

# 国際宇宙ステーション搭載NICERによる Holmberg IX 銀河中の超光度 X 線天体の研究

X-ray study of Ultra Luminous compact X-Ray source in Holmberg IX with NICER

X 線天文学研究室 BP17037 木村公紀

指導教員：久保田あや教授

## 1 研究目的と背景

ブラックホール (以後 BH) は  $10M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  は太陽質量) 程度の恒星質量 BH と  $10^6M_{\odot}$  以上の超巨大質量 BH の 2 種類が知られているが、両者の間をつなぐ中質量 BH が確認されず、天文学における大きな謎とされてきた。しかし近年、両者の中間の質量を持ち X 線光度が非常に高い天体が発見され、超光度 X 線天体 (ULX: Ultra Luminous compact X-Ray source) と呼ばれるようになった [1]。BH に降着するガスに働く重力と、BH から放射される光子の輻射圧が釣り合う光度をエディントン限界光度  $L_{Edd}$  といい、これは天体が輝ける限界の光度である。ULX は恒星質量ブラックホールの  $L_{Edd}$  を超えて輝く。ULX は中間質量 BH の候補として注目されているが、他にも恒星質量 BH あるいは中性子星である可能性が示唆されており [2]、その正体は明らかでない。ULX 天体を解析し、中間質量 BH の存在を確認することができれば、これまで明かされてこなかった恒星質量 BH と超巨大質量 BH の関係性解明に大きく役立つ。本研究では、Holmberg IX 銀河に存在する ULX 天体 X-1 を ISS の X 線観測装置 NICER による観測データを解析し、その放射機構を決定し、天体の正体を突き止めることを目的とする。

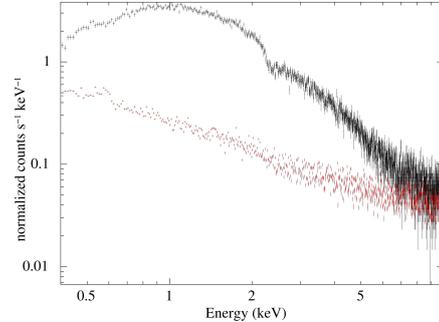


図 1: Holmberg IX X-1 のスペクトル

ネルをエネルギーに変換することができる。今回の研究では NASA が提供しているサイト<sup>3</sup>から ARF、RMF をダウンロードしデータに適用する。

## 2 NICER

NICER (The Neutron Star Interior Composition Explore Mission) とは 2017 年 6 月に国際宇宙ステーションに設置された NASA の X 線天体観測装置である [4]。56 個の X 線集光鏡とシリコンドリフト検出器により、0.6~12 keV の X 線帯域を広い有効面積で観測する。特に時間分解能は 100 ナノ秒を達成しており、短時間変動を特徴とする ULX の時間変動解析に適している。

## 3 スペクトル解析

### 3.1 スペクトル抽出

Holmberg IX X-1 は NICER によって 2018~2019 年に 13 回観測された。今回は 2019 年 4 月 15 日に 18932 秒間観測されたデータの解析に着手した。データからスペクトルを抽出するため NASA で公開されている heasoft<sup>1</sup> という X 線データ解析ソフトを用いて、作成したソースのスペクトルを図 1 に黒で示し、NICER Background Estimator<sup>2</sup> を用いて作成した BGD スペクトルを図 1 に赤で示す。

### 3.2 応答関数の作成

X 線源から実際に放射されているはずのスペクトルを再現するためには、観測した望遠鏡や検出器によるスペクトルへの影響を応答関数を用いて考慮する必要がある。応答関数とは、ARF と RMF のことである。ARF とは、検出器の検出効率と望遠鏡の有効面積エネルギー依存性を表しているファイルである。RMF は 1 つのエネルギー光子に対するパルスハイトの確率分布であり、検出器のチャン

## 4 モデルフィット

作成したスペクトルに X 線の放射モデルを当てはめることで、実際にソースから放射されているであろうスペクトルを再現することをモデルフィットという。

### 4.1 diskbb による評価

銀河系内の明るい恒星質量 BH、ULX は diskbb [5] モデルで再現可能であることが分かっている。diskbb は、光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤が黒体放射する時のスペクトルを表す標準降着円盤 [6] のモデルであり、パラメータは、降着円盤の最も内側の温度  $T_{in}$  と、降着円盤の最も内側の半径である normalization (norm) である。また天体から放射された X 線星間ガスによる吸収を受けるため、水素柱密度  $N_h$  をパラメータにもつ tbabs を diskbb にかけてモデルでフィッティングを行った。 $T_{in}$  は 1.63keV となり、先行研究 [3] と同様の値だったが、 $\chi^2_{\nu^2}(dof)=1.40(588)$  でデータを再現しなかった。

### 4.2 nthcomp による評価

diskbb モデルが棄却されたので、nthcomp [7] モデルに tbabs をかけたモデルでフィッティングを行った。nthcomp は逆コンプトン錯乱による黒体放射モデルであり、恒星質量 BH の Very High State (以降 VHS) を再現するモデルとして知られる。逆コンプトン錯乱は低エネルギーの光子が高温のプラズマなどの高エネルギー電子に衝突することによって加速されエネルギーを得る現象である。パラメータは電子温度  $kT_e$ 、入射光子の黒体温度 ( $kT_{bb}$ )、power-law の光子指数  $\Gamma$ 、及び normalization である。表 1 より、 $\chi^2_{\nu^2}(dof)=1.06(588)$  でモデルはデータを再現した。また、0.4-10.0 keV の X 線強度は  $1.39 \times 10^{18} W/cm^2$ 、吸収を補

<sup>1</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/lheasoft/>

<sup>2</sup>[https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/tools/nicer\\_bkg\\_est\\_tools.html](https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/tools/nicer_bkg_est_tools.html)

<sup>3</sup>[https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/proposals/nicer\\_tools.html](https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/proposals/nicer_tools.html)

正した X 線強度は  $1.41 \times 10^{-18} \text{W/cm}^2$  である。これより等方放射を仮定した距離  $1.14 \times 10^{25} \text{cm}$  における X 線光度  $L_X = 2.29 \times 10^{33} \text{W}$  と推定できた。これは質量  $10M_\odot$  の BH のエディントン限界光度を超えており、この天体が ULX であることがわかる。

### 4.3 diskpbb による評価

恒星質量 BH の高光度状態では VHS の他に、slim disk という状態になることが理論的にも観測的にも示唆されている [8][9]。slim disk は diskbb と同様に多温度の黒体放射で表されるが、円盤の局所温度の分布が標準降着円盤では  $T(r) \propto r^{-3/4}$  であったのに対し、slim disk では温度勾配が  $3/4$  より小さく（平坦に）なると予測されている。diskpbb モデル [8] は温度勾配を新たなパラメータ  $p$  として  $T(r) \propto r^{-p}$  の黒体放射の重ね合わせでスペクトルを表現するモデルである。diskpbb に tbabs をかけたモデルでフィットした結果を図 3 と表 2 に示す。  $\chi_\nu^2(dof)=1.12$  であり、モデルのあい具合は nthcomp の方が良いものの、このモデルもデータを再現したと言える。得られた  $p$  は  $p = 0.62$  であり、 $3/4$  より小さいことから slimdisk の様になっている可能性は高い。

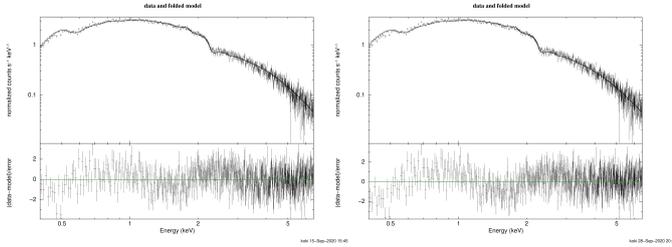


図 2: nthcomp モデルフィット 図 3: diskpbb モデルフィット

表 1: tbabs×nthcomp モデルの各種パラメータ

Model	Paramater	Unit	2019/4/15
1	nH	$10^{22}$	0.181 $\begin{smallmatrix} +0.003 \\ -0.003 \end{smallmatrix}$
2	gamma		1.577 $\begin{smallmatrix} +0.06 \\ -0.06 \end{smallmatrix}$
3	kt_e	kev	1.624 $\begin{smallmatrix} +0.003 \\ -0.003 \end{smallmatrix}$
3	norm		0.003 $\begin{smallmatrix} +0.007 \\ -0.007 \end{smallmatrix}$
	Absorbed flux	$10^{-18} \text{W/cm}^2$	1.39
	Correct flux	$10^{-18} \text{W/cm}^2$	1.41
	$\chi_\nu^2(dof)$		1.06

表 2: tbabs×diskpbb モデルの各種パラメータ

Model	Paramater	Unit	2019/4/15
1	nH	$10^{22}$	0.160 $\begin{smallmatrix} +0.009 \\ -0.004 \end{smallmatrix}$
2	Tin	kev	2.387 $\begin{smallmatrix} +0.189 \\ -0.121 \end{smallmatrix}$
3	p		0.622 $\begin{smallmatrix} +0.009 \\ -0.011 \end{smallmatrix}$
4	norm		0.178 $\begin{smallmatrix} +0.005 \\ -0.005 \end{smallmatrix}$
	Absorbed flux	$10^{-18} \text{W/cm}^2$	1.39
	Correct flux	$10^{-18} \text{W/cm}^2$	1.41
	$\chi_\nu^2(dof)$		1.12

### 4.4 時間変動解析

スペクトル解析からはこの天体は明るい BH の状態である VHS もしくは slim disk のような状態になっていることが示唆された。VHS では恒星質量 BH は QPO という数 Hz の準周期的な時間変動を示すことが観測されている。これを調べるためライトカーブのフーリエ解析を行った。図 4 にパワースペクトルを示す。全体として変動はほとんどなく、0.002-0.2Hz の範囲では特徴的な QPO は検出されなかった。したがって、時間変動からは VHS は強くは示唆されない。

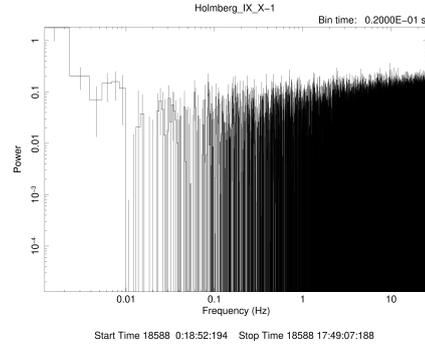


図 4: Holmberg IX X-1 のパワースペクトル

## 5 結果と考察

円盤の内縁半径  $R_{in}$  が相対性理論から導かれる BH 周りの  $R_{ms}$  (最終安定軌道) である  $3R_s$  ( $R_s=2GM/c^2$ :シュヴァルツシルト半径) であるとすると、この天体について BH 質量は  $1.08 \times 10^{-2} M_\odot$  と推定できる。また、BH が円盤の回転と同じ向きで回転していたとすると、その回転速度が最も早い BH の場合、一般相対性理論より  $R_{ms}$  は  $0.5R_s$  まで入り込む。このとき BH 質量は  $6.49 \times 10^{-2} M_\odot$  と推定される。エディントン限界光度による質量上限は  $1.51 \times 10^{15} M_\odot$  であり、 $R_{ms}$  による質量はこれを超えていない。

## 6 まとめ

Holmberg IX X-1 のスペクトル解析では diskpbb 及び nthcomp モデルで再現することができた。この結果から VHS か slimdisk の状態にあることが予想されるが、時間変動解析で特徴的な QPO が検出されなかったため、slimdisk である可能性が示唆される。

## 参考文献

- [1] [https://www.jaxa.jp/article/interview/no7/p6\\_j.html](https://www.jaxa.jp/article/interview/no7/p6_j.html)
- [2] [https://www.astroarts.co.jp/article/h1/a/34\\_m82x2](https://www.astroarts.co.jp/article/h1/a/34_m82x2)
- [3] Makishima, et al. 2000,ApJ,535,632
- [4] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer>
- [5] mitsuda et al. 1984
- [6] Shakura Sunyaev 1973
- [7] Zycki et al.
- [8] Kubota Makishima 2004
- [9] Abramowicz1988