

概要

Ia 型超新星は、比較的軽い ($< 8 M_{\odot}$) 恒星の最終進化段階である白色矮星が起こす爆発現象で、宇宙に存在する中間質量元素 (シリコン、硫黄、アルゴン、カルシウム) や、鉄族元素 (クロム、マンガン、鉄、ニッケル) の主要な供給源となっている。また、Ia 型超新星の絶対光度は極めて一様かつ推定可能であることが観測的に知られており、宇宙における距離の指標である「標準光源」として用いられている。しかし、この絶対光度の一様性はあくまで観測的な経験則であり、その物理的成因、および Ia 型超新星の親星の物理的性質や爆発のメカニズムについてははっきりした結論には至っていない。現在、Ia 型超新星の親星について議論的となっている問題は 2 つで、1 つは親星の連星系が何か、もう 1 つは親星の質量は白色矮星の理論的な質量上限であるチャンドラセカール限界に真に近いのか、というものである。

本研究では、後者の問題である親星の質量を明らかにするべく、XMM-Newton 衛星による超新星残骸 3C 397 の撮像分光観測を行い、鉄族元素の空間分布と質量比を調べた。その結果、3C 397 の南部において鉄族元素が偏って存在する領域を発見した。この領域の X 線スペクトルからは鉄族元素に加えて、Ia 型超新星からは初となる Ti からの K 殻輝線を検出した。測定された質量比 Ti/Fe、Cr/Fe は、白色矮星の中心部で起こる電子捕獲反応 ($p + e^{-} \rightarrow n + \nu_e$) の寄与を必要とする、この南部領域は白色矮星の中心部を起源としていると考えられる。さらに、電子捕獲反応の効率は白色矮星の中心密度に敏感であるという性質から、爆発時の中心密度が $\rho_c \sim 5 \times 10^9 \text{ g cm}^{-3}$ であることを明らかにした。単独の超新星残骸の観測から中心密度に制限をつけたのは本研究が世界初である。この中心密度は従来考えられていたものよりも数倍高く、白色矮星の質量がチャンドラセカール限界質量に極めて近かったことを示唆している。このような重い白色矮星が全ての Ia 型超新星を起こすと仮定すると、 ^{50}Ti や ^{54}Cr といった中性子過剰元素を過剰に生成してしまうため、銀河の化学組成進化を説明できない。この事実は、Ia 型超新星が単一の起源ではなく、異なる中心密度を持つ白色矮星から生じていることを示唆している。

本研究では、将来実現する精密 X 線分光観測を見据えた科学検討も行った。2022 年度に JAXA が打ち上げ予定の XRISM 衛星は、従来の検出機器よりも 1 桁ほど高いエネルギー分解能をもつ検出器を搭載しており、鉄族元素からの L 殻輝線の分離を実現する。L 殻輝線は、K 殻輝線と比較して、光子数が圧倒的に多いので、温度が低かったり、鉄族元素の絶対量が少ない超新星残骸においても元素組成比を測定できる。一方で、若い超新星残骸で見られる電離状態 (Li-like から Ne-like) からの L 殻輝線は実験データが少なく、またプラズマ中の振る舞いについても実験的に確認されていない。そこで核融合科学研究所にある LHD を用いた地上プラズマ実験によって、鉄族元素からの L 殻輝線の中心エネルギーの測定と、プラズマ中における時間発展を調査した。