

RXTE衛星によるブラックホール天体 GRO J1655-40 の研究

X-ray study of black hole candidate GRO J1655-40 with RXTE

X線天文学研究室 BP19105 中川 寛斗

指導教員：久保田 あや 教授

1 研究の背景と目的

はじめに、ブラックホール (以降 BH) とは光すら脱出できない重力を持ち、単体では直接観測することができない天体である。しかし、通常の恒星と連星系をなす BH において、恒星から自身に落ち込むガスにより形成される降着円盤 (図 1) が放出する X 線を解析することにより BH の観測が間接的に可能になる (文献 [1])。BH は、降着円盤が未発達ときは暗いが内側に向け発達してくると明るくなるといった状態変化を示す。また、恒星質量 BH は突然明るさが増す現象 (アウトバースト) を複数回起こすトランジェント天体に分類される。本研究では、トランジェントなブラックホール天体 GRO J1655-40 における降着円盤の状態変化を明らかにする事を目指す。

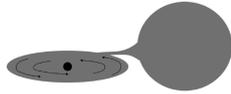


図 1: 連星系 BH と降着円盤の概念図 (文献 [2])

2 RXTE 衛星による GRO J1655-40 の観測

観測対象である GRO J1655-40 は、1974 年 7 月 27 日にコンプトンガンマ線観測衛星によって発見された (文献 [3]) BH 連星である。主星と伴星の質量がそれぞれ $7.09 \pm 0.22 M_{\odot}$ 、 $2.34 \pm 0.12 M_{\odot}$ (文献 [4])、地球から天体までの距離は $3.2 \pm 0.2 \text{ kpc} (= (9.9 \pm 0.6) \times 10^{13} \text{ km})$ (文献 [5]) である。 M_{\odot} は太陽質量 ($2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$) を表す。この天体の観測に使用された X 線天文衛星 Rossi X-ray Timing Explorer (以降 RXTE) は、1995 年 12 月 30 日～2012 年 1 月 5 日の間運用された 1 ミリ秒単位での観測ができ、短時間変動の観測に秀でている衛星である。搭載検出器は 3 つのシャドウカメラを持つ全天観測装置 (All-Sky Monitor) (文献 [8])、20-60 keV で観測可能な Proportional Counter Array (以降 PCA) (文献 [9])、15-250 keV をカバーする The High Energy X-ray Timing Experiment (以降 HEXTE) (文献 [10]) である。RXTE 衛星により 1996 年から 1997 年にかけて 72 回、2005 年頃に 499 回観測が行われ、どちらにおいても図 2 に示すようにアウトバーストの発生が確認された。

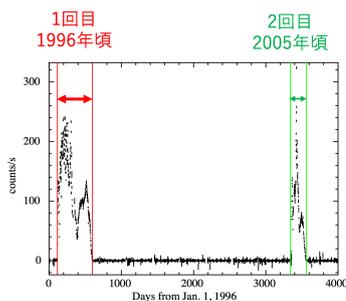


図 2: RXTE 衛星の全天観測装置による GRO J1655-40 の長期の強度変化

3 解析の準備

データ解析の準備として、NASA のデータ公開サイトより得た全観測データを元に各帯域のカウントレートを求め、図 3 に長期の強度変動を示すライトカーブを作成した。左が 1 回目、右が 2 回目のアウトバースト発生時のデータである。また、PCA のデータから導出したスペクトルの硬度比 (Hardness ratio; HR) の長期変化も示した。ここで、HR は高エネルギー (5-20 keV) の X 線光子数を低エネルギー (3-5 keV) の X 線光子数で割ったものでスペクトルの形状の指標を与える。横軸は修正ユリウス日 (MJD) で示した観測日である。1 回目 (図 3 左) は畑野により詳しく解析され (文献 [7])、QPO は短時間変動が大きいときや光子数が特に多いときに観測されていることが報告された。2 回目 (図 3 右) は、アウトバースト開始時のカウントレートが非常に低い状態から 1000 cts/s を超えるまで密に観測が行われており、このデータを詳細に解析することで降着円盤が中心 BH から遠方に後退し、ほぼ X 線を放射しない状態から中心部にまで発達する際に成長過程を精査することが可能と考えられる。図 4 にハードネスレシオ毎のカウントレートの遷移を示す (丸の色は図 3 対応)。図 3 で暗くハードな状態から明るくソフトな状態に遷移していることが示されたことから、図 4 の右下からアウトバーストが開始し、時間経過とともに反時計回りに点が遷移していていることがわかる。

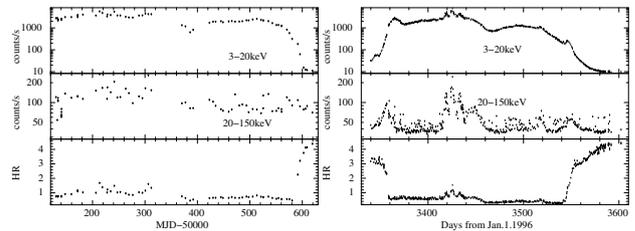


図 3: ライトカーブ (1 段目:3-20keV, 2 段目:20-150keV, PCU1 台当たりのカウントレート) と硬度比 (3 段目)。(左:1996～1997 年 右:2005 年) 縦線 (MJD = 緑:3516.26, 青:3442.13, 水色:3521.72, オレンジ:3554.34)

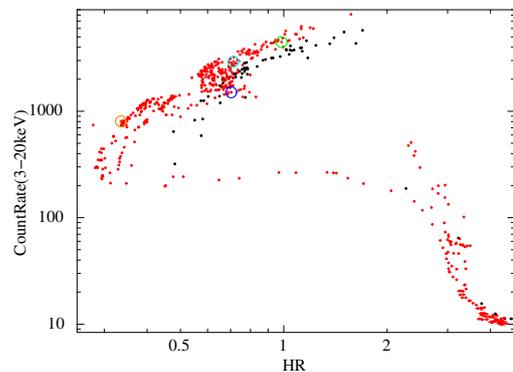


図 4: ハードネスレシオごとのカウントレート (黒:1 回目, 赤:2 回目のアウトバースト) (MJD = 緑:3516.26, 青:3442.13, 水色:3521.72, オレンジ:3554.34)

4 スペクトル解析

4.1 スペクトルモデル

1995年のアウトバーストに関しては畑野により解析されているため、2005年のアウトバースト時のスペクトルについて解析を行った。降着円盤の物理量の変化を探るため、対象天体のスペクトル形状に適した放射モデルを作成した。用いたモデルは幾何学的に薄く、光学的に厚い降着円盤の黒体放射を再現した diskbb モデルにおける温度勾配を変化させる diskpbb モデル (文献 [11])・星間吸収の断面積を計算する tbabs モデル (文献 [13])・広い吸収幅を表す smedge モデル¹・BH 近傍の高温プラズマによる種光子の逆コンプトン散乱を再現する nthComp モデル (文献 [12]) である。これらを組み合わせ放射モデル (constant*TBabs(diskpbb + smedge*nthComp)) を作成した。

4.2 代表観測の解析結果

4.1 節で作成したモデルを図 4 のくり抜き丸 (緑・オレンジ) で示した形状の異なるスペクトルを持つ代表的な観測データに適用しモデルフィットを行った結果を図 5 に示す。図 5 右 (HR=0.34 のソフトなスペクトル) はスペクトルの傾きを表す光子指数 $\Gamma=3.0$ とフィッティングの際に設定した上限値となっているが、図 5 左 (HR=0.98 の比較的ハードなスペクトル) は $\Gamma=1.89$ となっており、高エネルギー帯の X 線光子も観測されており前者より直線的なスペクトルになっていることが数値からも読み取れる。また、円盤温度と内縁半径はそれぞれ ($T_{in}=1.42, 0.92[keV]$ $R_{in}=14.36, 54.61[km]$) と求まっており、円盤温度が大きい程光子数が増加していることを考慮すると降着円盤の発達に伴い内縁半径が縮小し、円盤温度が上昇していると考えられる。温度勾配 p に関しては左が 0.64, 右が 3.00 であり、円盤温度が上昇するほど勾配が緩やかになっていると仮定できる。更に χ^2/dof の値はそれぞれ 1.13, 0.95 となっており、4.1 節で作成したモデルはデータをよく再現していると言える。

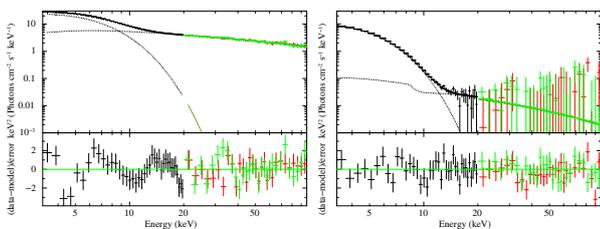


図 5: 代表的な観測のフィッティング結果 (左:MJD = 3516.26, 右:MJD = 3554.34)

4.3 全データの解析

4.2 節と同じ手法で図 4 の赤点のうちハードネスレシオ 1 以下かつカウントレート 300 以上の密な観測がなされている合計 144 個のスペクトルデータを解析した。図 6 にフィッティングにより得られた各パラメータの時間変化を、図 7 に円盤温度ごとのパラメータの変化を示す (色は図 4 と図 3 に対応)。円盤温度 T_{in} が上昇するにつれ $Luminosity$ が大きく、 R_{in} が小さくなっており、降着円盤が BH の内側に向けて発達していると考えられる。また、節 4.2 で仮定した通り円盤温度が上昇するにつれ p が小さく、すなわち温度勾配が緩やかになっていると考えることができる。

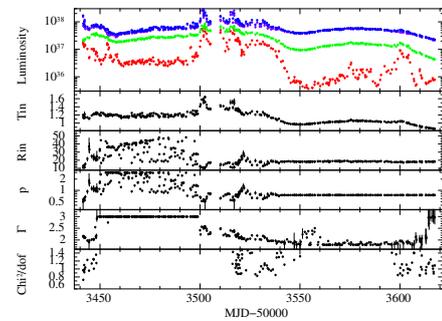


図 6: 上から $Luminosity$ (紫= L_{disk} , 赤= L_{nthc} , 緑= L_{obs} , 青= L_{tot}) 円盤温度 T_{in} , 半径 R_{in} , 円盤温度の放射依存性 P , 光子指数 Γ , カイ二乗

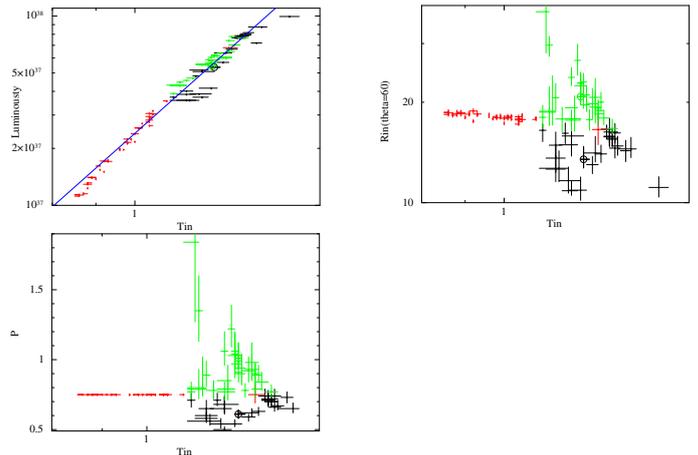


図 7: 円盤温度に対する値の変化 (左上: L_{disk} , 右上: R_{in} , 下: P) (黒 $p < 0.75$ 赤 $p = 0.75$ 緑 $p > 0.75$)

5 考察と今後の展望

本研究ではアウトバースト中の密な観測が行われている箇所に対するスペクトル解析を行った。円盤温度に対するパラメータの相関を可視化し、降着円盤の内縁半径と温度勾配に関しては負の相関、光度に関しては正の相関があることがわかった。対象天体には今回用いた観測データの他にも解析に着手できなかった輝線成分の放射が見られるなどスペクトル形状が異なる物が複数あり、それらに適應する放射モデルを作成し、より詳細に降着円盤の物理量の変化を調査する必要がある。

References

- [1] 嶺重 慎 2005 ブラックホール天文学入門 23, 24
- [2] 久保田 2021, 分光研究, 70 170
- [3] Orosz Bailyn, 1997, ApJ 477, 878
- [4] Hjellming & Rupen, 1995, Nature, 375, 464
- [5] Tingay, 1995, Nature, 374, 141
- [6] Remillard, Roland A, 1999, Astrophysical Journal, 522, 397
- [7] 畑野郁弥 総合研究論文 (芝浦工業大学) 2021
- [8] Levine et al. 1996, Astrophysical Journal, 469, 33
- [9] Jahoda et al. 1996, Proc. SPIE Vol.2808, 59
- [10] Rothschild et al. 1998 Astrophysical Journal 496, 538
- [11] Kubota et al. 2004
- [12] Zdziarski, 1996, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 283, 193
- [13] Wilms et al, 2000, ApJ 542, 914

¹<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node263.html>