

全天X線監視装置MAXIによる古典新星爆発時X線閃光の探索

島ノ江純¹⁾・山岡均¹⁾・三原建弘²⁾・杉崎睦²⁾・芹野素子²⁾

¹⁾九州大学 ²⁾理化学研究所

Search for the prompt X-ray emissions at the ignition of the Galactic classical novae

Jun SHIMANOE¹⁾, Hitoshi YAMAOKA¹⁾
and Tatehiro MIHARA²⁾, Mutsumi SUGIZAKI²⁾, Motoko SERINO²⁾

Abstract

The Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) on board the International Space Station (ISS) scans all sky every 92 minutes, and the data are stored as the archive, so we can search for phenomena back to the past.

Classical novae (CNe) are explained as thermonuclear runaways (TNRs) on the surface of accreting white dwarfs. In analogous of the type-I X-ray bursts, which are TNRs on the surface of neutron stars, the CNe possibly emit the prompt X-ray at their ignition, however, it has never been detected for the difficulty of pointing the moment of their explosion so far. As an expected gamma-ray emission of V407 Cyg detected by Fermi Gamma-ray Space Telescope the last March, we can strongly expect unknown phenomena immediately after the explosions of CNe¹⁾. So we try to detect the prompt X-ray emission by analyzing the archive data at the discovered CNe positions during the statically observing stage of MAXI.

Key Words: X-ray, Classical Novae, MAXI

1 はじめに

1.1 全天X線監視装置MAXI

全天X線監視装置 (Monitor of All-sky X-ray Image, MAXI) は国際宇宙ステーション (International Space Station, ISS) の日本実験棟「きぼう」の曝露部に取り付けられている、X線変動天体の速報や21世紀のX線カタログ作りを目的として開発された全天観測のX線装置である。

MAXIは12台の比例計数管から成るGSC (Gas Slit Camera) と32枚のCCDから成るSSC (Slid-state Slit Camera) を搭載している。GSCによって観測されるX線のバンドは1.5-20 keVで2方向(進行方向とそれに垂直な方向)にそれぞれ1.5° × 160° の扇形の広い視野を持ち、同様にSSCのバンドは0.5-12 keV、視野は1.5° × 90° である。ISSが92分ごとに地球の周りを一周することによって、広い視野を持つGSCとSSCが全天の画像を撮影する。MAXIは全天のX線観測装置としては史上最高の感度を誇り、得られた画像を時系列に沿って並べることにより「全天の動画」を作成することができる。2009年8月15日に運用が開始されてからこれまで得られた画像やライトカーブ、スペクトルは全てアーカイブされ、その一部はMAXIホームページで公開されている。これらを時間を遡って調査することが可能となるため、MAXIは突発天体の観測に対して非常に

有効な手段といえる。

1.2 古典新星

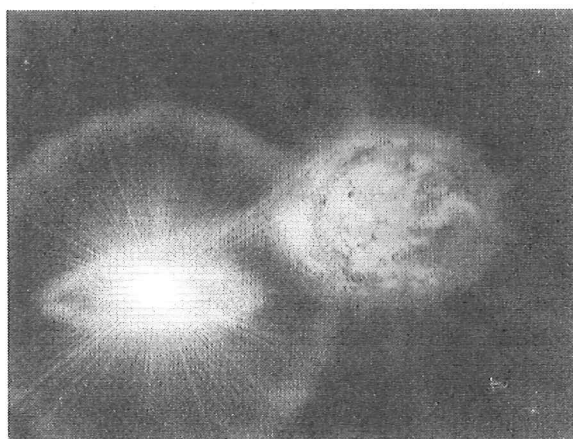


図1 古典新星のイメージ

(<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap060726.html>)

古典新星 (新星) とは白色矮星と恒星からなる連星系において、後者から前者へ降り積もった水素ガスがある臨界量を超えたときに白色矮星表面で起こる核爆発現象である (図1)。超新星や矮新星など「新星」と名の付く他の天文現象と区別して“古典”新星と呼ばれている。世界中のアマチュア天文家などによって年

間に約10個発見される。また特に新星爆発が二回以上観測されたものは「再帰新星」や「回帰新星」などと呼ばれる。再帰新星（回帰新星）が繰り返し爆発を起こすごとに白色矮星の質量が少しずつ増加することでIa型超新星の親星となりうるとも考えられている。

典型的な新星は、爆発後可視光で10等以上増光し、数ヶ月から数年かけて爆発前の明るさに戻っていく。そのスペクトルは水素の輝線が特徴的であり、また新星爆発の衝撃波と星周物質との相互作用による軟X線や超軟X線が確認されている。

1.3 研究動機

このように古典新星は数多くの天文現象の中でも比較的低エネルギーの低いものであると認識されてきた。しかし2010年3月、NASAのガンマ線天文衛星フェルミによって新星V407 Cyg爆発時の高エネルギーガンマ線が検出された¹⁾。(図2、図3)

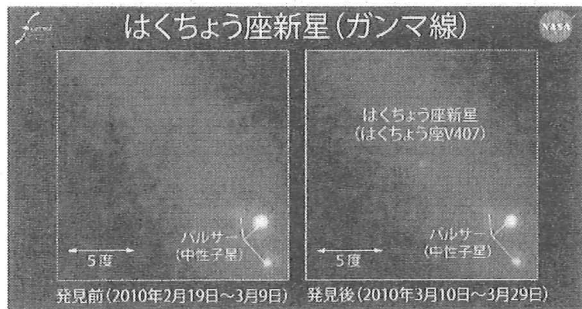


図2 V407 Cyg爆発前(左)と後(右)のFermi/LATによる画像(AstroArts 2010.8.16より)

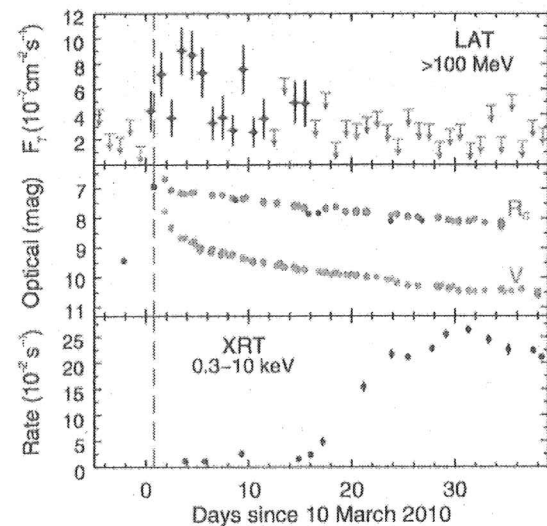


図3 (上から)ガンマ線、可視光、軟X線のライトカーブ¹⁾

このような予期せぬ現象の発見を受けて、我々は新星爆発のメカニズムにはまだ解明されていない謎があ

ると予想し、新たな知見を加えるべくMAXIのアーカイブデータを活用することによって新星爆発時のX線閃光を探索した。

2 解析

2.1 X線閃光の探索

中性子星表面での核爆発現象であるI型X線バーストと同様に、新星爆発時にもX線で輝くことが期待できる。MAXI運用開始後(2009年8月以降)に可視光で発見された古典新星19例のうち、近くに他の既知天体からのX線が混入しておらず解析が可能だった13例について座標、発見日時等をリストにまとめ、爆発時のX線閃光を調査した。我々はまず爆発時X線閃光のエネルギーがソフトであると予想し、MAXI/GSCの最も低いエネルギーバンドである2-4 keVのデータを解析した。

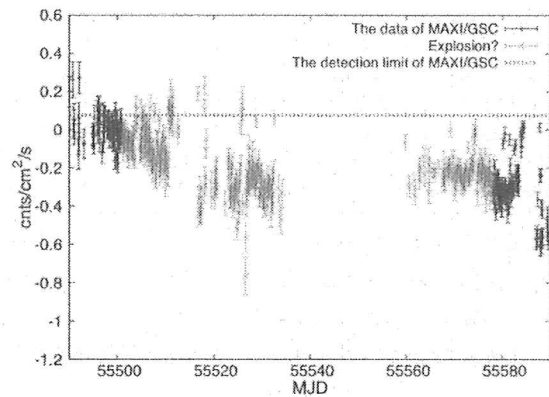


図4 MAXI/GSCによるV5587 Sgrの2-4 keV (1orbit-bin) ライトカーブ。赤色のプロットの期間(爆発期、MJD = 55501-55578)内に新星爆発が起きたと考えた。

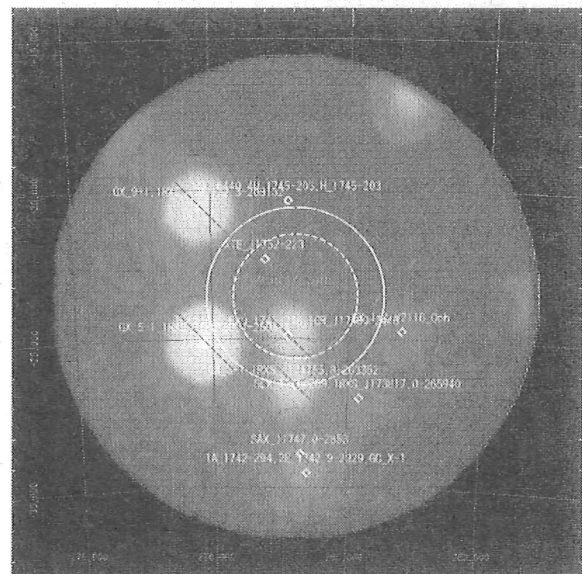


図5 MAXI/GSCによるV5587 Sgrの2-4 keVの画像(MJD=55501-55550)。tarzan5からのX線が混入。

表1 調査した古典新星13例のリスト

Name	R.A.(J2000)	Decl.(J2000)	Last undetected	First detected	Distance (kpc)	Luminosity (erg/s)
V1313 Sco	16 ^h 36 ^m 44 ^s .29	-41°32'37".7	2011 Sept. 5.36	2011 Sept. 6.431	?	-
PR LUPI	14 ^h 54 ^m 20 ^s	-55°05'03".	2011 Jul. 20.0	2011 Jul. 25.8	?	-
V1312 Sco	16 ^h 55 ^m 09 ^s .46	-38°38'04".5	2011 May. 30	2011 Jun. 1.40	?	-
V5588 Sgr	18 ^h 10 ^m 21 ^s .35	-23°05'30".6	2011 Mar. 26.8	2011 Mar. 27.8	(> 2.3)	-
V5587 Sgr	17 ^h 47 ^m 46 ^s .33	-23°35'13".1	2010 Nov.	2011 Jan. 17	(> 1.1)	-
V1723 Aql	18 ^h 47 ^m 38 ^s .38	-03°47'14".1	2010 Sep. 10.5	2010 Sep. 11.6	3.4	2.0×10 ³⁵
V407 Cyg	21 ^h 02 ^m 09 ^s .83	+45°46'33".0	2010 Mar. 7.86	2010 Mar. 10.8	2.7	1.3×10 ³⁵
V2674 Oph	17 ^h 26 ^m 32 ^s .19	-28°49'36".3	2010 Feb. 13.8	2010 Feb. 15.7	9	14×10 ³⁵
V2673 Oph	17 ^h 39 ^m 40 ^s .90	-21°39'50".5	2009 Nov. 3	2010 Jan. 13.9	7.9	11×10 ³⁵
V1722 Aql	19 ^h 14 ^m 09 ^s .73	+15°16'34".7	2009 Dec. 7.41	2009 Dec. 14.4	5.0	4.4×10 ³⁵
KT Eri	04 ^h 47 ^m 54 ^s .21	-10°10'43".1	2009 Nov. 12.3	2009 Nov. 13.1	6.5	7.4×10 ³⁵
V496 Sct	18 ^h 43 ^m 45 ^s .65	-07°36'41".5	2009 Nov. 7.38	2009 Nov. 8.37	4.4	3.4×10 ³⁵
V5584 Sgr	18 ^h 31 ^m 32 ^s .79	-16°19'07".5	2009 Oct. 21.5	2009 Oct. 26.4	6.5	7.4×10 ³⁵

各新星の位置のorbit-binライトカーブをプロットし、GSCの検出限界である60 mCrabを超えるX線があるかどうかを探した。V5587 Sgrについては爆発期前半にX線の増光が確認されたものの、同時期のX線画像を確認してみると近くのtarzan5という既知X線源によるものであることがわかった。(図4、図5)最終的にはよりハードな4-10 keV、10-20 keVバンドにおいても同様の調査を進めたが、結局古典新星13例すべてにおいて計2-20 keVでは爆発時のX線閃光を確認することができなかった。

2.2 X線閃光上限値の見積もり

2.1節では新星からのX線閃光をとらえることはできなかった。そこで2006年にSwift/BATによって得られた再帰新星RS Oph爆発直後のX線ライトカーブ(14-25 keV)を参考に、新星のX線閃光強度の上限値を見積もった。(図6)

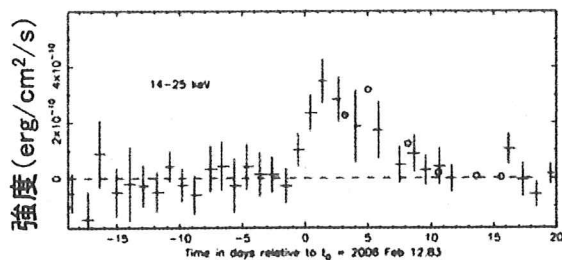


図6 Swift/BATによるRS OphのX線ライトカーブ²⁾

図6よりRS OphのX線Fluxのピーク F_X は 3.5×10^{-10} erg/cm²/sである。このライトカーブのデータ1点あたりのタイムスケールはdayなので、MAXIでの観測も1day-binで考えると、GSCの検出限界は15 mCrab = 1.4×10^{-10} erg/cm²/s。よって距離(kpc)の位置にある天体がGSCによって観測されなかったとするとそのX線光度 L_X は、

$$L_X = F_X \times 4 \pi r^2 < 1.7 \times 10^{34} \times r^2 \text{ (erg/cm}^2\text{/s)}$$

となる。この式を距離がわかっている8天体に適用すれば各X線閃光の上限値が定まる。最大のもので 1.4×10^{36} (erg/cm²/s)である。(表1)

2.3 MAXI/GSCによる新星検出率の見積もり

図6においてエネルギーを平均の19.5 keVと仮定するとピークの強度は 3.5×10^{-10} erg/cm²/s = 0.011 cnts/cm²/sである。また19.5 keVに最も近いGSCのバンドは10-20 keVであり、このとき1 Crab = 0.42 cnts/cm²/sなので1day-binの検出限界は15 mCrab = 6.3×10^{-3} cnts/cm²/s。RS Ophまでの距離はおよそ5000光年なので、RS Ophと同じ明るさの新星がR(ly)の距離に出現したとすると、それをGSCで検出するためには

$$0.011 \times (5000/R)^2 > 0.0063$$

$$\Leftrightarrow R < 6600 \text{ ly} = 22 \text{ kpc}$$

ここで図7のように銀河系の形を仮定するとその体積Vはおよそ 2.0×10^{13} (ly³)となり、銀河系内の古典新星

発生率（観測率） p を10個/年と仮定すると、銀河系内の新星の数密度は、

$$\rho = p/V = 5.0 \times 10^{-13} \text{ 個/ly}^3/\text{年}$$

よってGSCが新星を検出できる領域を図8のような円柱と近似して考えれば、その検出率（期待値）は、

$$\rho \times \pi R^2 \times 650 \text{ ly} = 0.044 \text{ 個/年}$$

つまり23年に1個となる。

銀河系(仮定)

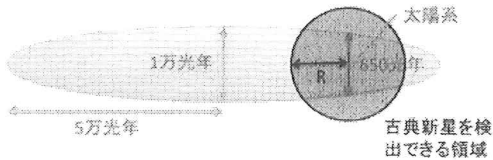


図7 銀河系のイメージ

太陽系近傍

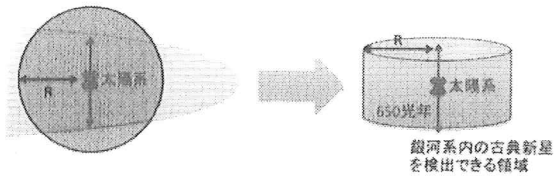


図8 太陽系近傍のイメージ

2.4 一ヶ月積分ライトカーブ

MAXI/GSCの1day-binライトカーブからは新星爆発時のX線閃光は確認することはできなかったが、これを30日ごとに足し合わせる（さらに平均をとる）ことによって増光が確認できないだろうかと考え、さらに調査した。V5587 SgrとV407 Cygの一ヶ月積分ライトカーブにおいて増光が見られたが、前者は先ほどの2.1節でもあったようにtarzan5という天体からのX線の混入であった。後者については、爆発から約250日後に全バンドにおいて大きなピークと、同じく約300-400日後に4-10 keVのみゆるやかな増光が見られ、画像を確認したところどちらもGSCに受かっていた。（図9）

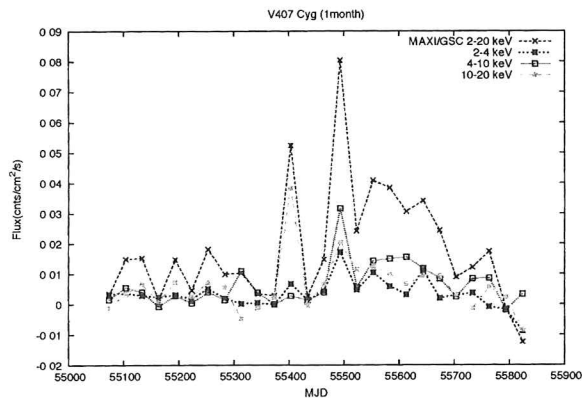


図9 V407 Cygの一ヶ月積分ライトカーブ (GSC)

しかしその後詳しく調査したところ、V407 Cyg付近にSAX J2103+4545というBe型X線連星が存在していることがわかった。

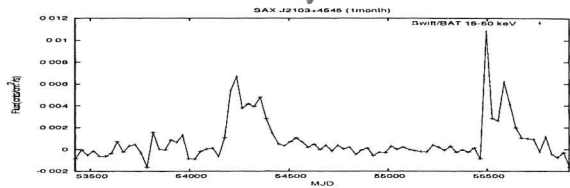


図10 SAX J2103+4545の一ヶ月積分ライトカーブ (Swift/BAT, 15-50 keV)

図9の最大のピークについて、図10に見られる二つの大きなピークのうち二つ目と同時期であること、全バンドで同時に増光していることからこれはSAX J2103+4545によるものであると考えられる。しかし図9のその後の緩やかな増光はSAX J2103+4545の増光と時期は一致しているものの、増えているのは4-10 keVのみ、と先ほどとは異なる。よってこの時期にV407 CygからのX線が埋もれていかもしれないと思い、SAX J2103+4545のライトカーブを用いて考察した。

2.4.1 SAX J2103+4545のX線増光に対するV407 Cygの寄与

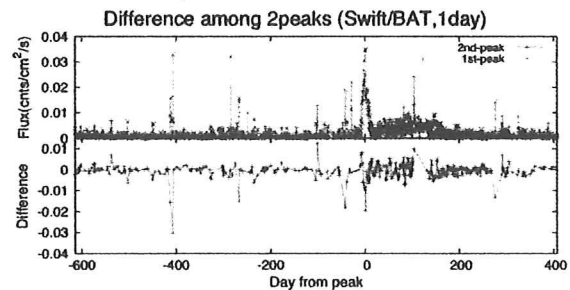


図11 上段：SAX J2103+4545のライトカーブを二つのピークを基準に重ね合わせたもの。緑色のプロットが二つ目のピーク、赤色が一つ目。下段：上段のプロットの差（赤から緑を引いたもの）。

図11を見ると二つのピーク前後のライトカーブはほぼ一致しており、明らかな差異は見られない。具体的にはピークから200日後までの差異の平均値はおよそ $0.00069 \text{ cnts/cm}^2/\text{s}$ で、この間の増光にV407 Cygが寄与しているとしても最大で $0.01 \text{ cnts/cm}^2/\text{s} = 5.2 \times 10^{-10} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ 程度である。V407 Cygまでの距離は2.7 kpcなので、これをLuminosityに変換すると $4.6 \times 10^{34} \text{ (erg/s)} < 1.3 \times 10^{35} \text{ erg/s}$: 上限値) となる。

3 まとめ

新星V407 Cygからの予期せぬガンマ線が発見されたことをきっかけに新星爆発時のメカニズムに新たな知見を加えるべく、MAXI/GSCのアーカイブデータを活用してX線閃光の探索を行った。MAXI運用開始以降に可視光で発見された古典新星19例のうち解析が可能だった13例について調査したが、そのすべてにおいて有意な増光は確認できなかった。そして距離が知られている8天体については閃光の上限値が最大で 1.4×10^{36} (erg/cm²/s)、また再帰新星RS OphのX線データを参考にMAXI/GSCによる新星検出率を0.044個/年と見積もった。一ヶ月積分ライトカーブの解析からは、SAX J2103+4545の寄与を考慮した結果緩やかな増光時のV407 Cygの光度は 4.6×10^{34} (erg/s)以下であることがわかった。

今回の調査では新星からのX線閃光を見つけることはできなかったが、今後も継続しさらに多くの新星を調べていきたい。また光度上限値以外にも白色矮星の質量など他の物理量も見積もりたい。

参考文献

- 1) A.Abdo et al., APJ, 706:L138-L144, 2009.
- 2) M.F.Bode et al., APJ, 652:629-635, 2006.

(2011年12月17日受付, 2012年3月1日受理)