

概要

2023年9月7日、宇宙航空研究開発機構は、6 keV の X 線に対して史上最高のエネルギー分解能 4.5 eV を持つ X 線マイクロカロリメータ *Resolve* 装置を搭載した X 線分光撮像衛星 (XRISM 衛星) の打ち上げに成功した。本研究は、XRISM 衛星による中性子星連星系 Cir X-1 の二回の観測データおよび他衛星による同時観測データを解析し、その詳細 X 線分光の結果から得られた成果をまとめたものである。

Cir X-1 は、年齢およそ 4600 歳の非常に若い中性子星連星系である。系の軌道周期は 16.6 日であり、その軌道位相変化に伴って複雑な変化を示す X 線スペクトルは長期にわたって研究の対象となってきた。軌道位相は視線上の中性子星に伴星が手前側にちょうど重なる点を $\phi = 0$ として定義されており、 $\phi = 0.8 - 1.0$ にあたる減光期には X 線スペクトルの時間変動が激しい一方、 $\phi = 0.0 - 0.8$ にあたる安定期には X 線スペクトルは大きな時間変動を示さないことが知られている。XRISM 衛星は、2024 年 2 月に減光期にあたる $\phi = 0.93 - 0.97$ を、2025 年 2 月に安定期にあたる $\phi = 1.00 - 1.11$ をそれぞれ観測した。第一回の観測は NICER 望遠鏡による同時観測を、第二回の観測は NICER 望遠鏡および NinjaSat 衛星による同時観測を伴っていた。それによって、第一回の観測では 0.38 - 13.0 keV、第二回の観測では 0.38 - 50.0 keV という、XRISM 衛星だけではカバーできない広いエネルギー帯域を研究対象とした。本研究では、輻射輸送数値シミュレーションソフトウェア Cloudy による光電離プラズマのモデルシミュレーションを行い、二回の観測を統一的に説明するスペクトルモデルの構築を試みた。

第一回の観測における Cir X-1 の X 線スペクトルは、4 keV 以上における X 線フラックスがおよそ 18 時間の間に約 10 倍変化する激しい変動を示し、電離階数の異なる複数種のイオンによる輝線と吸収線がなす、複雑な X 線スペクトル構造が検出された。このスペクトルは、中性子星表面および降着円盤からの黒体放射と、降着円盤周囲の部分吸収体、およびその外縁の円盤風によって駆動された外向きの速度を持つ二層構造のプラズマ雲からの放射と吸収を仮定することで説明できる。このモデルでは、激しい時間変動は、部分吸収体の視線上の被覆率変化によって引き起こされる。部分吸収体は、円盤からの放射を部分的に覆い隠す高密度の粗い物質塊であり、その起源として、伴星からの降着流の円盤との衝突点における局時的な不均一が考えられる。

第二回の観測における Cir X-1 の X 線スペクトルは、全エネルギー帯域において第一回観測の 100 倍程度明るく、2 日間にわたって時間変動の比較的小さい状態を示した。X 線スペクトルには顕に輝線が観測されない一方、強い吸収線が観測された。この特徴は、第一回観測のモデルから部分吸収体を除いたもので説明できる。第一回の観測と同じく、中性子星と降着円盤からの黒体放射と二層構造のプラズマ雲を仮定し、プラズマ雲からの輝線放射に対して黒体放射の光度が卓越しているため、見かけ上吸収線のみが観測されるとしてよくモデル化された。

これらの観測結果は、部分吸収体は公転軌道上の一部に偏在し、一回めの観測は部分吸収体が存在する方向から、二回目は存在しない方向から観測したもので、X 線光度は二回目のほうが約 100 倍明るかったというシンプルなモデルで解釈できる。1 年を隔てた 2 回の観測において、電離度が高く、大きい速度で外側に流出するプラズマ雲と、電離度が低く、小さい速度で外側に流出するプラズマ雲の 2 成分が共に観測され、それらのパラメーターに大きな変化はなかった。本研究によって、時間変化を含めた Cir X-1 の広帯域 X 線スペクトルを統一的に説明するモデルを構築することに成功した。

Abstract

On September 7, 2023, the Japan Aerospace Exploration Agency launched the X-ray spectroscopic imaging satellite (XRISM) equipped with the microcalorimeter *Resolve*, achieving an energy resolution of 4.5 eV at 6 keV. In this study, we analyze two XRISM observations of the neutron-star X-ray binary Cir X-1, together with simultaneous observations by other satellites, and present results based on detailed broadband X-ray spectroscopy.

Cir X-1 is an extremely young neutron-star binary with an age of about 4,600 years and an orbital period of 16.6 days. The orbital phase is defined such that $\phi = 0$ corresponds to the companion star being in front of the neutron star along the line of sight. It is known that strong spectral variability occurs during the dipping phase ($\phi = 0.8 - 1.0$), while the spectrum is relatively stable during $\phi = 0.0 - 0.8$. XRISM observed Cir X-1 at $\phi = 0.93 - 0.97$ in February 2024 (dipping phase) and at $\phi = 1.00 - 1.11$ in February 2025 (stable phase). The first observation was simultaneous with NICER, and the second with both NICER and NinjaSat, enabling broadband spectral analysis over 0.38–13.0 keV and 0.38–50.0 keV, respectively. To interpret the data, we performed photoionization plasma simulations using the radiative transfer code *Cloudy* and constructed a unified spectral model for both epochs.

During the first observation, the X-ray flux above 4 keV varied by about an order of magnitude over ~ 18 hours, and complex emission and absorption lines from ions with different ionization states were detected. The spectrum can be explained by blackbody emission from the neutron star and accretion disk, a partial absorber surrounding the disk, and emission and absorption from a two-layer plasma cloud driven outward by a disk wind. The strong temporal variability is attributed to changes in the covering fraction of the partial absorber, which likely consists of dense clumps originating from inhomogeneities at the impact point where the accretion stream from the companion collides with the disk.

In the second observation, the source was about 100 times brighter across the entire energy band and showed only modest variability over two days. No prominent emission lines were detected, while strong absorption lines were present. This spectrum is well reproduced by the same model as in the first observation, but without the partial absorber. Because the blackbody luminosity dominates over line emission from the plasma clouds, only absorption features are apparent.

These results can be interpreted by a simple geometric scenario in which the partial absorber is localized along a limited region of the orbit: the first observation probes a line of sight intersecting the absorber, whereas the second does not, and the intrinsic luminosity during the second observation is about 100 times higher. In both observations, two plasma components are required: one highly ionized with a large outflow velocity, and another with lower ionization and a smaller velocity, with no significant changes in their parameters over one year. This study thus provides a unified model that consistently explains the broadband X-ray spectra of Cir X-1, including their temporal variability.