

X線衛星「すざく」による銀河系内ブラックホール連星 GX 339-4 の観測とスペクトル解析

京都大学 宇宙物理学教室 M1

志達 めぐみ

第 40 回天文天体物理若手夏の学校

2010 年 8 月 2 日-5 日

コン 40a

1 概要

我々は、X線衛星「すざく」を用いて、2009年3月に合計3日間にわたり、「low/hard 状態」と呼ばれる硬 X線の強い状態にある銀河系内ブラックホール連星 GX 339-4 を観測した。「すざく」は 10 keV 以下で高エネルギー分解能を達成しつつ、0.2-600 keV の広いエネルギー帯域を同時にカバーする。その結果、今回の観測で、同状態にある本天体のデータとしては過去最高の質のデータを取得することに成功した。その連続スペクトルを円盤からの光子を種とするコンプトン散乱モデルで解析したところ、温度と光学的厚みが一定のコロナでは説明できず、少なくとも 2 つの異なる光学的厚み ($\tau = 1.21, 0.31$) が必要であることがわかった。この事実は、コロナの構造が非一様であることを示唆する。また、6.4 keV 付近に見られる鉄輝線を、相対論的效果を考慮した降着円盤からの輝線放射モデルで解析した結果、標準円盤がブラックホールの最内縁安定軌道まで伸びていないという示唆を得た。

2 導入

ブラックホール連星は、ブラックホールと恒星からなる近接連星系であり (図 1)、エネルギースペクトルと時間変動の特徴の異なる、いくつかの「状態」をとることが知られている。

図 2 は、ブラックホール連星の 2 種類の典型的な状態における X線スペクトルを表している。このうち 10 keV 以下の軟 X線が支配的である状態 (図 2、赤) を「high/soft 状態」と呼び、その軟 X線スペクトルは、標準円盤から出る様々な温度の熱放射の重ね合わせ (多温度黒体放射) として、よく理解されている。

一方、硬 X線成分の強い「low/hard 状態」(図 2、青) では、100 keV 付近にカットオフのある冪型のスペクトルを示すことから、標準円盤の周囲に高温コロナが存在し、熱的コンプトン散乱が起こっていると考えられている。さらに、降着円盤

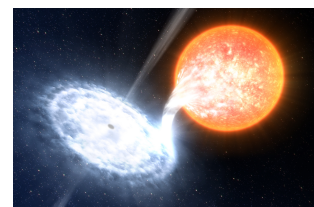


図 1 ブラックホール連星のイメージ図

起源の鉄の K 蛍光輝線の形状の解析から、標準円盤がブラックホール近傍の最内縁安定軌道（回転していないブラックホールの場合、Schwarzschild 半径の 3 倍）まで伸びておらず、途中で途切れている可能性が示唆されている。しかし、現状の結果は不定性が大きく、降着円盤やコンプトン散乱を起こすコロナの物理状態やジオメトリは良く分かっていない。

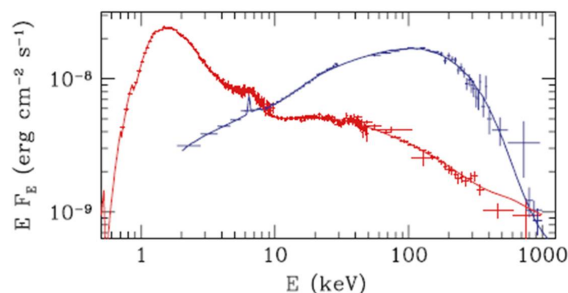


図 2 1991 年 (青)、1996 年 (赤) におけるブラックホール連星 Cyg X-1 のスペクトル (Done et al. 2007)。縦軸は $E F_E$ で表現されている。

3 観測

我々は、X 線衛星「すざく」を用いて、low/hard 状態にある銀河系内のブラックホール連星 GX 339-4 を観測した。観測は 2009 年 3 月 18 日、25-26 日、30-31 日 (以下では、それぞれ 1,2,3 日目と呼ぶ) の合計 3 回行われ、1 回の観測における正味の露出時間は、平均で約 40 ksec であった。

「すざく」は、軟 X 線検出装置の X-ray Imaging Spectrometer (XIS) と、硬 X 線検出装置の Hard X-ray Detector (HXD) を搭載している。XIS、HXD はそれぞれ 0.5-12 keV、10-600 keV をカバーしており、XIS は高いエネルギー分解能を誇っている (6 keV における分解能 ~ 130 eV)。したがって、これら 2 種類の装置を用いると、0.2-600 keV という非常に幅広いエネルギー帯域の X 線を検出可能で、同時に軟 X 線領域では輝線等の局所的構造を解析するために十分な、高いエネルギー分解能でのスペクトルを取得できる。このような「すざく」の優れた特徴により、我々は、今回の観測で、GX 339-4 の low/hard state における観測としては過去最高の質のデータを得ることができた。

図 3 は、3 回の観測で得られた時間平均の生スペクトルである。各観測日のスペクトルの形状は、ほぼ一致していることがわかる。

以下では 1 日目の観測で得られたスペクトルの解析とその結果について述べる。(ただし、2,3 日目の観測データに対しても同じ解析を行っており、それぞれの結果が信頼度 90% の誤差範囲で一一致することを既に確認している。)

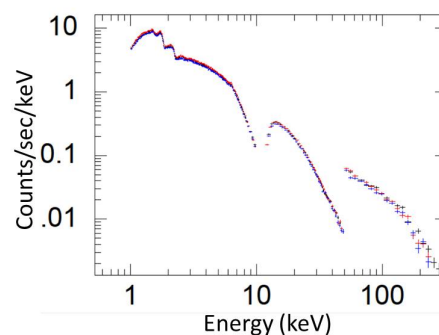


図 3 1、2、3 日目の観測で得られた時間平均スペクトル (順に黒、赤、青)。検出器の応答がかかっている。

4 解析と結果

4.1 広エネルギー帯域の解析

ブラックホール連星のジオメトリとして図 4 を仮定すると、観測される X 線スペクトルは、(1) 標準円盤の熱放射の直接成分、(2) コロナの熱的電子と円盤から放射された光子とのコンプトン散乱、(3) 円盤における散乱光子の反射、の 3 種類が考えられる。これらをすべて考慮したモデルを用いて、1 日目のスペクトル全体のフィットを試みた。ここで、散乱成分として、球対称で一様な光学的厚みを持ったコロナを仮定した。また、6.4 keV 付近に見られる鉄輝線については、物理的モデルを用いた詳細な解析を以下で行うが、ここでは Gaussian を使用した。その結果、図 5 の中段のように硬 X 線領域にモデルとデータの顕著なずれが残った。このような現象は、過去の「すざく」による low/hard 状態のいくつかの観測で発見されている (例えば、Makishima et al. 2008)。我々は、それらの先行研究と同様に、光学的厚みのみが異なるコンプトン散乱成分をもう 1 成分加えて、再びスペクトルフィットを行った。その結果、図 5 下段のように硬 X 線部分の残差が消え、フィットが改善した。したがって、コロナの構造は一様ではなく、少なくとも 2 種類の光学的厚みが必要であるといえる。

ベストフィット時の主要なパラメータを表 1 に、全体のスペクトルに対する各成分の寄与を表したグラフを図 6 に示した。

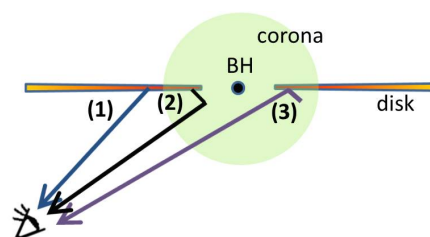


図 4 ブラックホール連星のジオメトリと放射機構

表 1

| モデル要素 | パラメータ | 値 |
|-----------|--|----------------------------------|
| 円盤の熱放射 | 内縁の温度 T_{in} (keV) | $0.225^{+0.003}_{-0.002}$ |
| 散乱体 (コロナ) | 電子温度 T_e (keV) | 142 ± 9 |
| | 光学的厚み τ | $1.210 \pm 0.005, 0.31 \pm 0.02$ |
| 反射体 | 立体角 $\Omega/2\pi^{*1}$ | 0.22 ± 0.02 |
| | 電離パラメータ ^{*2} ξ (erg cm s^{-1}) | $0.3^{+1.5}_{-0.3}$ |

^{*1} 散乱体から反射体 (円盤) を見込む立体角 Ω を 2π で規格化した値。

^{*2} 光電離の強さを表す指標。X 線源の光度を L 、距離を r 、X 線源を取り囲むガスの粒子密度を n として、 $\xi = L/(nr^2)$ と定義される。

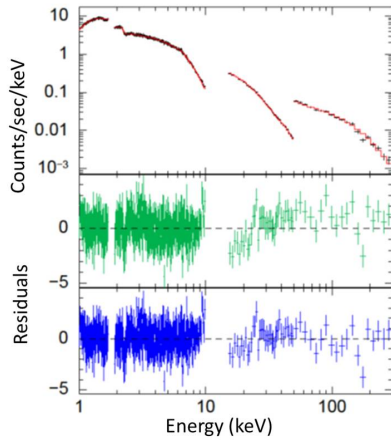


図5 モデルフィットの結果。上段:1日目のスペクトル(黒)と、2種類の散乱成分を用いたベストフィットモデル(赤)。中段:一様球対称の散乱成分を用いたモデルフィットの残差。下段:2種類の散乱成分を用いたモデルフィットの残差。

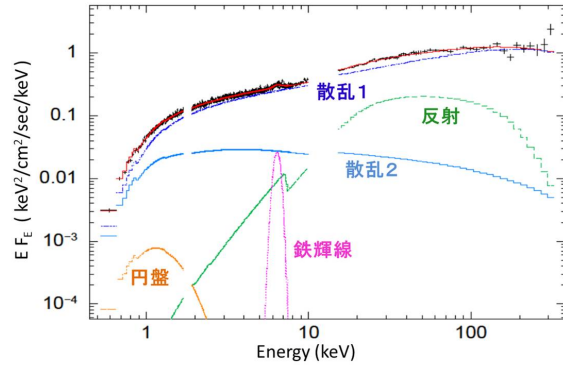


図6 ベストフィット時における、2種類のコンプトン散乱成分を用いたモデルの νF_ν スペクトル。各モデル成分の寄与も合わせて示した。

4.2 鉄輝線の解析

上で述べた2種類のコンプトン散乱成分を用いたモデルの結果から Gaussian を除いたものを連続光として採用し、観測スペクトルをフィットすると、図7左の下段のように、6–7 keV に広がった輝線の構造が見られる。これが、降着円盤から放射された鉄の K 蛍光輝線である。降着円盤起源の輝線の形状は、円盤の回転による Doppler broadening、ブラックホールの重力ポテンシャルによる重力赤方偏移などによって決まる。これらの効果は中心のブラックホールに近づくほど大きくなるため、輝線の解析によって降着円盤の内縁半径に制限をつけることが可能である。

そこで、我々は相対論的效果を考慮した降着円盤からの輝線モデルを用いて、6.4 keV 付近にみられる鉄の K 蛍光輝線の解析を行った。図7右はベストフィット時のスペクトルと鉄輝線の寄与を示している。解析の結果、円盤の内縁半径は $16^{+8}_{-4} r_s$ (r_s は Schwarzschild 半径) となった。この値は、最内縁安定軌道の半径 ($\lesssim 3 r_s$) より大きく、標準円盤が途中で途切れていることを示唆する。

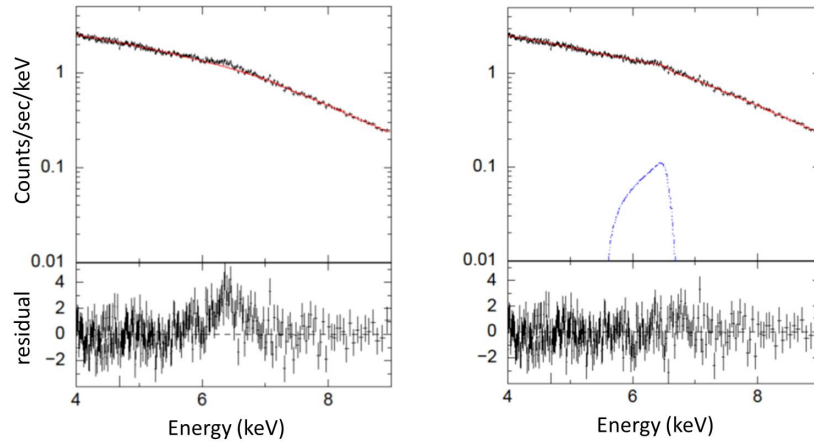


図7 左: 6.4 keV 付近に見られる鉄の蛍光輝線。1 日目のスペクトル (上段、黒) を 2 成分の散乱体を用いたモデル (赤) でフィットした残差を下段に示している。右: 相対論的效果を考慮した輝線モデルでフィットした結果。モデル全体を赤、鉄輝線の寄与を青で示した。

5 まとめ

我々は、「すざく」衛星を使用して、low/hard 状態にある銀河系内ブラックホール連星 GX 339-4 を 2009 年 3 月に合計 3 回観測した。観測 1 日目のスペクトル全体を、降着円盤から放射された光子を種とする熱的コンプトン散乱モデルを用いて解析した結果、散乱体の光学的厚みは少なくとも 2 種類 ($\tau = 0.311.21$) 必要であることがわかった。したがって、コロナの構造は非一様であるといえる。さらに、6.4 keV 付近に見られる鉄の蛍光輝線を、相対論的效果を考慮した円盤からの輝線放射モデルを用いて解析した結果、円盤の内縁半径は $16_{-4}^{+8} r_s$ となった。これは、標準円盤が最内縁安定軌道まで伸びておらず、途中で途切れていることを示唆する結果である。

参考文献

- [1] Done, C., Gierliński, M., & Kubota, A. 2007, A&A Rev., 15, 1
- [2] Makishima, K., et al. 2008, PASJ, 60, 585