ブラックホール連星の広帯域X線解析による 降着円盤放射の研究

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻

高エネルギー宇宙・可視赤外天文学研究室

M183596

岩尾祐希

主查 高橋弘充 副查 小嶌康史

2020年2月

概 要

ブラックホール連星は太陽の数倍程度の質量を持つ恒星質量ブラックホールと伴星からなる天体であり、 伴星からの物質の供給によりブラックホール周りに降着円盤を形成し、X線帯域で明るく輝いている。ブ ラックホール連星の数数10keVのX線放射は、降着円盤からの熱的放射成分と非熱的放射成分によって よく再現されると1970年代に報告された。これらは、降着円盤の幾何学的に薄く、光学的に厚い領域から の円盤半径に依存した黒体放射の重ね合わせ(多温度黒体放射)と、光学的に薄い領域の電子雲(コロナ)に より多温度黒体放射が逆コンプトン散乱された放射(べき型放射)だと考えられている。また観測から降着 円盤の最内縁半径は一定で、最終安定円軌道に到達していると考えられている。

近年の先行研究により1 keV 以下の低エネルギー帯域まで含めた広帯域解析では、熱的放射成分が従来 の多温度黒体放射モデルでは再現できないことが報告された。ただしこれは1 天体の1 観測についてのみ 調べられた結果である。そこで本研究ではブラックホール連星を低エネルギー帯域まで含めた広帯域で解 析し、光度の変化による降着円盤の熱的放射成分の変化を理解することを目的とした。先行研究と同様、ブ ラックホール連星の中でもよく観測され、多温度黒体放射モデルとべき型放射モデルでよく再現されると 広く認知されており、かつ視線方向の水素柱密度がとても小さく、低エネルギー帯域まで観測できる LMC X-3 を解析天体とした。

本研究では X 線天文衛星「すざく」による 3 観測 (先行研究 1 観測を含む) と XMM- Newton による 4 観測、計 7 観測のアーカイブデータのスペクトル解析を行った。まず従来の手法を用いて LMC X-3 の 7 観測を 3 keV 以上で解析したところ、従来のモデルで再現され、最内縁半径も先行研究と同程度で一定 値となった。一方で 0.7 keV まで含めた広帯域で解析したところ、光度が約 15 倍変動している間にスペク トルの形が変化しており、全てのデータで従来のモデルでは再現できないことが分かった。そこで多温度黒 体放射モデルの温度の半径依存指数 (p) に着目し、それをフリーパラメータとしたモデルを用いて解析した (多温度黒体放射モデルでは p=0.75)。その結果、最内縁半径は先行研究程度の値でほぼ一定となり、p の 値は全観測で 0.75 より小さく、低エネルギー帯域の放射が増加していることがわかった。結論として、広 帯域スペクトルは多温度黒体放射の幅を広くすることで光度によらず再現でき、降着円盤の温度が外側に 向けて下がりにくくなっている。



図目次

2.1	reference picture	5
2.2	植	6
2.3	植	6
2.4	植	8
2.5	reference picture [?]	9
3.1	植	13
3.2	植	13
3.3	植 が参照う輸 [?]	13
3.4	植梢名植梢名植梢名植梢名植梢名植梢名植梢 名植梢名植梢名	14
3.5	植梢名植梢名植梢名植梢名植梢名植梢名植梢 名植梢名植梢名 [?]	14
3.6	植	14
4.1	植	17

第1章 序論

1.1 ブラックホールX線連星

ブラックホールのようなコンパクト天体はある程度大きな質量を持つ星の進化の最終段階によって生成 される天体である。それらの天体と近傍の恒星(伴星)が連星系となると、コンパクト天体の重力により伴 星のガスが供給されコンパクト天体に降着円盤を形成し、重力エネルギーを解放し、X線帯域で明るく輝 いているものをX線連星という。その中でも太陽質量程度のブラックホールと伴星により数~数10 keVの X線帯域で輝いている天体をブラックホールX線連星と呼ぶ。



図 1.1: ブラックホール連星の外観 [?]

X線連星は伴星の質量によって大質量X線連星と低質量X線連星とに分類される。

1.1.1 大質量 X 線連星 (High Mass X-ray binary:HMXB)

HMXB は OB 型星のような質量が~ $10M_{\odot}$ を超える重い恒星を伴星に持つ X 線連星である。低質量 X 線連星との降着の違いとして、恒星からの恒星風がコンパクト天体の重力により降着していると考えられ ている。伴星が比較的若く、重い恒星であるため、HMXB の系としての寿命は 10^5 yr 程度である。HMXB は星が誕生する銀河面によく分布しており、現在まで天の川銀河では約 130 の HMXB が観測されている。 本研究で対象とした LMC X-3 は伴星の質量が約 3.6M_☉ の HMXB である [?]。

1.1.2 低質量 X 線連星 (Low Mass X-ray binary:LMXB)

LMXB は~ $1M_{\odot}$ 程度の低質量の恒星を伴星に持つ X 線連星である。大質量 X 線線連星をの降着の違い として、恒星とコンパクト天体がロッシュローブと呼ばれる重力圏を満たしており、ラグランジュ点を通り 恒星のガスがコンパクト天体へと降着していると考えられている。伴星は比較的古く、軽い恒星であるた め、LMXB の系としての寿命は $10^7 - 10^9$ yr 程度である。LMXB は銀河中心や、古い系の多い球状星団中 によく分布している。

1.2 降着円盤放射

X 線連星の降着円盤は伴星からのガスの降着によって形成され、輝いている。そのガスの質量降着率に よってスペクトルは観測的に低エネルギーX線(軟X線)と高エネルギーX線(硬X線)が強度が相対的に 変化する。質量降着率が高い場合、幾何学的に薄く、光学的に厚い降着円盤を形成する。この円盤はガス の粘性加熱によるエネルギーを放射エネルギーへと変換し効率的な黒体放射が可能であり、放射冷却によ リ円盤の温度は数万K程度となる。この円盤を標準降着円盤と呼ぶ。また質量降着率が低い場合、幾何学 的に厚く、光学的に薄い移流優勢流(Advection Dominated Accretion Flow:ADAF)やRIAF(Radiatively Inefficient Accretion Flow)のような降着円盤を形成する。この円盤は光学的に薄く低密度のため、放射の 効率が悪く放射冷却が起きにくい。そのため粘性加熱によるエネルギーが放射へと変換されないため円盤 の温度は数十億K程度の高温になる。[?][?]



図 1.2: 降着円盤の軟 X 線と硬 X 線の強度変化 [?]

1.3 先行研究

ブラックホール X 線連星からの X 線放射のスペクトルは 1970 年代に降着円盤からの熱的放射成分と非 熱的放射成分によって再現されることが報告された [?]。熱的放射成分は降着円盤の幾何学的に薄く、光学的 に厚い領域からの円盤半径に依存した黒体放射の重ね合わせによる多温度黒体放射 (MCD:Multi color disk) モデル、非熱的放射成分は光学的に薄い領域の電子雲(コロナ)により多温度黒体放射が逆コンプトン散乱 された放射、べき型放射モデルで再現される。

多温度黒体放射モデルのパラメータからは降着円盤の最内縁温度と最内縁温度が求められる、詳細は後述。 ブラックホールの近傍では相対論的効果により安定な円軌道がとれなくなる(最終安定円軌道(Innermost Stable Circular Orbit:ISCO))。先行研究による複数のブラックホール連星の観測からX線光度が変化して も降着円盤の最内縁半径はほぼ一定であることが示唆された。[?][?][?] これにより降着円盤は、ブラック ホール近傍の最終安定円軌道に到達していると考えられている。



図 1.3: X 線光度変化と最内縁温度、最内縁半径 [?][?][?]

また先述の多温度黒体放射モデルとべき型放射モデルでよく再現されていたのは X 線帯域の数 keV 以上 で解析した場合であった。しかし近年検出器の性能の向上により 1 keV 以下の低エネルギー X 線まで観測 し、解析することが可能となった。そこで低エネルギー帯域まで含めて従来のモデルで解析した先行研究が ある [?]。そこで従来の単純な多温度黒体放射モデルでは低エネルギー帯域までは再現できず、より幅の広 い放射が要求されていることが報告された。



図 1.4: LMC X-3 のすざく1 観測目の広帯域解析 [?]

1.4 研究目的

ブラックホール連星のX線スペクトルは従来まで1keV以上の帯域で解析され降着円盤による多温度黒 体放射モデルとべき型放射モデルによって再現されることが知られている。しかし検出器の性能の向上に より1keV以下の低エネルギー帯域まで観測可能となっている。本件研究で用いたX線天文衛星「すざく」 とXMM-Newton衛星もそのうちの一つで、前者はXIS検出器とHXD検出器、後者はEPIC pn検出器の データを用いて解析を行った。XIS検出器は0.2-12 keV に感度を持ち低エネルギー帯域まで観測可能なた め熱的放射成分をよく理解することに適している。また HXD検出器は10-600 keV に感度があり非熱的放 射成分も精度よく決定できる。「すざく」衛星の2つの検出器を用いてブラックホール連星のX線スペクト ルを解析することで今まで以上の詳細な理解が期待できる。また XMM-Newton衛星の EPIC pn検出器は 0.15-15 keV に感度を持ち、同様に広帯域で解析が可能となっている。

解析天体としては視野方向の水素柱密度がとても小さく低エネルギー帯域の解析に適しているブラック ホール X 線連星である LMC X-3 とした。

以上より本研究では、ブラックホール X 線連星である LMC X-3 のすざく衛星による 3 観測と XMM-Newton 衛星による 4 観測、計 7 観測のデータを用いてスペクトル解析を行った。先行研究からすざく衛星 による 1 観測のみの解析から 1 keV 以下の低エネルギー帯域まで含めた広帯域解析では熱的放射成分が従 来の多温度黒体放射モデルでは再現できないことが報告されている。[?] そこで同一天体の光度の変化によ る降着円盤成分の変化を理解することを目的とした。

第2章 観測衛星

本研究では解析に X 線天文衛星「すざく」と XMM-Newton 衛星によるアーカイブデータを用いた。それらの概要について以下に述べる。

2.1 X線天文衛星すざく

「すざく」は「はくちょう (1979 年)」、「てんま (1983 年)」、「ぎんが (1987 年)」、「あすか (1993 年)」に 続く日本の 5 番目の X 線天文衛星で 2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた。この衛星の最大の特徴は様々な X 線天体に対して 0.3 keV から 600 keV という広いエネルギー帯域にわたり、より高いエネルギー分解能 かつ高感度での観測ができることである。



図 2.1: X 線天文衛星「すざく」の外観 [?]

2.2 すざくに搭載されている検出器

すざく衛星には 5 つの軟 X 線検出器 (XRT+XIS が 4 台、XRT+XRS が 1 台) と 1 つの硬 X 線検出器が 搭載されている。

2.2.1 XRT (X-ray telescope)

X線は物質中で強く吸収され、屈折率が1よりわずかに小さいという特徴から、光学系は反射鏡を使った全反射しか利用できない。そして屈折率の1からのずれが小さいため全反射は鏡面すれすれの角度の光

にのみ起こる。すざくの X 線望遠鏡は口径 40 cm で焦点距離 4.75 m の XRT-I が 4 台と焦点距離 4.5 m の XRT-S が 1 台搭載されている。



図 2.2: XRT の外観 [?]

2.2.2 XIS (X-ray Imaging Spectrometer)

XIS 検出器は X 線 CCD カメラで CCD に X 線が入射するとある確率で光電吸収が起こり、それにより 生じた光電子は Si 原子と衝突し電子・正孔対を作る。ここで生じた電子・正孔対の数が入射 X 線のエネ ルギーに比例することから、この電子の集まりを検出することによって入射 X 線エネルギーを知ることが できる。すざくの XIS は 4 台の X 線 CCD によるカメラが搭載されており、天体の撮像と X 線スペクト ルの取得が可能である。4 台それぞれのセンサーを X0、X1、X2、X3 と呼び X0、X2、X3 は表面照射型 (Frontside Illuminated:FI)、X1 は裏面照射型 (Backside Illuminated:BI) である。表面照射型 CCD は X 線 を電極側から入射するため、低エネルギーの X 線は電極や絶縁層で吸収されてしまう。一方で裏面照射型 CCD は X 線を電極の反対側から入射するため低エネルギーの X 線に高い検出効率を得ることが可能であ る。また X 線の入射により生成された電子雲が 1 つのピクセルのみで検出される場合と 2 つ以上のピクセ ルにまたがり検出する場合がある。XIS は中心の最も波高が高い 3 × 3 ピクセルでのスプリットの仕方を グレードと呼び、この内の 7 通りのグレードを X 線イベントとみなして解析に利用している。



図 2.3: XIS の外観 [?]



図 2.4: 表面照射型 (左) と裏面照射型 (右)の模式図 [?]

視野	17'.8 × 17'.8
エネルギー帯域	$0.2{-}12~{ m keV}$
有効画素数	1024×1024
1 画素のサイズ	$24\mu{ m m}$
エネルギー分解能	$\sim 130~{\rm eV}@6~{\rm keV}$
有効面積	340 cm ² (FI), $390 \rm cm^2(BI)@1.5 \rm keV$
	$350 \ {\rm cm}^2({\rm FI})$, $100 \ {\rm cm}^2({\rm BI}) @8 \ {\rm keV}$
時間分解能	8 s (Normal mode), $7.8~{\rm ms}({\rm P-Sum}\ {\rm mode})$

表 2.1: すざくに搭載されている XIS 検出器の性能 [?]

2.2.3 HXD (Hard X-ray Detector)

すざくは高いエネルギーの X 線に感度を持つ硬 X 線検出器 (HXD:Hard X-ray Detector) を搭載してい る。HXD は 10~600 keV の広いエネルギー範囲の硬 X 線をこれまでにない高い感度で観測することがで きる。HXD の構造は基本となる井戸型のフォスイッチカウンター 16本 (Well ユニット)を BGO 結晶のア ンチカウンター 20本 (Anti ユニット)が取り囲んでいる。Well ユニットの主検出部は PIN 型半導体検出器 と GSO シンチレータを上下に重ねた形で構成されている。PIN 型半導体検出器は 10~70 keV 程度の帯域 で感度を持ち、GSO は 50~600 keV の X 線を検出することが可能であり、10-600 keV という広帯域で観 測が可能となる。



図 2.5: HXD の外観 [?]



図 2.6: HXD の構造 [?]

視野	34' × 34'(≤100 keV), 4°.5 × 4°.5(≥100 keV)
エネルギー帯域	10-600 keV (PIN 10-70 keV, GSO 40-600 keV)
エネルギー分解能	PIN ~4 keV(FWMH), GSO 7.6/ $\sqrt{E_{\text{MeV}}}$ %(FWHM)
有効面積	$\sim 160 \text{ cm}^2 @20 \text{ keV}$, $\sim 260 \text{ cm}^2 @100 \text{ keV}$
時間分解能	$61 \ \mu s$

表 2.2: すざくに搭載されている HXD 検出器の性能 [?]

2.3 X線天文衛星 XMM-Newton

XMM-Neton (X-ray Multi-Mirror Mission-Newton) 衛星は欧州宇宙機関 (ESA) によって 1999 年 12 月 に打ち上げられた X 線天文衛星である。全長約 10 mで重さは約 4 トンと X 線天文衛星の中で最大規模の 衛星である。XMM-Newton は遠地点高度 114,000 km、近地点高度 6,000 km、軌道傾斜角 40 度、軌道周 期 48 時間の楕円軌道をなしている。



図 2.7: XMM-Newton 衛星の外観 [?]

2.4 XMM-Newton に搭載されている検出器

XMM-Newton 衛星には EPIC (European Photo Imaging Camera)、RGS (Reflection Grating Spectrometer)、OM (Optical Monitor) の3種類の検出器が搭載されている。EPIC にはすざくと同様に表面照 射型の MOS と裏面照射型の PN と呼ばれる検出器が搭載されている。RGS は、透過型分散器で反射した X 線の分散角を測定することで2 keV 以下の X 線分光を行う。OM は X 線で観測する天体を同時に可視・ 紫外の帯域で観測するために搭載されている口径 30 cm の可視・紫外望遠鏡である。各検出器の性能につ いて以下に示す。

検出器	EPIC(MOS)	EPIC(PIN)	RGS	OM
エネルギー帯域	$0.1512~\mathrm{keV}$	$0.1512~\mathrm{keV}$	$0.352.5~\mathrm{keV}$	180–600 nm
視野	30'	30'	~ 5 '	17'
ピクセルサイズ	40 $\mu m(1.1")$	150 $\mu\mathrm{m}(4.1")$	81 $\mu\mathrm{m}(9\ {\times}10^{-3}{\mathring{A}})$	0.47"
時間分解能	$1.75 \mathrm{\ ms}$	$0.03 \mathrm{\ ms}$	$0.6 \mathrm{\ s}$	$0.5 \ \mathrm{s}$
エネルギー分解能	$\sim 70~{\rm eV}$	$\sim 80~{\rm eV}$	$0.04/0.025 \ {\rm \AA}$	180

表 2.3: XMM-Newton に搭載されている検出器の性能 [?]

今回は EPIC の PN 検出器のデータを用いたので特に EPIC について説明する。

2.4.1 EPIC

EPIC には MOS 検出器と PN 検出器の 2 種類からなり、0.2 keV から 12 keV の X 線に感度を持つ。 XMM-Newton 衛星は X 線望遠鏡を 3 台搭載しており、それぞれの焦点部に EPIC の検出器 3 つが配置さ れている。2 台の望遠鏡と MOS 検出器の間には透過型分散器 (RGA:Reflection Grating Arrays) が配置さ れ、これにより入射 X 線が EPIC の検出器、RGS 検出器で検出されるものと RGA に吸収されてしまうも のに別れる。MOS 検出器は 7 枚の CCD から、PN 検出器は 12 枚の CCD から構成されておりその概略図 と有効面積を以下に示す。本研究では天体の X 線フラックスが高く、CCD を通常の読み出し速度で利用す るとパイルアップ(1回の露光の間に複数イベントが入射してしまう)が生じてしまう。そこで、読み出す CCD の数、さらに CCD 上の読み出す領域を狭く限定することで、CCD の読み出し速度を速くしてパイル アップの影響を低減している。





図 2.8: MOS 検出器 (左) と PN 検出器 (右) の概略図 [?]



図 2.9: 検出器の有効面積 [?]

第3章 データ解析

3.1 解析天体と観測データ

本研究の目的に合う天体として LMC X-3 を用いた。LMC X-3 は大マゼラン雲にあり、銀河系内の他の ブラックホール連星と比較して視線方向の水素吸収柱密度が小さく、X 線の低エネルギー帯域を含めて解析 するのにふさわしい天体である。また先行研究として「すざく」衛星の 2008 年のデータを解析した Kubota et. al.(2010) がある。本研究では先行研究の観測に加え、「すざく」衛星の 2 観測と XMM-Newton 衛星の 4 観測の計 7 観測を解析した。今回は「すざく」衛星の XIS 検出器、PIN 検出器と XMM-Newton 衛星の PN 検出器のアーカイブデータを用いて解析を行った。観測データの詳細については、以下の表にまとめる。

ターゲット	観測衛星	観測開始日	観測時間 (ks)	光度 $(erg/cm^2/s)$	エディントン比(%)
	すざく	2008年12月22日	54.3	1.04	11.4
		2009年12月21日	133.4	2.16	23.7
	XMM-Newton	2013年3月28日	87.1	0.31	3.4
LMC X- 3		2000年11月24日	9.06	4.37	48.0
		2011 年 5 月 27 日	9.51	2.33	25.6
		2011 年 8 月 12 日	10.5	0.81	8.9
		2011 年 11 月 2 日	10.5	1.07	11.7

表 3.1: すざく衛星と XMM-Newton 衛星による観測ログ

3.2 解析ソフトウェア

本研究では DARTS から取得したアーカイブデータの中で、スクリーニングされたデータ (clearned event) を用いた。スクリーニングされたデータは南大西洋地磁気異常帯 (SAA) によって観測していない時間帯や 対象天体が地球に隠され観測できない時間帯などが除去されている。このデータを ds9、xselect や XSPEC などのソフトウェアを用いて source、background 領域の決定や検出器の応答関数 (rmf ファイルや arf ファ イル) の作成を行った。

3.3 解析方法

3.3.1 χ^2 検定

スペクトル解析の際にデータとモデルの一致具合を定量的に評価するため χ^2 検定を用いた。XSPEC で は以下のように各エネルギーごとの χ^2 を導いている。

$$\chi^{2} = \sum_{i=1}^{n} (\frac{i \ all \ o \vec{r} - 9 \ b \ c \ o \ d \ b}{\sigma_{i}})^{2}$$
(3.1)

 σ はi番目のデータ点での標準偏差である。得られた χ^2 の値から自由度を割ることで reduced chi square を求める。 χ^2 検定ではこの値が1に近づくほどモデルがデータをよく再現できていることになる。

3.3.2 使用モデル

本研究で用いたスペクトルモデルについて説明する。

$\operatorname{constant}$

このモデルに物理的意味はなく、検出器によりスペクトル解析に定数倍として現れる差異を補正する定数として導入した。スペクトル上で「すざく」の XIS 検出器と PIN 検出器のデータにギャップが存在することが知られており、XIS 検出器を 1.0 とした場合、PIN 検出器は 1.15 と「すざく」チームによって報告されている。本研究でもこの報告に従い解析を行った。また XMM-Newton の解析では用いていない。

tbfeo

宇宙は様々な星間物質で満たされており、それにより天体由来のX線は観測衛星に届くまでに光電吸収 を受ける。またLMC X-3 は酸素の吸収が弱いことがXMM-Newtonの解析から判明したので、それらを考 慮した吸収モデルとなっている。このモデルは水素柱密度、太陽に対する酸素の存在量、太陽に対する鉄 の存在量、赤方偏移をパラメータに持つ(他の元素は指定がなければ太陽組成を仮定)。本研究では酸素を 0.4、鉄を1.0、赤方偏移を0に固定し、水素柱密度をフリーにして解析を行った。

diskbb

ブラックホールや中性子星などのコンパクト天体の連星は伴星からガスが降着する際に降着円盤を形成 する。そのガスが降着する際に重力ポテンシャルの解放によってX線帯域で明るく輝いている。降着円盤 は中心天体に近いほど角速度が大きくなり、ガスの粘性摩擦により内縁から徐々に温度が下がっている。そ の温度変化を考慮した黒体放射を足し合わせたものがこのモデルであり標準降着円盤モデルと呼ばれる。こ のモデルは降着円盤の最内縁温度と normalization をパラメータに持つ。normalization から降着円盤の最 内縁半径を算出することができる。

Normalization =
$$\left(\frac{\frac{R_{in}}{km}}{\frac{D}{10 \, \text{kpc}}}\right) \cos \theta$$
 (3.2)

 R_{in} は降着円盤の最内縁半径、Dは天体から地球の距離、 θ は降着円盤の傾きを表し、0度は円盤全体が見えている状態 (face-on) で、90度は円版の端が見えている状態 (edge-on) である。本研究ではLMC X-3の距離 Dを先行研究を参考に 52 kpc として算出している [?]。

power-law

このモデルは単純なべき乗のスペクトルモデルであり、以下の式で表される。

$$A(K) = KE^- \tag{3.3}$$

ここで、K は係数で単位エネルギー、面積、時間あたりの光子数を表しており、 は光子指数である。

 simPL

このモデルは降着円盤放射を種光子として、コロナにより逆コンプトン散乱された放射モデルであり、以 下の式で表される。

$$n_{\rm out}(E)dE = (1 - f_{\rm sc})n_{\rm in}(E)dE + f_{\rm s}c[n_{\rm in}(E_0)G(E;E_0)dE_0]dE \tag{3.4}$$

 $\operatorname{diskpbb}$

降着円盤は恒星からのガスの降着時に粘性摩擦によって加熱される。そのため中心ほど摩擦は大きくな り熱く、外側に向けて温度は下がる。標準降着円盤の場合、この半径に依存した温度勾配は $T^{-3/4}$ である。 このべき指数をフリーパラメータ (p) にしたモデルがが diskpbb モデルである。

3.3.3 すざく XIS 検出器の pileup 補正

CCD 検出器の特性として pileup 効果と呼ばれるものがある。第2章で述べたようにすざくに搭載され ている XIS 検出器には CCD が用いられている。CCD に光子が1つ入射すると、空乏層である確率により 光電吸収が起こり、それにより生じた光電子はエネルギーを失うまで Si 原子と衝突を繰り返し、電子・正 孔対を作る。その電子・正孔対の数は光子の持つエネルギーによって変わる。しかし明るい天体を観測す ると、検出される際に、複数の光子を1光子として誤認してしまうことがある。それを pileup 効果と呼ぶ。 その結果、よりエネルギーの低いソフトな複数の光子が、エネルギーの高い光子としてカウントされ、スペ クトルがハードになってしまい、天体由来のフラックスで解析できなくなる。pileup 効果を除去するために 先行研究 [?] を参考に用いて、すざくのデータ3 観測のそれぞれの XIS0,XIS1,XIS3 の pileup 効果について 調べた。下図の結果とスペクトルについては最も光度が大きく明るいすざくの2 観測目のもので、その他 の結果については表に示す。



図 3.1: すざく 2 観測目の XISO の結果



図 3.2: すざく 2 観測目の XISO の領域除去したスペクトルの比較 黒線は元データのスペクトル、

緑線は pileup を 3%以上している領域を除去して解析したスペクトル、 赤線は pileup を 1%以上している領域を除去して解析したスペクトル

観測	検出器	pileup3%領域 (pixel)	pileup1% 領域 (pixel)
	XIS0	4.7	29.4
すざく1 観測目	XIS1	4.5	32.5
	XIS3	4.9	28.7
	XIS0	9.2	46.0
すざく2観測目	XIS1	12.9	54.8
	XIS3	9.1	46.8
	XIS0	0	6.2
すざく3観測目	XIS1	0	2.5
	XIS3	0	4.8

表 3.2: 3 観測の pileup 領域

表のように全検出器で pileup が 3%以上起こっている領域と pileup1%領域を除いてスペクトル解析を行っ た。pileup は集光された天体の中心付近で起こるため、すざくの1 観測目の pileup3%領域は、中心の半径 約5 pixel を除いてスペクトルを作成した。その結果、1 観測目と2 観測目では pileup3%領域を除いても大 きな変化は見られなかったが、pileup1%領域を除くと、元データよりもスペクトルがソフトになることが分 かった。(図??参照)また3 観測目では pileup3%領域と pileup1%領域どちらでも大きな変化は見られなかっ た。これは他の2 観測よりも光度が低く、pileup が起こりづらいことが原因である。以上より、本研究では すざくの1、2 観測目は pileup1%領域を除き、3 観測目は元データのまま解析を行った。XMM-Newotn の PN 検出では CCD の露光時間が短いため、pileup の影響は見られなかった。

3.3.4 すざく XIS 検出器の 1.8 keV 付近に存在する Si 吸収端補正

XIS 検出器の応答関数には Si の K 殻吸収端である 1.83 keV 付近に天体由来とは考えにくいスペクトル 解析の残差が生じるという問題が存在した。この問題は大阪大学の研究チームにより改善することがわかり [?]、そのレスポンスファイルを提供していただき再解析したところ、残差が改善されていることが確認でき た。その結果、先行研究のデータ解析では用いられなかった 1.6-2.0 keV を含めて解析できるようになった。



3.4 スペクトル解析

3.4.1 diskbb+powerlaw モデル

第1章でも述べた通り、多温度黒体放射モデル+ベき型放射モデルによりブラックホール連星のスペクトルはよく再現できる。この方法で解析するために用いたのは以下のモデル式である。

$$constant * tbfeo * (diskbb + powerlaw)$$
 (3.5)

従来の手法に則り、低エネルギー帯域を含めず、3 keV 以上のスペクトルで解析した図と光度変化によ るパラメータの変化図を以下に示す。図の上部はモデルによるスペクトルフィットであり、下部はスペクト ルフィットの結果、データからモデルを引いた残差を表示している。さらにすざくによる3 観測と、XMM-Newton による4 観測の図について説明する。すざくの図では黒線、赤線、緑線の順に XISO、1、3 で、青 線が HXD の PIN 検出器によるデータであり、"+"が連続しているものが天体信号のデータを表示してお り、直線はモデルフィット結果である。また XMM-Newton の図では黒線が PN 検出器によるデータであ り、"+"と直線に関してはすざくと同様である。以降のモデルフィットの結果を表す図も同様である。



図 3.4: 3 keV 以上での diskbb + powerlaw モデルでのスペクトルフィット図 左上から右に向かい、すざく 1、2、3 観測目、XMM-Newton1、2、3、4 観測目の結果となっている。



図 3.5: 3 keV 以上での diskbb + powerlaw モデルでのフィット結果のパラメータ 左図は降着円盤の最内縁温度、右図は最内縁半径の光度に対する変化のプロット。黄色がすざくの 3 観測、 青色が XMM-Newton の 4 観測を示す。

全7観測で残差に大きなズレが見られないことから、多温度黒体放射とべき型放射のモデルでよく再現 されていることがわかる。光度が変化することにより、降着円盤の最内縁温度は変化するが、最内縁半径は 最も光度の低い1観測を除いて 20-25 km 程度とほぼ一定になり、先行研究と同様の結果を得た。また光度 が増加すると最内縁温度も増加する傾向が見られた(距離は 52 kpc を仮定 [?])。

次に本研究の目的である 0.7 keV まで含めた広帯域で解析したスペクトルと光度によるパラメータの変 化を以下に示す。



図 3.6: 0.7 keV まで含めた diskbb + powerlaw モデルでのスペクトルフィット図

複数の観測のスペクトルフィットで低エネルギー帯域で多温度黒体放射よりもべき型放射が卓越してい

る。べき型放射は多温度黒体放射を逆コンプトン散乱した成分なので、これは非物理的な状況となってお り、このモデルでは再現できない。このことから、今回解析した7観測でも、先行研究の通り広帯域では従 来の手法で解析は出来ないことが分かった。

3.4.2 simPL*diskbbモデル

次に非熱的放射成分をより物理的なモデルである simpl モデルで解析した。具体的なモデルについては 以下の式である。

$$conatant * tbfeo * (simPL * diskbb)$$
(3.6)

先述の通り simPL モデルは多温度黒体放射を種光子としており、逆コンプトン散乱を考慮して非熱的放 射を決めるため、低エネルギー帯域で非熱的放射成分が支配的となってしまうことはない。まず、従来の通 り 3 keV 以上でスペクトルフィットした結果と、その結果のパラメータを以下に示す。



図 3.7: 3 keV 以上での simPL*diskbb モデルでのスペクトルフィット図



図 3.8: 3 keV 以上での simPL*diskbb モデルでのフィット結果のパラメータ

3 keV 以上の解析ではよくモデルによってデータが再現されていることが残差から理解できる。しかし 図??から、先行研究での最内縁半径の値や diskbb + powerlaw モデルでの解析による最内縁半径の値より も全観測で増加している結果となった。

次に 0.7 keV まで含めて powerlaw モデルよりも物理的な simPL モデルを用いて解析した。そのスペクトルフィットとパラメータの図を以下に示す。



図 3.9: 0.7 keV まで含めた simPL*diskbb モデルでのスペクトルフィット図



図 3.10: 0.7 keV まで含めた simPL*diskbb モデルでのフィット結果のパラメータ

スペクトルフィットの図の残差から、すざくでは PIN 検出器による 10 keV 以上のデータを再現できて おらず、1 keV 以下ではずれが大きくなる傾向がわかる。また XMM-Newton でも残差が 0 から大きくず れておりフィットが合っていないことがわかる。すざくでは XIS 検出器のデータが PIN 検出器のデータよ り統計が良いため、フィッティングの際、低エネルギー帯域に引っ張られてしまったことが原因であると考 える。またフィットは合っていないが大雑把なトレンドを知るためにパラメータも示している。特に最内縁 半径はこれまでの解析の値よりも大きくなっており、この傾向は、3 keV 以上の際にも見えている。これは 従来のモデルでは、本来は多温度黒体放射によって補って再現されなければならない低エネルギー成分を powerlaw モデルによって再現してしまっていた。そのため simPL モデルのように物理的に再現 (多温度黒 体放射だけで低エネルギー放射を再現) しようとした場合、powerlaw 放射分も多温度黒体放射で再現しよ うとして、最内縁半径が大きくなったと考えられる。

以上より、先行研究の通り広帯域解析では熱的放射成分は多温度黒体放射よりも幅の広い放射が必要で あることが、7 観測でも確認できた。

3.4.3 simPL*diskpbb モデル

従来のモデルや、多温度黒体放射を逆コンプトン散乱したべき型放射モデルを用いても広帯域での降着 円盤の再現は出来なかった。そこで標準降着円盤モデルの半径温度依存指数 p を変化させることで解析ス ペクトルが再現できないかを調べた。p の値は減少するほど低エネルギー帯域の放射が増加する。具体的に 用いたモデルは以下の式である。

$$constant * tbfeo * (simpl * diskkpbb)$$
 (3.7)

まず3 keV 以上での解析結果と各種パラメータを以下に示す。



図 3.11: 3 keV 以上での simPL*diskpbb モデルでのスペクトルフィット図



図 3.12: 3 keV 以上での simPL*diskpbb モデルでのフィット結果のパラメータ

スペクトルフィット図の残差から、3 keV 以上ではよく再現できていることがわかる。またパラメータ は最内縁温度はこれまでの解析と同程度の値、光度に対する変化の傾向を示し、最内縁半径は約 20 km 程 度となり、従来の手法で解析した値や先行研究と同程度の値を示した。降着円盤温度の半径依存性を示す p は全 7 観測とも標準降着円盤の 0.75 よりも下回る結果となった。また光度の減少により p の値も小さく なっていく傾向を示唆する結果となった。

次に 0.7 keV まで含めたスペクトルフィット結果とパラメータを以下に示す。



図 3.13: 0.7 keV 以上での simPL*diskpbb モデルでのスペクトルフィット図



図 3.14: 0.7 keV 以上での simPL*diskpbb モデルでのフィット結果のパラメータ

スペクトルフィットの図から、明るい時期であるすざくの2観測目や XMM-Newton の1、2観測目は残差のうねりが見られるが、simPL*diskbb モデルでのフィットほど大きくはない。フィット結果のパラメータからは、広帯域での解析でも最内縁半径は 20 km 前後と先行研究や従来の手法で解析した距離と大きく 変わらなかった。パラメータ p は 3 keV での解析と同様に全観測で標準降着円盤の 0.75 を下回る結果となった。

次に 0.7 keV まで含めた simPL*diskpbb モデルでの解析で、残差のうねりが見られたすざくの 2 観測 目、XMM-Newton の 1、2 観測目を 3 keV を境に分けて解析したスペクトルフィットの結果を以下に示す。



図 3.15: simPL*diskpbb モデルで 3 keV を境に分けたスペクトルフィット図 すざく 2 観測目 (左上) と XMM-Newton の 1(右上)、2 観測目 (左下)

図??との比較から、残差の変化はわかりづらいが、reduced chi square の値はすざくから順に、 $1.37 \rightarrow 1.30, 1.89 \rightarrow 1.67, 1.32 \rightarrow 1.25$ へと改善された。その結果、3 keV 以上と3 keV 以下での p の値は、すざ くから順に $0.60 \rightarrow 0.71, 0.67 \rightarrow 0.68, 0.63 \rightarrow 0.64$ へと変化していた。この結果から、降着円盤の熱的放 射成分は多温度黒体放射のような単純な温度勾配を持つモデルでなく、降着円盤の外側に向け温度勾配が変 化していると考えられる。

第4章 考察

4.1 スペクトル解析結果のまとめ

すざく1観測の広帯域解析から多温度黒体放射よりも幅の広い放射が報告された(第1章参照)。本研究 では、先行研究を踏まえてLMC X-3の7観測を解析し、1keV以下まで含めた解析では、全ての観測で多 温度黒体放射では再現できないことを確認した。また降着円盤温度の半径依存指数pのパラメータをフリー にしたモデルでの解析から、標準降着円盤でのpの値、0.75を下回る結果を得た。このパラメータをフリー にしたモデルでの解析から、標準降着円盤の温度が外側に向け下がりにくいことを示しており、先行研究 での多温度黒体放射モデルよりも幅広い放射という点でそれを再現できていると言える。また光度が減少 するにつれ、pの値も減少する結果となり光度と降着円盤温度の半径依存性に相関があることがわかった。 また3keVを境に解析した結果から、降着円盤の内側と外側でpの値が異なり、温度勾配が変化している ことが分かった。

4.2 従来の解析結果との比較

これまでの先行研究から、LMC X-3 は観測的に標準降着円盤であることが知られており、最内縁半径は ISCO に到達していると考えられている。つまり、2 つのパラメータを持つ多温度黒体放射モデルの内、最 内縁半径は変化せず、降着円盤は最内縁温度のみに依存してスペクトルが変化する。したがって、スペクト ルの形状は光度が変化しても相似形に変化するはずである。しかし本研究では光度変化によって、温度の半 径依存性 p が変化することからスペクトルの形状は変化する結果となった。実際に円盤放射のみのスペク トルを光度の異なる観測日のデータと比較したところ、相似変化しておらず、スペクトル上で差が生じて いることが分かった。これは先行研究では検出器が1 keV より低エネルギー側に感度が (あまり) なく、数 keV より高エネルギー帯域で解析結果が決められていたためだと考えられる。実際に今回の解析でも3 keV 以上のみの帯域では、従来と同程度の最内縁半径として求まっている。



図 4.1: すざく1 観測目 (黒) と2 観測目 (赤) のスペクトル形状の比較図

降着円盤の内側の放射と外側の放射でそれぞれ合わせた図が図??である。

4.3 降着円盤温度の半径依存性 p の変化によって得られる物理的描像

降着円盤温度の半径依存指数 p は、降着円盤の温度 vs 半径のグラフでは以下の図??のように傾きとして 表される。



図 4.2: 降着円盤の温度 vs 降着円盤の半径

黒線は、標準降着円盤の p の値 0.75 での直線を表しており、赤線は今回の解析結果から 0.75 よりも小 さい値の直線である。図??から降着円盤の内側が標準降着円盤で外側の放射が増加する場合 (1) と降着円 盤の外側が標準降着円盤で内側の放射が標準降着円盤よりも減少する場合 (2) を考えることができる。(1) の場合、図??での右図に相当し、円盤放射の内側 (温度の高い側) でスペクトル形状を合わせた場合、円盤 放射の外側 (温度の低い側) でスペクトル形状のズレが見える。反対に (2) の場合、図??での左図に相当し、 円盤放射の外側 (温度の低い側) でスペクトル形状を合わせた場合、円盤放射の内側 (温度の高い側) でスペ クトル形状のズレが見える。しかし、円盤外側の放射が増加する機構は考えにくく、円盤内側の放射が減少 する機構が尤もらしいと考える。

関連図書

- [1] Jerome et al. 2014
- [2] http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/JPSCR/2012F/X50/Inoue.pdf
- [3] http://astro-dic.jp/radiatively-inefficient-accretion-flow-2/
- [4] http://heapa.astro.isas.jaxa.jp/activity/2011/heapaws11/presen/3-2yamada.pdf
- [5] Ogawa et al.1992
- [6] Takizawa et al.1991
- [7] Ebisawa et al. 1991
- [8] Kubota et al. 2010
- [9] http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2011/kawai/02.shtml
- [10] Makishima et al. 1986
- [11] X-ray binaries (Cambridge Astrophysics))
- [12] 「すざく」ファーストステップガイド 第 4.0.3 版 (Process Version 2.1-2.3)
- [13] http://www.ray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/OskXrayTlabHP/XIS.html
- [14]Jansen et al. 2001, AA, 465, L1
- [15] XMM-Newton Users Handbook Issue 2.17, 15.07.2019
- $\left[16 \right]$ di Benedetto 1997
- [17] Yamada et al. 2012
- [18] 岡崎貴樹 (大阪大学、2018)
 http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/OskXrayTlabHP/home/papers/mthesis/FY2018/okazaki₂0190204.pdf