

# 「すざく」によるソフト状態のブラックホール連星 Cygnus X-1 の ハードテイル成分の解析

奥田 和史 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

我々は最も明るいブラックホール連星の 1 つである Cygnus X-1 に着目し、「すざく」で取得されたデータを用いて、ソフト状態のハードテイル成分の解析を行った。2010 年の中頃に Cygnus X-1 がソフト状態になって以降、2013 年までに行われた計 5 回の観測において、硬 X 線検出器 (HXD) の 15–200 keV の強度は、数分から数秒のタイムスケールで 1 桁以上もランダムに変動していた。特に 2013 年 4 月 8 日の観測内の 440 sec は最大強度に達し、PIN のカウントレートは 100 Hz、また同 5 月 7 日の 3.4 ksec は最も暗く 3 Hz 程度と、33 倍の開きがあった。これら 2 つに 2013 年 5 月 7 日の観測 21 ksec の平均を含めた 3 つのデータの硬 X 線スペクトルを比較すると、すべて冪関数型を示し途中で折れ曲がりが見られた。それらを Broken power law モデルを用いてフィッティングを行うと、いずれも  $\Gamma_1 = 2.48 \pm 0.05$ 、 $\Gamma_2 = 3.09 \pm 0.06$ 、 $E_{\text{break}} = 25 \pm 1$  keV という同一のパラメータで概ね説明できた。一方で最も明るい時間帯はスペクトルにさらなる折れ曲がりの徴候も見られた。33 倍の光度変化に対してスペクトルの形状が変わらない事実には説明できないが、今回見られた折れ曲がりにはハードテイル成分の放射メカニズムの理解につながる新たな発見である。

## 1 Introduction

ブラックホール連星 (BHB) とは、恒星質量 (太陽質量の数倍から 20 倍程度) のブラックホール (BH) と恒星との連星系のことを言う。恒星から BH にガスが降着する際、BH の周りには降着円盤と呼ばれる円盤状の構造が形成される。その中で、降着物質の静止質量エネルギーの実に  $\sim 10\%$  が放射に変換されるため、BHB は強力な X 線源である。そのスペクトルには、図 1 に示すように、ソフト状態とハード状態の 2 つの典型的な状態が存在する。質量降着率が高い場合がソフト状態、低い場合がハード状態に対応する。

ハード状態の全貌は、BH 近傍から後退した降着円盤からの紫外線光子が、高温 ( $\sim 100$  keV) 電子により逆コンプトン散乱を受けて高エネルギーを得る、熱的コンプトン過程として解釈された (Makishima et al. 2008)。また、ソフト状態の軟 X 線成分 ( $< 10$  keV) は、幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤からの多温度黒体放射と理解されている (Makishima et al. 1986)。ところが、ソフト状態のハードテ

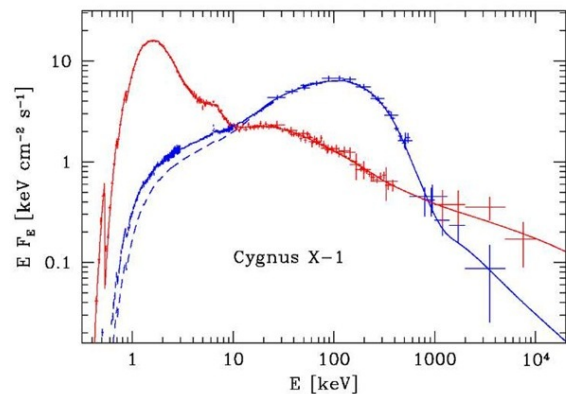


図 1: 代表的な BHB である Cygnus X-1 のエネルギースペクトル (McConnell et al. 2002)。赤色がソフト状態、青色がハード状態を表す。

イル成分 (HTC) と呼ばれるべき関数型の硬 X 線成分 ( $> 10$  keV) の起源は、未だ大きな謎に包まれている。

HTC もハード状態と同様に素過程はコンプトン散乱であると考えるのが最も自然だが、HTC は数 MeV までほとんど折れ曲がらずに延び、熱的な特徴は確認されていない。また、HTC のフラックスは図 2 に

示すように、数秒から数分のタイムスケールで 1 桁を超えて激しく変動している。

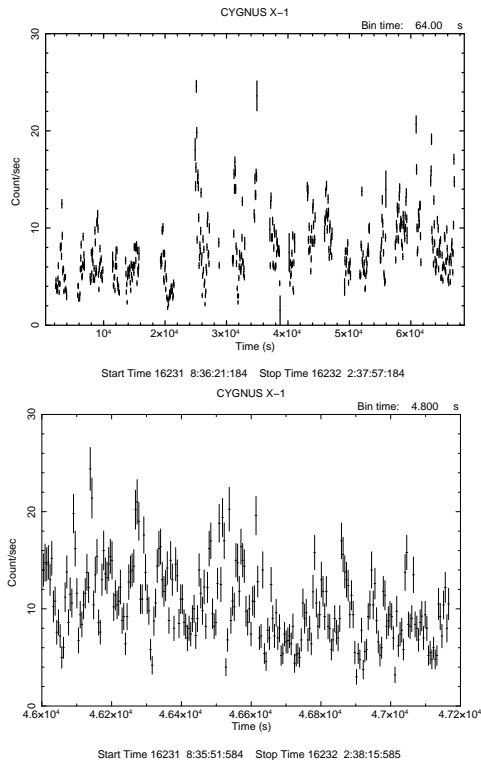


図 2: (上) Cygnus X-1 の HTC の、2012 年 10 月 31 の観測全体における「すぎく」PIN のライトカーブ。(下) 同じライトカーブを 1.2 ksec の幅で拡大したもの。

近年までの観測は数 MeV 帯域はもとより数百 keV 帯域ですら感度が悪かったため、数日からときには数ヶ月の積分時間を要し、それでも十分な精度のスペクトルは得られなかった。これでは HTC の長時間平均スペクトルしか観測できない。これが HTC の起源に迫る事はできずにいた主な原因であると考えられる。

そこで我々は、日本の X 線衛星「すぎく」に搭載されている硬 X 線検出器 (HXD) を用いて HTC の解析を行った。HXD は 10–300 keV のエネルギー帯域で高い感度を持ち、短いタイムスケールの変動を追うことができる。

## 2 Observation

代表的な BHB である Cygnus X-1 の「すぎく」の観測による公開データを用いて解析を行った。解析に用いた検出器は HXD-PIN と HXD-GSO の 2 つで、これらのバックグラウンドは公開されている Non X-ray Background を用いた。

ソフト状態の Cygnus X-1 は「すぎく」によって 2010 年から 2013 年までに 5 回観測されている。HXD のライトカーブはランダムに変動しており、2013 年 4 月 8 日の観測中には何度か突発的な光度上昇 (フレア) が生じていた。中でも最大のもは、図 3 に示すように 440 sec に渡って光度が 1 桁以上も上昇した。一方、図 4 に示したように、2013 年 5 月 7 日の観測では 3.4 ksec に渡って光度が最も暗くなった。以降では、このフレアが生じた 440 sec を「データ A」、2013 年 5 月 7 日全体の平均スペクトルを「データ B」、最も光度が低くなった 3.4 ksec を「データ C」とする。

## 3 Data Analysis

まず 3 つのデータの HXD スペクトルを `powerlaw` モデルでフィットした。全ての検出器で  $\Gamma$  を共通にして、`normalization` のみを変化させた。フィットの結果、 $\text{reduced } \chi^2 = 2.70(\text{for } 159 \text{ dof})$  であった。データ B に対するモデルとの比を図 5 に示す。図からスペクトルには折れ曲がりが生じていることがわかる。

そこで、次に `bknpower` モデルを用いた。これはあるエネルギーを境に  $\Gamma$  の値が変化するべき関数モデルである。ここでも折れ曲がりの生じるエネルギー、折れ曲がり前後の  $\Gamma$  は全データで共通にし、`normalization` のみを変化させた。 $\text{reduced } \chi^2 = 1.33(\text{for } 159 \text{ dof})$  となり、フィッティングの結果が大幅に改善されたことがわかる。パラメータを表 1 に、データ B に対するモデルとの比を図 6 に示す。光度が最大で 33 倍の差があるにも関わらず、スペクトルの形状にはあまり変化がなかった。

このモデルの `normalization` をデータ A に合わせ、データ A のスペクトルのみ表示したものを図 7 に示す。データ A のスペクトルには、60 keV 以上にさらに折れ曲がりが存在していることがわかる。実際に、

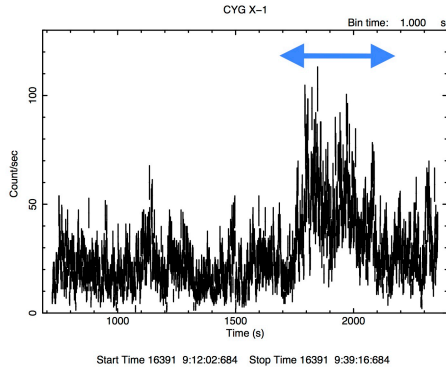


図 3: フレアが生じた時間帯 (データ A) の PIN によるライトカーブ。青い矢印で示した範囲がデータ A に対応する。カウントレートが 2 分程度で 10 Hz 程度から 100 Hz 程度にまで上昇したことがわかる。

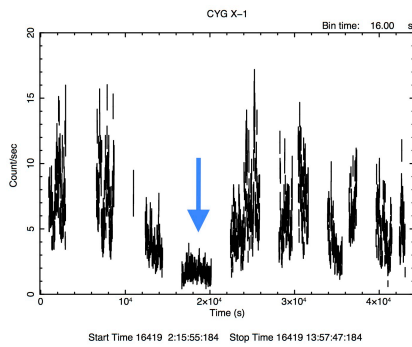


図 4: 2013 年 5 月 7 日の観測 (データ B) の PIN によるライトカーブ。青色の矢印で示した時間帯はカウントレートが  $\sim 3$  Hz にまで下がっており、これがデータ C に対応する。

表 1: bknpower モデルでのフィッティングパラメータ

Parameter	Value
$\Gamma_1$	$2.48 \pm 0.05$
$\Gamma_2$	$3.09 \pm 0.06$
$E_{\text{broken}}$	$25 \pm 1$ keV
reduced $\chi^2$ (dof)	1.33(159)

データ A のみでは reduced  $\chi^2 = 1.65$ (for 68 dof) となり、フィッティングの結果は悪化した。一方データ B,C のみでは、同じパラメータに対して reduced

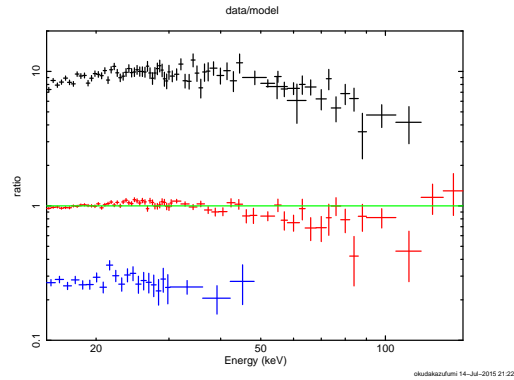


図 5: powerlaw によるフィッティングとのデータの比。データ A が黒、データ B が赤、データ C が青のプロットに対応し、データ B に対するモデルとの比を取っている。

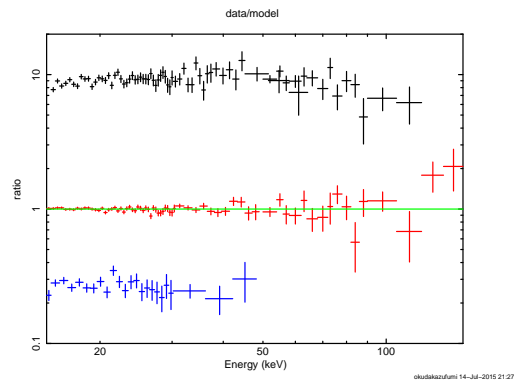


図 6: bknpower モデルによるフィッティングとのデータの比。データ A が黒、データ B が赤、データ C が青のプロットに対応し、データ B に対するモデルとの比を取っている。

$\chi^2 = 1.09$ (for 91 dof) であり、表 1 のパラメータはデータ B,C については説明できていることがわかる。

## 4 Discussion and Conclusion

Cygnus X-1 の HTC の光度は短いタイムスケールで激しく変動しているが、15–60 keV のエネルギー帯域では光度におよそ 33 倍の変動があってもスペクトルの形状にあまり変化が見られなかった。このようなスペクトルの普遍性については、数ヶ月という長いタイムスケールでは既に確認されていたが (McConnell et al. 2002)、今回数百秒という短いタイムスケール

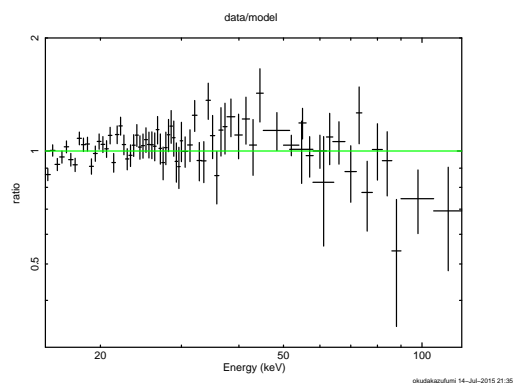


図 7: 図 6 のモデルの normalization をデータ A に合わせ、データ A との比を取ったもの。

について確認することができた。大きな光度変化に対してスペクトルの形状があまり変わらないことは、単純なコンプトン過程のモデルでは説明できない。また、最も光度が高いデータ A は、60 keV 以上に他のデータには無いスペクトルの折れ曲がりが見られた。これも「すぎく」の観測により今回初めて明らかになったもので、BHB の放射メカニズムに迫る手がかりになると考えられる。

## Reference

McConnell et al. 2002. APJ,572,984

Makishima et al. 1986. APJ,308,635

Makishima et al. 2008. PASJ,60,585