

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。中でも波長が $\sim 10^{-11} - 10^{-8}m$ 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。その中で一つで 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)。

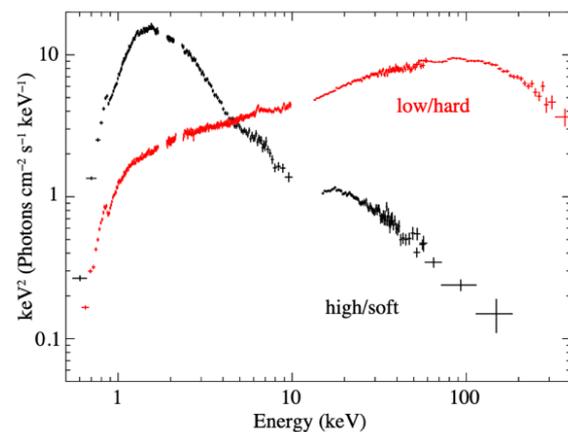


図 1 エネルギーの割合から見たハード状態とソフト状態 [1]

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が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一回走査する。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よ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。

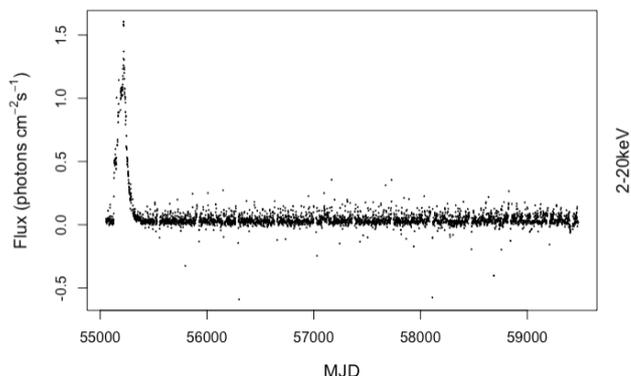


図 2 XTE J1752-223 の光度曲線 2-20keV

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。

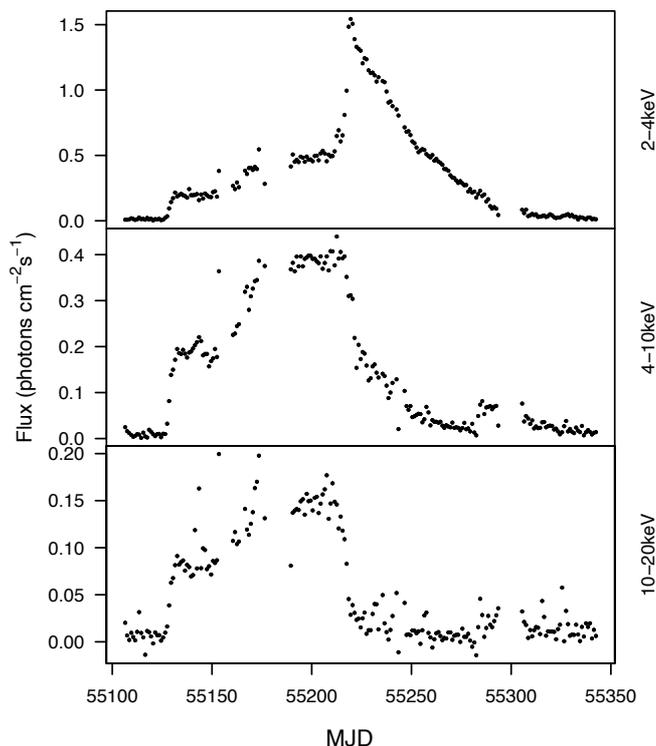


図 3 XTE J1752-223 のアウトバースト期間の光度曲線 (上から 2-4、4-10、10-20keV)

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_l , F_m , F_h とした場合、 F_l , F_m のハードネス比は

$$\text{hardness ratio} = F_m / F_l \quad (1)$$

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、

$$A/B \text{ の誤差} = (A/B) \sqrt{(a/A)^2 + (b/B)^2} \quad (2)$$

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。

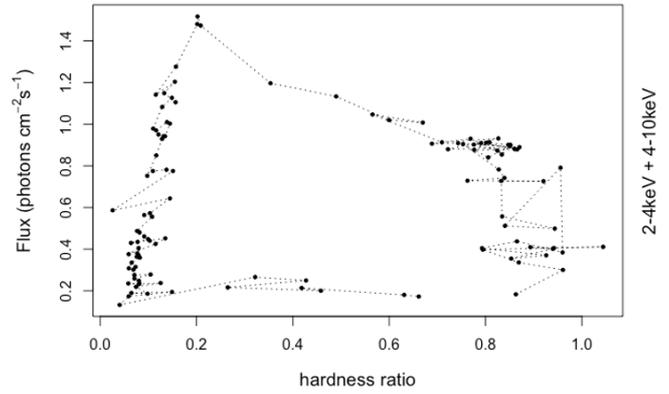


図4 XTE J1752-223のハードネス強度図

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。

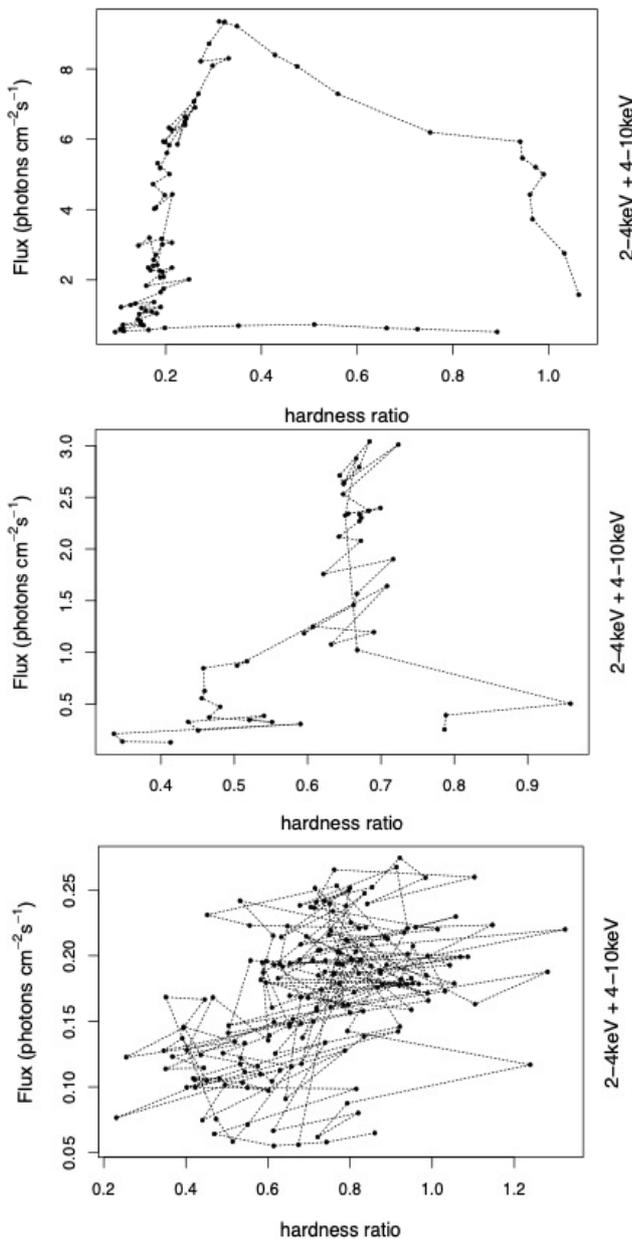


図5 3タイプのハードネス強度図（上から反時計回りの円環状の軌跡を描いている、円環状ではないが何らかの状態遷移が見られる、円環状を描かず状態遷移も見られない）

(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相関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)。

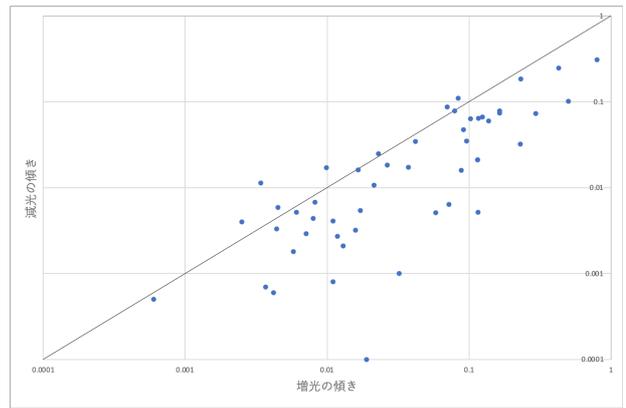


図6 各アウトバーストの増光と減光の傾きの関係性

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)。

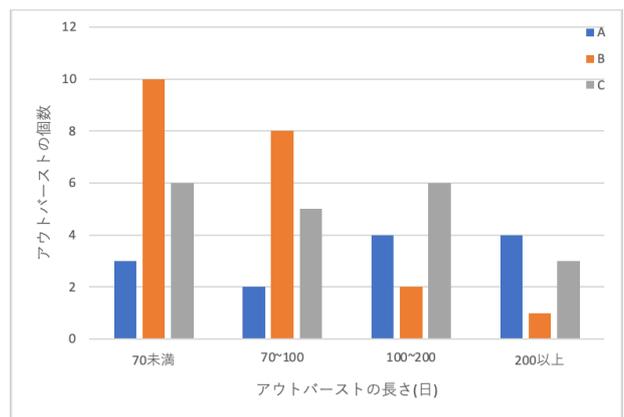


図7 ハードネス強度図の円環状の有無とアウトバーストの長さの関係性

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。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)。

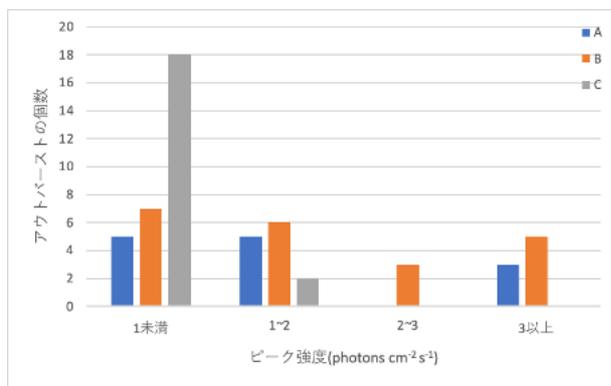


図8 ハードネス強度図の円環状の有無とアウトバーストのピーク強度の関係性

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増えており、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増えているのは、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型に属するものが増えると考えられる。

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) McClintock J.E., Remillard R.E., et al., 2009, ApJ 698, 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)