

「すぎく」衛星による MAXI J1659-152 の広帯域 X 線スペクトル解析

宮崎 直人 (首都大学東京大学院 理工学研究科)

Abstract

ブラックホール (BH) 連星では伴星からの物質供給が起こり、降着物質が獲得した重力エネルギーが X 線として解放される。その放射は主に降着円盤からの熱的な成分と、BH 周辺のコロナからのコンプトン放射による連続成分から構成される。前者が優勢のときをソフト状態、後者が優勢のときをハード状態と呼ぶ。MAXI J1659-152 は国際宇宙ステーションに設置された全天 X 線監視装置 (MAXI) によって 2010 年 9 月 25 日に発見された BH 候補天体である。その後数日間の内に次々に追観測が行われた。「すぎく」衛星でも 9 月 29 日から 10 月 1 日の間に 3 回観測が行われた。MAXI による長期間の変動の観測により、発見当初この天体はハード状態であり、「すぎく」衛星での観測時はハード状態からややソフトな状態に向かいつつある過渡期であると考えられる。我々はこの「すぎく」衛星のデータの解析を行った。姿勢の補正、パイルアップの処理、テレメトリ欠損と統計を考慮したデータ選別の最適化を行い、 ~ 0.7 keV から ~ 200 keV までのエネルギースペクトル、ライトカーブ、パワースペクトルを得た。広帯域のエネルギースペクトルは、どの観測においても概ねハード状態の典型的なモデル (円盤モデル+熱的コンプトン) で再現できた。また、3 日間のパワースペクトルから QPO 周波数の変化と天体のハードネスの変化の関係を見つけることができた。

1 Introduction

銀河系内に存在する恒星質量 BH はこれまでに銀河系内に 50 個程度発見されている。BH そのものを光で観測することはできないが、恒星や白色矮星等と連星を成している Black hole X-ray binaries (BHXB) では伴星から物質の供給が起こり、回転しながら薄い円盤状になって落ち込んでいく。この降着円盤は標準モデルでは光学的に厚く、幾何的に薄いとされ、そこからの放射のスペクトルは温度に依存した黒体放射で表される。一方 BH の内縁部周辺にはコロナと呼ばれる、 ~ 100 keV 程度の高温で密度の低い電子雲が広がっており、降着円盤から出た光子はこのコロナで散乱、加速されて数百 keV という硬 X 線領域まで到達する。この逆コンプトン散乱によるスペクトルはべき 1.4-2 程度の冪関数で表される。BHXB ではアウトバーストと呼ばれる突発的な増光現象や数日のうちにハードネスが大きく変化する現象がみられる。円盤からの放射が支配的な軟 X 線優勢で明るい状態をソフト状態、コロナからの放射が支配的な硬 X 線優勢で暗い状態をハード状態と呼ぶ。

MAXI J1659-152 は MAXI が発見した恒星質量 BHXB の候補天体である。2010 年 9 月 25 日に発見

された後、RXTE、*Swift*、*XMM-Newton*、「すぎく」で次々と追跡観測が行われた。観測は X 線だけでなく、*Swift*/UV Optical Telescope (UVOT) や ESO/Very Large Telescope (VLT) で UV や可視光での観測も行われた。MAXI J1659-152 の時間変動の解析から以下のことが示唆されている。(E.Kuulkers et.al. 2013) 軌道周期は発見されている BHXB 中最短の ~ 2.4 時間であり、これは連星が銀河面から 2.4 ± 1.0 kpc と比較的離れた所に位置していることと関係していると考えられている。ディップの様子から降着円盤の傾斜角 (円盤の法線と視線のなす角) は $65-80^\circ$ である。伴星は $0.15-0.25 M_\odot$ 、 $0.2-0.25 R_\odot$ の M5 型矮星である。

本研究では MAXI J1659-152 の「すぎく」衛星のデータについて主にエネルギースペクトルの解析を行った。「すぎく」での観測時、この天体はハードからソフトへと移行する中間である、Intermediate と呼ばれる状態であった。

2 Data Processing

2010 年 9 月 29 日から 10 月 1 日の 3 日間にわたって「すざく」衛星で取得されたデータを解析した。「すざく」衛星搭載の検出器は XIS、HXD-PIN、HXD-GSO の 3 つでそれぞれのエネルギー帯域は 0.4-12 keV、10-70 keV、40-700 keV である。XIS は 0.8-10 keV、HXD は X 線バックグラウンド (NXB) に対して天体からの信号が 1% 以上となる 200 keV 以下を使用した。ただし、検出器や望遠鏡の応答が合わない 1.7-1.9 keV、2.1-2.3 keV、42-50 keV は除いた。また、XIS では半径 4 分角の円から中心の 1-1.5 分角取り除いた領域を使用した。これは天体が明るい場合 CCD が検出限界を超えてしまい正しく光子をカウントできない、パイルアップと呼ばれる現象の影響を軽減するためである。なお、XIS の観測モードは、1,2 日目が 1/4 window normal mode、3 日目が 1/4 window burst mode である。そのため、3 日目の観測の統計が他 2 日間に比べて良い。また、衛星の姿勢のずれとみられる変動があったためこれをツールで補正した。解析には HEADAS version 6.15 を使用した。

3 Results

3.1 Power Spectrum

図 1 は 3 日間の 10-20 keV のパワースペクトル、図 2 は 3 日間のスペクトルを適当なモデルでフィットし、モデルとの比をとったものである。図 1 から 1 日目の準周期的振動 (QPO) のピーク周波数が他 2 日間と比べて小さいことがわかる。また、図 2 を見ると 1 日目 (黒線) のスペクトルが 5-30 keV あたりにかけて 10% 程度卓越している。ハードネスと QPO の周波数の関係はこれまでも示唆されてきたが、その物理的要因はまだ解明されていない。

3.2 Spectrum Analysis

3 日間のデータのうち最も統計の良い 3 日目のデータを中心にフィッティングを行った。スペクトルはハード状態の BHBX の代表的な 黒体放射 + 熱的コ

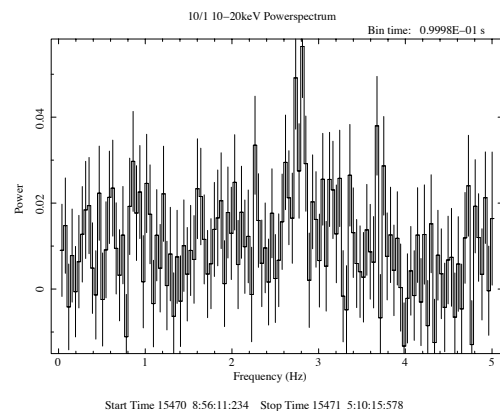
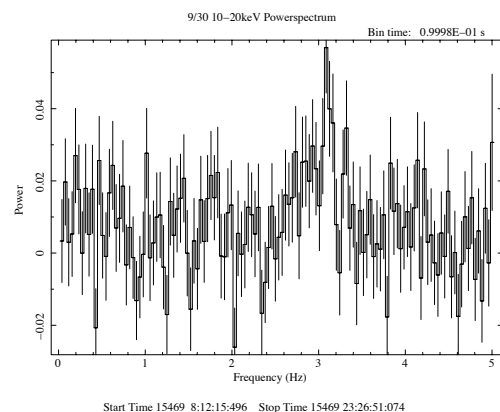
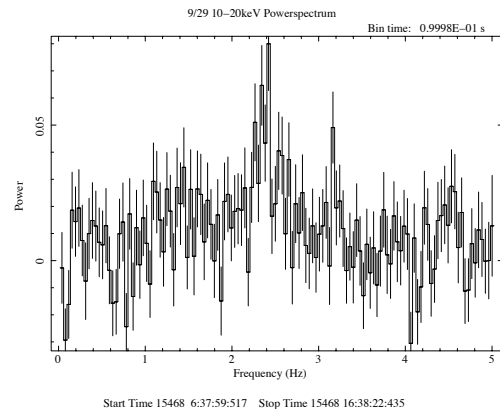


図 1. 10-20 keV のパワースペクトル. 左上が 1 日目, 右上が 2 日目, 下が 3 日目である. ピークの位置はそれぞれ 2.4, 3.1, 2.9 Hz である.

ンプトンのモデルでフィットを行った。このような状態を再現する diskbb + cutoffpl、これに星間吸収をかけた TBabs * (diskbb+cutoffpl) というモデル

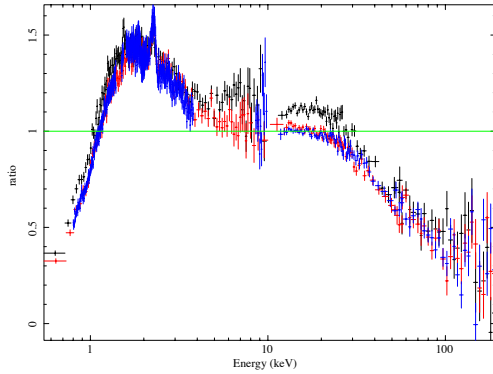


図 2. 3 日間のスペクトルの比. 黒線が 1 日目, 赤線が 2 日目, 青線が 3 日目.

を使用した. フィットの結果を図 3、パラメータを表 1 に示す.

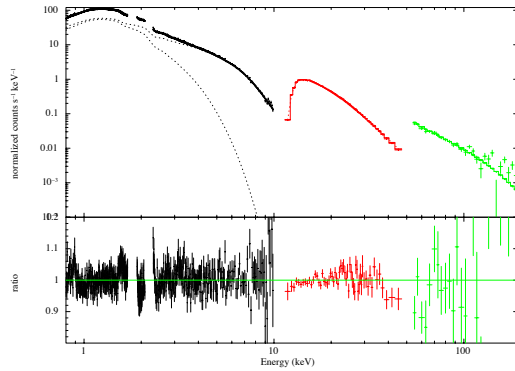


図 3. 関数モデルによるフィットの結果. 上段はデータ, 下段はモデルとの比である.

表 1. 図 3 のフィットで得られたパラメータ. nH, T_{in}, Γ はそれぞれ星間吸収, 最内縁温度, 及びべきである.

nH (10^{22})	T_{in} (keV)	Γ	Cutoff (keV)
$0.29^{+0.006}_{-0.005}$	$0.51^{+0.007}_{-0.006}$	$1.99^{+0.01}_{-0.01}$	$67^{+3.7}_{-3.5}$

このような簡単なモデルでも 100 keV あたりまでよくフィットできた. χ^2/dof は 879.8/578 であった.

続いて, より複雑なモデルを使ってフィットを行った. ここでは円盤温度, コロナの電子温度と光学的

深さ, 反射成分を考慮した compPS モデルを使用した. 上記のモデルとの違いは, こちらは物理的描像を取り入れているという点である. 実際にフィットに用いたモデルは compPS にもう一つ円盤 (直見え円盤) を加えた, TBabs * (diskbb + compPS) である. 2つの円盤の温度は一致するようにし, 傾斜角は E.Kuulkers et.al. (2013) に従って $65-80^\circ$ に固定した. χ^2/dof は 1% の systematic error を含めて 782/575 であった. フィットの結果を図 4、パラメータを表 2 に示す.

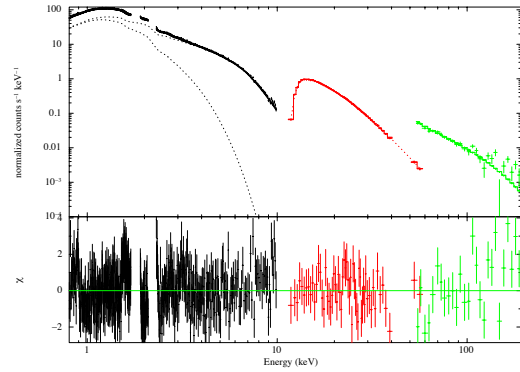


図 4. 物理モデルによるフィットの結果. 上段がデータ, 下段がモデルの残差である.

4 Discussion

それぞれのモデルの norm から BH の内縁半径 R_{in} を求めることができる. norm と R_{in} [km] の関係は,

$$\text{norm} = \left(\frac{R_{in}}{D} \right)^2 \cos\theta \quad (1)$$

で与えられる. ここで D は天体までの距離 [単位: 10kpc] である. E.Kuulkers et.al. (2013) に従い, $D \sim 8.6$ kpc とする. diskbb, compPS の norm からそれぞれ R_{in} を求めると, 132km, 127km となる. これは恒星質量 BH には大きすぎる値である. パラメータをより精密に定めていく必要がある.

前節では 3 日目の解析結果のみを述べたが, フィットの結果, 3 日間で電子温度の継続的な減少がみられ

表 2. 図 4 のフィットで得られたパラメータ. 左から, 吸収, 内縁温度, diskbb の norm, 電子温度, 光学的深さ, 傾斜角, 反射成分の大きさ, compPS の norm を表す.

nH (10^{22})	T_{in} (keV)	norm1	kTe (keV)	τ	cosInc(deg)	rel-refl	norm2
$0.25^{+0.007}_{-0.007}$	$0.47^{+0.009}_{-0.009}$	4745^{+539}_{-610}	$38.9^{+7.23}_{-6.33}$	$1.5^{+0.18}_{-0.39}$	0.200	0.577	4352^{+875}_{-764}

た。これは天体のハードネスの変化に関係していると考えられる。

表 3. 3 日間の電子温度の変化.

	kT_e (keV)
1 日目	$52.1^{+10.0}_{-8.9}$
2 日目	$48.5^{+6.2}_{-12.5}$
3 日目	$38.9^{+7.23}_{-6.33}$

5 Conclusion

「すぎく」衛星の取得した MAXI J1659-152 のデータの解析を行い、ライトカーブ、パワースペクトル、広帯域の X 線スペクトルを得ることができた。3 日間のパワースペクトルの比較から、ハードネスと QPO 周波数の関係を発見することができた。200 keV までのスペクトルは関数モデルと物理的モデルの両方でよくフィットできたが、個々のパラメータについてはもう少し精査する必要がある。

Reference

E.Kuulkers et.al. 2013, arXiv:1204.5840