

論文の内容の要旨

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

MAXI J1631-479 (以下、MAXI J1631) は、2018年12月に全天X線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) によって発見されたブラックホール X 線新星である。その長期強度変動に伴うエネルギースペクトル変化は、ブラックホール X 線新星に典型的な振る舞いとは異なる特徴を示した。本研究の目的は、その特異な振る舞いの詳細な調査と、その物理過程の解明である。

多くのブラックホールX線新星は、X線領域で突然現れ、数日から数十日で急激に増光し、数ヶ月かけて指数関数的に減光していく（この現象を FRED (Fast-Rise Exponential-Decay) 型アウトバーストと呼ぶ）。この突然の増光は、伴星からのガスの流入によりブラックホールの周りに降着円盤と呼ばれるガスの円盤が形成され、円盤に蓄積されたガスの量がある閾値を超えると、円盤の不安定性により大量のガスがブラックホールに流れ込み、重力エネルギーを解放して円盤が急激に明るくなるためと考えられている。

アウトバースト中に観測されるスペクトルには主に2つの状態、比較的低エネルギー側（約 5 keV 以下）に放射が強いソフト状態と約 100 keV に放射エネルギーのピークを持つハード状態がある。これは、単位時間あたりにガスがブラックホールに落ちる量の変化に伴う、降着円盤の物理状態の変化によるものと考えられる。通常、アウトバーストの初期のスペクトルはハード状態で、主に冪関数で表せる。このときの降着円盤は光学的に薄く、ガスの多くのエネルギーがブラックホールに向かってエントロピーとして流れ込むと考えられている。アウトバーストの中期では、天体はハード状態からソフト状態に遷移する。ソフト状態のスペクトルは、光学的に厚い降着円盤からの熱的放射成分と円盤上の高温プラズマによって逆コンプトン散乱されたと考えられる非熱的（冪関数）成分からなる。熱的放射成分は多温度円盤黒体放射 (diskbb) モデルで表せ、その規格化定数は降着円盤の最内縁半径の 2 乗に比例する。また、ソフト状態とハード状態の間の状態である中間状態もしばしば観測される。

高エネルギー側の光子数を低エネルギー側の光子数で割った値（以下、硬度比）と強度との関係を示す HID (Hardness-Intensity Diagram) 上で、典型的なブラックホール X 線新星は q 型の軌跡を示す。これは、ハード状態で急激に増光し、その後すぐにソフト状態に遷移して徐々に減光し、再びハード状態に戻ることを意味する。q 型を示す天体は、強度がピーク時に比べ約 1 桁小さくなるとソフト状態からハード状態へ遷移することが観測から示されている。

本研究では、MAXI、Swift 衛星 (The Neil Gehrels Swift Observatory)、位置天文学用の宇宙望遠鏡 Gaia のデータを用いて MAXI J1631 の解析を行なった。MAXI と Swift の光度曲線より、MAXI J1631 のアウトバーストは一般的な FRED 型アウトバーストを示したが、HID は q 型とは異なる振る舞い（逆 Y 型の軌跡）を示すことがわかった。また、硬度比とスペクトル解析より、MAXI J1631 はハード状態、ハードな中間状態、ソフトな中間状態、ソフト状態、ハード状態へ遷移したことがわかった。しかしながら、ソフト状態からハード状態へ遷移したのは、強度がピーク時に比べ 3 桁近く小さくなってからであった。

1 日毎に分けてスペクトル解析を行うことより以下のことを明らかにした。ハード状態のスペクトルは吸収をかけた冪関数で表せ、典型的なブラックホール X 線連星のハード状態の特徴と一致した。それ以外の状態では、吸収をかけた diskbb モデルとその光子の一部が逆コンプトン散乱されたとしてそれを計算するモデル `simpl` で表せた。初期のアウトバーストのソフトな中間状態における diskbb モデルの規格化定数 ($\sim 3 \times 10^3$) は、他のソフトな中間状態とソフト状態に比べ小さいことがわかった。このことは、円盤の最内縁半径が小さくなっていることを示し、光学的に厚い降着円盤の最内縁安定円軌道半径より内側でガスの一部のエネルギーがブラックホールに向かってエントロピーとして流れ込んでいた可能性を示す。その後のハードな中間状態では、diskbb モデルの規格化定数が少し大きくなり ($\approx 7.3 \times 10^3$)、逆コンプトン散乱された割合も他の状態に比べ 30-40% と多いことがわかった。これより、この時期の降着円盤は、その最内縁半径が少し大きくなり、その内側が光学的に薄い高温プラズマ状態になったと考えられる。これが起こる要因としては、円盤の熱的不安定性などが考えられる。その後のソフト状態では、逆コンプトン散乱

された割合も 3% 以下に減少し、diskbb モデルの規格化定数がほぼ一定 ($\approx 4.0 \times 10^3$) となった。これは、典型的なブラックホール X 線連星のソフト状態の特徴と一致する。HID での逆 Y 型の軌跡は、以上のように降着円盤の物理状態の変化と関係している可能性が高いことが新たにわかった。

一方、銀河面にある天体からの X 線には、星間吸収の他に天体からの X 線が星間塵 (以下、ダスト) によって散乱された成分が観測されている。散乱される光子は 3 keV 以下の低エネルギー側で多いため、スペクトル解析に大きく影響する。

本研究で用いた Swift のイメージでも、3 keV 以下の低エネルギー側で MAXI J1631 の像が広がった散乱成分が確認された。そこで、近傍のダスト層の位置を求めるため、Gaia のデータより MAXI J1631 の方向にある恒星の数と距離の分布を調べた。また、遠方のダスト層の位置と MAXI J1631 までの距離は、ガンマ線バーストの解析で用いられる手法を応用し、次のようにして求めた。まず、それぞれの距離を少しずつ変えたときの直接光と散乱光の時間差と Swift の光度曲線からダスト層の位置での強度を見積もり、ダスト層の柱密度も少しずつ変化させ、散乱される X 線強度を数値的に求めた。そして、その強度と観測された散乱成分を比較した結果、ダストの層が少なくとも 2 つか 3 つ必要で、それぞれの場合について、MAXI J1631 までの距離をそれぞれ約 8 kpc と約 12 kpc と見積もることができた。また、ブラックホールが回転 (スピンパラメータ $a^* = 0.96$) しており、円盤の傾斜角が 30 度と仮定した場合、距離が 8 kpc だと MAXI J1631 の光度から MAXI J1631 の質量は太陽の約 16 倍と見積もられた。一方、距離が 12 kpc の場合、その質量は銀河系内のこれまでに発見された X 線連星では最も大きく、重力波で観測されているブラックホール同士の合体の前の 1 つのブラックホールの質量に相当することがわかった。また、MAXI J1631 までの距離を 12 kpc と仮定したときのアウトバースト中に放射したエネルギーの総量は、ブラックホール X 線新星の中では最も大きい部類に属し、連星系の大きさ自体も大きい可能性があることがわかった。

本論文は 8 章から構成されており、以下に各章の概要を示す。

第 1 章は研究背景と本研究の目的について記した。

第 2 章は本研究に関係するブラックホール X 線連星の基本的な特徴を示し、観測されるスペクトルと降着円盤の物理状態との関係について解説した。また、ダストによる散乱成分からダスト層までの距離と柱密度、天体までの距離の見積もりについて記した。

第 3 章では本研究で使用した観測装置、MAXI、Swift、Gaia について解説した。また、MAXI と Swift におけるお互いの観測機器の長所と短所についても記した。

第 4 章では天体が検出器の端付近で検出されるなど、観測条件が悪い MAXI のデータ解析の改良について記した。また、その解析手法と別の解析手法から得られた光度曲線を比較した。

第 5 章では MAXI J1631 の観測と解析結果について記した。MAXI J1631 からダストによる散乱成分が観測されたため、スペクトル解析では、その成分も考慮して行った。ダストの散乱成分の影響を無視すると、diskbb モデルの規格化定数が散乱成分の影響を考慮した場合に比べ 2 倍以上大きくなり、ブラックホールの質量を $\sqrt{2}$ 倍大きく見積もり過ぎる結果につながることを示した。

第 6 章では MAXI J1631 から観測されたダスト成分の見積もりにおける具体的な計算方法とそこから得られた MAXI J1631 までの距離の制限を記した。

第 7 章では 5、6 章の解析結果を基に、アウトバースト中の MAXI J1631 の降着円盤の物理状態の変化と質量の見積もりについて議論した。また、MAXI J1631 と同様な振る舞いをしたブラックホール X 線新星 MAXI J1803-298 (以下、MAXI J1803) との比較も行った。MAXI J1803 の光度曲線は FRED 型のアウトバーストを、HID は逆 Y 型の軌跡を示した。また、スペクトル解析より、強度がピーク付近の最内縁半径と逆コンプトン散乱した割合の変化が MAXI J1631 の減光時のソフトな中間状態とハードな中間状態と同じ傾向であることがわかった。これらより、MAXI J1803 と MAXI J1631 の降着円盤の物理状態の変化とその解釈について議論した。

第 8 章では 5 章から 7 章までのまとめを記した。

また、補足では以下の A-D の 4 つから構成されている。補足 A ではダストの微分散乱断面積、直接光と散乱光の光路差、ソース領域内に含まれる直接光と 1 日以内に地球に到達する散乱光の割合の導出について記した。補足 B では MAXI J1803 がピーク強度付近のスペクトル解析の結果を中心に記した。補足 C では観測史上最も明るいガンマ線バースト GRB 221009A におけるダストによって散乱された成分を考慮した解析結果について記した。補足 D では MAXI J1631 のスペクトルフィットのパラメータ変化の具体的な数値について記した。