

電離・温度の非平衡プラズマモデルを取り入れた精密 X 線分光データ解析による Ia 型超新星残骸 3C 397 の親星解明

講師：大城 勇憲（理化学研究所 基礎科学特別研究員）

日時：2025 年 6 月 16 日(月) 16:00-18:00

場所：理学部 1 号館 4 階 物理会議室

概要：

白色矮星の熱核融合暴走である Ia 型超新星は、距離が推定可能な標準光源として宇宙論で用いられるとともに、シリコン、カルシウム、鉄などの生命・文明に必須な元素を宇宙に供給しており、宇宙の起源の根幹に関わる重要天体である。

しかし、Ia 型超新星の親星の性質の大部分、例えば連星系の伴星や、爆発に至るまでの進化過程、爆発時の白色矮星の質量などは未解明である。

Ia 型超新星の親星解明は、Ia 型超新星を標準光源たらしめる物理や、合成された元素の供給量を決定するために不可欠である。

超新星残骸の X 線観測は、Ia 型超新星の親星を解明する強力な手段となる。

特に白色矮星の最奥部で合成される鉄族元素(ここではチタン、クロム、マンガン、鉄、ニッケルをさす)は、その合成量に親星の質量や中心密度が色濃く反映されるため、これらの組成比を精密に測定することが親星解明の鍵となる。

しかし、超新星残骸のプラズマは電離・温度の非平衡が著しく、観測された X 線スペクトルから組成比を推定するためには、これらの非平衡状態の緩和過程を考慮したスペクトルモデルの構築が重要となる。

本講演では、X 線観測による Ia 型超新星の親星解明に向けた(1)超新星残骸の非平衡プラズマモデルの開発と(2)XRISM 衛星による精密 X 線分光データの解析について紹介する。

従来の超新星残骸の X 線観測データの解析に用いられていた非平衡プラズマモデルは、電離の非平衡は考慮しているものの、温度の非平衡は考慮しておらず、かわりに一定の電子温度を仮定するものであった。そこで、衝撃波加熱プラズマにおける電離・温度の非平衡緩和過程を自己無撞着に考慮したモデルを開発した。従来モデルとの比較から、従来モデルによる電離度の推定を最大で 30%過小評価するバイアスの存在を明らかにした。

構築したモデルを XRISM 衛星による Ia 型超新星残骸 3C397 の精密 X 線分光観測データに適用することで、鉄族元素の組成比測定を行った。XRISM 衛星の優れた分解能により、観測された X 線スペクトルからは様々な元素からの特性 X 線が分離された。特に、残骸の南部からはチタンからの微弱な K 殻輝線が検出され、Ti/Fe 質量比が残骸の一部で増強されていることが明らかとなった。このような Ti の増強は、爆発時に白色矮星の中心部で起こる電子捕獲反応により中性子過剰な環境で元素合成が起きたことを示唆する。この結果に基づいて、爆発時の白色矮星の中心密度が $\rho \geq 5 \times 10^9 \text{ g cm}^{-3}$ であったことを明らかにした。これは、3C397 の親星である白色矮星の質量が、その理論的上限である Chandrasekhar 限界に極めて近かったことを示唆し、Ia 型超新星の親星が重い白色矮星であるという証拠を得た重要な結果である。