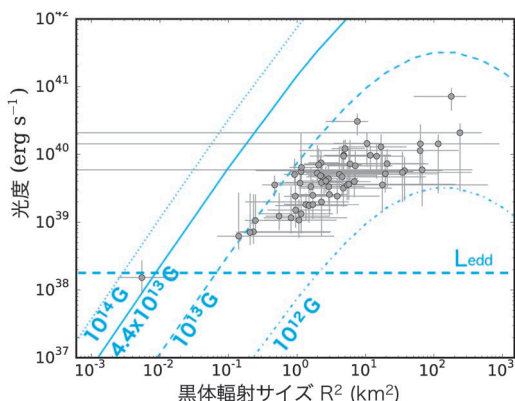


図5 WAMが観測した黒体輻射のサイズと光度. 曲線は、各磁場強度が束縛できるプラズマの光度の上限値を示す.  $L_{\text{edd}}$  は中性子星表面でのエディントン限界光度である.

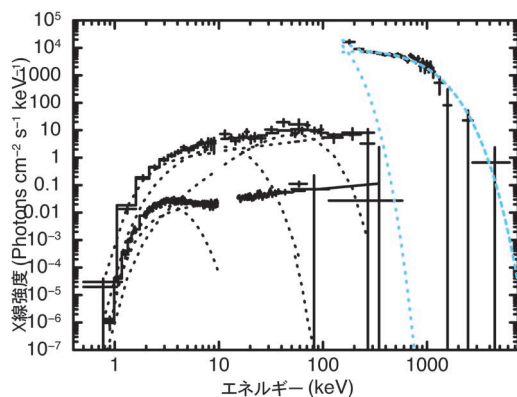


図6 「すざく」衛星によって得られた2009年1月の1E 1547のX線スペクトル. 暗いものから順に定常放射<sup>25)</sup>, 暗い突発バーストの足し合わせ<sup>26)</sup>, 明るい突発バースト<sup>34)</sup>である.

プラズマからの放射であるとする火の玉モデル (trapped fireball model)<sup>40)–42)</sup>などを考える. 単純に磁場がプラズマを閉じ込めようとする磁気圧と放射圧の関係は<sup>30)</sup>,

$$\frac{[B(R_{\star} + \Delta R)]^2}{8\pi} \geq \frac{E_{\text{BB}}}{3\Delta R^3} \quad (2)$$

と書ける. ここで,  $\Delta R$ はプラズマを束縛している磁気圏のサイズ,  $E_{\text{BB}}$ はそのプラズマから放射された光子のエネルギーの総和であり,  $R_{\star}$ は中性子星の半径で12 km, 磁場強度分布を  $B(R) = B_{\star}(R/R_{\star})^{-3}$ と仮定すると, 星表面での磁場強度  $B_{\star}$ は

$$B_{\star} \geq 6.9 \times 10^{11} \left( \frac{E_{\text{BB}}}{10^{41} \text{ erg/s}} \right)^{1/2} \times \left( \frac{\Delta R}{12 \text{ km}} \right)^{-3/2} \left( 1 + \frac{\Delta R}{R_{\star}} \right)^3 \text{ G} \quad (3)$$

と書ける. この磁場強度の下限値を, 得られた黒体輻射のサイズとX線光度の関係と比較した (図5). この図から, 中性子星の典型的な磁場強度  $10^{12}$  Gではプラズマを磁気圏にとどめておくことはできず, 1E 1547の星表面の磁場強度は弱くと

も  $>10^{13}$  G程度は必要だということがわかった. これは  $P \cdot \dot{P}$ から推定した磁場強度  $B_d$ と矛盾のない結果である.

### 4.3 謎の追加分の発見

定常放射の10キロ電子ボルト以上のX線スペクトルでは, べき関数で再現できる硬X線成分がすでに多くのAXP/SGRから発見されている<sup>11)</sup>. それは約1週間後の「すざく」による1E 1547の緊急観測からも同様に発見されており (べき指数  $\sim 1.3\text{--}1.5$ )<sup>25)</sup>, この時検出された暗い短時間バーストのX線スペクトルにも硬X線成分があったとしても矛盾のない結果が得られている<sup>26)</sup>. これらと, WAMが06:45:13 (UT)に観測した特に明るい突発バーストのX線スペクトルを比較したものを図6に示す. このように2成分以上で再現できるX線スペクトルの形状が似ていることから, 定常放射が非常に暗くて小さい突発バーストの重ね合わせであるとする説<sup>43), 44)</sup>を支持する結果となった.

WAMが追加分を発見した突発バーストは, 短時間バーストや中間規模フレアに相当する明るさや継続時間のものであった. このような謎の成分は, 実はSGR1806–20の巨大バースト<sup>45)–47)</sup>

からも発見されている<sup>\*5</sup>。つまり、今回のWAMの観測によって、マグネター候補天体からのX線スペクトルには定常放射や明るい・暗い短時間バースト、中間規模フレア、巨大フレアの種類にかかわらず、(放射起源が同じかどうかはわからないが)すべての放射に硬X線成分が存在していることが明らかになった。

WAMが発見した追加成分は、もしかすると磁場に束縛された電子・陽電子プラズマからの対消滅輝線が強磁場下で光子分裂<sup>4)</sup>した結果によるものかもしれないが、それを示すようなべき関数の指数、折れ曲りエネルギー、明るさなどの間に有意な相関を見つけてことができなかった。さらなる調査は、より高感度での硬X線観測やX線の偏光観測に期待したい<sup>48)</sup>。

## 5. まとめ

以上、WAMのパイルアップ効果補正を施したX線スペクトル解析の結果を紹介した。今回、X線スペクトルを積分せずに個々の突発バーストから黒体輻射で再現できない追加成分を発見できたのは、WAM最大の特徴である巨大な有効面積が活きた結果と言える。これによってマグネター候補天体からのあらゆる放射に追加成分があることが示されたが、その詳細なスペクトルの形や放射機構はまだわかっていない。これらは、将来衛星による広帯域観測や検出器の高感度化、さらには偏光測定などによって、より深くマグネター候補天体の理解が進むことが楽しみである。

## 謝辞

本稿の内容は、埼玉大学大学院に提出した博士論文<sup>49)</sup>と投稿論文<sup>50)</sup>およびその後の半年間の研究が元になっています。寺田幸功氏、田代信氏には多くのご指導をいただき、研究生生活の面白さを教えていただいた。この場を借りて心から感謝申し上げます。また検出器の運用や較正にご尽力いただき、データ解析の方法など、ご教授いただいたWAMチームの皆様には御礼を申し上げます。

馬場彩氏には本稿執筆の機会や的確なコメントをいただいたき感謝いたします。なお、本研究は日本学術振興会の援助を受けて行われました。

## 参考文献

- 1) Manchester R. N., et al., 2005, ApJ 129, 1993
- 2) 村上敏夫, 1999, 天文月報 92, 152
- 3) 中川友進, 2008, 天文月報 101, 7
- 4) 榎戸輝揚, 2012, 天文月報 105, 431
- 5) 牧島一夫, 2015, 天文月報 108, 721
- 6) Duncan R. C., Thompson C., 1992, ApJL 392, 9
- 7) Braithwaite J., 2009, MNRAS 397, 763
- 8) Harding A. K., Lai D., 2006, Reports on Progress in Physics 69, 2631
- 9) Tiengo A., et al., 2013, Nature 500, 312
- 10) Borghese A., et al., 2015, ApJL 807, 20
- 11) Kuiper L., et al., 2006, ApJ 645, 556
- 12) Enoto T., et al., 2010, ApJL 722, 162
- 13) Nakano T., et al., 2015, PASJ 67, 9
- 14) Kumar H. S., et al., 2014, ApJ 781, 41
- 15) Takahashi T., et al., 2007, PASJ 59, 35
- 16) Kokubun M., et al., 2007, PASJ 59, 53
- 17) Ohmori N., et al., 2016, PASJ
- 18) Endo A., et al., 2010, PASJ 62, 1341
- 19) Gronwall C., et al., 2009, GCN 8833, 1
- 20) Connaughton V., Briggs M., 2009, GCN 8835, 1
- 21) Savchenko V., et al., 2009, GCN 8837, 1
- 22) Golenetskii S., et al., 2009, GCN 8851, 1
- 23) Bellm E., et al., 2009, GCN 8857, 1
- 24) Terada Y., et al., 2009, GCN 8845, 1
- 25) Enoto T., et al., 2010, PASJ 62, 475
- 26) Enoto T., et al., 2012, MNRAS 427, 2824
- 27) Iwahashi T., et al., 2013, PASJ 65,
- 28) Makishima K., et al., 2015, PASJ
- 29) Cheng B., et al., 1996, Nature 382, 518
- 30) Thompson C., Duncan R. C., 1995, MNRAS 275, 255
- 31) Kuiper L., et al., 2012, ApJ 748, 133

\*5 驚くべきことにこのときのX線スペクトルは、10メガ電子ボルトに到達するべき関数で再現されている。



32) Bellm E., et al., 2009, GCN 8857, 1  
 33) Golenetskii S., et al., 2009, GCN 8858, 1  
 34) Feroci M., et al., 2004, ApJ 612, 408  
 35) Nakagawa Y. E., et al., 2007, PASJ 59, 653  
 36) Collazzi A. C., et al., 2015, ApJS 218, 11  
 37) Lin L., et al., 2012, ApJ 756, 54  
 38) van der Horst A. J., et al., 2012, ApJ 749, 122  
 39) Tiengo A., et al., 2010, ApJ 710, 227  
 40) Feroci M., et al., 2001, ApJ 549, 1021  
 41) Olive J.-F., et al., 2004, ApJ 616, 1148  
 42) Hurley K., et al., 2005, Nature 434, 1098  
 43) Nakagawa Y. E., et al., 2009, PASJ 61, 109  
 44) Nakagawa Y. E., et al., 2011, PASJ 63, S813  
 45) Guidorzi C., et al., 2004, A&A 416, 297  
 46) Frederiks D. D., et al., 2007, Astronomy Letters 33, 1  
 47) Boggs S. E., et al., 2007, ApJ 661, 458  
 48) Kitamoto S., et al., 2014, arXiv:1412.1165  
 49) Yasuda T., 博士学位論文, 埼玉大学理工学研究科 (2015年3月)  
 50) Yasuda T., et al., 2015, PASJ 67, 41

**Hard X-ray Bursts from a Magnetar Candidate Observed with Suzaku/WAM**

**Tetsuya YASUDA**

*Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakuraku, Saitama 338-8570, Japan*

Abstract: Soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars are considered to be candidates of neutron stars with strong magnetic-field of  $10^{13-15}$  G, named “magnetars,” which are powered by their magnetic energy. On 2009 January 22, an anomalous X-ray pulsar 1E 1547.0 – 5408 exhibited a large-number of sporadic burst emissions, then the wide-band allsky monitor on-board *Suzaku* satellite successfully detected more than 400 bursts in the 0.16–6.2 MeV bandpass from the direction of the object. I selected 97 of these bursts and extracted X-ray spectra to perform spectral fitting correcting pile-up effect. 81 WAM spectra were well-fitted by a single blackbody with  $\sim 16$  keV. On the other hand, the rest of the spectra were not represented with only blackbody component, and the WAM revealed that the spectra required any additional component.