## 法政大学学術機関リポジトリ

### HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-03

# 全天X線監視装置MAXIによるX線連星系のアウトバーストの観測と長時間解析

堤, 涼平 / TSUTSUMI, Ryohei

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要.理工学研究科編
(巻 / Volume)
64
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
5
(発行年 / Year)
2023-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00026430

## 全天 X 線監視装置 MAXI による X 線連星系の アウトバーストの観測と長時間解析

#### OBSERVATION AND LONG-TIME ANALYSIS OF OUTBURSTS IN X-RAY BINARY SYSTEMS BY THE MONITOR OF ALL SKY X-RAY IMAGE "MAXI"

堤涼平 Ryohei TSUTSUMI 指導教員 佐藤 修一

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻創生科学系修士課程

Black hole binary stars are normally faint, but they undergo sudden explosion called outbursts, which can increase their luminosity by several orders of magnitude in few days to few weeks. During the outburst, X-ray energy spectrum changes dramatically, transitioning from a high-energy hard state to a low-energy soft state. This state transition often follows a basically counterclockwise circular trajectory on the hardness intensity diagram. In this study, we investigated the outbursts of black hole binary stars and neutron star binary stars observed by Monitor of All-sky X-ray Image; MAXI. By comparing them, we found the characteristics of the outbursts.

Key Words : MAXI, binary stars, outbursts, hard and soft states

#### 1. はじめに

#### (1)研究背景

電磁波には様々な種類があり,例として電波,赤外 線,可視光などがある.その中でも波長が~10<sup>-11</sup> – 10<sup>-8</sup>mほどの電磁波をX線と呼び,1895年にドイツの 物理学者レントゲンによって発見された.X線によっ て,宇宙の多くの天体がX線を出していることや1ミリ 以下の短い時間で不規則にX線強度が変化する天体があ ること,超高音のガスや超高エネルギー現象が宇宙の 様々なところにあることが判明してきている.その中の 一つでX線連星系というものが発見された.

2つの恒星が重力的に結合した恒星系を形成している ものを連星系と言う.その中でも通常の恒星と中性子星 やブラックホールなどの高密度星との近接連星系で,相 手の星から高密度星への質量降着で強いX線が放射され るものをX線連星系と言う.ブラックホールに限定した 場合はブラックホール連星と言い,流れ込むガスは比較 的大きな角運動量を持つため,ブラックホールの回りに 降着円盤が作られる.

多くのブラックホール連星は周期的に X 線強度に違い が見られる.具体的には大きく分けると2種類あり,硬 X 線の強いハード状態と軟 X 線の強いソフト状態がある (図 1).



状態 [1]

ブラックホール連星は通常暗いが, 突発的にアウトバー ストという爆発現象を起こし, これは数日~数週間で数 桁以上もの増光を示し, これによって降着円盤に変化が 見られる.変化として,増光の途中に放射スペクトルに 違いが生じる.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線エネルギーのスペクトルが劇的に変化 し,エネルギーの高いハード状態からエネルギーの低い ソフト状態へ遷移することが知られている[2].

#### (2)研究の目的

本研究の目的は、全天 X 線監視装置 MAXI が観測した X 線連星系のデータを解析することによって、各連星系 の明るさなどを比較して特徴付けを行うことである.具 体的にはアウトバーストを起こしたことのあるブラック ホール連星とその候補および同じような現象を起こすと されている中性子星連星に注目し、それぞれのアウトバ ーストのハードネス強度図を作成する.そこから X 線の ハード状態、ソフト状態の状態遷移が起きるかを調査し、 何らかの傾向を見出すことである.またアウトバースト の増光と減光の変化率にも注目をし、相関があるかを調 査する.

#### 2. 観測機器

宇宙には X 線を放射する高エネルギー天体が多数存在 する. X 線を調べることで、ブラックホール、中性子 星、相対論的ジェットなど、その起源を特定することに つながる. X 線天体は数ミリ秒から数年の時間スケール で大きく変動しているため、全天を監視しフレアやバー ストを検出するためのモニターが必要である. そのため に 2009 年より JAXA や理化学研究所等によって全天 X 線監視装置 MAXI が開発された.

MAXI は国際宇宙ステーションに取り付けられてお り、二十四時間体制でX線を通して宇宙をくまなく観測 し、明るくなった星がないか常に監視をしている. 全天 を観測する装置としてスリットカメラを用いているのが 特徴としてある.一次元位置検出器と直行したスリット の組み合わせによって細長い視野からX線のくる方向を 検出している. 国際宇宙ステーションが約90分で地球 を1周すると、2つの半円弧状のカメラ視野が全天を-回走査する.カメラ自体は比例計数管を用いたガススリ ットカメラとX線CCDを用いたX線CCDスリットカ メラの2種類のカメラが搭載されている.これより低エ ネルギーのX線から高エネルギーのX線まで広い波長 領域で観測し、X線によるカラー撮影が可能となり、こ れは MAXI の一つの強みとなっている. 観測されたデー タはリアルタイムで更新されており、長時間観測に適し ている.

#### 3. 研究方法と結果

#### (1) 光度曲線の作成

MAXI の観測データを用いて天体の光度曲線を作成す る.データには3つのエネルギーバンドの2-4,4-10,10-20keV と全体のエネルギーバンドの2-20keV がある.こ のデータを用いることにとって光度曲線を作成し,アウ トバーストの期間を確認する.光度曲線は天体の物理量 やサイズ,天体の発している物理情報等を得る目的とし て主に用いられる.光度の時間変化を表す曲線であり,縦 軸に天体の明るさ,横軸に時間を取る.

はじめにここで 2009 年にいて座で発見されたブラッ

クホール連星である XTEJ1752-223 の 2009 年 8 月から 2021 年 9 月までの時期で作成した光度曲線を以下に示 す.



図2より,前半に顕著にX線強度が強く表れている部分 があることを確認できる.この部分がこの天体でアウト バーストが起きている期間となる.

次にその部分に着目してエネルギーバンド2-4,4-10,10-20keVにおけるそれぞれの光度曲線を作成し, 比較をする.アウトバースト期間で作成した光度曲線を 図3に示す.



図3 XTE J1752-223のアウトバースト期間の光度曲線 (上から2-4,4-10,10-20keV)

図3は上からエネルギーバンド2-4,4-10,10-20keV となっている.どのエネルギー帯もX線強度が強くなっ ているが、特にエネルギーが低いときほどX線強度が強 く表れている.

#### (2) ハードネス強度図

ブラックホール連星の放射状態の遷移を概観するため にハードネス強度図を作成する.ハードネス強度図にお けるハードネス比は異なるエネルギーバンドのフラック スの比から求める.高帯域の強度を低帯域の強度で割っ たものでスペクトルの硬さが求められる.2-4,4-10, 10-20keV をそれぞれF<sub>l</sub>,F<sub>m</sub>,F<sub>h</sub>とした場合,F<sub>l</sub>,F<sub>m</sub>の ハードネス比は

hardness ratio = 
$$F_m/_{F_1}$$
 (1)

となる.本研究では全体を通してアウトバーストが特に 顕著に表れていた 2-4, 4-10keV のデータを用いて各ア ウトバーストのハードネス強度図を作成することとす る.

MAXIの観測データには誤差が大きいデータが存在している.本研究ではそれらのデータをゴミデータとして扱い,その除去を行う.除去の条件として,まずマイナスのデータ(バックグラウンドが高すぎるデータ)は不要なデータとし,取り除く.また除算の誤差の定式より変数Aの誤差がa,変数Bの誤差がbであり,AとBが統計的に独立であるとき,

$$^{A}/_{B} \mathcal{O}$$
誤差 =  $(^{A}/_{B})\sqrt{(^{a}/_{A})^{^{2}} + (^{b}/_{B})^{^{2}}}$  (2)

として, 誤差の大きいハードネス比のデータを算出す る. (2)式において, Aは高エネルギー帯の強度, Bは低 エネルギー帯の強度, aは高エネルギー帯の強度のエラ ー, bは低エネルギー帯の強度のエラーとなる. ブラッ クホール連星などの高密度天体の連星系の場合,一度の アウトバーストでハードネス強度図上に反時計回りの円 環状の軌跡を1つ描くことが多い[3]. したがってハード ネス強度図において綺麗な円環状を描くことを目指すた めに不要となる誤差の大きいデータ点を(2)式を用いて除 去することとする.

以上の手法を用いて作成した XTE J1752-223 のアウトバーストのハードネス強度図を図 4 として示す.



各データ点は時間順で点線によって結んであり,図3の 右下から始まっている.XTE J1752-223 は右下のハー ドネス比がハード状態でX線強度が弱い状態から強度が 徐々に上がり,一気にハードネス比がソフト状態に遷移 してさらにX線強度が強くなり,ソフト状態を維持した まま強度が下がり最後に一気にハード状態に戻っている のを読み取れる.この一連の流れによって反時計回りの 円環状を描くという結果になった.

#### (3) 各アウトバーストのハードネス強度図の分類

上記の一連の手法を用いて本研究では合計16天体・ 54アウトバーストを調査し,結果を比較することによって特徴付けを行った.そして作成したそれぞれのハードネス強度図から以下の3つのタイプに分類をした. A.反時計回りの円環状の軌跡を描いている B. 円環状ではないが何らかの状態遷移が見られた C. 円環状を描かず状態遷移も見られなかった

本稿では分類した 3 タイプのハードネス強度図をそれぞれ1つずつ図5に示す.



図5 3タイプのハードネス強度図(上から反時計回りの円環状の軌跡を描いている,円環状ではないが何らかの状態遷移が見られる,円環状を描かず状態遷移も見られない)

#### (4) アウトバーストの増光と減光の相関

調査してきたアウトバーストの増光と減光の変化率に 関係性があるかを調べた.アウトバーストのピーク強度 までを増光期間,それ以降を減光期間とする.変化率を 調べるために各アウトバーストの増光期間,減光期間を それぞれ直線でフィッティングして傾きを算出する.求 めた増光と減光の傾きに相関があるか調べた(図 6).



図6 各アウトバーストの増光と減光の傾きの関係性

横軸が増光,縦軸が減光であり,斜めの黒線は対角線となっている.多くのデータ点が対角線より下に集中していることから増光の傾きが減光の傾きよりも大きいアウトバーストが多いということがわかった.54個のアウトバーストのうち増光の傾きが減光の傾きよりも大きかったのは47個あり,全体の約87%という結果となった.

#### 4. 考察

#### (1) アウトバーストの比較

各アウトバーストのハードネス強度図を作成した結果, 様々な軌跡を描くアウトバーストがあることが明らかと なった.そこで本研究では,円環状の軌跡を描くアウトバ ーストには特徴や傾向があるのかを調査するため,アウ トバーストを3つのタイプに分類し,それぞれアウトバ ーストの長さ(期間)とピーク強度と関係性があるかを調 査した.

まず円環状の有無とアウトバーストの長さの関係性を 調べた(図 7).





アウトバーストの長さは4つの範囲に分けた.また,Aが 円環状の軌跡を描いているアウトバースト,Bが円環状 ではないが何らかの状態遷移が見られたアウトバースト, Cが円環状を描かず状態遷移も見られなかったアウトバ ーストとなっている.アウトバーストの長さが短くなる につれ、Bが多くなっていることを読み取れる.本研究で はBを円環状ではないが何らかの状態遷移が見られたも のと定義して分類をしたが、Bに分類されたアウトバー ストの状態遷移は一様ではなく、様々な形があった.した がって特徴づけをするにはこの情報だけでは不十分であ ると判断した.状態遷移が見られただけでなくアウトバ ーストの状態遷移の仕方によってさらに細かく分類分け を行えば、新たな特徴や傾向が見つかる可能性があると 考える.AとCに関しては特に傾向は見られず、円環状 の有無との関係性はないと考察する.

次にハードネス強度図で円環状の軌跡を描くこととア ウトバーストのピーク強度に関係性があるのかを調べた (図 8).





ピーク強度が低くなるにつれ円環状を描かず状態遷移も 見られなかったアウトバーストの数が多くなっており, それらのほとんどがピーク強度1未満となっていること がわかる. K. Alabarta et al(2021)の研究では,アウトバ ーストは発生する半径によって2種類に分類されると考 察している[4]. それぞれ降着円盤の外縁近くで起きるも のと,内縁に近い半径で起きるものである.そして円環状 を描かないアウトバーストは,降着円盤の内縁に近い半 径での不安定性によって発生するものであると考察して いる.したがってその際,円盤の外側まで状態変化が伝わ りにくくなると考えられる.この理論が正しければ,ピー ク強度が低いときに円環状を描かず状態遷移も見られな かったアウトバーストの数が多くなっているのは,これ が原因であると推測できる.

#### (2) アウトバーストの増光と減光の相関

ブラックホール連星とその候補そして中性子星のX線 連星系のアウトバーストの増光と減光の変化率に関係性 があるかを調べた.多くのアウトバーストで増光の傾き が減光の傾きよりも大きいという結果が得られた. Kazumi ASAI et al(2012)の研究では、アウトバースト の状態遷移にはハード状態からソフト状態へ遷移する前 に強度が最大になる slow 型(S-type)と, 遷移後に最 大になるである fast 型(F-type)があると述べている [5]. 異なる点として,S型はF型に比べてハード状態か らソフト状態への遷移までの時間(遷移前時間)が長い という特徴がある.その結果として,S型の増光は比較 的長くなり,反対にF型は短くなる.本研究の結果で は、多くのアウトバーストで増光の傾きが減光の傾きよ りも大きかった.したがって連星系のアウトバーストは F型に属するものが多くなると考察する.

#### 5. 結論とまとめ

本研究では全天 X 線監視装置 MAXI が観測したブラッ クホール連星や中性子星連星が起こしたアウトバースト のハードネス強度図を作成し、それぞれの比較を行った. 比較するにあたって、アウトバーストのハード状態とソ フト状態の状態遷移に着目した.ピーク強度が低いとき ほどハードネス強度図上で状態遷移を起こさず円環状の 軌跡を描かなくなるのは、降着円盤の内縁付近で起きる アウトバーストによるものだと推測した.また多くの連 星系のアウトバーストでは増光の方が減光よりも期間が 短くなることを確認した.

#### 参考文献

1)Yamada et al, 2013, PASJ, 65, 80-2

2)McClintockJ.E.,RemillardR.E., et al., 2009, ApJ698, 1398

- 3)志達めぐみ:「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」,愛媛 大学理工学研究科,『天文月報』9号(2019)
- 4)K. Alabarta et al, 2021, MNRAS, 507, 5507A
- 5)Kazumi ASAI et al, 2012, PASJ, 64, 128
- 6)Kim, S.-W., Wheeler, J. C., & Mineshige, S. 1999, PASJ, 51, 393
- 7) 五月女哲哉,「MAXI による Be 型 X 線連星パルサーの アウトバーストの観測」芝浦工業大学 修士論文 (2011)
- 8)井上一:「シリーズ現代の天文学17-宇宙の観測Ⅲ高エネルギー天文学・」,日本評論社(2008)
- 9)小山勝二:「シリーズ現代の天文学 8-ブラックホール と高エネルギー現象 -」,日本評論社 (2007)
- 10)Rameshi Narayan, Insu Yi, 1995, Astrophysical Journal, 452, 710
- 11)N.I. Shakura, R.A. Sunyaev, 1973, Astron. Astrophys., 24, 337
- 12)Monitor of All-sky X-ray Image 全天 X 線監視装置 MAXI

http://maxi.riken.jp/top/index.html (参照日 2023.01.15)