

ISS搭載NICERによる Atoll タイプの中性子星 X 線連星 4U 1636–536 の研究

X-ray study of 4U 1636–536 observed with NICER

X 線天文学研究室 BP20073 武田 和輝

指導教員：久保田 あや 教授

1 背景と目的

質量が太陽の 10 倍以上の恒星は進化の最後に超新星爆発を起こし、中心には中性子星やブラックホールが形成される。中性子星は、半径が約 10 km、質量が太陽質量の約 1.4 倍の高密度星で表面での重力は地球上の約 1 兆倍大きい。特に、磁場の弱い中性子星もしくはブラックホールと太陽程度の質量の恒星との連星系を低質量 X 線連星系 (Low Mass X-ray Binary: 以降 LMXB) という。中性子星の LMXB では恒星のガスが中性子星の重力圏に捉えられ落ち、角運動量を持って円盤 (降着円盤) を形成し、ガス同士の摩擦により円盤が数千万度の高温になる。また、ガスの運動エネルギーは最終的に中性子星表面で熱エネルギーに変換される。したがって、LMXB の X 線放射は表面の黒体放射と円盤の放射の 2 成分を特徴とする [1]。中性子星の LMXB の円盤の構造は単位時間あたりに落ちるガスの量 (質量降着率 $\dot{M}$) によって変化し、カラーカラーダイアグラム (Color-Color Diagram: 以降 CCD) での振る舞いによって Z 天体と Atoll 天体に分類される [2]。天体には質量に比例して理論的に可能な上限光度であるエディントン光度 (L_{edd}) が存在し、2022 年度の総合研究で伊藤は比較的明るい LMXB の解析から $0.05L_{\text{edd}}$ 程度で円盤の構造が変化することを示した [3]。

本研究では、ISS 搭載 NICER 検出機で観測された中性子星の中で比較的光度が低い ($L = 0.01\text{--}0.1L_{\text{edd}}$) とされる Atoll 型の LMXB である 4U 1636–536 の解析を行い、円盤の変化がどのように生じるかを明らかにする。これにより極限の重力下での物質降着のメカニズムを知る。

2 NICER による 4U 1636–536

4U 1636–536 は X 線天文衛星ウフルによって発見された中性子星の LMXB であり [4]、地球からの距離が $4.4^{+1.6}_{-3.1}$ kpc ($1.4^{+0.5}_{-1.0} \times 10^{22}$ cm)[5]、質量が太陽質量の 2.0 ± 0.1 倍 [6]、軌道傾斜角は 36 度～74 度 [7]、エディントン限界光度は、 $L_{\text{edd}} = 2.5 \times 10^{38}$ erg/s¹である。

NICER は中性子星の研究を目的にした NASA の X 線望遠鏡である。2017 年 6 月 3 日に打ち上げられ、国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された。エネルギー帯は 0.2–12 keV²、エネルギー分解能は半値全幅で 6 keV あたり 137 eV、空間分解能は 5 分角、時間分解能は 100 ns である。主要観測機器として、X 線タイミング機器 (X-ray Timing

Instrument: 以降 XTI) があり、これは 56 組の X 線集光器とシリコンドリフト検出器が並べられたものである。X 線集光器は XTI の表面に、シリコンドリフト検出器は XTI の内部に並べられている [8]。4U 1636–536 は NICER によって 2017 年 6 月 26 日から 2022 年 3 月 5 日までの間に 143 回の観測が行われた。本研究では NASA の観測データ公開サイト³からこれらのデータを用いた。

3 スペクトル解析

3.1 解析準備

全データの低エネルギー帯 (0.2–1.0 keV)、中エネルギー帯 (1.0–3.0 keV)、高エネルギー帯 (3.0–10.0 keV) の 1 秒間あたりの光子数を取得し、各エネルギー帯の 1 秒間あたりの光子数の比を縦軸横軸に取った CCD を作成し、図 1 に示した。図は Atoll 天体の特徴である円形の傾向を示している。図中に Atoll 天体の特徴的なブランチである Upper Banana (UB), Lower Banana (LB), Island State (IS) の位置を示した。

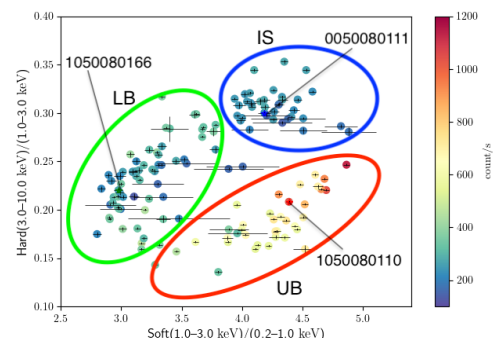


図 1: 横軸ソフトカラー (1.0–3.0 keV)/(0.2–1.0 keV)、縦軸ハードカラー (3.0–10.0 keV)/(1.0–3.0 keV) の CCD、カラーマップは 1 秒間あたりの光子数

3.2 検証する放射モデル

Atoll 天体の円盤は降着率 $\dot{M}$ が大きいと光学的に厚い標準降着円盤 [9] (多温度の黒体放射スペクトル diskbb [10]) と中性子星表面からの黒体放射スペクトル bbodyrad で表され、これをモデル 1 とする。また、円盤がコンプトンのガスに包まれた描像を考え、種光子を diskbb とした熱的逆コンプトン散乱スペクトル thComp [11] をモデル 2 と定義し、それぞれに星間吸収 tbabs を掛け合わせた。フィット

¹ 1 erg = 10^{-7} J

² 1 keV = 1.6×10^{-16} J

³ <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl>

のパラメータは bbodyrad が中性子星の温度 kT_{bb} と球面放射を仮定した球の半径 R_{bb} , diskbb が円盤の温度 kT_{in} と半径 R_{in} , thComp がべき乗則光子指数 Γ と電子温度 kT_e とコンプトンされた種光子の割合 f , tbabs が水素柱密度 nH [$\times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$] である⁴.

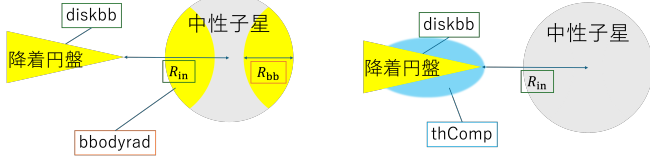


図 2: モデルのイメージ図, モデル 1 (左), モデル 2 (右)

3.3 スペクトルの例

各ブランチの代表データ (観測 ID が 1050080110, 1050080166, 0050080111) を解析した後, その結果から各ブランチごとに解析を行った. UB と LB のデータは F 検定の結果からそれぞれモデル 1, モデル 2 が, IS はモデル 1 では円盤の半径が中性子星の理論値の半径 10 km より有意に小さいため物理的に適切でなく, モデル 2 が妥当と考えられる. 図 3 は左が UB をモデル 1 で, 右が LB (赤) と IS (青) をモデル 2 でフィットした結果のエネルギースペクトルであり, 図上にそれぞれのパラメータを載せた. L_x は 0.5–10.0 keV の光度である. LB と IS で diskbb の盛り上がりの高さが異なり, IS は LB の延長であった.

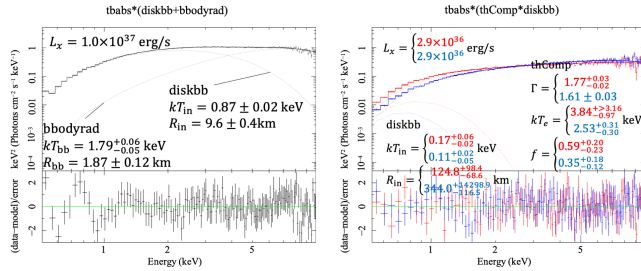


図 3: エネルギースペクトル, 左: UB, 右: LB (赤), IS (青)

3.4 全スペクトル解析

全てのデータに対して UB はモデル 1, LB と IS はモデル 2 で同様にフィットし, 横軸に修正ユリウス日 (MJD) とし各パラメータの時間変動を図 4 に示した.

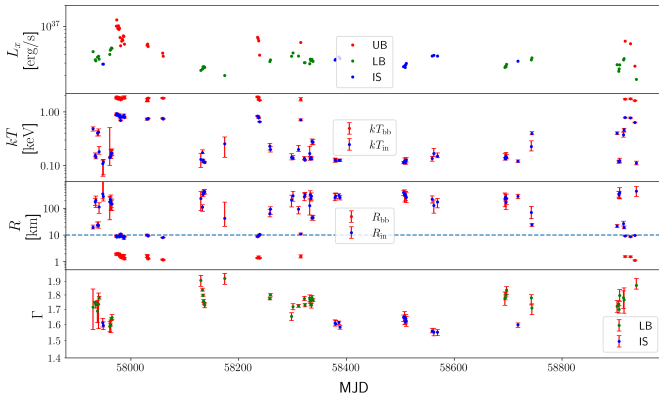


図 4: L_x , kT , R , Γ の時間変動

4 考察と得られた描像

L_x と kT_{in} および kT_{bb} の相関図を図 5, L_x と R_{in} および R_{bb} の相関図を図 6, L_x と Γ および kT_e の相関図を図 7 に

示した. 図 5, 6 から L_x が $5.0 \times 10^{36} (= 0.02L_{\text{edd}})$ erg/s を上回ると天体は UB にあり, 円盤半径 R_{in} は 9.1 ± 0.4 km に一定である (図 6 左). これは中性子星の半径にほぼ一致しており, 明るい UB では光学的に厚い円盤が遠方から中性子星表面まで広がっている描像が成り立つ. また, UB では中性子星表面からの放射光度は $L_{\text{bb}} \simeq 0.48L_x$ のように全光度に比例し, 表面温度はほぼ一定 ($kT_{\text{bb}} = 1.8 \pm 0.1$ keV) で, 放射領域の面積 ($S_{\text{bb}} = 4\pi R_{\text{bb}}^2$) が $S \propto L_x^{0.88}$ (図 6 右) のように暗くなるに従って減少することがわかった. また, UB から LB および IS への遷移は $L_x = 0.01\text{--}0.02L_{\text{edd}}$ で生じることからヒステリシス (履歴) があることがわかる (図 5 左, 6 左). 遷移が完了すると $R_{\text{in}} = 205 \cdot (L_x/0.01L_{\text{edd}})^{-1.28}$ km で表され, 円盤は UB と比べて 20 倍外側に後退し, 暗くなるとさらに外側に移動する. また, 遷移後は LB と IS はともに $\Gamma = 1.5\text{--}1.9$ の逆コンプトン散乱放射が卓越するが, 同程度の光度では IS の方が Γ が小さく (図 7 左), よりコンプトン散乱が効果的であることがわかった.

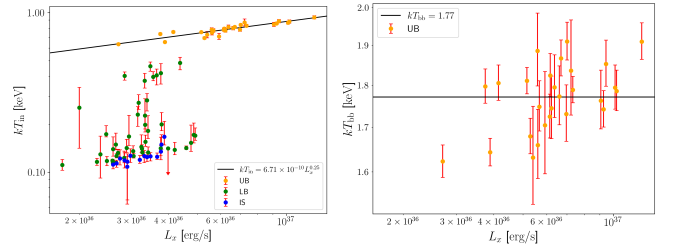


図 5: L_x に対する kT_{in} (左), kT_{bb} (右)

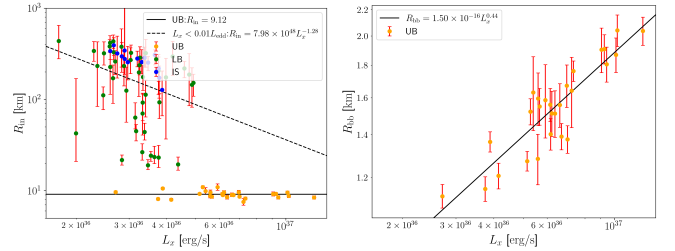


図 6: L_x に対する R_{in} (左), R_{bb} (右)

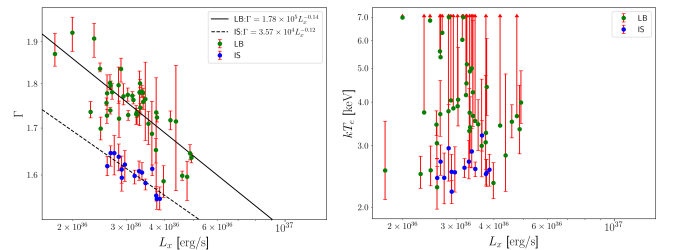


図 7: L_x に対する Γ (左), kT_e (右)

参考文献

- [1] 小山勝二, 1992, X 線で探る宇宙
- [2] van der Klis, M., 1989, Vol.1: X-Ray Binaries. Vol.2: AGN and the X-Ray Background, 203–207
- [3] 伊藤和樹, 総合研究論文 (芝浦工業大学), 2022
- [4] Giacconi, R. et al., 1972, AJ, 178, 281
- [5] Arason, R. M. et al., 2021, MNRAS, 502, 5455
- [6] Klahn, T. et al., 2006, PRC, 74, 3, 035802
- [7] Casares, J. et al., 2006, MNRAS, 373, 1235
- [8] Wilson-Hodge, Colleen A. et al., 2017, AASM 229, 309.04
- [9] Shakura, N. I et al., 1973, A & A, 24, 337–355
- [10] Mitsuda, K. et al., 1984, PASJ, 36, 741–759
- [11] Zdziarski, Andrzej A. et al., 2020, MNRAS, 492, 5234–5246

⁴<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/Models.html>