

課題名(タイトル):

Monte Carlo simulation for X-ray interactions with a warped accretion disk

利用者氏名:

○高嶋 聡(1)

理研における所属研究室名:

(1) 仁科加速器科学研究センター 宇宙放射線研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係

地上では再現できない強磁場・強重力環境を作り出す中性子星は、極限環境における物理を明らかにするための貴重な実験環境である。特に中性子星が恒星と連星をなす場合、物質降着によって降着円盤を形成して強い X 線を放射することがある。その X 線放射を観測することで中性子星周囲の環境を探ることができる。大質量 X 線連星 SMC X-1 は、エディントン光度を超える強い X 線放射をする。また、0.71 秒周期のパルス変動や 3.89 日周期の軌道変動、45-60 日周期の準周期的な超軌道変動を起こすことで知られている。一般的に、超軌道変動における顕著なフラックスの減衰を説明する有力な描像の一つは、曲がった降着円盤によって、中性子星と観測者を結ぶ視線方向の X 線放射が遮蔽されるというものである(warped disk model)。しかし、SMC X-1 の場合には、warped disk model はまだ確立されていない。本研究の目的は、これら 3 つの時間変動に伴う X 線スペクトルおよび光度曲線の変化を明らかにすることで、謎に包まれている SMC X-1 の複雑な降着構造を明らかにすることである。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究では X 線天文衛星のデータ解析によってスペクトルや光度曲線を作り、それを X 線の輻射輸送計算の結果と比較して降着円盤の幾何学的な形状を明らかにすることを目指した。そのために HOKUSAI でモンテカルロシミュレーションコード MONACO (Odaka+11)を使った輻射輸送計算を行った。設定した幾何形状は、先行研究 Hickox+05 で導入された光学的に厚く曲がった降着円盤と、光学的に薄い円盤コロナおよび非等方な X 線放射源によって形成されている。本研究の設定では、ワープした円盤による遮蔽効果は視線方向に依存する。視線方向を一樣にサンプリングするため、HEALPix (Górski+05) を用いて、到来方向ごとに光子をビン分けした。

3. 結果

観測者方向、放射方向、およびその広がりに関して、選

択される組み合わせの数は大きく制限された。SMC X-1 のスペクトル解析では、超軌道変動に伴って見られる連続成分の見かけ上の変動は、連続成分自体の本質的な変化によるものではない可能性が高い。さらにパルス形状の変動は、降着円盤による遮蔽効果に起因すると考えられる。

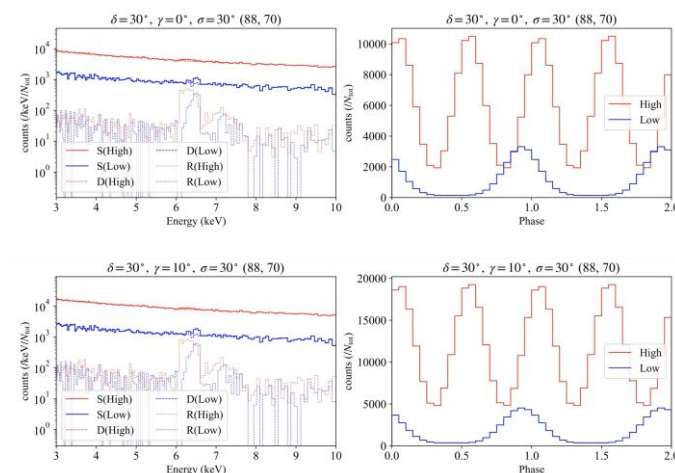


図 1: SMC X-1 の観測結果を再現する、スペクトルとパルスプロファイルのシミュレーション結果。赤と青がそれぞれ超軌道変動の High/Low 状態に対応する。

4. まとめ

観測結果と光子輸送シミュレーションを組み合わせることで、SMC X-1 において観測された超軌道変動は、歳差運動し、かつ曲がった降着円盤による X 線の減衰によって説明できることが示された。歳差運動する円盤による中心天体の遮蔽は、6.4keV 中性鉄輝線の等価幅、パルスプロファイル、および硬 X 線連続成分フラックスに見られる変動を良く再現する。中性子星の光度に本質的な変動を示す証拠は得られなかった。

5. 今後の計画・展望

曲がった降着円盤の周辺環境には様々な電離状態のプラズマが存在すると考えられており、X 線精密分光が可能な XRISM 衛星による観測によって幾何構造にさらに厳しい制限が与えられると期待できる。

2025 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

S. Takashima, et al., “X-ray analysis and photon-transport simulations of SMC X-1: a warped-disc origin of the superorbital modulation”, MNRAS, 546 (4), 2026

【ポスター発表】

S. Takashima, et al., “Constraints of an accretion structure in the luminous X-ray pulsar SMC X-1”, XRISM Conference 2025, Oct. 20-24, 2025, Kyoto, Japan