

氏名（本籍） よし かわ あき ぶみ 吉川 瑛文（東京都）  
学位の種類 博士（理学）  
学位記番号 甲第 1070 号  
学位授与の日付 平成 27 年 3 月 20 日  
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当  
学位論文題目 **X-ray Studies on Short-term Softening of  
Black Hole Binary Swift J1753.5-0127**  
(X 線によるブラックホール連星系 Swift  
J1753.-0127 の短時間ソフト化の研究)

論文審査委員 (主査) 教授 三浦 和彦  
教授 梅村 和夫 准教授 辻川 信二  
准教授 松下 恭子  
連携大学院 物理学専攻 客員教授 玉川 徹

## 論文内容の要旨

### 1. 研究の背景と目的

ブラックホールの研究は、アインシュタインによって提唱された一般相対論をもとに、1916 年にドイツのシュヴァルツシルトがアインシュタイン方程式の厳密解の 1 つとして導出したことから始まる。その後 50 年間は、単なる理論上の産物であったが、1971 年に小田らが、はくちょう座の X 線源をブラックホール候補天体として報告したことで、本格的な観測が始まった。ブラックホールは単独では電磁波を放射することができず、物質の質量降着に伴う重力エネルギーの解放によってはじめて光を放つことができる。ブラックホールと恒星の連星系では、ブラックホール近傍に、光学的に不透明なプラズマのガス円盤（降着円盤）が形成される。ケプラー運動により、降着円盤は内側ほど早く回転するため、ブラックホールからの距離が違うガス間に速度差が生まれ、摩擦熱が生じる。ビリアル定理によると、失った重力エネルギーの半分は運動エネルギーに変換され、残りの半分が熱になると考えられている。そのため、重力ポテンシャルの大きなブラックホール近傍の降着円盤のガスは高温になる。最内縁では  $10^6$  K に達し、数 keV の X 線帯域で黒体放射をする。ブラックホールは強重力場における一般相対論の検証のための唯一の物理実験場であり、ブラックホール近傍からの放射される X 線を観測することは、その

検証のための優れた手段になる。

ブラックホールから観測される 0.5-3 keV 程度の X 線は、降着円盤の黒体放射成分によって説明される。3 keV 以上の X 線は、その黒体放射成分が、降着円盤の周りに薄く広がった高温プラズマで逆コンプトン散乱されることにより上手く説明できる。逆コンプトン散乱は、コンプトン散乱とは逆に、希薄なプラズマに含まれる高温の電子から光子へエネルギーを輸送する散乱過程である。

ブラックホールの X 線スペクトルは、ソフト状態とハード状態と呼ばれる 2 つの状態があることが知られている。ソフト状態は、降着円盤からの黒体放射成分が卓越したスペクトルを持ち、1 keV 程度まで加熱された降着円盤がブラックホール近傍まで形成される。一方、ハード状態では、降着円盤はブラックホールのより外側に形成され、温度が低くなり放射が減少する。また、3 keV 以上の逆コンプトン散乱成分が卓越したスペクトルになる。多くのブラックホールでは、これら 2 つの状態間を遷移する現象が観測されており、状態遷移の時間スケールは百日程度である。

Swift J1753.5-0127 は 2005年に *Swift* 衛星により発見されたブラックホール天体である。発見から現在までハード状態が続いており、状態遷移は観測されていなかった。しかし2011年に、2-20と15-50 keV 帯域のX 線光度曲線において、20日間で、約10分の1程度まで減光し、再び増光する現象が観測された。Shaw et al. (2013)によると、ブラックホールの放射領域を何らかの物質が覆い隠す「食」で説明することがもっともらしいと報告された。しかし、彼らは 2 keV以上のX 線しか解析しておらず、本当に食で説明できるかは自明ではなかった。本論文の目的は、Swift J1753.5-0127の光度曲線に見られた20日間程度の減光と増光（短時間変動）の原因を観測的に解明することである。

## 2. 研究内容と結果

Swift J1753.5-0127の光度曲線に見られる短時間変動の原因を解明するために、私が運用に参加している全天X線モニターMAXI の、2 keV以下のデータに着目し解析を行った。MAXI には、0.7-7 keVの X 線に感度を持つ SSC (Solid-state Slit Camera) と、2-20 keVのX線に感度を持つ GSC (Gas Slit Camera) が搭載されている。加えて、15-50 keV に感度を持つ全天観測装置 (BAT) が搭載されているSwift衛星のデータも用いた。これらの観測データを利用し、2009年7月から2013年1月までの X 線光度曲線を1日毎にプロットしたところ、前述した光度曲線に見られる短時間変動において、15-50 keVの光度が急激に減光した時期に、0.7-1.7 keVの X 線は逆に約10倍に増光していることを発見した。この短時間変動が、食によるものであれば、物質によって、低エネルギーのX 線がより吸収されるため、0.7-1.7 keVに増光がみられることは説明できない。よって、食説は棄却された。一方で、ブラックホールがハード状態からソフト状態へ遷移した場合は、降着円盤からの黒体放射成分である0.7-1.7 keVのX 線は増光し、逆コンプトン散乱成分である15-50 keVのX線は減光することが期待される。これは、観測結果を良く説明するので、短時間変動の間に、状態遷移が起きた可能性が高いと考えた。

2012年4月23日に観測された短時間変動の間、*Swift* 衛星の X 線望遠鏡によって、変動のピークから終了まで、数日間隔で10回観測が実施された。私はこのデータを用い、0.6-10 keVのX 線スペクトルを解析することで、短時間変動が本当に状態遷移によるものかどうかの検証を試みた。X 線スペクトルは、典型的な降着円盤からの黒体放射成分と、その一部が、希薄なプラズマで逆コンプトン散乱された成分によって、上手く説明することができた。10回の観測の間に、降着円盤の黒体放射成分のエネルギーフラックス ( $F$ ; モデルを0.01から10 keVまで積分) が、 $4.8 \times 10^{-9}$  (ピーク時) から  $2.2 \times 10^{-9}$   $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  (終了時) に減少し、降着円盤の最内縁の温度 ( $T_{\text{in}}$ ) は 0.48 から 0.2 keVに低下した。降着円盤の標準モデルより、降着円盤の最内縁半径 ( $R_{\text{in}}$ ) を求めることができ、ピーク時に最もブラックホールに近く、終了時には遠のいたことが分かった。これはブラックホールの状態が遷移していることを示している。

同様の短時間変動が、2012年4月23日の変動以前に2回観測されている。GSCとSSCの観測データを用いてX線スペクトルを解析したところ、 $F$  は  $4\text{-}5 \times 10^{-9}$   $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 、 $T_{\text{in}}$ が 0.4 keV程度になり、これらもブラックホールの状態遷移であることがわかった。*Swift* J1753.5-0127では同様の状態遷移が繰り返し起きているのかもしれない。

### 3. 考察

*Swift* J1753.5-0127で観測された短時間の状態遷移を、典型的な状態遷移を起こすブラックホール GX 339-4と比較した。GX 339-4の2-4 keVの光度曲線は100日間程度で光度が100倍になり、その後ソフト状態が300日間程度続き、さらに100日かけてハード状態に遷移する。 $T_{\text{in}}$  は、ハード状態で0.16 keVだが、ソフト状態では1.0 keVまで変化する (Nandi et al., 2012)。さらに  $F$  は、 $8.2 \times 10^{-8}$   $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  から  $5.96 \times 10^{-6}$   $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ まで変動する。一方、*Swift* J1753.5-0127の場合、10日間で2-4 keVのX線の光度が数倍に増光し、その後10日間で減光した。 $T_{\text{in}}$  および  $F$  の変動は最大で数倍程度であり、典型的なものに比べ、小規模の状態遷移であることが分かった。

降着円盤からの黒体放射成分の  $F$  は、 $R_{\text{in}}^2 T_{\text{in}}^4$  に比例する。ソフト状態では降着円盤がブラックホールの最近傍まで形成され  $R_{\text{in}}$  は一定になり、 $F \propto T_{\text{in}}^4$  となるはずである。*Swift* J1753.5-0127で得られた結果は、 $F \propto T_{\text{in}}^{0.97 \pm 0.02}$ であり、短時間変動の間は、完全なソフト状態には到達していないことが分かった。Cabanac et al. (2009)によると、ハード状態からソフト状態に変わる時の降着円盤の光度は、エディントン光度(輻射圧と重力の釣り合う光度)の1.5%程度になる。一方で、*Swift* J1753.5-0127 のピーク時の降着円盤の光度は、エディントン光度の1.6-5.8%であった。この結果は、ハード状態から短時間だけソフト状態に遷移し、再びハード状態に戻ったという描像を裏付ける。

### 4. 結論

*Swift* J1753.5-0127の光度曲線に見られた、20日間程度の減光と増光 (短時間変動) の原因を観測的に解明するために、2 keV以下のデータに着目し、*MAXI*と *Swift* 衛星の観測データを解析し、以下の結果を得た。

- 15-50 keVの光度が急激に減光した時期に、0.7-1.7 keVの X 線は逆に約10倍に増光していることを発見した。
- 短時間変動した際のX線スペクトルは、降着円盤からの黒体放射と、その一部が希薄なプラズマで逆コンプトン散乱された成分によって説明できた。降着円盤の標準モデルより、降着円盤の最内縁半径が、ピーク時に最もブラックホールに近く、終了時には遠のいたことが分かった。
- 降着円盤の温度とエネルギーフラックスの関係をプロットしたところ、エネルギーフラックスは温度の4乗則に従わないことが分かった。

これらの結果から、短時間変動は、ハード状態からソフト状態への小規模な状態遷移であり、同様の遷移が少なくとも3回起きていたことが分かった。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、ブラックホールと恒星がつくる連星系 **Swift J1753.5-0127** において、2-50 keV の X 線光度曲線に見られる短時間の減光の原因を、観測的に調査したものである。その結果、他のブラックホールでは過去に見られたことが無い、非常に短時間のスペクトル軟化（状態遷移）が起きていることを突き止めた。

ブラックホールはアインシュタインの一般相対論の解として得られる天体であり、その存在について、観測的、理論的な研究が盛んに行われている。強重力場を研究する優れた対称であるが、自らは光を出さないで、その観測は非常に難しい。恒星と連星系を作るブラックホールは、数少ない観測対象の一つであり、その X 線スペクトルは一般に、伴星からの降着ガスがブラックホール近傍に形成する降着円盤からの黒体放射と、降着円盤の周りにある薄いプラズマガスによる逆コンプトン散乱からの高エネルギーX線により特徴づけられる。黒体放射成分が多い状態をソフト状態と呼び、高エネルギーX線が多い状態をハード状態と呼ぶ。多くのブラックホールはソフト状態とハード状態の間を遷移することが知られているが、**Swift J1753.5-0127** は発見以来、ハード状態を継続している天体であり、その状態変化について何らかの情報を得ることが待ち望まれていた。

本論文は全七章から構成されている。第一章はイントロダクションである。ブラックホールからの X 線発生について簡単に説明した上で、論文の研究動機が端的に述べられている。

第二章はブラックホールならびに、ブラックホール連星系についてのレビューである。ブラックホールの概念を基礎的なところから書き起こし、伴星である恒星からのガス降着により、重力エネルギーを解放して X 線が放射されるメカニズムなどが、詳しく解説されている。また、ブラックホールの周りに形成される降着円盤の温度構造や、ブラックホールの状態遷移などが説明されており、X線がブラックホールを観測する上で最

適な波長であることが述べられている。また、将来行われるであろう X 線偏光観測が、ブラックホールの重力場研究に一石を投じる可能性について述べられている。

第三章は本論文の観測対象となった、ブラックホール連星系 **Swift J1753.5-0127** についてのレビューである。これは 2005 年に発見された新しい天体であるが、伴星を含め、連星系の観測結果がわかり易くまとめられている。さらに、2011 年と 2012 年に 2-50 keV のエネルギー帯域で、**dip** と呼ばれる光度曲線のへこみが見られたことに言及し、その原因について、これまでの研究が簡単にまとめられている。

第四章は今回の観測で使用した衛星搭載機器が、本論文でデータ解析をする上で必要な情報とともにレビューされている。吉川氏が運用に関わった、宇宙ステーション搭載の X 線全天モニター **MAXI** (全天を常時モニターできるが低統計) と、米国の **Swift** 衛星 (観測範囲は限られるが高統計) について、それぞれの特徴を簡潔にまとめ、観測における使い分けについて説明している。

第五章は **Swift J1753.5-0127** のスペクトルデータ解析について、解析に用いたデータ、データフィットに使ったモデルの詳細な解説、データ処理方法についてまとめてある。また、データ解析から得られた結果を示し、短時間の減光が「食」では説明できないこと、ブラックホールの状態変化が起きていると考え、そのスペクトル変化が上手く説明できることが述べられている。

第六章はデータ解析結果を受けた考察である。最初に解析で得られたデータが、適切にまとめられている。次に、今回 **Swift J1753.5-0127** で見られた状態変化は、他のブラックホール連星系が起こす状態変化に比べ極めて短時間であったこと、降着円盤の最内縁半径が時間とともに変化したこと、伴星からの質量降着率が変化したことが示されている。以上の解析と考察より、**Swift J 1753.5-0127** の X 線光度曲線に見られた短時間の変動は、ブラックホールが 20 日間だけ、ハード状態からソフト状態に、非常に短期間だけ遷移した現象であることを明らかにした。第七章は論文のまとめである。

本研究により、これまで「食」と解釈されていた短時間の光度変動が、実は短時間の状態遷移であることが明らかにされた。このような短時間変動は他のブラックホールでは見られておらず、学術的に重要な発見である。

以上により、本研究は博士 (理学) の学位論文として十分に価値のあるものと認める。