

X 線衛星「すざく」をもちいた LMC X-1 ブラックホールの降着円盤による X 線研究 (Koyama et al. 2015 のレビュー)

八重幡 幸太郎 (埼玉大学大学院 理工学研究科)

Abstract

ブラックホールと恒星が連星を組んだ系では、伴星からのガスがブラックホールに降着する際、降着円盤を形成し、X 線を放射する。この X 線のスペクトルは、High/Soft 状態と Low/Hard 状態の二つの状態を遷移し、この遷移の間の状態は Very High 状態 (VHS) と呼ばれる。降着円盤は光学的に厚く、幾何学的に薄いとする標準降着円盤モデルでしばしば説明される。ケプラー回転は円盤の内側ほど早く、外側ほど遅いため、その速度差によって起こる摩擦で角運動量が熱エネルギーに変換される。一般相対論から、ケプラー回転は回転半径がシュバルツシルト半径の 3 倍以下になると角運動量が発散して成立しなくなり、この半径を最内安定円軌道という。これより内側には円盤を形成できないので、内縁半径は一定に保たれる。円盤の成長つまり降着円盤の内縁半径がシュバルツシルト半径に近づくとき高温プラズマが少なくなることがわかっているのだが、この二つの事象の関係をつなぐ物理過程がどんなものかは不明だった。ここではすざく衛星による広帯域での LMC X-1 の X 線観測を行った。そこで得られた時間平均スペクトルが降着円盤成分、熱的 + 非熱的コンプトン成分に分離してフィッティングができ、さらに VHS における熱的コロナ成分を他のブラックホール天体と比較することで、円盤からの種光子に対する熱的コンプトン光子の割合と種光子から見たコンプトンプラズマの energetics が比例することがわかった。

1 Introduction

多くのブラックホール連星は、時間的推移によって X 線光度やそのエネルギー・スペクトルに変動が観測され、いくつかの "状態" を持つことが知られている。図 1 ははくちょう座 X-1 の広帯域での X 線のスペクトル図の例である (Gierliński et al. 1999)。この図に示される 10 keV 以下の軟 X 線が主に見られる状態を "High/Soft" 状態 (HSS) とする。また広帯域の硬 X 線が支配する状態を "Low/Hard" 状態 (LHS) とする。そして軟 X 線の光度が上昇し、硬 X 線の光度が減少する、2 つの状態間の遷移中の状態を "Very High" 状態 (VHS) とし、これらの状態は以下によって説明することができる。HSS は 100 keV 付近にカットオフを持つベキ型成分が見られることから、降着円盤の真上にあるコロナと呼ばれる光学的に薄いプラズマが存在し、コロナからの非熱的な逆コンプトン散乱による成分が観測できる (図 1 の soft)。この状態では、降着円盤の半径が一般相対論的要請による最小の安定半径である最内安定円軌

道 (ISCO) と一致すると示唆された (Ebisawa et al. 1994)。一方、LHS では 0.1–1 keV にピークを持ち、円盤成分の寄与があまりなく (図 1 の hard)、HSS と違って熱的な逆コンプトン散乱による成分が支配するスペクトルを示す。したがって、降着円盤からの多温度黒体放射で説明される。VHS は熱的コンプトン散乱と非熱的コンプトン散乱が同時に観測できる状態 (Gierliński & Done 2003) で、円盤+ベキ型のモデルに広帯域では熱的コンプトンのモデルを加えることで説明ができる。VHS は観測例も少なく、コロナの状態や構造がまだよくわかっておらずブラックホールの成長過程を解明する鍵でもある。Koyama et al. (2015) ではブラックホール連星 LMC X-1 は LHS よりも VHS に近い状態にあるのではないかという結論に至った。更に LMC X-1 が VHS であるとして他のブラックホール連星との比較によって降着円盤と熱的コロナにどんな物理関係が存在するのかについて言及している。この関係についてはまだ不明な点が多いが、ブラックホールの状態が VHS であったことを考慮して他の VHS のブラックホールと

の比較によってこの物理関係に迫ろうとしたところに興味を持ち、今後自身のブラックホール天体への研究の参考なると思いこの論文をレビューすることにした。

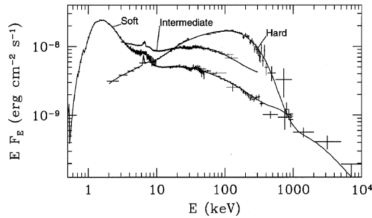


図 1: 3 状態にあるはくちょう座 X-1 の広帯域のスペクトル例 (Gierliński et al. 1999)

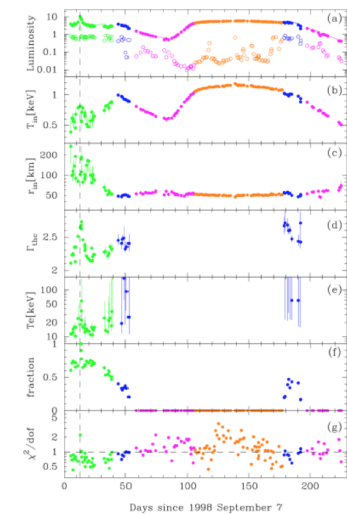


図 2: RXTE データによって得られた XTE J1550-564 の 3 成分モデルのフィッティングによるスペクトルパラメータの遷移 (Kubota & Done 2004)。(a) は円盤、べき型成分、total の光度の time history を示す。(b)-(g) は円盤温度、内縁半径、熱的コンプトンの photon index、熱的コンプトンの電子温度、熱的コンプトン放射における photon flux の反射、フィッティングの統計値に対する time history を示す。

2 Observations

2009 年の 7 月 21 日から 7 月 24 日にかけて X 線衛星「すざく」(?)m2007) を用いてブラックホール連星 LMC X-1 を観測した。XIS は nominal position で 1/4 window モード、時間分解能は 2 秒で、スペクトル観測を行った。以前の VHS の観測の多くは 2-100 keV の帯域でのものが多く、単一コンプトンとの見分けがつきにくかった。「すざく」に搭載される XIS は 0.2-12 keV、HXD は 10-600 keV と広帯域のエネルギー帯域を同時観測でき、かつ低バックグラウンドのスペクトルデータが取れる。このような理由から「すざく」衛星を利用した。

3 Spectra Analysis

3.1 時間平均スペクトルの解析

0.8-10 keV の XIS スペクトルと 13-50 keV の HXD スペクトルの解析を行った (図 3)。「円盤+(熱的+非熱的)コンプトン」のモデルを使うことでこれをうまく説明できた (表 1)。つまり、LMC X-1 が熱的コンプトンと非熱的コンプトン両方の成分が混在する VHS であることを示唆する。

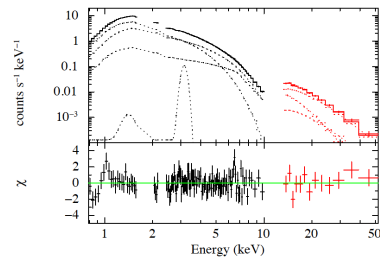


図 3: $phabs * [simpl_{Source} * dkbbfth_{disk} + kdblur * rfxconv * (simpl_{Compton} * dkbbfth_{disk} + dkbbfth_{Compton})]$ でフィットした LMC X-1 の Fold スペクトル (Koyama et al. 2015)。 χ は best-fit モデルとデータの残差を示す。

表 1: Best-fit parameters for time averaged spectra (Koyama et al. 2015) .

		Model 1	Model 2	Model 3
phabs	N_H ($\times 10^{21}$ cm 2)	$5.47^{+0.07}_{-0.06}$	$6.03^{+0.07}_{-0.06}$	$6.06^{+0.09}_{-0.11}$
diskbb	kT_{in} (keV)	0.784 ± 0.006	—	—
	Norm *	$104.69^{+3.94}_{-3.49}$	—	—
bhspec	a_*	—	0.79 ± 0.01	—
	L/L_{Edd}	—	0.137 ± 0.001	—
dkbbfth	T_{in} (keV)	—	—	$0.811^{+0.012}_{-0.010}$
	Norm ($\times 10^{-2}$)	—	—	$1.39^{+0.06}_{-0.12}$
	R_{tran} (R_{in})	—	—	$8.86^{+0.98}_{-0.44}$
	kT_e (keV)	—	—	$15.5^{+1.3}_{-3.8}$
	Γ_{th}	—	—	$3.91^{+0.11}_{-0.10}$
rfxconv †	$\Omega/2\pi$ §	$0.64^{+0.11}_{-0.09}$	$0.64^{+0.11}_{-0.10}$	$0.98^{+0.34}_{-0.18}$
simpl	$f_{scat}^ $	$0.167^{+0.022}_{-0.015}$	$0.164^{+0.013}_{-0.014}$	$0.033^{+0.002}_{-0.007}$
	Γ	$2.88^{+0.06}_{-0.05}$	$2.90^{+0.04}_{-0.05}$	2.1 (fixed)
$\chi^2/d.o.f$		290.13/118	302.24/118	111.57/116
Derived value	r_{in} (km) #	$54.8^{+0.9}_{-1.0}$	47.6 ± 0.8	$55.0^{+1.2}_{-1.0}$
	τ_{th}	—	—	$0.67^{+0.05}_{-0.13}$
	f_{th}	—	—	0.12

Notes. The errors are 90% confidence level for single parameter.

*⁰ Normalization defined as $r_{in}^2 \cos i / (D/10 \text{ kpc})^2$

†⁰ The solar abundances assumed, with fixed ionization parameter of $\xi = 1000$

§⁰ Reflection strength of the `ireflect` model. Ω is solid angle of the reflector.

||⁰ Scattering fraction of the `simpl` model

#⁰ Inner disk radius derived from fit results.

Model 1: Calculated from the normalization of `diskbb`.

Model 2: Equivalent to a_* of `bhspec` calculated with $M_{BH} = 10.9 M_{\odot}$.

Model 3: Estimated from unabsorbed photon flux via Equation (A.1) in Kubota & Done (2004).

3.2 変動スペクトルの解析

hardness ratio の 0.25 を境にしてそれより上のデータを hard phase, 下を soft phase として分けて解析を行った (図 4)。どちらも“円盤+ (熱的+非熱的) コンプトン”のモデルで表現でき (図 5)、非熱的コンプトン放射の反射成分 f_{scat} が hard phase と soft phase で 40 % ほどの変動が伺えた。それぞれの phase での内縁半径を計算した結果、Hard Phase (PH) で $54.1^{+1.1}_{-1.2}$ km、Soft Phase (SP) で $55.5^{+0.7}_{-0.1}$ km となった (表 2)。

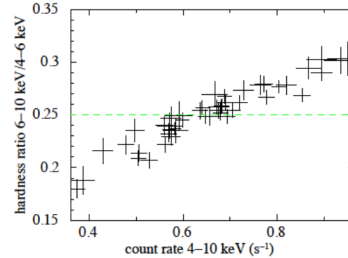


図 4: bin サイズ 5760 s における 4-6 keV の Count rate に対する 6-10 keV から 4-6 keV の Hardness ratio (Koyama et al. 2015)

4 Discussion

X 線観測衛星「すざく」(Mitsuda et al. 2007) を用いて VHS のブラックホール連星 LMC X-1 の観測を行った。この時得られた時間平均スペクトルの解析では非熱的+熱的コンプトンの二成分が必要なのことがわかり、このことは LMC X-1 が VHS であることを示す。スペクトル変動の解析では非熱的コンプトンの割合のみが変化し、円盤の内縁半径が一定に

保たれることがわかった。

観測時に VHS であった他のブラックホール天体 (GX 339-4, 2U1630-47) の降着円盤の内縁半径と熱的コロナ成分 (図 6) の比較より (Koyama et al. 2015)、内縁半径が大きいほど、言い換えると ISCO より外側に内縁半径を取る時、種光子から見たコンプトンプラズマのエネルギーが増加する。これを Koyama et al. (2015) では円盤の半径が ISCO に近づく方に伸展

表 2: Best-fit parameters for each phase (Koyama et al. 2015) .

		HP	SP
phabs	N_H ($\times 10^{21}$ cm 2)	$6.09^{+0.01}_{-0.13}$	6.01 ± 0.08
dkbbfth	kT_{in} (keV)	$0.813^{+0.011}_{-0.012}$	$0.807^{+0.007}_{-0.001}$
	Norm ($\times 10^{-2}$)	$1.35^{+0.10}_{-0.08}$	$1.42^{+0.10}_{-0.10}$
	R_{tran} (R_{in})	$8.89^{+0.60}_{-0.80}$	$9.07^{+1.02}_{-0.92}$
	kT_e (keV)	$14.0^{+4.0}_{-4.1}$	$16.3^{+11.6}_{-5.7}$
	Γ_{th}	$3.98^{+0.13}_{-0.14}$	$4.04^{+0.22}_{-0.26}$
rfxconv ‡	$\Omega/2\pi$ §	0.85 ± 0.24	$0.89^{+0.57}_{-0.36}$
simpl	f_{scat}	$0.048^{+0.008}_{-0.007}$	$0.027^{+0.008}_{-0.009}$
	Γ	2.1 (fixed)	2.1 (fixed)
$\chi^2/d.o.f$		109.95/116	108.64/116
Derived value	r_{in} (km) #	$54.1^{+1.1}_{-1.2}$	$55.5^{+0.7}_{-0.1}$
	τ_{th}	0.70 ± 0.16	$0.61^{+0.34}_{-0.18}$
	f_{th}	0.12	0.11

Notes. The errors are 90% confidence level for single parameter.

‡⁰ The solar abundances and ionization parameter of $\xi = 1000$ assumed.

§⁰ Reflection strength of the rfxconv model. Ω is solid angle of the reflector.

||⁰ Scattering fraction of the simpl model

#⁰ Inner disk radius estimated from unabsorbed photon flux via Equation (A.1) in Kubota & Done (2004).

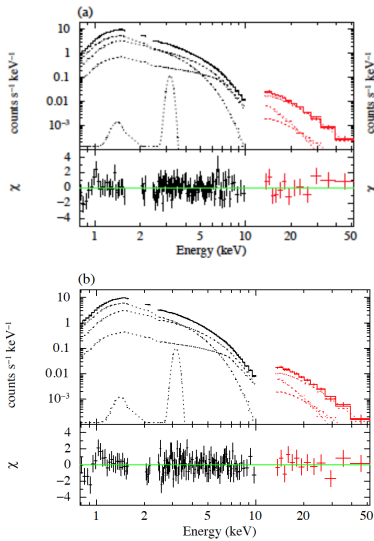


図 5: (a)hard phase (b)soft phase におけるベストフィットモデルの Unfolded スペクトル (Koyama et al. 2015) 。 χ は best-fit モデルとデータの残差を示す。

するに伴い、種光子が増加し、それがコロナによってエネルギーを与えられ、コロナの冷却が進むと解釈していた。しかし、今回の観測は4日程度のため状態遷移のタイムスケールがどれくらいなのかを考慮にいれておらず、もし円盤が伸展途中であった場合成り立たない。

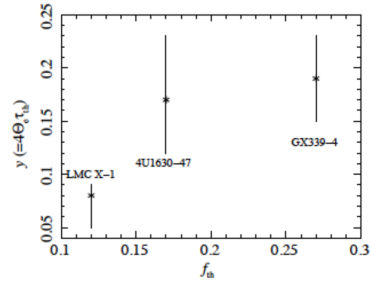


図 6: VHS における 3 つのブラックホール連星 GX 339-4 (Tamura et al. 2012) と 4U1630 - 47 (Hori et al. 2014)、LMC X-1 (Koyama et al. 2015) のコンプトン反射成分 f_{th} と y パラメータ ($y = 4\tau_{th}kT_e/511$ keV) の比較 (Koyama et al. 2015)。 y は種光子から見たコンプトンプラズマのエネルギーを示す。

Reference

Koyama, S., Yamada, S., Kubota, A., et al. 2015, PASJ, 67, 46
 Ebisawa, K., Ogawa, M., Aoki, T., et al. 1994, PASJ, 46, 375
 Gierliński, M., Zdziarski, A. A., Poutanen, J., et al. 1999, MNRAS, 309, 496
 Gierliński, M., & Done, C. 2003, MNRAS, 342, 1083
 Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337
 Kubota, A., & Done, C. 2004, MNRAS, 353, 980
 Tamura, M., Kubota, A., Yamada, S., et al. 2012, ApJ, 753, 65
 Hori, T., Ueda, Y., Shidatsu, M., et al. 2014, ApJ, 796, 146
 Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, , 59, 1