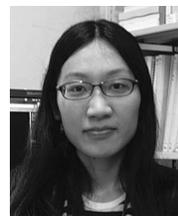


MAXIによるブラックホールX線連星の 長期モニタ：非常に大きな増光を示した MAXI J1535-571と MAXI J1820+070の観測成果



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¹⁾。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。

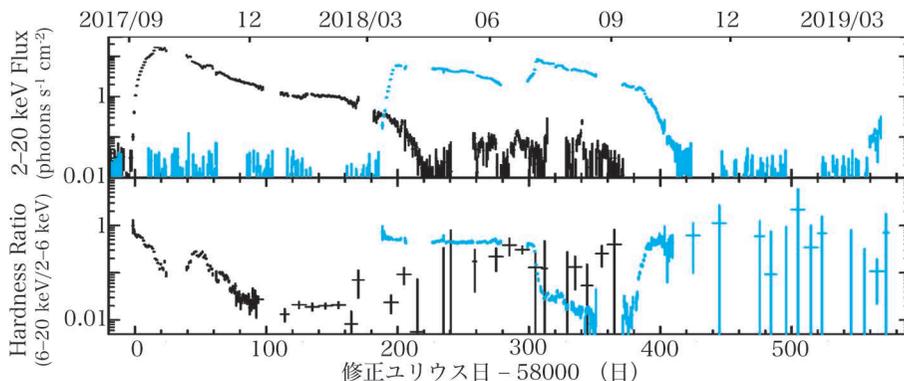


図1 MAXI J1535-571 (黒) と MAXI J1820+070 (青) のアウトバースト期間の X 線光度曲線とハードネス*2.

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 J1535-571²⁾ 及び MAXI J1820+070^{3,4)} 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⁵⁾。発見直後の X 線強度は 30 mCrab^{*1} 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

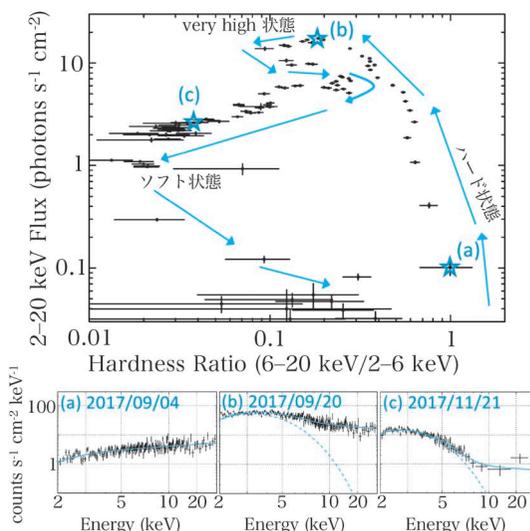


図2 (上) MAXI J1535-571 のアウトバースト期間のハードネス-強度図。(下) 上図 (a), (b), (c) で得られた代表的な X 線スペクトル。破線は標準円盤からの熱放射。

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^{*2}-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⁻² s⁻¹。

*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^{*3}の数十%を超えると現れることが知られている⁶⁾。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⁸⁾。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⁹⁾、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¹⁰⁾、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、

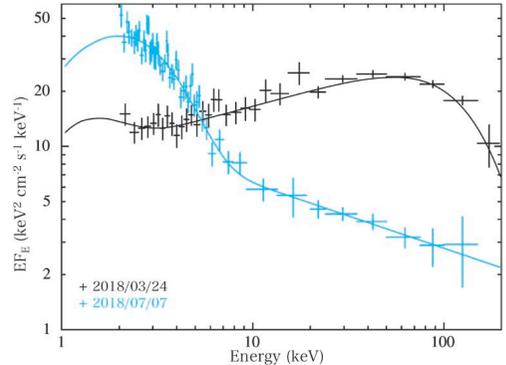


図3 MAXI (2-20 keV) とSwift衛星BAT検出器(>15 keV)でX線強度の第1ピーク付近(黒)と第2ピーク付近(青)に得られたMAXI J1820+070の広帯域X線スペクトル。実線は標準円盤からの放射と、その円盤光子を種とするコンプトン散乱を考慮したモデルで両データを解析して得られたベストフィットモデル。

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¹¹⁾。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、 $\approx 1.3 \times 10^{38} (M/M_{\odot}) \text{ erg s}^{-1}$ 。

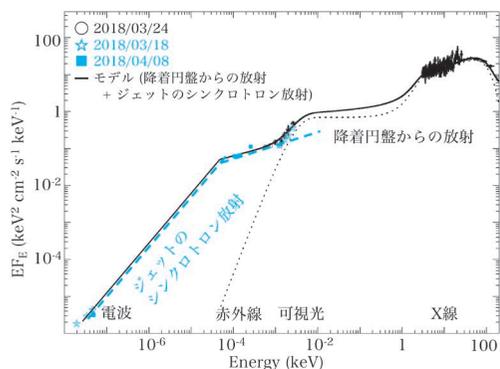


図4 X線強度の第1ピーク付近で得られたMAXI J1820+070の多波長スペクトルエネルギー分布。縦軸は、単位エネルギーあたりのエネルギーフラックスに、さらにエネルギーを掛け算したもの。減光補正済。2018年3月24日にMAXIとSwift/BAT、OISTERチームの観測で得られた同時データ(黒)に、他チームによる同時期の電波～可視光の観測結果⁷⁾を重ね合わせた。降着円盤からの放射成分について、可視光付近(円盤外縁部からの放射に対応)のフラックスが大きくなっているが、これは円盤内縁部からのX線照射の効果を考慮したモデル(黒破線)で説明できる。

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 kpc¹²⁾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¹³⁾。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²⁻⁴⁾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には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.