国際宇宙ステーション搭載 NICER による低質量 X 線連星系 CygnusX-2の研究

X-ray study of Neutron star X-ray binary Cygnus X-2 with NICER

X線天文学研究室 BP18070 橘 志穏

指導教員:久保田 あや 教授

1 研究の目的

中性子星とは質量が太陽の約1.4 倍、半径約10km、密 度は1cm³ あたり数億トンである[1]。中性子星は単独の 場合、磁場が強ければ電波パルサーとして観測されるが、 歳をとり磁場が弱くなると電波を放射せず、冷たい死ん だ星となる。しかし、中性子星が恒星と近接連星系 (low mass X-ray binary; LMXB とよぶ)を形成すると、恒星 からのガスが回転しながら中性子星に降着し、降着円盤 という回転ガス円盤を作る。円盤内の粘性摩擦により力 学的エネルギーを失いながら熱エネルギーとして円盤内 のガスを加熱し、ガスは X 線を放射して冷却する。

本研究では、国際宇宙ステーション (ISS) に搭載され た NASA の X 線望遠鏡、NICER (Neutron star Interior Composition Explorer[2]) で観測された LMXB である CygX-2 のスペクトルと時間変動解析を行った。これに より明るさによる円盤の状態を評価する。

2 NICER による CygX-2 の観測

2.1 ISS 搭載 NICER

NICER は 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、2017 年 6 月 16 日に国際宇 宙ステーション (ISS) に配備された。X 線を集める 56 個 のX 線集光系とシリコンドリフト検出器を並べた XTI(Xray Timing Instrument) により、1.5keV で 1900cm² と いう広い有効面積で 0.2-1.2keV の X 線を検出すること ができ、非常に短い時間分解能を特徴とする [2]。

2.2 中性子星 LMXB CygX-2

CygX-2 とは中性子星と低質量の恒星から成る LMXB で、はくちょう座に位置し、地球からの距離は約 26000 光年である [4]。CygX-2 の NICER による観測は 2017 年 6 月から 2019 年 9 月にかけて 71 回行われた。図 1 は ISS 搭載の全天観測装置 MAXI。で得られたライトカーブで 横軸ユリウス日 (MJD) で示した日付である。本研究で 解析を行う観測日を示しており、観測 1 は昨年度の総合 研究で池谷が解析したデータと同じものである [3]。また 時期の早い観測から順に 2, 3, 4 とする。

2.3 スペクトル解析の準備

CygX-2 のデータは NASA の HEASARC Browse で ダウンロードし、nicerl2 を用いて観測データを再較正 するパイプライン処理を行った。Nicer 検出器チームか ら提供されている nibackgen3C50 というパッケージを用 いて、ソースとバックグラウンドのスペクトルファイル を作成した。またエネルギーにおける検出器の有効面積 を記述する Ancillary Response File(ARF) と 検出器の チャンネルとエネルギーとの関係を記述する Response Matrix File(RMF) を作成する。また、池谷の解析では



図 1: MJD58000-58200 の MAXI による時間変動及び解 析時期。上から順に 2-20keV(全帯域).2-4keV(低帯域),4-10keV(中帯域),10-20keV(高帯域) である。

heasoft6-28 で解析していたが、今回は heasoft6-29 で解 析し、ノイズの大きな FPM14,34 も除いた。これらを用 いてスペクトルの解析を NASA の XSPEC で行った。

3 スペクトル解析

3.1 使用する放射モデル

本研究では、スペクトルを再現するためにさまざまな 放射モデルおよび、星間吸収モデルを用いている。ここ でモデルの概略を説明する。

tbabs モデルは、天体から放射された X 線が地球に到 達するまでの間に星間ガスによって吸収を受ける。この 吸収を考慮するために用いる。パラメータは、地球に到 達するまでの間に存在する水素の柱密度 *nH*(10²²/cm²) である [5]。

power-law モデルのパラメータは、無次元量の光子指数 Γ 、normalization で 1 keV における X 線強度を表す K である。式は $f(E) = KE^{-\Gamma}$ で表される [5]。

nthComp モデルは、熱的逆コンプトン散乱を表して いる。パラメータは、光子指数 Γ 、高エネルギー成分は 電子温度 kT_e 、低エネルギー成分はコロナに入射する種 光子の黒体温度 kT_{bb} である [6]。

bbodyrad モデルは黒体放射をし、パラメータは円盤 の温度 kT と R_{km}^2/D^2 で表される normarization(K) で ある。 R_{km} は中性子星の半径、D は地球から CygX-2の 距離である [5]。

Disk blackbody(diskbb) モデルは、幾何学的に薄く光 学的に厚い降着円盤がさまざまな温度の黒体放射で輝く スペクトルモデルを表す。パラメータは、円盤の最内縁 の温度 kT_{in} と円盤の内縁半径 $R_{in}\sqrt{\cos i}$ である [7]。iは 円盤の傾斜角である。

gaussian モデルは、原子からの輝線を記述するために 用い、関数は正規分布で表される。パラメータは、輝線 の中心エネルギー E_{line} と輝線の幅 σ 、normalization(K) である [5]。

3.2 各観測のスペクトル解析

観測 1 において全体の傾向を見るために power-law に 星間吸収をかけたモデルでフィットした。その結果全体 としてハードなスペクトル形状であることが分かったが、 自由度に 423 対する χ_v^2 値は 25400 でデータを再現しな かった。

次に明るい中性子星 LMXB の典型的なスペクトルと して中性子星表面の黒体放射 (bbodyrad) と降着円盤か らの diskbb モデルに星間吸収をかけたモデルで評価し た。 χ^2 値は自由度 421 に対し 501 であり,power-law よ り格段に再現したもののまだ再現しなかった。

鉄イオン由来と思われる 6.6 keV に輝線構造がみられ たため、さらに 6.6 keV に gaussian を加えたところ χ^2 値は自由度 418 に対し 495 となり、鉄輝線は有意である が、モデル自体はデータを再現したとは言えない。

そこで中性子星の周りを高温のガスが覆っており、そ の周りに降着円盤が存在する描像に基づいてスペクトル を評価した。その結果を表1と図2に示す。

コンプトンの光学的厚み *τ* は文献 [8] より求めること ができる。



図 2: 観測 1,2 のスペクトルとモデルの比

	Unit	観測 1	観測 2	観測 3	観測 4
flux	W/cm^2	2.38×10^{-15}	0.97×10^{-15}	1.28×10^{-15}	1.51×10^{-15}
L_x	W	1.81×10^{31}	7.34×10^{30}	9.73×10^{30}	1.14×10^{31}
L_x/L_{edd}		0.905	0.367	0.486	0.572
nH	$10^{22}/cm^2$	$0.285^{+0.015}_{-0.014}$	$0.303^{+0.014}_{-0.013}$	$0.291^{+0.017}_{-0.014}$	$0.321^{+0.02}_{-0.019}$
Tin	keV	$0.344^{+0.041}_{-0.029}$	$0.294^{+0.022}_{-0.019}$	$0.329^{+0.028}_{-0.029}$	$0.290^{+0.028}_{-0.025}$
$R_{in}\sqrt{\cos i}$	km	108.7	115.2	91.9	134.3
kT_{bb}	keV	$0.611^{+0.083}_{-0.052}$	$0.469^{+0.038}_{-0.033}$	$0.599^{+0.057}_{-0.062}$	$0.520^{+0.053}_{-0.045}$
R _{bb}	km	77.48	74.99	58.21	78.78
Г		$1.94^{+0.25}_{-0.13}$	$1.901^{+0.051}_{-0.038}$	$1.93^{+0.15}_{-0.12}$	$1.827^{+0.097}_{-0.063}$
τ		7.821	6.325	7.234	8.157
kT_e	keV	$1.89^{+0.31}_{-0.10}$	$2.79^{+0.29}_{-0.18}$	$2.17^{+0.33}_{-0.19}$	$1.91^{+0.14}_{-0.11}$
χ^2/dof		0.542	0.553	1.013	0.953

表 1: パラメータの時間変化

観測1と同様にいずれの観測においてもモデルはデー タをよく再現した。

flux は池谷と同じ結果を得たが normarization は異な る結果となった。この理由はデータリダクションの段階 での heasoft のバージョンアップとノイズの大きなもの を除外したためと考えられる。

図3は横軸を観測番号、縦軸をパラメータにした図 である。この図から観測1が最も明るく円盤の内縁温度 Tin, 中性子星表面温度 kTbb が高温になり、円盤の内縁 半径が大きくなる。高温プラズマは暗いほど温度が高く なることが分かる。



図 3: 全ての観測のパラメータの比較 (a)X 線光度 $L_x(\times 10^{31}W),(b)$ 円盤内縁半径 $R_{in}\sqrt{\cos i}(km)$, 中性子 星の半径 $R_{bb}(km),(d)$ コンプトンの光学的厚み $\tau,(e)$ 光子指数 $\Gamma,(f)$ 中性子星の温度 $kT_{bb}(keV),(g)$ 円盤温度 Tin(keV),(h) 水素の柱密度 nH×10²²/cm²

4 考察

本研究で解析したモデルで、中性子星の半径とコンプ トンの光学的厚みについて規則性が見つけられなかった ためデータを増やす必要がある。

また中性子星の半径と中性子星から円盤までの距離は $R_{bb} < R_{in}\sqrt{\cos i}$ であったが中性子星の半径は 10km に 対し本研究ではどの観測でも $R_{bb} >> 10km$ と矛盾が生 じた。図4のように高温プラズマの中心部が広い範囲で $\tau >> 1$ となっており見かけの中性子星のようなものが できたと考えた。

また、図4で観測1の方が明るく、観測3は暗い。円 盤の内縁半径と中性子星の半径も明るいほど大きくなる ことが分かった。本研究により、高光度状態のLMXBで



図 4: 高温プラズマと標準降着円盤

高温プラズマの光学的厚み、温度の違いを説明できるこ とが分かった。

References

- [1] X 線で探る宇宙 小山勝二 初版第三刷 p25
- [2] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/mission_guide/
- [3] 池谷智弘 卒業論文(芝浦工業大学)2020
- [4] Jerome A.Orosz, Erik Kuulkers, 1999, MNRAS, 305, 132
- [5] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/Models.html
- [6] Zycki, et al. 1999, MNRAS, 309, 561-575
- [7] Mitsuda, et al. 1984, PASJ, 36, 741-759
- [8] 久保田あや,2022, 分光研究 vol.70,13