

Swift 衛星搭載 X-Ray Telescope によるブラックホール候補天体 GRS 1739 - 278 の質量推定

システム理工学専攻
宇宙観測システム研究

MF15044 須藤雅之 すどうまさゆき
指導教員 久保田 あや 准教授

1 ブラックホールからの X 線放射

大質量の星は進化の最終段階で超新星爆発する。そして、爆発後の進化は星の質量によって異なる。太陽の質量の 30 倍以上の星はブラックホール (以降 BH) になる。BH は強い重力のため、光さえも抜け出せない領域であり、単独では観測することができない。しかし、宇宙空間にあるガスが BH に吸い込まれることで観測することができる。BH に吸い込まれる物質は角運動量をもっており、周囲を回転しながら BH に落ちていく。そして、BH の周囲には降着円盤と呼ばれるガスの円盤が形成される。降着円盤は摩擦により高温となり、強い X 線が放出される。そのため BH の観測には、X 線を用いるのが有効である。

BH に落ち込むガスの量の違いによって放射スペクトルに顕著な違いが生じることがわかってきた。これを状態遷移と呼ぶ。代表的な状態は、low/hard 状態と high/soft 状態の 2 つである。low/hard 状態は、質量降着率が低く、X 線光度が低いときに現れる状態で、スペクトルは高エネルギー側が優勢なスペクトルをしている。降着率が高くなると円盤まわりのコロナが少なくなり、円盤からの黒体放射が支配的となって軟 X 線で明るい high/soft 状態へ遷移する。スペクトルは降着円盤からの放射が支配的で、低エネルギー側で優勢なものになる。一般相対性理論から、BH の周りの安定なケプラー軌道には下限があり、これを最終安定軌道 r_{ISCO} と呼ぶ。high/soft 状態の BH 連星の降着円盤は一定の内縁半径 r_{in} をもつことが報告されており、これは最終安定軌道に一致すると考えられている。

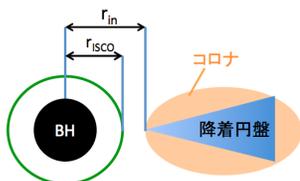


図 1: BH と降着円盤のイメージ

2 Swift 衛星搭載 X-Ray Telescope

Swift 衛星搭載 X-Ray Telescope (以降 Swift/XRT) は 2004 年 11 月に打ち上げられた衛星である。Swift 衛星に搭載されている XRT は、0.3–10keV (1keV=1.60×10⁻¹⁶J) のエネルギー帯に感度がある X 線望遠鏡である [1]。位置決定精度は 2–5 秒角、視野は 23.6×23.6 分角である。

3 GRS 1739 - 278 の特徴

GRS 1739 - 278 は、1996 年 3 月 18 日に Granat 衛星の Sigma 装置によって発見された BH 連星であり、1996 年の急激な増光の後すぐに減光した [2]。2 回目の増光は

2014 年 3 月に観測された。2014 年の増光を Swift/XRT が観測した光度曲線とハードネス比を図 2 に示した。図 2 の下のパネルで示すハードネス比とは、高帯域 (4–10keV) の強度を低帯域 (1–4keV) の強度で割った比で、スペクトルの硬さがわかるものである。このハードネス比で、ハード、中間、ソフト 1、ソフト 2 の 4 つの期間に状態分けを行った。

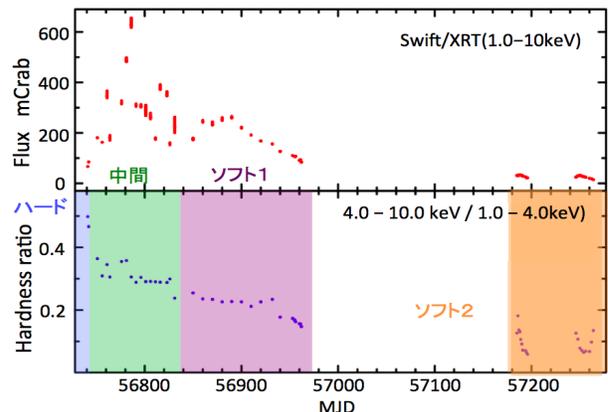


図 2: Swift/xrt の光度曲線とハードネス比

4 スペクトル解析

4.1 使用したモデル

スペクトル解析とは、観測されたスペクトルとモデルスペクトルを比較することで物理パラメータを求める事である。 χ^2 検定によりデータに適合するモデルのパラメータを決定する。tbabs モデルは (Wilms et al. 2000) の元素組成に基づき、星間吸収を表したモデル [3] で、パラメータは水素柱密度 N_H である。simpl モデルは降着円盤から放射された X 線が BH 周辺のコロナの中で逆コンプトン散乱を繰り返した状態を表したモデルである [4]。パラメータは光子指数 Γ と、散乱の割合を示す f_{sc} である。disk blackbody (diskbb) [5] モデルは、光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤が黒体放射する時のスペクトルを表す標準降着円盤 [6] のモデルである。パラメータは、降着円盤の最も内側の温度 T_{in} と、降着円盤の内縁半径 r_{in} である。kerrbb モデルは、一般相対論的效果を考慮した標準円盤からの多温度黒体放射モデルである [7]。パラメータは、ブラックホールのスピンパラメータ a 、軌道傾斜角 i 、ブラックホールの質量 M_{bh} 、質量降着率を示す \dot{M} 、観測器からの距離 D 、色温度と有効温度の比 ($T_{col}/T_{eff}=1.7$ [8]) である。

4.2 多温度黒体放射モデルを用いた解析

tbabs*simpl*diskbb でモデルフィットを全期間行った。各期間の代表的なスペクトルを図3にのせた。各図の上のパネルは、データ(点)とモデル(線)、下のパネルはモデルとデータの残差を表示している。 $\chi^2/\text{自由度}$ は、ハード期間から0.85,0.73,1.09,1.31となった。ハード期間では高エネルギーが優勢なスペクトルであるが、時間経過すると低エネルギー側に遷移している。

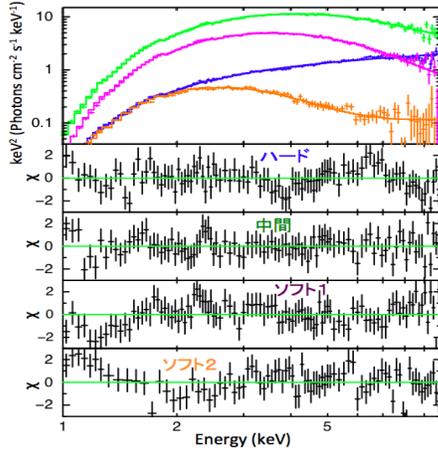


図3: スペクトル

図4に各パラメータと χ^2/dof 値の時間変動を載せた。1番上のパネルのfluxとは、単位面積あたりの入射エネルギー[W/cm²]である。内縁半径 r_{in} は、徐々に小さくなっていきソフト1期間とソフト2期間でほぼ一定になっている。図5は、同期間に1996年のRXTE衛星搭載PCAのデータを加え、明るさ L_x と T_{in} の関係図に $L_x = 4\pi r_{\text{in}}^2 \sigma T_{\text{in}}^2$ (降着円盤全体から放射されるX線)の直線を書いたものを示した。明るさが1桁減少してもデータ点がほぼ青線上にあり、内縁半径は一定となることがわかった。同期間はhigh/soft状態にあり、標準円盤の内縁が最終安定軌道まで安定して伸びていたと考えられる。円盤の軌道傾斜角を $i=60^\circ$ 、距離を $D=7\text{kpc}$ [9]と仮定すると、 $r_{\text{in}} = 23 \pm 2\text{km}$ と推定できた。色温度と有効温度の補正 κ と、円盤の内縁での境界条件 ξ [10]を考慮すると、真の内縁半径 R_{in} は、 $R_{\text{in}} = \kappa^2 \xi r_{\text{in}}$ で推定でき、 $R_{\text{in}} = 27 \pm 4\text{km}$ と求まった。その結果、非回転ブラックホールの場合、GRS 1739 - 278のブラックホール質量は $3.0 \pm 0.5M_\odot$ と見積られる。

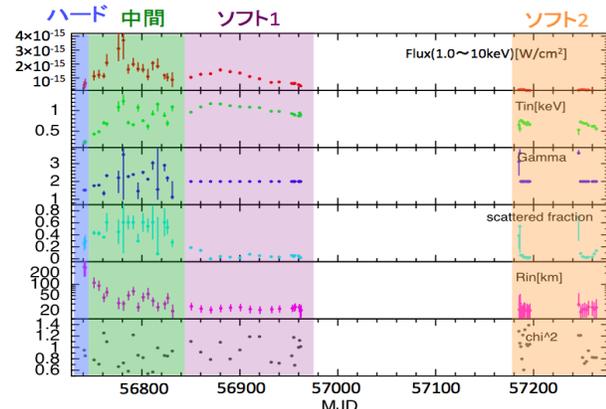


図4: パラメータの時間変動

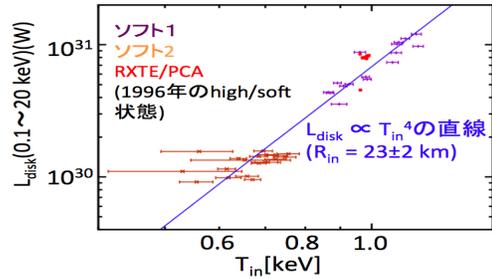


図5: 温度と明るさの関係

4.3 相対論的円盤放射モデルを用いた解析

次にブラックホールが回転している場合を調べるため、一般相対論的效果を考慮した標準円盤からの放射モデル(kerrbb)をソフト1とソフト2期間に適用した。スピンパラメータ a の平均値を実線で、質量と $\chi^2/\text{自由度}$ の平均値を点線で図6を示した。X線の食や吸収dip、円盤風による電離吸収構造が過去に観測されていない事から $i \leq 60^\circ$ と考えられ、 $i=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ で調査した。図6から、 $a=0.8$ であれば $M_{\text{bh}} \leq 7M_\odot$ まで許されるなど、 a と M_{bh} に制限をつけることができる。

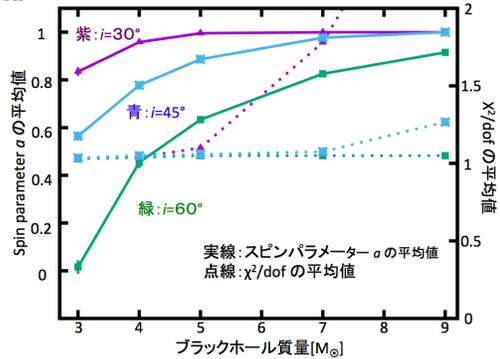


図6: BH質量とスピンパラメーター a の平均値

5 考察とまとめ

Swift/XRTで得られたデータを解析することで、2014年のアウトバースト中にGRS 1739 - 278が状態遷移していることがわかった。ソフト1期間とソフト2期間では、標準円盤が r_{ISCO} まで達していることが示唆された。この r_{ISCO} から $i=60^\circ$ 、 $D=7\text{kpc}$ [9]と非回転BHと仮定するとGRS 1739 - 278のブラックホール質量は $3.0 \pm 0.5M_\odot$ と見積ることができた。また一般相対論的效果を考慮した標準円盤からの放射モデルで解析し、GRS 1739 - 278のブラックホールのスピンパラメータと質量の値の取りうる範囲を制限する事ができた。

References

- [1] Gehrels, N., et al. ApJ,2004, 611, 1005
- [2] Paul, J. Bouchet, L. Churazov, R. IAUCirc.1996,6348
- [3] Wilms, Allen and McCray 2000, ApJ 542, 914
- [4] Steiner, J. F., Narayan, R., McClintock, J. E., & Ebisawa, K. PASP, 2009, 121, 1279
- [5] Mitsuda, K. et al. PASJ,1984, 36, 741
- [6] Shakura, N. I. Sunyaev, R. A&A ,1973,24, 337
- [7] Li et al., ApJSuppl, 2005, 157, 335
- [8] Shimura and Takahara ApJ, 1995,445, 780
- [9] Greiner J., et al. A&A,1996,314
- [10] Kubota et al. PASJ,1998,50,667