

全天 X 線監視装置 MAXI による Cygnus X-1 の hard 状態、soft 状態のパワースペクトル解析

杉本 樹梨 (立教大学大学院 理学研究科)

Abstract

ブラックホール連星 Cygnus X-1 は、ミリ秒から 10 年まで様々なタイムスケールでの激しい変動をする天体として知られている。本研究では、hard 状態、soft 状態での変動性をパワースペクトル (PSD) を用いて調査した。Cygnus X-1 は、MAXI 観測以前はほぼ hard 状態にあったため、soft 状態における長期間の PSD 解析は MAXI により初めて可能となる。解析には全天 X 線監視装置 MAXI の 2009 年 8 月 15 日から 2013 年 6 月 12 日までの観測データを用いた。エネルギー帯は、MAXI/GSC の 2-4 keV、4-10 keV、10-20 keV を使用した。まず X 線硬度比から hard 状態と soft 状態 (各 4 期間) に分けた。観測開始 (55058MJD) から hard 状態が約 10ヶ月続いた後状態遷移し、約 10ヶ月 soft 状態が継続した。その後は各状態を約 1-3ヶ月で繰り返し、56107MJD 以降は soft 状態が継続している。各状態の PSD を作成した後、各状態の期間の平均強度の二乗で割って「規格化した PSD (NPSD)」を求め、エネルギー帯ごとに比較を行った。その結果、soft 状態、hard 状態において、変動のエネルギー依存性に明らかな違いが見られた。さらに、各状態でスペクトル解析を行った結果、soft 状態においては、降着円盤からの熱的放射による soft 成分よりも、コンプトン放射による hard 成分の方が変動が大きいということがわかった。

1 Introduction

X 線天体の時間変動の探査は、放射エネルギースペクトルを調べる事と並んで、天体現象の起源に迫るための重要な手段である。様々な時間領域で変動する X 線天体において、 $10^{-4} \sim 10^3$ Hz の周波数域、つまりミリ秒から数時間の短い時間変動の調査は、X 線望遠鏡を搭載した観測装置による 1 回の詳細観測で十分な情報が得られる。しかし、それより長い変動の特徴は、長期間の質の良いデータが必要であるため制限されている。そのような低い周波数の研究は、降着円盤のモデルにおいてとても重要であり、変化が粘性タイムスケールで起こると期待されるディスクの最外部の情報を与える。この問題は、2009 年 8 月から国際宇宙ステーション (ISS) 「きぼう」船外実験プラットフォームで稼働している全天 X 線監視装置 (MAXI) の観測データを用いることで解決可能となる。MAXI は 1 日に全天の 95% の領域を観測でき、X 線帯域で過去の装置より 1桁高い感度を持つ全天モニターである。MAXI を用いることで、1 秒未満から 1 スキャン (スキャン時間 ~1 分間) まで、

ISS 周回に伴う 92 分から年以上にわたる連続的な天体強度のサンプルデータが得られる。1 日あたり数十 mCrab という検出感度による全天観測を用いた長時間変動の調査は、それ自体に新規性がある。

本研究では、MAXI データを用いて銀河系内のブラックホール連星 Cygnus X-1 のフーリエパワースペクトル (PSD) 解析を行った。Cygnus X-1 の時間変動の先行研究は、数時間以下での周期的なシグナルの調査に注目されたものがほとんどであった (1)。一方、ブラックホール候補天体からの X 線放射の性質は、10 ミリ秒より長い時間スケールでの強く「非周期的な」変動である。異なるスペクトル状態間では PSD も変化することから、変動性とスペクトル状態はかなり関連しているということが示唆され、PSD の形と降着円盤の半径を対応させる先行研究がある (2)。また、Cygnus X-1 の low/hard スペクトル状態でのディスクとコロナの相対的な位置関係はいくつかのモデルが提唱されているが、まだ明らかになっていない。この問題へのアプローチとして、長期 PSD 解析によってエネルギー帯と変動の関係を明らかにすることが重要であると考えた。Reig et al.

(2002)(4) では、RXTE/ASM の X 線データを用いて非周期的な変動の時間解析に着目し、Cygnus X-1 の長期間変動を解析している。この RXTE 運用期間はほぼ low/hard 状態にあったため、high/soft 状態での長期観測は含んでいなかった。だが 2009 年から全天 X 線監視装置 MAXI が観測を始めた後、2012 年 6 月に状態遷移し、現在までずっと high/soft 状態が継続している。本研究では、この MAXI の観測データを用いて、hard 状態と soft 状態両状態でのエネルギー帯ごとの非周期的長期変動に着目した。PSD 解析やエネルギースペクトルを用いた時間変動解析を行い、変動成分の起源を調査した。

2 Observation

2.1 MAXI

全天 X 線監視装置 MAXI は 2009 年 7 月 16 日に打ち上げられ、国際宇宙ステーション (International Space Station ; ISS) の日本実験棟きぼう船外実験プラットフォームに設置された。地球を一周約 92 分で周回する ISS に搭載することにより、92 分ごとに絶えず全天を見張る観測が可能となった。MAXI はこれまでの約 2 年 5 ヶ月の観測で 100 件以上の突発天体の変動現象を報告しており、その結果はインターネットを通じて全世界の人々に即座に公開され、世界中の望遠鏡での迅速な詳しい追跡観測を促進している。MAXI/GSC は 2-30 keV までの広い波長領域で観測し、X 線によるカラー撮影を行うことができる。解析には、MAXI のガススリットカメラ (GSC) による観測データを使用した。MAXI による 2-20 keV、2-4 keV、4-10 keV、10-20 keV の 4 つのエネルギー帯での時系列データが公開されている。
(<http://maxi.riken.jp/top/>)

2.2 Light curves

解析には、Cygnus X-1 の MAXI/GSC による 2-4 keV、4-10 keV、10-20 keV バンドの光度曲線を使用した (図 1)。観測期間は 2009 年 8 月 15 日 (MJD55058) から 2014 年 6 月 17 日 (MJD56825) である。

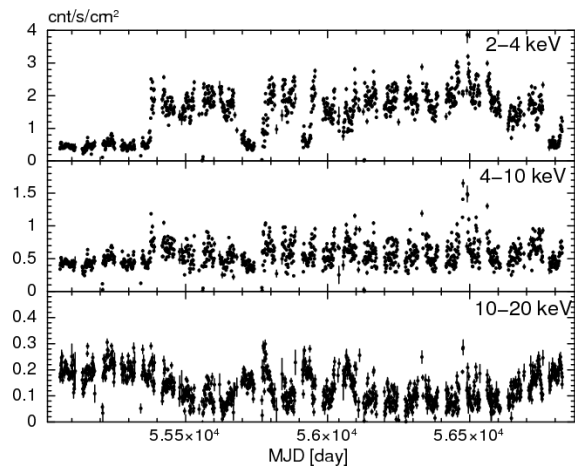


図 1: Cyg X-1 の 1 日ピンの光度曲線。1 段目: 2-4 keV バンド、2 段目: 4-10 keV バンド、3 段目: 10-20 keV バンド

これより、縦軸に 2-10 keV バンドの X 線強度、横軸に 2-4 keV バンド/4-10 keV バンドの硬度比 (Hardness ratio) をとった Intensity-Color 図を作成した (図 2)。これを横軸に投影すると 2 つのグループに分かれる。これらを hard 状態、soft 状態に分類した。

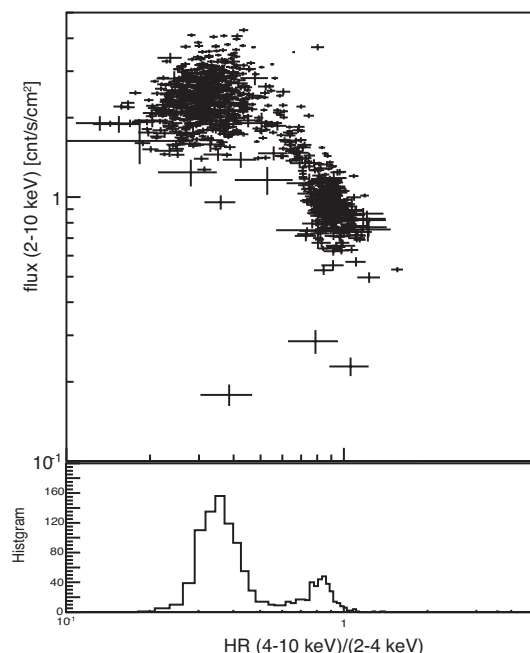


図 2: (上段) Cyg X-1 の 1 日ピンの Intensity-color 図。(下段) 硬度比に対するヒストグラム。

3 Results

3.1 PSD analysis

PSD は、hard 状態と soft 状態それぞれについて計算した。解析には、状態が最も長く安定している期間として、hard 状態：55058MJD–55376MJD、soft 状態：56077MJD–56734MJD を用いた。2–4 keV、4–10 keV、10–20 keV の 3 バンドの光度曲線にフーリエ変換して、各状態につき 3 つの PSD を計算した。さらに、hard 状態と soft 状態では強度が異なるため、PSD を比較する際には規格化を行う必要がある。そこで、各々の光度曲線の (強度平均値)² で割って規格化し、NPSD として比較した。結果を図 3 に示した。NPSD の値が大きいほど、強度変動が大きいということを表している。

解析の結果、soft 状態では、10–20 keV バンドの最も高いエネルギー帯において変動が大きいということがわかった。対して、hard 状態では、soft 状態ほどエネルギー帯によって変動の大きさに違いはないことがわかった。また、各状態で NPSD を比較すると、2–4 keV バンドのパワーは、hard 状態と soft 状態で同じくらいである。

3.2 Energy spectrum

hard 状態、soft 状態において、エネルギー帯によってどの成分が変動しているのかを調べるため、エネルギースペクトル解析を行った。解析には、MAXI/GSC、および MAXI/SSC による観測データを用いた。解析した期間は、PSD を計算する際に用いたものと同じ、hard 状態：55058MJD–55376MJD、soft 状態：56077MJD–56734MJD である。ここで、hard、soft 状態をさらに明るい時期、暗い時期に分割し、それぞれのスペクトルを抽出して比較した。平均強度の値は、解析した PSD の周波数範囲の中央あたり ($\sim 10^{-6}$ Hz) の変動を見るために、移動平均平均法を用い 15 日ピンごとに計算を行った。MAXI/GSC による 2–20 keV バンドの光度曲線について移動平均強度を計算し、計算した平均強度よりも明るい (= 強度が高い時期) と暗い (= 強度が低い時期) に分割した。このとき、平均強度とちょうど同じ強度にな

る点は使用していない。これら 4 つのスペクトルに対して、モデルフィッティングを行った。モデルは、Compton 成分、disk 成分、鉄輝線による 6.7 keV 付近の構造を考慮した *powerlaw + diskbb + gaussian* を使用した。結果を図 4、ベストフィットパラメーターを表 1 に示した。

4 Discussion & Conclusion

PSD 解析結果から、「hard 状態と soft 状態では、変動のエネルギー依存性が異なる」ということが明らかになった。エネルギースペクトルの 15 日間での時間変化を調べた結果、hard 状態では全エネルギー帯域で変化は小さく、soft 状態では高エネルギー帯域で変動が大きいことがわかった。この結果は、PSD 解析の結果と矛盾しない。また、フィッティングを行って詳細に調べた結果、hard 状態では disk 成分、powerlaw 成分ともに変動していることがわかった。これは、disk の内縁半径が 15 日スケール以内で変化し、それに追従してコンプトン領域からの高エネルギー放射も変化することによると考えられる。一方、soft 状態では、powerlaw 成分が顕著に変動していることから、disk は安定しており、高エネルギー成分のみが変動するということが明らかになった。この変動成分の正体についてはまだ明らかではないが、hard 状態とは異なる起源を持つ放射であると考えられる。

Reference

- [1] Kitamoto S. et al., ApJ, 531, 546 (2000)
- [2] Churazov E. et al., MNRAS, 321, 759 (2001)
- [3] Scargle J. et al., ApJ, 263, 835 (1982)
- [4] Reig P. et al., A&A, 383, 202 (2002)
- [5] Yamada S. et al., PASJ, 65, 80 (2013)
- [6] Makishima K. et al., PASJ, 60, 585 (2008)

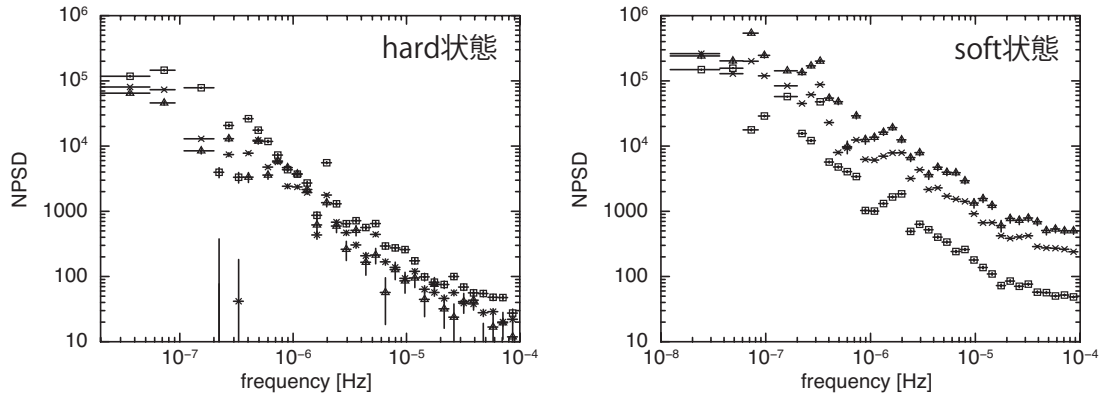


図 3: Cygnus X-1 の NPSD。左が hard 状態、右が soft 状態であり、四角が 2-4 keV バンド、クロスが 4-10 keV バンド、三角が 10-20 keV バンドの観測データを用いている。

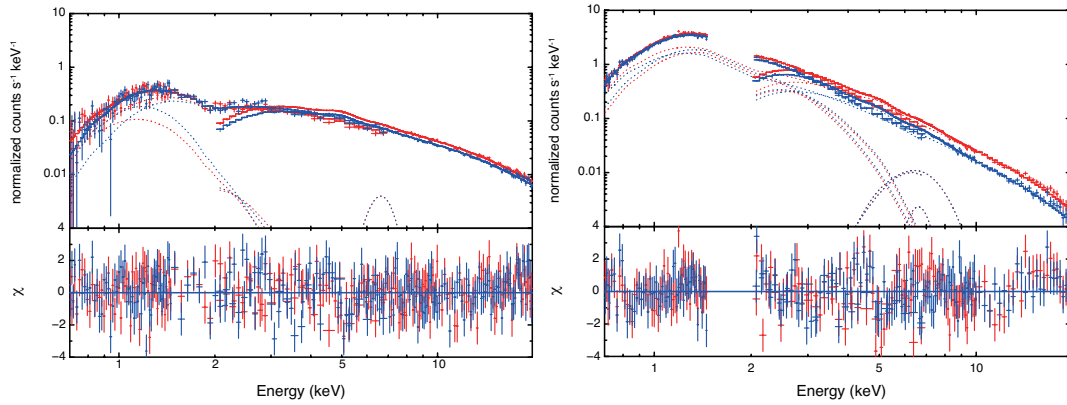


図 4: (上段)Cygnus X-1 のエネルギースペクトルと (下段) モデルとの残差。上が hard 状態、下が soft 状態である。それぞれ、赤が平均強度に対して明るい時期、青が暗い時期のスペクトルである。モデルは $powerlaw + diskbb + gaussian$ を使用した (点線がモデルを示す)。

Component	Parameter	hard state		soft state	
		hard/bright	hard/dim	soft/bright	soft/dim
phabs	nH ($\times 10^{21}$)	$4.57^{+0.86}_{-0.91}$	$7.45^{+0.83}_{-0.81}$	4.95 ± 0.15	4.56 ± 0.18
powerlaw	Index	1.64 ± 0.01	1.64 ± 0.01	2.85 ± 0.03	2.91 ± 0.04
	Norm	2.02 ± 0.05	1.71 ± 0.04	$19.31^{+1.14}_{-1.11}$	$14.24^{+1.22}_{-1.16}$
diskbb	T_{in} (keV)	$0.25^{+0.03}_{-0.02}$	0.21 ± 0.01	0.50 ± 0.01	0.51 ± 0.01
	R_{in} (km)	$55.8^{+27.6}_{-24.0}$	$136.6^{+41.9}_{-34.1}$	$33.6^{+1.1}_{-1.8}$	$34.1^{+1.1}_{-1.2}$
fit goodness	χ^2_ν	1.31 (422)		1.35 (355)	

表 1: hard 状態、soft 状態のエネルギースペクトルのベストフィットパラメータ。

Model = constant*phabs*(powerlaw+diskbb+gaussian)