ブラックホールX線新星 MAXI J1348-630 の発見

富永 愛侑(宇宙航空研究開発機構、東京大学)、中平 聡志(宇宙航空研究開発機構)、志達 めぐみ(愛媛大学)、大枝 幹(東京工業大学)、
海老沢 研(宇宙航空研究開発機構)、菅原 泰晴(宇宙航空研究開発機構)、根来 均(日本大学)、河合 誠之(東京工業大学)、
杉崎 睦(中国科学院国家天文台)、上田 佳宏(京都大学)、三原 建弘(理化学研究所)、ほか MAXIチーム

概要

ブラックホールX線連星 (Black hole X-ray binaries; BHBs) とは、恒星質量ブラックホール (Black hole; BH) と伴星である主系列星からなる連星系であり、”low/hard” 状態と “high/soft” 状態 と呼ばれる二つの異なるX線放射特性を持つ状態を遷移することが知られている[1, 2]。”low/hard” 状態は、伴星からの質量降着率が比較的小さく、光学的に厚く、幾何学的に薄い円盤状態を指す。この時、円盤は最内縁安定半径 (Intermost Stable Circular Orbit; ISCO) に達し、放射非効率な高温降着流が発生する。一方、“high/soft” 状態 では光学的に薄く幾何学的に厚い円盤状態にある。BHB がいつどこで量状態を遷移し、X線放射特性を変えるかを予測することは難しい。よって、全天サーベイは BHB の研究に最も有効な手段となる。

全天監視装置 (Monitor of All-sky X-ray Image; MAXI) [3] は国際宇宙ステーション (International Space Station; ISS) に搭載されており、約92分で全天のおよそ 85% を観測することが可能であり、BHB の研究に適している。実際、2009年から運用を開始したMAXI は新しく 13 の BHB を発見している [4]。

MAXI J1348-630 (以下、J1348) は、MAXI に搭載された検出器 (Gas Slit Camera; GSC) [5, 6] により、(RA, Dec)=(207°.053, -63.274) [8] に 2019年1月26日 03:16 UT (MJD 58509, T=0 とする) に新しく発見された BHB である [7]。発見後、Swift [8]、INTEGRAL [9]、NICER [10] により追X線観測が行われた。可視光観測、電波観測も行われ、ジェットが確認されている [11]。我々は、2回のアウトバースト を含む発見後半年間に渡る J1348 の MAXI の観測データを解析し、BHB の質量・距離に制限を設けた。また、Swift による観測で得られたより広いエネルギー帯域のデータも一部も用いた。

観測とデータ処理

1. MAXI/GSC

エネルギー帯域: 2-20 keV　　観測: 全天サーベイ

データ処理: MAXI/GSC ondemand web interface *1 [12]

2. Swift

Burst Alert Telescope (BAT)

エネルギー帯域: 15-50 keV　　観測: 全天サーベイ

データ: BAT Transition Monitor website *2 [13]

X-Ray Telescop (XRT)

エネルギー帯域: 1-10 keV　　観測: ポインティング

データ: Obs ID = 00011107024, 00011107029, 0001110702

on-demand web interface [14]

参考文献

[1] Remillard & McClintock 2006
[2] Belloni 2009
[3] Matsuoka et al. 2009
[4] Negoro 2019
[5] Mihara et al. 2011
[6] Sugizaki et al. 2011
[7] Yatabe et al. 2019
[8] Kenna & Negoro 2019
[9] Lepingwell et al. 2019
[10] Sanna et al. 2019
[11] Russell et al. 2019
[12] Nakahira et al. 2013
[13] Krimm et al. 2013
[14] Evans et al. 2009
[15] Homan & Belloni 2005
[16] Scargle et al. 2013
[17] Maccarone 2003
[18] Xu et al. 2018
[19] Jana et al. 2020

*1 http://maxi.riken.jp/mxondem
*2 https://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients/

本研究は Tominaga et al. 2020, “Discovery of the Black Hole X-Ray Binary Transient MAXI J1348-630”, *ApJL* **899** L20 に投稿されています。

結果

MAXI/GSC による J1348 のX線観測結果を、低エネルギー (2-6 keV) と高エネルギー側 (6-20 keV) で比較し (ライトカーブ : 図1) 、半年間の円盤の状態変化を調べたところ、Hardness Intensity Diagram (図2) では “q” 字を描くように状態遷移しており、J1348 が極めて典型的な BHB の振る舞いをしていたことがわかった [15]。ただし、Bayesian block [16] を用いて、位置観測点が十分な光子統計を持つように bin まとめを行なった。

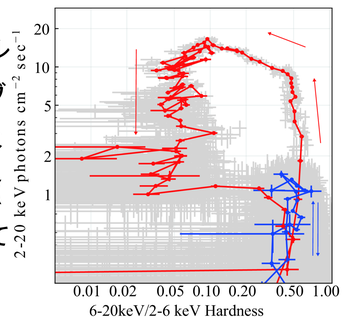

図2: J1348 の HID。矢印は時系列を示し、赤は一度目、青は二度目のアウトバーストを示す。

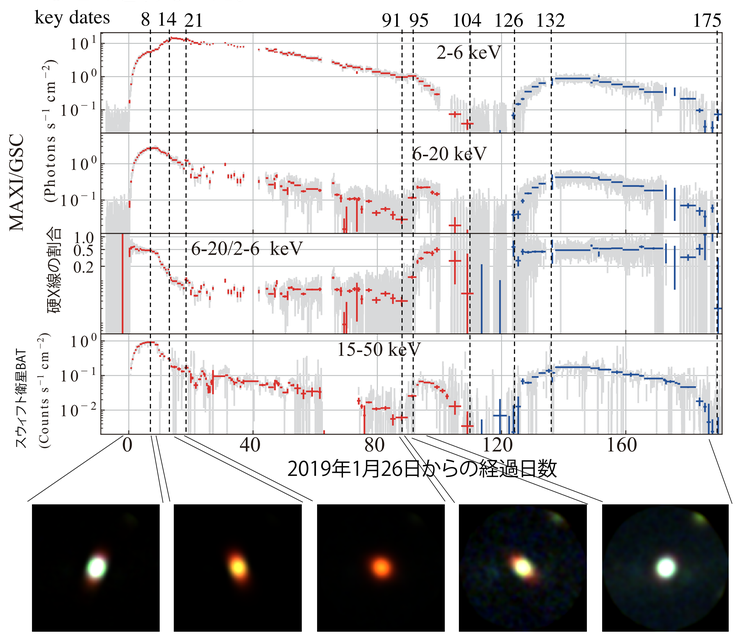

図1: J1348 の観測波長域ごとの光度変動(1,2,4段目)、波長ごとの強度比(3段目)。一度目のアウトバーストは赤、二度目は青で示した。また、擬似カラー(赤:2-4keV、緑:4-8keV、青:8-20keV)による観測イメージ図(最下段の写真)では、青(高エネルギーX線が比較的多い状態)から赤(低エネルギーX線が比較的多い状態)へ、そして再び青へ遷移する様子がわかる。

表1のようにモデルを定め、XSPEC によるスペクトルフィットを行なった(図3, 図4)。全期間を通して水素柱密度 N_H = 8.6e21 cm^{-2} とした。

表1: 円盤の状態と各期間のスペクトルモデル

円盤状態	T	モデル
high/soft (S)	21-91	Tbabs*Simpl*diskbb (Γ fixed)
Transition (T)	8-21, 91-107	Tbabs*Simpl*diskbb
Low/hard (H)	0-8, 107-191	Tbabs*powerlaw

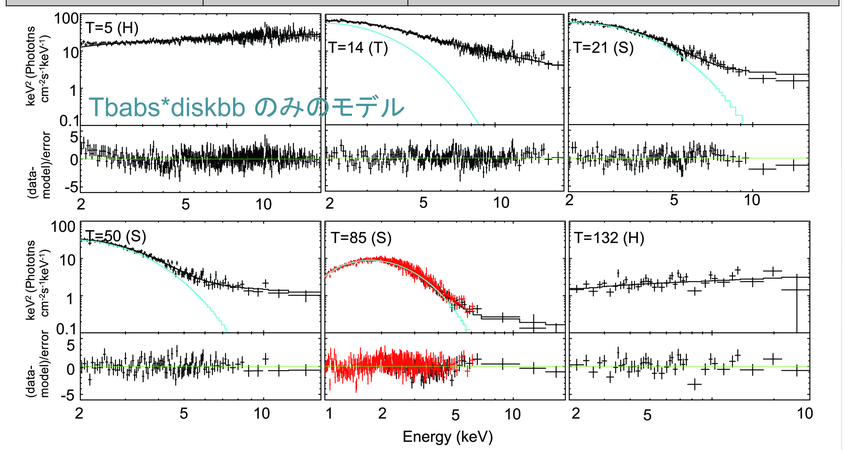

図3: J1348 の スペクトルフィット結果の抜粋。T=85 は、MAXI (黒) と Swift/XRT (赤) による同時刻観測を同時フィットしたものである。

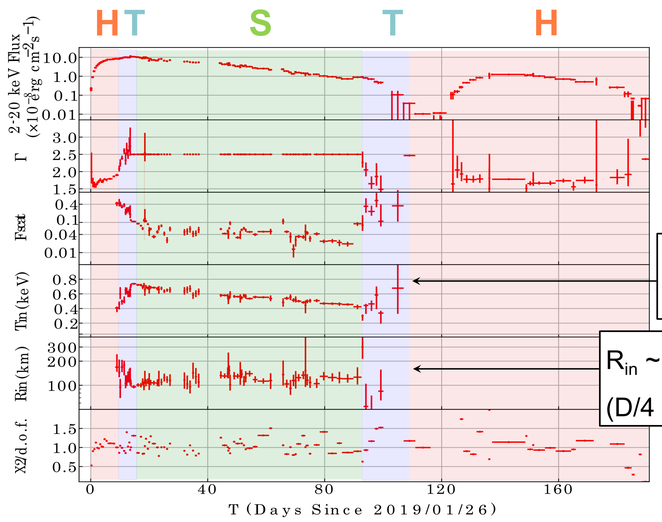

図4: スペクトルのベストフィットパラメータの時間発展。円盤の状態 (H, T, S) に応じて表1のモデルを使用した。ただし、天体までの距離 D=4 kpc, 円盤の傾き i=0 (face-on)として 円盤内縁半径 R_{in} を計算した。

考察

J1348 は同程度の光度の BHB (T_{in} > 1keV が多い)と比べて、T_{in} の最大値が小さいという特徴がある (図4)。また、R_{in} がほぼ一定であることからこれを ISCO (Schwarzshild 半径の3倍) とみなし、

$$M_{BH} = c^2 R_{in} / 6G \sim 13 \pm 2\ (D/4\ \mathrm{kpc})(\cos i)^{-1/2} M_{sun}$$

として BH 質量を見積もる。また、”high/soft” 状態から ”low/hard” 状態への遷移が Eddington 光度 (L_{Edd})の 1-4% で起こる [17]とし、J1348 の中心BHの質量・距離を制限した (図5)。

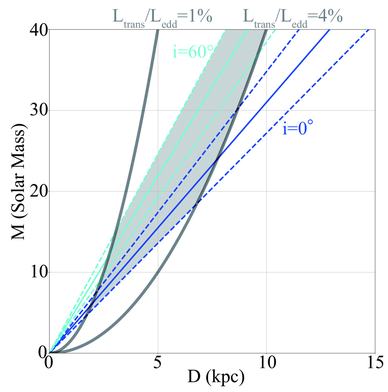

図5: J1348 の質量 (M) と天体までの距離 (D) の見積もり。円盤の傾きを i=0°、60°とし、光度の制限を設けることで、網掛け部が尤もらしい値であるとした。

さらに天体までの距離について考察する。J1348 の観測方向は銀河系の Scutum-Centaurus arm (距離 ~4-8 kpc [18]) の方向と一致する。一方、スペクトルフィットにより求めた水素柱密度は、J1348 が arm 内の高密度領域以遠にあることを示唆しない。故に、D<4 kpc であると考えられる。即ち、J1348 は比較的近くに存在する天体であることが示唆される。

BH 質量をより正確に求めるために、BH の回転による相対論的影響を考慮した場合の円盤放射モデルである kerrbb を diskbb の代わりに用いて (tbabs*kerrbb*simpl)、回転パラメータ a, 円盤の傾き i を固定し BH質量を求めた。ただし、T=85 の MAXI/GSC および Swift/XRT の観測データを用い、D=4 kpcとした (表2)。以上より、J1348 は、D=4 kpc とした時、少なくとも 7 M_{sun} の質量の BH が存在すると考えられる [19]。ただし、円盤の傾きに応じて BH 質量は増加する。本研究により、J1348 は「銀河系内の比較的近くにある重いBHである」と結論づけられた。

表2: kerrbb モデルによるBH 質量

a	i (°)	M_{BH} / M_{sun}
0	0	7
0	60	14
0.998	0	18
0.998	60	76

This document is provided by JAXA.