

論文審査の結果の要旨

氏名：小 林 浩 平

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：ブラックホールX線新星 MAXI J1631-479 の発見とその特異な正体の解明

審査委員：（主査） 教授 根 来 均

（副査） 教授 藤 井 紫麻見

芝浦工業大学教授 久保田 あ や

ブラックホールは、一般の星のような複雑な形状を持つ表面を持たないため、実質、質量と自転速度だけで特徴付けられる最も単純な天体と考えられている。そのようなブラックホールは、その候補も含めこれまでに 100 天体近く我々の銀河系内で発見されてきた。しかし、多波長で観測されるそれらの天体の特徴は様々で、その多様性の原因はまだわかっていないところが多い。また、そのほとんどの天体が、伴星からのガスがブラックホールに流れ込むときのみ一時的に輝く X線新星と呼ばれる突発天体である。近年は、国際宇宙ステーションに搭載された全天 X線監視装置 MAXI（マキシ）が最も多くのブラックホール X線新星を発見し、世界中の多くの研究者によってそれらの天体の特徴が明らかにされてきた。

本論文は、2018 年 12 月に発見されたブラックホール X線新星 MAXI J1631-479（以下、J1631）の特異な特徴とその物理的原因を明らかにしたものである。MAXI の運用チームに参加している申請者は、その増光にいち早く気づき、天体现象の速報サイトである *The Astronomer's Telegram* を介してその出現を世界に報告した。その後、申請者は MAXI チームを代表して MAXI の約 300 日に渡る長期観測データを解析した。そして、米英伊の X線観測衛星 Swift による同天体の観測データも解析し、それらの詳細を本論文にまとめた。

MAXI のデータ解析にはスキャン観測特有の問題があり、これまで一部のデータが破棄されてきた。そこで申請者は、検出器の特徴とバックグラウンド特性を考慮したデータ処理手法を新たに確立し、それらの問題を解決した自動処理システムを開発した。これまでも申請者は、同処理手法を用いて、ブラックホール X線新星 MAXI J1803-298（以下、J1803）や新たに発見された X線パルサー MAXI J0709-159、観測史上最高強度のガンマ線バースト GRB 221009A のデータ解析と科学評価を行い、それらの査読論文の共著者となっている。今後、同システムを公開し、MAXI のデータを用いた科学の進展に寄与することが期待される。

また、申請者は、Swift 衛星のデータ解析を行うにあたっては、英レスター大学 Swift チームの A. P. Beardmore より天体からの X線の星間塵（ダスト）による散乱光の影響について指摘を受け、その影響を MAXI のデータを含め、多方面より再評価した。その結果、ダストによる散乱効果を考慮しない場合、ブラックホール質量を約 40% 過大評価してしまうことなどがわかり、これまで重要視されてこなかったダストによる影響が無視できないことを明らかにした。

これらの解析を通じて申請者は、多くのブラックホール X線新星とは異なる、天体周辺に形成されるガス状の円盤（降着円盤）の状態変化やそれに伴う円盤の最内縁半径の変化などを詳細に明らかにした。そして、それらの結果を他のブラックホール X線新星の観測結果と比較することにより、通常より多くのガスが天体に降り注がれることによって観測された特異な状態に達していたことを降着円盤の理論モデルを用いて議論している。

一方、J1631 は、ブラックホールの質量を見積もる上で指標となる通常観測される減光時の状態遷移がかなり低光度になるまで観測されなかった。そのため、似た性質を示した J1803 同様、通常的手法ではブラックホールの質量も天体までの距離も見積もることができなかった。そこで、数秒から数十秒の爆発現象であるガンマ線バーストにおいて、直接光とダストによる散乱光の入射角と検出時刻の差を用いたダストの層までの距離を見積もる手法を、100 日以上にわたって長期変動が観測される X線新星に応用し、ガスと天体までの距離を見積もった。応用するにあたっては、申請者はダストによる散乱の物理過程を考慮した、複雑な解析システムを一から構築した。その結果、この種の特徴を持つ天体としてはこれまでにない精度で天体までの距離と天体の質量を制限することができた。このような手法での質量と距離の見積りは初めての試みであり、得られた結果を含め、その業績は特筆に値する。また申請者は、J1631 の増光

中の全放射量も求め、既知のものと比較し、同天体が最も多くのエネルギーを放出したブラックホールX線新星の一つであることも明らかにした。

以上のように、申請者は、複数の新たな解析手法を導入することにより、ブラックホールX線新星 J1631 の特異な性質とその物理的原因を明らかにした。

本論文は、全8章と4つの補足からなり、その各内容と評価は以下の通りである。

第1章「序」

ブラックホールの観測的特徴の概要から本論文の研究目的、各章の説明が簡潔に記されている。

第2章「ブラックホールX線連星」

本論文に直接関係するこれまでのブラックホールX線連星の観測的特徴とそれらを説明する降着円盤モデル、そして、ダスト散乱に関する基本事項が引用文献とともに過不足なくまとめられている。

第3章「観測装置」

本論文で用いた2つの衛星の観測装置とX線の検出原理が一通り記されている。また、Swift衛星については、J1631の観測で用いられた2つの観測モードについても各特徴が首尾よくまとめられている。

第4章「MAXI のデータ解析の改良」

MAXI のデータを解析する上での問題点と、申請者が如何にして改良を行ったかが多くの図等を用いてわかりやすく記されている。また、これまでの解析手法による光度曲線との比較も改良の効果がわかり、適切である。

第5章「MAXI J1631-479 の観測と解析結果」

本論の J1631 の解析結果を記す前に、ダストによる影響のみならず、近傍天体からのX線の混入の評価など、J1631 のスペクトル等を正しく評価するため行われた解析結果が記されている。多少冗長な嫌いはあるが、申請者が如何に慎重に解析を行ったかを示すものとなっている。そして、J1631 の解析結果については、多くの色や線種を用いたスペクトルの図などを多数示し、視覚的にも分かりやすく、それぞれの状態の特徴が簡潔に記述されている。

第6章「MAXI J1631-479 から観測されたダスト散乱成分の見積もり」

GRB 221022A の解析を通じて学んだダスト散乱による知見を活かした、申請者が構築したダスト散乱モデルの計算過程が示され、そのモデル計算による強度の空間分布と観測結果との比較結果が記されている。その計算過程の詳細については補足 A に、GRB 221022A の解析結果については観測されたダストリングを含め補足 C に記されている。これらの補足での記述も適切と考えられる。

第7章「議論」

J1631 と同様な特徴を示した（補足 B に解析結果が記された）J1803 をはじめ、既知の天体との比較や、ダストの影響、降着円盤モデルとの比較など、得られた観測結果に対する多方面にわたる十分な議論がなされている。

第8章「まとめ」

本論文で示された主要な結果について簡潔にまとめられている。

以上のことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和6年2月15日