

## ブラックホール候補天体 XTE J1856+053 の X 線観測

田中 結 (青山学院大学大学院 理工学研究科)

### Abstract

ブラックホールは単体で明るく輝くことはないが、恒星と近接連星系をなしている時など、ブラックホールの周りに降着円盤が形成され、そこからの放射を観測することができる。

XTE J1856+053 は、1996 年 9 月 17-18 日に RXTE/PCA の銀河リッジ探査によって発見された X 線天体である (Marshall et al. 1996)。RXTE/ASM の観測によると 9 月 10 日に初めて検出され、9 月 15-17 日に X 線フラックスのピークを向かえたことが報告されている。XTE J1856+053 は 2007 年に再増光し、3 月 14 日に XMM-Newton によって観測され中心天体の周りの降着円盤のスペクトルはソフト状態のモデルとよく合っていることが報告されている (Sala et al. 2008a)。今回は、XMM-Newton の再解析を含め、「すざく」、RXTE/PCA、Swift/XRT の計 6 回の観測データを解析し、中心天体の質量に制限をつけることを目的とする。すべての X 線スペクトルは、温度約 0.7keV の降着円盤からの多温度黒体放射で概ね近似でき、得られた放射領域 (内縁半径) から、距離 10kpc、軌道傾斜角  $25^\circ$  と仮定すると質量は  $4.6 \pm 0.1 M_\odot$  と求まった。また、中心天体がブラックホールで銀河系内にあると仮定すると、距離は 8 – 23kpc、質量は 3 – 8 $M_\odot$  と制限を付けることができた。

## 1 Introduction

XTE J1856+053 は、1996 年 9 月 17-18 日に RXTE/PCA の銀河リッジ探査によって発見された X 線天体である (Marshall et al. 1996)。1996 年に観測された compton/BATSE(20-100 keV) のライトカーブでは、フラックスのピークが 9 月 7-9 日であり、これは RXTE/ASM(1.5-12 keV) によって観測された X 線フラックスのピークより約 8 日間早かった (Barret et al. 1996)。XTE J1856+053 は 2007 年に再増光し、3 月 14 日に XMM-Newton 衛星によって観測され中心天体の周りの降着円盤のスペクトルはソフト状態のモデルとよく合っていることが報告されている (Sala et al. 2008a)。2007 年のアウトバーストは RXTE/ASM によって検出された (Levine et al. 2007)。2007 年にも 2 回アウトバーストが検出されていて、XMM-Newton の他にも、Swift、RXTE、「すざく」衛星で合わせて 6 回観測された。2007 年の最大 X 線フラックスは 5 月 28 日に ~110 mCrab に達していた。また、2007 年のアウトバーストは口径 6.5m の Magellan Baade 望遠鏡で近赤外線領域において追観測がなされている。この観測で近赤外線 XTE J1856+053 の位置と対応する天体が発見された。観

測は、3 月 11 日と 5 月 8 日に行われており、それぞれ  $K_s=16.43 \pm 0.05$  mag,  $17.8 \pm 0.1$  mag と報告されている (Torres et al. 2007)。今回は、XMM-Newton の再解析を含め、2007 年に観測された 6 回のデータを用いてスペクトルフィッティングを行なった。

## 2 Data Analysis

XTE J1856+053 は、2007 年に 2 回のアウトバーストが観測されている。図 1 に XTE J1856+053 が 2007 年にアウトバーストした時のライトカーブを示し、各パネルに表示した矢印は、それぞれの検出器の観測日時を表している。

解析には、HEADAS バージョン 6.12 を使用した。「すざく」衛星のデータは、XIS は 1/4 Window モード、Edit mode は  $3 \times 3$  が使われ、XIS の HXD ノミナルポジションで観測された。本解析ではパイルアップの影響が 4%以上のところを除いている。スペクトルの積分領域として用いたのは中心から半径 0.9 分 (56 pixel) を除いた半径 4.3 分 (250 pixel) の円である。バックグラウンドとして用いたのは、XIS0,3 については天体からの寄与がないイメージの上の端

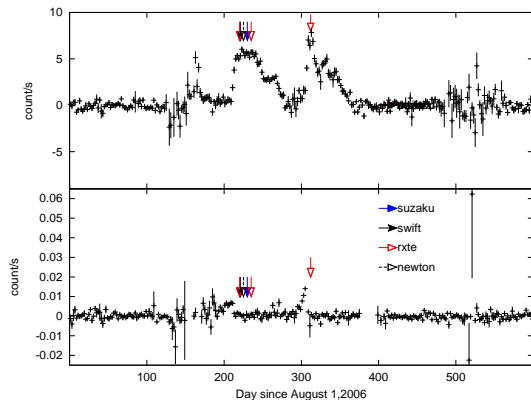


図 1: 2007 年に XTE J1856+053 がアウトバーストしたときの RXTE/ASM(上) と Swift/BAT(下) のライトカーブ。それぞれの矢印は、各検出器の観測した時間を表している。

の四角形で、XIS1 ではイメージの両端の四角形である。この領域を使って、それぞれスペクトルを作った。HXD は PIN 型半導体検出器だけで、検出された。

一方 Swift/XRT では、正味の観測時間は、1.2 ksec で、Photon Counting モードで観測された。Swift の U.K. サイトの自動解析ツール (Evans et al. 2009) を用いて、イメージとライトカーブとスペクトルを作成した。

RXTE/PCA は、2007 年 (1)3 月 9 日,(2)24 日,(3)6 月 10 日の 3 回観測され、正味の観測時間はそれぞれ 2.9 ksec,3.1 ksec,0.3 ksec であった。(1),(2) は、2007 年の 1 回目のアウトバースト時を観測していて、(3) は 2 回目のアウトバースト時を観測している。

XMM-Newton 衛星では、RGS と EPIC の pn-type によって観測された。今回は、EPIC-pn のデータを用いる。露光時間は 1.5 ks で、Timing mode、Filter は Medium を使って観測された。Science Analysis Software(SAS) はバージョン 12.0.1 を使用した。カウントレートが 0.4 cts 以下の時間で、エネルギーは 150 eV 以上、single+double のイベントファイルを作った。実際にスペクトルを作るのに使用したものは、382 秒のデータである。使用した天体領域は、 $29 \leq \text{RAWX} \leq 47$ 、バックグラウンド領域は  $3 \leq \text{RAWX} \leq 5$  としている。

## 3 Results

### 3.1 diskbb モデルによるフィッティング

最初に、ブラックホール連星系のソフト状態を表す diskbb モデルを使用してフィッティングを行う。用いたモデルは、 $\text{wabs} \times \text{simpl} \otimes \text{diskbb}$  である。RXTE/PCA の 1 回目のアウトバーストの時のデータ 2 つを diskbb モデルでフィッティングしたとき、6.4 keV 付近に輝線が見えた。ベストフィットの  $\chi^2$  の値は、それぞれ 36.5(自由度 38), 55.0(自由度 38) である。この 2 つのデータに輝線を表すモデル  $\text{gaussian}$  を付け加えた  $\text{wabs} \times (\text{simpl} \otimes \text{diskbb} + \text{gaussian})$  でフィッティングを行うと、 $\chi^2$  の値は、22.6(自由度 35), 28.3(自由度 35) となった。 $\text{gaussian}$  を付け加えたモデルの方が  $\chi^2$  が有意に改善されたので、このモデルをベストフィットとした。それぞれのベストフィット時のパラメータの値を表 1 に示す。ここに書いてある誤差はすべて信頼度 90% に対応するものである。表 1 に示した diskbb モデルの内縁半径  $R_{\text{in}}$  の値は、天体から観測者までの距離を 10 kpc、軌道傾斜角を 25 度としたときの値である。表 1 から、すべてのデータのスペクトルは diskbb モデルで表せるので、ブラックホールのソフト状態の典型的なスペクトルであることがわかった。

### 3.2 kerrbb モデルによるフィッティング

さらに、中心天体の質量に制限をつけるために kerrbb モデルを用いて、6 つのデータのスペクトルフィッティングを行った。フィッティングに用いたモデルは  $\text{wabs} \times \text{simpl} \otimes \text{kerrbb}$  である。今回は、シュバルツシルトブラックホールだと仮定し、kerrbb モデルの角運動量を表すパラメータ  $a$  は 0 に固定している。ベストフィット時のパラメータの値を表 2 に示す。表 2 は、kerrbb モデルの距離を 10 kpc、軌道傾斜角を 25 °、規格化定数を 1 に固定してフィッティングしたときのパラメータの値である。また、PCA(1),(2) に関しては  $\text{gaussian}$  モデルを加えている。

表 1: diskbb モデルでのベストフィットパラメータ

Model	Parameter	Suzaku	XRT	PCA(1)	PCA(2)	PCA(3)	EPIC-pn
wabs	$N_H \cdot 10^{22} \text{cm}^{-2}$	$3.1^{+0.1}_{-0.1}$	$3.7^{+0.5}_{-0.4}$	3.1(fixed)	3.1(fixed)	3.1(fixed)	$3.6^{+0.2}_{-0.2}$
simpl	$\Gamma$	$1.6^{+0.6}_{-0.6}$	2.0(fixed)	2.0(fixed)	2.0(fixed)	2.0(fixed)	2.0(fixed)
	$f \cdot 10^{-3}$	$0.6^{+0.1}_{-0.8}$	$15.3^{+21.3}_{-15.3}$	$4.1^{+0.3}_{-0.3}$	$2.8^{+0.3}_{-0.3}$	$0.5^{+0.6}_{-0.5}$	$3.6^{+1.8}_{-1.7}$
diskbb	$T_{\text{in}}(\text{keV})$	$0.73^{+0.01}_{-0.01}$	$0.74^{+0.08}_{-0.09}$	$0.74^{+0.01}_{-0.01}$	$0.72^{+0.01}_{-0.01}$	$0.78^{+0.01}_{-0.01}$	$0.75^{+0.01}_{-0.01}$
	$R_{\text{in}}(\text{km})$	$33.4^{+0.4}_{-0.3}$	$43.7^{+20.9}_{-11.8}$	$35.5^{+0.7}_{-0.6}$	$37.7^{+0.8}_{-0.7}$	$38.1^{+1.2}_{-1.1}$	$29.4^{+2.1}_{-1.9}$
$\chi^2/\text{d.o.f}$		889.3/654	66.0/74	22.5/35	28.3/35	40.7/38	122.2/95

表 2: Kerrbb モデルのベストフィットパラメータ。

Model	Parameter	Suzaku	XRT	PCA(1)	PCA(2)	PCA(3)	EPIC-pn
wabs	$N_H \cdot 10^{22} \text{cm}^{-2}$	$3.2^{+0.1}_{-0.1}$	$3.7^{+0.5}_{-0.4}$	3.1(fixed)	3.1(fixed)	3.1(fixed)	$3.7^{+0.2}_{-0.2}$
simpl	$\Gamma$	1.55(fixed)	2.0(fixed)	2.0(fixed)	2.0(fixed)	2.0(fixed)	2.0(fixed)
	$f \cdot 10^{-3}$	$0.5^{+0.1}_{-0.1}$	$12.5^{+20.0}_{-12.5}$	$3.6^{+0.3}_{-0.2}$	$2.4^{+0.3}_{-0.2}$	$0.3^{+0.3}_{-0.3}$	$2.8^{+1.7}_{-1.5}$
kerrbb	$M_{\text{bh}}(M_{\odot})$	$3.5^{+0.1}_{-0.1}$	$4.5^{+2.3}_{-1.2}$	$3.9^{+0.1}_{-0.1}$	$4.0^{+0.1}_{-0.1}$	$4.0^{+0.1}_{-0.1}$	$3.1^{+0.2}_{-0.2}$
	$\dot{M} \cdot 10^{18} \text{gs}^{-1}$	$1.0^{+0.1}_{-0.1}$	$1.8^{+0.6}_{-0.3}$	$1.2^{+0.1}_{-0.1}$	$1.2^{+0.1}_{-0.1}$	$1.7^{+0.1}_{-0.1}$	$0.9^{+0.1}_{-0.1}$
$\chi^2/\text{d.o.f}$		897.8/654	65.9/74	18.4/37	34.1/37	47.4/37	122.6/95

## 4 Discussion

### 4.1 パラメータの議論

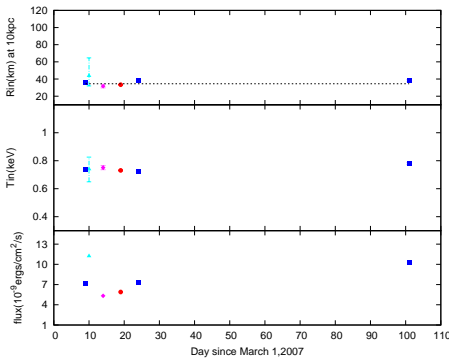


図 2: diskbb モデルのパラメータの時間変化

diskbb モデルで 6 つのデータをフィッティングしたときに求めたパラメータの時間変化を図 2 に示す。横軸は 2007 年 3 月からの日付を表して、一番下のパネルは、全周波数フラックス (bolometric flux) を表している。図 2 を見るとフラックスは時間とともに変化しているのに対して、内縁半径  $R_{\text{in}}$  は大きな変化が見えず、時間がたっても約 35km であることが分かる。標準円盤の内縁半径は、最小安定円軌道の半径

に一致して一定になるはずである。計 6 回のデータは、全て多温度黒体放射 diskbb モデルで説明でき、フィッティングパラメータから、温度は、0.72 keV から 0.78 keV で、この天体の内縁半径は大きく変化していないことから、XTE J1856+053 は high/soft 状態であることがわかる。

### 4.2 diskbb モデルからの質量の見積り

diskbb モデルでフィッティングしたときのパラメータから内縁半径はほとんど変化していないことがわかる。6 つの観測によって求めた内縁半径の平均を求めると、 $34.52 \pm 0.47 \text{km}$  となる。ここで誤差は、信頼度 90%としている。この内縁半径はスペクトルから求めた見かけの半径なので、本当の内縁半径にするために補正を行う (Kubota et al. 1998)。補正を加えた後の内縁半径は  $41.10 \pm 0.56 \text{ km}$  となる。シュバルツシルト半径は、 $R_s = 2GM/c^2$  と表されるので、ブラックホールの質量は式 1 で求められる。よって、距離が 10 kpc、軌道傾斜角が  $25^\circ$  のときの中心天体の質量は、

$$M = 4.6 \pm 0.1 M_{\odot} \left( \frac{\cos\theta}{\cos 25^\circ} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{D}{10 \text{kpc}} \right) \quad (1)$$

と求めることが出来た。

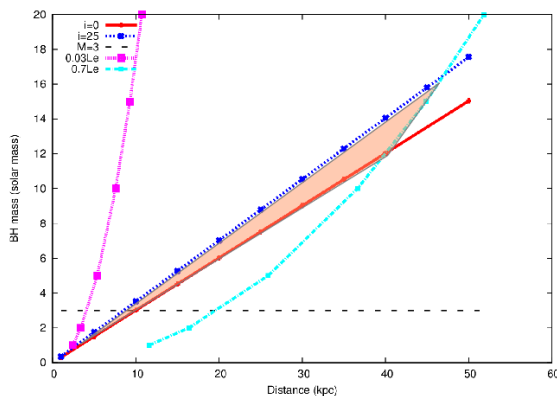


図 3: 「すざく」衛星のデータから求めた距離に対する質量の変化。

### 4.3 kerrbb モデルからの質量と距離の制限

最初に kerrbb モデルを用いて、軌道傾斜角の範囲に制限をつける。そのため、「すざく」衛星のデータを用いて、軌道傾斜角とブラックホール質量の 2 つのパラメータで、confidence contour を描いた。距離を 5, 10, 23 kpc に固定したときの confidence contour は、距離によってブラックホールの質量は変化しても、軌道傾斜角はほとんど同じ範囲であることが見て取れた。どの距離を仮定したときでも、信頼度 90% の confidence contour は、軌道傾斜角が  $25^\circ$  以下の範囲に収まっていることが分かるので、軌道傾斜角の範囲は  $0^\circ \leq i \leq 25^\circ$  と考えられる。

今度は、「すざく」のデータを kerrbb モデルでフィッティングするときに、軌道傾斜角は一定に固定して、距離を変化させた時のブラックホールの質量の値を求めた。その結果が図 3 である。図 3 の曲線は、エディントン限界光度の距離に対する質量の変化率を表している。この連星系の光度の下限値は、典型的なブラックホールの最小光度であるエディントン限界光度の 3%、上限値は、Sala et al.(2008) で指定しているエディントン限界光度の 70%としている。軌道傾斜角は  $0^\circ \leq i \leq 25^\circ$  の範囲と考えられるので、距離と質量の許される範囲は図 3 のオレンジに塗られているところに限られる。このことから、距離と

質量の範囲は、

$$\begin{aligned} 1 \leq M[M_\odot] \leq 17 \\ 2 \leq D[\text{kpc}] \leq 47 \end{aligned} \quad (2)$$

と評価できる。本天体は、我々の銀河系内にあると考えるのが妥当であるので、距離と質量の範囲は、

$$\begin{aligned} 3 \leq M[M_\odot] \leq 8 \\ 8 \leq D[\text{kpc}] \leq 23 \end{aligned} \quad (3)$$

と考えられる。

## 5 Conclusion

XTE J1856+053 が、2007 年に増光したときに観測された 6 つのデータのスペクトル解析を行った。その結果、それぞれの検出器で得られたスペクトルは、ブラックホールの典型的なスペクトルであった。スペクトルのモデルは、多温度黒体放射モデル (diskbb) で表せ、このブラックホール候補天体のソフト状態の質量は、距離 10 kpc、軌道傾斜角  $25^\circ$  とした時、diskbb モデルから  $4.6 \pm 0.1 M_\odot$  と求まる。中心天体はブラックホールであり、我々の銀河系にあると考えられるので、この天体の距離と質量には  $3 \leq M[M_\odot] \leq 8, 8 \leq D[\text{kpc}] \leq 23$  と制限をつけることができた。

## Reference

- Barret, D., Grindlay, J. E., Bloser, P. E., Harmon, B. A., Zhang, S. N., Wilson, C. A., Robinson, C. R. & Paciesas, W. S. 1996, IAUC, 6519
- Evans, P. A., et al. 2009, MNRAS, 397, 1177
- Kubota, A., Tanaka, Y., Makishima, K., Ueda, Y., Dotani, T., Inoue, H. & Yamaoka, K. 1998, PASJ, 50, 667
- Levine, A. M., Remillard, R. A., & the ASM team at MIT and NASA/GSFC 2007, ATel, 1024
- Marshall, F. E., Ebisawa, K., Remillard, R., & Valinia, A. 1996, IAUC, 6504
- Sala, G., Greiner, J., Ajello, M. & Primak, N. 2008, A&A, 489, 1239
- Torres, M.A.P., Steeghs, D., Jonker, P.G., Morrell, N., Roth, M. & Kerber, F. 2007, ATel, 1072