# RXTE衛星によるブラックホール天体 XTE J1550 - 564 の準周期振動 の研究

The study of the QPO of XTE J1550-564 with RXTE

X線天文学研究室 bp17077 鶴見一輝

指導教員: 久保田 あや教授

### 1 XTE J1550 - 564 と研究の目的

ブラックホールとは、強い重力により光でさえ脱出でき ない天体である。しかし、ブラックホールを中心として公 転しながら落ち込んでいく物質が (こうしてできた円盤を降 着円盤と呼ぶ)、物質同士の摩擦により熱エネルギーを持ち、 それらが電磁波を放射することで輝いている (文献 [1])。本 研究で解析する XTE J1550 – 564 は RXTE 衛星により発 見された質量 9.10 ± 0.61  $M_{\odot}$ 、軌道周期 1.55 日、距離 D =  $14.29^{+1.89}_{-1.34}$ kc、軌道傾斜角 i = 74°.7 ± 3°.8 の低質量 X 線連 星 (文献 [2])。宇宙ジェットや準周期振動 (Quasi-Periodic Oscillation;QPO) が観測されている天体で、文献 [3] にも あるように、Type C QPO の中心周波数とエネルギースペ クトルパラメータの間に、長時間のスケールで強い相関が あることがわかっている。本研究ではこの天体の光度デー タを解析し、QPO の発生メカニズムと円盤の状態の関係を 明らかにすることを目指す。

## 2 ブラックホールの状態と QPO

QPO とは周期が完全に一定ではない X 線強度の時間 変動のことで、パワースペクトルに、幅の広いピークが現 れるという特徴を持つ (文献 [4])。およそ 0.1Hz から 10Hz の間に見られる低周波 QPO は Q 値 (QPO の中心周波数 /FWHM) によって3つのタイプ (A,B,C) に分類される (文献 [5])。ブラックホールは単位時間に落ち込む物質の 量 (降着率 m) の違いによってスペクトルに大きな違いが 生じる。図1にその時の円盤の様子とスペクトルの例を引 用する。ブラックホール連星の場合、硬 X 線を多く含み 強度の低い Low/Hard State(LHS) と軟 X 線を多く含み強 度の高い High/Soft State(HSS) と、その中間状態である Intermediate State(IMS) が存在し、IMS の中でも Hard な 成分の強い Hard Intermediate State(HIMS) と Soft な成 分が強い Soft Intermediate State(SIMS)、そして高光度な Very High State(VHS) という状態を遷移する。HSS の時 降着円盤は光学的に厚く幾何学的に薄く、VHS では円盤は HSS と同様に光学的に厚く幾何学的に薄いがその周囲に光 学的に薄い高温コロナが存在していると考えられている(文 献 [6])。QPO は主に高温コロナの発達していると考えられ ている状態のLHS、HIMS、SIMS、VHS で観測されている。

# 3 RXTE/PCAからのパワースペクト ル作成

The Rossi X-ray Timing Explorer(RXTE 衛星) は 1995 年 12 月 30 日に打ち上げられ、2012 年 1 月 5 日に運用を 終了したアメリカの X 線天文衛星で、地球から 600km の 高度をおよそ 90 分で周回する。 3 種類の検出器を搭載する が、今回はエネルギー帯が 2~60keV で時間分解能が 1µs と 最も良い Proportional Counter Array(PCA) から得られた



図 1: 左図は連星系ブラックホールに見られる4つの円盤 の形状 (文献 [7])。中心の黒い点がブラックホールを表し、 左右に水平に伸びているのが標準円盤。小さな点の集合は 高温降着ガスである。

右図は GRO J1655 - 40 のそれぞれの状態毎のスペクトル [8]



図 2: XTE\_J1550-564 の MJD 51081 における 16s ごとの ライトカーブ (左) とパワースペクトル (右)

データを解析に使用した<sup>1</sup>。

XTE J1550 - 564 は RXTE 衛星に搭載された PCA に よって、1998 年 9 月 7 日 (MJD 51065.0676;MJD は修正ユ リウス日) から 2004 年 6 月 6 日 (MJD 53162.90911) の間に 188 回観測された。今回は全体のライトカーブから、特に変 動の大きかった区間の観測データに対し、NASA の ftools の POWSPEC<sup>2</sup>を用いてパワースペクトルを作成した。そ の例を図 2 に示す。3Hz 付近に幅の広いピーク、QPO が確 認できる。

#### 4 観測毎のフーリエ解析

観測データ毎にフーリエ解析を行い、QPOが発見できた データをまとめ解析を行った。QPOが発見できたデータの 各パラメータ (*Countrate*[counts/s]・ピークの中心周波数 [Hz]・*FWHM*[Hz]・*Q*値・関数の積分値 (*norm*))の時間 変動を図3に示す。パラメータは QPO の見られる PSD に 対してコーシー分布で知られる、ローレンツ関数 式 (1)を フィットさせることで得た。

$$f(\nu) = \frac{a}{\pi} \frac{\gamma}{(\nu - \nu_c)^2 + \gamma^2} \tag{1}$$

 $^{1}RXTE$ 

 $<sup>^{2}</sup> https://heasarc.gsfc.nasa.gov/lheasoft/ftools/fhelp/powspec.txt$ 



図 3: Countrate(上) とメインピーク (赤) とサブピーク (青)にパラメータの時間変化。上から順にピーク周波数、 FWHM、Q 値、関数の積分値 (norm) を示す。



図 4: Countrate と中心周波数・FWHM との相関 (左)。 相関係数は順に 0.6404、0.5889。中心周波数と FWHM・ norm との相関(右)。相関係数は順に0.8192、-0.9115。

ここで $\nu_c$ を中心周波数、 $\gamma$ をHWHM(= FWHM/2)と する。関数の積分値を示す norm は、norm =  $\pi a \gamma$  で計算 した。尚、今回解析したデータにはサブピークを持つこと のある B・C-Type QPO が多く確認できたため、サブピー クについても同様に時間変動を追った (図 3)。

どのパラメータも Countrate の変動に応じて大きさが 変化していることがわかる。そこで各パラメータに対して、 Countrate やピーク周波数との間の相関を調査した (図 4)。

図4から、ピークの中心周波数とFWHM、norm との間 には強い相関関係があることがみて取れる。Countrate と ピークの中心周波数、FWHM との間にも弱くはない相関 が発見できた。その他の相関係数は、Countrate と Q 値・ norm がそれぞれ-0.1501、-0.5729。ピークの中心周波数と Q 値が-0.2725 となった。また、各ピークの中心周波数につ いて、サブピークの確認できたデータにおいて、周波数の高 いピークの周波数を  $\nu_1$  低い周波数を  $\nu_2$  とした時、  $\frac{\nu_1}{\nu_2} \simeq 2$ となることが分かった。

#### 短時間に分割したフーリエ解析 5

XTE\_J1550-564の MJD 51081の観測データに対して、 立教大学の山田真哉氏の Python プログラム<sup>3</sup> による短時 間でのフーリエ解析を行った。今回は100秒毎の短時間解 析を行った (図 5)。

この図5は10s毎のパワースペクトルが1つの図にまと められている。幅の広いピークが 3Hz 付近に集中している ため、QPO は QPO 自体のピークが短時間で変動している



図 5: XTE\_J1550-564の MJD 51081 における 100s ごとの パワースペクトル。10s ごとの結果を 10 回加算平均した。



図 6: XTE\_J1550-564 の MJD 51081 における 10s ごとの Countrate(上)とパラメータの時間変化。上から順にピーク 周波数、FWHM、Q 値、関数の積分値 (norm) を示す。

ことがわかる。平均 countrate やその他の各パラメータの 時間変動は図6の様になった。

#### まとめと考察 6

観測毎のフーリエ解析を行ったことで、QPO の中心周波 数は FWHM や norm と強い相関関係があることが判明し た。また、Countrateと中心周波数の間に正の相関がある事 実は、光度が高くなるにつれて光学的に厚い降着円盤がブ ラックホール近傍まで成長し、それに伴って高温プラズマの サイズが縮小することと矛盾しない。変動を 100s ごとに解 析した結果、1回の観測中も peak-to-peak で 0.2Hz 程度の 中心周波数の変化が見られた。これは QPO 自体の幅に近 いことから、QPO の幅がより短時間の変動に起因している 可能性は高い。しかし、図5に見るように100sでのPSDに ついても鋭いピークではなく広がりが見られており、QPO の周期の広がりを時間変動由来と断言はできない。今後さ らに短時間の周期解析をする必要がある。

### References

- ブラックホール天文学入門 嶺重慎 第1版 p.48 [1]
- Steiner, James F et al. 2011 MNRAS, 416 941S |2|
- Heil, L. M. & Vaughan, S. & Uttley, P. 2010 MNRAS, 411 [3]
- ブラックホール天文学 嶺重慎 第1版 [4]p.173 [5]
- Casella et al. 2005 ApJ, 629, 403[6]
  - Kubota, A., & Done, C. 2004, MNRAS, 354, 980
- [7]Esin et al. 1997 ApJ, 489, 865
- Done & Gierliński & Kubota 2007 A&AR, 15, 1 [8]
- [9] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xte/
- https://heasarc.gsfc.nasa.gov/lheasoft/ftools/fhelp/powspec.txt10 https://qiita.com/yamadasuzaku/items/0f25166ddda15d8067a3 [11]

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>https://qiita.com/yamadasuzaku/items/0f25166ddda15d8067a3