

X線天文衛星すざくによる高降着率状態の 恒星質量ブラックホールの研究

電気電子情報工学専攻
宇宙情報工学研究

たむらまなみ
m110090-8 田村愛美
指導教員 久保田あや

1 はじめに

ブラックホール（以降 BH）とは、太陽質量の 30 倍以上の恒星が進化の最終段階で重力崩壊を起こし形成した天体であり、光さえも抜け出せない程の重力を持つ。そのため、BH が単独で存在する場合は観測が難しい。しかし、図 1 の様に、光学主星と BH が近接連星系を成している場合、光学主星からのガスは相手の星の外層大気が BH の強い重力に引かれ、BH のまわりをケプラー運動しながら落ち込んでいく。このようにして形成されるガス円盤を「降着円盤」と呼ぶ。降着円盤に BH からのガスが落ち込む時に摩擦により数千万度の高温に熱せられ強い X 線が放射される。この X 線を観測することにより、BH を間接的に知ることができる。

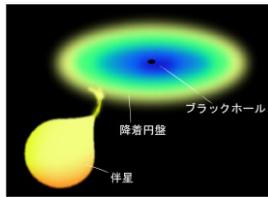


図 1: BH 連星周辺の概念図 [出典: jaxa]

2 BH の観測と研究目的

宇宙の天体からの X 線は地球の大気によって吸収されるため、観測には人工衛星が用いられる。今までに多くの X 線天文衛星によって、BH 連星の観測が行われ、BH に落ち込むガスの量、すなわち降着率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。降着によって輝く BH の最大値であるエディントン限界に対して、10%程度以上の明るさで輝く BH では、光学的に厚い降着円盤が形成され、通常では、図 2 の緑色のスペクトルように軟 X 線で明るいソフト成分とべき関数的 (power-law: エネルギー E にたいして $f(E) \propto E^{-\Gamma}$) な硬 X 線放射で特徴づけられる。ソフト成分は BH 周りに広がった標準降着円盤 [1] を近似した多温度黒体放射 (DISKBB モデル [2]) でよく再現できる。これは、降着物質が BH に落ちこむ過程で、力学的エネルギーの半分を黒体放射として宇宙空間に放出するとして、円盤は BH からの距離 r において局所温度 $T(r) = T_{in}(r/r_{in})^{-3/4}$ の温度で黒体放射するとして放射モデルであり、スペクトルから円盤の最も内側の温度 T_{in} とその半径 r_{in} が得られる。内縁半径 r_{in} は観測的に非常に重要な物理量である。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最終安定軌道とよばれる下限があり、非回転 BH ではシュバルツシルト半径 R_s の 3 倍、極端回転 BH では 1/2 倍より内側では安定な軌道が存在せず、物質は BH に落ち込んで行く。したがって、観測から得られる円盤の内縁半径 r_{in} は BH の最終安定軌道に一致していると考えられる。実際、多くの BH の high/soft 状態では得られた r_{in} は、最終安定軌道に矛盾ないことが確立してきた (e.g., [14]) しかし、観測例が増えてくると、BH 連星はより明るい状態になると、スペクトル形状が図 2 の黒色のスペクトルのように、power-law 成分が卓越した very high 状態 (以後 VHS) に遷移することが明らかになり、この状態では、high/soft 状態と同様に放射スペクトルをモデル化すると円盤の物理量に物理

的矛盾が生じることがわかってきた (e.g., [3])。本研究では、日本の X 線天文衛星すざくによって観測された二つの BH 連星、GX 339-4 および MAXI J1659-153 の VHS の詳細スペクトル解析を行い、VHS における降着円盤の幾何学的配置、構造を明らかにすることを目的とする。

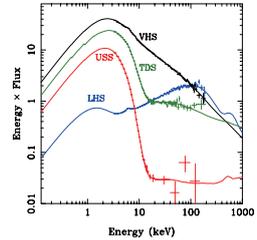


図 2: スペクトル状態 [14]

3 GX 339-4 と MAXI J1659-153 の「すざく」による観測

GX 339-4 は、1970 年にてんま衛星によって発見された天体で、距離が $D=7-9\text{kpc}$ [6] ($1\text{kpc}=3.0 \times 10^{19}[\text{m}]$)、連星の軌道傾斜角が $i=50^\circ$ [15] と見積もられている。一方、MAXI J1659152 は、2010 年 9 月 25 日に swift と MAXI によって発見された BH 連星で、距離は $5.3-8.6\text{kpc}$ と見積もられている [8]。通常の high/soft 状態における円盤内縁半径はいずれも X 線光度の大きな変化に対して一定に保たれており、その値は、GX 339-4、MAXI J1659-152 それぞれ $r_{in}\sqrt{\cos i}=53\text{km}$ ($D=8\text{kpc}$ を仮定)、および 35km ($D=10\text{kpc}$ を仮定) と得られている。すざく衛星 [9] は、2005 年に打ち上げられた、日本で 5 番目の X 線天文衛星で、0.2-12 keV で観測可能な軟 X 線検出器 (XIS) [10] と 10-300 keV で観測可能な硬 X 線検出器 (HXD) [11] が搭載されており、これら 2 種類の検出器によって、0.2-300 keV という広帯域のエネルギー領域での観測が可能である。すざくによって観測された BH 連星は 8 天体あり、その中で VHS の観測は、2007 年 2 月 12 日-15 日に行われた GX 339-4 の観測、および 2010 年 9 月 29 日から 10 月 1 日に行われた MAXI J1659-152 の観測である。図 3、4 にそれぞれの天体の X 線強度変動を載せ、すざくの観測した期間を点線で示す。

本観測では天体の明るさが大変明るいいため、視野を絞って読み出し時間を節約する 1/4 window mode での観測が行われた。それに加え、通常の CCD の露光時間は 8 秒であるが、GX339-4 は 3 台ある XIS 検出器のうち XIS0 と XIS1 が 0.3 秒、XIS3 が 0.2 秒、MAXIJ1659-152 は XIS3 のみ 0.3 秒と、短い露光時間で読み出す burst option 付きの観測が行われた。

4 データ解析

4.1 GX 339-4 のスペクトル解析

図 5 (a) に得られた X 線スペクトルを示す。まず、通常の high/soft 状態と同様の描像を考え、DISKBB と power-law に、鉄輝線と円盤からの反射を考慮したモデルでデータの再現を試みた。データとモデルの差分は図 5(b) であ

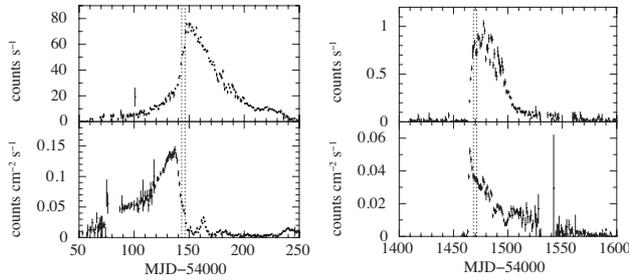


図 3: GX 339-4 の強度変動の図。上がエネルギー範囲 1.5-12keV で、下が 15-50 keV である。

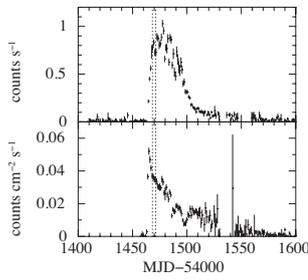


図 4: MAXI J1659-152 の強度変動の図。エネルギー範囲は、それぞれ、2-20keV と 15-50keV である。

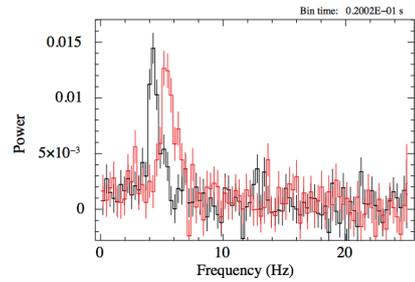


図 7: 前半のパワースペクトル。前半から後半にかけて QPO の周波数が高くなっている。

り、 χ^2 検定による値は $\chi^2/\text{dof}=19.0245/186$ とデータはよく再現されるものの、得られる power-law が卓越しており物理的に正しくないものであった。次に、光学的に厚い降着円盤の上に高エネルギーのコロナが全面を覆っている場合 (図 6b)、降着円盤の降着物質が中心部で分岐してコロナのエネルギーとなる場合 (図 6c) の二つのモデルをこころみた。結果は、図 5(c)(d) に示したように、 χ^2/dof は 198.938/186、178.682/186 であった。このときの円盤内縁半径は 133km および 93km と得られ、いずれも通常の high/soft 状態での半径 (53km; §3) に比べて拡大していることがわかった。

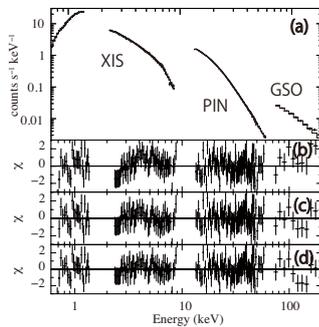


図 5: GX 339-4 すざくスペクトル

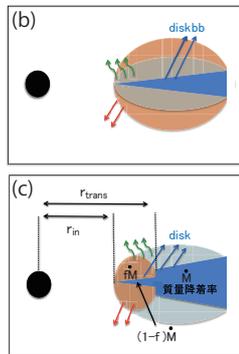


図 6: モデルの描像

4.2 GX 339-4 の時間変動

HXD-PIN のパワースペクトルを作成した結果、QPO が前半 4.2Hz に対し後半 5.9Hz と周波数がみられ、前半から後半にかけて QPO 周波数が増加していることが分かった (図 7)。この変動は周期的ではないが全くランダムでもないので準周期的変動 (QPO) と呼ばれる。

そこで前後半のスペクトルにも変化が現れているかを探るため、エネルギーバランスを考慮したモデル (図 6c) で評価したところ、前半から後半にかけて高温コロナの密度がやや小さくなったことが示唆された。コロナのサイズの指標である r_{in} および r_{trans} は統計誤差の範囲では 8% 以内で一定である。4.2Hz から 5.9Hz への QPO 周波数変化に対応するコロナの予想されるサイズ変動は 7% 程度であり [17] 今回の観測結果に矛盾はないことが分かった。

4.3 MAXI J1659-152 のスペクトル解析

MAXI J1659-152 についても GX 339-4 と同様のモデルで解析を行った。その結果、 $\chi^2/\text{自由度}$ は、227.6/212、230.2/212、245.8/212 と、いずれのモデルもデータを再現した。しかし標準円盤モデルでは、power-law が卓越しており物理的に正しくないものである。円盤とコロナの独立した描像モデル (図 6b) とエネルギーバランスを考慮したモ

デル (図 6c) の結果より T_{in} は 0.50keV、0.60keV となり、内縁半径 R_{in} を求めると、84.2km、80.0km となり、いずれも通常の high/soft 状態での半径 (35km; §3) に比べて拡大していることがわかった。

5 結果と考察

本研究では、すざく衛星で観測されたすべての VHS データ、GX 339-4 と MAXI J1659-152 について、詳細な円盤の構造を探るために、標準的な円盤モデル、円盤とコロナの放射が独立した描像の円盤モデル、円盤とコロナのカップリングの描像の円盤モデルで解析を行った。GX 339-4 では、いずれのモデルにおいても、データを良く再現し、 r_{in} が HS の内縁安定軌道に届かず truncated disk が形成されていると結論付けられる。また、データを前半と後半に分けた解析を行った結果、前半から後半にかけて徐々に円盤が最終安定軌道側に伸び、それにつれてコロナの放射が減少している構造がみられ、これは、QPO 周波数と相関があると考えられた。MAXI J1659-152 では、いずれの解析結果も、HS の最終安定軌道には届かず truncated disk が形成されていると考えられる結果が得られた。

参考文献

- [1] Shakura, Sunyaev. 1973, A&A, 24, 337
- [2] Mitsuda, K., et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [3] Kubota, A. et al. 2001, ApJL, 560, 147
- [4] Kubota, Done. 2004, MNRAS, 354, 980
- [5] Markert et al. 1973, ApJ, 184, 67
- [6] Zdziarski et al. 1998, MNRAS, 301, 435
- [7] Hynes et al. 2004, ApJ, 609, 317
- [8] Yamaoka et al 2011, PASJ, 63, S751
- [9] Mitsuda, K. et al. 2007, PASJ, 59, 1
- [10] Koyama, K. et al. 2007, PASJ, 59, 23
- [11] Takahashi, T. et al. 2007, PASJ, 59, 35
- [12] Done, Kubota. 2006, MNRAS, 371, 1216
- [13] Kolehmainen & Done, 2009
- [14] Done, Gierlinski, Kubota. 2007, A&A, 15, 1
- [15] Shidatsu et al. 2011
- [16] Yamada, et al. 2011, ApJ
- [17] Ingram et al. 2009, MNRAS, 397, L101

研究業績

田村愛美, 久保田あや 他, "すざくによるブラックホール天体 GX339-4 の very high state の観測", 日本天文学会 2011 年春季年会発表
 田村愛美, 久保田あや 他, "「すざく」による GX 339-4 と MAXI J1659-152 の very high state の観測", 日本天文学会 2012 年春季年会発表予定
 Tamura, Kubota et al. "The truncated disk from Suzaku data of GX 339-4 in the extremely comptonized very high state", Astrophysical Journal 投稿中 (査読にしたがって改訂中)