

「すぎく」を用いたソフト状態とハード状態における LMXB の統一的な研究

小野 光、櫻井壮希、ZhangZhongli、中澤知洋(東大 理)、牧島一夫(東大 理/理研)

Abstract

LMXB (Low-Mass X-ray binary) は中性子星と低質量星 ($\lesssim 1M_{\odot}$) の連星系で、光度が高い ($L \gtrsim 10^{37}$ erg/s) ときにはスペクトルは柔らかくなり、ソフト状態と呼ばれ、一方光度が低いと ($L \lesssim 10^{36}$ erg/s)、スペクトルは ~ 100 keV まで伸び、ハード状態と呼ばれる。櫻井らにより、Aql X-1 は 2つの状態ともに、コロナに逆コンプトン散乱された黒体放射と標準降着円盤で説明される事が分かった。そこで我々は、LMXB の熱的コンプトン過程をより統一的に考えるために、「すぎく」による複数の観測結果を同様に解析した。LMXB である GS1826-238 と、4U1608-52 のソフト状態とハード状態を解析した結果、これらのスペクトルはスペクトル状態によらず、櫻井らと同等のモデルで再現された。ソフト状態とハード状態には、電子温度などに系統的な違いが見られた。さらに、ハード状態の間でも、Aql X-1 のハード状態に比べて、コロナの電子温度が低く、光学的に厚いなど、異なるパラメータが得られた。コロナ電子の、イオンによる加熱と、ソフトな黒体放射 (温度 kT_{bb}) の散乱による冷却のバランスを表すために、無次元量として、パラメータ $Q \equiv T_e/T_{bb}$ を導入し、これとコンプトン散乱の強さを定量化する y パラメータで、コンプトン過程の記述を試みた。様々な LMXB のデータを (Q, y) 平面上にプロットしたところ、これらはソフト状態、ハード状態ともに同一の曲線上に分布し、同一の天体はこの曲線上を動く事が分かった。さらに、ソフト状態は $Q = 1 \sim 7$ 、ハード状態は $Q = 10 \sim 1000$ に分布し、これらは連続かつ滑らかにつながる事が分かった。

1 はじめに

LMXB (Low-Mass X-ray binary) は弱磁場 ($B \lesssim 10^8$ G) 中性子星 (NS) と低質量星 ($\lesssim 1M_{\odot}$) の連星系で、中性子星に降着するガスが重力エネルギーを解放することにより、X線で輝く。光度が高い ($L \gtrsim 10^{37}$ erg/s) ときにはスペクトルは柔らかくなり、ソフト状態と呼ばれ、標準降着円盤による多温度黒体放射と、NS 表面からの黒体放射で説明される^[1]。黒体放射成分の高エネルギー側には、より高温のコロナによる、逆コンプトン散乱の兆候も見られる^[1]。

1990 年代には *RXTE* や *BeppoSAX* が登場し、LMXB の光度が低いとき ($L \lesssim 10^{36}$ erg/s) に実現されるハード状態の研究が進んだ。この状態ではスペクトルが硬くなり、ベキ ~ 2 で ~ 100 keV まで伸びる。ソフト状態ではわずかな兆候しか見られなかった逆コンプトン散乱過程が、スペクトルの全体を支配する結果と解釈された。^[2,3]

2005 年、広帯域 ($\lesssim 1$ keV から $\lesssim 100$ keV) で高

い感度を誇る「すぎく」が打ち上げられた。これによる Aql X-1 の観測から櫻井ら^[4,5] は、ハード状態では降着円盤が半径 ~ 50 km で途切れ、高温のコロナ流として NS にほぼ自由落下し、NS 表面で熱化して黒体放射され、その光子が後続のコロナにより強くコンプトン散乱を受けている事を明らかにした。

そこで我々は、LMXB をより統一的に理解することを目的に、GS 1826-238 と 4U 1608-52 を同様に解析した。GS 1826-238 は「ぎんが」衛星により発見された LMXB で、ほぼ周期的に I 型バーストが起きる以外には X 線輝度に大きな変動はなく、常にハード状態にある。また、光度が高く、距離が $4 - 9$ kpc^[6] 程度であるため、硬 X 線帯域で質のよいスペクトルを得る事ができ、2009 年に「すぎく」が観測した公開データを用いた。4U 1608-52 は、Aql X-1 と並んで大きな強度変化を示す事で知られる LMXB で、「すぎく」により 2010 年に複数回観測されて、データは公開されており、異なる時期のデータから、同じ天体の 2つの状態を統一的に調べる事が出来る。

2 結果

2.1 GS 1826-238

2009 年 10 月 21 日に「すざく」と *RXTE* により同時に観測された exposure 13.9 ks のデータを使った。図 2a のように、「すざく」の XIS0、HXD-PIN、HXD-GSO、*RXTE* の PCA から同時平均スペクトルを作った。このように明らかにハード状態であった。図 1 のように、スペクトルを、降着円盤からの多温度黒体放射 (diskbb) と、NS 表面からのコンプトン化された黒体放射 (nthcomp) の和でフィットした。フィッティングで使った自由パラメータは、吸収、円盤の内縁温度 (kT_{in})、内縁半径 (R_{in})、黒体温度 (T_{bb})、黒体半径 (R_{bb})、電子温度 (T_e)、光学的厚み (τ) で、 $\chi^2_\nu(\nu) = 1.6(157)$ となった。電子温度はハード状態の Aql X-1 ($kT_e \sim 50$ keV) に比べて、表 1 のように、 $kT_e = 18.3$ keV と低く、光学的厚みはハード状態における Aql X-1 の $\tau = 2 \sim 2.5$ に比べて $\tau = 4.2$ と高くなった。

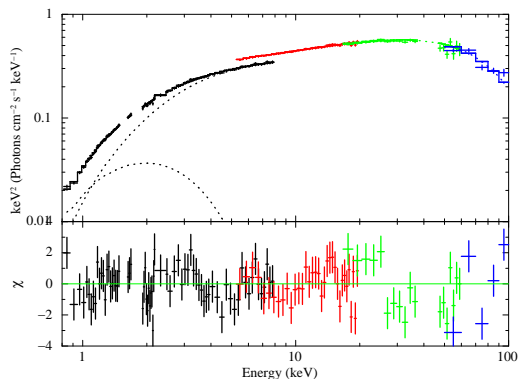


図 1: GS 1826-238 の νF_ν プロットと、モデルからの残差。黒は XIS0、緑は HXD-PIN、青は HXD-GSO、赤は PCA のスペクトル。

2.2 4U 1608-52

データは、2010 年 3 月 11 日、3 月 15 日、3 月 18 日に「すざく」で取得され、それぞれ exposure は 26 ks, 6.5 ks, および 26 ks であった。図 1(b,c,d) に示すように、はじめの 2 つデータはソフト状態、第 3 データはハード状態であった。11 日と 15 日の

データは XIS3、HXD-PIN を使い、18 日はさらに HXD-GSO も含めてスペクトルを作った。モデルは前節 2.1 と同様で、3/11 のデータは Fe-K 輝線としてガウシアンを加えた。表 2 のように、電子温度は $kT_e = 5 \sim 15$ keV と全観測でハード状態の Aql X-1 ($kT_e \sim 50$ keV) よりも低く、光学的厚みは $\tau \sim 3$ と高くなった。

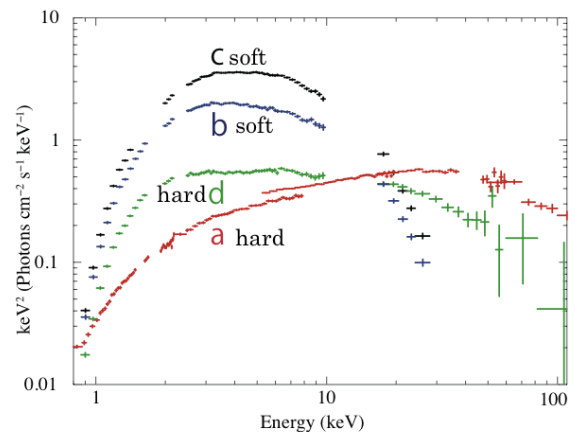


図 2: νF_ν スペクトル。a: GS 1826-238; 「すざく」、*RXTE* の観測データを使った。b, c, d: 4U 1608-52、3/15、3/11、3/18 の「すざく」による観測データを使った。

表 1: GS 1826-238 とハード状態における 4U 1608-52 のフィッティングパラメータ

天体	GS 1826	4U1608-52
観測日	10/21	3/18
L (10^{36} erg/s)	1.5	0.91
kT_e (keV)	18.3 ± 0.6	$15.5 \pm_{2.6}^{3.4}$
τ	4.2 ± 0.1	$3.1 \pm_{0.5}^{0.4}$
kT_{bb} km	0.81 ± 0.16	$0.63 \pm_{0.03}^{0.5}$
R_{bb} km	3.3-7.5	$8.6 \pm_{0.8}^{0.9}$
R_{in} km	3.5-9.5	53(> 25)
T_{in} keV	0.7 ± 0.2	$0.50 \pm_{0.16}^{0.03}$

表 2: ソフト状態における 4U 1608-52 のフィッティングパラメータ

観測日	3/11	3/15
L (10^{36} erg/s)	5.8	2.8
kT_e (keV)	$3.5(> 2.3)$	$5.4(> 2.3)$
τ	$2.9(< 4.1)$	$3.1(< 4.3)$
kT_{bb} km	$1.32 \pm_{0.23}^{0.13}$	$1.58 \pm_{0.32}^{0.18}$
R_{bb} km	3.1 ± 0.3	2.6 ± 0.2
R_{in} km	$821 \pm_{304}^{530}$	$301 \pm_{173}^{227}$
T_{in} keV	0.21 ± 0.02	$0.24 \pm_{0.03}^{0.05}$

3 考察

GS 1826-238 と 4U 1608-52 は、ソフト状態、ハード状態ともに、逆コンプトン散乱された黒体放射と降着円盤という一つのモデルによって統一的に記述できる事が分かった。異なる天体の 2 つの状態を通して成り立つ、一般的なモデルと言える。一方でソフト状態は $kT_{bb} \gtrsim 1$ keV、 $kT_e \sim 5$ keV、ハード状態では $kT_{bb} \lesssim 1$ keV、 $kT_e \gtrsim 10$ keV などと、すべての天体を通して系統的な違いが見られた。

さらにハード状態の中でも、いくつかの異なる点があった。GS 1826-238 と 4U 1608-52 はハード状態の Aql X-1 に比べて、コロナの光学的厚み τ が高く、特に電子温度 kT_e が低い点が大きく異なった。これは、これら 2 観測における光度が $L \sim 10^{37}$ erg/s と、Aql X-1 の光度 $L \sim 10^{36}$ erg/s に比べて高く、質量降着率が高かったためコロナが光学的に厚くなり、低温の黒体放射の光子を逆コンプトン散乱することによる冷却の効果が高まったためと考えられる。このような違いを表すため、熱的コンプトン過程におけるコロナ電子の加熱と冷却のバランスを表す新しいパラメータ、 $Q \equiv T_e/T_{bb}$ を導入する。

まず、LMXB の基本的なパラメータである光度 L に対する Q の依存性を見るために、今回の解析結果と [4,5] のパラメータを図 3 上の、 (Q, L) 平面にまとめた。 $L/L_{Edd} = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ と光度が低い部分にハード状態が分布しており、 $Q \sim 10^3$ と大きな値をとる。光度が上がるとソフト状態が出現し、このとき黒体温度が上がりコロナの冷却が効き始め、電子温度は下がるため、 $Q = 1 \sim 7$ となる。 $L/L_{Edd} \sim 10^{-1}$ で

は、おもに状態遷移に伴うヒステリシスを反映して、同じ光度でもソフト状態とハード状態が混在しているが、 Q を独立変数に選ぶと、ハード状態 ($Q > 10$) とソフト状態 ($Q < 7$) が一意的に分離する事が分かった。さらに L と異なり、 Q は無次元量なので、距離の不定性を取り除いて議論できることも、もう一つのメリットである。

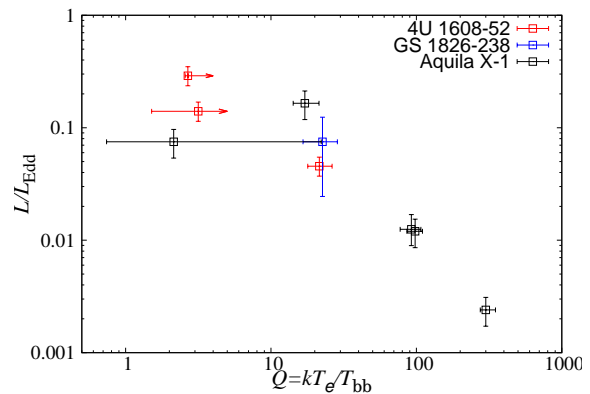


図 3: Q パラメータと光度 L の相関図

次にコンプトン過程をより包括的に完全に表すために、コンプトン化の強さを表す y パラメータも考え、今回の解析結果を Aql X-1 の結果 [4,5] とともに $Q-y$ ダイアグラムとしてまとめた。

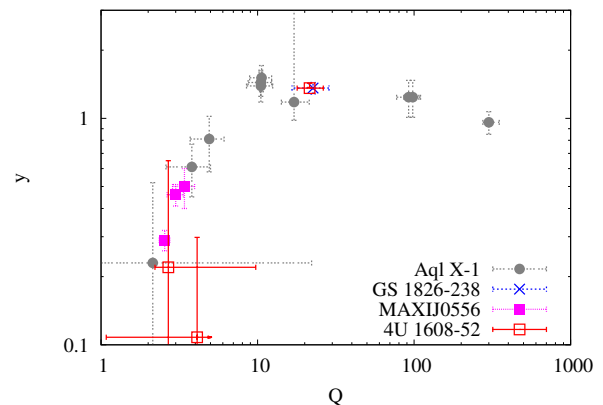


図 4: $Q-y$ ダイアグラム。

図 3 で見るように、ソフト状態は $Q = 1 \sim 7$ に、ハード状態は $Q = 10 \sim 10^3$ に分布し、これらは 1 つの共通の曲線を共有している。このことから、

1. 異なる LMXB は Q - y ダイアグラム上でほぼ共通の軌跡を描く
2. この軌跡上での位置は、 Q で一意的に指定できる
3. ハード状態とソフト状態は、 Q - y ダイアグラム上で連続につながる

事が分かった。

4 結論

GS 1826-238 と 4U 1608-52 のスペクトルはすべて、光学的に厚くソフトな円盤の放射と、逆コンプトン散乱を受けた黒体放射のモデルで説明する事が出来た。また、これらは Aql X-1 とともに、 (Q, y) ダイアグラム上で一つの曲線を形成し、ソフト状態は $Q = 1 \sim 7$ 、ハード状態は $Q = 10 \sim 10^3$ に連続かつ滑らかに分布した。また、1 天体の光度が変わる時、同じ曲線上を移動する事が分かった。以上からこれらの天体は、熱的コンプトン過程が連続かつ滑らかに異なるものとして、統一的に理解できる事が分かった。

Reference

- [1] Mitsuda et al. 1984
- [2] Lin et al. 2007
- [3] Cocci et al. 2011
- [4] Sakurai et al. 2007
- [5] Sakurai et al. 2014
- [6] Barret et al. 2000
- [7] Galloway et al. 2008