

X 線観測衛星「すざく」による very high state にあるブラックホール X 線連星 4U1630-47 の観測

堀 貴郁 (京都大学理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

ブラックホール (BH) への高質量降着流の理解は、銀河中心核にある巨大ブラックホールの成長メカニズムの解明につながる重要な課題である。このための最適な研究対象は、BH 連星と呼ばれる、3 ~ 10 太陽質量のブラックホールと恒星からなる近接連星系である。

BH 連星の X 線スペクトルは大きく分けて 2 つの状態をとることが知られている。降着率が低いときは、降着円盤上のコロナからの逆コンプトン散乱が支配的なスペクトルを示し、降着率が高くなると円盤からの黒体放射が支配的なスペクトルを示す。さらに質量降着率が大きいところでは、very high state (VHS) という、強い円盤放射と強いコンプトン散乱が同時に観測される状態をとる。しかし、この状態は珍しいためこれまで観測例が少なく、降着円盤やコロナの物理状態がほとんど理解されていない。また、近年この状態で相対論的ジェットが放出されていることが確認された [1] が、それは VHS において定常的に放出されているのかは分かっていない。

我々は、2012 年 10 月、X 線天文衛星「すざく」を用いて、VHS にあった BH 連星 4U 1630-47 を観測した。その結果、VHS にある BH 連星としては過去最高精度で、1.2 - 200 keV という広域にわたる X 線データを取得することができた。この X 線スペクトルを、降着円盤からの熱的放射と、コロナによる逆コンプトン散乱成分からなるモデルを使って解析したところ、BH 周りの降着円盤は標準円盤を保っておらず、コロナなどの密度の低い状態に遷移していることを発見した。また、この観測の 4 日前に相対論的ジェット [1] が観測されていたが、本観測ではジェットは確認されなかった。ポスターでは、VHS の物理状態・ジェットの放出について議論する。

1 Introduction

ブラックホール (BH) の質量進化の謎は天文学最大の問題の一つである。宇宙が誕生してわずか 8 億年後の超遠方宇宙において、 $10^9 M_{\odot}$ もの超巨大 BH が存在することが知られている。最大の謎はこのような短期間で超巨大 BH を生む機構にある。これを説明する有力な候補は、恒星質量 BH ($3 \sim 10 M_{\odot}$) への超臨界質量降着である。超臨界質量降着とは、中心天体からの光圧が重力を上回る光度 (Eddington 光度) を越えて明るく輝くほどの激しい質量降着を指す。この現象の理解なくして巨大 BH 形成の謎は解明できないであろう。

この研究に最適な天体は BH 連星である。BH 連星とは恒星質量 BH と恒星との近接連星系で、恒星の質量を BH が剥ぎ取り、BH 回りに降着円盤を形

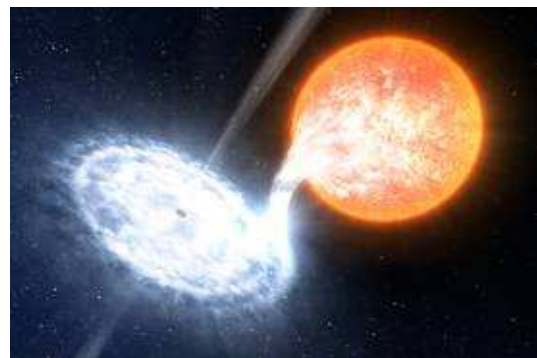


図 1: BH 連星の想像図

成している系のことである (図 1)。

この降着円盤はとても高温で (~ 1000 万度)、X 線のようなエネルギーの高い波長で観測される。BH 連星は度々突発的な増光 (outburst) を起こす。これ

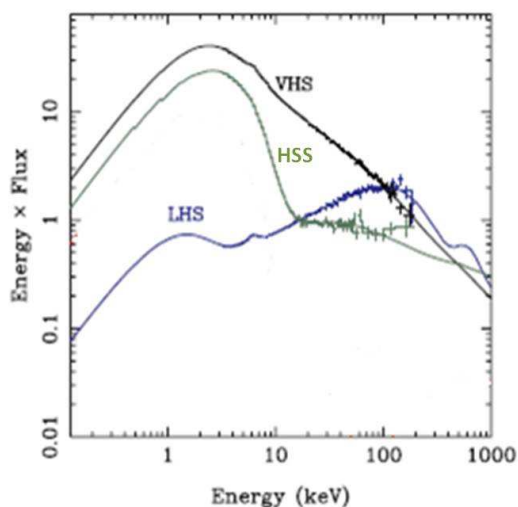


図 2: それぞれの状態における GRO J1655-40 のスペクトル。(Done et al. 2007)

に伴って、観測される X 線スペクトルが大きく変動することが知られている。この X 線スペクトルは 3 つの状態 low/hard state (LHS)、high/soft state (HSS)、very high state (VHS) に大別できる。図 2 はこれらの X 線スペクトルの一例である。

HSS は標準円盤(光学的に厚く、幾何学的に薄い円盤)からの黒体放射が主な放射源である(図 2 の緑)。高エネルギー側には、降着円盤周りの非熱的な高温コロナからの逆コンプトン散乱成分が観測される。一般的に、BH 周りの降着円盤には重力的にとりうる最小の安定半径(innermost stable circular orbit: ISCO)がある。HSS では標準円盤の内縁半径が最内縁安定半径と一致しているという観測報告(Ebisawa et al. 1994)があり、BH への質量降着が効率的に起きていると考えられている。

LHS は高温コロナからの逆コンプトン散乱が支配的なスペクトルをしており、円盤成分の寄与は小さい。(図 2 の青)。このような HSS とのスペクトル形状の大きな違いは BH 周りの環境の変化に起因する。LHS では標準円盤が ISCO まで伸びておらず、BH 周りではコロナのような状態に遷移しているため、この高温のコロナによる強い逆コンプトン成分を放射すると理解されている。このコンプトン散乱が HSS でのコンプトン散乱と大きく違うのは、コンプトン散乱の元となるコロナが非熱的ではなく熱的

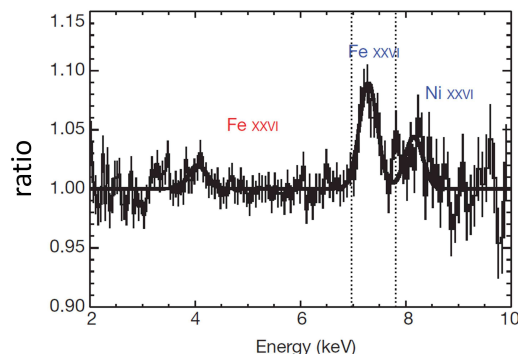


図 3: XMM-Newton による 4U 1630-47 からのジェットの観測。縦軸は連続成分とスペクトルの比。青字、赤字はそれぞれ青方偏移、赤方偏移した輝線。(Díaz Trigo et al. 2013)

であることである。これにより、LHS では高エネルギー側にカットオフがあるベキ型成分が観測される。

この 2 つの状態間の遷移の中間状態が VHS である。VHS は強い円盤放射と強い逆コンプトン成分が同時に見られる複雑な状態である(図 2 の黒)。円盤の回りのコロナが大きく発達し、強い逆コンプトン散乱を起こすと考えられているが、VHS は非常に珍しく観測例も少ないため、コロナの状態や幾何構造はほとんど理解されていない。VHS では超臨界質量降着に近い状態が達成されており、まさに BH 成長の現場である。よって、この状態の調査は巨大 BH 成長の謎を解き明かす上で必須である。

近年、VHS での円盤の内縁半径が ISCO まで伸びていないという観測報告がなされた(Tamura et al. 2012)。これは、VHS のような高質量降着時には円盤の内部が標準円盤を保てず、コロナのような状態に遷移したという示唆を与えている。しかし、この問題については未だ決着がついておらず、更なる観測が待たれている。

今回観測した 4U 1630-47 は BH 候補天体である。BH 候補天体とは、BH 連星であるという確定的な証拠はないものの、スペクトルや変動の振る舞いが BH 連星に類似している天体である。天体までの距離は正確に定まっていないが、強い水素吸収を受けているため、銀河中心付近に存在すると考えられている。また円盤風の観測報告があるため、軌道傾斜角はある程度大きいことがわかっている。本研究

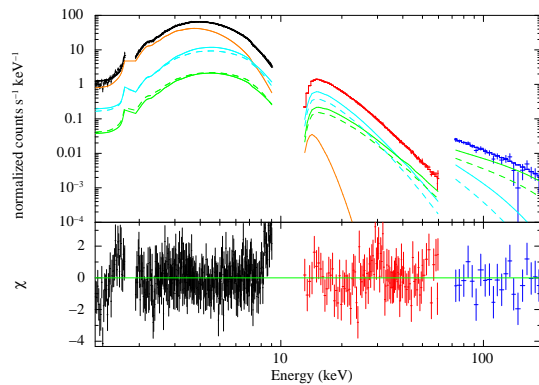


図 4: 上: 観測された時間平均スペクトル。黒、赤、青色はそれぞれ XIS0, PIN, GSO のスペクトルである。Fitting 結果も同時に示した。オレンジ、空色、緑色はそれぞれ円盤放射、熱的コンプトン散乱、非熱的コンプトン散乱を表している。実線、点線はそれぞれ直接成分、円盤の反射成分である。下: スペクトルとモデルとの残差。

では天体までの距離を 10 kpc、軌道傾斜角を 70° と仮定した。

2012 年の XMM-Newton の観測で、VHS にある 4U 1630-47 からの相対論的ジェットがとらえられた (Díaz Trigo et al. 2013)。図 3 はそのスペクトルである。この図をみてわかる通り、ジェット由来の強い輝線が多数確認できる。このように強い X 線輝線を放射するジェットの観測例は、現在発見されている中で SS 433 に次いで 2 例目であり、非常に珍しい現象である。このように、4U 1630-47 は円盤の状態のみならず、ジェットの研究にも適した天体である。

2 Observations

我々は 2012 年 10 月 2 日、X 線観測衛星「すざく」を用いて VHS にあった 4U 1630-47 を観測した。これは前述の XMM-Newton におけるジェットの観測のわずか 4 日後である。観測衛星「すざく」には X-ray Imaging Spectrometer (XIS) と Hard X-ray Detector (HXD) という 2 種類のカメラが搭載されている。XIS は 0.5-12 keV、HXD は 10-600 keV というエネルギー帯をカバーしておりこの 2 つのカメラを使うことによって、0.5-600 keV という非常に

表 1: スペクトル解析により求められた best-fit パラメータ

パラメータ名	結果
円盤温度 (keV)	$1.30_{-0.02}^{+0.04}$
内縁半径 (km)	$41.0_{-1.7}^{+0.7}$
熱的コンプトン散乱のべき γ	$2.89_{-0.04}^{+0.05}$
熱的コロナの温度 (keV)	53_{-13}^{+10}
熱的コロナの光学的厚み τ	$0.41_{-0.07}^{+0.12}$
反射体の立体角 $\Omega/2\pi$	$1.16_{-0.33}^{+1.62}$

広バンドにわたって高いエネルギー分解能での観測が可能である。このような「すざく」の優れた性能により、我々は 4U 1630-47 で過去最高精度の広帯域データを取得することができた。図 4 は取得されたスペクトルである。観測時の光度は 1.2-200 keV で 2.0×10^{38} erg/s であり、Eddington 光度の数 10% 程度の光度を達成している。

3 Analyses

以下では得られたスペクトルを解析することによって円盤の構造を決定する。図 5 は今回解析に用いたモデルの概念図である。VHS では熱的コンプトン散乱と非熱的コンプトン散乱が同時に観測されている (Gierliński & Done 2003) ため、モデルでは熱的、非熱的コロナの両方を考慮した。このモデルの fitting 結果を図 4 の上部に示した。図 4 の下部はモデルと観測点との残差である。また、この fitting 結果を表

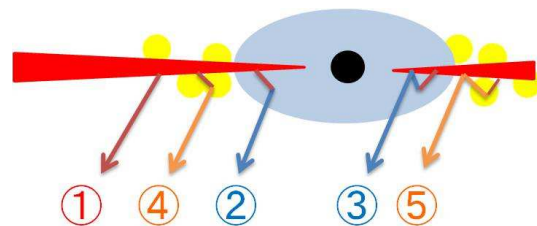


図 5: モデルの概念図。全 5 種の放射を考慮している。1、円盤放射 2、熱的コロナからのコンプトン散乱 3、熱的コンプトン散乱の円盤反射 4、非熱的コロナからのコンプトン散乱 5、非熱的コンプトンの円盤反射

1 に示した。

4 Results and Discussion

上のスペクトル解析によって VHS 内縁半径は $41.0^{+0.7}_{-1.7}$ km と見積もられた (表 1)。また我々はこの解析とは別に、HSS にあった同天体を「すぎく」がとらえた 2006 年の観測データを解析した。この結果、HSS での内縁半径は 35.0 ± 0.3 km と見積もられた。この観測時では円盤の内縁半径は ISCO に一致している (Kubota et al. 2007) ため、VHS で得られた結果は ISCO よりわずかに大きい。これらのことから我々は、VHS では標準円盤の内縁半径は ISCO まで到達しておらず、途中で途切れていることを証明した。これは高質量降着時において、BH 周りの円盤が標準円盤として存在することができず、BH への降着流がコロナなどの密度の薄い状態でのみしか達成されないという重要な示唆を与えている。

また、XMM-Newton で見られた ~ 7 keV 付近のジェットによる輝線は、今回の観測では確認されなかった。この原因として、ジェットの放出が 4 日の間に止まったか、あるいはジェット自体の性質が変化し輝線が観測されなくなったという可能性が考えられる。4U 1630–47 で観測されたジェットの性質は SS 433 のものと類似している (Díaz Trigo et al. 2013)。SS 433 では、ジェットが X 線放射をできなくなるまで冷える時間は長くても数時間と見積もられるため、4U 1630–47 の場合も 4 日の間に輝線放射は自然に消滅する。

5 Summary and Conclusion

我々は X 線観測衛星「すぎく」を用いて、VHS にあるブラックホール候補天体 4U 1630–47 を過去最高精度で観測することに成功した。この取得されたスペクトルを詳細なモデルを用いて解析することによって、我々は VHS の内縁半径は最内縁安定半径と比べて大きいことがわかった。これは VHS のような高質量降着時において、降着流はコロナのような密度の低い状態に遷移しているという重要な示唆を与えている。さらに、本観測の 4 日前に見られた

相対論的ジェットからの輝線が観測されなかった。この原因として、ジェットの放出が 4 日の間に止まったか、あるいはジェット自体の性質が変化し輝線が観測されなくなったという可能性が考えられる。さらに詳細な解析結果は Hori et al. (2014) に記載されている。

Reference

- Díaz Trigo, M., Miller-Jones, J. C. A., Migliari, S., Broderick, J. W., & Tzioumis, T. 2013, *Nature*, 504, 260
- Done, C., Gierliński, M., & Kubota, A. 2007, *A&AR*, 15, 1
- Ebisawa, K., Ogawa, M., Aoki, T., et al. 1994, *PASJ*, 46, 375
- Gierliński, M., & Done, C. 2003, *MNRAS*, 342, 1083
- Hori, T., Ueda, Y., Shidatsu, M., et al. 2014, *ApJ*, 790, 20
- Kubota, A., & Done, C. 2004, *MNRAS*, 353, 980
- Kubota, A., Dotani, T. 2007, *PASJ*, 59, S185
- Tamura, M., Kubota, A., Yamada, S., et al. 2012, *ApJ*, 753, 65