

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 BP19104 韓 大成

指導教員：久保田 あや 教授

1 背景と目的

太陽の約 8 倍以上の質量を持つ星は進化の最後に超新星爆発を起こす。その中でも太陽の約 30 倍以上の恒星は超新星爆発した後に中心核が重力収縮を起こし、ブラックホールが形成される [1]。ブラックホールは恒星の最後の姿であり、物質や光さえも抜け出すことができない天体である。ブラックホールによって吸い込まれる物質やガスは渦巻き状になり高速回転をし降着円盤を形成する。降着物質の重力エネルギーは円盤の粘性摩擦によって熱エネルギーに変換され、ガスは高温になり X 線などの電磁波を放出する [2]。この X 線で直接的に観測できないブラックホールを間接的に観測することができる。本研究では、国際宇宙ステーション (ISS) 搭載の NICER 検出器によって観測されたはくちょう座 X-1 (Cygnus X-1、以降 Cyg X-1) のデータを解析する。

2 ブラックホール候補天体 Cyg X-1

Cyg X-1 は 1964 年に Naval Research Laboratory のグループによって発見された最初のブラックホール候補天体である [3]。Cyg X-1 は地球から見てはくちょう座方向に約 8100 光年 (2.5×10^4 kpc、 7.5×10^{16} km) の距離に位置しており、HDE226868 という青色超巨星とブラックホールにより約 5.6 日周期で回りあっている近接連星系である [4]。質量は太陽の約 22 倍にもなると推定されており、銀河系内のブラックホールと恒星の近接連星系の中では最も重いブラックホールである [5]。

3 中性子星観測装置 NICER

NICER は ISS に搭載された中性子星観測装置であり、2017 年 6 月 3 日に SpaceX Falcon9 ロケットに搭載されて打ち上げられた。NICER は、X 線タイミング装置に取り付けられている同じ視野を持つ 56 個の X 線集光鏡 (XRC) とその焦点面モジュール (FPM) を備えた構成である。個々の FPM は非常に信号処理速度が速いシリコンドリフト検出器 (SDD) を備えており個々の X 線光子を検出する。この構成により、0.2~12 keV の X 線に高感度で、エネルギー分解能 2%、時間分解能 100 ns での観測が可能である [6]。

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 日から 2022 年 12 月 3 日まで 112 回行われている。図 1 上段に ISS 搭載全天 X 線監視装置による Cyg X-1 の 2017 年 7 月 3 日から 2022 年 4 月 15 日までの 2~20 keV の長期強度変動を示す。図 1 の横軸は修正ユリウス暦 (Modified Julian Date、以降 MJD) を表している。この図から Cyg X-1 は恒常的に X 線を放射し、2~3 倍強度が変動していることが分かる。今回は中間発表時点で観測が終了しているデータ 44 個について、NASA 解析パッケージ heasoft (本研究では heasoft6.30)、データベース caldb、NASA の解析ツール

(nicerl2、nibackgen3C50、nicerarf、nicerrmf) で解析を始めた。まず nicerl2 でデータの選別、nibackgen3C50 を走らせ、ソースとバックグラウンドのスペクトルファイルの作成、nicerarf と nicerrmf を走らせ有効面積と応答関数のレスポンスファイルの作成を行った。これらのファイルの情報からカウントレート (ライトカーブ) と高エネルギー帯のカウントレートを低エネルギー帯のカウントレートで割った値 (hardnessratio、以降 HR) を求めた結果を図 1 中段と下段に示す。図 1 にソフトなデータ (MJD58091) は赤線、ソフトとハードの間のデータ (MJD57945) は黒線、ハードなデータ (MJD59681) は緑線で示してある。

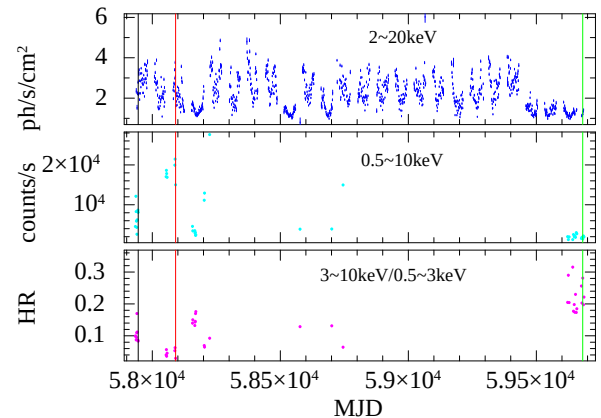


図 1: 横軸 MJD、縦軸ライトカーブ及び HR のグラフ

5 データ解析

5.1 データの特徴

図 1 で縦線で示したデータ MJD58091、MJD57945、MJD59681 の特徴の比較を行った。最初に xselect¹ という解析ツールを用いてライトカーブを作成し、2.5 秒分の強度変動を図 2 に示した。図 2 よりソフトな状態であるほど平均強度が高く (明るい) 変動幅は小さくて、ハードな状態であるほど平均強度は低く (暗い) 変動幅が大きいことが分かる。

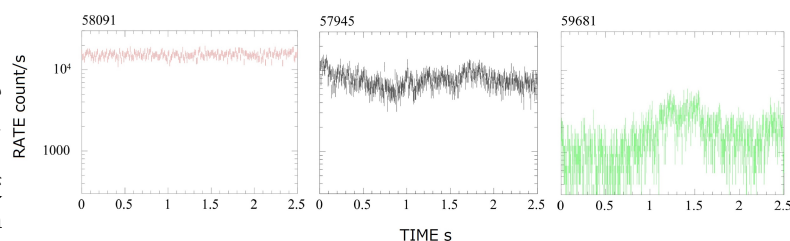


図 2: 短時間ライトカーブ

¹<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/lheasoft/ftools/xselect/xselect.html>

次にこの3つの特徴的な観測日について、X線スペクトルの解析ツール xspec で表示したエネルギースペクトルおよびX線スペクトルの計算ツール powspec²で作成した時間変動のパワースペクトル (Power Spectral Density、以降 PSD) を図3、4に示す。図3から明るい時には確かに低エネルギー側の放射が高く (ソフトな状態)、暗いときには高いエネルギー側が相対的に高くハードになっていることが分かる。また、図4より、暗くハードな状態は、明るくソフトな状態と比較して PSD のパワー (変動の二乗平均平方根; rms) がどの周波数でも高いことが分かる。

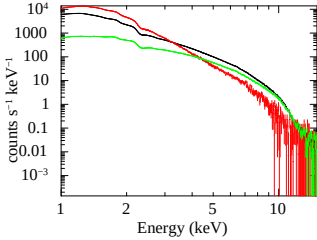


図 3: X線スペクトル

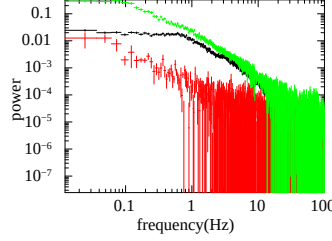


図 4: PSD

5.2 スペクトル解析に使用したモデル

ソフト、ハードといったスペクトルの形状ごとに分類して、スペクトル解析 (モデルフィット) を行った。使用したモデル³は星間物質による光電吸収を記述する Tbbabs モデル [7]、パラメータは水素柱密度 $nH[10^{22}/\text{cm}^2]$ 、鉄元素による吸収端を表した smedge モデル (パラメータはしきい値エネルギー、最大吸収係数、光電断面積の指数)、標準降着円盤 [8] を近似した diskbb モデル [9] (パラメータは $R_{in}^2 \cos\theta D_{10}^{-2}$ (R_{in} は内縁半径、 θ は軌道傾斜角 D_{10} は 10 kpc に対する距離) と R_{in} における温度 $T_{in}[\text{keV}]$)、熱逆コンプトン散乱を表した nthcomp モデル [10] (パラメータは光子指数 Γ 、電子温度 $kT_e[\text{keV}]$ 、黒体温度 $kT_{bb}[\text{keV}]$)、重元素からの輝線成分の放射を正規分布で表した gaussian モデル (パラメータは線エネルギー、線幅)。

5.3 スペクトル解析

5.2 節で紹介したモデルによりフィットし、MJD58091、MJD57945、MJD59681 のベストフィットパラメータ、0.01~300 keV におけるエネルギーフラックス (flux)、カイ2乗値 χ^2_ν 、自由度 dof、真の内縁半径 R_{in} を表1に示す。次に今回解析対象 44 個の観測のベストフィットの nH 、 T_{in} 、 Γ 、 R_{in} と flux のパラメータ変化の図を図5に示す。ここで水色が全体の flux、マゼンタ色が nthcomp の flux、オレンジ色が diskbb の flux となっている。

表 1: ベストフィットパラメータ

Parameter	58091	57945	59681
$nH(10^{22})$	$0.75^{+0.03}_{-0.03}$	$0.52^{+0.02}_{-0.03}$	$0.87^{+0.08}_{-0.09}$
$T_{in}[\text{keV}]$	$0.41^{+0.01}_{-0.02}$	$0.38^{+0.01}_{-0.01}$	$0.14^{+0.02}_{-0.01}$
diskbb_norm(10^4)	$9.73^{+1.54}_{-1.54}$	$3.67^{+0.38}_{-0.56}$	149^{+150}_{-108}
Γ	$3.52^{+0.83}_{-0.16}$	$2.10^{+0.01}_{-0.01}$	$1.56^{+0.03}_{-0.06}$
nthcomp_norm	$6.40^{+1.90}_{-1.03}$	$3.94^{+0.09}_{-0.16}$	$1.15^{+0.41}_{-0.20}$
$E_c[\text{keV}]$	$6.67^{+0.09}_{-0.22}$	$6.36^{+0.05}_{-0.04}$	$6.33^{+0.05}_{-0.06}$
$\sigma[\text{keV}]$	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	$0.10^{+0.00}_{-0.00}$	$0.09^{+0.07}_{-0.05}$
gaussian_norm(10^{-3})	$-0.83^{+0.65}_{-0.02}$	$2.38^{+0.68}_{-0.69}$	$1.28^{+0.64}_{-0.52}$
flux(10^{-15})[W/cm ²]	8.69	5.48	3.91
$\chi^2_\nu(\text{dof})$	263.09(374)	76.36(390)	214.57(390)
$R_{in}[\text{km}]$	$95.73^{+33.77}_{-24.84}$	$65.79^{+17.02}_{-20.70}$	$346.07^{+328.40}_{-278.70}$

²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xronos/examples/powspec.html>

³<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual>

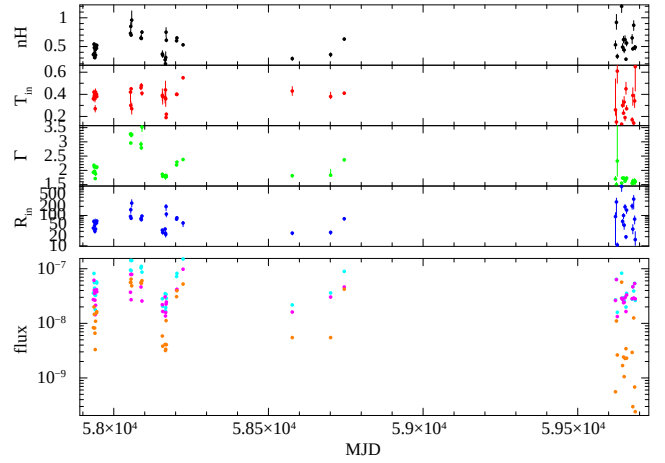


図 5: パラメータ変化の図

6 考察

光度 luminosity(L)- Γ 、 T_{in} - R_{in} の相関を表した図を図6、7に示す。標準降着円盤がブラックホールのごく近くまで形成されたソフト状態では逆コンプトン散乱の Γ は2以上、中心部は高温プラズマが優勢なハード状態では Γ が1.4~1.8程度になることが知られており、データを $\Gamma \geq 2$ (赤) と $\Gamma < 2$ (黒) に分類して、吸収線のあるデータは緑色の丸で囲み、 L に対する Γ (図6)、 T_{in} に対する R_{in} (図7) を示す。図6より、誤差の非常に大きなデータを抜かせば、 $L=3.5 \times 10^{30}$ W 付近でハード状態とソフト状態が置き換わっていることがわかる。これはガス降着によって輝く天体の光度の上限であるエディントン限界光度 ($L_{edd}=1.3 \times 10^{31}$ W $\cdot (M/M_\odot)=2.86 \times 10^{32}$ W ($M=22M_\odot$)) の1.22%であり、これは降着円盤理論の予測とよく一致する。また図7より降着円盤からのソフトな放射が優勢な状態では、 $R_{in} \simeq 75$ km でほぼ一定である。これは $M=22M_\odot$ のブラックホールの重力半径 R_g の2.49倍 ($R_g=GM/c^2$) である。非回転のブラックホールでは $R_{in}=6R_g$ 程度になることが相対性理論から導かれており、回転が進むと内側まで伸びる。したがって Cyg X-1 は高速で回転している可能性が高い。

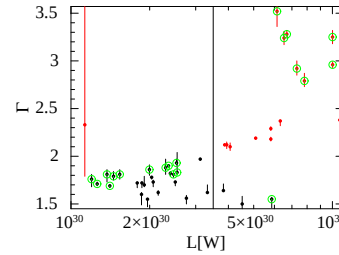


図 6: L - Γ の相関図

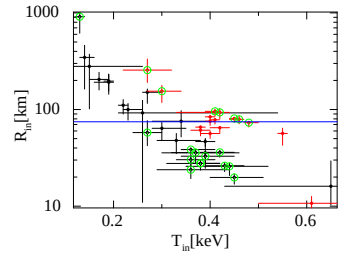


図 7: T_{in} - R_{in} の相関図

本研究により、Cyg X-1 の様々な観測日における降着円盤の状態変化、パラメータの変化と相関関係を見ることができた。

References

- [1] シリーズ現代の天文学7「恒星」野本他、日本評論社
- [2] 久保田 2021, 分光研究, 70, 170
- [3] E. T. Byram, T. A. Chubb, and H. Friedman 1966, Science 152, 66
- [4] Liang, E. P., & Nolan, P. L., 1984, Space Science Reviews, Volume 38, Issue 3-4, pp. 353-384
- [5] J. C. A. Miller-Jones et al., 2022, Science, 371, 1046.
- [6] Gendreau and Arzoumanian 2017, Nature Astronomy 1, 895
- [7] Wilms, Allen & McCray 2000.
- [8] Shakura Sunyaev 1973, A&A, 24, 337
- [9] Mitsuda et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [10] Zdziarski et al. 1996, Soc, 281, 201