

RXTE 衛星によるブラックホール天体 GX339-4 の QPO の LASSO による解析

LASSO analysis of QPO in the blackhole candidate GX339-4 with RXTE

X 線天文学研究室：BP16096 森勇輝

指導教員：久保田 あや 准教授

1 はじめに

日本時間 2019 年 4 月 19 日 22 時、日本を含む国際プロジェクト Event Horizon Telescope が、世界で初めてブラックホール (以下 BH) の直接的な撮影に成功したことを発表した (文献 [1])。その中で用いられたスパースモデリングの手法、Least Absolute Shrinkage and Selection Operator; LASSO の Quasi-Periodic Oscillation; QPO 解析における有用性の検証と、QPO の解析から BH の降着円盤の状態を探ることを本研究の目的とする。

2 降着円盤と QPO (文献 [2]、[3]、[4])

BH 連星では、伴星から BH にガスが落ち込む際に、ガスが持つ角運動量によって BH の周囲を回る円盤をつくる。この円盤は降着円盤と呼ばれ、中心に近いところほど速度が大きくなる回転をしている。中心ほどガスの回転による摩擦が大きいため高温になっており、黒体放射により X 線を放出する。

本研究で解析する GX339-4 は太陽の 2.3 倍から 9.5 倍の質量の BH を有する低質量 X 線連星であり、多様な X 線アウトバーストが観測されている。軌道周期は 1.76 日とされており、QPO を起こす天体として知られている (文献 [5])。QPO とは X 線星にみられる擬似周期的な X 線強度の時間変化で、準周期的振動と訳される。特に $\sim 0.1\text{Hz}$ から $\sim 10\text{Hz}$ 間に見られる Low frequency QPO は Q 値^{*1} などによって A、B、C の 3 つのタイプに分類される (文献 [6])。それぞれの例は図 1 に示す。QPO の起源として降着円盤のレンズティーリング^{*2} 歳差運動 (文献 [7])、降着円盤中のらせん構造 (文献 [8])、降着円盤中の不安定性 (文献 [9]) などのモデルが挙げられているが、決定的なものはない。

BH には主に放出される X 線が硬い (硬 X 線が相対的に強い) 順に Low/Hard State (LHS)、Very High State (VHS)、High/Soft State (HSS) という 3 つの状態が存在する。また、VHS はより硬い Hard Intermediate State (HIMS) とやや軟らかい Soft Intermediate State (SIMS) に分類されることもある。LHS では高温ガスのコロナが発達しているが、HIMS では円盤はより内側まで侵入し、内部のコロナと同時に円盤上にスラブ状のコロナが発達していると考えられる。また、SIMS では内側のコロナはほとんど消失し、スラブコロナが硬 X 線放射を担うと考えられている。GX339-4 では A、B タイプ QPO は SIMS で見られ、C タイプ QPO は LHS、HIMS で見られる。

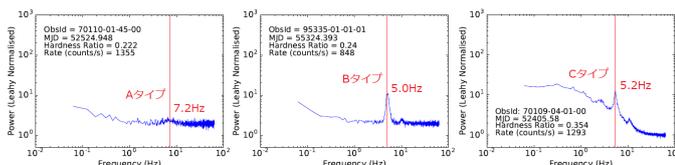


図 1: GX339-4 に現れる 3 種類の LFPQPO のパワースペクトルの例 (文献 [10] 左から Figure 4, Figure 3, Figure 1)

*1 QPO ピークの半値全幅 (FWHM) に対する QPO 周波数の比

*2 慣性系の引きずり

3 RXTE/PCA からのライトカーブの作成

RXTE 衛星は BH や中性子星などを観測することを目的とし、観測可能なエネルギー帯や時間分解能等の異なる 3 種類の X 線検出器が搭載された。低エネルギー帯からそれぞれ All-Sky Monitor; ASM (比例計数管) (エネルギー帯: 2-20 keV) (時間分解能: 90 分毎に全天の 80%)、Proportional Counter Array; PCA (比例計数管) (エネルギー帯: 2-60 keV) (時間分解能: $1\mu\text{s}$)、The High Energy X-ray Timing Experiment; HEXTE (シンチレータ + 光電子倍增管) (エネルギー帯: 15-250 keV) (時間分解能: $8\mu\text{s}$) である (文献 [11])。本研究では時間分解能が最も良い PCA で得られたデータを利用する。RXTE によるデータは NASA の HP^{*3} から得られる。The RXTE Cook Book^{*4} に従い、Event-Mode で解析をする。この際、フィルターファイルを検証し、必要なデータのみを残した。

4 フーリエ変換と LASSO (文献 [12])

X 線の強度変動を解析する手法としてフーリエ変換が広く用いられている。強度変動をフーリエ変換すると、曲線を複数の周波数の正弦波に分解したパワースペクトルが得られる。多くの周波数のパワーが 0 だと仮定し、最小二乗法によるフーリエ変換の推定解に推定解の 1 次ノルムを加えた解推定を行う手法を LASSO という。フーリエ変換で解析した場合、ほとんどの周波数成分がパワーを持つが、LASSO で解析した場合、ほとんどの周波数成分が 0 になる。つまり、光度変動を数種類の周波数成分に分解できる。また、フーリエ変換では近い周波数成分を分離できないが LASSO では可能だ。本研究では R 言語のパッケージで LASSO を実現する。

5 解析結果

A、B、C タイプの QPO それぞれ複数のデータに対し、解析を行った。まずは B タイプ QPO について述べる。

観測 ID95335-01-01-01 (観測日 2010/05/08) に関する図が図 2 から図 6 である。図 2 の光度曲線を NASA の HP から入手できるフーリエ変換ツールで再解析した結果が図 3 である。図 1 中央と同じ結果が得られたため、データリダクションが正しいことがわかる。得られた光度曲線を左端から 10s ごとに区切り、それぞれを平滑化し LASSO をしていくと、図 4 のようなパワースペクトルが (観測時間/10) 個得られる。これらのピークの時間変動を表したのが図 6 上であり、同区間のレート (=明るさ) を表したのが同図下である。ピークとレートの振動の相関を調べるため、これらの相関を取ったものが図 5 である。図 5 では、B タイプ QPO において、10s という短い時間で得たパワースペクトルのピークが、平均レートと相関していることがわかる。文献 [3] では観測一つあたり、つまり 900s-6000s 程度のデータから解析した結果からの相関が報告されていたのに対し、10s でも同様の相関が得られたことがわかる。また、より詳細には 4.5Hz-5.75Hz 程度ではこの傾向に強

*3 <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/>

*4 https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xte/recipes/cook_book.html

く従うが、わずかに外れた周波数域では大きく外れているデータが散見される。これは、QPO とは無関係な瞬間的な増光あるいは減光があったのではないかと考えられる。

これ (95335-01-01-01(青△)) に加えて 3 つの観測に対し、同様の解析を行った。結果を図 7 と図 8 にまとめて示す。観測 ID60705-01-84-02(観測日 2004/11/24)(赤○)では同様に正の相関が見られた。観測 ID95335-01-01-06(観測日 2010/05/10)(緑+)では、3472s のデータのうち、途中の 1000s 間でのみ同様の相関が見られた。理由は定かではないが、今後の解析で有意なデータになるかもしれない。観測 ID95409-01-17-00(観測日 2010/04/30)(黒×)では 1-3Hz(QPO ではない) と 5-7Hz の 2 つの周波数域にピークが集中し、全体では相関があるように見られたが、各周波数域では相関があるとは言い難かった。

観測全体 (図 7 全体) では、単一の観測内と同様に、平均レートとパワースペクトルのピークとの正の相関が見られた。図 7 に引かれた 4 本の直線は、いずれも傾きが 1/50 である。この傾きは任意に取ったが、各データは直線に沿っており、一時的 (数千 s 程度) の明るさと変動の周期に比例の関係があることが取れる。図 8 は各観測を 10s で LASSO した結果の平均を取ったものであるが、やはり全体でも相関が見られる。これは文献 [3] 中に示された各観測単位の相関と一致し、傾向が有意である根拠を強める。

A タイプ QPO は LASSO での検出自体が困難であった。C タイプ QPO は検出できないことがあり、検出できた場合であれ、ピークが分散し、相関はなかった。相関がなかったのは、文献 [3] の長期的な相関とも一致する。

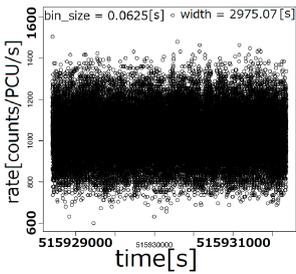


図 2: 図 1 中央のデータから生成した光度曲線 (ELV >= 10 && NUM_PCU_ON == 2)。

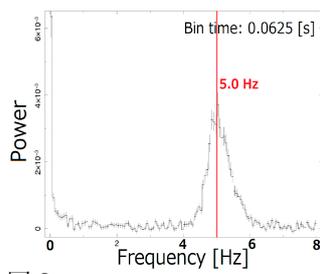


図 3: 図 2 の光度曲線を POWSPEC でフーリエ変換した結果 (プロット時の rebin = 16)。

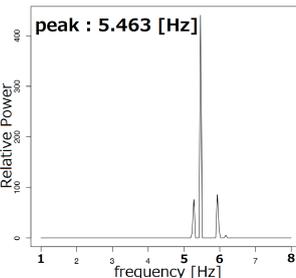


図 4: 図 2 の光度曲線を 10s ごとに区切り平滑化した曲線を LASSO して得られたパワースペクトルの例 (冒頭 1 区間)。

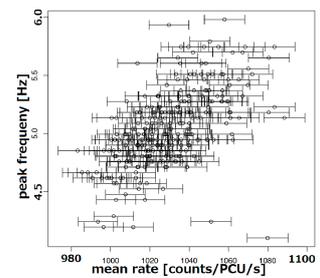


図 5: 図 6 の平均レート (横軸) とパワースペクトルのピーク (縦軸) との相関 (データ数 8 割未満と検出の悪い、4Hz-6Hz 以外を除いてある)。相関係数 0.566 と正の相関が見られる。

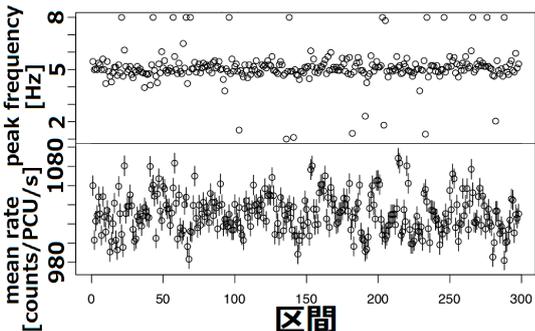


図 6: 図 2 を 10s ごとに区切り平滑化した曲線を LASSO して得られたパワースペクトルのピークの時間変動 (上) と平均レートの時間変動 (下)。

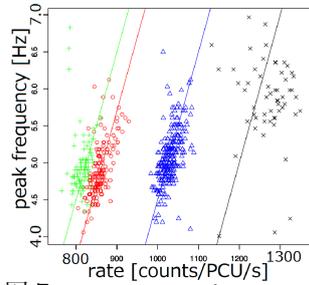


図 7: 4 つの B タイプ QPO の平均レートとパワースペクトルのピークとの相関 (データ数 8 割未満と検出の悪い、4Hz-7Hz 以外を除いてある)。全体でも相関係数 0.541 と正の相関が見られる。

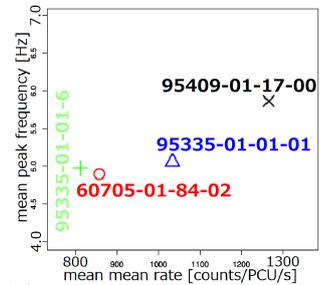


図 8: 各観測ごとにとった平均レートの平均 (横軸) とパワースペクトルのピークの平均 (縦軸) との相関。相関係数 0.947 と強い正の相関が見られる。

6 まとめ

B タイプ QPO の解析結果を表 1 にまとめた。B タイプ QPO は短期的に見て、明るさと周波数に正の相関が見られるデータが多く、これは文献 [3] の長期的な相関 (≒ 図 8) と矛盾しない。C タイプ QPO についても、短期的な明るさと周波数に相関が見られないのは同論文の長期的な相関と矛盾しない。今回の研究では、長期的な変動に見られる相関が、より短期的な変動の集合であったということが新たに明らかになった。

QPO の起源が降着円盤であると仮定する場合、10s という短時間でピークが変動するという傾向が観測できたことは、放射領域の大きさ (< 光速 × 変動の時間) の小さい、円盤の内側での物理現象が起源であると言える。現在 QPO が発生する BH の状態である LHS、HIMS、SIMS では、降着円盤の内側の領域に発達した高温降着流があるとされているため、高温降着流が起源であるとも言える。

今回は 10s という時間で解析を行ったが、この短時間で変動を観測できたということは、実際の変動はさらに短い時間で起きていると考えるのが妥当である。特に、今回計測したピークが 5 Hz 程度であることを考慮すると、変動は大きくとも 0.2s 程度で起きていると推測できる。この条件から求めると、放射領域の大きさは 6×10^7 m 以下ということになる。高温降着流は $3 \times 10^4 (M/M_{\odot})$ km 以上の大きさを持つ (文献 [2]) ため、GX339-4 の場合、その領域は $6.67-27.55 \times 10^7$ m 程度あり、矛盾はない。

明るくなると周波数が高くなるので、振動している降着流が明るい時ほど内側に入り込んでいる可能性がある。今後はこの関係を精査し QPO の発生原因を突き止めていく。

表 1: 今回解析した B タイプ QPO

観測 ID	観測時間 [s]	平均ピーク周波数 [Hz]	平均レート [counts/PCU/s]	相関係数
60705-01-84-02	1664	4.896	859	0.649
95335-01-01-01	2975	5.050	1030	0.566
95335-01-01-06 ^a	1000	4.888	815	0.459
95409-01-17-00(全体)	912	4.619	1234	0.701
95409-01-17-00(5-7Hz)	-	5.951	1271	-0.169
95409-01-17-00 ^b (1-3Hz)	-	1.934	1146	0.297

^a ピーク周波数が集中している時間帯のみを抽出

^b ピーク周波数は集中しているが、QPO ではない

参考文献

- [1] The Event Horizon Telescope Collaboration ApJL, 875, L1
- [2] 小山勝二・嶺重慎 (2007) 『ブラックホールと高エネルギー現象 シリーズ現代の天文学 第 8 巻』, 日本評論社
- [3] S. Motta et al. 2011 MNRAS, 418, 2292M
- [4] Done & Gierliński & Kubota 2007 A&AR, 15, 1
- [5] M.Heida et al. 2017 The ApJ, 846, 132
- [6] Casella et al. 2005 ApJ, 629, 403
- [7] Stella & Vietri 1998 ApJ, 492, L59
- [8] Varniere & Vincent 2017 ApJ, 834, 188
- [9] Abramowicz et al. 1995 ApJ, 452, 379
- [10] Arur, K.; Maccarone, T.J. 2019 MNRAS, 486, 3451
- [11] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xte/XTE.html>
2019 年 7 月 6 日閲覧
- [12] 植村誠・加藤太一 天文月報 第 111 巻 第 8 号 2018 p.528
- [13] Kato Taichi & Uemura Makoto 2012 PASJ, 64, 122
- [14] 解析には京都大学の木邑氏と加藤氏から頂いた R 言語プログラム (文献 [13] を参考にしている) を改良して用いる。