

# RXTE衛星によるブラックホール天体 XTE J1550 - 564 の X線スペクトル解析

Spectral analysis of XTE J1550-564 with RXTE

X線天文学研究室 BP18099 藤沢 将伍 指導教員：久保田 あや 教授

## 1 背景と目的

ブラックホールは、太陽の30倍以上の恒星が進化の最終段階で重力崩壊を起こすことで生まれる天体である。光すら抜け出せない重力を持つ。そのため電磁波での直接の観測は不可能である。しかし図1のようにブラックホールにガスなどの物質が落ち込む際、摩擦を伴いながら回転することで降着円盤と呼ばれる円盤を形成し、その円盤が黒体放射を起こすことで間接的に観測が可能になる。通常の恒星と連星系を成す場合、その恒星からの単位時間あたりの質量降着量(降着率  $\dot{M}$ )により、円盤からの放射強度は大きく変化する。また、 $\dot{M}$ の変化に伴って降着円盤の構造も変化する。明るい状態からそれぞれ Very High State(VHS)、High/Soft State(HSS)、Low/Hard State(LHS)と分類されている(文献[1])。電波による観測から、VHSで一過的に強力な、ジェットと呼ばれる円盤に対し垂直に放射されるプラズマが報告されている(文献[2])。

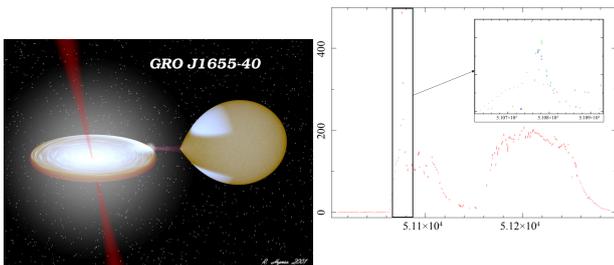


図1: BHの図(文献[3]) 左い時間帯と843MHz(青)、がブラックホール、右が通1.4GHz(緑)のフラックス密度(文献[4])の関係

ジェットの確認される時間帯においては、状態図から推測されるスペクトルのモデルと比較したときに他の状態に比べて一致しないことがわかっている(文献[2])。本研究は、ジェット放出が報告された前後のX線スペクトルを解析し、ジェット由来と考えられるX線放射成分を特定し、降着円盤とジェットの相互関係に迫ることを目的とする。

## 2 RXTE衛星による XTE J1550-564 の観測

RXTE衛星は、1995年12月にNASAによって打ち上げられたアメリカのX線天文衛星である。地球から600kmの高度を90分ほどで周回する。2012年1月までの約16年間観測を続けた。PCA、HEXTE、ASMという3つの観測機器を搭載している。PCAは2-60keVのエネルギー分解能を持ち、高精度の観測が可能である。HEXTEは15-250keVと広範囲の観測が可能である。XTE J1550-564はRXTE衛星によって1998年9月7日に発見された連星系ブラックホールである。質量は太陽質量の $9.10 \pm 0.61$ 倍、軌道傾斜角は $i = 74^\circ.7 \pm 3^\circ.8$ である(文献[5])。

図2にRXTE衛星搭載の全天観測装置で得られたXTE J1550-564のX線強度の変化(ライトカーブ)を示す。図2の四角の部分では強い電波放射が観測されており(文献[4])、その部分のライトカーブの拡大と電波放射の時間変動を表示したものを図中に示してある。ジェットの噴出があると電波が放出されるが、X線強度が最大となったMJD510605において電波放射が検出され始め、その後12日遅れて、電波がピークに達している。そこで、ピークを挟んで前後の5観測のX線データを解析した。観測日はMJD=51074であり、最初の観測から01,02,03,04,05とID付けすることとする。ピークの観測は02である。

## 3 VHSの標準的描像によるスペクトル解析

01-05の5つの観測データをVHSの標準的なスペクトルモデルで解析した。ここでは、01,02,03,05の結果を示す。VHSは、図3のように、光学的に厚く、幾何学的に薄い標準降着円盤を光学的に薄い高温のプラズマが覆っている描像で理解される(文献[1])。また、高温プラズマは300keV程度の超高温のコロナと10keV程度のやや低温のコロナの2種類で記述される。スペクトル解析にはNASAで供給されているxspecというパッケージを用いて行ったが、上記の描像から、xspec上ではtbabs\*(diskbb+nthcomp+nthcomp)という形でスペクトル評価を行った。ここでdiskbbは降着円盤が黒体放射するときのスペクトルを表したモデルで(文献[6])、nthcompが高温プラズマによる逆コンプトン散乱放射を記述するモデル(文献[7])である。また、tbabsは天体から地球までに間にある星間物質によるX線の吸収を記述する。この結果を図4およびベストフィット値を表1にしめす。データとモデルの差分を表した $\chi^2/\text{dof}$ の値から、ジェットの影響の少ない、01,03,05ではデータはモデルを再現するが、もっとも明るい観測02ではモデルは棄却されていることがわかる。



図3: VHS時の、降着円盤と2つのプラズマガスの想像図

表1: 各時間のフィットの値と $\chi^2/\text{dof}$ の値

Model	Parameter	01	02	03	05	再評価
semedge	edgeE	$7.6 \pm 0.2$	$8.8 \pm 0.3$	$7.5 \pm 0.2$	$7.7 \pm 0.2$	$7.0 \pm 9.1$
diskbb	Tin	$0.7 \pm 0.04$	$0.8 \pm 0.05$	$0.8 \pm 0.05$	$0.56 \pm 0.5$	$0.3 \pm 30.9$
diskbb	norm	$6900 \pm 1380$	$0.8 \pm 98$	$3300 \pm 501$	$6150 \pm 1500$	$125 \pm 5700$
gaussian	LineE	$6.3 \pm 0.07$	$6.5 \pm 0.05$	$6.2 \pm 0.15$	$6.2 \pm 0.14$	$6.2 \pm 1.07$
nthComp1	Gamma	$2.0 \pm 2.4$	$2.0 \pm 1.03$	$2.0 \pm 5.56$	$2.0 \pm 6.67$	$3.0 \pm 36310$
nthComp1	kT <sub>e</sub>	$50 \pm 107$	$68 \pm 87$	$300 \pm 1600$	$300 \pm 15000$	$10 \pm 76440$
nthComp2	Gamma	$2.52 \pm 0.07$	$2.7 \pm 0.06$	$2.6 \pm 0.17$	$2.8 \pm 0.53$	$3.0 \pm 31.3$
nthComp2	kT <sub>e</sub>	$9.36 \pm 4.0$	$10.5 \pm 2.4$	$14.7 \pm 12$	$21.3 \pm 57$	$300 \pm 17040$
$\chi^2/\text{dof}$		$56.5/88$	$234/90$	$50.5/90$	$124/90$	$124/72$

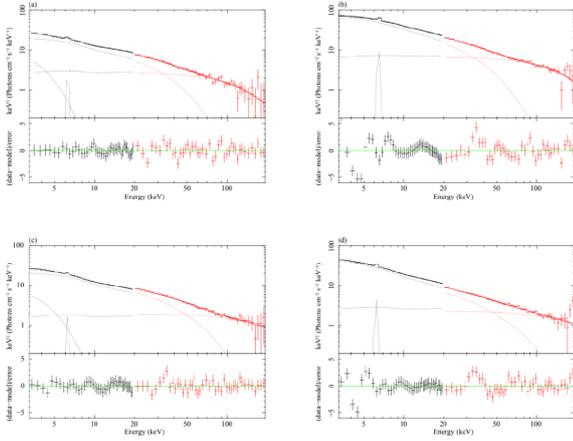


図 4: VHS の fit 結果。(a)01,(b)02,(c)03,(d)05

## 4 差分スペクトル

3章から、もっとも X 線強度が高い 02 の観測はこれまでの描像ではスペクトルを再現しないことがわかったので、ここにジェット由来の放射成分が付加されていると考えられる。その成分を抽出するため、02 のスペクトルから前後のスペクトルを差し引いた差分スペクトルを power-law, cutoff power-law, broken power-law で評価したところ、broken power-law がデータをよく再現した。cutoff power-law は power-law モデルに  $E_{cut}$  で指数関数的に減衰させるモデルであり、broken power-law は  $E_{bkn}$  で power-law の光子指数が変化するモデルである。図 5 は観測 02 から観測 01 を引いたスペクトルを broken power-law で再現したものである。

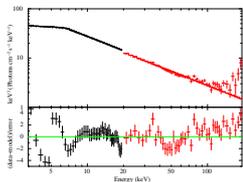


図 5: 02-01 の bknp モデル 図 6: PCA のライトカーブでの fit 結果  
RATE=65550 が境界線

次に、より短時間の変動成分があるかを検証した。観測 02 において PCA のライトカーブで平均値 (図 6 の直線) よりカウントレートの高い時間帯と低い時間帯でそれぞれスペクトルを抽出し、高い時間帯から低い時間帯を差し引いたスペクトルを評価したところ、cutoff power-law モデルでよく再現した。図 7 は短時間の差分スペクトルを cutoff power-law で評価したものである。これらの結果により、ジェットには長期的な broken power-law と短期変動を示す cutoff power-law の 2 成分があると考えられる。これを検証するため、図 5 の 02-01 のスペクトルを broken power-law + cutoff power-law で評価した結果を図 6 に示す。表 4 から、モデルは図 5 よりもデータをよく再現したとわかる。

表 2: 各モデルのフィットの値と  $\chi^2/\text{dof}$  の値

Model	Parameter	02-01bknp	上-下 cutoffp	02-01bknp+cutoffp
bknp	$E_{bkn}$	$6.70 \pm 0.04 \text{ keV}$		$6.50 \pm 0.06 \text{ keV}$
bknp	$\Gamma_{low}$	$2.24 \pm 0.01$		$2.24 \pm 0.06$
bknp	$\Gamma_{high}$	$2.96 \pm 0.003$		$2.93 \pm 0.03$
cutoffp	$E_c$		$16.0 \pm 2.50 \text{ keV}$	$5.26 \pm 3.50 \text{ keV}$
cutoffp	$\Gamma$		$1.74 \pm 0.10$	$1.09 \pm 1.66$
$\chi^2/\text{dof}$		250/85	131.6/85	218/82

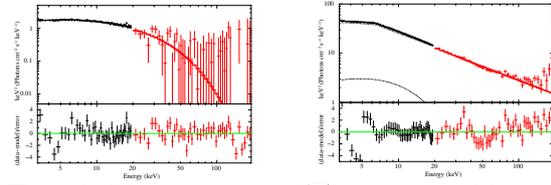


図 7: 上-下の cutoffp モデル 図 8: 02-01 の bknp+ cutoffp での fit 結果

## 5 スペクトルの再評価

以上の検証に基づいて観測 02 を再評価した。通常の VHS のモデルである  $\text{diskbb} + \text{nthcomp} + \text{nthcomp}$  (VHS モデルとする) に加えて、今回抽出した broken powerlaw + cutoff powerlaw (jet モデルとする) を用いて、 $\text{tbabs} * (\text{VHS model} + \text{jet model})$  によってスペクトルを評価した結果を図 9 に示す。ここで、jet model については形状を決めるパラメータは 4 章で決めた値に固定した。この結果は表 1 の再評価で示すとおりになり、 $\chi^2/\text{dof}$  を 234/90 から 124/72 と値を大きく減らすことができた。

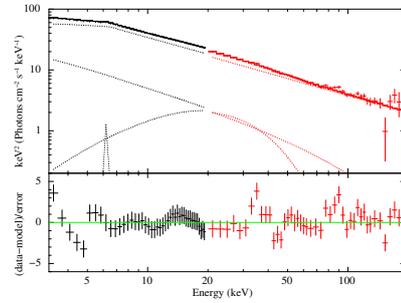


図 9: ジェットの時間帯の、標準降着円盤+cutoffp+bknp のモデルでの fit 結果

ただしこの値は、ジェットの直前の時間帯の fit 結果 56.5/88 や、直後の時間帯の 50.5/90 よりも大きいことから、bknp、cutoffp のモデルを加えただけではジェットの時間帯のモデルを完璧に作成することが出来たとは言えない。

## 6 まとめと結論

5つのデータの解析から、ジェットの観測された時間帯は VHS のモデルに fit させても一致しないことがわかった。そこで前後の時間帯や光量との比較から再現したモデルを追加して再評価することで、一致しない成分を減らすことが出来た。

## References

- [1] 久保田 あや 2022 分光研究 70 巻 6 号 印刷中
- [2] Fender, R. P, Belloni, T. M, 2004 MNRAS, 355 1105
- [3] <http://www.phys.lsu.edu/rih/binsim/j1655.html>
- [4] Hannikainen, D. C., Hunstead, R. W., Wu, K., 2009 MNRAS 569
- [5] Steiner, James F et al. 2011, MNRAS, 416, 941S
- [6] Mitsuda, K. et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [7] Zdziarski, Johnson, Magdziarz, 1996, MNRAS, 283, 193