

# RXTE衛星によるブラックホール天体 XTE J1550 – 564 の準周期振動とエネルギー依存性の研究

Study of energy dependency of QPO of XTE J1550 – 564 with RXTE

X線天文学研究室 BP19067 水川 竜希

指導教員：久保田 あや 教授

## 1 ブラックホールと QPO

ブラックホール (以下 BH) とは、大質量の恒星が一生を終えて生まれ変わる、高密度な天体である。その強い重力で光が脱出できず、単独の BH は観測できないが、恒星と近接連星系を成していると周りの角運動量を持ったガスが BH に落ち込み、回転して降着円盤を形成する。降着物質は粘性摩擦により数千万度になり X 線を放射する。この X 線を捉えることで BH を間接的に観測することができる [1]。

BH 連星ではしばしば準周期振動 (Quasi-Periodic Oscillation、以下 QPO) と呼ばれる、周期が完全に一定でない時間変動が観測され、PSD では幅の広いピークとして特徴付けられる [2]。QPO は X 線スペクトルにおいて硬 X 線が相対的に強いハードな状態で観測されることが多く、降着円盤の周りに存在する温度が数 10keV (キロ電子ボルト) の高温プラズマが起源と考えられている。本研究では強い QPO が報告されている BH 天体 XTE J1550 – 564 の Rossi X-ray Timing Explorer 衛星 (以下 RXTE 衛星) の観測データを用いて PSD のエネルギー依存性を精査する。

## 2 RXTE 衛星

RXTE 衛星は、1995 年 12 月 30 日に NASA によって打ち上げられた X 線天文衛星で、Proportional Counter Array (以下 PCA [4]: 2 – 60keV) と、High Energy X-ray Timing Experiment (HEXTE [5]: 15 – 250keV) により、広い有効面積で観測が可能である。PCA は時間分解能が  $1\mu\text{s}$ 、エネルギー分解能は 6keV で 18%、HEXTE は時間分解能が  $8\mu\text{s}$ 、エネルギー分解能は 60keV で 15% を達成する。本研究では短時間変動を解析するため、主として、光子数が多く統計的に有意な PCA の観測データを解析する。

## 3 RXTE による XTE J1550 – 564 の観測

図 1 は MIT の ASM/RXTE チームのホームページから得られた、XTE J1550 – 564 のライトカーブであり、横軸 MJD (修正ユリウス日)、縦軸カウントレートである。

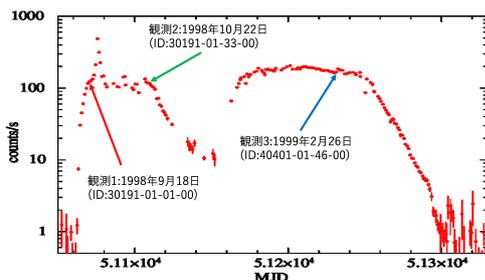


図 1: 天体のライトカーブ

7日から2004年6月6日まで415回観測されている。2020年度の総合研究 [7] で、エネルギーごとに分けられない QPO が調べられ、光度が高いほど光学的に厚い降着円盤が BH 近傍まで成長し、高温プラズマが小さくなるという結果が得られた。また、現在久保田によって QPO の周波数が高温プラズマのサイズに非常によく相関することが明らかにされつつある [8]。これらが正しければ、エネルギーごとに QPO の特徴を調べれば、高温プラズマの影響が大きい高エネルギー側で QPO への寄与が大きいはずである。

## 4 スペクトル状態と時間変動

図 2 は図 1 に矢印で示した 3 箇所 (観測 1、2、3) のスペクトルを示す。観測 1 (赤) と観測 2 (緑) は 10keV 以上の硬 X 線が強く高温コロナが発達した very high state (VHS; [1]) で、観測 1 は硬 X 線が少し多い High Intermediate State (HIMS) で、観測 2 は硬 X 線が少し少ない Soft Intermediate State (SIMS) である。観測 3 (青) は降着円盤の黒体放射による 10keV 以下の軟 X 線が卓越し、硬 X 線がほぼない soft state [1] である。

図 3 はエネルギー帯を変えて作成した時間変動の PSD である。VHS (観測 1、2) と soft state (観測 3) を比較すると、soft state では平均カウントレートに対する変動が 0.1% 未満で特徴的な周波数はあまり見られない。VHS では顕著な QPO が観測されており、特に観測 1 では全体的に大きく時間変動していることがわかる。同じ VHS でも観測 1、2 を比較すると、観測 1 では全エネルギー帯で連続的な変動に対する QPO の強度は変化しないが、観測 2 では高エネルギー帯で QPO が強い。よって、QPO が高温プラズマ起源であるという仮説が正しければ、観測 1 から 2 にかけて高温プラズマの領域が狭くなり、観測 2 の低エネルギー側では円盤の放射成分が効いているものと考えられる。

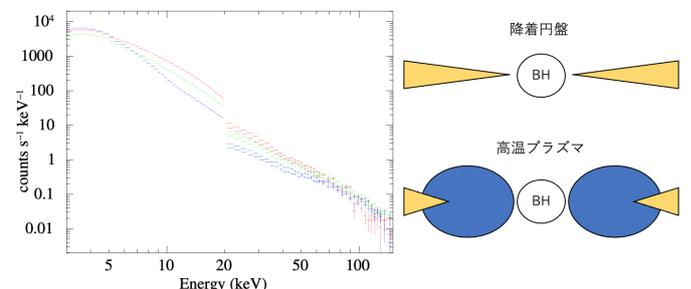


図 2: 左の図は時間別のスペクトル。赤、緑、青は順に観測 1、2、3 のデータ。右上の図は降着円盤が発達した様子の BH の模式図。右下の図は降着円盤が後退し、高温プラズマが発達した様子の BH の模式図。

XTE J1550 – 564 は RXTE 衛星によって、1998 年 9 月

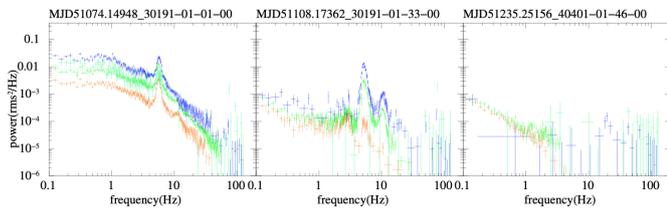


図 3: エネルギー帯 4keV 以下 (赤)、4keV 以上 13keV 以下 (薄緑)、13keV 以上 30keV 以下 (青)、30keV 以上 (緑) の PSD。左から観測 1、2、3 のデータ。

## 5 PSD の解析

PSD の解析は HEASARC のソフトの一つである Xspec を使用して行う。解析について、スペクトルに任意の関数を当てはめ、スペクトルの形を考えることをモデルフィットという。今回解析に使うモデルについて、冪乗則で知られる power law や、途中で指数関数的な減衰が始まる cutoff power law、正規分布で知られるガウス関数、コーシー分布で知られるローレンツ関数がある。power law の式は  $f(\nu) = K\nu^{-\alpha}$ 。cutoff power law の式は  $f(\nu) = K\nu^{-\alpha} \exp(-\nu/\beta)$  である。

図 3 の PSD のピークにガウス関数またはローレンツ関数をフィットさせて、ピークの位置やピークの高さを考える。例として図 4 は、図 3 の観測 1 の 4keV 以下の PSD をフィットしたものである。上の図の点線はモデルであり、下の図の縦軸はデータとモデルの差をモデルの誤差で割った数であり、緑の線に近いほどモデルがフィットしている。観測 1 の時は、7Hz あたりの大きいメインピークと左右にもサブピークがあることがわかる。観測 2 の時は、5~6Hz あたりの大きいメインピークと右にサブピークがあることがわかる。

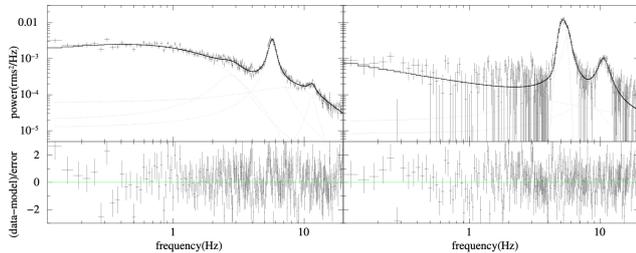


図 4: 左の図は観測 1 の 4keV 以下の PSD にモデルフィットした図。右の図は観測 2 の 13keV 以上 30keV 以下の PSD にモデルフィットした図。

## 6 モデルフィット結果

モデルフィットした結果を図 5 に示した。全てのグラフにおいて横軸は MJD である。図 5 の点の色は、図 3 のスペクトルの色で緑が紫になったものと同じである。図 5 の各パラメータについて、上から順に、countrate は PCU 1 台あたりの平均カウントレート。HR は 13keV 以上の、13keV 以下に対するハードネスレシオ (以下 HR)。HR の線について 0.06 以上は HIMS、0.06 未満は SIMS である。power は PSD の 0.1-20Hz の power(rms<sup>2</sup>)。fc\_bin と fc.event は、低エネルギー側 (binned mode) と高エネルギー側 (event mode) のメインピークの周波数  $f_c$ 。QPO power は、メイン QPO の power(rms<sup>2</sup>)。Q は Q 値、eqw は等価幅 (Hz) である。ここで Q 値は、ピークの周波数を半値全幅で割ることで出る値であり、主に Q 値と周波数で QPO のタイプがわかる [3]。Q 値が大きいほど対数スケールで QPO の幅が狭いことを意味する。等価幅は  $f_c$  において連続的な変動 (ノイズ) に対する QPO の変動の強さを与える。

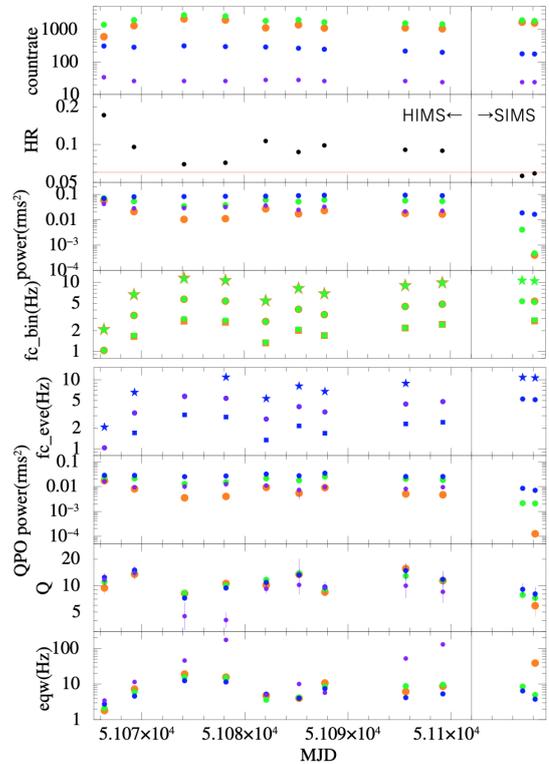


図 5: モデルフィット結果。MJD51102 に状態の境目がある。

## 7 まとめと考察

図 5 の 0.1-20Hz power について、これは観測 1(HIMS) の PSD(図 3 左) で全体的に power が大きいことと一致する。横軸 HR、縦軸  $f_c$ (Hz) の図を図 6 左、横軸  $f_c$ (Hz)、縦軸 QPO power の図を図 6 右に示した。色の意味は図 5 と同じで、丸は HIMS、円は SIMS である。まず図 6 左では、周波数が大きいと HR が小さい、つまり高温プラズマが小さいことが確かめられる。さらに図 6 右で、HIMS では周波数が高くなると低エネルギー側の QPO の power がどんどん低くなっており、周波数の高い SIMS では低エネルギー側と高エネルギー側の差が大きい。よって高温プラズマが小さくなると低エネルギー側から QPO の power が小さくなることから、高温プラズマの QPO への寄与が大きいと考えられる。

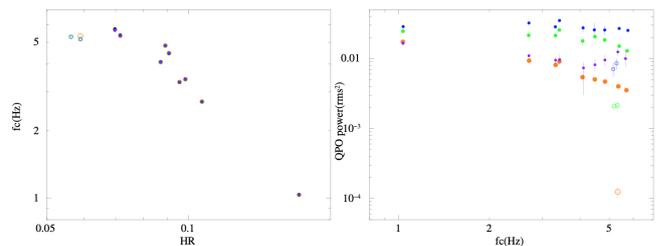


図 6: 図 5 の一部パラメータをまとめた図

本研究では、BH 天体 XTE J1550 - 564 の QPO のエネルギー依存性について RXTE 衛星で得られたデータから解析を行った。エネルギーごとに分けた PSD をモデルフィットして比べることにより、高温プラズマの成分の QPO への寄与が大きいことが確認できた。

## References

- [1] 久保田 2021, 分光研究, 70, 170
- [2] Strohmayer, Tod E. 2001, APJ, 552, 49
- [3] Caswila et al. 2005, APJ, 629, 403
- [4] Jahoda Keith et al. 1996, Proc. SPIE, 2808, 59
- [5] Rothschild, R E. et al. 1998, APJ, 496, 538
- [6] Levine, Alan M. et al. 1996, APJ, 469, L33
- [7] 鶴見一輝 総合研究論文 (芝浦工業大学) 2020
- [8] Kubota 2022 in prep