

Tomo-e Gozen による静穏期のブラックホール X 線連星の可視光観測 Optical observation of black hole X-ray binaries in the quiescent state by Tomo-e Gozen

○田中 雅泰¹, 小林 浩平², 根来 均³, 酒向 重行⁴

*Masayasu Tanaka¹, Kohei Kobayashi², Hitoshi Negoro³, Shigeyuki Sako⁴

Abstract: Black hole X-ray binaries (BHXB), which consist of a black hole and a main-sequence star, occasionally undergo outbursts lasting several months. On the other hand, in the optical energy band, a brief flare can be seen even during the quiescent state. We performed relative optical photometry of the BHXBs XTE J1118+480 and A 0620-00 observed by Tomo-e Gozen in March 2022, and obtained apparent magnitudes of 18.91 ± 0.08 mag and 17.92 ± 0.08 mag, respectively, which were found to be about the same brightness as in the past quiescent state.

1. 序

ブラックホールと主系列星で構成されるブラックホール X 線連星 (BHXB) である XTE J1118+480 (XTE J1118) と A 0620-00 (A 0620) は、太陽系からそれぞれ 1.9 kpc と 1.06 kpc と近く^[1,2], また、X 線での静穏期に可視光のフレアが観測されている^[3,4]. そこで、可視光での増光を調べるために、サブ秒の時間分解能での高速撮像が可能な Tomo-e Gozen^[5] を用いてこれらの天体の観測を行った. ここでは、まず初めに取得したデータを用いて相対測光を行い、各天体の可視での明るさを求めた.

2. 観測

Tomo-e Gozen (Tomoe) は、東京大学木曽観測所にある、口径 1.05 m、直径 9°の視野を持つ木曽シュミット望遠鏡に搭載された 84 枚のモザイク CMOS カメラと、リアルタイムデータ処理ソフトウェア、自動観測ソフトウェアから構成される、可視光の広視野動画観測システムである.

A 0620 と XTE J1118 の観測は、Tomoe を用いて、それぞれ 2022 年 3 月 9 日 09:59-10:14 UT と 14:41-14:56 UT に、視野角 $39'.7 \times 22'.4$ を 2 fps 総露光時間 15 分間ずつ行われた. これらの観測から、各天体について 15 分間の動画データ (cube) と、100 秒毎に積分した画像データ (stack) が得られた.

3. 相対測光による等級の算出

3.1. モファット関数を用いたフィッティング

XTE J1118 と A 0620 それぞれの近傍 1000'' 以内に位置する 7 つの参照星を用いて相対測光を行い、見積もった天体強度と等級の関係から、XTE J1118 と A 0620 の等級を求めた. ここで各強度 F は、各天体

の動径方向の輝度分布にガウス関数とモファット関数^[6]でフィッティングしたところ、モファット関数を用いて求めるのが適当だと分かった (Fig. 1, 2). モファット関数 f は、大型望遠鏡の焦点における大気の流れによって生成される星の点拡がり関数 (PSF) を正確に定義することができ、以下のように、天体中心からの動径方向の距離 r 、変数 σ, β を用いて表される.

$$f = \left(1 + \frac{r^2}{(2\sigma)^2}\right)^{-\beta} \quad (1)$$

このとき、強度 F は規格化定数 N を用いてモファット関数の積分値で表される.

$$\begin{aligned} F &= N \times \int_0^\infty \left(1 + \frac{r^2}{(2\sigma)^2}\right)^{-\beta} \cdot 2\pi r dr \\ &= \frac{\pi(2\sigma)^2}{\beta - 1} N \text{ [ADU]} \end{aligned} \quad (2)$$

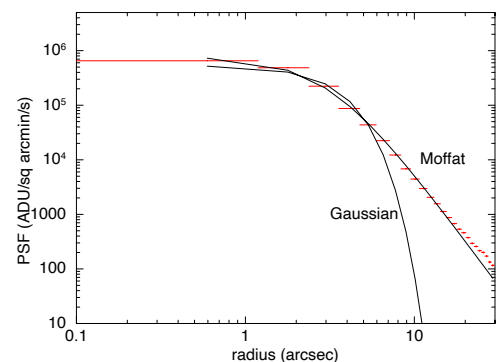


Figure 1. An observed PSF of a reference star TYC3451-1612-1 fitted with a Gaussian function and with a Moffat function.

同様に、近傍の 7 天体にフィッティングを行い、XTE J1118 と A 0620 観測時の 7 天体の σ, β の平均は、それぞれ $\sigma = 1.54 \pm 0.09$, $\beta = 2.04 \pm 0.21$ と $\sigma = 1.28 \pm 0.18$, $\beta = 1.92 \pm 0.12$ と求まった.

1 : 日大理工・院 (前)・物理 2 : 日大理工・院 (後)・物理 3 : 日大理工・教員・物理 4 : 東京大学

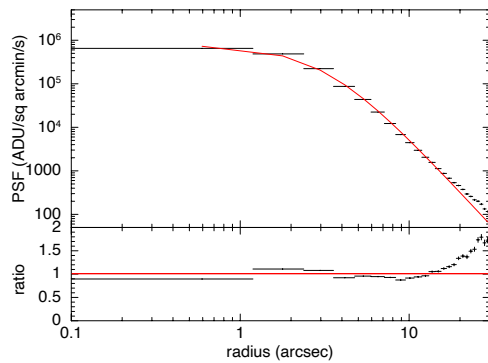


Figure 2. A radial profile of TYC3451-1612-1 fitted with a Moffat function (upper panel) and its ratio (lower panel).

これらの σ, β を用いて、それぞれの天体につき 9 枚の各 stack データでの強度を求め、その平均と分散から、天体強度と天体カタログ^[7]の等級の関係図を作成した (Fig. 3, 4). その結果、XTE J1118 と A 0620 の等級 m_v は、それぞれ 18.91 ± 0.08 mag と 17.92 ± 0.08 mag と求まり、ともに過去の静穏期での明るさ (それぞれ 19.31 mag と 17.47 mag^[7]) と同程度で受かっていることが分かった。

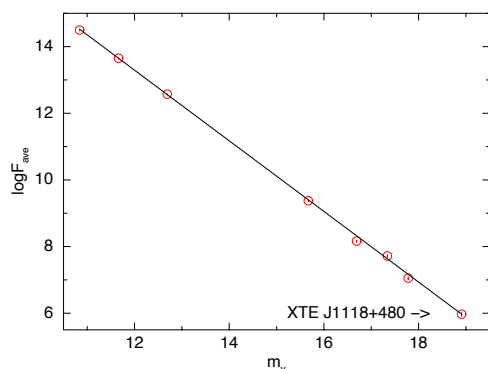


Figure 3. Optical magnitudes m_v and the observed average fluxes of XTE J1118+480 and nearby seven reference stars.

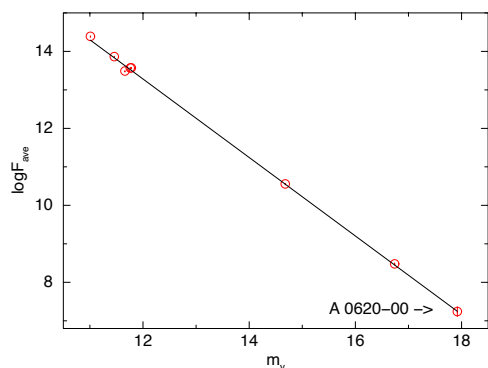


Figure 4. Same with Figure 3 except A 0620-00 and nearby seven reference stars.

3.2. 変数 σ, β の相関関係の調査

モファット関数の変数 σ, β は各 stack データごとにばらついていて、そこで、その変化の原因を探るために相関関係を調べた。

3.2.1. 明るい3天体の相関

参照星で用いている 10.84 等級の TYC3451-1612-1 (1612), 11.66 等級の TYC 3451-1409-1 (1409), 12.69 等級の GSC 03451-00938 (GSC) の σ, β の相関係数 r_σ, r_β を調べた。1612 と 1409 では $r_\sigma = 0.71, r_\beta = 0.78$, 1409 と GSC では $r_\sigma = 0.73, r_\beta = 0.22$, 1612 と GSC では $r_\sigma = 0.43, r_\beta = -0.16$ と求まり、1409 と他の 2 天体の相関が強かったため、1409 を基準とした。

3.2.2. 基準にした明るい天体と暗い4天体の相関

各 stack データごとに、参照星のうち暗い 4 天体の σ, β の平均を求め、基準とした 1409 との相関を調べた。 σ, β の相関係数 r_σ, r_β は、それぞれ $r_\sigma = 0.15, r_\beta = 0.25$ と求まった。また、それぞれのグラフを「定数」、「1 次関数」の 2 つのモデルでフィッティングして χ^2 検定を行ったところ、 σ, β とともに、どちらのモデルを用いても矛盾はないという結果になった。

暗い天体の相関から σ, β の変化の原因は分からなかったが、明るい天体の正の相関を考える限り、観測条件 (大気揺らぎ) の影響だと推論できる。

4. 今後の課題

σ, β の相関が天体強度の見積もりにどの程度影響するのかを議論する。また、天体の光度曲線を作成してフレアの有無を確認する。フレアが確認されなかった場合は、天体の変動の上限値を得る。

5. 参考文献

- [1] Cantrell et al., ApJ, 710, 1127-1141, 2010
- [2] Cherepashchuk et al., MNRAS, 483, 1067-1079, 2019
- [3] Shahbaz et al., MNRAS, 362, 975-982, 2005
- [4] Shahbaz et al., MNRAS, 354, 31-42, 2004
- [5] Tomoe Gozen
<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/ja/>
- [6] Racine, PASP, 108, 699-705, 1996
- [7] SIMBAD <http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>