

# 天文月報

THE ASTRONOMICAL HERALD

10

2019

平山族 100周年特集

全天 X 線監視装置 MAXI 10周年特集

宇宙の標準模型 CDM は本当に正しい？  
すばる HSC による精密宇宙論

日本天文学会

Astronomical Society of Japan



©NASA

国際宇宙ステーション搭載の全天 X 線監視装置 MAXI

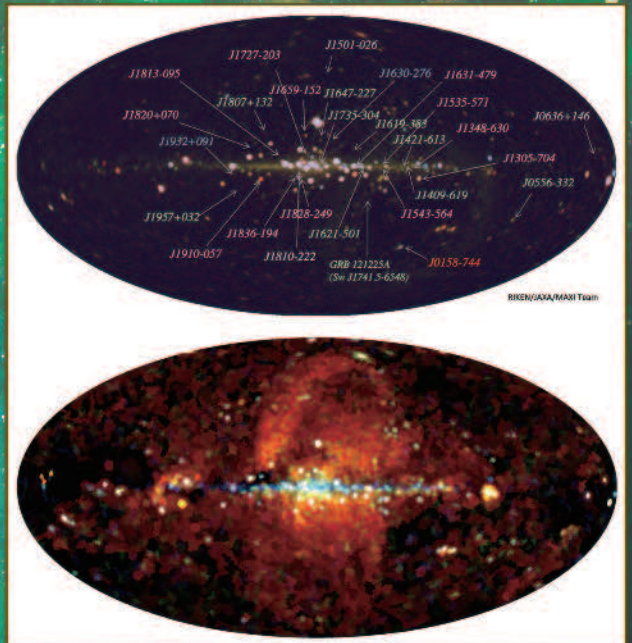
# 天文月報

THE ASTRONOMICAL HERALD

12

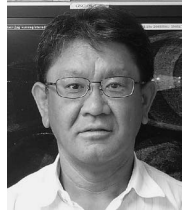
2019

特集: 20 周年を迎えたすばる望遠鏡  
全天 X 線監視装置 MAXI 10 周年特集 (4)  
スーパーアースの形成と大気



(上) MAXI 搭載 Gas Slit Camera の全天画像と MAXI が発見した X 線天体  
(下) MAXI 搭載 Solid-state Slit Camera の全天画像

# マキシ 全天 X 線監視装置 MAXI 連続観測 10 年



## 三原 建弘 & MAXI チーム

〈理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: tmihara@riken.jp

2019年8月15日、全天X線監視装置MAXIは観測開始10年を迎える。この間、軟X線新星MAXI J0158-744、多くのX線ブラックホール新星などを発見し、激動するX線宇宙を世に見せてきた。観測されたX線源は21世紀初頭における3MAXIカタログとして結実している。MAXIは天体のX線データを提供し、電波からTeVガンマ線までの「多波長天文学」の一波長帯を担っている。これは、重力波、ニュートリノを加えた「マルチメッセンジャー天文学」に発展している。さらにリアルタイム性を活かし、MAXIとSwift/BATとでX線/ガンマ線突発天体の「時間領域天文学」のトリガー役となっている。本特集ではMAXIの成果を引き続き紹介していく。

## 1. 全天 X 線監視装置 MAXI

全天X線監視装置MAXI (Monitor of All-sky Image)<sup>1)</sup>は、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟の船外実験プラットフォームに搭載されている日本の装置である (図1)。MAXI チームは、理研, JAXA, 8大学ほか、計20名ほどの研究者からなり、運用と速報に当たっている。検出器には大面積のXeガス比例計数管を用いたガススリットカメラ (GSC)<sup>2)</sup>とX線CCDを用いたソリッドステートスリットカメラ (SSC)<sup>3)</sup>がある。GSCはX線 (2-20 keV) のエネルギー帯で92分に一回、ほぼ全天 (90%以上) をスキャンしている。SSCは0.7-7 keVで同約20%の天域をスキャンしている。観測データは、MAXI ホームページ (HP)<sup>\*1</sup>から即時公開されていて、誰でもいつでも「本日のX線の空」や「はくちょう座 X-1 の10年間の光度曲線」などを見ることができる。MAXI HPでは既知の約400個の天体のモニタに加え、任意の位置の任意の時間におけるX

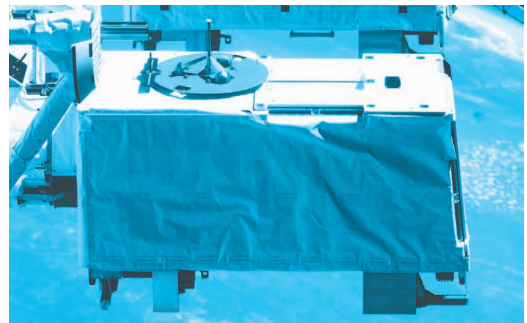


図1 全天X線監視装置MAXI (JAXA提供)。

線画像、光度曲線、スペクトルを生成できる「MAXI オンデマンド」も稼動している。MAXI による全天の積分画像は、MAXI HPのトップページや次の根来の記事の図1にある。数多くのX線源に加え、軟X線で広がるNorth Polar Spur などや、2-10 keVでは銀河リッジなどの大きく広がった構造も一目瞭然である。

## 2. MAXI の設計思想

1990年代初頭、当時、科学技術庁下の理化学

\*1 MAXI ホームページ <http://maxi.riken.jp>

研究所松岡勝はISSの天文学利用としては「X線全天モニタ」が最善であるという結論に至った。天体の出現と消滅が日常茶飯事であるX線の空において「全天モニタで発見し、主観測機器で詳細観測を行う」という組み合わせは王道である。実際1987年打ち上げの「ぎんが」衛星では全天モニタASMでX線新星を発見し、直後から主観測機器LACによる詳細観測が行われた<sup>4)</sup>。MAXI提案当時、ASTRO-E, Chandra, XMM-Newtonという望遠鏡型衛星が同時期に計画されていた。それらに観測ターゲットを供給するための高感度全天モニタは、世界のX線天文学者が必要と感じていた。

さてMAXIがスリットカメラによるスキャンという方式の全天モニタになった大きな要因は、ISSならではの姿勢の事情があった。ISSは常に「下側」を地球に向けて飛んでおり、通常の天文衛星のように星空空間に静止した姿勢を取らない。すると軌道1周回(92分)で1自転してしまうため、1つの星をポインティング観測するには、可動機構が必要で、技術的困難、コスト高、長期の信頼性の低下をまねく。一方、スキャン型としてISSの自転を利用すれば、カメラを動かすことなく観測でき効率的である。

その場合、スキャン頻度は自転周期である92分に決まってしまう。したがって観測対象は1日スケールより長いゆっくりした変動をする活動銀河核(AGN)などが考えられた。当時の全天モニタはRXTE衛星のASMであり、面積が小さいうえに符号化マスク方式なのでその感度は50 mCrab<sup>\*2</sup>/day (5 $\sigma$ )と低く、AGNは検出できていなかった。ISSのペイロードを使えば、大面積の比例計数管を多数搭載でき(MAXIではA4紙大の窓面積を持つ比例計数管を12台搭載)、AGNのような暗い天体も観測できる。さらにス

リットカメラによるスキャン<sup>\*3</sup>を採用することで、たとえ10年間のデータでも同一画像上で一度に加算して処理でき、観測すればするほど感度が上がる。つまりスナップショット的には全天モニタとして、データをためれば特定の星の詳細観測器としても使える一挙両得のカメラができる。こうして「最高感度の全天モニタ」MAXIの基本コンセプトが決定した。理想的感度(5 $\sigma$ )は、5 mCrab/day、2年間で混入限界感度に達するとされた<sup>1)</sup>。

### 3. MAXIで目指したサイエンス

MAXI提案時に掲げた3つの目標は、21世紀のX線カタログ作成、突発天体の速報、X線天体の長期変動の監視である。すでに述べたAGNの変動の他、ブラックホールや中性子星への長期の降着現象と放射過程の解明にも期待できる感度である。

MAXIは全天モニタと言う性格上、迅速に情報を提供することに意味がある。MAXIデータは最初から誰にでもすぐ利用できる形での無償提供、即時公開の方針とした。ここには良くも悪くもHETE-2衛星(2000~2007)の経験が活かされた。HETE-2はリアルタイムでのガンマ線バーストの位置速報で成功をおさめた一方、データは一般に広く利用できる形で公開されなかったため、チーム外の研究者に利用されることはなかった。MAXIチームは自分たちで論文を書くと同時に、国際的な天文コミュニティへの貢献を重視することで、より広いサイエンスに利用されることを目指した。

### 4. 打ち上げから初期故障を経て最終的な感度

さてこうして、松岡らの提案は1997年4月に第

\*<sup>2</sup> 強い定常X線源であるカニ星雲のX線強度を1 Crabと呼ぶ。mCrabは1 Crabの1000分の1。

\*<sup>3</sup> 天空上の1点が検出器上の1点に対応しているという意味で、基本的にピンホールカメラである。ピンホールカメラの検出器面のY軸を時間軸にしたものと思えばよい。

1期ペイロードとして採択された<sup>5)</sup>。ISSで初めての天文学利用である。打ち上げは当初予定の2003年から6年も遅れたが<sup>6)</sup>、多くの方々の御尽力のおかげで、2009年7月16日スペースシャトルにより打ち上げられた。そして若田光一宇宙飛行士のロボットアーム操作による取り付けを経て、2009年8月15日からMAXIの運用は始まった。

ところがその3週間後、カメラ2台で、比例計数管の炭素繊維芯線が切れるという故障が起きた。MAXI/GSCの前身にあたるHETE-2のWXM装置では成功を収めていた炭素繊維芯線がMAXI/GSCで破断したのにはいくつかの原因がある。HETE-2衛星は、ほぼ赤道軌道だったのに対し、ISSの軌道は傾斜角が51.6度と大きいため、南大西洋異常帯（当然そこでは比例計数管は停止していた）だけでなく、高緯度地帯で多くの電子や陽子を受けることになった。赤道上に比べ6倍も強い粒子線により比例計数管の中で放電が誘起され、1か所へ集中した放電電子のスパッタリングによって炭素繊維芯線が細くなり、破断したと考えられる。また、WXMの芯線端の特性を改善するため、芯線張りの構造を変えたことも遠因にあった。もちろん軌道上の高い放射線環境に備え、打ち上げ前には強い<sup>137</sup>Csガンマ線を比例計数管に照射して放射線耐性を確認した。しかし荷電粒子は実験室で簡便に当てることはできないため、事前の試験や検討が不十分であったことは否めない。ちなみに当時もその後も放電をせずに、現在でも初期と同じ1650 Vの高圧で運用しているカメラも2台ある。粒子線に対する放電のしやすさにはカメラの個性があるようだ。

初期故障が起きて以降、3つの「安全運用」の方針を採用した。(i) GSCは極地方では運用しないこととし、時間稼働率は80%から40%に下がった。(ii) 放電は起こしたが破断には至っていないカメラは念のため停止し温存し、運用カメラ数を12台から8台に減らした。(iii) 放電の気配があるカメラでは高圧を1650 Vから1550 Vに

下げて運用した。それによりPSF（点源広がり関数）はやや悪くなり、1PSF内のバックグラウンドは1.5倍増えることになった。これらの対策のおかげでMAXIは2009年9月23日以降、ほぼ安定して運用を続けている。Metorex社製の比例計数管はとても安定していて、10年間でガス増幅率の変化は1%以内である<sup>7)</sup>。

その後の調査により、MAXIのカメラの何台かは、ソユーズ宇宙船の高度計からの散乱ガンマ線を受けており、バックグラウンドレベルが1.5倍程度高いことが分かった<sup>8)</sup>。当初懸念されたISSという400トンもの大質量による宇宙線シャワー発生による粒子・ガンマ線バックグラウンドの増加は、MAXIでは認められなかった（同じくISSに搭載のCALETのCAL装置では検出されている）。

安全運用の対策 (i) と (ii) により、理想的状態に比べ、単位時間内のシグナル (S) の量は0.26倍に減った。他方、対策 (iii) とソユーズの影響により、バックグラウンド (B) は2倍（その揺らぎは $\sqrt{2}$ 倍）に増えた。これらにより現在の感度 ( $S/\sqrt{B}$ ) は100 mCrab/スキャン、25 mCrab/dayとなっている ( $5\sigma$ 値)<sup>9)</sup>。

こうして当初の目的の1つであるAGNの長期モニタをするには感度が不足となり、観測可能AGN数が減ってしまった。しかし数個のAGNの強度モニタは行われている。特に変動の激しい明るいとかげ座BL型天体のMrk 421については幾度もフレアを検出したり、パワースペクトルを求めたりしている<sup>10)</sup>。また一番明るいAGNのCen Aについても変動解析がなされている<sup>11)</sup>。

## 5. 歴史に残るMAXIカタログ

定常な微弱X線源の検出を行う場合には、一挙両得カメラであるがゆえに、シグナル量の減少は時間をかければ取り戻せる。7年間のGSCデータを用いた3MAXIカタログでは、3–20 keVで896個のX線源がリストされ、感度はほぼ混入限界の0.4 mCrabに達した（後続の川室氏の記事）。同

程度の感度限界で 1970 年代に HEAO-1 A2 により得られた Piccinotti の AGN サンプルと比べると、数十%の AGN はリストから消えると同時に、ほぼ同数が新たにリストに加わっていた。それは数十年単位の AGN の変動を物語っている。

また 7 年間の SSC カタログも発行された。0.7–1.85 keV と 1.85–7.0 keV の 2 バンドで、各々感度 3 と 4 mCrab で 140 と 138 個がリストされている<sup>12)</sup>。これらの MAXI カタログは 21 世紀初頭の X 線源の基礎データとして歴史に残るであろう。

## 6. MAXI の速報体制と 時間領域天文学

MAXI は ISS に搭載されているため、アメリカのデータリレー衛星 TDRSS を経由して 70% の時間、リアルタイムで地上へデータが降りてくる。JAXA 筑波宇宙センターでは MAXI の突発天体発見システムがデータを監視し、大增光があれば登録者に直接、電子メールで知らせる<sup>13)</sup>。自動速報の最速記録は発生後 11 秒である<sup>9)</sup>。通常程度の増光であれば、MAXI 当番がデータを吟味した後 GCN (ガンマ線バースト連携ネットワーク) や ATel (天文学者電報) へ新星情報を発信する。それらを元に、世界中の地上の、小口径から大口徑まで、波長も電波から TeV まで、の望遠鏡や、はたまた Swift などの軌道上望遠鏡も、秒単位あるいは時間単位で急いで追跡観測を行う。この時間領域天文学へのトリガー役の貢献が評価され、MAXI は 2016 年 ISS 研究開発国際会議の Innovation in space science 賞を受賞した<sup>14)</sup>。

実は故障したカメラ 3 台のうち 2 台は、有効面積が半分で反同時計数なしという状態なので、感度は 1/4 だが使用できることが分かり、運用を始めた。「ぎんが」が発見した V404 Cyg は、26 年たった 2015 年 6 月 15 日に再び出現し、MAXI ではそれらのカメラで検出・速報された。今回の増光では、ガンマ線から可視光、電波までの現代の観測機器が総動員され、その激しい変動ぶりがつ

ぶさに観測された<sup>15)</sup>。それによりブラックホール連星におけるガス降着からジェット放出までの姿が描き出され、多波長天文学の成功例となった。

## 7. 長期モニタとしての活躍

MAXI の運用は 3 回にわたり延長された結果、長期モニタならではの新しい成果も増えて来た。例えば数年ごとにアウトバーストを繰り返すブラックホール連星では、その長期光度曲線の驚くほどの類似性が認識された<sup>16)</sup>。ポインティング衛星の観測では決して得られなかった視点である。

長期モニタとしての成果のもうひとつには、積極的なデータ公開によって、MAXI チーム外の研究者によるデータの利用が進んだ点があげられるだろう。MAXI の観測結果は X 線領域での標準的な参照データとして世界的に認められたと言える。その証拠に MAXI の装置論文 Matsuoka<sup>1)</sup> (2009) の引用数は、いまや 325 回 (ADS, 2019.5.1.現在) になった。それを「何らかの形で MAXI を使用した論文」の数と見なすと、これは MAXI チームが執筆した論文 76 編に加えて、その 3 倍の数の論文が外部の研究者によって書かれていることを意味する。ここ 6 年間では毎年 40 回程度引用されており、MAXI のコンスタントな活躍を物語っている。この貢献が評価され 2013 年度には第 18 回 PASJ 論文賞を頂いた。

## 8. MAXI の成果

このような MAXI の成果を俯瞰すれば、MAXI のサイエンスには、次の 4 つのパターンがある。後続の記事のテーマを ( ) 内に記した

1) MAXI 単独でできる研究 (MAXI カタログ、恒星フレア、遅いパルサーの時系列解析、軟 X 線拡散 X 線源など)、

2) MAXI の発見と Swift/XRT や NICER などによる追観測を相補的に組み合わせた成果 (X 線新星発見など)、

3) MAXI と RXTE/ASM, Swift/BAT, Fermi/

GBMなどの全天モニタとを組み合わせる研究（アウトバーストの形やスペクトル状態変化や周期性、パルサーのパルス周期と光度関係など）、

4) マルチメッセンジャー天文学への貢献（重力波天体、ガンマ線バーストなど）。

例えばMAXIで一番の特異な天体、軟X線新星MAXI J0158-744の発見は2)に入る。この天体は1スキャンだけで検出され、4 keV以下のみで光る軟X線天体で、小マゼラン雲にありながら1 Crabと明るく、光度に直せば1太陽質量のエディントン光度<sup>\*4</sup>の100倍もあった。そしてそこにはBe星が存在した。未知の天体現象に出会った時の研究者の驚きや試行錯誤は、天文月報<sup>17)</sup>に掲載されている。その他さまざまな成果については、後続の記事をご覧ください。

## 9. そして10年

MAXIの10年の運用により、提案時に掲げた、21世紀のカatalog、新星の速報、X線天体の長期変動の監視は、ほぼ達成され、現在も継続中である。この10年でMAXI J0158のような新天体も現れ、ブラックホール新星も頻繁に報告されるようになった。

さらに特筆すべきは、この10年の天文学の進歩の一形態として、潮汐破壊現象、重力波、超高エネルギーガンマ線、超高エネルギーニュートリノといった、高エネルギー現象や激しい時間変動を含む新しいサイエンスが出現したことである。MAXIはこれら高エネルギー天体のX線データを提供しており、それによりMAXI自身の重要性も増している。

MAXIチームでは研究の潮流を知り世界の研究者と議論するため、合計6回のMAXI国際会議を開催した。そこにはMAXIの成果もまとめられていて、集録や発表資料はMAXI HPから入手可能である。

一般向けとして、JAXAからMAXIサイエンスニュースも随時発行している<sup>18)</sup>。ISSツイッターにもときおり登場している。

MAXIのカメラは現在も安定して稼働している。これからも激動のX線宇宙をお見せするだろう。

## 参考文献

- 1) Matsuoka, M., et al., 2009, PASJ, 61, 999
- 2) Mihara, T., et al., 2011, PASJ, 63, 623
- 3) Tomida, H., et al., 2011, PASJ 63, 397
- 4) Tsunemi, H., et al., 1997, proc All-Sky X-ray obs.15
- 5) 三原建弘, 1999, 天文月報, 92, 154
- 6) 上野史郎, 2006, 天文月報, 99, 441
- 7) Sugizaki, M, et al., 2018, proc New eyes on X-ray astrophys. with Japanese and Chinese obs.
- 8) Mihara, T., et al., 2014, SPIE, 9144, 10
- 9) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 10) Isobe, N., et al., 2015, ApJ, 798, 27
- 11) Tachibana, Y., et al., 2016, PASJ, 68, S25
- 12) Tomida, H., et al., 2016, PASJ, 68, S32
- 13) 鈴木素子, 根来均, 2010, 天文月報, 103, 465
- 14) ISASニュース2016年9月号, ISS研究開発賞
- 15) 例えばKimura, M., et al., 2016, Nature 529, 54
- 16) 中平聡志, 2012, 天文月報, 105, 166
- 17) 森井幹雄, 2015, 天文月報, 108, 225
- 18) MAXIサイエンスニュース <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/maxi>

### MAXI 10 years of observation

Tatehiro MIHARA & MAXI team

RIKEN, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: On 2019 August 15, it will be 10 years since MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) started observations on the International Space Station. MAXI discovered the soft X-ray nova MAXI J0158-744, and many black-hole X-ray novae. The 3 MAXI catalog was published as that in the early 21<sup>st</sup> century. MAXI provides basic data in X-ray objects. It takes part in the "multi-wavelength astronomy" from radio to TeV gamma-ray. Recently together with the gravitational wave and the neutrino, MAXI contributes to the "multi-messenger astronomy". MAXI and Swift/BAT are leading the "time-domain astronomy" in the X-ray and Gamma-ray transients.

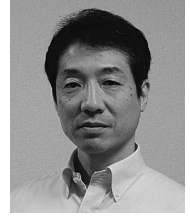
<sup>\*4</sup> 星が輝ける最大の光度。星の質量に比例する。1太陽質量であれば $1.4 \times 10^{31}$  W, 太陽光度の3万倍である。当光度以上になると光圧が重力に勝り、星表面のガスが宇宙空間に飛散し、星の体をなさなくなる。

# MAXIによる X線新星の発見

根 来 均

〈日本大学理工学部 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8〉

e-mail: negoro.hitoshi@nihon-u.ac.jp



MAXIの最大の目的の一つは、X線新星などの突然輝き出す突発天体の発見である。この10年間に、MAXIは27個の新たなX線新星を発見し、うち12個がブラックホール（またはその候補）を含む連星系、11個が中性子星を含む連星系であった。本稿では、MAXIによるX線新星の発見から正体判明までの過程と、発見された天体の多種多様な特徴を述べる。発見例の中には高銀緯に位置し、伴星が低質量星のものも多きことから、ブラックホールや中性子星を含む低質量連星系が、銀河面を離れ数多く存在する可能性が示唆される。さらなる全天観測の重要性についても触れる。

## 1. はじめに

重力波の検出<sup>1)</sup>やEvent Horizon Telescopeによる観測<sup>2)</sup>で、ブラックホールの存在はいよいよ疑う余地が無くなった。ただし、そこに物が吸い込まれてゆく際の現象に対しては、依然としてX線観測が重要な観測手段となる。X線の様々な強度変動、多彩なエネルギースペクトル、高速で飛び出すジェットが発生場所や機構など、まだ多くの謎が残る。

こうした謎を解明する鍵となるのが、広帯域・高感度・高精度なX線観測や、短時間変動をも捉えられるようになった可視光を含む、多波長同時観測である。ただしこれら装置の性能を十分に活かすには、光子数などの統計揺らぎが無視できる明るい天体を観測する必要がある。そこで、恒星質量ブラックホールが恒星と連星系をなし、質量降着によりX線を放射するブラックホール連星(BHB)が、最適な観測対象となる。

恒星質量ブラックホールは我々の銀河には数億個も存在すると見積もられているが、これまでBHBは70個ほどしか知られていない<sup>3)</sup>。「はくちょう座X-1」など準定常的に輝く数例を除くと、

それらの大部分はX線で突然に現れ、一時的にしか輝かない現象、すなわちX線新星として発見される場合が多い<sup>4)</sup>。よってBHBの包括的な理解には、X線新星の発見と監視が重要である。

MAXIは全天を監視し、X線での突発天体の発見を、最重要課題の一つとしている。実際、我々はこれまでにBHBを含むX線新星や、より短時間の突発現象（ガンマ線バーストや活動星のフレアなど）を捉え、世界に速報してきた。その科学的な意義は、MAXIのThe Astronomer's Telegram (ATel)への速報（2019年4月末現在307編）が、査読論文で600回近く引用されていることからわかる。

以下、MAXIによるX線新星の発見の過程と、発見された多様なX線新星の特徴を紹介する。また発見から示唆される新たな連星系の姿と、全天観測の科学的意義にも触れる。

## 2. 発見と追観測

MAXIの全天X線監視による新天体の発見は、データを自動監視する突発天体発見システム<sup>5),6)</sup>が発行するアラートメールから始まる。我々は、24時間2交代制でこのアラートメールの対処に当



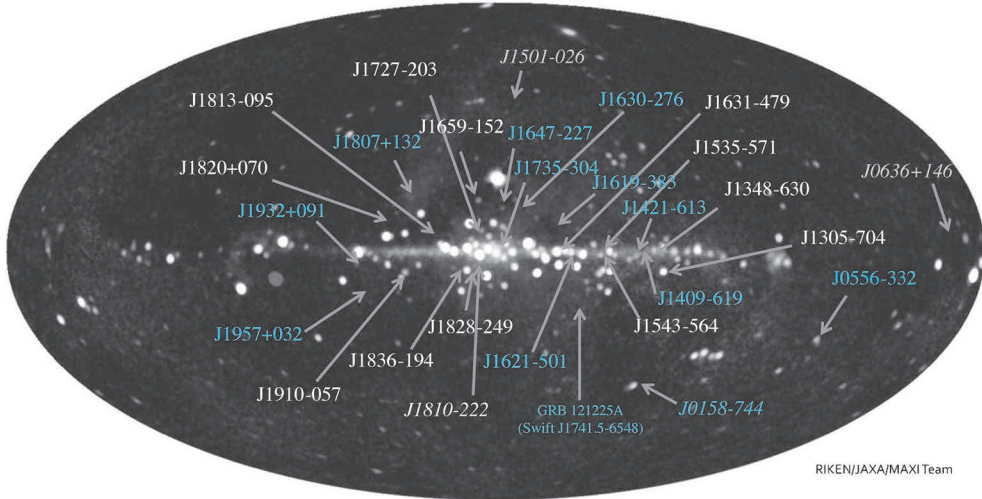


図1 MAXIが発見した新天体の位置をMAXIのGSCとSSCによって得られた全天図上に示した。ブラックホールは白で、中性子星は水色で、白色矮星は斜体水色で、正体不明な天体は斜体白でそれぞれ天体名を示した。なお、全天図を作成した後に明るくなった天体や暗い天体は全天図には表示されておらず、およその位置を矢印で示してある。

たっている。そして新天体を発見すると、いつまで明るい状態が続くかわからないため、その出現と位置を、世界中の研究者に急ぎメールで知らせる。その後、増光の様子やスペクトル、推測される正体などの情報も加えてATelに報告する。

MAXIは広視野で新天体を発見する能力は高いが、発見時の天体の位置決定精度は $0^{\circ}.1-0^{\circ}.5$ に留まるため、別衛星による追観測が重要となる。Swift衛星の科学運用チームのリーダー J. Kennea は、MAXIの運用初期の我々の不確かな情報にもめげず、多くの場合に報告から6時間以内に同衛星のXRT検出器で追観測を行ってきた。その結果、秒角の精度で位置が決まり、新天体か否か判断でき、さらなる追観測が可能になった。

XRTでも分解できない、球状星団の中の星が密集した領域に新天体を検出したときは、最高の位置分解能を誇るChandra衛星が天体を同定した。さらに最近では、天体が太陽近くのためSwiftが観測できない時なども、NuSTAR衛星やNICER X線観測装置が追観測を行い、3つの新天体を確認した。このようにMAXIは、世界の全

天モニターとしての役割を十分に果たしている。

こうして詳細な位置が報告されると、様々な波長で追観測が行われる。そして、数日のうちにそれらの結果がATelに報告され、その正体が明らかされていく。その様子は感動的できさえる。

### 3. 発見されたX線新星の正体と数

MAXIが検出した突発天体には、ガンマ線バースト等の短時間の突発現象もあるが、本稿ではX線新星に焦点を当てる。

弱磁場の中性子星やブラックホールは、自らは殆どもしくは全くX線を放射しない。しかしそれらが恒星との連星系を成すと、伴星からのガスが降着円盤と呼ばれる円盤を形成し、重力エネルギーを解放しつつ降着し、X線を放射する。このとき、降着する量が少ないとガスはいったん円盤の外縁部に溜まり続ける。そして溜まったガスの温度が上昇して電離し粘性が高まると、一気に降着が始まり、数十～数百日間だけX線が放射される<sup>7)</sup>。これが「X線新星」の最も代表的な例である。

MAXIは、観測当初から短時間の突発現象は捉える一方、X線新星に関しては観測を始めて1年余り、RXTE衛星など先行する諸衛星の後塵を拝していた。しかし2010年9月25日にMAXI J1659-152を発見して以来、MAXIはX線新星発見の先陣を切ることとなる。

新天体が発見され、MAXI自身も含め追観測が始まると、過去の知識から、数日で天体の正体に見当がつく。例えば、X線バーストや周期パルスが観測されれば、「表面」のある中性子星とわかる。他方、激しく不規則なX線の短時間変動に加え、べき乗型スペクトル、もしくは「低温度の熱的成分とハードテイル」というスペクトルが観測されるとブラックホール「らしい」<sup>4)</sup>となる。X線と電波の強度比は中性子星とブラックホールを判別する手掛かりとなり、可視光観測からは、伴星の情報や、減光による距離の推定値が得られる。

こうしてMAXIが発見し、MAXI名を冠するX線新星は、2019年4月末までに27天体となった。その主星の内訳は、まだ推測中のものも含め、ブラックホール（候補も含む）12、中性子11（うちパルサー1）、白色矮星1、不明3である。図1にはMAXIで得たX線全天図にそれらの位置を示し、図2と3に各天体の光度曲線を示した。ここに載せたのは、太陽近くのため詳細な位置が得られなかったJ1619-383とJ1630-276を除き、正真正銘の新天体であり、MAXI J0911-655のように、過去に暗いながらも受かっていた天体は含まない。

このようなX線新星の一部は、数年～数十年で再び明るくなる再帰X線新星なので、後発のミッションほど新天体の発見は難しくなる。にもかかわらず、MAXIによる銀河系内の新しいBHBの発見数12は、RXTEが17年間で築いた15個に次ぐ、歴代2番目の数となった。

## 4. 新天体の特徴

発見されたX線新星は、偶然にも面白いことに、他の衛星が発見したものを含めても、次の3つの期間で様相がかなり異なる（図2,3参照）。

### 4.1 第1期—暗いブラックホール新星

BHBや降着型中性子星のX線光度は、降着ガスに働く重力と放射圧が釣り合う「エディントン限界光度」で基本的に頭打ちとなる。この値は中心天体の質量に比例するので、中性子星より数倍から1桁ほど質量が大きいブラックホールでは、よりX線光度が高くなると期待され、実際、これまでの観測でその傾向が確認されている。

ところが2014年初めまでの第1期に発見された6つのBHBのX線ピーク強度（見かけの値）は、「ぎんが」衛星やRXTEが20-30年前に捉えたものより2桁ほど低く、半数は図2で青系統の色で示した中性子星X線新星と大差ない。このようなX線で暗い（強度の低い）BHBは過去に、RXTEやINTEGRAL衛星の銀河面サーベイによって発見されてきた。MAXIの全天観測により、同様な天体が高緯度（ $|b| > 5^\circ$ ）でも多く見つかるようになったといえる。なぜX線で暗いか、以下の3つの可能性が考えられる。

第1は、これらBHBが系統的に遠くに位置するという可能性である。実際、多くのBHB X線新星ではピーク光度はエディントン限界の1割程度という報告<sup>8)</sup>があり、また、RXTEなどが発見した銀河中心方向の暗いBHBではソフト状態も観測されているので、光度はかなり高かった可能性がある。このような遠方のBHB X線新星の発見は、後述する銀河系内のブラックホール総数の見積りという点で重要となる。

第2は、発見したBHBでは降着量が少なく、光度がエディントン限界に比べ大幅に低かったという可能性である。実際、これら6天体のうち4つ（J1659-152, J1836-194, J1305-704, J1828-249）では、エディントン限界で規格化した光

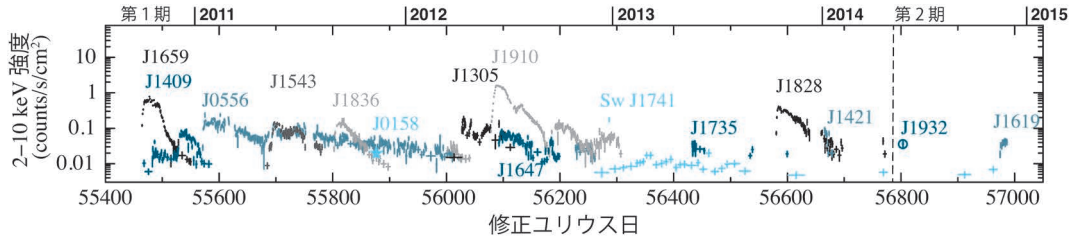


図2 MAXIが発見した新天体の光度曲線 (MJD 55400–57050)。ブラックホールは黒か灰色で、それ以外を青系統の色で示す。強度は、1日平均のデータを  $5\sigma$  以上になるようにピンまとめし、有意な点のみ記した。よって、1日未満の短い増光の場合は低く表示されている。(代表的なX線源「かに星雲」の強度は、 $2.2 \text{ counts/s/cm}^2$  である。)

度が増大する際の指標である、ソフト状態への完全な遷移 (本号 633 頁、志達による記事参照) は見られなかった。また、J1659では連星周期がこれまで発見されたBHBでは最短の2.4時間と見積もられている<sup>9)</sup>。このことも、連星系が幾何学的に小さいために、降着円盤に貯められる降着物質が少なかった可能性を示す<sup>10)</sup> (11月号掲載予定、浅井による記事も参照)。

第3に、これらのX線新星ではブラックホールが低質量で、エディントン限界光度そのものが低かったという可能性も考えられる。しかしBHBの平均質量 $\sim 7M_{\odot}$ は、ブラックホールの下限質量のたかだか2-3倍なので、この可能性は低い。

また、BHBではないが、この期間に小マゼラン雲近傍で発見されたJ0158-744も、白色矮星の超軟X線新星の初期爆発を初めて捉えた特筆すべき重要な発見である<sup>11)</sup>。

#### 4.2 第2期—暗く短い正体不明のX線新星

続く2017年中頃までの第2期の新天体は、MAXIで受かった期間が1スキャンからせいぜい数日と短いものが多い。第1期中性子星X線新星も様々な継続時間を示したが、この期間のものはそれらより2-3桁短い。

そのうちのひとつJ1957+032は、MAXIでは1年半の間に4度にわたって検出され、各検出は2-3スキャン (3-5時間) という短いものであった。Swiftによる追観測の結果と合わせ、同現象は、“Very Faint X-ray Transient (VFXT)” と呼

ばれる、非常に暗い中性子星連星系からの増光である可能性が指摘されている<sup>12)</sup>。

さらに短い例として、MAXIの発見後にSwiftでも約1日しか受からなかったJ0636+146<sup>13)</sup> や、Swiftの即時追観測でも受からなかったJ1501-026<sup>14)</sup> が挙げられる。これらの正体は不明で、高銀緯であることから、いわゆるX線新星ではないかもしれない。しかしMAXIが当初ガンマ線バーストと報告したGRB 121225Aが、後にX線新星Swift J1741.5-6548と判明した例<sup>5)</sup> もあるので、“burst only source” と呼ばれる中性子星の一種である可能性もある。

高銀緯でのこのような短いX線増光は、MAXIによって初めて多く捉えられ始めた。VFXTにせよ、J1932+091の解釈の一つである<sup>5)</sup> “Supergiant Fast X-ray Transient” と呼ばれる大質量星と中性子星の連星系にせよ、短時間でのX線増光のメカニズムは分かっていない。MAXIの全天観測は中性子星連星系の多様性という観点でも新たな情報を提供し続けている。

#### 4.3 第3期—巨大マンモスの時代

2017年半ば以降になると様相は一変し、今世紀最大級の明るさのJ1535-571の発見を初め、「ぎんが」やRXTEの時代に現れたような非常に明るいX線新星、いわば巨大マンモスを、MAXIは次々に発見した。

J1535とそれに続く奇妙な天体J1820+070の長期変動については、志達による記事を参照された

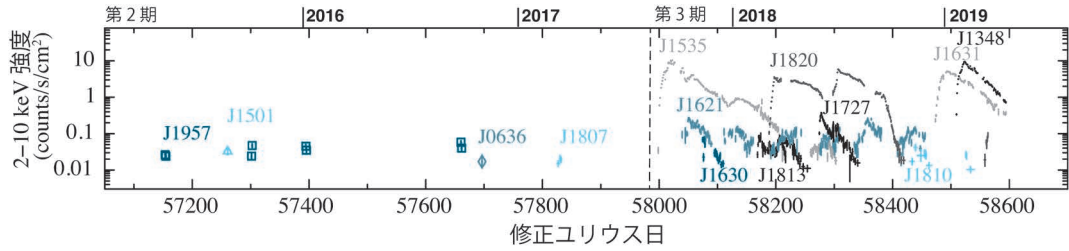


図3 (図2の続き, MJD 57050-58700)

いが, J1820ではX線のみならず, 可視光でも1秒以下の激しい短時間変動がかつてない精度で観測されている<sup>15)</sup>. これらの観測により, まだ謎が多いブラックホール特有の短時間変動やジェットの起源の解明が進むことが期待される.

それらに続くJ1631-479とJ1348-630は, 本稿の執筆段階ではまだ減光中だが, 先の2天体とは状態遷移の様子などがまた異なる特徴を示している. 統計的に十分な明るさを持つこれらの天体をNICERやNuSTARなど最新の検出器で観測することにより, これまでは統計的な問題で決め手に欠いた, ブラックホール近傍での相対論効果の検証<sup>16-18)</sup>や, 多波長観測による降着円盤の大局的な理解の進展が期待される. 世界最高のエネルギー分解能を持つXRISM衛星の打ち上げも待たれる. こうして明るいX線新星の相次ぐ発見により, ブラックホール研究も高性能X線検出器が十分活かせる新たな時代に入った.

## 5. 高銀緯に分布する新天体

MAXIで発見されたX線新星の距離を様々に見積もって3次元地図を作ると, それらは銀河中心方向に広く分布しており<sup>14)</sup>, 太陽系近傍で多く検出したわけではない. さらにこれまでも述べたように, MAXIで発見されたX線新星は, かなり高銀緯に分布している(図1). まだ約 $2\sigma$ の有意性であるが, MAXI X線新星のうち高銀緯( $|b| > 5^\circ$ )に分布する相対数(56%)は, 低質量連星系カタログ<sup>19)</sup>にある187個の天体から, 球状星団などを除いたサンプルの場合(26%)と比べ超

過を示す.

MAXIでは位置分解できない低銀緯の明るい天体付近での新天体の数なども考慮しなければならないが<sup>14)</sup>, 上記のことから, 銀河面を離れた高銀緯領域に, ブラックホールや中性子星を含む, 低質量連星系が数多く存在する可能性が示唆される. また, このことは, 同時に, 相当な数の孤立したブラックホールや中性子星が銀河面を離れて存在することも意味する.

この示唆は, 3つの課題に直結する. まず, 銀河面に集中する大質量星から生まれるはずのブラックホールや中性子星が, いかにして高銀緯まで分布するかという問題である. 次に, 仮に中性子星は誕生時のキックで銀河面を飛び出したとしても, MAXIで検出されるには連星を組まねばならず, 十分な確率で低質量星を捕獲できるかという問題. 最後に, ダークマターの候補となるMACHO探査では, 銀河系ハローに高い密度でブラックホールが存在する可能性には否定的な結果が出ており<sup>20)</sup>, その結果といかに整合させるかである.

## 6. 長期観測と今後への期待

このように, MAXIによる長期観測は新天体の発見のみならず, 統計的研究においても重要である. 高銀緯での天体の数の推定に加え, 銀河全体のブラックホールの総数を見積もるには, 現在のところ, BHBの発見された数とX線新星の再帰間隔が重要な観測量となる. かつて, X線新星は平均10-50年間隔で増光を繰り返すと予想されて

いた。しかし一部の天体を除き、この50年の間に1度しか増光していない天体も多い<sup>3)</sup>。BHBの数は、高密度星の元となる大質量星や連星進化の研究においても稀少な情報を与える。こうした研究を進める意味で、MAXIのさらなる長期運用が望まれる。

今後、さらなる長期観測により、重力波で発見されたような数十太陽質量<sup>1)</sup>をもつBHB X線新星も見つかるかもしれない。そして、MAXIが多くの再帰X線新星を検出してきたように、50年後、もしくは100年以上経って再びMAXI名を持つ天体が明るく輝き、MAXIの活躍を思い起こさせるであろう。

最後に、これらの研究成果は、長年にわたる多くのMAXIチームのメンバーの多大な貢献によるものであることを記しておく。また、本稿に対して大変有益なコメント等を頂いた、牧島一夫氏、常深博氏に感謝する。

### 参考文献

- 1) Abbott, B. P., et al., 2016, Physical Review Letters, 116, 061102
- 2) The Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L1
- 3) Corral-Santana, J. M., et al., 2016, A&A, 587, A61
- 4) McClintock, J. E. & Remillard, R. A., 2006, in "Compact stellar X-ray sources", eds. Lewin, W. H. G. & van der Klis, M., (Cambridge University Press), 157
- 5) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 6) 鈴木素子, 根来均, 2010, 天文月報, 103, 465
- 7) 嶺重慎, 1991, 天文月報, 84, 288

- 8) Dunn, R. J. H., et al., 2010, MNRAS, 403, 61
- 9) Kuulkers, E., et al., 2013, A&A, 552, A32
- 10) Meyer-Hofmeister, E., 2004, A&A, 423, 321
- 11) Morii, M., et al., 2013, ApJ, 779, 118
- 12) Beri, A., et al., 2019, MNRAS, 486, 1620
- 13) Kennea, J. A., et al., 2016, The Astronomer's Telegram, 9710
- 14) Negoro, H., & MAXI Team, 2017, 7 years of MAXI: monitoring X-ray Transients, 15, <http://maxi.riken.jp/conf/sevenyears/pdf/toc.html> (2019.8.5)
- 15) Sako, S., et al., 2018, The Astronomer's Telegram, 11426
- 16) 牧島一夫, 山田真也, 2010, 天文月報, 103, 186
- 17) 根来均, 2010, 天文月報, 103, 379
- 18) 海老沢研他, 2010, 天文月報, 103, 445
- 19) Liu, Q. Z., et al., 2007, A&A, 469, 807
- 20) Wyrzykowski, L., et al., 2011, MNRAS, 413, 493

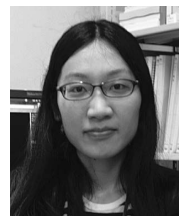
### X-ray novae discovered by MAXI

**Hitoshi NEGORO**

*Department of Physics, Nihon University, 1-8, Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan*

Abstract: MAXI discovered 27 X-ray novae including 12 black hole candidates in 10 years. Here, I describe how we have discovered and identified the X-ray novae, and introduce their various interesting properties. A suggestion from the discoveries and the importance of further all-sky survey with MAXI are also discussed.

# MAXIによるブラックホールX線連星の 長期モニタ：非常に大きな増光を示した MAXI J1535-571と MAXI J1820+070の観測成果



## 志 達 めぐみ

〈愛媛大学理工学研究科 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5〉

e-mail: shidatsu.megumi.wr@ehime-u.ac.jp

MAXIは、これまでに数多くのブラックホールX線連星のアウトバーストをいち早く検出し、全世界に速報してきた。さらに、その常時観測性を活かし、増光の始まりから再び見えなくなるまでの数十日～数百日の長期にわたって、ほぼ連続的なX線データを提供し、アウトバーストの全体像に関わる情報をもたらしてきた。本稿ではMAXIが新たに発見したブラックホールX線連星のうち、特に大きな増光を示したMAXI J1535-571とMAXI J1820+070の長期モニタの成果を紹介する。

## 1. はじめに

前稿に書かれているとおり、MAXIはこれまでに様々な種族のX線変動天体を発見し、全世界に速報してきた。その中でも、増光幅がひとときわ大きい天体がブラックホールX線連星である。これまでに銀河系内に見つかっているものの大部分は、太陽質量 ( $M_{\odot}$ ) の数倍程度より軽い、比較的低質量の星を伴う低質量X線連星であり、それら数十例のほとんどが、突発的なX線変動を示すトランジェント天体である。Cyg X-1のように、大質量星との連星で、ほぼ定常的にX線で明るいものは数例しかない。一方、中性子星と低質量星のつくる連星系には、X線で常に明るいものも数多く存在する。低質量X線連星がどのように形成されるのか、また中性子星に比べてブラックホールとの連星の方がなぜトランジェントになりやすいのかは、未だよくわかっていない。

多くのブラックホールX線連星は、普段はX線

で検出できないほど暗いが、ある日突然アウトバーストを起こし、数日～数週間で数桁以上もの増光を示す。増光の途中で、降着円盤の内縁部が、幾何学的に厚く光学的に薄い「放射非効率降着流」から、幾何学的に薄く黒体放射を出して効率的に冷える「標準円盤」に遷移する。それにともない、X線エネルギースペクトルが劇的に変化し、硬X線の強い「ハード状態」から、軟X線の卓越する「ソフト状態」へ遷移する<sup>1)</sup>。また、この遷移のタイミングで、光速の90%を超える高速のジェットも噴出することがある。その後、数カ月～1年ほどかけて減光し、途中でハード状態に再び遷移した後、やがて見えなくなる。

このように、ブラックホールX線連星は、ブラックホール近傍で起こる激しい活動現象を、アウトバースト全体でも約1年以下という観測しやすい時間スケールで見せてくれる。X線は降着ガスの重力エネルギーの解放で生じるため、基本的には質量降着率が高いほどX線光度が大きくなる。

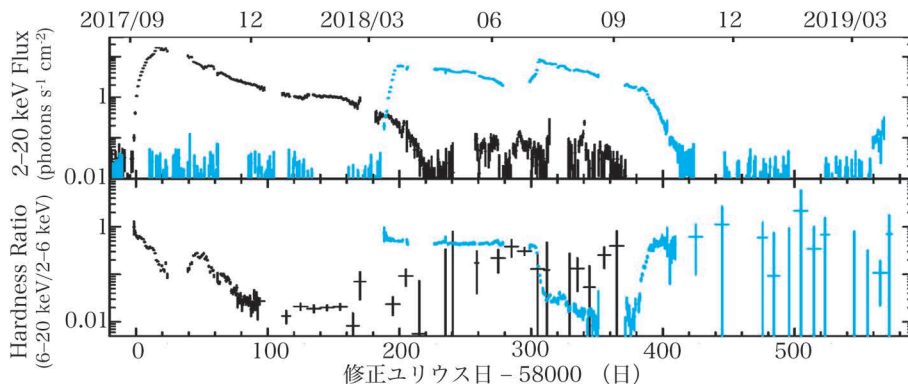


図1 MAXI J1535-571 (黒) と MAXI J1820+070 (青) のアウトバースト期間の X 線光度曲線とハードネス\*2.

したがって、アウトバースト中の長期モニタにより、ブラックホール降着流や噴出流の変化を非常に幅広い質量降着率にわたって調べられる。

MAXI は、ブラックホール X 線連星の増光をいち早く検出するだけでなく、その常時観測性を活かして、アウトバースト期間全体をほぼ連続的にカバーするユニークな X 線データを提供してきた。本稿では、MAXI で発見されたブラックホール X 線連星のうち、特に明るいアウトバーストを引き起こした MAXI J1535-571<sup>2)</sup> 及び MAXI J1820+070<sup>3,4)</sup> を例にとって、MAXI による長期モニタの成果を紹介する。

## 2. MAXI J1535-571：今世紀最大のアウトバースト

MAXI J1535-571 は、2017 年 9 月に発見されたブラックホール X 線連星である<sup>5)</sup>。発見直後の X 線強度は 30 mCrab<sup>\*1</sup> であったが、その後約 2 週間で 100 倍以上も増光して 5 Crab に達し、全天で Sco X-1 に次いで 2 番目に明るい X 線源となった (図 1)。5 Crab 以上に達したブラックホール X 線連星は過去に数天体しかなく、今世紀に限ると、2015 年の V404 Cygni (GS 2023+338) の特

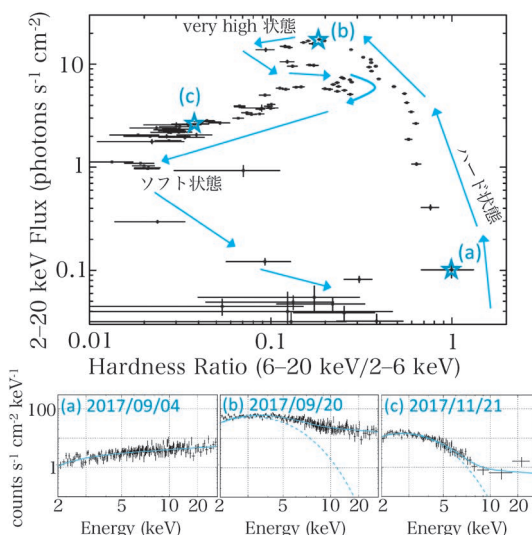


図2 (上) MAXI J1535-571 のアウトバースト期間のハードネス-強度図。(下) 上図 (a), (b), (c) で得られた代表的な X 線スペクトル。破線は標準円盤からの熱放射。

異なアウトバースト (数時間に数桁もの激しい光度変動を示した) を除けば最大の増光である。

図 2 上は MAXI J1535-571 のハードネス<sup>\*2</sup>-強度図であり、アウトバースト中の状態変化を概観するためによく使われる。ブラックホール X 線連星の多くは、1 度のアウトバーストで、ハードネ

\*1 かに星雲 (X 線天文学では標準光源としてよく用いられる) のフラックスで規格化した X 線強度。2-20 keV で 1,000 mCrab = 1 Crab  $\approx 3 \times 10^{-8}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。

\*2 軟 X 線強度に対する硬 X 線強度の比。

スー強度図上に反時計周りの円環状の軌跡を1つ描く。一方、MAXI J1535-571の場合、増光のピーク(期間(b))を過ぎた後に、ハードネスが一度、減少から増加に転じた結果、図の上部に小さな円環が作られた。増光の立ち上がりでは、べき型で硬X線の強い典型的なハード状態のスペクトルが見られ(期間(a))、期間(c)付近のハードネスが最も小さくなった時期には、標準円盤からの軟X線成分が卓越した典型的なソフト状態のスペクトルが見られた。一方、期間(b)付近の小さな円環をなしている時期には、標準円盤の軟X線成分と、硬X線のべき成分の強度が両方とも非常に大きくなった。このような状態は、「very high状態」と呼ばれ、エディントン光度<sup>\*3</sup>の数十%を超えると現れることが知られている<sup>6)</sup>。したがって、増光のピーク付近では、エディントン光度近くまで達していたと考えられる。ピーク光度がエディントン光度と等しく、距離は銀河中心までの8 kpcと仮定すると、ブラックホール質量は約6  $M_{\odot}$ と見積もられる。

### 3. MAXI J1820+070：2段階の増光、さらに…

MAXI J1820+020は、2018年3月に発見されたブラックホールX線連星である<sup>8)</sup>。MAXIによる発見の数日前に、可視光でも超新星全天自動探査チームによって突発天体(ASSASN-18ey)が見つかっており<sup>9)</sup>、MAXIの発見直後のSwift衛星による追観測から、両者は同一天体と判明し<sup>10)</sup>、X線連星であることも確定した。可視光は、降着円盤とジェットからの放射が起源と考えられる。

図1のとおり、発見後2週間は増光を示し、その後3ヶ月半ほどかけてわずかずつ減光した。この間、常にハード状態にとどまった(図1下段)。2018年6月末から再び増光し、7月上旬にはおよそ2 Crabに達した。この第2ピークの直前に、

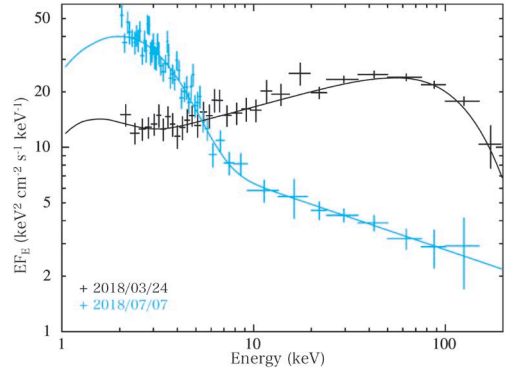


図3 MAXI (2-20 keV) とSwift衛星BAT検出器(>15 keV)でX線強度の第1ピーク付近(黒)と第2ピーク付近(青)に得られたMAXI J1820+070の広帯域X線スペクトル。実線は標準円盤からの放射と、その円盤光子を種とするコンプトン散乱を考慮したモデルで両データを解析して得られたベストフィットモデル。

ハード状態からソフト状態へ遷移した。ブラックホールX線連星がこのように2段階の増光を示し、4ヶ月もの長い間ハード状態にとどまった後、状態遷移を示すのは非常に珍しい。

図3は、MAXIとSwift衛星BAT検出器を用いて、第1・第2ピーク付近で得られたX線スペクトルである。興味深いことに、状態遷移が2度目の増光でしか起こらなかったためスペクトル形状は全く異なるが、1-100 keVで積分したピーク光度はほぼ等しい。降着ガスの解放するエネルギーがX線放射に変換される効率が大きく変わらなかったと仮定すると、この結果は、ハード状態からソフト状態への状態遷移は質量降着率だけでは決まらず、何か他の要因が関係していることを示唆する。同様の結果が、これまでに複数回アウトバーストを起こしたブラックホールX線連星GX 339-4でも得られており、遷移時の光度がアウトバーストごとに1桁近く異なる<sup>11)</sup>。このことから、遷移光度の違いは、連星系固有のパラメータ(ブラックホール質量やスピン、伴星の質量など)で

\*3 球対称降着において、中心天体による重力と放射圧がつりあう限界光度。降着ガスが水素のみの場合、 $\approx 1.3 \times 10^{38} (M/M_{\odot}) \text{ erg s}^{-1}$ 。



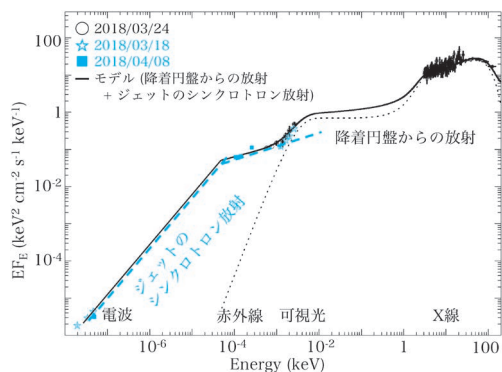


図4 X線強度の第1ピーク付近で得られたMAXI J1820+070の多波長スペクトルエネルギー分布。縦軸は、単位エネルギーあたりのエネルギーフラックスに、さらにエネルギーを掛け算したもの。減光補正済。2018年3月24日にMAXIとSwift/BAT、OISTERチームの観測で得られた同時データ(黒)に、他チームによる同時期の電波～可視光の観測結果<sup>7)</sup>を重ね合わせた。降着円盤からの放射成分について、可視光付近(円盤外縁部からの放射に対応)のフラックスが大きくなっているが、これは円盤内縁部からのX線照射の効果を考慮したモデル(黒破線)で説明できる。

はなく、アウトバーストごとに变化しうる物理量(降着円盤の大きさや円盤上の磁場強度など)が関係していると考えられる。

MAXI J1820+070は、北半球から見える天体であったことや、星間減光が比較的小さく、距離が3 kpc<sup>12)</sup>と近かったことなどの好条件が重なったために、様々な波長で盛んに観測された。我々も、光赤外線天文学大学間連携チームにご協力いただき、可視光・近赤外線・X線の同時観測ができた。図4は、X線強度の第1ピーク付近(ハード状態)で得られた多波長スペクトルエネルギー分布である。解析の結果、その形状は、降着円盤からの放射とジェットからのシンクロトロン放射によって説明でき、ジェットは主に電波～可視光の放射成分に寄与していることがわかった。

2度目の増光の後、徐々に減光し、2018年11月にはMAXIで見えなくなったが、発見からちょ

うど1年となる2019年3月に、再び増光し始めた(図1)。4月4日現在、約50 mCrabの明るさにまで達している。可視光では、MAXIで暗くなった11月以降も、アウトバースト開始前の静穏期よりも数倍明るい状態が続いていることが報告されている<sup>13)</sup>。これは、伴星から降着円盤への質量供給が継続していることを示唆しており、円盤へのガスの蓄積がある一定のレベルに達したことで、X線で再び明るくなったと考えられる。今後どのような変動を示すのか、興味が尽きない。

#### 4. まとめと今後の展望

MAXIは、その常時観測性を活かし、ブラックホールX線連星のアウトバーストのほぼ全期間にわたる長期データを提供し、X線スペクトルの状態変化を幅広いX線光度でモニタすることに成功してきた。今回紹介した2天体のふるまいを比較すると、X線光度やスペクトルの変化の仕方には非常に大きな個性が見られる。しかし、その個性がどういう物理で生じるかは、未だによくわかっていない。これまでに見つかっている銀河系内のブラックホールX線連星はわずか数十個程度である。サンプル数を増やし統計的な調査を行い、ブラックホール降着流の普遍性・多様性を理解するために、今後もMAXIによるブラックホールX線連星のモニタを継続する必要がある。また、スペクトルの変化から、降着流の幾何構造や物理状態を詳しく推定するためには、感度やエネルギー分解能などでMAXIに勝るポインティング型のX線観測装置を用いた追観測も重要である。加えて、ジェット噴出と降着円盤の関係性を明らかにするために、電波から可視光帯域も含めた多波長観測が不可欠であり、様々な波長の観測チームと連携を密にしていきたい。

#### 謝辞

本稿に述べた内容は、筆者らの投稿論文<sup>2-4)</sup>に基づくものであり、より詳しい結果はそちらをご

覧いただきたい。この場を借りて、中平聡志氏をはじめとする MAXI チームの共著者の皆様と、MAXI J1820+070 の可視光・近赤外線観測を実施し、データを提供下さった光赤外線天文学大学間連携チームの皆様深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) Done, C., et al., 2007, *A&A Rev.*, 15, 1
- 2) Nakahira, S., et al., 2018, *PASJ*, 70, 95
- 3) Shidatsu, M., et al., 2018, *ApJ*, 868, 54
- 4) Shidatsu, M., et al., 2019, *ApJ*, 874, 183
- 5) Negoro, H., et al., 2017, *The Astronomer's Telegram*, 10699
- 6) Kubota, A., & Makishima, K., 2004, *ApJ*, 601, 428
- 7) Russell, D. M., et al., 2018, *The Astronomer's Telegram*, 11533
- 8) Kawamuro, T., et al., 2018, *The Astronomer's Telegram*, 11399
- 9) Tucker, M. A., et al., 2018, *ApJ*, 867, L9
- 10) Kennea, J. A., 2018, *The Astronomer's Telegram*, 11406
- 11) Dunn, R. J. H., et al., 2008, *MNRAS*, 387, 545
- 12) Gandhi, P., et al., 2019, *MNRAS*, 485, 2642
- 13) Baglio, M. C., et al., 2019, *The Astronomer's Telegram*, 12596

### Long-term Monitoring of Black Hole X-ray Binaries with MAXI: Very Bright Outbursts from MAXI J1535–571 and MAXI J1820+070

Megumi SHIDATSU

*Department of Physics, Ehime University, 2-5 Bunkyocho, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan*

Abstract: MAXI has detected many outbursts of black hole X-ray binaries and promptly alerted the astronomical community all over the world. Moreover, it has almost continuously monitored the sources over their entire outburst periods, and provided overall outburst properties. In this article, we introduce the results from the long-term monitoring of the newly discovered black hole X-ray binaries MAXI J1535–571 and MAXI J1820+070, which showed very bright outbursts.

# MAXI-NICER 連携で切り拓く X 線突発天体

岩 切 渉

〈中央大学理工学部物理学科 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27〉

e-mail: iwakiri@phys.chuo-u.ac.jp



近年、継続時間の短い貴重な突発現象の時間経過を研究する時間領域天文学が活発である。全天 X 線監視装置 MAXI や硬 X 線の Swift 衛星が突発天体を発見・速報し、様々な観測波長のチームに伝えることでこの分野を牽引してきた。しかし、MAXI の観測波長帯域でのみ輝き、急速に減光する突発天体に対しては、即時追観測が間に合わず、未開拓領域として残されている。そこで我々は、MAXI と同じく国際宇宙ステーションに搭載された X 線望遠鏡 NICER と協力し、MAXI と NICER による MANGA および OHMAN と名づけた 2 つの連携により、突発現象の即時観測を目指している。これまでにアルゴルからの X 線フレア食の観測や、MAXI 新星の発見から約 4 時間後の NICER による追観測に成功した。

## 1. 即応時間と観測感度の未開拓領域

MAXI チームでは突発天体発見の報せをいち早く世界に伝えるべく、前号の三原氏、根来氏の記事にもあるように、ほぼリアルタイムで国際宇宙ステーション (ISS) から送られてくる MAXI の観測データを突発天体発見システム<sup>1)</sup>によって監視し、疑わしきイベントがあった場合には、当番がその詳細を確認する体制をとっている。そのため、当番に従事していると、新たな X 線新星や突発現象を発見する時がある。昼夜を問わずにやってくるこの瞬間は、どんなに眠くともハッと目が覚める。そして、「これは一体何事が宇宙で起きたのか?」という好奇心が湧き上がってくるのを感じつつデータを解析し、速報を準備する。しかし、必ずしも MAXI のデータのみで、この好奇心というものに十分に答えられないことがある。例えば、本号の芹野氏の記事に登場する MAXI 未同定天体 MUSST が現れた時には、「あの光は一体…」というモヤモヤとした感情が晴れることはない。

MAXI は全天スキャンにより突発現象を高い効率で検出できるが、一つの点源を観測できる時間は 92 分毎に約 60 秒しかないため、しばしば光子数が不足し、次のスキャンまでの情報が得られず、位置精度も約 0.3 度と必ずしも十分ではない。そこで、迅速に MAXI のトリガー情報を提供し、視野は狭いが感度は高い検出器を搭載したポインティング型の衛星に、追観測を行ってもらうことが重要となる。これまで、MAXI の発見は多くの場合、米国のガンマ線バースト探査衛星 Swift に通報され、Swift の即応ポインティング観測で対象天体の誤差が約 3 秒角にまで狭められるとともに、Swift 自身や他の望遠鏡で、天体の詳細なスペクトル情報や時間遷移が明らかにされてきた。しかし、X 線衛星としては抜群の即応性を持つ Swift 衛星といえども、MAXI で突発天体を検出してからその情報を受け、対象に向けて姿勢制御を決断・実行するには、どんなに早くとも ~3 時間を要する。つまり、この「~3 時間」以内が未開拓領域であり、この間に X 線の突発天体・現象がどのように変動し、どのように消えてゆくか、

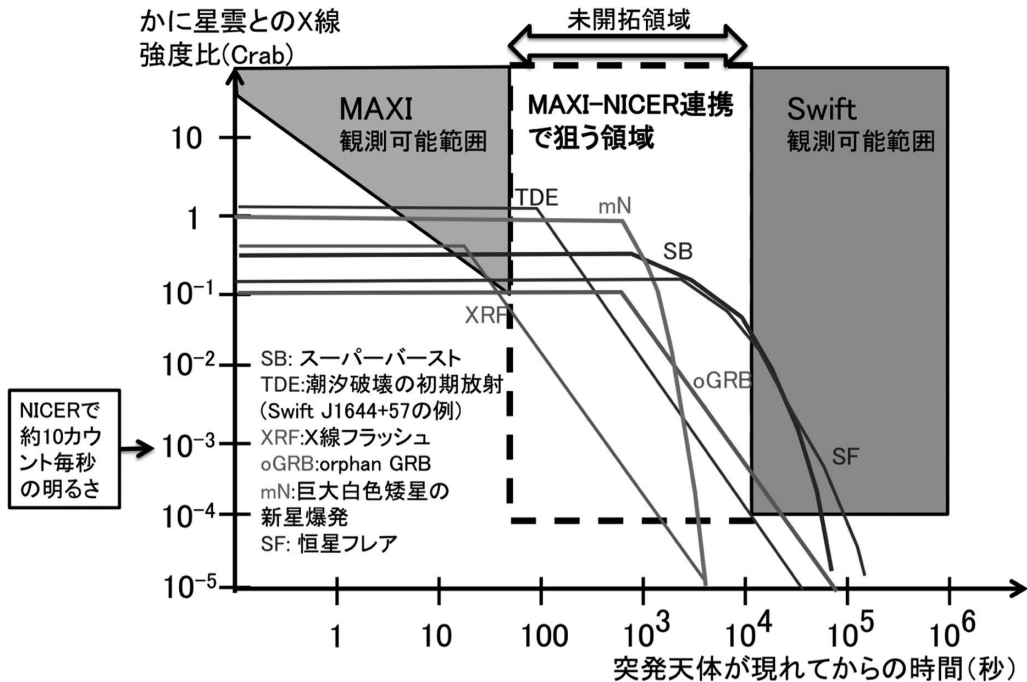


図1 さまざまなX線の急速減光天体の光度曲線を、MAXI及びSwiftの観測可能範囲と比べたもの。

十分に観測されていない。中には急速に減光する天体も存在している。図1に、この未開拓領域をいくつかのX線突発天体の光度曲線とともに示す。MAXIで観測される突発天体は多岐にわたっている。X線フラッシュ、MUSST（本号の芹野氏の記事参照）といったものや、詳細な観測例が少なくスペクトルの時間発展が十分に理解されていない、太陽フレアの10万倍以上の規模を持つ巨大恒星フレア（本号の坪井氏の記事）、中性子星表面で起きる不安定な核融合のうち、通常のX線バースト（数十秒で終わる）に比べてずっと長く、1時間以上も続くスーパーバースト<sup>2)</sup>、チャンドラセカール限界に近い白色矮星での新星爆発<sup>3)</sup>、星がブラックホールに落ち込む際の潮汐破壊現象<sup>4)</sup>の初期放射など、この未開拓領域には興味深い物理現象が集まっている。ここにどうにかして分け入ることはできないのか。そんな折、「X線望遠鏡NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) がISSに搭載される」と

いうことが2014年に決まった。

## 2. NICER 望遠鏡がISSにやってくる

NICER<sup>5)</sup>は、NASAゴダード宇宙飛行センターで開発されたX線観測装置である。その科学的な目的は、パルサーの詳細なパルスプロファイルの観測から一般相対論的效果の情報を引き出し、中性子星の半径と質量の比などを精度よく推定し、それを高密度核物質の状態方程式の決定に役立てることである。NICERの構成は、同じ視野を持つ56個のX線集光鏡と、その焦点面（焦点距離～1m）に非常に信号処理速度が速い（ナノ秒）シリコンドリフト検出器を配したX線望遠鏡である。撮像能力は持たないが、点源に対しては軟X線帯域で現在最大の有効面積 (>2,000 cm<sup>2</sup> @1.5 keV) を持つ。地球周回に伴うISSの自転を打ち消すため、NICERは自分自身で星姿勢系をもち、経緯台で自動的に目標を追尾する。

「NICERがISSにやってくる」。我々MAXIチー

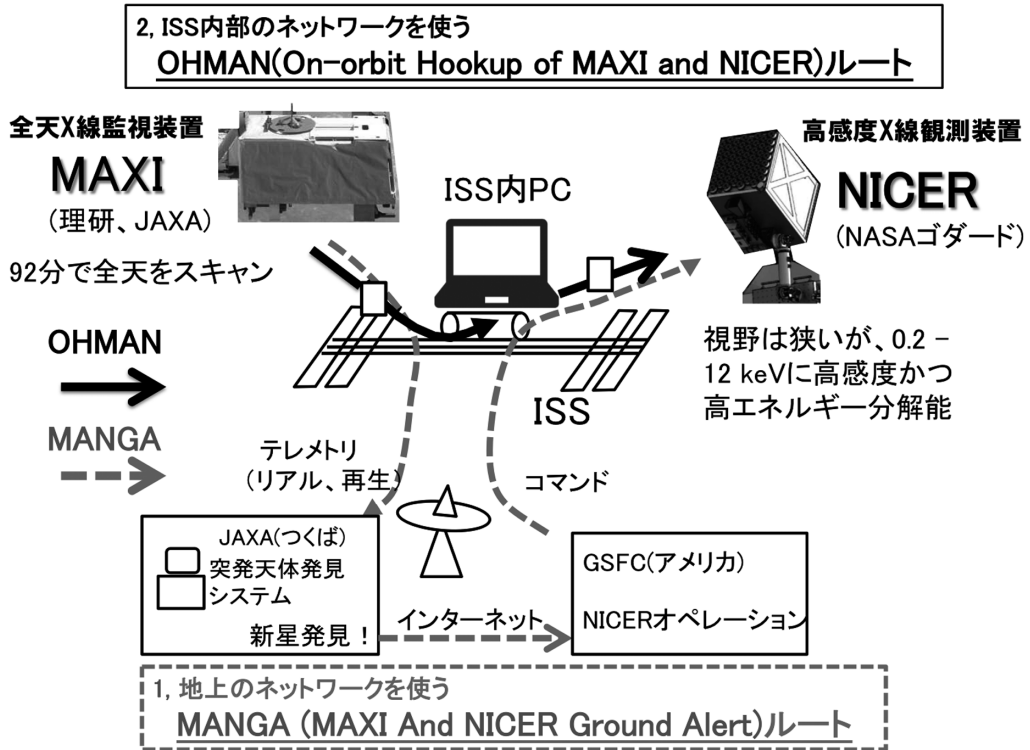


図2 MAXI-NICER連携, MANGAとOHMANに関する模式図.

ムはそれを聞いて、この機会を逃してはならぬと、図2に示す2つのMAXIからNICERへの突発現象情報の伝達ルートを構想し、NASAのNICERチームと打ち上げ前の2015年頃から議論を開始した。

伝達ルートの1つ目は、これまで通りMAXIのデータは地上（JAXA 筑波宇宙センター）にて突発天体発見システム<sup>1)</sup>により監視し、そこで検出された情報を、インターネットを通じてNICER側に送るというものである。我々はこれをMANGA（MAXI And NICER Ground Alert）と名付けた。この方法は他の衛星にも使えるが、相手がNICERであると特に効果的である。まず、ISSとは1日の70%の時間常に通信が接続されているので、NICERは1日の70%の時間、リアルタイムで即座に観測天体の変更が可能である。さらに、衛星では通常その全体を姿勢制御して目標

座標に向けなければならないが、NICERの場合は巨大なISSには全く影響なしに自身を目標に向けることができるため、簡単でリスクが少ない。これらのメリットは非常に大きく、例えば日本の「すざく」衛星でガンマ線バーストの発生5時間後から残光観測に成功した際の田代氏の記事<sup>6)</sup>をお読みいただければ、人工衛星を数時間以内に姿勢変更することの困難さが伝わるであろう。

さて、両機器ともにISSに搭載されているのならば、わざわざ地上を経由せずとも、ISS上で繋がれるはず、と考える読者も多いだろう。それが、図2に示したもう一つのMAXI-NICER間の情報伝達ルートで、これはNICERチームのリーダー、Gendreau氏によってOHMAN（On-orbit Hookup of MAXI And NICER）と名付けられた。具体的には、地上で動いているMAXIの突発天体発見システムをISS内部にあるノートPCにイ

ンストールし、そこで得られた新星や突発現象の情報をそのままダイレクトにNICERに伝え、観測を開始するというものである。しかし、地上でならばすぐにでも開通できそうなこのルートも、ISS上ではそう簡単ではなく、OHMAN計画を実現する上で障壁が2点ある。1つ目は、普段JAXA（つくば）で動かしている突発天体発見システム<sup>1)</sup>を、ISS内のマシンパワーやOSが限定された環境で動かす必要があることである。2つ目は、NICER側がISS内のPCからMAXIの新星情報を受け取れるように、機上ソフトウェアを書き換えることである。

もしこのOHMANルートを開通できれば、即応時間はほぼNICER望遠鏡の現在位置と目標天体位置の角度の移動時間で決まり、MAXIによる突発現象の発見から約2分以内にNICERによる高感度のX線観測を始めることができる。つまり、図1に示す空白の未開拓部分を探索することができる。

日米による検討の結果、まずはMANGA経路で変動のタイムスケールが1日程度の恒星フレアや、数日以内で進行するブラックホールX線連星の状態遷移などに対して、1時間以内の即応観測を目標にして進め、並行してOHMANに向けた準備を行うこととした。

### 3. MAXI-NICER連携の開始

#### MANGAの現状

NICERは2017年6月にISSへと向かい、無事に設置され、6月後半から順次観測を始めた。NICERのメインサイエンスや打ち上げの様子に関しては、NICERの集光鏡の開発に携わっていた榎戸氏のISASニュースの記事<sup>7)</sup>にも詳しい。

MANGA連携観測は、打ち上げ前から議論を重ねていたおかげで、NICER打ち上げ直後の2017年7月から開始することができ、2019年5月現在、23例の観測に成功している。その内訳は、9例が恒星フレア、8例が新天体、6例が既知

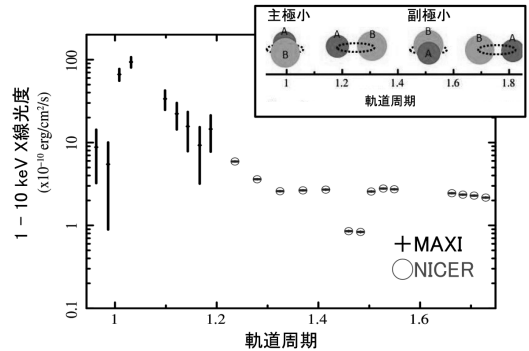


図3 アルゴルで観測された巨大恒星フレアの食。アルゴルBがAの後ろに来る、可視光で見たときの副極小で、NICERが食によるX線減光を観測できた。

のX線連星の時間変動に対するフォローアップ観測であった。

図3にMANGAの恒星フレアの観測例を示す。アルゴルが食変光星であるということは本誌の読者の方々には言わずもがなであろう。一方で、アルゴルがしばしば巨大フレアを起こすフレア星であることはあまり知られていない。恒星フレアの場合、太陽フレアと違って撮像が困難なため、そのループサイズは観測される高温プラズマの情報に冷却のモデルを適用して推定する必要があり、間接的にしか求まらない。ところがアルゴルの場合は、もしフレアの食が観測されれば、連星軌道パラメータがよく分かっているため、フレアループのサイズを幾何学的に制限できるという大きなメリットを持つ。これまでにアルゴルのX線フレア食は2回だけ偶然に観測されており、いずれも副極小で起こった<sup>8),9)</sup>。可視光で明るい主極小ではX線の減光は見られないため、X線フレアを起こすのは可視光で暗いアルゴルBであることもわかる。今回MANGAによって、初めて狙い通りに副極小にてフレア食の観測に成功し、この時のフレアループの高さは約2太陽半径以上であったことが推定された。

次にMANGAの観測が多かったのが、X線新星である。NICERが打ち上がったからは、ちょ

うど前号の根來氏の記事における「第3期—巨大マンモスの時代」に対応しており、かに星雲よりも明るくなる X 線新星が頻発した。高カウントレートの観測に強い NICER は、このような明るいブラックホール新星（前号の志達氏の記事に詳しい）のミリ秒スケールの早い時間変動の観測にとっても適しており、MANGA 連携によって発見初期の早い段階から観測が行われ、詳細な時間変動解析で NICER の威力を発揮している<sup>10), 11)</sup>。観測開始までの迅速性についての最速記録は MAXI J1727-203 のフォローアップ観測で、MAXI での発見から約 4 時間であった。目標の 1 時間以内の観測はまだ達成できていないが、MAXI 側も NICER 側もより早くできるように努力を続けている。

### OHMAN の現状

OHMAN 計画を実現する上での障壁のうち、1 つ目の突発天体発見システム<sup>3)</sup>を ISS 内のノート PC で動作させることに関しては、JAXA 宇宙科学研究所の「小規模プロジェクト」の予算を頂いてソフトウェアの改良を行い、地上での試験を終え、2018 年度の後半に実際に ISS 内部の PC にインストールし、ISS 一周回分にわたり動作させることに成功した。2 つ目の NICER の機上ソフトウェアの書き換えに関しては、2018 年の ISS R&D Conference にて開催された、ISS 利用に関する「JAXA/NASA 共同ワークショップ」<sup>12)</sup>において、MAXI-NICER 間のネットワークの具体的な議論を行い、JAXA-NASA 間で担当者間の合意を得て、NASA の予算獲得に向けて動くこととなった。大げさと思われるかもしれないが、軌道上の装置のソフトウェア書き換えは常に細心の注意を要し、まして異なる国の異なる装置間の話となれば、いたしかたない。もし日本の MAXI が発見した X 線星をアメリカの NICER が即時追跡観測したら、それは誰が見ても ISS 上の日米協力の成功であり、まことの意味での「国際」宇宙ステーションと言えよう。また進展等があれば、学

会やシンポジウムを通してご報告していきたい。

### 謝 辞

いつも急なお願いを聞き入れてくれる Keith Gendreau 博士を始めとした NICER チームの皆様と、OHMAN 実現のために動いてくださっている JAXA の皆様に感謝します。また、本稿の執筆にあたって、有用なコメントを頂いた牧島一夫氏、常深博氏に感謝します。

### 参考文献

- 1) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 2) in't Zand 2017, in 7 years of MAXI, ed Serino, M., et al.
- 3) 森井幹雄, 2015, 天文月報, 108, 225
- 4) 川室太希, 2018, 天文月報, 111, 856
- 5) Gendreau, K. C., et al., 2016, SPIE, 9905, 99051H
- 6) 田代信, 2007, 天文月報, 100, 254
- 7) 榎戸輝揚, ISAS ニュース 2018 年 6 月号
- 8) Schmitt, J. H. M. M., & Favata, F., 1999, Nature, 401, 44S
- 9) Schmitt, J. H. M. M., et al., 2003, A&A, 412, 849S
- 10) Stevens, A. L., et al., 2018, ApJ, 865, L15
- 11) Kara, E., et al., 2019, Nature, 565, 198
- 12) [http://iss.jaxa.jp/topics/2018/08/180816\\_workshop.html](http://iss.jaxa.jp/topics/2018/08/180816_workshop.html) (2019/5/17)

### The new observational system of X-ray transients based on the MAXI and NICER collaboration

Wataru IWAKIRI

*Department of Physics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan*

Abstract: MAXI has discovered many X-ray transients in the last 10 years. To reveal properties of short soft X-ray transients, we are going to proceed with the two kinds of collaborations between MAXI and NICER, called MANGA (MAXI and NICER Ground Alert) and OHMAN (On-orbit Hookup of MAXI and NICER). In this article, we report the detail and current status of these collaborations and the observational result on X-ray flare eclipse from Algol obtained by MANGA.

# MAXI 全天 X 線監視装置 MAXI で捉えた 恒星からの超巨大 X 線フレア

坪井 陽子

〈中央大学理工学部物理学研究科 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27〉

e-mail: tsuboi@phys.chuo-u.ac.jp



MAXIが稼働を開始してから10年。この間、既に27の星から130発以上の超巨大なフレアを観測した。りょうけん座RS型変光星や赤色輝線矮星（dMe型星）だけでなく、降着円盤を伴わない、単独の前主系列星からも大光度のフレアを検出した。これは今まで提唱されてきた、連星間での磁氣的相互作用、物質の降着、星と円盤との磁氣的相互作用などが、MAXIで検出される超巨大フレアをトリガーするために必ずしも必要でないことを示唆する。太陽における極小なフレアから我々の観測した超巨大恒星フレアまで、その光度の範囲は10桁を超える。ようやく、恒星で起こるフレアを広いダイナミックレンジで理解する素地を整えることができた。

## 1. 恒星 X 線の発見から MAXI 登場まで

太陽 X 線は、第二次世界大戦が終結して間もない1949年、アメリカのロケット実験によって発見された<sup>1)</sup>。それからしばらく経った1973年、初めて太陽の X 線画像が得られた。スカイラブという宇宙ステーションに X 線望遠鏡が備えられたのである。しかしそこに映し出された太陽は、我々が普段目にする太陽とは大きく様相を異にしていた。可視光帯域で見られる様な太陽とは対照的に、X 線放射領域はきわめて非一様で、図1左のように、光球から立体的に飛び出していた。

スカイラブで撮られた X 線画像を時系列で追っていくと、外層へと開いた形状をし、定常的に薄く光る「コロナ」と、ループ状の構造を持ち、急激に増光する「フレア」の2成分に大別された。「フレア」で光るループは磁力線の構造をトレースしていると考えられ、その形状が急激に変わって磁気エネルギーが熱エネルギーに変換した結果プラズマが生成されると考えられた。しかし、

「コロナ」は静穏的でありながら X 線を放出するほどの高温（100万度程度）になっており、この加熱源が何であるのか、高温がいかにして保たれているのか、という謎も生まれた。

太陽系外の恒星はというと、1974年に初めて「コロナ」が連星系カペラにおいて検出され<sup>2)</sup>、1975年に「フレア」が赤色輝線矮星（dMe型星）同士の連星系、くじら座 UV 星から発見された<sup>2)</sup>。これらを皮切りに、りょうけん座 RS 型変光星などの近接連星系から、フレアの発見が相次いだ。

特に、本格的な X 線望遠鏡を初めて搭載したア

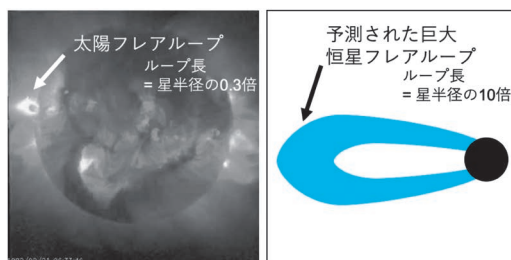


図1 ようこう衛星で撮像された太陽の X 線写真(左)<sup>2)</sup>と MAXI で検出された巨大恒星フレアの模式図(右)。



インシュタイン衛星 (1978-1981) は検出感度を大幅に改善し、X線帯域における恒星のサンプル数を数百までに伸ばしただけでなく、それまでX線が検出されていなかった種族、例えば前主系列星 (Tタウリ型星)、などからのX線を初検出した。さらに、強い輝線を伴わない「弱輝線Tタウリ型星」という新しい種族を前主系列星の仲間として増やしたことは特筆すべきであろう。この役割はローサット衛星 (1990-1999) による全天探査に引き継がれ、活発なコロナ活動を起こす恒星の全天カタログが完成した。

X線天文衛星で星のサンプル数が増加したことにより、星の「コロナ」の統計的議論が可能となり、星の全波長域での光度、自転速度、自転周期と対流の周期との比 (ロスビー数)、といった物理量のそれぞれとX線光度との関係が得られていった<sup>3)</sup>。一方で、突発的に起こる「フレア」のサンプルを集めるのは簡単ではなかった。特に巨大なフレアほど発生頻度も低く、検出例は非常に限られていた。

そのような中、100分に一度、 $20^{\circ} \times 180^{\circ}$ の領域を走査する Ariel-V 衛星 (1974-1980) の Sky Survey Instrument (SSI) は、巨大フレアのサンプルを集めるのに健闘した。Pye and McHardy (1983)<sup>4)</sup> と Rao and Vahia (1987)<sup>5)</sup> は、両者合わせて17個の星から20個の巨大フレアを検出した。また、後者はフレアの最大X線光度と全波長域から得られた光球の光度との間に正の相関があるという統計的議論まで行なっている。これは短時間の周期で大視野を走査するX線監視装置が巨大フレアをサンプリングするのに有効であることを示していた。

巨大フレアには、その発生のトリガーの正体、ループの構造、星はどこまで巨大なフレアを発生しうるか、コロナとの関係は、などの謎があった。また太陽系近傍に巨大フレアを起こす星がどのように分布するか、に答える無バイアスサーベイも存在しなかった。これらの問いに答えることができるミッションが待たれた。

## 2. MAXIによる恒星フレアサーベイの幕開け

Ariel-V 衛星が稼働を終えて四半世紀が過ぎた2009年7月、国際宇宙ステーション (ISS) に MAXI が搭載されることになった。MAXI の比例計数管「ガススリットカメラ (GSC)」には160度角幅のスリットが備えられ、進行方向と天頂方向の2方向に置かれた。MAXI は宇宙ステーションの動きに合わせて90分に一度全天の97%を走査し<sup>6)</sup>、Ariel-V 衛星のSSIと比べると、1回のスキャンあたり、一桁近く大きい立体角を走査することとなった。

問題は感度であった。1スキャンで検出できる点源のX線強度は、Ariel-V 衛星ではかに星雲の0.02倍なのに対し、MAXI のGSCでは0.1倍であった。よって、フレアの研究を今まで以上に新たに展開できるかは、MAXI/GSCの感度限界付近までフレアサーチを行なえるか否かにかかっていた。

そこで我々は、日本大学の根来らが開発した「突発天体発見システム<sup>7)</sup>」でフレア探査を行うと共にデータを全て目視で確認する方法をMAXI稼働後の数年間、併用した。目視によるチェックは半径10度角の領域を1日積分で画像化し、パラパラ漫画のように増光を判断していくものであり、中央大学の学生が日々、行った。MAXIの感度で検出できそうな星は我々の近傍に位置し、銀河面ではなく全天に一様に分布する。そのため半径10度角の円200個で全天を覆うこととなった。このハイブリッドなサーチが功を奏し、フレアイベントは、月に1-2個というAriel-V衛星を超えるペースでMAXI稼働直後から見つかっていった<sup>8)</sup>。

当初、星からフレアが受かっても、無数に、それこそ星の数ほどある星の候補からMAXIで検出されたX線源を特定することは難しいのではないかと、という懸念があった。しかし、先述のローサット衛星が全天探査で検出した明るいX線源のカタログ (ROSAT All-Sky Survey Bright Source

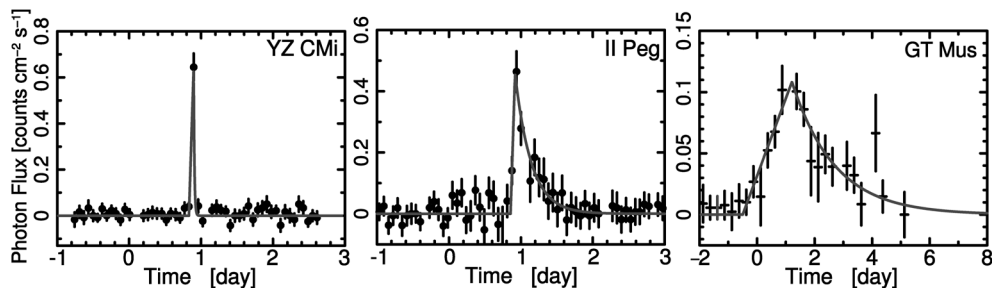


図2 全天X線監視装置MAXIで観測された恒星フレアの光度曲線(横軸: 時間, 縦軸: フォトンフラックス)<sup>6)</sup>. 左: dMe型星, 中: りょうけん座RS型変光星, 右: りょうけん座RS型変光星で観測された中でも特に継続時間の長いフレア.

Catalogue)と照合すると, 半径1°弱のMAXI/GSCのエラー領域にこのカタログ中のソースがただ一つ入り, IDは意外にも簡単に行うことができた.

### 3. MAXIで観測された星々

MAXIが稼働を始めてから約10年が経ち, この間に我々は27の星から130発以上のフレアを検出した. 図2に, MAXIで実際に得た星のフレアのX線強度変動を示す. dMe型星(左)と, りょうけん座RS型変光星(中)の典型的なフレアに加え, りょうけん座RS型変光星で観測された中でも特に継続時間の長いフレア(右)を載せている. 一般的にりょうけん座RS型変光星の方がdMe型星よりフレアの継続時間が長かった<sup>8)</sup>.

図3に, フレア一発の間にX線として放たれたエネルギーの頻度分布を示す. フレア源は, りょうけん座RS型変光星やアルゴル型連星(アルゴル自身)などの近接連星系, dMe型星(連星を含む), および前主系列星<sup>9)</sup>だった. 前主系列星からの検出はスキャン型の全天X線監視装置としては初めてであった. また, はえ座GT星以外の星はすべて300光年以内の距離にあった<sup>\*1</sup>.

### 4. MAXIでどこまで分かったか

MAXIの成果は何とんでも今までにない大き

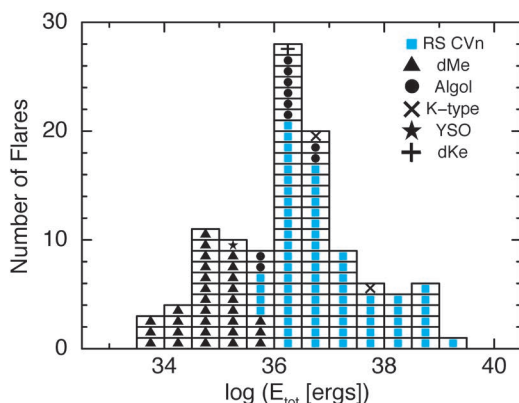


図3 MAXIで検出したフレアのX線放出総エネルギー( $E_{tot}$ )の頻度分布.

な光度のフレア群を検出したことである. 先行研究で得られていたフレア群と共に, フレア中の最大光度と減衰時間との関係を調べると, マイクロフレアと呼ばれる極小の太陽フレアから, MAXIの超巨大フレアまで, 光度にして12桁ものダイナミックレンジで綺麗な正の相関があることを初めて示すことができた(図4).

一方, フレア時のプラズマ温度とエミッションメジャー<sup>\*2</sup>との間にも, 太陽のマイクロフレアから恒星フレアまで何桁にもわたって正の相関があることが既に知られていたが(例えばShibata and Yokoyama 1999)<sup>10)</sup>, MAXIのフレアを足す

\*1 はえ座GT星は約500光年の距離にある.

\*2 エミッションメジャーは電子密度, イオン密度, およびプラズマ体積の積で表される.

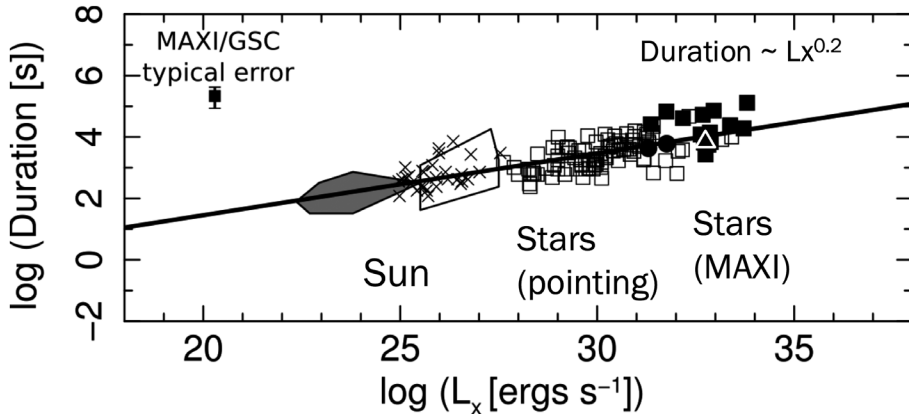


図4 フレアのピークでのX線光度 ( $L_x$ ) とフレアの継続時間との関係<sup>6)</sup>。黒塗りのシンボルがMAXIで検出されたフレア、それ以外が先行研究で得られたフレア。MAXIでフレアが観測された天体については、りょうけん座RS型星を四角、dMe型星を丸、前主系列星を三角で表している。

ことで、その関係を拡張することができた<sup>8)</sup>。

図4の相関は、「光度の大きいフレアほど減衰時間が長い」ということを表しているが、具体的には、フレアの減衰時間はフレアの最大光度の0.2乗に比例していた。なぜこの幂になっているか、は今後の課題である。

MAXIで検出された超巨大フレアの空間スケールやプラズマの密度は、以下のようにフレアのタイムスケールとスペクトルから見積もることができた。まず、伝導冷却は温度勾配の関数であるが、実は巨大フレアと太陽のマイクロフレアでは温度が1桁程度しか変わらない。一方、エミッションメジャーは9-12桁も異なっていた。フレアループ内のプラズマ密度が太陽フレアのそれと同程度だとまず大雑把に考えてみれば、エミッションメジャーの違いはプラズマの体積の違いとなる。よって超巨大フレアの形状が太陽フレアのループ形状と相似だとすると、ループの長さは太陽フレアのループに比べ3-4桁も大きいことになる。よって超巨大フレアのループ内の温度勾配は小さくなり、伝導冷却が効かず、放射冷却が優勢となる。

放射冷却では、減光のタイムスケールが単純に電子数密度およびイオン数密度 ( $\approx$ 電子数密度) の積と温度で決まるため電子密度がまず決定でき、

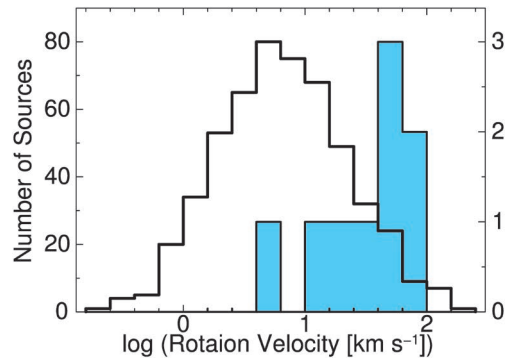


図5 300光年以内に位置する星の自転速度 (Rotation Velocity) のヒストグラム<sup>6)</sup>。青がMAXIで観測したフレア源、白がそれ以外の活動星 (縦軸は左のものを参照) を表す。MAXIのソースは右の縦軸を、それ以外の活動星は左の縦軸を参照のこと。

ループサイズもエミッションメジャーから決定できる。ここで得られた電子数密度は、太陽プラズマのそれと矛盾がなかった。しかし、ループサイズは太陽半径の数10倍から100倍程度、フレアを起こした星の半径の数倍から数10倍だと分かった。

このような長さのプラズマループが星の表面から出ているとすると図1右のようになる。実は、これほど巨大なループが単独の星のみで作られるとする理論はお目にかからない。一方で、MAXI

のソースのほとんどは、主星と伴星との距離が星の半径の2-3倍という近接連星系であった。では、プラズマループは連星同士を繋ぐ磁力線の繋ぎ変えて形成されたとは考えられないだろうか。実際、そのような理論は今までに何度も作られている。しかし我々は、その反例となる天体からも数例ではあるが、巨大なフレアを検出している。単独星、連星間距離が太陽-地球間距離(天文単位)の約6千倍の連星系、などがそれである。また、これら、反例となる天体が、星の周囲に降着円盤を伴っていない\*<sup>3</sup>ことも我々は確認済みである<sup>8),9)</sup>。このことは、連星間での磁氣的相互作用、物質の降着、星と円盤との磁氣的相互作用など、今まで提唱されてきたプロセスが、MAXIで検出される超巨大フレアを形成するために必ずしも必要でないことを示唆している。

では一体、何が超巨大フレアを生成する本質的な物理量だろうか。図5に、300光年以内に位置するMAXIで観測したフレア源およびそれ以外の活動星(active stars)<sup>11), 12)</sup>それぞれの自転速度のヒストグラムを示す<sup>8)</sup>。これを見ると、超巨大フレアを示す活動星の自転速度の方が明らかに速い。よって、自転速度がフレアの規模を決定する重要なパラメーターだと考えることができる。星の自転の運動エネルギーが磁場のエネルギーへと変換され、さらに、磁気再結合によってプラズマの熱エネルギーに変換された結果フレアが観測される、と考えればつじつまが合う。一方で、昔からコロナの光度と自転速度との間にも相関があるとされてきた<sup>3)</sup>。これはコロナがフレアと同一の起源で生成されていることを暗示しているのだろう。

しかし図5を見ると、速い自転速度を持ちながら、未だMAXIでフレアが観測されていない星もあることが分かる。超巨大フレアを持つか否かが自転速度のみで決められるのか、何か別の物理量

が影響しているのか、我々は現在もMAXIでモニターを続け、その検証にあたっている。

- 1) "Exploring the X-ray Universe" Charles, P. A., & Seward, F. D., 1995, Cambridge University Press
- 2) <https://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/yohkoh.html> (2019.8.9)
- 3) Pallavicini, R., et al., 1981, ApJ, 248, 279
- 4) Pye, J. P., & McHardy, I. M., 1983, MNRAS, 205, 875
- 5) Rao, A. R., & Vahia, M. N., 1987, A&A, 188, 109
- 6) Matsuoka, M., et al., 2009, PASJ, 61, 999
- 7) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 8) Tsuboi, Y., et al., 2016, PASJ, 68, 90
- 9) Uzawa, A., et al., 2011, PASJ, 63, S713
- 10) Shibata, K., & Yokoyama, T., 1999, ApJ, 526, L49
- 11) Eker, Z., et al., 2008, MNRAS, 389, 1722
- 12) Wright, N. J., et al., 2011, ApJ, 743, 48

## Hyper X-ray flares from stars detected with MAXI

Yohko Tsuboi

*Department of Physics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan*

Abstract: MAXI detected 130 hyper flares from 27 stars during the first ten years of MAXI. They are five orders of magnitude more energetic than the solar flares at maximum and 3-4 orders of magnitude more than super flares detected from G-type main sequence stars in the field of view of the Cygnus arm direction. Huge flares were detected not only from close binary systems but also from some single stars without accretion disk. These results reinforce the scenario that neither binarity nor accretion, nor star-disk interaction is not necessarily needed to generate huge flares. The MAXI flare sample, together with the sample of solar flares and the stellar flares detected in pointing observations, enables us to examine physical parameters statistically through over ten orders of magnitudes.

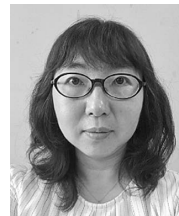
\*<sup>3</sup> 単独星TWA-7はデブリ円盤を持っていたが、その質量は月の質量と同程度の小さいものであり、降着円盤は持っていない。

# MAXIとガンマ線バーストのこの10年

芹野素子

〈青山学院大学理工学部 物理・数理学科 〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1〉

e-mail: serino@phys.aoyama.ac.jp



ガンマ線バースト (GRB) は宇宙で最も明るく最も激しく輝く天体であり、最近では重力波との関連も話題となって、その魅力でますます人々を惹きつけている。本稿では、このGRBを地味ながら10年間観測し続けているMAXIの結果から、どのようなことがわかったか、更に今後何を期待するかをまとめる。

## 1. ガンマ線バーストの10年前と今

ここ10年間で、ガンマ線バースト (GRB) に関する大きな観測的成果といえば、重力波GW170817/GRB170817Aでの重力波とGRBとの同時観測が記憶に新しい<sup>1)</sup>。MAXIが打ち上がった2009年当時には、10年以内にGRBを“重力波の電磁波対応天体”という文脈で語ることが“普通になる”時代が来るとは思っていなかった。まして、GRBアラートではなく、重力波アラートに日夜追われ、睡眠時間を削られる生活が待っているとは想像もできなかった\*1。

10年前といえば、Swift衛星の活躍<sup>2)</sup>に加えてFermi GBM (Gamma-ray Burst Monitor) がそれを上回る頻度でガンマ線バーストを観測し始めた<sup>3)</sup>頃である。2003年にはHETE-2衛星によるGRB 030329の観測で継続時間の長いGRB (の一部) が超新星爆発に伴う現象であることが明らかになっており、2005年にはGRB 050509BやGRB 050709で継続時間の短いGRBは中性子星同士または中性子星とブラックホールの合体が起源となっている可能性が指摘されていた<sup>4),5)</sup>。Swift衛星のX線望遠鏡 (XRT) による早期の残光の観測

は強力で、それまで知られていなかった残光フレアなどの複雑な変動を発見しただけでなく、可視光などの詳細な観測を可能にする早く正確な位置速報も供給した。また、MAXI打ち上げの前年に打ち上がったFermi衛星は広い視野で数多くのGRBを捉えられただけでなく、LAT (Large Area Telescope) 検出器の観測でMeVからGeV領域での放射の様子もわかってきていた<sup>6)</sup>。

ここにMAXIが割って入るのは容易ではないように思われた。というのも、次に述べるようにMAXIの視野は狭く、この視野でガンマ線バーストのイベント数を稼ぐことは無理だったからである。

## 2. 『全天』を常に見ているわけではない

最近“MAXIは『全天』X線監視装置なのに、重力波イベントが観測できなかったのはなぜですか?”と訊かれることがある。MAXIはひとつの装置でありながら、92分毎のスナップショットでは全天をモニタでき、かつ、データをためれば特定の星の詳細観測器としても使える一挙両得のスリットカメラである<sup>7)</sup>が、短所もある。ある一瞬における視野 (瞬間視野) が小さいことだ。MAXI/GSC (Gas Slit Camera) の場合、視野は

\*1 MAXIの重力波に関する取り組みは今後、杉田の記事で紹介予定である

3度×160度が2つで全天の2%でしかない。また、軌道上に荷電粒子が多数存在する放射線帯では観測できないため、時間稼働率も40%である。実は視野に関しては、南大西洋放射線異常帯(SAA)で観測できない影響は設計時に考慮しており、前方と上方の2つの視野を持たせた。それにより“92分間輝く天体”に対しては今でも検出確率90%以上を維持できている。しかし“一瞬だけ輝く天体”に対しては検出確率1%<sup>8)</sup>で不利なのである。

冒頭の質問への答えは、“重力波イベントはX線では92分間も光り続けていないようです”と“Fermi/GBMが受けたような継続時間の短いGRBは、瞬間視野が小さいMAXIでは受ける確率が小さいです”となるだろう。しかし検出確率1%でも相手が多数起きていれば観測にかかる。MAXIで検出したGRBの数は、10年間こつこつ観測し続けた結果累計103個にもなった(2019.5.1.現在)<sup>9),10)</sup>。ただし、このような結果を打ち上げ前に想像していたかといえ、実はそうでもない。

### 3. 10年前の予測と現実, 意外な活躍

打ち上げ1年前の2008年のMAXI国際会議では、MAXIでのGRBの検出は年間3.5イベント(実績は年間約10イベント)とする予測を発表していた。なぜこれほど少ない予想だったかといえ、BATSEやUlyssesといったMAXIよりも観測エネルギー帯域の高い検出器の頻度をもとに算出したものだったからである。当時“X線フラッシュ”のようなスペクトルのソフトなガンマ線バーストについては、ぎんが、BeppoSAX, HETE-2などによって徐々に明らかになってきている段階で<sup>11)</sup>、その数についても、従来のいわゆるガンマ線バーストの2-3倍はありそうだ、という推定がされていた。この補正を入れると、ほとんど実際観測された数に一致する。

もうひとつ、積極的に宣伝してこなかった予測として、“どうやら2秒以下の短いGRBは検出できそうにない”というのがあった。MAXIの点源に対する有効面積は典型的には5 cm<sup>2</sup>で、短い

観測時間では検出される光子数が少なすぎて有意な検出とならない。しかしこの予測は意外な形で外れることとなった。それが“視野外”GRBの存在である。GRB 120816B, GRB 140219Aなどの短いハードで明るいGRBは、光子の入射方向を制限するためのスリットやコリメータといった光学系を透過して検出された。光学系を取り去れば総面積5350 cm<sup>2</sup>にもなる巨大な検出器である。そのため、これらの視野外GRBに対しても大変に統計の良い光度曲線を描くことができた<sup>10)</sup>。

### 4. MAXIが明らかにしたこと

はじめに述べたMAXI打ち上げ前のGRBの起源に関する理解は、現在でも大きな変更なく支持されている。GRBの理解を覆すような観測事実はなかったということだ。その中でMAXIが10年間の積み重ねによって明らかにしたことは、弱くスペクトルのソフトなGRBが多く存在し、それらはMAXIでしか観測できないということである。これを端的に示したのが図1である。他の衛星と同時に観測されたGRB(丸印)は図の上の方(スペクトルがハード)や右の方(フラックスが大きい)に多く、左下の領域はほとんどがMAXI

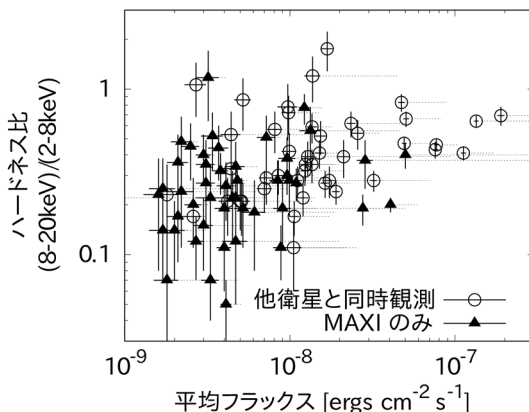


図1 MAXIが観測したGRBの平均フラックスとハードネス比の散布図。他の衛星と同時に観測したものの(丸印)に比べて、MAXIだけが観測したものの(三角)は縦軸、横軸ともに低い方にまで分布が伸びていることがわかる。

のみで観測された GRB である。2–20 keV という低いエネルギーに感度があることで、ソフトなイベントを効率よく捉えていることがまずわかる。

また、ここで強調しておきたいのは、意外と感度は良かったということである。数  $\text{cm}^2$  という小さな有効面積しかもたない GSC だが、ピンホールカメラの特性上、バックグラウンドが非常に低く抑えられ、その結果少ない光子数でも有意に検出できるのである。一方でこの光子統計ではスペクトルに関する議論がほとんどできず、論文化には常に苦しみを伴った<sup>9)</sup>。

GRB の統計的な性質とは別に、個別のイベントに関してもいくつかの特筆すべき成果が得られた。例えば、GRB 130427A<sup>12)</sup> や GRB 130925A<sup>13)</sup> は、非常に長時間にわたって X 線での活動が観測されたイベントで、Swift XRT と MAXI とが観測できない時間帯を相互にカバーしあう結果となった。90 分続くイベントは MAXI の本領発揮である。また、標準的な冪型の関数ではないスペクトルを示す例として、GRB 090926B<sup>14)</sup> や GRB 160107A<sup>15)</sup> が観測されている。このような GRB は少数の特殊な例ではあるが、GRB の多様性を示すイベントになっている。

## 5. 未だできていないこと、新たな課題

10 年前に確実にできるだろうと (密かに) 思い描いていたものの、未だに実現していないことがある。それは、低エネルギー側での感度を活かして  $z > 5$  というような遠方のガンマ線バーストをとらえることである。打ち上げ前の試算では、明るい  $z \sim 10$  のガンマ線バーストを検出できる、という予測だったのだが運にめぐまれず未だそのような例はない。これからの観測でぜひ実現したいものである。

一方で、この 10 年の観測で新たに生まれた謎もある。それが、MAXI Unidentified Short Soft Transient (MUSST) と名付けた存在である。10 年間で 9 例を数えるこの天体の特徴は、MAXI の観測データでは X 線フラッシュに似た振る舞いを示

すが、追跡観測を行っても対応天体が見つからない点で X 線フラッシュとは異なっている。MUSST の正体を明らかにするためには、MAXI での観測もさることながら、素早い速報で追跡観測を実現することが欠かせない。本号の岩切の記事にもあるように、NICER との即時連携も計画検討されている。これからも MAXI の成果を最大化するために、速報に力を注いでゆく。そして、MAXI だからこそ得られる成果を積み上げてゆきたい。

## 謝 辞

このような機会をくださった月報編集委員の方に大変感謝している。MAXI チームのメンバーには原稿について有益なコメントを数多く頂いた。

## 参考文献

- 1) 坂本貴紀, 2018, 天文月報, 111, 82
- 2) 坂本貴紀, 田代信, 佐藤悟朗, 2015, 天文月報, 108, 642
- 3) Nava, L., et al. 2011, A&A, 530, A21
- 4) Gehrels, N., et al., 2005, Nature, 437, 851
- 5) Villasenor, J.S., et al., 2005, Nature, 437, 855
- 6) 大野雅功ほか, 2010, 天文月報, 103, 315
- 7) 三原建弘, 2019, 天文月報, 112, 622
- 8) 芹野素子, 2017, 天文月報, 110, 25
- 9) Serino, M., et al., 2014, PASJ, 66, 87
- 10) MAXI GRBs <http://maxi.riken.jp/grbs/>
- 11) 山崎了, 2010, 天文月報, 103, 744
- 12) Maselli, A., et al., 2014, Science, 343, 48
- 13) Evans, P.A., et al., 2014, MNRAS, 444, 250
- 14) Serino, M., et al., 2011, PASJ, 63, S1035
- 15) Kawakubo, Y., et al., 2018, PASJ, 70, 6

## MAXI and Ten Years of Observations of Gamma-ray Bursts

Motoko SERINO

*Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5258, Japan*

Abstract: Gamma-ray bursts are the brightest and most violent objects in the universe. Recently they have attracted a great interest because of the association with gravitational wave events. We summarize the results of observations of GRBs by MAXI for the last 10 years, and mention what we expect in the near future.

# Be型 X線連星パルサーの巨大 X線増光

中 島 基 樹

〈日本大学松戸歯学部 〒271-8587 千葉県松戸市栄町西 2-870-1〉

e-mail: nakajima.motoki@nihon-u.ac.jp



国際宇宙ステーションに搭載された全天 X 線監視装置 MAXI により Be 型星と X 線パルサーの連星系の X 線光度曲線が長期間モニタされた。10 年のモニタ観測の結果、17 天体から総計およそ 200 回の X 線増光を検出し、うち 9 割以上はパルサーの近星点通過付近で起きる周期的増光、残りは連星位相に無相関な巨大 X 線増光であった。Be 型 X 線連星パルサーの一つである A 0535+26 からは巨大 X 線増光の軌道位相が変化する現象を観測した。これは星周円盤の歳差運動に伴う現象であると解釈できる。

## 1. Be 型 X 線連星パルサー (BeXBP)

Be 型 X 線連星パルサー (Be/X-ray Binary Pulsar: BeXBP) とは、Be 型星と X 線パルサー (中性子星) で構成される X 線連星系である。主星である Be 型星は水素輝線を示す早期型星で、この輝線は Be 型星の周囲の星周円盤が起源であると考えられている。この星周円盤は Be 型星の速い自転のため形成されると考えられているが、詳しい形成過程や動径方向への拡がりの物理機構などについて不明な点が残されている<sup>1)</sup>。伴星のパルサーは X 線光度が数桁にもわたり変化する X 線トランジェント天体で、X Persei (本特集の谷田部による記事を参照) を除き、静穏時の X 線強度は、MAXI などの広視野 X 線モニタ装置で検出できないほど暗い。銀河系内では X Persei を含みこれまでに 28 個の BeXBP が確認されている<sup>2)</sup>。

主星から伴星への質量降着により生じる BeXBP の X 線増光は、多様な現象についての研究機会を提供してくれる。明るい状態のときに観測される X 線パルスの到来時刻の変動から、連星系の軌道パラメータを決定できたり<sup>3)</sup>、X 線スペクトル中に現れるサイクロtron共鳴散乱構造から

中性子星の表面磁場が測定可能となるほか<sup>4,5)</sup>、降着物質による角運動量の輸送による中性子星の自転周期の変化についてのモデル検証の場も与えてくれる (本特集の杉崎の記事を参照)<sup>6)</sup>。この様に、X 線増光中の BeXBP の観測は多様な物理量・状態の決定に重要となるが、質量降着機構については未だに決着していない問題も残されている。

## 2. BeXBP の周期的な X 線増光

BeXBP は、MAXI にとって絶好の観測対象で、これまでに 17 天体から総計およそ 200 例の X 線増光を検出した。そのうち 2 天体、GRO J1008-57 と A 0535+26 の X 線光度曲線を図 1 に示す。BeXBP の X 線増光は特徴により大きく 2 つに分類される。一つは、連星の軌道周期と同期して近星点を通過する前後で発生する、最大 X 線光度  $\leq 10^{37}$  erg/s、継続時間が  $\sim 10$  日程度の X 線増光である。本稿ではこれを「周期的増光」と呼ぶ。これは中性子星の誕生時における超新星爆発の影響により、軌道離心率が 0.3 以上となった連星系において、近星点の近くで星周円盤からガスが降着しやすくなるためと考えられている。MAXI が検出した BeXBP の増光のうち、9 割以上はこのタイプであった。



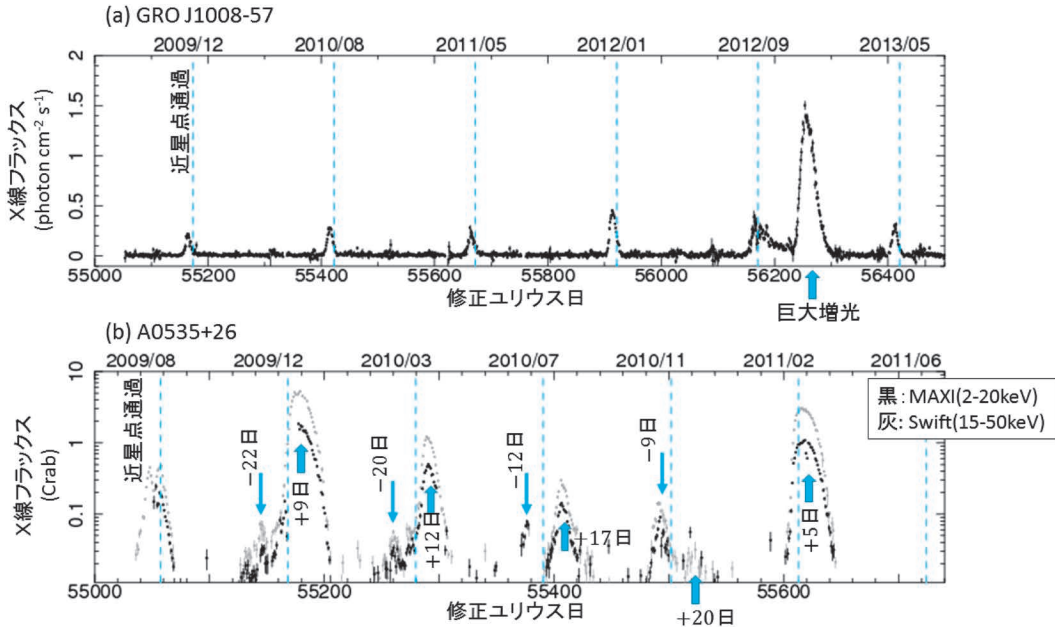


図1 MAXI搭載のガススリットカメラで観測した2つのBeXBPのX線光度の変動。上下の図とも、縦の点線が近星点の通過日を表わしている。(a) GRO J1008-57の2009年8月から2013年7月までの2-20 keVのX線光度曲線。近星点を通過する直前に周期的増光が起きている。2012年11月には巨大増光<sup>7)</sup>が近星点から離れた場所で起きた。(b) A 0535+26のMAXI(黒)とSwift衛星(灰色)で観測したX線光度曲線。巨大増光は軌道周期の5サイクル続いた(上向き矢印)。また、それに伴う前駆ピーク(下向き矢印)を見やすくするため、縦軸は対数目盛で表示した。矢印の側の数字は、近星点通過からの日数を表わしている。巨大増光の前駆ピークと主ピークは、ほぼ30日の間隔を保ったまま、それらの軌道位相が軌道周回ごとに数日ずつ、ずれていく様子を確認できる。

図1に示すように、GRO J1008-57は2005年から2019年まで、約249日の軌道周期に同期した増減光を繰り返している。A 0535+26も2008年から周期的な増光を繰り返し、2009年8月に増光ピークの間隔が約10日の二峰性のX線増光を起こすと、2009年12月頃から2010年11月頃にかけて後述する特異な挙動を示し、2011年半ばに消えて行った。このように軌道周期に同期した増光だけでなく、数年から十数年の長期変動も特徴である。これは星周円盤が数年から十数年の時間スケールで、形成・成長・縮小もしくは消滅を繰り返しているためと考えられる。

### 3. BeXBPの巨大X線増光

2つに分類されるBeXBPのX線増光のもう一つ

が「巨大増光」と呼ばれる、近星点から離れた場所で発生する現象で、最大X線光度はほぼエディントン光度 ( $\sim 2 \times 10^{38}$  erg/s) に達する。図1(a)の上向き矢印で示したのがGRO J1008-57の巨大増光で、1993年にこの天体が発見された時の巨大増光から、実に20年ぶりの大増光であった<sup>7)</sup>。BeXBPごとに異なるが、この巨大増光はおおむね数年から十数年に一度の割合で発生していることが知られている。こうした巨大増光を引き起こす大量のガスが、なぜ近星点から離れた場所に存在するかは大きな謎だが、それに対する一つの解釈を、MAXIが観測した近傍に位置するBeXBP、A 0535+26のX線観測の結果を元に紹介する。

図1(b)でわかるように、A0535+26は約111日の軌道周期を持つので、2009年8月に検出され

た周期的増光の次の X 線増光は約 4 ヶ月後になると予測されていたが、この予想は外れ、次の近星点通過の約 40 日前に当たる、2009 年 10 月末ごろからゆっくりとした X 線増光が始まった<sup>8)</sup>。近星点を通過する 22 日前に一度、微小な前駆ピークを迎えたあと (図 1b の下向き矢印)、近星点の通過後に巨大増光が観測された (上向き矢印)。この近星点を挟んだ一対の X 線増光は、2010 年 11 月まで、近星点を通過する前後で繰り返し起きていた。このように巨大増光は、数連星軌道周回にわたり続くことがある。

2010 年 7 月の前駆ピークは、A 0535+26 が太陽近傍の位置にあったため、太陽角制限の緩い MAXI でのみ観測できた。そのおかげで、図 1(b) から読み取れるように、2009 年 12 月から 2010 年 11 月までに観測された巨大増光の性質が以下のように明らかになった。

- ・前駆ピークと主ピークの間隔は、常に約 30 日であった。
- ・一対のピークの軌道位相は、1 連星軌道周回で約 5 日ずつ遅れていった。
- ・主ピークの光度は、 $\sim 2$  Crab (X 線標準光源である「かに星雲」の X 線フラックスの 2 倍) から、 $\sim 50$  mCrab (最初の 1/40) まで暗くなった。
- ・逆に前駆ピークの光度は、 $\sim 30$  mCrab から、 $\sim 100$  mCrab まで増光した。

この様な大小 X 線増光が対となり、それらの軌道位相とピーク光度が変化する現象が観測されたのは、A 0535+26 が初めてである<sup>9)</sup>。

以上の結果をまとめたものが図 2(a) である。前駆ピークと主ピークの軌道面上での位置を線で結ぶと、Be 星を挟んで反対の位置にある。この線分は 1 連星軌道周回で約 15 度程度ずつ回転していた。また最大 X 線光度は、中性子星の軌道と Be 星の間の距離が近いときの方が大きくなる傾向が確認できる。

これらの観測事実を説明するため、軌道面に対して傾いた星周円盤がゆっくりと歳差運動してい

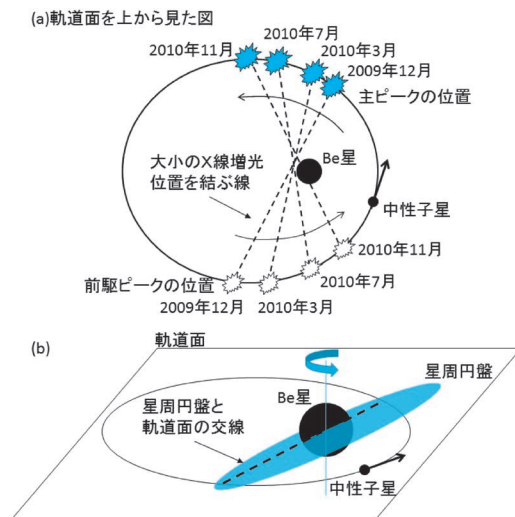


図 2 (a) A 0535+26 の連星軌道面を上から見た想像図。中性子星は反時計回りで周回している。巨大増光の前駆ピークと主ピークの軌道位置を印で示すと、Be 星を挟んでちょうど反対に位置する。(b) 軌道面に対して傾いた星周円盤が存在しているときの想像図。星周円盤が大きく広がっていれば、中性子星軌道と 2 ヶ所で交差する。

る状況を仮定してみる (図 2b)。歳差運動により中性子星と星周円盤の交差する位置が時間と共にずれるため、X 線増光の軌道位相が連星軌道周回ごとに移動する。また、Be 星の半径を  $r_*$ 、Be 星からの距離を  $r$ 、星周円盤面からの高さを  $z$  とすると、星周円盤の密度分布は  $(r_*/r)^{1.5 \sim 4.5} e^{-z^2}$  に比例する<sup>10)</sup>。今回の巨大増光の発生時期の前後で、光学観測より水素の輝線等価幅の増大と減少が観測されていた<sup>11)</sup>。特に巨大増光の終盤には、星周円盤の大きさの指標となる水素の輝線等価幅の減少が観測されていたので、星周円盤の縮小が示唆される。よって X 線光度の変化は、歳差運動と星周円盤の縮小の重ね合わせで生じたと解釈できる。このことから、巨大増光は軌道面に対して傾いて広がった星周円盤が起源となっていることが判明した。これは光学観測の結果<sup>11)</sup> や数値計算の結果<sup>12)</sup> ともおおむね一致している。ただし、星周円盤の幾何学的な変化が生じる原因については、

まだ多くの未解明点が残されているので、今後の課題となっている。

#### 4. 巨大増光の長い周期性

最後に前節で紹介した巨大増光の原因と考えられる星周円盤の幾何学的な変化について、長い周期性がある、つまり巨大増光に長い周期性が存在する可能性について紹介する。代表的な BeXBP の一つである EXO 2030+375 は、1985 年に巨大増光を起こして発見された連星である。約 46 日の軌道周期と同期して、近星点を通過してから約 5 日後に増光ピークが每周回観測されていたため、もっとも多くの周期的増光が観測された連星となっている。

発見後から数年の間は、決まった軌道位相での増減光が続いていたのだが、1995 年にそれまでとは異なる軌道位相、すなわち近星点の約 3 日前で周期的増光のピークが観測されるようになった<sup>13)</sup>。その後、この周期的増光の位相のずれは約 2 年かけて徐々に解消していき、元の位相で周期的増光が観測されるようになった。

この位相のずれの発生から約 10 年後の 2006 年、再び巨大増光が観測された。前回の巨大増光から約 20 年後であった。さらに 10 年後の 2016 年、今度は 1995 年に観測されたのと同じ、周期的増光の位相のずれが MAXI により発見された<sup>14)</sup>。つまり、巨大増光や周期的増光の位相のずれが、ほぼ 20 年間隔で起きていたのだ。この準周期性は、古在機構<sup>15)</sup>により、星周円盤の離心率と、連星軌道面に対する円盤の傾斜角が、周期的に変化するモデルで解釈可能であることが示された<sup>14)</sup>。古在機構が他の BeXBP に適用できるかどうかについては、さらなる議論が必要である。

#### 参考文献

- 1) Porter, J. M., & Rivinius, T., 2003, PASP, 115, 1153
- 2) Reig, P., 2011, Ap&SS, 332, 1
- 3) Sugizaki, M., et al., 2015, PASJ, 67, 73
- 4) Yamamoto, T., et al., 2011, PASJ, 63, 751
- 5) Yamamoto, T., et al., 2014, PASJ, 66, 59
- 6) Sugizaki, M., et al., 2017, PASJ, 69, 100
- 7) Nakajima, M., et al., 2012, The Astronomer's Telegram, 4561
- 8) Sugizaki, M., et al., 2009, The Astronomer's Telegram, 2277
- 9) Nakajima, M., et al., 2014, PASJ, 66, 9
- 10) Silaj, J., et al., 2010, ApJ, 187, 228
- 11) Moritani, Y., et al., 2013, PASJ, 65, 83
- 12) Okazaki, A., et al., 2013, PASJ, 65, 41
- 13) Wilson, C. A., et al., 2008, ApJ, 678, 1263
- 14) Laplace, E., et al., 2017, A&A, 597, 124
- 15) Kozai, Y., 1962, AJ, 67, 591

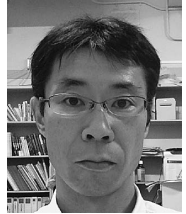
#### Giant X-ray Outburst of Be/X-ray Binary Pulsar

Motoki NAKAJIMA

*School of Dentistry at Matsudo, Nihon University, 2-870-1 Sakaecho-Nishi, Matsudo, Chiba 271-8587, Japan*

Abstract: The X-ray lightcurves of Be/X-ray binary pulsars have been monitored by MAXI for 10 years. Among ~200 X-ray outbursts observed from 17 Be/X-ray binary pulsars, ≥90% of them were categorized into normal outbursts, and rest of the events were giant outbursts. We confirmed that the precessing stellar disc causes the outburst phase shift and Kozai oscillation is related to the periodic giant outburst.

# X線連星パルサーにおける降着スピナップ機構の系統的検証



杉崎 睦

〈東京工業大学理学院 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail: sugizaki@hp.phys.titech.ac.jp

X線連星パルサーでは、光学対応天体から降着する物質が中性子星に角運動量を持ち込むので、X線光度と自転周期の変化には相関がある。2009年からMAXIとフェルミ衛星ガンマ線バーストモニター（GBM）によって得られた10年間にわたるX線光度とパルス周期のデータを用いて、強磁場中性子星における降着トルクモデルの系統的な検証を行った。Be型星との連星パルサーでは、増光活動期間中、X線光度と自転周期の変化率はほぼ比例し、Ghosh & Lamb（1979）の降着円盤を介したトルクモデルに良く合うことがわかった。一方、青色超巨星との連星パルサーでは、X線光度と自転周期の変化に明らかな相関はなく、その挙動は全く異なる。さらに、エディントン光度限界の50倍を超えるX線パルサーも見つかった。今後は、これらの降着機構の解明が課題である。

## 1. X線連星パルサーを巡る問題

X線連星パルサー（以下、X線パルサー）は、強い表面磁場（ $\sim 10^{12}$  G）を持つ中性子星と降着物質を供給する光学対応天体からなる連星系である。降着物質が中性子星の磁気圏に到達すると、その内側では磁力線に沿ってほぼ自由落下し、磁極の表面付近で重力エネルギーを解放する。従って、観測X線強度は自転周期（数ミリ秒～千秒）で周期的に変動する。増光時にはエディントン光度（ $2 \times 10^{38}$  erg s<sup>-1</sup>）近くに達し、太陽系から比較的近いものは全天で最大級のX線強度になる。これまでに我々の銀河系には約50個のX線パルサーが見つかったが、そのほとんどがBe型星あるいは青色（OB）超巨星との連星系である。これは、強磁場中性子星を含む連星系の形成進化の過程を反映していると考えられるが、そのシナリオは必ずしもわかっていない。

X線パルサーでは降着物質が中性子星に角運動量を持ち込むので、X線光度（以下、単に光度）と自転周波数の変化の割合には正の相関が予想される。そのような観測結果はX線パルサーの発見当初から報告されており、いくつかの理論モデル（降着トルクモデル）が提唱されてきた。ただし、モデルの再現性を検証するためには、連続した光度と自転周波数の変化を追跡する必要があり、ポイントング衛星による断片的な観測だけでは不十分であった<sup>\*1</sup>。こうした状況は、1991-2000年のコンプトン衛星ガンマ線バースト検出器BATSEのデータ解析で大きく改善した。ほぼ全天に感度を持つバースト検出器の計数データに周期解析を施し、既知のX線パルサーのパルス信号を抜き出すことによって、多数のX線パルサーの自転周波数の変化を同時に得られるようになった<sup>1)</sup>。この結果、Be型星を主星とするX線パルサー（本誌、中島の記事を参照）ではX線増光期

<sup>\*1</sup> 初期の報告の中には、軌道運動によるドップラー変調を取り除けていなかったり、ランダム的な変化の一部を誤認していたものが少なくない。

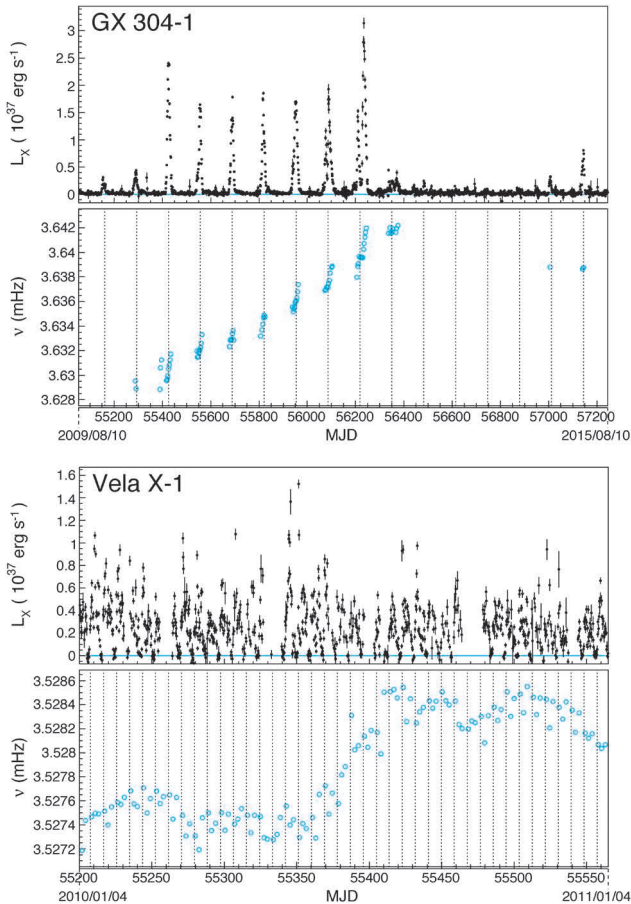


図1 (上) Be型星X線パルサー GX 304-1 (自転周期272秒, 軌道周期132日)のMAXIガススリットカメラによるX線光度  $L_x$  (上段)とフェルミ衛星GBM検出器の周期解析から求められた自転周波数 $\nu$  (下段)。期間は2009年8月から2015年8月までの6年間。下段の縦の破線はパルサーの近星点通過の時刻を表す。(下) 青色超巨星X線パルサー Vela X-1 (自転周期283秒, 軌道周期8.96日)に対する同様の結果。期間は2010年1月から2011年1月までの1年間。下段の縦の破線はパルサーの主星による蝕の中心時刻を表す。

にはほぼ必ずスピナップが観測されるなど、光度のパルス成分と自転周波数の変化の割合に良い相関があることがわかった。一方、青色超巨星を主星にもつシステムでは、明確な相関は見られなかった。ただし、BATSEのデータから得られる情報はパルス成分に限られ、光度に関して全X線放射の情報が得られないという問題があった。

降着物質の角運動量は中性子星の磁気圏半径で受け渡されるので、中性子星の磁場が強いほど、光度に対する自転周波数の変化の割合は大きくなる。X線パルサーの表面磁場は、X線スペクトルにサイクロtron共鳴構造を検出できれば正確に見積もることが出来るが、この方法で測られた約20天体の表面磁場は  $(2-8) \times 10^{12} \text{ G}$  の非常に狭い範囲にあるという問題がある<sup>2), 3)</sup>。全X線パルサーの表面磁場がこの狭い範囲にあるのか、あるいは観測バイアスが大きいのか、決着がつかっていない。残る過半数のX線パルサーの表面磁場は不明であるが、光度と自転周波数の変化率の関係から、より大きな磁場 ( $\geq 10^{13} \text{ G}$ ) が示唆される天体が出てきた (本誌, 谷田部の記事を参照)<sup>4)</sup>。まだ表面磁場が不明のX線パルサーの中に、同様に磁場が強いものが潜んでいる可能性が考えられ、興味深い状況にある。

## 2. MAXIとフェルミ衛星GBMを用いた降着トルクモデルの検証

2008年からBATSEと同等の機能を持つフェルミガンマ線天文衛星のバースト検出器GBM (Gamma-ray Burst Monitor) が稼働し始め、2009年からはMAXIが観測を始め、既知のX線パルサーに関して自転周波数に加えて全X線放射の精度

の良い光度曲線 (光度の変化) が得られるようになった。図1に、Be型星または青色超巨星を主星とする2つの代表的なX線パルサーに対して、得られた年スケールでの光度と自転周波数の変化をプロットした。Be型星X線パルサーのGX 304-1では、数週間も続く増光期間の中、光度に応じて自転周波数が単調に増加していることがわか

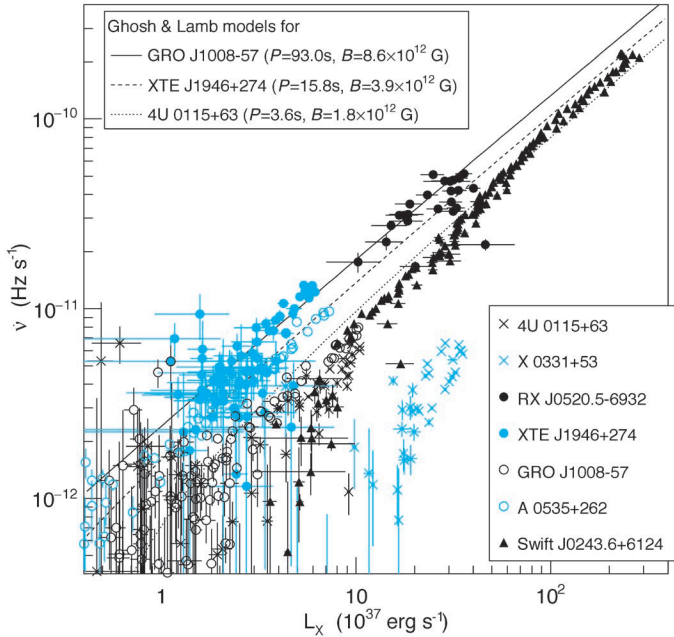


図2 MAXIが稼働し始めてからX線増光があったBe型星X線パルサーの代表サンプル7天体の、X線光度 $L_x$ と自転周波数の変化率 $\dot{\nu}$ の関係。サイクロトロン共鳴で測られた磁場が最も強い天体 (GRO J1008-57)、中間の天体 (XTE J1946+274)、弱い天体 (4U 0115+63) に対して、Ghosh & Lambモデルで予測される関係を実線、破線、点線で示した。

る。これは降着円盤を介したスピナップを示唆している。一方、青色超巨星を主星とするX線パルサー、Vela X-1では、光度と自転周波数の間に単純な相関は見られない。

そこで、我々はMAXIとフェルミ衛星GBMによるX線パルサーの連続監視データを用いて、降着トルクモデルの系統的な検証を行った<sup>5)</sup>。このために、2009-2016年の間にX線増光が検出された全12個のBe型星X線パルサーのデータを用いた。自転周波数の変化を精度良く決定するためには、連星軌道運動によるドップラー変調を注意深く取り除く必要がある。7年間にわたるデータを使って軌道要素を最適化したところ、4天体で有意な改善を行うことができた。結果として得られた光度と自転周波数の変化率のデータは、すべてのBe型星X線パルサーのサンプルで、比例に近

い正の相関を示すことがわかった。図2に、代表的なサンプルの光度と自転周波数の変化率の関係を重ねてプロットした。この相関データを理論モデルに合わせたところ、典型的な中性子星の質量(太陽質量の1.4倍)と半径(10 km)の仮定の下で、全体としてはGhosh & Lamb<sup>6)</sup>の円盤降着トルクモデルで良く再現できることがわかった。個々の天体データの再現性を見ると、正相関の様相は合っているが、絶対値に0.3-3倍の係数の補正が必要になる。この補正量は、観測X線強度に対する放射エネルギーを計算をする時に仮定した、パルス放射の等方性と天体までの距離の誤差を考えると妥当な範囲である。唯一、X 0331+53だけは、磁場も距離も精度良くわかっている割には、10倍の補正が必要になり、原因は不明である。

### 3. 今後の展望

以上のように、MAXIとフェルミ衛星GBMによって得られたX線パルサーのデータを解析した結果、Be型星を主星とするX線パルサーでは、光度と自転周波数の変化率の間に良い相関があり、Ghosh & Lamb<sup>6)</sup>の円盤降着トルクモデルで説明できることがわかった。今後、データをさらに蓄積していけば、逆に仮定した中性子星の質量、半径、磁場の検証に利用できると考えている。既に得られている顕著な成功例が本誌の谷田部の記事にあるので、参照されたい。また、この解析で重要な要素である天体の距離に関しては、2014年に始まったGAIA衛星の精密測量で、精度が大幅に向上してきている。

一方、青色超巨星のX線パルサーに関しては、光度と自転周波数が両方共に複雑な時間変動を示し、単純な相関はない。青色超巨星の斑らな星風に原因があるという説が有力だが、詳細なメカニ

ズムには依然、議論の余地がある。これに関して、図1に代表例として示した Vela X-1 では、MAXI の監視データから 8.96 日の連星軌道位相に対する強度変動が特徴的な型を持つことがわかり、パルサー軌道上の星風環境の情報が得られることとなった<sup>7)</sup>。自転周波数の変化に関しても膨大なデータが蓄積してきており、光度との関係のパターン認識などの手法により、星風捕獲による降着プロセスの新たな情報が得られるかもしれない。

青色超巨星と中性子星の連星系に関しては、近年、数十日から数ヶ月に1回、持続時間が数時間以下の X 線フレアを起こす非常に活動頻度が低い突発 X 線連星<sup>\*2</sup>が見つかってきて、問題になっている<sup>8)</sup>。X 線パルサーと同じ構成要素の連星系でありながら、どうしてこのような活動性に違いが生まれるのか、連星進化の鍵となる可能性がある。現在、このような突発 X 線連星は 12 個ほど確認されており、6 個の天体では中性子星の自転周期がわかっている。これらの連星軌道周期、自転周期の分布に X 線パルサーとの違いはない。星風環境や中性子星の磁場の違いなど、いくつかの仮説が提案されているが<sup>9)</sup>、決定的な証拠は得られていない。X 線パルサーにおける星風降着を理解することは、この問題解決の手掛かりになりうる。

近年、我々の銀河系外でエディントン光度の 50 倍に達するような超高光度 X 線パルサー (M82 X-2 など) が見つかり、その降着機構が問題になっている<sup>10)</sup>。2017 年に我々の銀河系に出現した Be 型星 X 線パルサー、Swift J0243.6+6124 は、見かけ上エディントン光度の 10 倍を超えたが<sup>11)</sup>、光度に対する自転周波数の変化の割合は他の Be 型星 X 線パルサーと全く同じレベルで (図2)、

磁場も同程度 ( $\sim 10^{12}$  G) であることが示唆される。通常の X 線パルサーの超エディントン増光の詳細な解析から、超高光度 X 線パルサーの降着がそれらの延長で理解できるか、また磁場強度はどの程度か、などの問題に迫ることができると期待される。

## 参考文献

- 1) Bildsten, L., et al., 1997, ApJS, 113, 367
- 2) Makishima, K., et al., 1999, ApJ, 525, 978
- 3) Yamamoto, T., et al., 2014, PASJ, 66, 59
- 4) Yatabe, F., et al., 2018, PASJ, 70, 89
- 5) Sugizaki, M., et al., 2017, PASJ, 69, 100
- 6) Ghosh, P., & Lamb, F. K., 1979, ApJ, 234, 296
- 7) Malacaria, C., et al., 2016, A&A, 588, A100
- 8) Sguera, V., et al., 2005, A&A, 444, 221
- 9) Bozzo, E., et al., 2008, ApJ, 683, 1031
- 10) Bachetti, M., et al., 2014, Nature, 514, 202
- 11) Wilson-Hodge, Colleen A., et al., 2018, ApJ, 863, 9

## Systematic analysis of accretion spin-up process in X-ray binary pulsars

Mutsumi SUGIZAKI

*Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan*

Abstract: Studies of luminosity—spin-up relations in X-ray binary pulsars with 10-years MAXI/GSC and the Fermi/GBM data are reviewed. In the systems with Be-star companions, the relations are well explained by the Ghosh & Lamb (1979) disk-magnetosphere interaction model. On the other hand, in the systems with OB supergiants, their correlations are not clear. The complicated spin-up/spin-down behaviors are considered to suggest the clumpy wind-fed accretion.

<sup>\*2</sup> SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) と呼ばれる。

# 降着トルクモデルを使った中性子星の 質量・半径・磁場強度の推定

谷田部 史 堯

〈理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

〈立教大学大学院 理学研究科 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1〉

e-mail: 17la015w@rikkyo.ac.jp



中性子星の質量・半径・磁場強度の測定は、核物質の状態方程式への制限や中性子星の進化を考えるうえで重要である。われわれはMAXIによる長期連続観測のデータを用いて、2つのX線連星パルサー、4U 1626-67とX PerseiのX線光度と自転周期変化率を調べた。その結果にGhosh & Lambの降着トルクモデルを適用し、中性子星の質量・半径・磁場に同時に制限をつけることができた。X Perseiでは重めの質量と $10^{13}$ - $10^{14}$  G (ガウス)の強磁場が示された。これはX線連星中で見つかった初めてのマグネター級の強磁場中性子星である。本方法はこれらの量を決定できる、古典的ではあるが最近適用可能になった、新しい方法である。

## 1. X線連星パルサー

中性子星の内部は地上では実現できない高密度になっており、そこでの核物質の状態方程式(EoS)は物理学における未解決の課題である。EoSを制限するための観測的なパラメーターは中性子星の質量 $M$ と半径 $R$ である。質量は主に連星系の軌道運動から、半径は主に中性子星表面で起こるX線バーストのスペクトルから測定されてきたが、まだEoSを制限するには至っていない。また、同じ天体で質量と半径が同時に測定された例もない。

質量および半径と独立に観測できる磁極の表面磁場強度 $B$ も、中性子星の起源や進化と関係のある重要な量である。X線連星パルサー(周期的なX線パルスを示す中性子星)における磁場推定には、エネルギースペクトルに現れるサイクロトロン共鳴散乱構造(CRSF)が利用されている。CRSFエネルギーは磁場強度と比例関係にあり、現在の観測ではCRSFは10-80 keV、磁場強度で

は $(2-9) \times 10^{12}$  G (ガウス)<sup>1)</sup>に分布している。100 keV ( $\sim 10^{13}$  G)以上のCRSFは、X線の強度不足により探査の感度が低く、発見されていない。

## 2. 降着トルクモデル

そこで、われわれは質量・半径・磁場強度を測定する別の方法として、降着トルクモデルに注目した。これは、中性子星と恒星の連星系において、恒星ガスの降着トルク $T$ による、中性子星の自転角速度 $\omega$ の変化率 $\dot{\omega}$ を表す式である。基本的には中性子星の慣性モーメントを $I$ として、 $I\dot{\omega} = T$ である。 $T$ はガスの降着率 $\dot{M}$ に比例し、 $\dot{M}$ は光度 $L$ から推定できる。 $I$ を移項し、 $\omega$ の代わりに自転周期 $P$ を使い、トルク受け渡しの半径(アルフヴェン半径)が $\dot{M}$ に依存することに留意すると、次の関係式が導かれる。

$$-\frac{\dot{P}}{P^2} = (M, R, B \text{ を含む数}) \times \mu^{\frac{2}{7}} I^{-1} L^{\frac{6}{7}} \quad (1)$$

$\mu$ はパルサーの磁気モーメントである。右辺が $\mu^{(2/7)}$ に比例しているのは、同じ $L$ でも $\mu$ が大きい



と遠方で角運動量を渡すことになり、大きな  $T$  を中性子星に与えるからである。

実際には中性子星は回転しているので、加速に働くトルクは、アルフヴェン半径における降着ガスのケプラー回転の角速度  $\omega_{\text{Kep}}$  から自転角速度  $\omega$  を引いた分になる。式(1)の定数部分に  $(\omega_{\text{Kep}} - \omega)$  が入るわけである。ここで両者の比を  $\omega_s = \omega / \omega_{\text{Kep}}$  と定義する。 $\omega_s$  はパルサーの回転度合いを表す無次元量で、fastness パラメータと呼ばれる。 $\omega_s$  は無次元量なのに、角運動量  $\omega$  と同じ文字を使っているのが混乱の元なのだが、ご容赦いただきたい。単純には  $\omega_s$  は 0 (中性子星は静止) から 1 (これ以上加速できない) の間の値をとり、式(1)の定数部分に  $\omega_{\text{Kep}}(1 - \omega_s)$  として入ることになる。

Ghosh と Lamb は磁場の変形などを考慮した降着トルク伝達モデルを考えて光度とトルクの間係を導き、式(1)を定式化した(以下 GL79)<sup>2)</sup>。それによると式(1)の  $(M, R, B$  を含む数)は、 $\omega_s = 1$  ではなく  $\omega_s = 0.34$  を境に正 (スピナップ) から負 (スピンドウン) に変わる。さらに  $M, R, B$  を含んでいるので、観測から  $\dot{P}$ - $L$  関係を測定すれば、各パラメータを推定できるわけである。

われわれは MAXI などから得られた長期連続観測データを用い、2つの X 線連星パルサー、4U 1626-67 と X Persei の  $\dot{P}$  と  $L$  を詳細に追った。両パルサーは歴史的にスピナップ期とスピンドウン期を示しており、GL79の検証に適した天体である。その結果に GL79 を適用し、中性子星のパラメータ ( $M, R, B$ ) を推定した。一方で杉崎氏の記事<sup>3)</sup>にあるように、MAXI を用いた 12 個の Be 型 X 線連星パルサーのアウトバースト時の挙動からは、 $\omega_s$  が小さいスピナップ領域では、GL79 理論式(1)はファクター 3 倍以内で正しいことが定量的に示されている。

### 3. 4U 1626-67 への適用<sup>4,5)</sup>

4U 1626-67 (みなみのさんかく座 KZ 星) は自転周期 7.6 秒<sup>6)</sup> の X 線パルサーと  $0.06 M_{\odot}$  以下

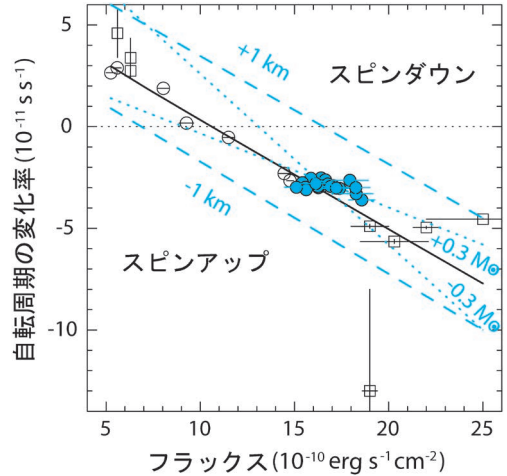


図1 4U 1626-67 の、 $F_{\text{bol}}$  と  $\dot{P}$  の関係<sup>4)</sup>。青丸は MAXI/GSC、白丸は Swift/BAT のデータ、白四角は文献値である。実線はベストフィットな GL79 で、2本の破線と点線はそこから半径だけ、あるいは質量だけ変えたものである。杉崎氏の記事の図2とはほぼ同じものだが、縦軸に  $\nu$  ではなく  $\dot{P}$  をとり、4U 1626-67 の  $\dot{P}$  は正と負の両方をとるため、ログ表示ではなく、リニア表示にしている点異なる。本図は Takagi et al. (2016)<sup>5)</sup> が初出だが、理論曲線を書くにあたり  $\mu$  や  $L$  の一般相対論的補正<sup>10)</sup> を加えた Takagi (2017)<sup>4)</sup> から引用した。

の低質量星<sup>7)</sup>の連星系である。磁場強度は CRSF から  $3.2 \times 10^{12} \text{ G}$ <sup>8)</sup> と測定されている。対して天体までの距離は  $5\text{--}13 \text{ kpc}$ <sup>9)</sup> と精度はよくない。

MAXI/GSC を用いて、2009 年 10 月から 2013 年 9 月までの自転周期  $P$  とフラックス  $F_{\text{bol}}$  を詳細に追ったところ、図1に示すように、 $P$  の時間変化率  $\dot{P}$  は  $F_{\text{bol}}$  と良い負の相関を示した<sup>4)</sup>。図1の実線はベストフィットな GL79 ( $1.34 M_{\odot}$ ,  $11.6 \text{ km}$ ,  $8 \text{ kpc}$ ) であり、MAXI と Swift/BAT と文献値を合わせたデータをよく再現していることが分かる。2本の破線と点線は実線のパラメータから半径だけ、あるいは質量だけ変えたもので、半径と質量をわずかに動かすだけでも GL79 の予測は大きく変わることが分かる。そのため、仮に距離を  $8 \text{ kpc}$  に固定すると、これらは  $1.34 \pm 0.02 M_{\odot}$ ,

11.59±0.03 kmと精度よく求められる。

$\dot{P}$ が0になる点はGL79では $\omega_s=0.34$ であることから、 $P \propto L^{-(3/7)} \mu^{(6/7)}$ が導かれる。つまりX軸との交点からは $\mu (= (1/2)BR^3)$ が決まる。今回はCRSFからBが既知であるため、Bを代入してこれよりRを算出できた。また、GL79の傾きは中性子星の回転の変化のしやすさである $I (\propto MR^2)$ を表すため、求めたRを使ってMを算出できる。現在のところ距離の不定性が5-13 kpcと大きいので、意味のある制限を与えるには至っていないが、今後の位置天文などの観測で距離が精度良く求まれば、MとRの両方に同時に強い制限を与えるであろう。特にRについては、式(1)のGL79にファクター3倍の不定性<sup>3)</sup>があったとしても、 $\dot{P}$ が0になる点は変わらないため、精度よく求められることが判明した。

#### 4. X Perseiへの適用<sup>10)</sup>

X Persei (ペルセウス座X星)は自転周期835秒<sup>11)</sup>のX線パルサーとBe星との連星系である。距離はGAIA衛星によって0.81±0.04 kpc<sup>12)</sup>と精度よく求められている。X線スペクトルの~30 keVに浅く広いへこみ構造が見られ、これをCRSFとみなせば磁場強度は $2.5 \times 10^{12}$  G<sup>13)</sup>となる。

もしパルサーがトルク平衡( $\dot{P}=0$ )にあれば、前節のように $\mu \propto P^{(7/6)} L^{(1/2)}$ であるから、Pの遅いものほど磁場が強いことになる。X Perseiでは~ $10^{14}$  Gと算出される。確かに~30 keVの構造はCRSF以外の連続成分モデルでも表現でき、さらにスペクトルが通常のX線パルサーのものより高エネルギーまで伸びていることから、実際はB~ $10^{13}$  G以上ではないかとの示唆もある<sup>14)</sup>。

RXTE衛星/ASM装置とMAXI/GSCを用いて1996年1月から2017年9月までのX Perseiの自転周期Pとフラックス $F_{bol}$ を詳細に追ったところ、図2に示すように、自転周期の変化率 $\dot{P}$ と $F_{bol}$ には4U 1626-67と同様に、良い逆相関がみられた<sup>10)</sup>。図2の実線は、ベストフィットを与えるGL79の

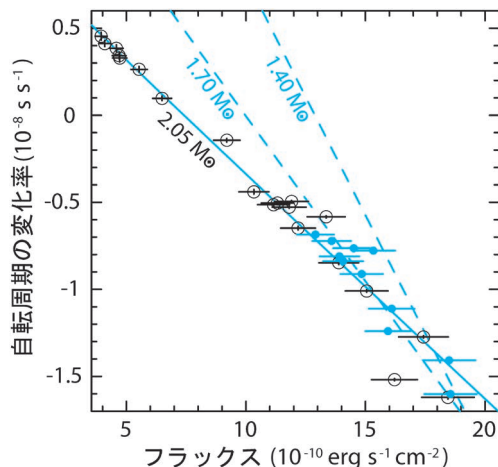


図2. X Perseiについての、図1と同様な関係<sup>10)</sup>。青丸はMAXI/GSC、白丸はRXTE/ASMのデータである。実線はベストフィットのGL79で、2つの破線は、そこから質量だけを変えたものである。

パラメーター例 (2.05  $M_{\odot}$ , 12.9 km,  $8 \times 10^{13}$  G, 0.81 kpc)である。他の2つの破線はそこから質量だけを変えたものである。グラフの傾きから、やや大きめの質量が示唆される。実際、距離の精度がよいため、質量は1.86-2.20  $M_{\odot}$ の範囲に制限された。この値は、標準的な中性子星の質量1.4  $M_{\odot}$ よりも有意に大きい。

中性子星の半径の範囲として9.5-15 kmを仮定すると、 $\dot{P}=0$ との交点から $\mu$ が決まっているので、磁場強度は(5-23)  $\times 10^{13}$  Gに制限された。GL79式(1)のファクター3倍の不定性を考慮すると、質量の下限値は~1.4  $M_{\odot}$ になるが、 $\mu$ は $\dot{P}=0$ の点で決まっているのでほとんど影響を受けず、磁場強度の範囲は依然として(4-25)  $\times 10^{13}$  Gとなる。このようにX Perseiの磁場は通常のX線連星パルサーよりも1-2桁大きいことが高い信頼度で判明した。

これはマグネター級の磁場をもつ中性子星をX線連星中で発見した最初の例であり、マグネターの生成機構の解明に大きな情報となる。磁場が大きいと考えると、従来から謎であった、長い自転

周期, 低い X 線光度, 硬いスペクトルが自然に説明できる<sup>14)</sup>. つまり, 強磁場でトルク平衡にあるので自転周期は長く, トルク平衡ではプロペラ効果のため降着率が減るので暗くなる. X 線連星パルサーの X 線スペクトルの高エネルギー側の落ちを CRSF によるためと解釈すれば, CRSF が高いエネルギーにあるため高エネルギーまで共鳴散乱されず, 連続スペクトルが伸びる. この視点は, 長周期パルサーである 4U 0114+65 (9760 秒), 4U 2206+54 (5420 秒), 4U 1954+31 (19000 秒) などにも適用できるかもしれない. また, 強い磁場強度と大きめの質量が同時に得られたことは, 「マグネター級の磁場を持つ中性子星は質量が大きい」という可能性を示唆している.

### 参考文献

- 1) Yamamoto, T., et al., 2014, PASJ, 66, 59
- 2) Ghosh, P., & Lamb, F. K., 1979, ApJ, 234, 296
- 3) Sugizaki, M., et al., 2017, PASJ, 69, 100
- 4) Takagi, T., 2017, PhD thesis, Nihon univ.
- 5) Takagi, T., et al., 2016, PASJ, 68, S13
- 6) Rappaport, S., et al., 1977, ApJ, 217, L29
- 7) Levine, A., et al., 1988, ApJ, 327, 732
- 8) Orlandini, M., et al., 1998, ApJ, 500, L163
- 9) Chakrabarty, D., 1998, ApJ, 492, 342
- 10) Yatabe, F., et al., 2018, PASJ, 70, 89
- 11) White, N. E., et al., 1976, MNRAS, 176, 201
- 12) <https://gea.esac.esa.int/archive/>
- 13) Coburn, W., et al., 2001, ApJ, 552, 738
- 14) Sasano, M., 2015, PhD thesis, Tokyo univ.

### Mass, radius and magnetic field of neutron stars estimated by accretion torque model

Fumiaki YATABE

*High Energy Astrophysics Laboratory, RIKEN, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

*College of Science, Rikkyo University, Nishi-Ikebukuro, Toshima, Tokyo 171-8501, Japan*

Abstract: Measurement of the mass, radius and magnetic field of neutron stars is essential to restrict the equation of state and the evolution of neutron stars. We investigated the luminosity and pulse period derivative of two X-ray binary pulsars 4U 1626–67 and X Persei using long-term observation with MAXI. We applied the accretion torque model by Ghosh & Lamb, and estimated the mass, radius and magnetic field of the two neutron stars. For X Persei, a heavy mass and a strong ( $10^{13}$ – $10^{14}$  G) magnetic field were suggested. This is the first neutron star in X-ray binaries which has as strong magnetic field as magnetars. Our method using accretion torque model is classical but new to estimate those values of neutron stars.

# 中性子星を含む低質量 X 線連星の長期変動

浅井和美

〈理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: kazumi@crab.riken.jp



中性子星を含む低質量 X 線連星にはアウトバーストと呼ばれる X 線の増光現象や長期の X 線変動がある。アウトバーストは、降着円盤の不安定性で引き起こされると考えられており、その時に生じる降着円盤の状態遷移の観測は重要な情報となる。こうした現象に対して強みを発揮する MAXI の長期連続観測で、状態遷移に関する次の二つの特徴が明らかになった。(1) 突発現象であるアウトバーストの立ち上がりを MAXI でとらえ、二つのタイプ (Slow 型と Fast 型) があることを示した。(2) 繰り返し起こる小規模の光度変動を MAXI で検出し、これも降着円盤の状態遷移を伴っていることを示した。

## 1. 低質量 X 線連星の長期変動

中性子星を含む低質量 X 線連星 (NS-LMXB) には、ほぼ一定光度で輝く定常天体と、突然 10 倍以上 X 線で明るくなり、数週間から数ヶ月その明るい状態を保つアウトバーストと呼ばれる現象を示すトランジェント天体がある。このアウトバーストは、矮新星やブラックホールを含む低質量 X 線連星のアウトバーストと同様に、降着円盤の不安定性が原因と考えられている。これまで、NS-LMXB のアウトバースト時の状態遷移の特徴はあまり知られていなかった。その理由には、1 日程度のポインティング観測では長時間にわたる変動の特徴がつかみきれないことがある。しかし MAXI の登場により、数十個の NS-LMXB を X 線でほぼ連続的に監視できるようになった。

## 2. アウトバーストの立ち上がり

アウトバーストはガス降着率の急激な増加によって始まる。アウトバースト開始時には降着円盤の内縁は幾何学的に厚く光学的に薄い状態だが、ガス降着率が増えると幾何学的に薄く光学的

に厚い状態に変化する。このとき、X 線スペクトルはハード状態 (冪関数) からソフト状態 (黒体放射) に変化する。これまでの観測では、突発現象であるアウトバーストを検出した後、光度のピークあたりからやっど観測を始めることが多く、その時点で X 線スペクトルはすでにソフト状態になっていた。よってピークを過ぎ、次第に X 線光度が減少してある光度で再びハード状態に変化する時の「立ち下がり時のソフト/ハード状態遷移」は多く観測されているが、「立ち上がり時のハード/ソフト状態遷移」はあまり観測例がなかった。

その観測に力を発揮するのが、常時 X 線で観測を行っている MAXI/GSC (Gas Slit Camera) (2–20 keV) と X 線天文衛星 Swift の BAT (Burst Alert Telescope) 装置 (15–50 keV) である。この 2 つのエネルギー帯は各々ソフト状態とハード状態で主に放射するエネルギー帯であり、両者の比を見れば X 線スペクトルの状態が判断できる。今回、アウトバーストを起こす天体として有名な 4U 1608–52 と Aql (わし座) X-1 を対象天体として、GSC データと BAT データを解析した。2009 年

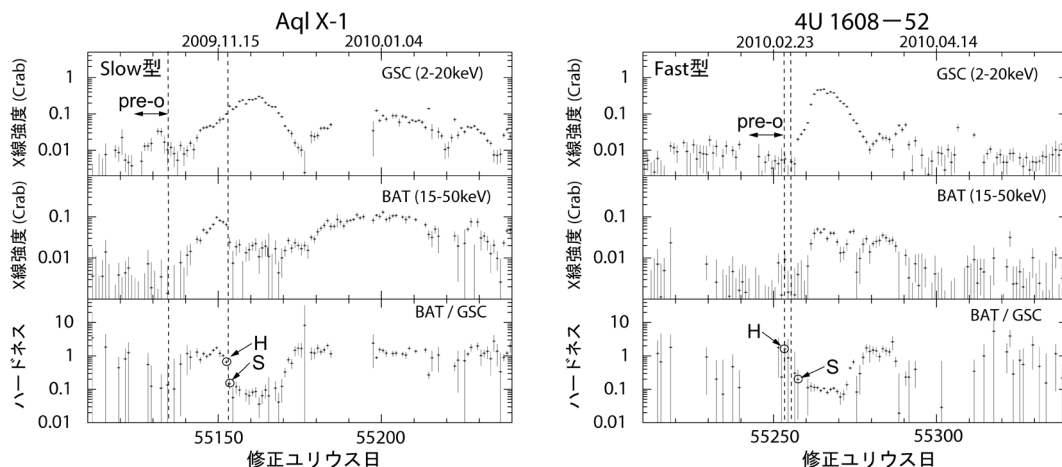


図1 Slow型(左)とFast型(右)の一例. MAXI/GSCとBATによるエネルギー別の光度曲線とその比(ハードネス)<sup>1)</sup>. 1データ点は1日の平均. ハードネス図のHは最後のハード状態の点を, Sは最初のソフト状態の点を表し, この間でスペクトルがハード/ソフトの状態変化をしている.

8月から2011年12月の間に5回(4U 1608-52から2回, Aql X-1から3回)のアウトバーストを検出し, その立ち上がりに注目して解析した. さらにX線天文衛星RXTEのASM(All Sky Monitor)装置(1996年から2011年まで稼働, 2-12 keV)のデータも加え, 合計10個のアウトバーストを調べた<sup>1)</sup>.

その結果, 天体によらず, アウトバーストの立ち上がりにはSlow型とFast型という二つのタイプがあることがわかった(図1). Slow型は2-20と15-50 keVバンドの両方で増光した後, 15-50 keVバンドの光度が急減してソフト状態になる. アウトバースト開始からハード/ソフト遷移を起こすまでの時間(開始-遷移時間: 図の点線で挟まれた期間)が1-2週間と長く, 遷移を起こすX線光度はソフト/ハード遷移の標準的な遷移光度であるエディントン光度の1-4%よりも明るい. 一方, Fast型は2-20と15-50 keVバンドの両方で増光するが, 15-50 keVバンドの光度が小さく, ほとんど増光開始時からソフト状態である. このため開始-遷移時間が数日とSlow型のものより短く, 遷移を起こすX線光度もエディントン光度の1-4%程度であり, Slow型より低い.

このSlow型とFast型の違いは, アウトバーストを起こす前の光度と相関があることがわかった. 図のpre-o(pre outburst)の期間が明るとSlow型になる. これはつまりアウトバースト開始前の円盤の状態や, 円盤のどの位置で状態遷移が始まり, それが半径方向にどう伝播していくのか, などとの関連を示唆しており, その後に起こるアウトバーストの特徴を決めている原因解明への手がかりとなる. 今後, 長期連続観測でアウトバーストの立ち上がりの観測が増えることで, 二つのタイプの解明に向けてさらなる進展が期待される.

### 3. ミニアウトバースト

定常的に輝くNS-LMXBは大規模なアウトバーストは起こさないものの, 不規則に変動することが知られている. MAXI/GSCの長期連続観測により, 3つの定常天体(4U 1636-536, 4U 1705-44, GS 1826-238)から繰り返し起こる小規模の光度変動を検出した. さらに, 1つのトランジェント天体(4U 1608-52)のアウトバースト中の明るい時期からも同様の光度変動を検出した. GSCデータとBATデータを合わせて解析した結

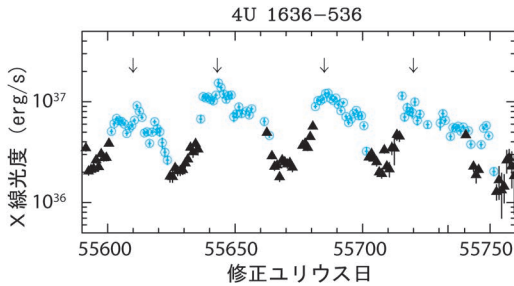


図2 ミニアウトバースト（矢印）の一例. 4U 1636-536の光度曲線<sup>2)</sup>. 1データ点は1日の平均. 青丸印がソフト状態で、黒三角印がハード状態を示している.

果、図2に示すように、光度が上がるとソフト状態、下がるとハード状態になっており、降着円盤の状態遷移を伴う光度変動であった。つまり見かけの強度変動ではなく、実際に降着量が変化していることが分かった。この変動は数倍の光度変化で、発生間隔も数十日と短いという性質をもち、通常のアウトバーストに対しミニアウトバーストとも呼べるものである。つまり、降着円盤の状態遷移は、通常のアウトバーストのような大きな光度変化の際だけではなく、光度が一桁以内で変動している時でも起きていることが分かった<sup>2)</sup>。

さらに、これらは、嶺重らが理論的に予言した円盤不安定性のうち、温度依存性が小さいときに生じる *purr type* (猫のノドゴロゴロ型) と呼ばれる光度変動<sup>3,4)</sup> に対応することを提案した。また、この温度依存性が小さい不安定性は中性子星からの X 線照射により降着円盤の温度が上昇している場合に起こると考えた。今後、このような状態遷移を伴うミニアウトバーストが観測された時には、X 線照射が効いている状態にあると推測でき、降着円盤の大きさに新たな制限をつけられる

可能性がある。

#### 4. MAXIで分かってきたこと

これまで、NS-LMXBの X 線変動はおもに  $\geq 10^{37}$  erg/s の高光度の状態ばかり注目されてきた。MAXIは、高い感度と常時監視の機能を持ったため、 $\sim 10^{38}$  から  $\sim 10^{36}$  erg/s までの広い光度範囲での挙動を総合的に理解できるようになった<sup>5,6)</sup>。現在、ASMとGSCを合わせた合計24年の長期連続観測により、NS-LMXBの連星軌道周期よりもはるかに長いタイムスケール(10年以上)の X 線変動が見えてきている。今後、NS-LMXBの長期観測により、大局的なNS-LMXBの姿が明らかになるだろう。

#### 参考文献

- 1) Asai, K., et al., 2012, PASJ, 64, 128
- 2) Asai, K., et al., 2015, PASJ, 67, 92
- 3) Mineshige, S., & Shields, G. A., 1990, ApJ, 351, 47
- 4) 嶺重慎, 1991, 天文月報, 84, 288
- 5) Matsuoka, M., & Asai, K., 2013, PASJ, 65, 26
- 6) 松岡勝, 浅井和美, 2013, 天文月報, 106, 244

#### Long-term variability of NS-LMXB

Kazumi ASAI

High Energy Astrophysics Laboratory, Riken, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Some of the low-mass X-ray binaries with a neutron star (NS-LMXB) show outbursts or long-term variability. Long-term observation with MAXI has an advantage to such a phenomenon. Here, we describe two topics, (1) we analyzed the initial rising behavior of the outbursts and classified them into two types (Slow and Fast), (2) we suggested a possibility that mini-outbursts are caused by disk instability with small temperature dependence.

# MAXI/GSCによる7年間の 全天軟 X 線カタログ

川 室 太 希

〈国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉  
e-mail: taiki.kawamuro@nao.ac.jp



MAXIは2009年8月以来、突発天体の発見や変動天体のモニター観測を行う傍ら、今日に至るまで膨大な全天X線データを蓄積してきた。2016年7月までの約7年間にガス比例計数管（GSC）で得られた4-10 keVデータを全て積算することで、896個ものX線天体を検出することに成功し、高銀緯 ( $|b| > 10^\circ$ ) と低銀緯 ( $|b| < 10^\circ$ ) 領域をカバーする2つのX線天体カタログ（MAXI/GSCカタログ第3版）を出版した。同帯域の全天サーベイ装置としては過去最高の感度を達成しており、検出される天体が他の天体と空間的に分解できなくなる混入限界にほぼ到達している。また、検出されたX線天体のうち約30%は、既存のX線カタログに対応天体を持たず、新天体である可能性がある。同程度のX線フラックス限界で比較した場合、約30年前にHEAO-1で見られていた活動銀河核の約半分はMAXI/GSCでは見えなくなった一方、ほぼ同等数が今回新たに検出されている。したがって、数十年で見える天体が変化することもわかった。

## 1. X線カタログ

天文学において、天体カタログは統計的な議論などをする上で基礎となる大変重要なものである。X線帯域でのカタログは、特に銀河系内ではブラックホールや中性子星といったコンパクト星の研究、そして系外では活動銀河核（AGN: Active Galactic Nucleus）の研究において重宝される。例えば、コンパクト星は強い星間吸収によって、また一方AGNはトラスと呼ばれる吸収体によって中心部が隠されることが多々あるので、透過力の高いX線を用いるとバイアスの少ないサンプルを得ることができるからである。

これまで、超軟X線 ( $< 2$  keV) では1999年にROSATによって<sup>1)</sup>、近年では2016年にMAXI/Solid-State Slit Camera (SSC) によってより硬いX線 (0.7-7 keV) までカバーした全天カタログが作成されている<sup>2)</sup>。硬X線 ( $> 10$  keV) では、2008

年にSwift/BATや2010年にINTEGRAL/IBISを用いて作成した全天カタログが出版されている<sup>3), 4)</sup>。そして、特に軟X線 ( $\sim 2-10$  keV) は歴史が長く、1970年代からUhuruを皮切りにCopernicus, HEAO-1, SAS-3, Ariel-5, 「ぎんが」, 「あすか」, そしてRXTEなどによって非常に多くのカタログが作成されてきている。現在、MAXIが過去最高感度の全天サーベイ装置として、その一翼を担っている。

MAXIの一番の特徴はX線で見える宇宙を常時観測していることであり、 $\sim 92$ 分の頻度で全天を走査している。数秒から数日以内の短い変動に対しては自動アラートシステムが働いており（本特集No. 2根來の記事を参照<sup>5), 6)</sup>、様々な変動天体が検出されてきている。一方で、より長い時間スケール ( $\sim$ 数ヶ月) に着目した探査も行われており、短い時間スケールで見つかったこなかった現象、例えば超巨大ブラックホールによる星潮汐破

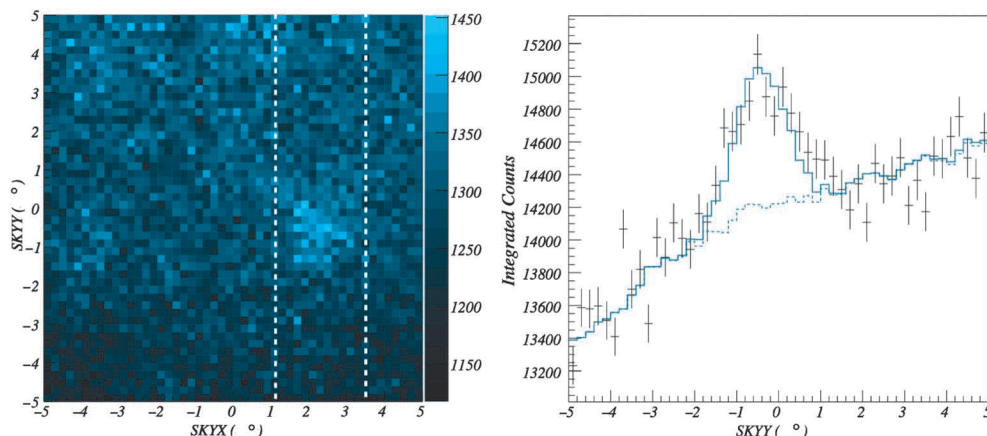


図1 MAXI/GSCによる点源の検出の例。(左) 天球上のある $11^\circ \times 11^\circ$ の領域におけるカウント数の空間分布。ここでは、AGNであるNGC 1365 (SKYX, SKYY $\approx 2^\circ, -1^\circ$ )を含む領域を例としてあげている。(右) 左図の破線で挟まれた領域を、SKYY (左図の縦軸) 方向に射影した1次元プロファイル。黒十字が観測データ、青破線がバックグラウンドモデル、青実線がバックグラウンドモデルと点源モデルの和を表す。

壊現象などを検出することに成功している<sup>7)</sup>。そしてこれらの観測データを全て積算することで、MAXIの感度を最大限まで引き出し、X線天体カタログが作られている<sup>8),9)</sup>。

## 2. MAXI/GSC軟X線 (4-10 keV) カタログ

MAXIを構成する2種類の検出器、すなわちGas Slit Camera (GSC)<sup>10)</sup>とSSC<sup>11)</sup>のうち、本稿ではGSCによって得られた2009年8月13日から2016年7月31日までの約7年間の軟X線 (4-10 keV)の高銀緯と低銀緯カタログを作成したので、それについて紹介する<sup>12),13)</sup>。GSCはSSCに比べて、大きな有効面積を持ち、かつエネルギー分解能は低いものの高いX線エネルギーまで感度があり、広い帯域 (2-30 keV) にわたってスペクトルを議論することができる。本カタログでは、特にMAXI/GSCの光子検出効率が高くバックグラウンドもしくは雑音レベルが低い4-10 keV帯域が天体検出に使われている。また透過力が高い帯域のために、星間吸収に対するバイアスも抑えられる。以下に述べるように、高銀緯 ( $|b| > 10^\circ$ ) と低銀緯 ( $|b| < 10^\circ$ ) 領域では考慮すべき事項が異

なることから、別々に解析をしている。

### 2.1 高銀緯 ( $|b| > 10^\circ$ ) X線カタログ

観測データを集積するにつれてより暗いX線天体まで見つけることができるため、高銀緯カタログは初版の7ヶ月カタログに始まり、37ヶ月カタログの第2版まで、廣井和雄の主導のもと作成された<sup>8),9)</sup>。今回の7年カタログに関しても本質的に従来の解析手法を踏襲している<sup>9)</sup>。基本となる操作は、点源の検出である。それには、全天を図1左のように $11^\circ \times 11^\circ$ の領域に分割して各個に解析している。まず、宇宙X線背景放射と荷電粒子やガンマ線を起源とする信号を合わせてバックグラウンドをモデル化する。それを基に、観測によって得られた画像データから有意な正の信号を抽出し、X線天体の位置を推定する。そして、GSCの角度分解能 (半値全幅で $\sim 1.5^\circ$ ) を考慮した点源モデルを候補の数だけ作成した後、それらとバックグラウンドモデルを2次的にフィットした。その際、点源モデルについては1天体あたり空間2次元座標上での位置と強度を合わせた3つ、そしてバックグラウンドについては強度の1つが自由パラメータとなっている。図1右が1次元に投影したフィット結果の一例である。



こうして作られた本カタログは、これまでの MAXI/GSC カタログと比較して、データ蓄積時間を長くすることで統計誤差を減らしたほか、再現性の鍵となるバックグラウンドと点源のモデルの精密化を図ることで、系統誤差を減らし、その結果として検出感度を向上できた。従来までに、宇宙線強度や宇宙船ソースズが MAXI に近いポートにドッキングしているかどうかでバックグラウンドの検出器上の位置分布やエネルギー分布が変化することがわかっていた。今回さらに機上データを精査することで、その特性が MAXI の南北の指向方向によって異なることもモデルに考慮した<sup>14)</sup>。また図 1 右のように点源が広がる効果をあらわす点源応答関数は、従来の簡単なものを改良し、X 線の検出器への入射角度の依存性やエネルギー依存性を考慮したモデルを構築し採用している<sup>13), 15)</sup>。その結果、点源応答やバックグラウンドが検出器の位置に依存する効果を、うまく再現することができた(図 1 右)。

初版では  $7\sigma$  以上<sup>\*1</sup>で 143 個の X 線天体が検出されていたが、第 3 版にあたる 7 年カタログでは統計誤差が減ったこともあり、約 5 倍に相当する 682 個もの X 線天体を  $6.5\sigma$  以上で検出することに成功した。この閾値は、モデルの不定性によって出る負の信号の検出数を数え、それと同数が偽天体として正の信号にも入り込むという統計的な仮定のもと、その数が少なくなるように決めている。図 2 に検出した天体の空間分布を示す。こうして「かに星雲」の X 線フラックスの 2000 分の 1 にあたる  $\sim 6 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  の感度を達成した。これはほぼ MAXI の混入限界、つまりこれ以上感度を上げて検出できたとしても、空間的に他の天体と分離できなくなる限界に相当する。

既存の X 線カタログと比較したところ、約 60% の天体は過去の X 線カタログに対応天体があり、それらの多くは銀河団や AGN に同定されている。

残りの約 40% は、既存の X 線カタログに対応天体が無かった。それらの正体は、以下のとおり様々であると考えられる。

- ・時間変動により明るくなり、検出感度を越えた天体。
- ・サーベイ感度が向上したため新たに発見された、暗い天体。
- ・従来のカタログで、たまたまサーベイの浅い領域にあった天体。
- ・適度な吸収かつ硬 X 線で暗い急峻なスペクトルにより、超軟 X 線と硬 X 線の両方のカタログで見落とされている天体。

現状の MAXI で持ちうる情報を見る限り、例えば軟 X 線と硬 X 線光子の強度比から、対応天体の無いものの多くは活動銀河核ではないかと思われる。より詳細な解析や追観測等は、今後の課題である。

## 2.2 低銀緯 ( $|b| < 10^\circ$ ) X 線カタログ

低銀緯についても同様に、堀貴郁の主導のもと X 線カタログを作成した<sup>13)</sup>。しかし、高銀緯と比較して 2 つの困難があった。そのためカタログの出版は遅れ、7 年カタログが初版に相当する。第 1 の困難は、MAXI の角度分解能(半値全幅で  $\sim 1.5^\circ$ ) のせいで分離できないほど明るい X 線天体が数多く存在することである。そこで、角度分解能のよい Swift /BAT (半値全幅で  $\approx 0.3^\circ$ ) による 105 ヶ月カタログ<sup>16)</sup> で存在がわかっている天体については、その位置を固定して考慮した。そのうえで、MAXI で新たに見えてきた天体を含めることで、天体混入の影響を抑えて 2 次元画像を再現した。それでも、銀河中心の周囲 ( $|b| < 5^\circ, l < 30^\circ$ , かつ  $l > 330^\circ$ ) は明るい天体が密集しているために、今回の解析領域から外さざるを得なかった。第 2 の困難は、銀河面に沿って広がった X 線放射 (Galactic Ridge X-ray Emission) の影響である。今回は、既存の観測結果をもとにその空間分布をモデル化し

\*1  $1\sigma$  は 2 次元フィットに用いた  $\chi^2$  分布に従う尤度関数が 1 だけずれたときのフラックスの誤差で、データの感度を表す基本的な単位として用いられる。

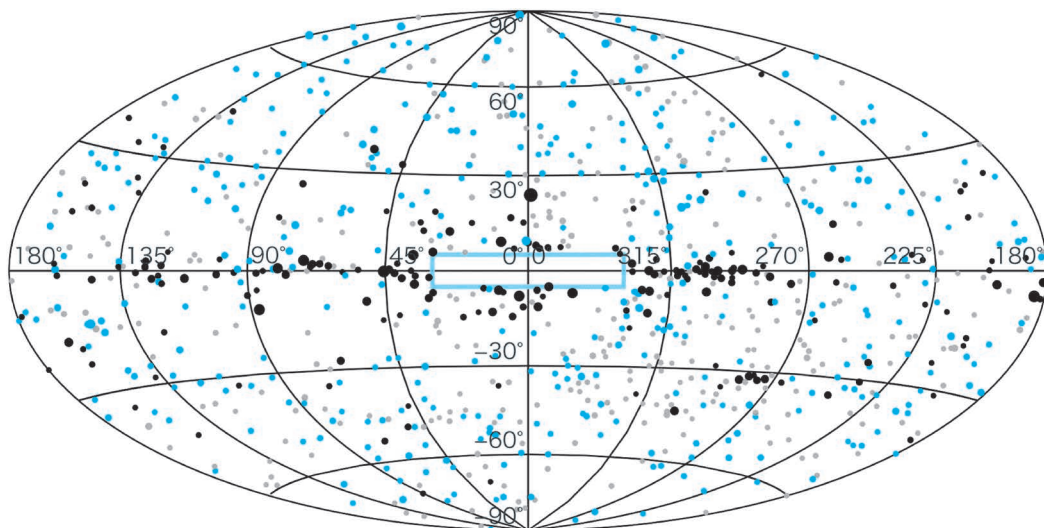


図2 MAXI/GSCの7年間の積算データから検出された全天896天体（高銀緯で682天体，低銀緯で214天体）の銀河座標での空間分布．銀河中心の周囲（シアン）の四角内）は除く．青は系外の天体（AGNや銀河団）と同定されたものを表し，黒は銀河系内や大/小マゼラン雲に存在するX線天体（X線連星系，活動性の高い星，パルサーなど）とわかったものを表している．灰色は未同定天体である．サイズが大きい天体ほど明るい．

て考慮した<sup>17)</sup>．

最終的に，銀河中心領域を除いて低銀緯でも，点源，銀河面X線放射，バックグラウンドのモデルを用いて観測データを高精度で再現することができた．そして，混入限界に近い感度のもと，214天体ものX線天体を検出することに成功した．他のカタログとの比較から，それらの約80%は既知のX線天体であり，全体の30%は銀河系内のX線連星系である．

### 2.3 X線光度の長期変動

ここで，検出されたX線天体の光度変動についても簡単に紹介しておきたい．第1章で述べたようにMAXIの最大の特徴は長期的な全天常時モニタリング観測であり， $\approx 92$ 分間隔で光度やスペクトルの時間変化を調べることができる．図3にあるように，7年間で数倍もの光度変動は様々な天体で見られている．この事実から期待されるように，7年間のデータをより短い時間スケールに分けることで，一時的に明るい天体が見つかる．

高銀緯ではAGNの時間スケールに着目して1年毎にデータを分けて，4天体を検出した．一方で，低銀緯ではより小さい系に重きをおいて，73日毎にデータを分けて，7天体を検出している．また，このような光度変動が原因で，同程度の限界フラックスで比較した場合，約30年前にHEAO-1<sup>18)</sup>で見られたAGNの約半分はMAXIで受かっておらず，ほぼ同等の数のAGNが新たに検出された．このことからAGNのX線放射は，数十年のタイムスケールで大きく変動することが示唆される．

本カタログ記載の全ての天体については，2016年7月31日までの光度曲線が既に作成され，論文から一覧できるようになっており，興味のある方はぜひご覧いただきたい<sup>12), 13)</sup>．より詳細な解析をしたい場合には，任意の座標と時間での画像や光度曲線，そしてスペクトルがMAXIオンデマンドシステム<sup>\*2</sup>を通して取得できるようになっている．

\*2 <http://maxi.riken.jp/mxondem/>

### 3. まとめと展望

MAXIの約7年にわたる観測データを利用し、4–10 keVのX線帯域でかつてない感度の(銀河中心領域を除いたほぼ)全天カタログを作成した。高銀緯と低銀緯で合わせて896天体を検出し、そのうち約30%については過去のX線カタログから対応天体が見つからなかった。結論を下すにはさらなる調査が必要だが、新天体の可能性がある。また今回、混入限界に近い感度に到達したことから、MAXIの運用が更に継続していったところでこれ以上の意味のあるカタログができるのか、と疑問に思うかもしれない。しかし前述の通りX線でみる宇宙は刻々と変化しており、着目する期間や時間スケールを変えれば、新たな天体が必ず見つかるかと期待している。事実これまでに、ある時間スケールに着目することで、高銀緯と低銀緯でそれぞれ一時的に明るい4天体と7天体を検出した。そのため、現状の合計の検出数は907天体になる。

2019年7月13日には、ドイツとロシアによるX線全天サーベイ装置eROSITAが無事に打ち上げられた。eROSITAは、0.5–10 keVをカバーし感度も位置分解能もMAXI/GSCのそれらよりはるかに高い。これによりやがて詳細な全天X線カタログが作成されるだろう。しかし、eROSITAは全天を常時モニターするわけではない。従ってMAXIの常時全天モニター観測は、これからもX線天体の観測に欠かせない役割を果たし続けることになる。

#### 謝辞

本稿の科学的内容は筆者1人でなし得たものではなく、MAXIチームのこれまでの運用やデータ校正の努力があってこそのものである。そしてとりわけ、上田佳宏准教授のもと京都大学のチームがこれまで約10年近く連綿と解析してきた結果である。具体的には廣井和雄氏そして堀貴郁氏の

京都大学での博士課程での成果やその解析技術が引き継がれて、ここに結果がまとまっていることを述べておきたい。そして末筆ながら、以上全ての方々に改めて感謝を述べたい。

#### 参考文献

- 1) Voges, W., et al., 1999, A&A, 349, 389
- 2) Tomida, H., et al., 2016, PASJ, 68, S32
- 3) Tueller, J., et al., 2008, ApJ, 681, 113
- 4) Bird, A.J., et al., 2010, ApJS, 186, 1
- 5) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 6) 根來均, 2019, 天文月報, 112, 627
- 7) Kawamuro, T., et al., 2016, PASJ, 68, 58
- 8) Hiroi, K., et al., 2011, PASJ, 63, S677
- 9) Hiroi, K., et al., 2013, ApJS, 207, 36
- 10) Mihara, T., et al., 2011, PASJ, 63, S623
- 11) Tsunemi, H., et al., 2010, PASJ, 62, 1371
- 12) Kawamuro, T., et al., 2018, ApJS, 238, 32
- 13) Hori, T., et al., 2018, ApJS, 235, 7
- 14) Shidatsu, M., et al., 2017, 7 Years of MAXI: Monitoring X-ray Transients, 29
- 15) 堀貴郁, 2018, 博士論文(京都大学)
- 16) Oh, K., et al., 2018, ApJS, 235, 4
- 17) Revnivtsev, M., et al., 2006, A&A, 452, 169
- 18) Piccinotti, G., et al., 1982, ApJ, 253, 485

### The 7-year MAXI/GSC All-sky Soft X-ray Source Catalog

Taiki KAWAMURO

National Astronomical Observatory of Japan,  
2–21–1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181–8588, Japan

Abstract: MAXI has successfully accumulated a large amount of all-sky X-ray data since 2009 August to date, while detecting new transients and monitoring variable sources. Utilizing the first 7-year MAXI/GSC data in the 4–10 keV band, we successfully detected 896 X-ray sources and released X-ray source catalogs in high- and low-galactic latitudes. The 4–10 keV band sensitivity is the highest ever achieved as an all-sky X-ray survey in a similar energy band, and is close to the confusion limit of the MAXI/GSC. We found no counterparts for 30% of the detected sources from past X-ray catalogs, being perhaps new objects. Also, we found that for a given flux limit, a half of the active galactic nuclei detected by HEAO-1 ≈ 30 years ago could not be detected by the MAXI/GSC, suggesting a change of detectable X-ray sources within a few decades.

# MAXIによる重力波源の電磁波対応天体の観測

杉田 聡 司

〈青山学院大学理工学部物理・数理学科〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1〉

e-mail: sugita@phys.aoyama.ac.jp

2017年8月17日に中性子星連星の合体による重力波イベントが初めて検出され、その電磁波対応天体が同定された。これにより重力波やガンマ線バースト（GRB）の研究は大きな盛り上がりを見せた。しかし発見された電磁波対応天体はまだ1例のみである。MAXIは1周回（約92分）で全天を走査するため、重力波の到来方向の誤差範囲を広くカバーした観測が行える。感度的には近傍で発生した短いGRBの残光が検出できると推定され、数多くある電磁波観測の中でもユニークな成果が期待できる。本稿ではMAXIによる重力波源の電磁波対応天体の観測の狙いとこれまでの観測結果、および2019年4月に開始した重力波検出器の第3回観測期間（O3）における観測体制の更新について報告する。

## 1. 重力波源の電磁波対応天体

2015年9月14日に重力波検出器Advanced LIGOによってブラックホール同士の合体に伴う重力波が初めて検出された<sup>1)</sup>。一般にバースト的な重力波はブラックホールや中性子星など高密度天体が強い重力の下で激しく運動することで発生しており、そこで起こる高エネルギー天体現象からは、電磁波の放射も期待できる。特に中性子星同士が合体する時には、短いガンマ線バースト（SGRB）が発生すると考えられており、SGRBに同期した重力波の検出と、その電磁波対応天体の観測が待ち望まれていた。

2017年8月17日にAdvanced LIGOとVirgoによって中性子星連星の合体による重力波（GW170817）が初めて観測された<sup>2)</sup>。世界中の観測者によって、LIGO-Virgo Collaboration（LVC）と連携した重力波源電磁波対応天体（以下重力波天体と称す）に対する追観測体制が組まれており、重力波発生の1.7秒後にガンマ線放射が観測され、半日後には重力波検出器が決めた誤差方向の範囲

内に可視光で対応天体が発見され、数多くの多波長追観測が行われた<sup>3)</sup>。すでに月報特集記事で解説されているのでそれぞれの観測結果の詳細はここでは省略するが<sup>4)–6)</sup>、重力波と同期したガンマ線イベントGRB170817Aは従来のSGRBと同様に継続時間が短く<sup>7)</sup>、可視光・赤外線放射からキロノバによるrプロセス元素合成の証拠が見つかるなど<sup>8)</sup>、予想されていた中性子星連星の合体の描像に一致し解明された印象がある。しかし重力波天体の観測はまだ1例のみであり、GRB170817AのX線残光に関しては従来のSGRBとは異なる特徴を持つなど全てが解明したわけではない。重力波天体の電磁波観測は2例目以降も重要である。

## 2. MAXIによる観測

### 2.1 全天モニタと電磁波対応天体

ではMAXI/GSCは重力波天体に対してどのような観測が行えるか。鍵となるのは高い観測カバー率と速報である。

全天モニタであるMAXI/GSCは走査型の検出器であるため瞬間的な視野は狭く、また特定の方

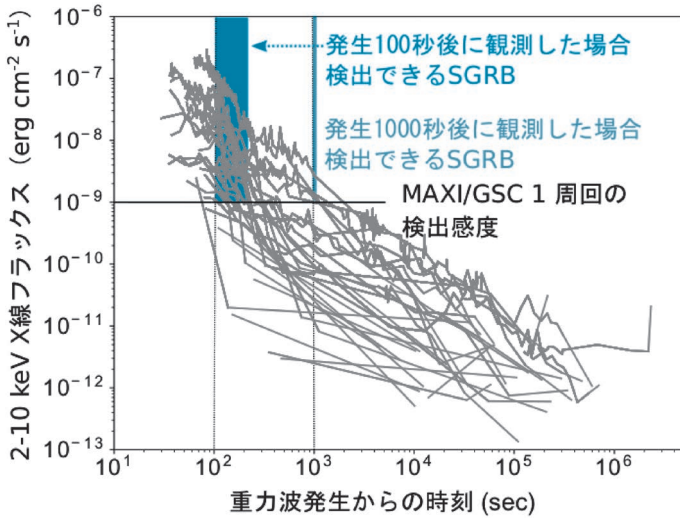


図1 近傍で発生した場合に換算した SGRB の X 線残光光度曲線と MAXI/GSC の検出限界の関係。灰色線はこれまで観測された SGRB 残光が O3 の限界距離 170 Mpc で発生した場合の X 線フラックス。黒線は MAXI/GSC 1 周回の検出限界。

向を向き続けることはできないため、SGRB のような短い時間スケールの突発天体の観測は得意とは言えない（芹野の特集記事<sup>9)</sup>を参照）。一方で、SGRB の残光のように長く続く現象では MAXI に利がある。92 分で全天の約 80% を観測する MAXI であれば、数十平方度と大きい誤差範囲を持つ重力波イベントの X 線残光を早期に発見し、到来方向を 0.2 程度の範囲で決定できる可能性がある。図 1 は SGRB の X 線残光の時間変化と MAXI/GSC 1 周回の検出感度を比較したものである。MAXI/GSC の 1 天体の観測時間は軌道 1 周回（92 分）につき約 100 秒間であり、もし重力波天体の方向を向くタイミングが発生直後であれば 90% の SGRB が、1000 秒後であれば 15% の SGRB が検出感度を上回る。このように近傍で発生した SGRB の残光であれば、検出感度的に観測が可能と推定される。

重力波イベント GW170817 に付随した SGRB で

ある GRB170817A では、X 線残光は重力波発生から 2 週間遅れてようやく出現し、かつ極めて暗かった<sup>10)</sup>。これは、従来の SGRB の残光の持つ、最初は明るく時間のべき乗で減光する特徴とは大きく異なる。このため GRB170817A の検出は、SGRB が中性子星連星の合体が起源であるという従来の定説の確実な証拠には至らなかった。GRB170817A が特別で、重力波イベントに付随する SGRB の多くが従来の例と同様にべき乗で減光しているのか、やはり重力波天体では異なる特徴なのか、これを明らかにするには両者の差が大きい早期の X 線残光の観測が鍵となる。MAXI の観測が SGRB の起源を解明する手がかりとなることが期待される。

二つ目の鍵である速報については、MAXI ではデータを自動監視する突発天体発見システムが構築されており<sup>11)</sup>、重力波天体かどうかによらず MAXI チームで 24 時間の速報体制を敷いている。重力波イベントの誤差範囲内に統計的に有意なイベントが検出された時には、MAXI による位置情報は全世界に確実に速報されることになる。もし MAXI によって早期に位置を決定し速報することができれば、感度の高い望遠鏡による観測をより初期から行うことができる。

## 2.2 これまでの観測

MAXI チームは 2015 年 9 月から LVC と協定しており、重力波検出のアラートを受けて観測データから重力波天体の探査を行ってきた。重力波発生時刻に観測が行われているかを確認し（放射線が強い高緯度では観測を停止しているため）、重力波イベントの誤差範囲内に X 線新天体が検出されているかチェックする。ここで言う X 線新天体とは、統計的に有意な X 線光子量の像が、既知の X

\*1 GCN はもともと GRB 速報ネットワークだが、そのまま重力波天体の観測速報にも使われている。

線天体に対応しない位置に出現し、かつ点源と矛盾しない大きさであった場合を指す。もし有意な X 線新天体が検出されていれば真っ先に速報し、なければ X 線フラックスの上限値とともに重力波天体メーリングリスト (GCN\*) に報告する<sup>12)</sup>。以下、代表的な重力波イベントの観測結果を示す。

#### GW150914

Advanced LIGO が検出した最初の重力波源である。ブラックホール同士の合体のため、理論的には電磁波の観測は期待されないが、初めての重力波イベントとあって、電磁波による誤差範囲の追観測が一斉に行われた。発生時 MAXI/GSC は高緯度のため観測を行っていなかったが、発生から 92 分後までに重力波イベントの誤差範囲 (610 平方度) のうちの 95% をカバーした。その結果、領域内に有意な X 線新天体は検出されず、X 線フラックスの上限値 ( $9.5 \times 10^{-10} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) を報告した<sup>13)</sup>。他の電磁波の観測からも重力波の電磁波天体は発見されていない。

#### GW151226

2 番目の重力波源で、ブラックホール同士の合体であり、電磁波対応天体は発見されていない。その発生時には MAXI/GSC は観測中であり、発生から 4 分後まで観測を続けた。発生から 92 分後までに重力波イベントの誤差範囲 (850 平方度) のうち 84% をカバーした。また突発天体発見システムによって、発生から 96 分後に重力波イベントの誤差範囲内で X 線新天体の候補が検出されたが、有意度が基準値 (バックグラウンドの揺らぎの 3 倍) に達していなかったため GCN ではこの件は報告しなかった<sup>14)</sup>。

#### GW170817

初の中性子星同士の合体による重力波イベントである。LIGO に加え、Virgo の観測が開始された

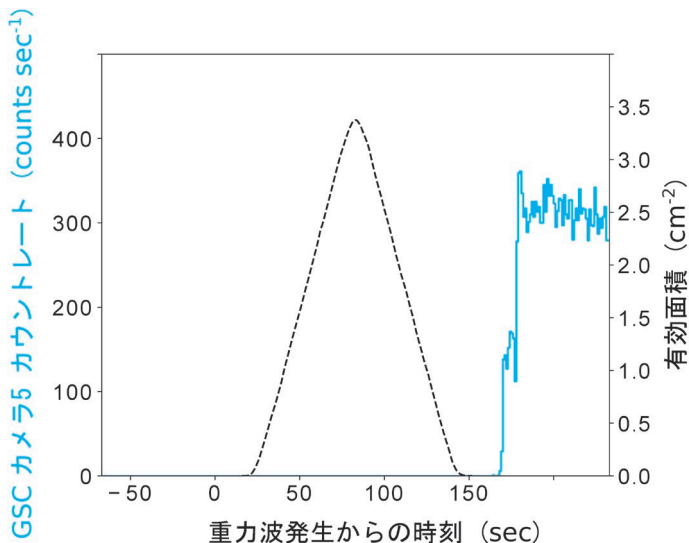


図2 GW170817 発生時の MAXI/GSC のデータ。点線は重力波天体に対する GSC カメラ 5 の視野 (有効面積) の推移。実線は GSC カメラ 5 のカウントレート。173 秒までは観測を中断していた。

ため重力波イベントの誤差範囲が 28 平方度と一気に小さくなり、可視光で重力波天体が発見された。MAXI/GSC は重力波発生 77 秒後という早いタイミングで重力波天体の方向を向いたが、不運にも観測を行っていなかった。地球の極に近い高緯度の上空では荷電粒子による放射線が非常に強く、検出器を保護するために高圧電源を落とし観測を中断している。MAXI/GSC が 1 周回でカバーできていない残り 20% の大半は、この高放射線帯を通過している時間である。図2のように MAXI/GSC が重力波天体の方向をスキャンしたのはこの高放射線帯を抜ける直前で、それは観測開始のわずか 173 秒前であった。国際宇宙ステーションの軌道は周回毎に少ししか変わらないので、ひとたび観測しない領域に入ってしまうと数周回は観測できない状況が続く。結局、軌道が放射線帯から逸れて重力波天体の方向を観測できるようになったのは発生から 4 時間 40 分後であった。それでも X 線観測では最速であり、X 線フラックスの上限値 ( $8.6 \times 10^{-9} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) を報告した<sup>15)</sup>。

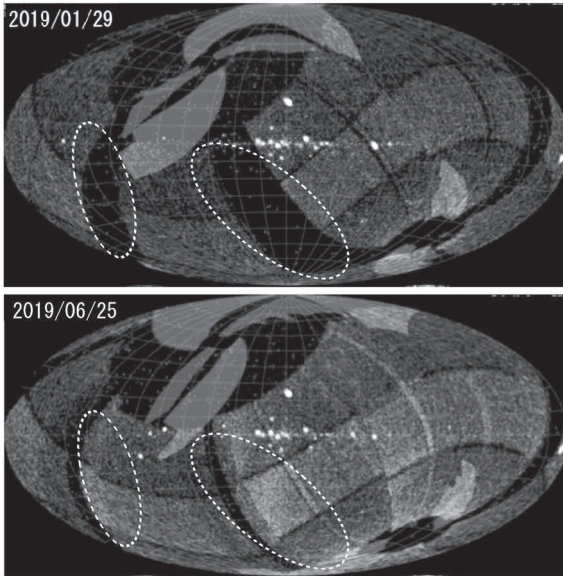
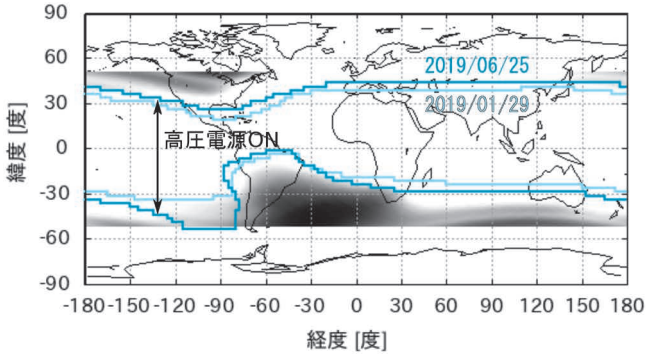


図3 荷電粒子の強度マップ (上), および観測時間拡大前 (中) と拡大後 (下) の1周回の前転画像. (上) では黒の濃淡が荷電粒子強度を表し, 色付き線が検出器の観測 ON/OFF の境界線である. 観測 ON 領域を拡大したことで観測ギャップ (白破線領域) が埋まり全天カバー率が増加した.

### 3. そしてO3

2019年4月から重力波検出器は第3回観測期間 (O3) というフェーズに入っている. 機器の改良と調整が進んだことで, それ以前より遠く (~170 Mpc) の中性子星の合体の検出が可能となり, 観測数は年間で最大50程度と飛躍的に多くなることが予想された<sup>16)</sup>. 実際に2019年4月には中性子星の

合体の候補が2例, 報告された (ただし遠すぎて電磁波放射は検出されていない). すでに述べたように, MAXIによる重力波天体の観測で鍵になるのは観測カバー率の高さと速報である. これらの利点をより伸ばすべくO3に向けてMAXI/GSCでは次のようなアップデートを行った.

#### 3.1 観測時間の拡大

国際宇宙ステーションの軌道傾斜角は51.6度なので1周回中に高緯度を必ず通るため, 二つのカメラセットを合わせても1周回の全天カバー率は80%程度にとどまる. このカバー率を100%に近づけるため観測時間の拡大を試みた.

検出器をON/OFFするタイミングは図3 (上) に示した, 地球上空の荷電粒子強度分布をもとに決定している. 2019年初頭までは検出器の損傷を抑えるよう, 荷電粒子の多い領域にマージンを多く設けた領域で観測をONにしていた. O3に向けてこのマージンを慎重に削り, 観測ONの領域を拡大した. 拡大運用後は観測のギャップが埋められ, 図3 (下) では全天カバー率を9%増加させることに成功した<sup>\*2)</sup>.

#### 3.2 速報体制の改善

前回の観測期間 (O2) までは重力波イベントの発生頻度が低かったこともあり, 担当者がアラートに反応して手で解析を行いGCNへ報告するという手順であった (解析の詳細と苦勞は月報記事<sup>9)</sup> に詳しい). 重力波天体のアラートはO3からは月6件程度に増加している. そこでMAXIによる速報が遅れないよう, 重力波天体の解析に専用の計算機を用意し, 速報の自動化を進めた. この計算機ではアラートメールを

\*2 軌道によっては低緯度でも放射線が強い領域を通過するので毎軌道のカバー率を100%にはできていない.

受けた直後に重力波天体の自動解析が行われ、結果を web などで常時確認できるようになった。GCN への観測カバー率と上限値の報告の際にはスマートフォンなどの端末からでも解析結果をチェックし投稿することが可能である。これにより投稿までの時間が安定して早くなった (92+数十分)。現在、解析結果の公開用 web ページを準備中である。

重力波天体を MAXI が今後も観測し続け、SGRB の起源の解明に貢献できるよう、これからも最善を尽くして運用を行なっていきたい。

## 謝 辞

本稿は MAXI チーム重力波天体対応メンバーの活動と結果のまとめとして執筆した。また本研究は、新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」, 「重力波物理学・天文学: 創世記」の支援の元に行われた。

## 参考文献

- 1) Abbott, B. P., et al., 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 061102
- 2) Abbott, B. P., et al., 2017, Phys. Rev. Lett., 119, 161101
- 3) Abbott, B. P., et al., 2017, ApJ, 848, L12
- 4) 坂本貴紀, 2018, 天文月報, 111, 82
- 5) 内海洋輔, 2018, 天文月報, 111, 84
- 6) 田中雅臣, 2018, 天文月報, 111, 86
- 7) Goldstein, A., et al., 2017, ApJ, 848, L14
- 8) Tanaka, M., et al. 2017, PASJ, 69, 102
- 9) 芹野素子, 2019, 天文月報, 112, 717
- 10) Troja, E., et al., 2017, Nature, 551, 71
- 11) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 12) 芹野素子, 2017, 天文月報, 110, 25
- 13) Kawai, N., et al., 2017, PASJ, 69, 84
- 14) Serino, M., et al., 2017, PASJ, 69, 85
- 15) Sugita, S., et al., 2018, PASJ, 70, 81
- 16) Abbott, B. P., et al., 2018, Living Reviews in Relativity, 21, 3

## MAXI observations of gravitational wave sources

Satoshi SUGITA

*Department of Physics and Mathematics,  
Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe,  
Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5258,  
Japan*

Abstract: MAXI scans about 85% of the whole sky every 92 minutes with the orbital of the International Space Station. It is suitable to search for X-ray afterglow or extended emission of gamma-ray bursts (GRBs) accompanied by electromagnetic (EM) counterparts of GW events. We report the status of the search for the EM counterparts and the update of high-voltage operation and analysis environment for the LIGO-Virgo O3.



# MAXI/SSCの10年間の稼働実績と 0.7-4 keVのX線全天マップ



中 平 聡 志

〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: nakahira.satoshi@jaxa.jp

全天X線監視装置MAXIに搭載されたSSC (Solid-state Slit Camera) は新しい国産技術を多く用い、32枚ものX線CCDを搭載したチャレンジングな検出器である。ここではSSCが目指したサイエンスと、それを実現するための設計思想について簡単に触れた上で、国際宇宙ステーション軌道上における観測実績およびCCDの性能変化について述べ、最後にSSCの観測で得られた軟X線全天マップを示す。

## 1. はじめに

これまで多くの観測実験によって電波からガンマ線にわたる電磁波の全天マップが取得され、様々な空間的な構造が確認されてきた。そのような結果、地球近傍から銀河系全体にわたるダストやガスの分布に始まり、ビッグバンの名残としての背景放射による宇宙論パラメータに至る、種々の重要な情報が明らかになってきた。

軟X線帯域では、1990年代のROSAT衛星<sup>1)</sup>により全天マップの全貌が明らかになった。その結果によると、0.3 keV以下と0.4-1.2 keV帯域で、異なる空間構造が確認された。前者は現在では、太陽風と地球近傍の原子の相互作用による電荷交換反応 (SWCX) が起源だと考えられているが、後者 (おもに銀経、 $|l| \sim \pm 60^\circ$ 、銀緯、 $-30 < b < 60$  に分布) の起源は、それがおそらく銀河系に分布する温度  $\sim 10^6$  Kの大規模プラズマの熱的放射であること以上にはわかっていない。近年、この「軟X線巨大構造」と部分的に重複する領域に、フェルミバブル<sup>2)</sup>と呼ばれるガンマ線の巨大構造が見つかり、この軟X線巨大構造の起源の解明に新たな関心が向けられている。

## 2. MAXI搭載のSSC

### 2.1 SSCの設計思想

全天X線監視装置MAXIに搭載されたSSC (Solid-state Slit Camera)<sup>3),4)</sup> は、GSC (Gas Slit Camera)<sup>5)</sup> と同じく一次元のピンホールカメラとして働くが、GSCが2-30 keVに感度を持つのに対して、SSCはより低い0.5-12 keVに感度を持っている。望遠鏡を備えないSSCの点源に対する有効面積は最大で1 cm<sup>2</sup>と小さく、空間分解能は点源広がり関数 (Point Spread Function; PSF) の半値幅にして1.5°と粗いため背景放射に対する点源の検出感度は高くない。一方で90°×3° (×2台; 水平向きのSSC-Hと、垂直向きのSSC-Z) のファンビーム状の視野のおかげで、幾何学的因子 $S\Omega$ は合計で $\sim 150 \text{ deg}^2 \text{ cm}^2$  (@6 keV) に達し、92分の軌道周回ごとに全天の数十%の領域を観測して足し合わせることで、数度以上の大きさの拡散構造に対して過去最高の観測性能を持つ。さらにX線CCDの優れたエネルギー分解能によって、酸素から鉄にわたる様々な元素の輝線の空間分布を調べる能力も高い。こうして、「軟X線巨大構造の起源を調べる事」がSSCの使命として

与えられた。

## 2.2 国産の新技術の応用

国産の新しい技術が数多く用いられていることも SSC の特徴である。詳しくは富田氏による天文月報第 103 巻 8 号の記事<sup>6)</sup>でも述べられているが、SSC に搭載された CCD は常深博氏ら大阪大学グループと浜松ホトニクス (HPK) による共同研究で開発された。MAXI/SSC の開発から派生した HPK の CCD は「かぐや」および「はやぶさ」でも利用され<sup>\*1</sup>、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ (HSC) や X 線分光撮像衛星 (XRISM) でも使用される。

図 1 の様に SSC は 1 ユニットあたり 16 枚、異なる視野を観測する 2 ユニットを合計すると 32 枚と大量の CCD を備えるので、その冷却が大きな課題となった。検討の結果「すざく」XIS 装置と同じ冷却システムでは冷やしきれない事がわかったので、ペルチェ素子 (一段) と一体型の CCD として開発し、機械的にもペルチェで支える設計となった。ISS は常に軌道周回と同じ周期で自転しているため、1 軌道周回の中に様々な方向から太陽光を受ける。ペルチェから排出される熱はループヒートパイプによってラジエータと接続されるが、SSC は異なる方向を向く 2 つのラジエータを備え、ループヒートパイプはより冷えた面と熱的に接続される。

## 3. 軌道上における SSC の稼働実績

### 3.1 冷却系の稼働状況

代表的な測定点の 10 年間にわたる温度変化を図 2 に示した。ラジエータの温度 (図 2 上段) はヒートパイプの稼働状況によって熱源と接続される面が入れ替わるので振動しているが、概ね 10 年間、一定の性能を維持している。図 2 の中・下段は、1 日毎の最低温度を各 CCD について求め、その 16 CCD の中央値を示したものである。CCD

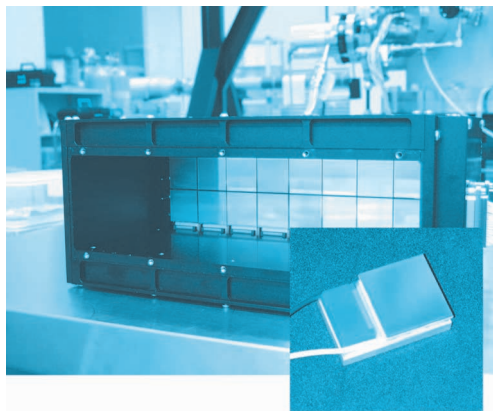


図 1 SSC 1 ユニット分の内部写真。2×8 枚の CCD が並んでいる。実際にはこの上にコリメータとスリットが取り付けられている。右下は 1 枚の CCD で、ペルチェ一体型である。

表 1 SSC の装置パラメータ。

CCD 枚数	16 枚 × 2 台
CCD サイズ	1024 × 1024 pixel / 1 CCD 24 × 24 μm / pixel
読み出し	64 pixel-binning
遮光	0.2 μm Al 蒸着
観測帯域	0.5–12 keV (設計) 0.7–7 keV (実際)
エネルギー分解能	~150 eV @ 5.9 keV
瞬間的な視野	90° × 3° × 2 台
点源に対する有効面積	~1 cm <sup>2</sup>
幾何因子 (Ω)	~150 cm <sup>2</sup> deg <sup>2</sup> (2 台)

温度も 10 年経過後も大きく変わっておらず、ペルチェを含む冷却システム全体の経年劣化は見られない。

2013 年の中頃に SSC-Z 温度が上昇しているのは、MAXI 搭載の 1 枚の CPU ボードが 1 年にわたり停止し、ペルチェを含め SSC-Z がストップしたためである。この事によって熱発生は低下したが、その間も稼働中だった SSC-H の CCD 温度はむしろ上昇した。これは、熱入力が減るとループヒートパイプの性能は低下するという特性のため

\*1 MAXI 打ち上げの遅れから両者の方が先に軌道上で利用された。

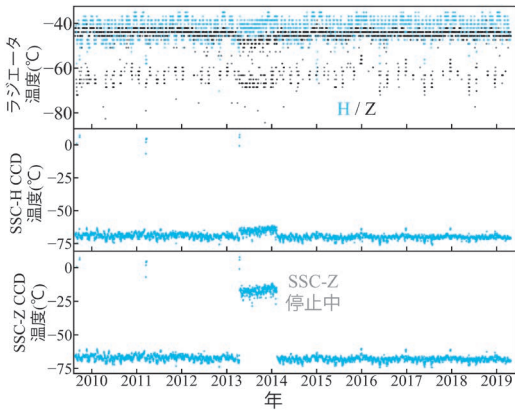


図2 上からラジエータ (H, Z面), SSC-Hおよび SSC-Zの CCD 温度. CCD 温度は 16 枚の中央値.

である.

### 3.2 CCD側面からの光漏れ

X線 CCD は赤外線や可視光にも感度を持つが, SSCの CCD は入射面に  $0.2 \mu\text{m}$  のアルミニウムを蒸着しており, この遮光は期待通りに働いた. しかし, CCD の側面の遮光が十分でなく, ISSが昼の間, もしくは月が視野付近にある間は可視・赤外光の影響を強く受けることが判明した. この間のデータを利用することは難しいので, 昼の時間帯には観測を停止し, 月の影響を受ける間はデータ処理で対応した. そのため, 全体としての観測効率は当初予想の半分以下に低下した.

### 3.3 放射線ダメージによる性能低下

衛星軌道上で稼働する放射線検出器には放射線ダメージによる劣化が一般的に見られ, SSCで用いる CCD の場合, 熱的ノイズの増加や電荷の収集効率の悪化で起きる, 低エネルギーイベントの増加やエネルギー分解能の悪化が想定される. 図3 (a, b) にはそれぞれ, 観測初期とその7年後の検出器座標でのイベントレート分布を示した. この図の左右はコリメータの入射角に対応しており, 中心が  $\theta=0^\circ$ , 両端が  $|\theta|=45^\circ$  である. 図3 (a) と (b) を比べると,  $|\theta|\sim 45^\circ$  の CCD#H0 (各ユニットの 16 枚の CCD は 16 進で #0, 1, ..., E,

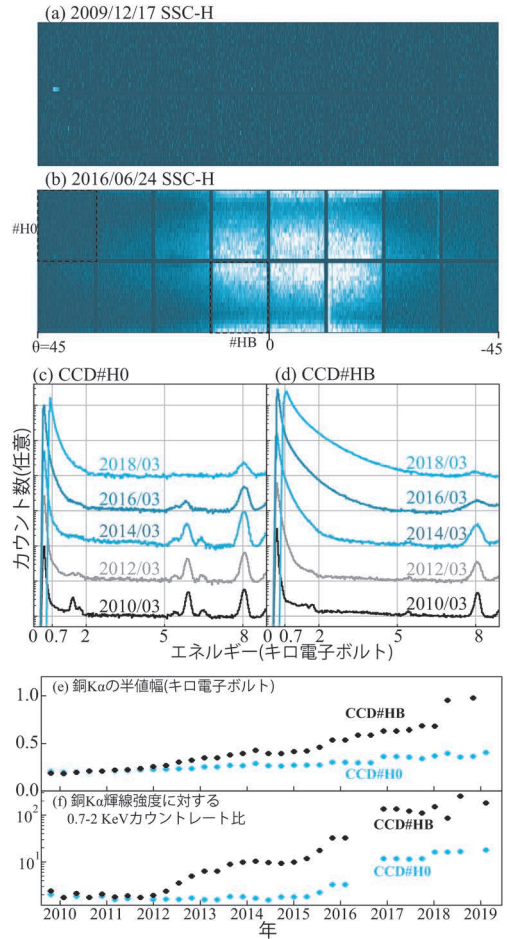


図3 (a) 2009年12月と (b) 2016年6月の, 検出器面上のイベントレートのマップ. (c, d) CCD#0と#Bのエネルギースペクトル. (e) 銅  $K\alpha$  輝線の半値幅, (f) 銅  $K\alpha$  輝線強度に対する  $0.7\text{--}2 \text{ keV}$  イベントレート比の時間推移.

Fと名付けられている) では6.5年を経てもイベント数は大きく増加せず, 図3(c) の様にスペクトルにも大きな変化は無いが,  $\theta\sim 0$  (CCD#HB) ではイベントレートが大きく増加し, その位置でのスペクトル (図3d) では, 特に低エネルギー側が上昇し, エネルギー分解能も劣化したことがわかる. 放射線劣化が位置によって違う事は, コリメータから入ってくる比較的低エネルギーの陽子 (数 MeV) のためである. つまり, コリメータから直接入ってくる個数は  $\cos \theta$  に比例し, 通

過する入射面アルミニウムの厚さは $1/\cos \theta$ に比例するため、コリメータ直下と端で大きな差が現れた。

次に、CCD#H0と#HBの時間的な性能変化を詳しく調べた。図3(e, f)には、銅 $K\alpha$ 輝線を観測したときのエネルギー分解能に加え、低エネルギーに見られる熱的ノイズの量の指標として銅 $K\alpha$ 輝線レート(1日平均ではほぼ一定)に対する0.7-2 keV イベントレートを100日刻みで測定し示した。エネルギー分解能はどちらのCCDもFWHM $\sim$ 0.2 keVで安定していたが、2012年頃からCCD#HBの急激な性能低下が始まり最終的にFWHM $\sim$ 1 keVまで低下し輝線検出が難しくなったが、CCD#H0は2016年頃まで緩やかな変化にとどまっている。低エネルギーイベント量も同様の傾向を示し、銅 $K\alpha$ に対する0.7-2 keV イベントレート比はどちらも $\sim$ 2だったが、CCD#HBでは2012年以降増加し2019年現在は2桁増、CCD#H0では2015年まで変化がなく現在は1桁増である。ここまでの性能悪化は想定されておらず、劣化が小さい期間でも低エネルギーの観測帯域下限を当初想定の0.5 keVから0.7 keVに上げざるを得なくなり、大きな影響が出た。将来的に同様に開口角の大きい広視野モニターとしてCCDを利用する場合は留意が必要である。

### 3.4 データ通信の中断

SSCの装置に起因する問題ではないが、SSCの観測に大きな影響を与えた事象として記録しておく。MAXIはMIL-STD-1553B<sup>\*2</sup>とEthernetの通信系を持ち、データ量の大きいSSCは実質にEthernetだけで観測データをダウンリンクするよう運用されている。しかし観測が始まった直後のおよそ8ヶ月間は、通信ソフトウェアの不具合により、異常パケットを受信するたび、数日間隔でEthernet通信系が停止した(この異常が発生する度、その数日後に、MAXI全体のリセットを行い

復帰させた)。このことで、この問題が修正されるまでの間、放射線ダメージの影響が少ない初期の観測データを10-20%ほど失う結果になった。この問題は、フィルタ機能付きMACアドレス変換ルータ(アルマジロで実装)を打ち上げて、宇宙飛行士がイーサネットケーブルに挿入することで無事に解決した。有人ミッションならではの解決法である。

### 3.5 SSC稼働状況のまとめ

MAXI/SSCは国産の新規開発技術を複数投入し、32枚ものX線CCDを搭載した挑戦的な装置であり、多少の問題を経ながらも致命的な故障なく稼働し続けている。SSCの冷却系はほぼ当初の性能を維持しているが、CCDの放射線ダメージによる性能低下は確実に進行していて、今後暗い拡散X線の観測量を積み増して行くことは望めない。それでもGSCでは観測できない2 keV以下の帯域における明るい軟X線トランジェントの探査は継続可能である。SSC軌道上運用の観測計画作成および地上データ処理(宇宙研が運用するDARTSサーバーにおける公開まで)が完全に自動化されSSC固有の運用コストが掛からない事もあり、SSCの観測運用を続けるとともに、以下に示すように観測初期に取得したデータの詳細解析を進めている。

## 4. SSCの全天マップ

SSCはこれまでの観測で、「はくちょう座」スーパーバブル(Cygnus Super Bubble; CSB)の観測<sup>7)</sup>や「新星爆発点火の瞬間」MAXI J0158-744<sup>8)</sup>の発見など様々な観測成果を上げている。ここではSSCによる観測の集大成である軟X線全天マップの作成<sup>9)</sup>について紹介する。

### 4.1 データ処理とバックグラウンドのモデル化

X線拡散放射のデータ解析では、点源データ解析と異なり隣接領域をバックグラウンドとする差

\*2 航空機や宇宙機で用いられるデータバス規格

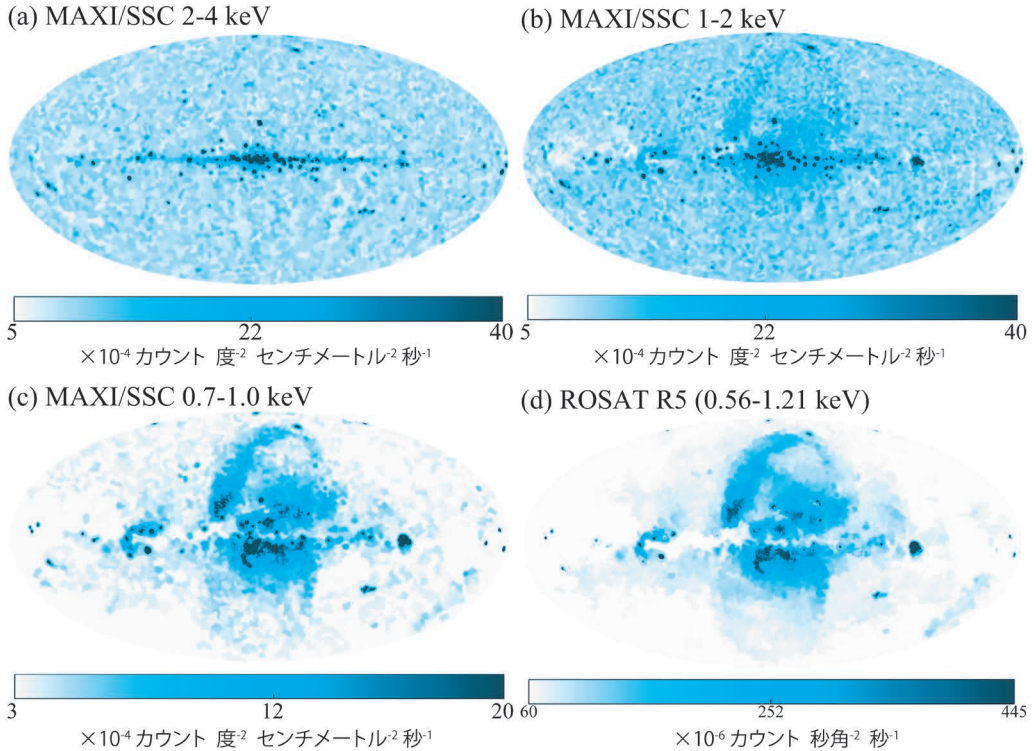


図4 SSCで取得した (a) 2-4 keV, (b) 1-2 keV と (c) 0.7-1 keV の全天マップ. 比較のため, (c) と近い帯域の ROSAT 全天マップを (d) に示した. (a-c) はそのデータ自体からピンを計算したが, (d) については (c) と同じピンニングを行った.

し引きが通用せず, 何らかの方法で非X線バックグラウンド (Non X-ray Backgrounds; NXB) を見積もる必要がある. 「すぎく」のような指向形観測の装置では望遠鏡が地球を向き空からの信号が遮られる「地没」観測が存在するため, NXBの寄与を推定できる. しかしISSは常に速度ベクトルに対して同じ姿勢を維持する (同じ方向を地球に向ける) ため検出器は常に空を向くことになり, 地没データが得られない. そこでこの研究では, ROSATの全天マップを参考に, SSCの視野が軟X線放射が暗い領域, つまり  $|l| > 60^\circ$  かつ銀河面の外を見ているときは, 目的とする軟X線巨大構造からの光子はほとんど検出器に到達しないと考え, この条件で取得されたデータを, バックグラウンドとして用いることとした. そして露出補正の後, 宇宙X線背景放射 (Cosmic X-ray

Background; CXB) および銀河ハローからの放射の寄与を推定して差し引くことでNXBを見積もった. すでに§2でも述べたように, 昼間の観測は行っておらず, 更にここで当初の2年だけを使うなど厳しくデータを選別したので, 得られたライブタイムは  $1.51 \times 10^7$  秒になった.

#### 4.2 SSCの全天マップ

NXBを差し引いたSSCの全天マップを図4(a)-(c)に示した, ここではROSATとの比較のため, 全天に一様に分布するCXBの寄与は差し引いていない. これらのマップは暗い領域の構造をよりはっきりさせるために, 表面輝度の近いピクセル同士を空間ごとにグループ化する `contbin`<sup>10)</sup> を用いて空間的にビンニングして表示している. 高エネルギーのマップ (a; 2-4 keV) では銀河面上に多数の点源と, より高い銀緯にもいくつかの点源が

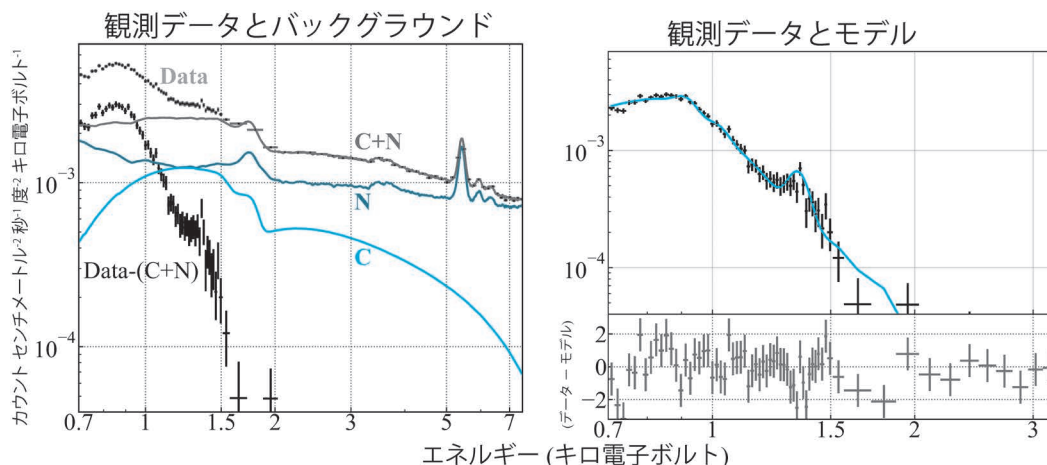


図5 SSCで抽出した銀河面の北西側の明るい構造のエネルギースペクトル. (左) 計算したバックグラウンドと合わせてプロットしたもの. (右) 希薄な電離プラズマモデルを使ったフィット結果.

見られ、GSCと同様の結果<sup>11)</sup>が得られた。銀河面放射を除くとSSCのPSFより大きい構造は見られない。中間エネルギーのマップ (b; 1-2 keV) では大まかには高エネルギーと同じであるが、点源以外に、CSBと「ほ」座超新星残骸に加え、銀河面北側に巨大構造がかすかに識別できる。低エネルギーのマップ (c; 0.7-1 keV) ではさらに様子が変わり、低銀緯の点源の多くが星間吸収の影響で見えなくなると同時に、巨大な拡散放射の形状がよりはっきり見えてきた。図4(c), (b), (a)を赤、緑、青に対応させた疑似カラー合成画像を本号表紙に掲載した。

比較のため、(c)と近い帯域 (R5; 0.56-1.21 keV) のROSATマップを図4(d)に示した。このようにSSCの0.7-1 keVマップと、ROSAT R5帯域のマップは、概ね同じであると言える。約20年の間隔を開けて取得したこれらのマップの間に明確な差異が無い事から、この帯域で見えている構造が、太陽風電荷交換反応などの地球近傍で短時間で変動する成分の影響を受けておらず、ともに地球から遠くに位置する放射を見ているということがわかった。銀河面南北の構造について、特に明るい箇所 ( $\sim 6 \times 10^{-4}$  counts deg<sup>-2</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) だけに着目してみると、おおよそ銀経、 $l \sim 340^\circ$ 、銀緯、 $b$

$\sim 15^\circ$ を中心とする円状に分布している。より暗い構造まで含めて見ると、南北それぞれそれぞれ銀緯、 $|b| > 60^\circ$ まで伸びる楕円の構造としても識別可能である。

ROSATの観測に対してSSCが優れる点としてエネルギー分解能の高さがあり、その点を生かしたエネルギースペクトル解析を行った。図5には「ノースポーラスパー」と呼ばれる、図4(c)銀河中心北西の最も明るい構造を中心とする領域のエネルギースペクトルを示した。左図には生データとバックグラウンドの各成分を示し、右図には希薄な電離プラズマモデルでフィットしたスペクトルと残差を示した。得られたパラメータはプラズマの温度 $0.31 \pm 0.01$  keV、重元素量 $0.51^{+0.13}_{-0.14}$ 太陽組成、星間吸収量は銀河系全体の0.6-1倍の間となり、上述の楕円に見える構造を9分割した各領域でも同様の結果が得られた。このパラメータは「すざく」などの局所ごとの観測<sup>12, 13)</sup>と同様であり、今回SSCを使って空を隙間なく観測したデータによっても確認できた。

### 4.3 SSCが観測した軟X線巨大構造

MAXI/SSCの最初の2年間のデータを用い、ROSAT以来の軟X線全天マップの取得に成功した。20年を経てROSATとよく一致する全天マッ

プが得られたことから、この帯域の軟X線放射は、地球近傍で時間的に変動するSWCXではなく、より遠方にある太陽系外からの放射であることがより確実に言ったと言える。ROSATの観測では、明らかに両極間のスキャン方向に沿った空間的ギャップや濃淡が残り(図4dではcと同じ空間的ビンニングを用いたのでギャップが埋まって見える)、暗い領域の解釈が難しかった。そのため明るい領域を中心にして、軟X線巨大構造は銀河面の北側に偏った非対称な構造だという解釈に留まっていた。SSCによる観測では数十分間(全天の数十%)の観測を2年間で1万回程度も繰り返す事で、スムーズで空間的に隙間の無い観露出マップが得られ、今回得られた全天マップ(図4c)では軟X線巨大構造は銀河面に対して、表面輝度は非対称だが、外形として対称な殻状構造に見える。明るい領域(北西)の星間吸収量や、銀河面付近の軟X線が減光している特徴も考慮に入れると、この構造は銀河系に付随する高温プラズマを反映している可能性が高い。ここで得られた解釈をより確たるものとするため、詳細なデータ解析が進められている。

## 謝辞

MAXI/SSCの装置開発に関わったすべての方々に敬意を表したい。また常深博氏には、「SSCを使った全天マップの作成」におけるデータ解析から論文執筆において、細部にわたるご指導を頂いた。この場を借りて感謝を申し上げる。

## 参考文献

- 1) Snowden, S. L., et al., 1997, ApJ, 485, 125
- 2) Dobler, G., et al., 2010, ApJ, 717, 825
- 3) Tomida, H., et al., 2011, PASJ, 63, 397
- 4) Tsunemi, H., et al., 2010, PASJ, 62, 1371
- 5) 三原建弘, 2019, 天文月報, 112
- 6) 富田洋, MAXI/SSC チーム, 2010, 天文月報, 103, 515
- 7) Kimura, M., et al., 2013, PASJ, 65, 14
- 8) Morii, M., et al., 2013, AJ, 779, 118
- 9) Nakahira, S., et al., 2019, PASJ, submitted
- 10) Sanders, J. S., 2006, MNRAS, 371, 829
- 11) Hiroi, K., et al., 2013, ApJS, 207, 36
- 12) Kataoka, J., et al., 2013, ApJ, 779, 57
- 13) Tahara, M., et al., 2015, ApJ, 802, 91

## Ten years operation of MAXI/SSC and 0.7–4 keV all-sky map

Satoshi NAKAHIRA

*ISAS/JAXA Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan*

Abstract: The Solid-state Slit Camera (SSC), onboard the Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI), is a challenging instrument which consists of 32 CCD chips and employs a lot of newly developed Japanese domestic technology. In this article, we first explain its primary scientific purposes and the design concepts to realize them, and then present its performance change during the ten-year operation on the ISS orbit. Finally, we show the soft X-ray all-sky maps in the 0.7–4 keV energy bands.