

はくちょう座 X-3 の ultrasoft 状態の MAXI による研究

X-ray study of Cyg X-3 in ultrasoft state with MAXI

X 線天文学研究室 BP16042 坂井 謙斗

指導教員：久保田 あや 准教授 / 三原建弘 (理化学研究所)

1 はくちょう座 X-3

はくちょう座 には X 線天文学の黎明期より Cyg X-1, Cyg X-2, Cyg X-3 の 3 つの X 線天体が存在することが知られている。今回研究を行った Cyg X-3 は、地球からの距離は 7.4 ± 1.1 kpc (約 24000 光年)[1]、軌道周期は 4.8 時間であることがわかっている。Cyg X-3 は大質量 X 線連星 (HMXB) であり、図 1 のように主星であるコンパクト星と、伴星であるウォルフ・ライエ星という大質量の恒星を持つ。伴星は強い星風ガスを放出しており、主星はこれを降着している。コンパクト星に落ち込んだガスによって降着円盤が形成され、そこから X 線が放出される。



図 1: Cyg X-3 の想像図 [2]

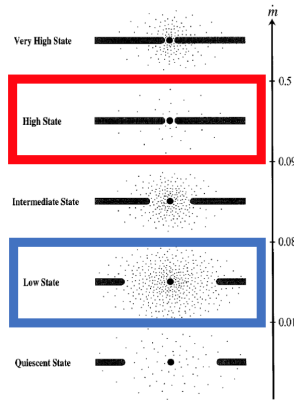


図 2: 降着円盤の状態 [3]

この他に特徴として、X 線のスペクトル状態には大きく分けて High/Soft 状態、Low/Hard 状態の 2 状態 (図 2) があり、この変化が激しいことが挙げられる [2]。コンパクト星はブラックホールである説が有力であるが、確定していない。このように、Cyg X-3 は未だ正体不明の天体である。

2 全天 X 線監視装置 MAXI

全天 X 線監視装置 (Monitor of All-sky X-ray Image)、通称 MAXI (図 3) は 2009 年 7 月 16 日に打ち上げられ、国際宇宙ステーション (ISS : International Space Station) の日本実験棟「きぼう」の船外プラットフォームに取り付けられた。そして同年 8 月 15 日より約 10 年間観測し続け、現在に至る。MAXI の大きな特徴の一つに、全天を観測し続けることができることが挙げられる。これは ISS が地球の周りを約 90 分で一周することを利用している。MAXI にはガススリットカメラ (GSC) と X 線 CCD スリットカメラ (SSC) の 2 種類のカメラが搭載されている。GSC は 12 台の大型キセノン比例計数管が搭載され、有効面積は 5350 cm^2 、検出範囲は 2-20 keV である。SSC は X 線 CCD を 32 枚使用し、有効面積は 200 cm^2 、検出範囲は 0.7-10 keV である [4]。データは MAXI の公開ページ [5] (図 4) にて公開されている。

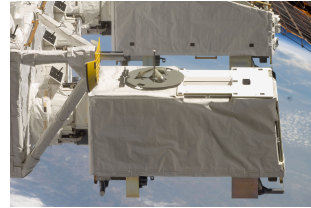


図 3: 全天 X 線監視装置 図 4: MAXI 公開ページ [5] MAXI[4]

3 MAXI による Cyg X-3 の解析

今回の解析では、MAXI に搭載されたセンサーのうち、GSC から得られたデータを使用した。MAXI の公開ページでは、2-20 keV (全帯域) と 2-4 keV (低帯域)、4-10 keV (中帯域)、10-20 keV (高帯域) の 3 バンドに分けられたデータが公開されている。今回はこのデータの中で 58400 MJD (修正ユリウス日) から 58600 MJD についての解析を行った。光度曲線は X 線強度を時間の関数としてプロットしたものであり、縦軸が $\text{counts} / \text{cm}^2 / \text{s}$ 、横軸が MJD である。今回はこのデータを基に、光度曲線 (ライトカーブ) と硬度比 (ハードネス比) を求めた。その結果が図 5 である。この図では上から順に 2-20 keV と 2-4 keV、4-10 keV、10-20 keV それぞれの光度曲線、hardness_low、hardness_high である。また、横軸に hardness_high、縦軸に 2-20 keV のデータをプロットしたものが図 6 である。これは強度ハードネスプロットと呼ばれるものである。今回得られたこの図より、明るくて軟 X 線が出ている High / Soft 状態と、暗くて硬 X 線が出ている Low / Hard 状態に分かれていることがわかる。

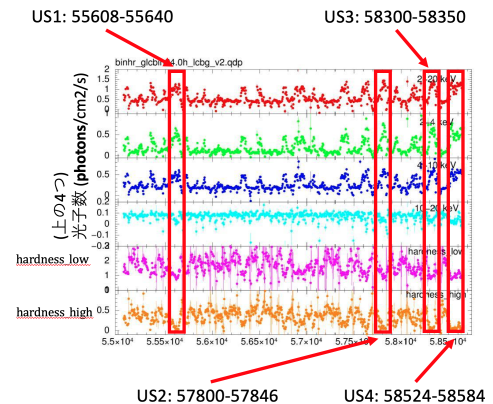
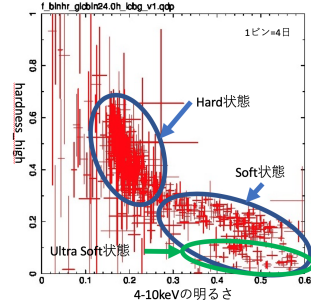


図 5: 光度曲線と硬度比

これより、MAXI で観測された 10 年間で Ultra-Soft 状態が 4 回見られることがわかった。55608 - 55640 MJD、57800 - 57846 MJD、58300 - 58350 MJD、58524 - 58584 MJD の 4 箇所である。以後、これを順に US1、US2、US3、US4 と呼称する。次に、US1 から US4 とその前後の区間において Swift 衛



星に搭載されたガンマ線検出器 BAT との比較と強度ハードネスプロットの作成をし、この 4 箇所が Ultra-soft 状態であることを検証した。まず、ガンマ線検出器 BAT のデータと先程求めた hardness_high の結果を比較した。その結果、両者で同じ箇所で落ち込みが見られた。また、図 7 は縦軸 hardness_high、横軸 4-10 keV の明るさで、Ultra-Soft 状態になる直前を黒、Ultra-Soft 状態を赤、Ultra-Soft 状態が終わった直後を緑でプロットした強度ハードネスプロットを作成したところ、いずれも赤の Ultra-Soft 状態が低い位置に出ていることがわかる。これらより、US1 から US4 の区間が Ultra-Soft 状態にあることが確認できた。ここでは US4 の結果を示す。

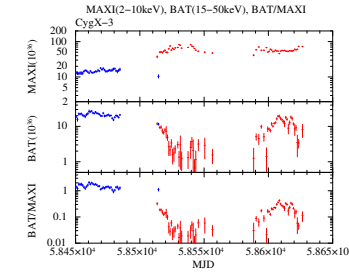


図 7: US4 - BAT と MAXI で

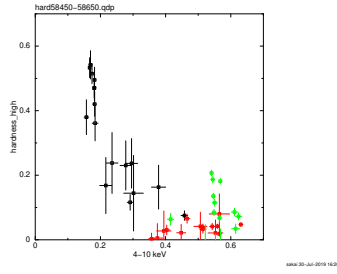


図 8: US4 - 強度ハードネスプロット

この 4 箇所の Ultra-Soft 状態について、スペクトル解析を行った。スペクトル解析には NASA が提供しているソフトウェアである xspec を用いた。まず、blackbody モデル (bb モデル) と diskbb モデルを用いてフィッティングを行い、その比較を行った。black body は黒体放射、disk bb はブラックホールの周辺に存在するガスでできた、光学的に厚い標準降着円盤 [6] からの多温度黒体放射を表すモデルである。[7] また、光電吸収の phabs と鉄ラインとして gaussian をそれぞれ加えてある。これは以下の式に表される。

- ・ bb モデル : $\text{phabs} * (\text{bb} + \text{gaus})$
- ・ diskbb モデル : $\text{phabs} * (\text{diskbb} + \text{gaus})$

これを US1、US2、US3、US4 にそれぞれ当てはめた。ここでは US4 の結果を示す。

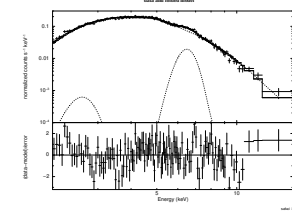


図 9: US4 - bb モデル

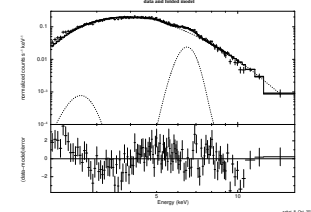


図 10: US4 - diskbb モデル

この時のベストフィットパラメータは表 1 のようになった。降着円盤の内縁半径 R_{in} は、距離を 7.4 kpc、 $\cos \theta = 0.5$ と

して導出した。なお、 χ^2 の自由度はいずれも 116 である。

表 1: bb と diskbb のベストフィットパラメータ

MJD		US1		US2		US3		US4	
		bb	diskbb	bb	diskbb	bb	diskbb	bb	diskbb
phabs	nH $10^{22}/\text{cm}^2$	2.73 ± 0.31	5.10 ± 0.32	2.15 ± 0.12	4.6 ± 0.124	3.18 ± 0.19	4.89 ± 0.12	2.21 ± 0.12	4.6 ± 0.13
bb/diskbb	kT (keV)	1.14 ± 0.02	1.49 ± 0.03	1.19 ± 0.01	1.56 ± 0.01	1.14 ± 0.01	1.47 ± 0.01	1.10 ± 0.01	1.42 ± 0.01
R_{in}	(km)	16.61 ± 1.47	12.86 ± 1.58	12.75 ± 0.21	12.59 ± 0.61	13.22 ± 0.21	14.35 ± 0.69	14.53 ± 0.25	15.77 ± 0.80
flux	10^{-13} W/cm^2	6.46	6.50	8.32	8.40	7.95	7.97	8.06	8.11
luminosity	10^{30} W	4.00	4.03	5.15	5.20	4.92	4.94	4.99	5.02
χ^2		1.01	1.15	1.27	1.71	1.44	2.08	1.31	1.95

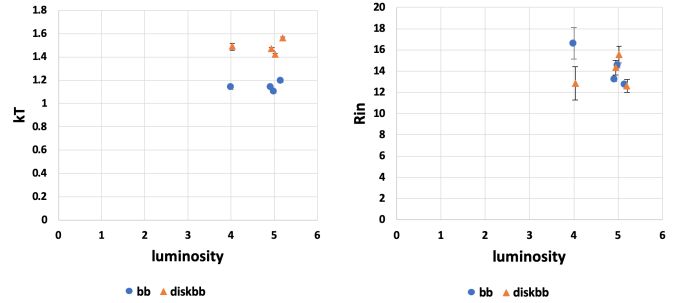


図 11: luminosity と kT の図 12: luminosity と R_{in} の関係関係

これより、Cyg X-3 では diskbb モデルよりも bb モデルのほうがより合うことがわかる。ただ、高帯域の成分が合わないこともわかった。そのため、powerlaw や nthcomp などのモデルを導入したが、diskbb のみの場合と大きな変化はなく、あまり良い結果とならなかった。

4 考察

表 1 の結果より、bb モデルで $kT = 1.15 \text{ keV}$ 程度、diskbb モデルで $kT = 1.5 \text{ keV}$ 程度である。また、いずれのモデルの場合でも、 $R_{\text{in}} = 13 \sim 15 \text{ km}$ 程度、 $\text{luminosity} = 5 \times 10^{-44} \text{ W/cm}$ 程度であることがわかる。また、 χ^2 の結果より、この天体には bb モデルが今回試したモデルの中で一番合っていることもわかった。以上の結果より、この 4 回の Ultra-Soft 状態において R_{in} と luminosity の再現性が確認された。

5 結論

本研究では、未だ正体不明の天体である Cyg X-3 を MAXI で観測された 4 箇所の Ultra-Soft 状態の解析をすることで、この天体の正体に迫った。今回の結果だけでは中性子星ではなくブラックホールであると断定できなかったが、今後は他の期間の解析などを通じてブラックホールであるという確証が得たいと考えている。

References

- [1] M.L.McCollough ApJ 830 L36 2016
- [2] F.Paerels, et.al 2000 ApJ 533 135
- [3] Spectral states of black hole X-ray binaries (Esinet al. 1997)
- [4] JAXA 「きぼう」 MAXI ホームページ
- [5] 理研 MAXI 観測データ公開サイト
<http://maxi.riken.jp/top/index.html>
- [6] Shakura Sunyaev 1973 AA 24 337
- [7] Mitsuda, K. et al. 1984 PASJ 36 741