

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

X-ray study of the QPO of XTE J1550 – 564 with RXTE

システム理工学専攻
宇宙観測システム研究

MF21083 鶴見 一輝
指導教員 久保田 あや

1 研究の目的

単体のブラックホール（以下BH）はその表面からの光は脱出できないため直接観測はできない。しかし、他の恒星と連星系をなすことで間接的に観測することができるようになる。近接連星系をなすBHは、お互いの周りを公転し合い光学主星からBHへガスが落ち込む。すると連星系が公転しているためガスは角運動量を持ち、ガスは主星の周りを回転し降着円盤と呼ばれるガス円盤を形成する。円盤中のガスは粘性摩擦により重力エネルギーを熱エネルギーに変換し、X線などの電磁波を放出し輝いている（文献 [1]）。

この連星系BHは候補も含めて銀河系内に35個程度分布していると考えられる（文献 [2]）。その中でも強い準周期振動（Quasi-Periodic Oscillation; QPO）と呼ばれる時間変動現象が観測されているBH候補天体である、XTE J1550 – 564 という天体に着目して研究を行う。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 RXTE衛星による XTE J1550 – 564 の観測

本研究で解析する XTE J1550 – 564 は The Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE 衛星)（文献 [3]）により発見された質量が太陽の 9.1 ± 0.6 倍、軌道周期 1.55 日、距離 $1.35^{+0.18}_{-0.13} \times 10^{17}$ km のBH候補天体であり低質量X線連星に分類される（文献 [4]）。

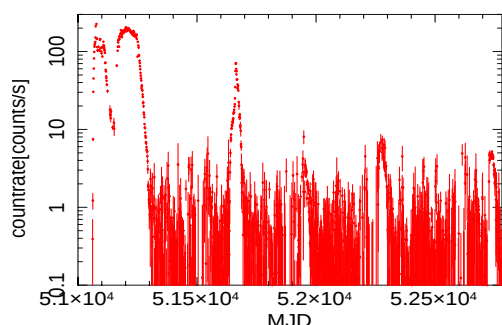


図 1: XTE J1550 – 564 の RXTE/ASM による長期強度変動。横軸修正ユリウス日 (MJD)、縦軸は Count rate。

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、3 種類の X 線検出器を搭載する。1 は RXTE に搭載された検出器のひとつである全天観測装置 (ASM) による XTE J1550 – 564 の 5 年間の強度変動で、アウトバーストを 5 回繰り返していることがわかる。これらのアウトバーストについて、RXTE 搭載の Proportional Counter Array (PCA) は 500 回以上の指向観測（1 回の観測は数時間）を行った。PCA

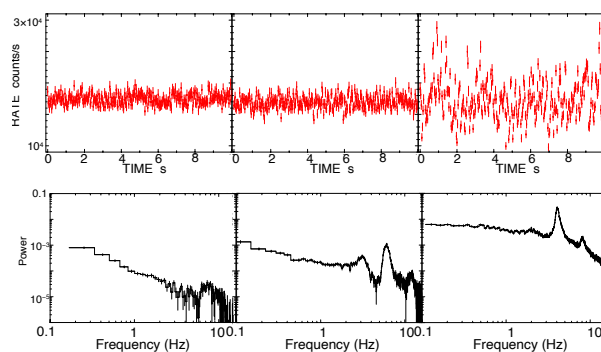


図 2: QPO の検出例。左から順に Type-A B C。上が元となったライトカーブ 10 s 分で下がフーリエ解析結果。

はエネルギー帯が 2~60keV で、時間分解能が $1\mu\text{s}$ と 3 つの検出器の中で最もよいため、PCA による観測データの中からエネルギー帯の高い Event モードと低い Binned モードによる観測データを用いて解析を行った¹。

3 降着円盤の状態と QPO

今回解析する QPO という現象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 [5]）。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）とノイズの形状によって 3 つの Type (A,B,C) に分類される（文献 [6]）。図 2 にそれぞれの Type の QPO の例を示す。Type-A はピークが平坦で、Type-B、C は見分けやすいピークが立っている。Type-B は Type-C と比べノイズが弱い特徴がある。本研究では主にピークの見分けやすい Type-B、C について詳しく研究した。

また、BH は単位時間に落ち込む物質の量（降着率 $\dot{M}$ ）の違いによってスペクトルに大きな違いが生じる。図 3 にその時の円盤の様子とスペクトルの例を引用する。BH 連星の場合、硬 X 線が多く強度の低い Low/Hard State (LHS) と軟 X 線が多く強度の高い High/Soft State (HSS) と、高光度な Very High State (VHS) が存在し、VHS の中でも Hard な成分の強い Hard Intermediate State (HIMS) と Soft な成分の強い Soft Intermediate State (SIMS)、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 [7]）。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、

¹<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl>

SIMS で観測されている。

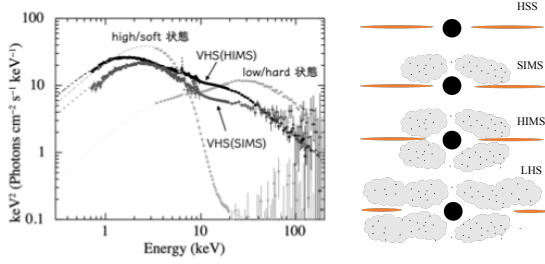


図 3: 左図は XTE J1550 – 564 のそれぞれの状態毎のスペクトル (文献 [1])。右図は連星系 BH に見られる 4 つの円盤の形状 (文献 [8])。中心の黒点が BH を表し、左右に伸びているのが円盤。小さな点の集合は高温ガスである。

4 LASSO による解析

4.1 LASSO の手法 (文献 [9])

スパースモデリングの一種である Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) と呼ばれる解析手法が存在する。LASSO によって周波数解析を行う場合フーリエ解析と比較して少ないノイズで周波数を求めることができる。今回この手法を用いてライトカーブの周波数解析を行った。パワースペクトルの推定を LASSO で解くと、式は以下のようになる。

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \|y_{obs} - \mathcal{F}^{-1}\beta\|_2^2 + \lambda\|\beta\|_1 \quad (1)$$

ここで、推定したいパワースペクトルの推定解ベクトルを $\hat{\beta}$ 、 $\|x\|_p$ は、 p 次ノルムを表す。右辺第 1 項は観測データ y_{obs} と理論上の光度を表すフーリエ逆変換 $\mathcal{F}^{-1}\beta$ の最小 2 乗法の式である。右辺第 2 項の $\|\beta\|_1$ は罰則項と呼ばれ、ベクトル β の 1 次ノルムである。罰則項を加えることで、 β の不要な要素つまりノイズを 0 にすることが可能になる。今回参考にした文献 [10] のプログラムでは、交差検証法により λ を推定している。

4.2 LASSO による短時間解析

Type-B、C の QPO が確認できた観測データに対してフーリエ解析より得られた中心周波数からライトカーブの周期を求め、8 周期分 (0.8~8 s) と 80 周期分 (8~80 s) ごとにデータを分割し LASSO 解析を行った。図 4 に各解析の例を示す。

LASSO 解析から得られたピークの周波数と countrate との関係性を調べるために相関係数を求めた。相関係数 $|r| > 0.25$ のものの相関を詳しく調べるため確率 p 値を求めると、多くのデータで $p < 0.005$ となり有意な相関が確認された。相関の得られたデータについてスペクトル状態や QPO の Type ごとに分類したところ、HIMS で得られた Type-C QPO と SIMS で得られた Type-B QPO のそれぞれで正の相関と弱い負の相関が見られる結果となった (図 5)。一方、LHS の LASSO 解析からは相関は確認されなかった。さらに、周期検出の確度についての相関も調べたところ、HIMS の Type-C QPO からは Countrate が低いほど確度が高いことが分かった。

5 まとめと考察

QPO の周期の 8 倍、80 倍という比較的短い短時間スケールにおいて、平均カウントレートと QPO 周波数の間

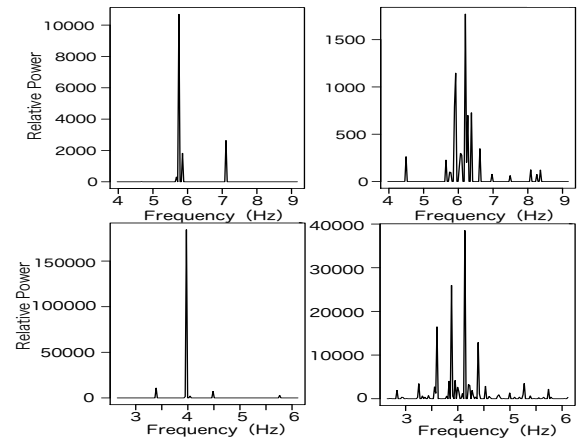


図 4: 上が Type-B で下が Type-C。図 2 のデータの 8 周期 (左)、80 周期 (右)。

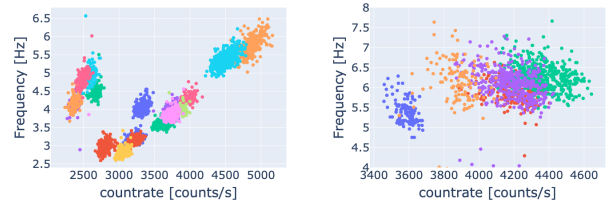


図 5: Binned 80 周期 LASSO 結果の散布図。横軸は平均カウントレート縦軸はピーク周波数。観測データごとに色を分けてある。左が HIMS Type-C、右が SIMS Type-B。

に HIMS では正の相関を、SIMS では弱い負の相関を確認することができた。Type-C の正の相関は (文献 [12]) でも報告されており、今回はその結果を確認したこととなる。Type-B の負の相関はこれまで報告されたことはなく (文献 [13] で GX339 – 4 のおいてその可能性が示唆)、新しい結果である。また、周期検出の確度の相関はこれまでまったく報告された例がない。正の相関がみられる HIMS データはアウトバーストの上昇期にあらわれており、 $\dot{M}$ が増加するに従って高温コロナが内側に収縮するという現象が短時間でも現れていることが示唆される。一方、負の相関が見られる SIMS では、長時間 (すなわち円盤全体) での $\dot{M}$ の変化は顕著でない。このことからカウントレートの変化は円盤中心部の揺らぎに依存すると考えられる。すなわち、コロナが一時的に膨らみ、カウントレートが上昇すると解釈できる。これらの違いが QPO の Type の違いとなって現れると結論される。

References

- [1] ブラックホール降着円盤からの X 線放射 久保田あや 分光研究 第 70 巻 第 6 号 (2021)
- [2] Corral Santana et al. 2016, A&A, 587, A61
- [3] Bradt, H. V., Rothschild, R. E., & Swank, J. H. 1993, Astronomy & Astrophysics Supplement, 97, 355
- [4] Steiner, James F et al. 2011 MNRAS, 416 941S
- [5] ブラックホール天文学 嶺重慎 第 1 版 p.173
- [6] Casella et al. 2005 ApJ, 629, 403
- [7] Kubota, A., & Done, C. 2004, MNRAS, 354, 980
- [8] Esin et al. 1997 ApJ, 489, 865
- [9] 植村誠・加藤太一 天文月報 第 111 巻 第 8 号 2018 p.528
- [10] Kato Taichi & Uemura Makoto 2012 PASJ, 64, 122
- [11] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xte/>
- [12] Heil, L. M. & Vaughan, S. & Uttley, P. 2010 MNRAS, 411
- [13] 森勇輝 総合研究論文 (芝浦工業大学) 2019