

# 「すぎく」による ULX 天体 Holmberg IX X-1 のスペクトルの時間変動解析

小林 翔悟、中澤知洋 (東京大学大学院理学系研究科)、牧島一夫 (東大理/理研)

## Abstract

Ultra Luminous X-ray source (ULX) は渦巻き銀河の腕に存在する X 線で明るい点源である。光度は  $L_X = 10^{39.5-41}$  erg/s と恒星質量 ( $\sim 10M_\odot$ ) ブラックホール (BH) の Eddington 限界光度  $L_{\text{edd}} \sim 10^{39}$  erg/s を大きく上回る。撮像分光観測によるスペクトル解析から、中間質量 ( $\sim 100 - 1000M_\odot$ ) BH が  $L_{\text{edd}}$  程度で輝いているとする説と、恒星質量 BH からの超  $L_{\text{edd}}$  放射であるとすつ説が存在し、決着がまだついていない。

ULX のスペクトルは BH 連星と同様に Disk 型と Power Law (PL) 型という異なる状態を遷移することが知られている。前者は上に凸なスペクトルで、後者は 10 keV 付近で弱いカットオフを受けたベキ関数的に伸びる硬いスペクトルである。特に後者については、降着円盤からの多温度黒体放射と、光学的に厚く  $\sim 3$  keV という比較的低温なコロナによる逆コンプトン散乱モデルでよく再現されることが知られている。しかしながら、平均スペクトルでの議論に限られており、スペクトルの時間変動まで含めた議論はごく少数に限られている。そこで代表的な ULX である Holmberg IX X-1 の「すぎく」での観測データに着目した。2012 年 4 月と 10 月でそれぞれ 180 ks と 320 ks に分けた合計 500 ks の長時間観測が「すぎく」で行われ、過去に類を見ない高統計なデータが得られた。今回このデータから長期/短期スケールでのスペクトル変動が得られたため、光度変化を含めて PL 型スペクトルの解釈が正しいかどうかの検証を行った。結果、観測を通じて「光学的に厚く電子温度の低い」コロナによるコンプトン散乱のモデルは妥当であり、Holmberg IX X-1 が中間質量 BH で、 $L_{\text{edd}}$  程度で輝いているという解釈が時間変動を含めて可能であることが確認された。

## 1 Introduction

ULX は渦巻き銀河の腕に存在する X 線で非常に明るい点源で、光度は  $L_X = 10^{39.5-41}$  erg/s である。これは恒星質量 ( $\sim 10M_\odot$ ) BH の重力と放射圧が釣り合うエディントン限界光度  $L_{\text{edd}} \sim 10^{39}$  を大きく上まっており、1989 年に *Einstein* での観測で発見されてから (1) その正体は謎であったが、「あすか」の CCD カメラでの撮像分光観測により、そのスペクトルは BH 連星と同様に降着円盤からの多温度黒体放射モデルでよく再現されることがわかった。そこで牧島ら (2) は高速回転する Kerr BH を仮定することで、これらをミッシングリンクとなっていた中間質量 ( $\sim 100 - 1000M_\odot$ ) BH からの  $L_{\text{edd}}$  程度での放射と解釈できるとし、国際的な議論を巻き起こした。一方で、嶺重らはこれらのスペクトルが恒星質量 BH からの超  $L_{\text{edd}}$  放射モデルでも説明ができると

し (3)、今日まで未決着である。

その後、その正体を探ろうと様々な衛星で観測が行われた。その結果、ULX には BH 連星の Low/Hard state、High/Soft state と同様に、Disk 型と Power Law (PL) 型という異なるスペクトル状態が存在し、その間を時間とともに遷移することがわかった。前者は先述した多温度黒体放射のモデルでよく再現でき、上に凸なスペクトルを持っている。後者はベキ関数的に伸びるスペクトルを持ち、降着円盤からの放射に加えて、それを種光子とした周辺コロナ中の電子による逆コンプトン散乱のモデルでよく再現される。BH 連星の Low/Hard state と同様にコンプトン散乱の成分が卓越しているが、この時のコンプトン雲は BH 連星 ( $kT_e \sim 100 - 200$  keV、 $\tau \sim 1$ ) とくらべて電子温度は  $kT_e \sim 3$  keV と非常に低く、光学的に  $\tau \sim 10$  と厚い (4)。このようなコロナは、中性子星連星である Aql.X-1(5) や活動銀河核である

Mrk.509(6) などでも確認されており、これらに共通の物理が存在している可能性がある。しかしながら、ULX は全て銀河系外に存在し flux が小さいことに加えて変動が比較的小さいため、ULX のスペクトルの時間変化をもちいた研究は極少数で、議論は平均スペクトルを用いたものにとどまっている。よってこの「光学的に厚く低温度なコロナ」という解釈が光度変化も含めて可能かどうかを検証する必要がある。

そこで今回、代表的な ULX である Holmberg IX X-1 の「すざく」での観測データに着目した。Holmberg IX X-1 は M81 渦巻銀河の伴銀河である Holmberg IX 不規則矮小銀河に付随する ULX であり、光度は  $L_X \sim 10^{40}$  erg/s である。そのスペクトルは Disk 型と PL 型を遷移することがわかっており (7)(8)(9)、近年では PL 型スペクトルで観測されている。この ULX は既知の ULX の中でも M82 X-2、M33 X-8 について 3 番目に flux が大きいことに加えて、2012 年に「すざく」で合計 exposure 500 ks の長時間観測が行われた。ここまで長時間での観測は前例がなく、一つの観測内でスペクトルの時間変化を追うことが十分期待できる。

## 2 Data Reduction

今回用いたのは「すざく」の公開データで、2012 年 4 月 13 日に行われた 180 ks と同年 10 月に行われた 320 ks の観測である。検出器は XIS(X-ray Image Spectrometer)0 と XIS3 を用いた。図 1 に XIS3 による 0.5-10 keV のイメージを示す。ULX の source region は中心から半径 3 arc min の円内とし、back ground は図に示した円環から、XIS0 が死んでいる長方形の領域と、点源を除いた領域内のイベントを用いた。10 keV 以上を担う Hard X-ray Detector は、M81 活動銀河核が視野内に混入していたため今回は用いない。

## 3 Results

図 2 に 4 月と 10 月の XIS0+XIS3 の 0.5-10 keV の light curve を示す。4 月と 10 月それぞれで  $\sim 20\%$  の変動が見られた。両月の平均スペクトルは非常に

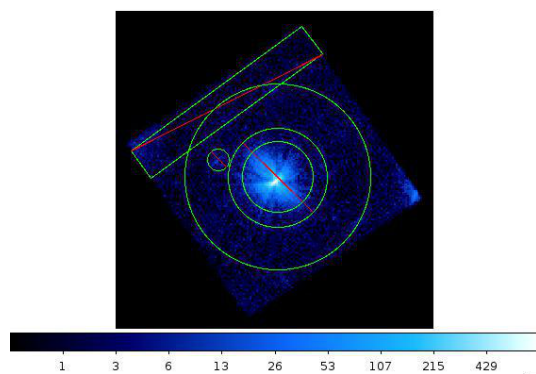


図 1: 「すざく」の XIS3 CCD カメラによる Holmberg IX X-1 の 0.5-10 keV イメージ。

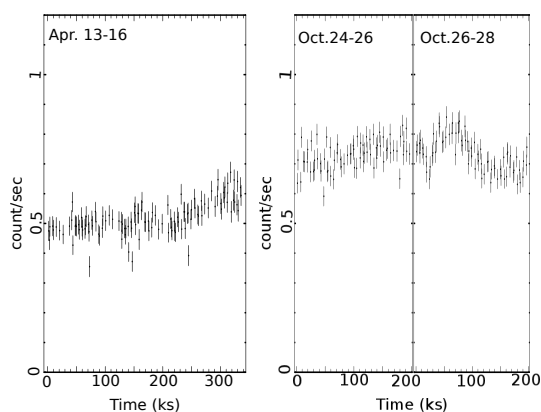


図 2: XIS0+XIS3、0.5-10 keV での Holmberg IX X-1 の light curve。

hard なスペクトルであり、ともに PL 型スペクトルであった。そこで、スペクトルを降着円盤からの多温度黒体放射とコロナによるコンプトン散乱のモデルでフィッティングを行った。フィッティングの結果を表 1 に示す。両月ともにこのモデルでよく再現で

表 1: 4 月と 10 月の平均スペクトルでのフィッティング結果。

	4 月 Average	10 月 Average
$kT_{in}$ (keV)	$0.21 \pm 0.01$	$0.19 \pm 0.01$
$kT_e$ (keV)	$2.8 \pm 0.2$	$3.1 \pm 0.3$
$\Gamma$	$1.67 \pm 0.02$	$1.78 \pm 0.01$
$L_X$ (erg/s)	$1.39 \times 10^{40}$	$1.51 \times 10^{40}$
red. $\chi^2$	1.11	1.06

きている。電子温度は誤差の範囲内で一致しているが、半年間で光度が9%増加し、スペクトルは軟化したことがわかる。コロナの光学的厚みを計算すると、光学的に厚いが $\tau \sim 14$ から $\tau \sim 11$ に減少している。次に light curve に変動が見られたので、時間変化を追うために、それぞれの月で平均値よりも count rate が高い時間を high phase、低い時間を low phase と定義し、スペクトルを抽出した。抽出したスペクトルとそれぞれの月の Low phase でのベストフィットモデルとの比を図3に示す。スペクトルは一貫して硬い PL 型であるが、比を見ると  $< 5$  keV が主に増加していることがわかる。これらを平均スペクトルと同じモデルでフィッティングを行った結果が表2、3である。

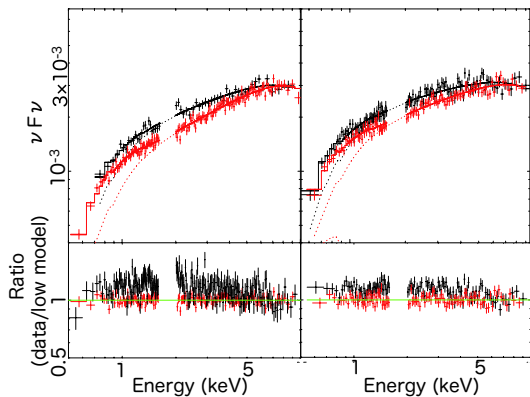


図 3: Holmberg IX X-1 の 4 月 (左) と 10 月 (右) の Low (赤)/High (黒) phase の  $\nu F\nu$  プロットとそれぞれの Low phase でのベストフィットモデルとの比。

表 2: 4 月の Low/High phase のフィッティング結果

	4 月 Low	4 月 High
$kT_{in}$ (keV)	$0.21 \pm 0.02$	$0.18 \pm 0.05$
$kT_e$ (keV)	$3.0 \pm 0.4$	$3.0^{+1.1}_{-0.5}$
$\Gamma$	$1.66 \pm 0.03$	$1.76 \pm 0.05$
$L_X$ (erg/s)	$1.20 \times 10^{40}$	$1.33 \times 10^{40}$
red. $\chi^2$	0.82	1.09

すべての phase についても、降着円盤とコロナによる逆コンプトン散乱のモデルでよく再現されることが確認された。一方でパラメータに着目すると、平均スペクトルの時と同様に、電子温度  $kT_e$  は誤差の

表 3: 10 月の Low/High phase のフィッティング結果

	10 月 Low	10 月 High
$kT_{in}$ (keV)	$0.19 \pm 0.02$	$0.16 \pm 0.03$
$kT_e$ (keV)	$3.0 \pm 0.7$	$2.9 \pm 0.7$
$\Gamma$	$1.76 \pm 0.03$	$1.83 \pm 0.04$
$L_X$ (erg/s)	$1.39 \times 10^{40}$	$1.51 \times 10^{40}$
red. $\chi^2$	0.99	0.98

範囲内で一致しているが、スペクトルの傾きを表す光子指数  $\Gamma$  が変化している。図4はそれぞれの phase

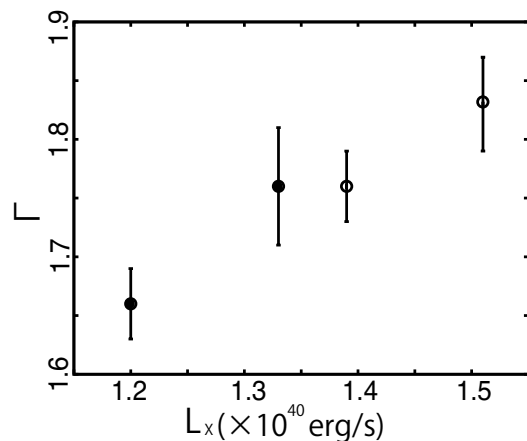


図 4: Holmberg IX X-1 での光度  $L_X$  と光子指数  $\Gamma$  の相関図。黒丸が 4 月、白抜き丸が 10 月。

での  $\Gamma$  を、光度  $L_X$  でプロットしたものである。これを見ると、 $\Gamma$  は光度とともに増加、すなわちスペクトルが軟化する傾向にある。以上から半年間の長期スケール、数十 ks の短期スケールともに Holmberg IX X-1 のスペクトルは同様の時間変化を示すことがわかった。

## 4 Discussion

Holmberg IX X-1 のスペクトルは、標準降着円盤からの放射とその付近にある低温度で光学的に厚いコロナによる逆コンプトン散乱のモデルでよく再現された。そこで、標準降着円盤がコンプトン雲であるコロナによって部分的に覆われているようなジオメトリを考える。降着円盤からの種光子の数がコンプ

トン散乱後も保存すると仮定すると、コロナによるコンプトン散乱を受ける前の「生の降着円盤からのスペクトル」を再現することが可能である。コンプトン散乱を受けていない、生で見えている降着円盤の見かけの最内縁半径を  $R_{\text{raw}}$ 、コンプトン散乱された分の降着円盤の見かけの最内縁半径を  $R_{\text{comp}}$  とすると、コンプトン散乱を受ける前の降着円盤の真の光度は  $L_{\text{true}} = 4\pi\sigma(R_{\text{raw}}^2 + R_{\text{comp}}^2)$  で求めることができる。ここで  $\sigma$  はシュテファン・ボルツマン定数である。以上から降着円盤の最内縁温度と、円盤の光度から降着円盤の最内縁半径を計算すると、 $R_{\text{in}} \sim 600 - 1700 \text{ km}$  となる。Schwarzschild BH を仮定し、降着円盤の最内縁半径が Schwarzschild BH の最内縁安定軌道である Schwarzschild 半径  $R_{\text{g}}$  の 3 倍に一致すると仮定すると、Holmberg IX X-1 の質量は  $M \sim 70 - 190 M_{\odot}$  となる。最大まで回転する Kerr BH を仮定すると、最内縁安定軌道はシュバルツシルト BH の  $1/6$  まで中心に近づき、さらに大きい質量まで許される。エディントン光度比は  $L_{\text{X}}/L_{\text{edd}} = 0.75$  となり、よって光度変化を含めて Holmberg IX X-1 は中間質量 BH が  $L_{\text{edd}}$  程度で輝いているという解釈が可能であるが、これはジオメトリや仮定に強く依存するため、検証が余地がまだ存在する。スペクトルは光度増加とともに軟化しており、コロナでの逆コンプトン散乱が非効率になる傾向が得られた。このような「電子温度が低く光学的に厚い」コロナは中性子星連星 Aql. X-1 や活動銀河核 Mrk 509 といった他種の天体でも散逸されているため、これらを支配する共通の物理がある可能性があり、今回のこの傾向がこれらでも存在するか、といった比較をすることが重要となる。

## 5 Conclusion

代表的な ULX である Holmberg IX X-1 の「すぎく」による 2012 年 4 月と 10 月の合計 500 ks の観測データを解析し、スペクトルの時間変化を追った。平均スペクトルは両月通して PL 型で、降着円盤からの多温度黒体放射と、まわりの  $\sim 3\text{keV}$  のコロナによる逆コンプトン散乱のモデルでよく再現された。半年の間で光度が 9% 増加しており、それにとまってスペクトルが軟化している。各月で light curve に

最大で 20% の変動が数-数十 ks の短期スケールで見られたため、平均値よりも大きい時と小さい時でスペクトルを抽出した。その結果すべてのスペクトルが、平均スペクトルと同一のモデルでよく再現された。また平均スペクトルの時と同様の時間変化をし、以上から Holmberg IX X-1 では、長期/短期ともにスペクトルのベキ  $\Gamma$  は光度と正の相関を持つ傾向にあることがわかった。モデルのパラメータから標準降着円盤の最内縁半径を求め、Schwarzschild と BH を仮定すると、質量は  $70 - 190 M_{\odot}$  で中間質量領域となる。以上から、検証の余地はまだ存在するが、長期/短期スケールで Holmberg IX X-1 が Eddington 比 0.75 で輝く中間質量 BH という解釈が可能であることを確認した。

## Reference

- [1] Fabbiano 1989
- [2] Makishima et al. 2000.
- [3] Mineshige et al.2007
- [4] Miyawaki et al. 2006
- [5] Sakurai et al. 2012
- [6] Noda et al. 2011
- [7] Tsunoda et al. 2006
- [8] La Parola et al. 2001
- [9] Vierdayanti et al. 2009