

# 国際宇宙ステーション搭載 NICER 検出器による中性子星連星 Swift J1858.6-0814 の研究

システム理工学専攻  
宇宙観測システム研究

MF20032 さかい けんとう  
坂井 謙斗  
指導教員 久保田 あや 教授  
三原 建弘 客員教授 (理化学研究所)

## 1. 背景と目的

中性子星 (Neutron star; 以降 NS) とは大質量の恒星が進化し超新星爆発を起こして誕生する最晩年の天体である。中性子星低質量 X 線連星 (low mass X-ray binary; 以降 LMXB) とは NS と低質量の恒星との連星系で、恒星の表面ガスが流れ出し、NS の周囲に降着円盤を形成する。降着円盤は光度により 2 つの状態を取り (図 1)、NS-LMXB のスペクトルのソフト状態、ハード状態に対応している。

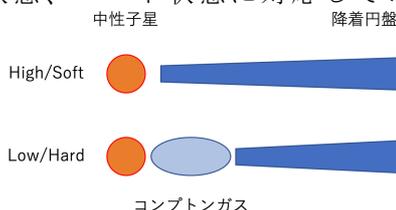


図 1: ソフト状態とハード状態での降着円盤  
ソフト状態では降着円盤が内側に進入し、内縁の温度が上がり、X 線で円盤黒体放射が見られる。ハード状態では降着円盤の内側の高温コンプトンガスが、降着円盤等からの低エネルギー光子を逆コンプトン散乱することにより、べき乗スペクトル(power-law)の硬 X 線を放射する。降着円盤自体は中心天体から後退し、温度が低くなっているため X 線は出さない[1]。LMXB のスペクトルには高階電離した鉄原子の共鳴吸収線が見られることがある。本研究では、国際宇宙ステーション(ISS)搭載の中性子星観測装置 Neutron star Interior Composition Explorer (以降 NICER [2]) で観測された LMXB, Swift J1858.6-0814 の X 線スペクトルを解析し、この天体の降着円盤の状態を明らかにすることを目指す。同時に、LMXB で観測される共鳴吸収線の検証を行い、降着円盤風の存在を検証する。

## 2. 中性子星連星 Swift J1858.6-0814

Swift J1858.6-0814 は、2018 年 10 月 25 日に Swift 衛星によって発見された X 線連星である[3]。2020 年に中性子星表面での爆発現象である I 型 X 線バーストが検出されたことで、Swift J1858.6-0814 のコンパクト天体は中性子星であると判明した[4]。距離は 12.8kpc (1kpc は  $3 \times 10^{16}$ km)、連星の軌道傾斜角は  $i=80^\circ$  と推定されている。

2020 年 2 月 6 日に再びアウトバーストを起こしたことが ISS 搭載の全天観測装置 MAXI[5]によって報告された。図 2 は 58800 MJD (2019 年 11 月 13 日) から 59000 MJD (2020 年 5 月 31 日) の MAXI の 2-20keV のライトカーブである。図 2 のライトカーブより、58885MJD から 58945MJD において明るくな

っていることがわかる。

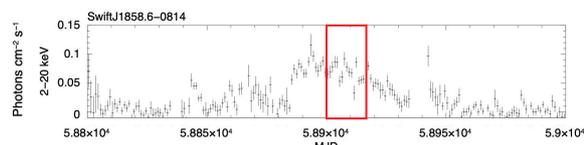


図 2: MAXI ライトカーブ (2-20keV)

## 3. スペクトル解析

### 3.1. NICER による Swift J1858.6-0814 の解析

NICER は 2017 年 6 月 3 日に打ち上げられ、XTI (X-ray Timing Instrument) 装置には 56 台の X 線集光鏡と、高カウントレート処理に強いシリコンドリフト検出器が搭載されている[2]。NICER XTI は大有効面積が特長で、高統計でポインティング観測できる。

MAXI ライトカーブで明るくなっていた期間について、NICER のスペクトル解析を行った。まず、先の MAXI で明るくなっていると確認した期間において、NICER の観測データの中から正常なものを確認したところ、図 2 赤枠期間内で 6 回の観測データが有効であった。このため、今回はこれを足し合わせて統計誤差を少なくしたものを使用する。この有効観測時間の合計は 4333 秒である。また、エネルギー帯域は 0.6-10.0keV を使用した。

### 3.2. スペクトルの連続成分放射

今回、いくつかのモデルについて試したが、その中で高温ガスによる低エネルギー光子の逆コンプトン散乱のスペクトルモデル nthcomp モデル[6]と、光学的に厚い降着円盤 diskbb モデル[7]を足し合わせたモデルがベストフィットであった(図 3、表 1)。自由度 439 に対して  $\chi^2$  が 504 とデータを再現した。nthcomp のベストフィット値は種光子の黒体温度  $kT_{bb} = 0.44 \pm 0.03$  keV、コロナの電子温度  $kT_e = 3.26 \pm 0.27$  keV、スペクトルの光子指数  $\Gamma = 1.72 \pm 0.01$  である。diskbb は  $kT_{in} = 0.27 \pm 0.02$  keV、norm(4 章参照) =  $2731 \pm 770$  であった。

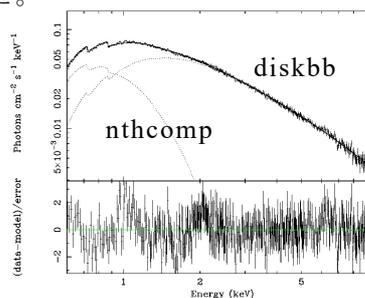


図 3: nthcomp+diskbb モデル

表 1: nthcomp+diskbb モデルのベストフィット値

phabs	$n_H$	$10^{22} \text{cm}^{-2}$	$0.28 \pm 0.01$
galactic nH		$10^{22} \text{cm}^{-2}$	0.18
nthComp	$\Gamma$		$1.73 \pm 0.015$
	$kT_c$	keV	$3.70 \pm 0.36$
	$kT_{bb}$	keV	$0.45 \pm 0.023$
	norm		$(8.27 \pm 0.45) \times 10^{-2}$
diskbb	$T_{in}$	keV	$0.26 \pm 0.015$
	norm		$2731 \pm 770$
$\chi^2_r(\text{dof})$			1.14 (439)

また、0.6-10keV の X 線放射強度は  $9.86 \times 10^{17} \text{W/cm}^2$ 、X 線光度は  $1.86 \times 10^{30} \text{W}$  であり、これは、質量降着で輝く理論的な限界値であるエディントン限界光度 (NS の場合は  $2 \times 10^{31} \text{W}$ ) の 0.9% である。

### 3.3. 共鳴吸収線の検証

この観測では 6-7keV に注目したところ、鉄由来の共鳴吸収線の存在が示唆された。5-9keV を power-law と積分値が負となる gaussian モデル (gabs) で評価し、その結果を表 2 に示す。

表 2: 吸収線のパラメータ

		powerlaw	gabs*powerlaw
gabs	LineE		$6.957 \pm 0.05$
	Sigma		0.05 fix
	Strength		$0.018 \pm 0.012$
powerlaw	PhoIndex	$1.84 \pm 0.06$	$1.82 \pm 0.05$
	norm	$0.26 \pm 0.03$	$0.25 \pm 0.03$
$\chi^2_r(\text{dof})$		1.09(100)	1.04(98)

この結果より、6.96 keV に吸収線が存在し、等価幅は 17 eV であることがわかった。また、gabs の有無での  $\chi^2(\text{dof})$  より F 検定を行ったところ、F 値 3.47 (自由度 2) であり、有意度 96.5% である。この吸収線のエネルギーは原子番号 26 の鉄において 25 個の電子が電離し、一つしか電子が残っていない鉄イオン (水素様鉄イオン、 $\text{Ly}\alpha$  という) のエネルギー 6.96keV に一致している。

これまで LMXB の吸収線は GX13+1 [8] や XB 1254-690 [9] など、いずれも軌道傾斜角  $i$  が大きい (すなわち視線方向が連星の軌道面に近い) 系で発見されていることから、この天体も  $i$  の大きな天体と考えることができる。また、吸収線は円盤に付随する吸収ガス (円盤風とよぶ) によるものと考えられ、今回の研究で円盤に円盤風が普遍的に付随するという描像をより確かなものとする事ができた。

## 4. 考察と結論

### 4.1. 連続成分と円盤コロナの幾何学的配置

3.2 で得られた連続成分のベストフィット値から円盤の幾何学的配置を推定する。まず、diskbb の norm から円盤内縁半径  $R_{in}$  を推定できる。norm は  $r_{in}^2(D/10\text{kpc})^{-2} \cos i$  で定義されるので [6]、距離 12.8 kpc [3] を代入すると  $r_{in} \sqrt{\cos i} = 94.6 \text{ km}$  と推定できる。これに、内縁部の境界条件 [10] と黒体放射の色温度補正 [11] を考慮すると実際の内縁半径は  $R_{in} \sqrt{\cos i} = 107^{+44}_{-32} \text{ km}$  となる。また、nthcomp の  $\Gamma$  はコロナの温度  $kT_e$  と光学的厚み  $\tau$  によって決まり [7]、表 1 のベストフィット値より  $\tau = 12$  と推定できる。ここで、コロナに入射した種光子は平均  $\tau^2$  回の散乱を受けるので、このコ

ロナは非常に光学的に厚い (すなわち不透明) であることがわかる。また、逆コンプトン散乱では光子は生成・消滅しないため、観測した光子の数と種光子の温度  $kT_{bb}$  から文献 [12] の式 (A1) を NS 用に修正したものを用いて、種光子である中性子星のサイズを  $8^{+3.2}_{-2} \text{ km}$  と推定した。この値は距離の不定性を考慮すると中性子星の半径 10km と大きな矛盾はない。以上より導いた Swift J1858.6-0814 のコロナと円盤の幾何学的配置を図 4 に模式的に示す。

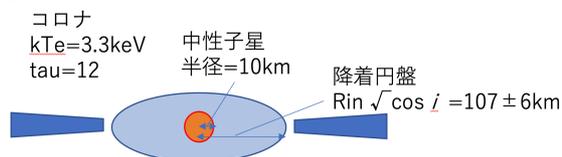


図 4: この時の中性子星の概略図

### 4.2. 吸収線と円盤風

吸収線の等価幅から視線方向にある吸収物質 (高階電離イオン) の個数 (柱密度) によって決まる。文献 [13] で示された、鉄  $\text{Ly}\alpha$  の等価幅と柱密度  $N_{\text{Ly}\alpha}$  の関係図より、 $N_{\text{Ly}\alpha} = 10^{19} \text{cm}^{-2}$  と推定できた。また、今回電子が 2 個残ったイオンである He 様鉄  $\text{He}\alpha$  の吸収線は検出されなかったが、 $\text{He}\alpha$  のエネルギー 6.7 keV における吸収線の等価幅の上限値を求めたところ 2.7 eV と推定できた。これより文献 [13] より、 $\text{He}\alpha$  の柱密度は  $N_{\text{He}\alpha} < 10^{17} \text{cm}^{-2}$  と決まる。したがって、 $\text{He}\alpha$  と  $\text{Ly}\alpha$  の存在比は  $N_{\text{He}}/N_{\text{Ly}\alpha} > 1/100$  となり、極めて高い電離度が予想される。光電離による電離度は吸収物質を照射する X 線のスペクトルに依存するが、温度 0.26 keV の diskbb として近似すると文献 [14] から電離パラメータ  $\xi \geq 2 \times 10^5$  と推定できた。これらより吸収物質の存在領域は中心天体から 1300 km 以下と推定できた。

## 5. まとめ

本研究では NICER で得られた Swift J1858.6-0814 のスペクトル解析を行った。降着円盤とコロナの幾何学的配置を決定し、この天体が LMXB のハード状態にあることを突きとめると同時に、高階電離した鉄の共鳴吸収線構造を検出した。これにより、円盤風が降着円盤に付随する、という描像をより普遍的なものとする事ができた。

### 参考文献

- [1] Done et al. 2007 A&A 15 1
- [2] Gendreau et al. 2012 SPIE 8443
- [3] Krimm et al. 2020 ATel #12151
- [4] Buisson et al. 2020 MNRAS 499 793
- [5] Matsuoka et al. 2009 PASJ 61 999
- [6] Zdziarski et al. 1996 MNRAS 283 1
- [7] Mitsuda et al. 1984 PASJ 36 741-759
- [8] Ueda et al. 2001 ApJ 556 L87
- [9] Boirin & Parmar 2003 A&A 407 1079
- [10] Kubota et al. 1998 PASJ 50 667
- [11] Shimura et al. 1995 ApJ 445 780
- [12] Kubota, Makishima 2004 ApJ 601 428
- [13] Kotani et al. 2000 ApJ 539 413
- [14] Kubota et al. 2007 PASJ 59 185