

RXTE衛星によるブラックホール天体 GRO J1655-40 の X 線解析

X-ray analysis of GRO J1655-40 with RXTE

X 線天文学研究室 BP18088 畑野 郁弥

指導教員：久保田 あや 教授

1 研究の背景と目的

ブラックホールとは、強い重力により光も脱出できない天体である。光を発しないため直接的な観測を行うことは不可能である。しかし、通常の恒星と近接連星系をなしているブラックホールの場合、相手の星から落ち込むガスが、ガス円盤(降着円盤)を形成し X 線を放射する。そのガスが落ち込む際、摩擦によって高温になり、X 線などの電磁波が放射されることによってブラックホールが観測できる(文献[1])。

ブラックホール連星は特徴的な X 線スペクトルと時間変動を示す。準周期振動(Quasi-Periodic Oscillation; QPO)は、振動の周期が一定でなかったり位相の揃わない振動が短時間に次々現れる時間変動の特徴である。本研究では X 線天文衛星(Rossi X-Ray Timing Explorer; RXTE)(文献[2])で観測された連星系ブラックホール GRO J1655-40 の時間変動とスペクトルデータを解析し QPO の発生を降着円盤のスペクトルと比較し、その発生メカニズムに迫ることを目的とする。

2 GRO J1655-40 の観測

GRO J1655-40 は、1994 年 7 月 27 日に発見されたブラックホール X 線連星である。質量は太陽質量の約 7 倍であり(文献[3])、地球からの距離は $3.2 \pm 0.2 \text{ kpc}$ ($9.9 \times 10^{16} \text{ km}$) である(文献[4])。また、超光速の電波ジェットや QPO も報告されている。GRO J1655-40 は、1996 年の初めにアウトバースト(急な天体の増光現象)が休止状態になったが、1996 年 4 月 25 日に 2 回目のアウトバーストが始まり、16ヶ月間続いた(文献[5])。この爆発の間、RXTE 衛星による 72 回の観測データを研究に使用した。また、RXTE 衛星には、全天観測装置(ASM)、比例計数管(PCA)、高エネルギー側(HEXTE)、これら 3 つの観測機器が搭載されている。

明るさの長時間変化を調べるため、RXTE/ASM で得られたデータから、GRO J1655-40 のライトカーブと硬度比(HR)を作成した。ライトカーブとは X 線強度を時間の関数としてプロットしたものであり、横軸が MJD(修正ユリウス日)、縦軸が counts/s である。図 1(上)は 1.5-12keV のライトカーブ、図 1(下)は硬度比、3.0-5.0keV(中帯域)/1.5-3.0keV(低帯域)を示す。これは、低帯域を基準とし、中帯域の X 線が含まれている量を表す。

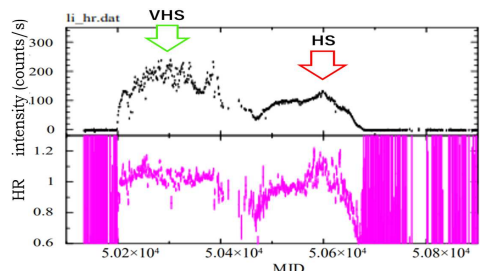


図 1: MJD50100~50900 のライトカーブ(上)と硬度比(下)

3 スペクトルの特徴

ブラックホール連星の降着円盤は質量降着率 $\dot{M}$ によって異なる状態を示す。 $\dot{M}$ が高い時には密度が高く、幾何学的に薄い降着円盤がブラックホールの近傍まで発達した High State(HS) となり、 $\dot{M}$ が低い時の降着円盤はブラックホールから遠方に後退し、内側には密度が低く高温(kT_e が数 10~100keV)のガス雲を形成する Low State(LS) となることが知られている(文献[1])。

今回解析した GRO J1655-40 の 3-200keV のデータはいずれも $\dot{M}$ が高く、円盤が発達した状態であったが、 $\dot{M}$ が特に高い場合、円盤の上にさらに高温のコロナ(温度 10keV 程度)が存在することが観測からわかっている(文献[6])。この状態は Very High State(VHS) とよび、通常の HS と区別される。図 1 の MJD50200~50400 では VHS が、MJD 50400~50700 では HS が実現している(文献[6])。

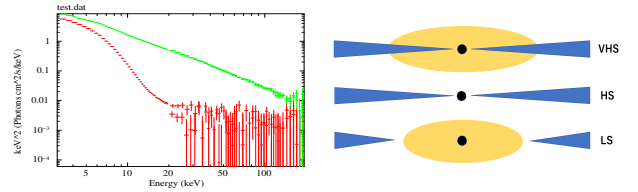


図 2: X 線スペクトル[VHS: 緑(MJD 50296), HS: 赤(MJD 50588)](左)と円盤の状態(右)

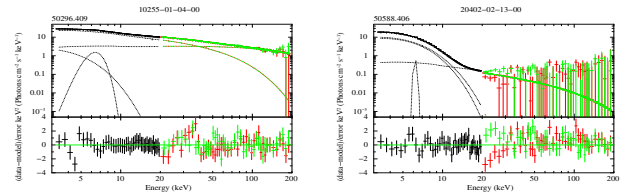


図 3: X 線スペクトルのフィット結果(3-200keV) MJD 50296 (左) MJD 50588 (右)

図 2(左)は図 1 に矢印で示した RXTE の観測による PCA と HEXTE で得られた X 線スペクトルである。

図 3 は図 2 のスペクトルを円盤(diskbb モデル(文献[7]))と高温コロナによる逆コンプトン散乱放射(nthcomp モデル(文献[7])),および鉄の輝線(gaussian モデル)に星間吸収(tbabs モデル)をかけて評価した結果である。図 2 の VHS(緑)が図 3(左)、HS(赤)が図 3(右)に対応しており、VHS では HS に比べて高エネルギーの X 線光子の量が多いことがわかる。ここから、スペクトルの変化を定量化するため、diskbb の物理量である円盤内縁部の温度 kT_{in} 、nthcomp の物理量であるコロナの温度 kT_e と光子指数 Γ を求めた。

図 4 は横軸に各観測の観測日を MJD で、縦軸にスペクトルパラメータを示した。ここから、flux と円盤温度が後半の観測日になると、徐々に下がっていることがわかる。

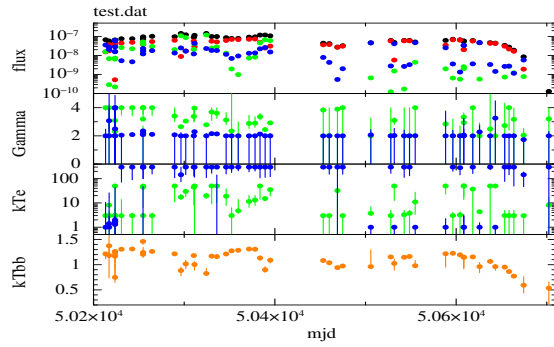


図 4: X 線スペクトルの時系列パラメータ変化 (上から flux[total: 黒, disk: 赤, nthc1: 緑, nthc2: 青], 光子指数, コロナ温度, 円盤温度)

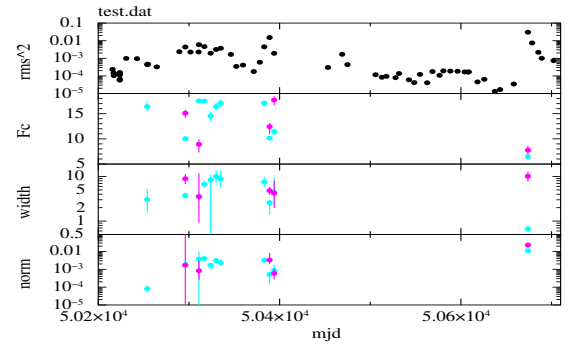


図 7: パワースペクトルの時系列パラメータ変化 (上から振幅, 中心周波数 [メインピーク: 水色, サブピーク: 紫], ピーク幅, 光子量)

4 時間変動解析

RXTE/PCA から得られたデータを、NASA の ftools の POWSPEC(文献 [8]) を用いてライトカーブをフーリエ変換し、パワースペクトルを作成した。全 72 観測から 11 観測で QPO が見られた。

図 5 は、図 3 と同じ日付のパワースペクトルであり、QPO の見られた観測 (左) と見られなかった観測 (右) である。

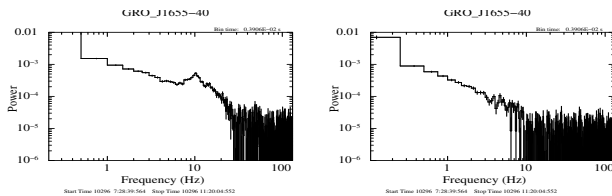


図 5: 作成したパワースペクトル

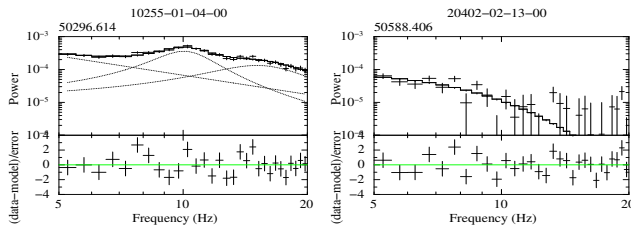


図 6: パワースペクトルのフィット結果 (5-20Hz)

図 6(左) は、QPO の見られたパワースペクトルを power-law と gaussian モデル、もしくは lorentz モデルで評価した。ここから、gaussian, lorentz の物理量であるピークの中心周波数 F_c 、ピーク幅 $width$ 、光子量 $norm$ および振幅 rms^2 を求めた。図 6(右) は、QPO の見られなかったパワースペクトルを cutoffpl モデルで評価し、振幅 rms^2 を求めた。

図 7 は、全ての観測データについて、スペクトル解析と同様にパラメータの時間変化を表示したものである。ここから、QPO が見られる観測日は振幅 rms^2 が大きいことがわかる。

5 考察とまとめ

解析の結果から得られたパラメータを図にし、それぞれの相関を調べた。

図 8(左) から 総 flux、nthc flux と振幅に相関があることがわかる。flux が大きくなると振幅も大きくなる。nthc flux と比べ、総 flux のほうが傾きが急になっていることがわかる。また、振幅が 2×10^{-3} を超えるものは全て QPO が

みられる。図 8(右) からは、総 flux、nthc flux とともに flux が小さいときには円盤の温度と右上がりの相関がみられるが、総 flux は 8×10^{-8} 、nthc flux は 2×10^{-8} を境に左上がりとなっており、その部分のみに QPO がみられる。

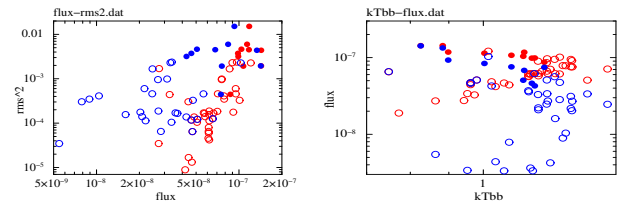


図 8: 横軸 flux[total(QPO あり (赤●), なし (赤○)), nthc(QPO あり (青●), なし (青○))] - 縦軸 rms^2 (左) 横軸 kTbb - 縦軸 flux[total(QPO あり (赤●), なし (赤○)), nthc(QPO あり (青●), なし (青○))](右)

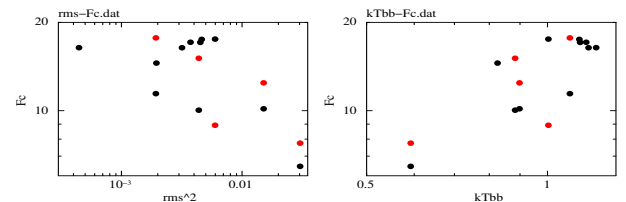


図 9: 横軸 rms^2 - 縦軸 QPO の F_c [メインピーク (黒), サブピーク (赤)](左) 横軸 kTbb - 縦軸 QPO の F_c [メインピーク (黒), サブピーク (赤)](右)

図 9(左) を見ると、振幅が大きくなるにつれて QPO の中心周波数が小さくなっていることがわかる。また、図 9(右) からは円盤の温度上昇とともに QPO の中心周波数が大きくなる相関がみられる。

以上より、それぞれのパラメータはある程度の相関がみられる。つまり、ブラックホールの時間変動と X 線スペクトルには密接な関係があることがわかる。

References

- [1] ブラックホール天文学 嶺重慎 P40,142
- [2] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xte/xte2.html>
- [3] Orosz, J. A., & Bailyn, C. D. 1997, ApJ, 477, 876
- [4] Hjellming, R. M., & Rupen, M. P. 1995, Nature, 375, 464
- [5] Sobczak, 2000, ApJ, 531, 537
- [6] Kubota A. et al, 2001, ApJ, 560, 147
- [7] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node127.html>
- [8] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/lheasoft/ftools/fhelp/powspec.txt>