国際宇宙ステーション搭載NICERによる 連星系ブラックホールCygnus X-1の研究

study of Black Hole Binary Cygnus X-1 with NICER

X 線天文学研究室　BP17029 金子 拓輝　　指導教員：久保田 あや 教授

1　背景と目的

恒星の内部では、核融合反応によって絶えずエネルギーを生成している。そして大質量の恒星は、核融合反応の最終段階で自分自身の重力でつぶれてしまい、超新星爆発を起こす。その結果、特に太陽質量の 30 倍以上の恒星は中心に向かって収縮し、物質や光さえも脱出することができない天体となる。これがブラックホールである [1]。ブラックホールは単独では光を放たないため観測できないが、通常の恒星と近接連星系を形成していると、恒星のガスがブラックホールに吸い込まれることで観測できる。また、恒星からブラックホールに流れ込むガスは、降着円盤と呼ばれる平らな円盤状のガス流をつくり、回転しながらブラックホールに落ちていく。降着円盤は、ブラックホールに近い内側ほど摩擦で温度が高くなり、X 線が放出される。本研究は、国際宇宙ステーションに搭載された中性子星観測装置 NICER で観測された CygX-1 のデータを用いて、この天体の降着円盤の構造を探る。

2　連星系ブラックホール Cygnus X-1

Cygnus X-1 は、地球から 7.5×10^{16} km の距離に存在する天体であり、青色超巨星（HDE 226868）と X 線星からなる連星系である [2]。この X 線星の質量は $21.2 \pm 2.2 M_{\odot}$（$M_{\odot}$ は太陽質量）と推定されている [3]。これは、中性子星の質量の理論的最大値である $3.6 M_{\odot}$[4, 5] をはるかに超えおり、現在知られている銀河系内のブラックホール連星の中で、最も重いブラックホールである。また Cyg X-1 は、high_soft 状態と low_hard 状態の 2 つの状態をもっていることと、X 線強度が非常に速いかつ不規則な時間変動をしていることがわかっており [7]、このような特徴から、Cygnus X-1 はブラックホール候補星とされている。

3　中性子星観測装置 NICER

NICER[8] は、2017 年 6 月に国際宇宙ステーション（ISS）に搭載された中性子星観測装置である。NICER には、56 個の X 線集光系（XRC）とシリコンドリフト検出器（SDD）が取り付けられいる。各 XRC は、約 30arcmin の天空から X 線を集め、小型の SDD に集光し、SDD はそのエネルギーを 100 ナノ秒という精度で検出し記録する。これにより、$0.2 - 12$keV の X 線帯域において、中性子星やブラックホールなどの高密度天体からの X 線放射を検出できる。これは早い時間変動を特徴とするブラックホール連星の研究に最適の衛星といえる。

4　NICER による Cyg X-1 の観測

NICER による Cyg X-1 の観測は、2017 年 6 月 30 日（MJD57934）から 2020 年 11 月 23 日（MJD59176）にかけて 37 回行われた。国際宇宙ステーションに搭載されている全天監視装置 (MAXI) で得られた長期時間変動を図 1 に示す。縦軸に X 線強度（フラックス）、横軸に修正ユリウス歴 MJD をとり、X 線強度を時間の関数としてプロットしたものである。今回はデータを基に、ライトカーブ（光度曲線）とハードネスレシオ（硬度比）を求めた。グラフの上は 2-20 keV のフラックス、下は 4-10 keV のフラックスを 2-4 keV のフラックスで割ったもの（ハードネスレシオ HR）を示している。この図から、明るい時期にはハードネスレシオが小さく、暗い期間ではハードネスレシオが大きいことがわかる。観測データより、X 線強度が大きく変動している 2 つの観測日のデータに対して、解析を行った。

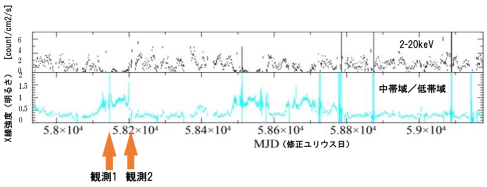

Figure 1: ライトカーブとハードネスレシオ

5　スペクトル解析

NASA の解析パッケージ heasoft とデータベース caldb、そして解析データをダウンロードし、スペクトルやライトカーブを作成するためのツールで XSELECT と、X 線スペクトルのフィットのためのパッケージ XSPEC を用いて、スペクトルの解析を行った。本研究では heasoft はバージョン 6.29 を使用する。始めにバックグラウンド処理として、nicerl2 でデータのスクリーニング処理、nibackgen3C50 でバックグラウンドとソースの作成を行った。

5.1　観測 1（2018/02/20）のモデルフィット

まずは、全体の傾向をみるために、べき乗則の関数であるエネルギーの光子数 f(E) が $KE^{-\Gamma}$ で記述される power-law モデル[1]を仮定して、星間吸収を記述する tbabs[2]というモデルをかけてフィッティングを行った。その結果、${X_{\nu}}^2(dof) = 0.939(527)$ となり、データは再現したが、より物理的な描像で評価するため、次に power-law モデルを逆コンプトン散乱モデルである nthcomp[3]に置き換えて評価した。その結果を表 1 に示す。nthcomp は power-law モデルより、熱的コンプトン化の連続的な形を詳しく求めることができる。パラメータは、光子指数 τ、電子温度 kT_e、黒体温度 kT_{bb}、int_type、redshift、そして normalization である。表 1 より、$\Gamma = 1.727$ であり、ブラックホールの典型的な値であったため、観測 1 は low state と考えらてる。フラックスは 1.63×10^{-15} W/cm^2 が得られ、距離 7.5×10^{16} km を仮定して、X 線光度は 1.15×10^{30} W と計算できた。これは質量

[1] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node212.html
[2] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node264.html
[3] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node204.html

降着によって輝く天体の光度の上限値であるエディントン限界光度 L_{edd}($22M_\odot$ のブラックホールでは 2.76×10^{32} W) の 0.42%である。

Table 1: 観測 1 tbabs*nthcomp モデルのパラメータ

model	Component	Parameter	Unit	ベストフィット値
1	TBabs	nH	$10^{22}/cm^2$	$0.279^{+0.033}_{-0.050}$
2	nthComp	Gamma		$1.727^{+0.0097}_{-0.0122}$
3	nthComp	kT_e	keV	$5.21^{+2.90}_{-0.90}$
4	nthComp	kT_bb	keV	$0.171^{+0.034}_{-0.034}$
5	nthComp	inp_type	0/1	0.0
6	nthComp	Redshift		0.0
7	nthcomp	norm		$1.522^{+0.091}_{-0.125}$
		flux	W/cm^2	8.28×10^{-16}
		flux(nH=0)	W/cm^2	8.76×10^{-16}
		flux(nH=0, 0.1 ~ 100.0 keV)	W/cm^2	1.63×10^{-15}
		${X_\nu}^2(dof)$		0.904(525)

5.2 観測 2（2018/03/27）のモデルフィット

まず観測 1 と同様に、power-law を仮定して星間吸収をかけたモデルと、nthcomp を仮定して星間吸収をかけたモデルでフィッティングを行ったが、それぞれ ${X_\nu}^2(dof) = 173.92(853), 174.92(852)$ となり、全くデータを再現できなかった。次に nthcomp に、新たに diskbb[4] を追加したモデルと、smedge と gaussian を追加したモデルでフィッティングを行った。diskbb は光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤からの放射を記述し、ブラックホールに近いほど円盤が高温になるため、スペクトルは多温度黒体の黒体放射の足し合わせとなる。パラメータは円盤内縁の温度 kT_in と normalization である。normalization は天体までの距離 d、内縁半径 r_in、円盤の傾斜角 θ で決まり、$(r_{in}/d)^2\cos\theta$ と表される。smedge[5]は、放射の円盤による反射成分を模擬するために、鉄元素による吸収端を表したものである。gaussian[6]は、鉄輝線を正規分布で表したものである。結果は、${X_\nu}^2(dof) = 13.89(851), 0.555(845)$ となり、理想の値である 1 に大きく近づいたものの、再現することはできなかった。さらに、diskbb と nthcomp を足したものに星間吸収をかけたモデルと、diskbb と nthcomp と gauss を足したものに星間吸収をかけたモデルでフィッティングを行ったところ、前者のモデルでは、${X_\nu}^2(dof) = 1.43(850)$ となり再現できなかったが、後者のモデル「$tbabs*(diskbb+nthcomp+gauss)$」では、${X_\nu}^2(dof) = 0.58(847)$ となり、最もデータを再現することができた。その結果を表 2 に示す。表 2 より、$\Gamma = 2.256$ であり、観測 2 は high state と考えらてる。フラックスは 7.79×10^{-15} W/cm^2 が得られ、X 線光度は 5.51×10^{30} W と計算できた。これはエディントン限界光度 L_{edd} の 2.00%である。

Table 2: 観測 2 tbabs*(diskbb+nthcomp+gauss) モデルのパラメータ

model	Component	Parameter	Unit	ベストフィット値
1	TBabs	nH	$10^{22}/cm^2$	$0.666^{+0.020}_{-0.020}$
2	diskbb	Tin	keV	$0.3719^{+0.0045}_{-0.0045}$
3	diskbb	norm		$1.245^{+0.097}_{-0.089}\times10^5$
4	nthComp	Gamma		$2.254^{+0.012}_{-0.019}$
5	nthComp	kT_e	keV	10.00
6	nthComp	kT_bb	keV	0.37
7	nthComp	inp_type	0/1	0.0
8	nthComp	Redshift		0.0
9	nthComp	norm		$3.22^{+0.11}_{-0.11}$
10	gaussian	LineE	keV	$6.479^{+0.050}_{-0.053}$
11	gaussian	Sigma	keV	0.79
12	gaussian	norm		$0.0286^{+0.0023}_{-0.0029}$
		flux	W/cm^2	2.68×10^{-15}
		flux(nH=0)	W/cm^2	3.53×10^{-15}
		flux(nH=0, 0.1 ~ 100.0 keV)	W/cm^2	7.79×10^{-15}
		${X_\nu}^2(dof)$		0.58(847)

[4]https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node162.html
[5]https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node259.html
[6]https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node175.html

Table 3: 各観測の L_x と L_{Edd} に対する L_x の比

	Unit	観測 1	観測 2
L_x	W	1.15×10^{30}	5.51×10^{30}
L_x/L_{Edd}		0.0042	0.020

6 時間変動解析

NASA の X 線スペクトルの計算ツールである powspec を用いて、それぞれの観測に対して X 線スペクトル PSD を作成し、図 2、3 に示す。

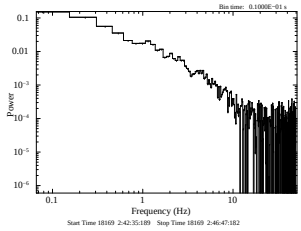

Figure 2: 観測 1 の PSD

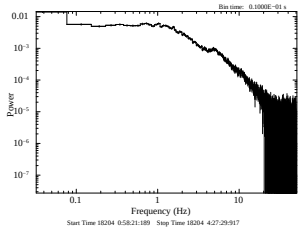

Figure 3: 観測 2 の PSD

7 まとめと考察

CygnusX-1 のスペクトル解析より、観測 1 は「$tbabs*nthcomp$ モデル」、観測 2 は「$tbabs*(diskbb+nthcomp+gauss)$ モデル」が、最もスペクトルを再現することができた。そして、観測 1,2 それぞれの X 線光度 L_x と、エディントン限界光度 L_{Edd} に対する X 線光度 L_x の比を、表 3 に示す。表 3 より、観測 1 より観測 2 のほうが L_x/L_{Edd} の値が大きいことがわかる。そして、観測 2 での降着円盤は図 4 のようになっていると推測される。

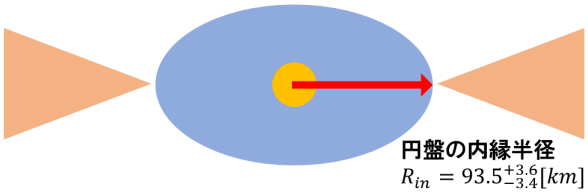

Figure 4: 観測 2 の降着円盤

References

[1] X 線で探る宇宙　小山勝二　初版第二刷　p.103
[2] Liang, E. P., & Nolan, P. L., 1984, Space Science Reviews, Volume 38, Issue 3-4, pp. 353-384
[3] J. C. A. Miller-Jones et al.: Science, 371, 1046 (2022).
[4] M. Nauenberg and G. Chaplined Jr.: Astrophys. J. 179, 277 (1973).
[5] S. L. Shapiro and S. A. Teukolsky: black-holes, White Dwarfs, and Neutron Stars–The physics of compact objects (A Wiley-Interscience Publication, 1983)
[6] Shin ' ya Yamada et al., 2013, the Astronomical Society of Japan, Volume 65, Issue 4
[7] C. Done, M. Gierli ´ nski, and A. Kubota: The Astron. Astrophys. Review 15, 1 (2007).
[8] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/
[9] G. B. Rybicki and A. P. Lightman: Radiative Process in Astrophysics, Harvard-Smithonian Center for Astrophysics (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1979).