

ブラックホール候補天体 4U 1630–47 の very high state での 観測的研究

堀 貴郁 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

ブラックホール (BH) への降着流の理解は、超強重力場下における物理の検証のみならず、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を解明するために不可欠な、たいへん重要な課題である。このための最適な研究対象が BH 連星とよばれる、恒星と太陽の数倍～10 倍程度の質量をもつブラックホールからなる近接連星系である。

BH 連星からの X 線放射は、質量降着率によって大きく 2 つの状態間を遷移することが知られている。降着率が低いときは low/hard state と呼ばれる状態をとり、硬 X 線の強いべき型のエネルギースペクトルを示す。この成分は、BH 近傍の高温コロナ中の電子が円盤からの光子を逆コンプトン散乱することで生じると理解されている。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 線で明るい状態 (high/soft state) へ遷移する。このとき、降着円盤の内縁は最内縁安定円軌道まで伸びている。さらに質量降着率が大きくなり Eddington 限界光度近くに到達すると、very high state (VHS) というコンプトン散乱成分が支配的な状態をとる。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や幾何形状がほとんど理解されていない。このような高質量降着率下での BH 降着流の理解は、質量降着による急速なブラックホール成長を理解する上で鍵となるものである。

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。このエネルギースペクトルを降着円盤からの熱放射と、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、円盤の内縁半径が最内縁安定円軌道より大きくなっているという証拠を得た。これは high/soft state からさらに質量降着率が上がると、降着流が新たな状態に変化することを示唆している。本講演ではスペクトル解析の詳細を説明し、VHS の物理状態について議論する。

1 Introduction

銀河系内には多くの ($\sim 10^8$ 個) のブラックホール (BH) があると言われている。私たちは BH 単体では観測することができないが、それらが他の星と近接連星系で、BH へのガス降着がおきていれば観測することができる。これらブラックホール (BH) 連星を観測することは、周囲の強い重力場や本来直接見ることのできない BH そのものの研究にも役立つ。さらにこの系では Eddington 限界に近い BH への質量降着が起きることがあるため、そのような高質量降着時の降着円盤の状態を調べることができる。これは、まさに高い質量降着率のガス供給によって成長してきた、とも考えられる銀河中心の巨大 BH の成

長過程の謎を解き明かす手がかりになる可能性もある、非常に重要な研究である。これらの点から、BH 連星を研究することは非常に意味のあるものであると言える。

図 1 は BH 連星の想像図である。この系の降着円盤はとても高エネルギーで、X 線のようなエネルギーの高い波長で観測される。さらに BH 連星はある周期で突発的増光 (outburst) を起こし、それ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。一般的に、outburst は光度の低い硬 X 線が強い、べき型のスペクトルを持つ low/hard state (LHS) から始まる。この状態で光度が大きくなり、そののちに軟 X 線の円盤の熱放射が支配的な high/soft state (HSS) に遷移する。図 2 はこれらの X 線スペ

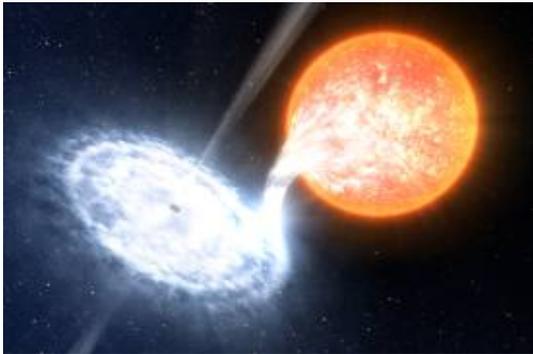


図 1: BH 連星の想像図

クトルの例である。

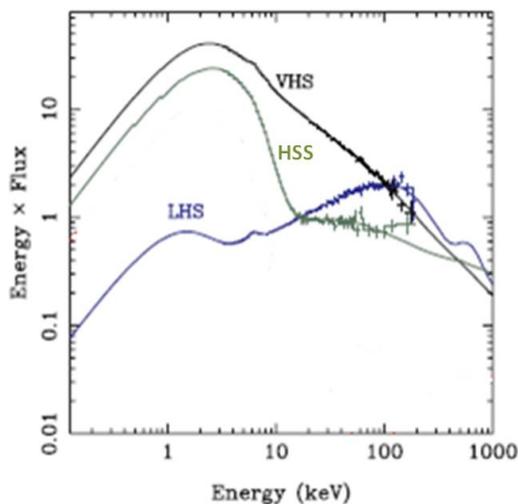


図 2: GRO J1655 - 40 のそれぞれの状態でのスペクトル (Done et al. 2007)

HSS のスペクトルは、低エネルギー側に標準円盤（光学的に厚く、幾何学的に薄い円盤）からの黒体放射、高エネルギー側に弱いベキ成分が伸びているスペクトルをしている（図 2 の緑）。この高エネルギー側のベキ成分は円盤周囲の非熱的な高温コロナによる逆コンプトン散乱によるものと思われる。一般的に HSS は天体が X 線で明るいときに見られ、軟 X 線が強いスペクトルを持つことからこの名がつけられた。

BH 連星の降着円盤は、中心が BH であるため、重力的にとりうる最小の安定半径を持つ。これを最内縁安定半径 (innermost stable circular orbit: ISCO)

と呼ぶ。HSS における 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いる Ebisawa et al. (1994) ため、この状態では内縁半径が最内縁安定半径まで届いており ($r_{in} = r_{ISCO}$)、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 のスペクトルは、高エネルギー側にカットオフのあるベキ状のスペクトルをしており、円盤の成分は弱い（図 2 の青）。これは LHS では標準円盤が ISCO まで伸びておらず途中で途切れており ($r_{in} > r_{ISCO}$)、その内側では光学的に薄く、幾何学的に厚い降着流に変わっており、高温の電子による強い熱的逆コンプトン散乱が起こっているためと考えられている。高エネルギー側にカットオフがあるのは、逆コンプトン散乱を起こす電子が熱的であるため、電子温度に対応するエネルギー（ ~ 100 keV）を越える電子が少なくなっているためである。LHS は一般的に天体の X 線光度が低いときに見られ、硬 X 線が強いスペクトルを持つことからこの名がつけられた。

この二つの状態間の遷移の中間状態が存在する。この状態の時の天体の光度は非常に高く、very high state (VHS) と呼ばれている。VHS では低エネルギー側に円盤放射、高エネルギー側に強い逆コンプトン成分が同時に見られるようなスペクトルを持つ（図 2 の黒）。これは円盤の回りにコロナが発達してきて、円盤からの放射を逆コンプトン散乱しているためであると考えられているが、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 は光度が非常に大きく質量降着率もかなり大きいため、この状態を調べることによって高質量降着時の円盤の状態を調べることができる。これは上でも述べたとおり非常に重要な研究である。さらに近年では、VHS での円盤の内縁半径が ISCO まで伸びていないのではないのかという報告がなされている (Kubota & Done 2004)。これは high/soft state では完全に標準円盤であったものが、VHS のような高質量降着時には内部の円盤が標準円盤を保っていらなくなる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いない。

本研究では VHS にある BH 候補天体 4U 1630-47 を観測し、この時の円盤の状態を調査した。さらに本観測で VHS にある標準円盤が ISCO まで伸びているか否かを調べた。

2 Observations

今回は BH 候補天体である 4U 1630-47 を X 線観測衛星「すざく」を用いて観測した。ここで 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、BH 連星とスペクトルの振る舞いなどが類似していることから BH 連星であろうと思われる天体である。この天体に関して天体までの距離、軌道傾斜角などは正確には求まっていないものの、水素吸収の程度、過去の吸収線の報告などから、本研究では天体までの距離を 10 kpc、軌道傾斜角を 70° と仮定した。

観測日は 2012 年 10 月 2 日で、この観測はほぼ突発的増光 (outburst) における光度極大の時期とほぼ一致していた。その結果、状態遷移の間にしか見られることのない Very high state (VHS) の円盤のスペクトルの取得に成功した。

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 では 0.5–12 keV、HXD では 10–600 keV というエネルギー帯をカバーしており、さらに XIS は高いエネルギー分解能を持っている (6 keV において $\sim 130\text{eV}$)。よって、この 2 つのカメラを使うことによって 0.2–600 keV という非常に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、我々はこの天体 4U 1630–47 では過去最高精度の広帯域データをとることができた。

3 Analyses of Averaged Spectrum

ここからは円盤まわりのジオメトリを仮定したモデルを用いて、得られたスペクトルを再現し、円盤の物理量を推定したいと思う。

本研究では円盤の形が図 3 のようになっていると仮定した。図 3 中で、黒は BH、赤は円盤、青は熱的コロナ、黄色は非熱的コロナを表している。つまり、円盤周りに熱的コロナ、比熱的コロナが存在し、円盤由来の光子を逆コンプトン散乱している、というイメージである。ここでコロナは熱的、非熱的なも

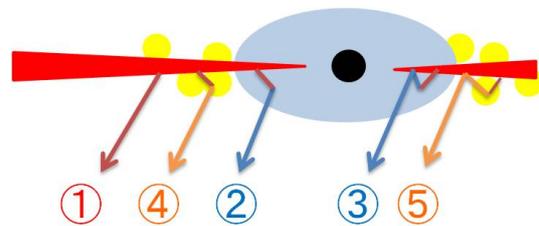


図 3: モデルの概念図

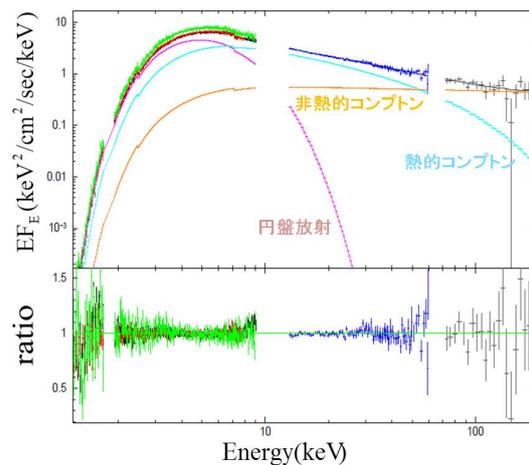


図 4: スペクトルの fitting 結果

の 2 つを考えているが、これは VHS でのスペクトルに熱的コンプトン成分と比熱的コンプトン成分が共存しているという報告がなされているためである (Gierliński & Done 2003)。図 3 の中で放射に番号をふってあるが、それらはそれぞれ①、円盤放射 ②、熱的コロナからの逆コンプトン散乱 ③、放射②の円盤反射 ④、非熱的コロナからの逆コンプトン散乱 ⑤、放射④の円盤反射 となっている。

これらの放射を仮定して観測されたスペクトルを再現した結果が図 4 である。図 4 の上部は今回得られた νF_ν スペクトルで、モデル計算された放射成分を同時に書いてある。天体までの距離を 10 kpc と仮定すると、天体の光度は 2–4 keV で $\approx 3 \times 10^{37}$ erg/s となり、とても光度が高い状態であることがわかる。このモデル計算の結果から、確かに円盤成分と強い逆コンプトン成分が共存しており、このデータが VHS のものであることが確認できる。図 4 の下部は今回のベストフィットモデルと観測データとの比をとっている。これを見ると、かなりいい精度で観測スペク

トルとモデルがあっていることが確認できる。

4 Results and Discussion

表 1: スペクトル fitting での Best-fit パラメータ

パラメータ	fitting 結果
円盤温度 (keV)	1.40 ± 0.01
内縁半径 (km)	$37.0^{+0.5}_{-0.6}$
反射体の立体角 ^{*1} $\Omega/2\pi$	≤ 0.074

表 1 は、今回のモデル計算で得られた結果である。ここの内縁半径は、標準円板の仮定の前で、天体までの距離 10kpc、天体の軌道傾斜角 70° と仮定して求めた。今回はベストフィットの時点で $\chi^2/\text{dof} = 1203.2/1037$ であった。この値を見ると、円盤の内縁半径が $\approx 37\text{km}$ と見積もられていることがわかる。ここで、同じ天体の high/soft state での内縁半径は $24\text{km} \leq r_{\text{in}} \leq 26\text{km}$ であることが報告されている (Kubota et al. 2007)。この状態での値が ISCO であるとすると、今回測定された r_{in} は ISCO より大きいこと ($r_{\text{in}} > r_{\text{ISCO}}$) がわかる。つまり今回の観測では、VHS での r_{in} は最内縁安定半径まで伸びておらず、円盤が途中で途切れていることがわかった。これは質量降着率がより高くなる VHS において、内側の円盤が標準円盤として存在することができないということを表しており、このような状況下では BH への降着流が新たな状態へ遷移しているということが示唆されている。よって high/soft state からさらに降着率が上がると、円盤はもはや標準円盤では説明できない新たな状態へ変わっていくということが想像される。

5 Summary and Conclusion

我々は X 線観測衛星「すざく」を用いてブラックホール候補天体 4U 1630–47 の VHS での過去最高精度での広帯域データをとることができた。さらに我々は円盤周りに熱的コロナと比熱的コロナが存在

しているというモデルをたて、観測されたスペクトルを再現することで円盤の物理状態を推定するという手法をとった。その結果、今回の観測での VHS の内縁半径の値は最内縁安定半径と比べて大きいことがわかった。VHS は BH 連星において、BH への質量降着率がもっとも高いときに起こる状態であるため、この事実は質量降着率がかなり高い状態においては内側の円盤が標準円盤を保っていらなくなるということを示唆する結果である。よって、さらに質量降着率が上がると降着円盤は標準円盤では説明できない新たな状態へ遷移していくと考えられる。

Reference

- 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
- Kubota, A., & Done, C. 2004, MNRAS, 353, 980
- Kubota, A., Dotani, T. 2007, PASJ, 59, S185

^{*1} 散乱体 (コロナ) から反射体 (円板) をみこむ立体角。反射の強度の指標になる