

概要

重力崩壊型超新星爆発は、太陽質量の 10 倍以上の大質量星がその生涯の最終段階で起こす壮大な爆発現象であり、元素の合成と放出、さらにはエネルギー注入を通じ、銀河の化学的および動的進化に重要な役割を果たす。しかし、その爆発メカニズムについては未解明の部分が多く残されており、特に爆発の非対称性の形成メカニズムや駆動プロセスの詳細について十分な理解に至っていない。一方で、近年の観測技術の進歩や数値シミュレーションの発展により、非対称性が超新星爆発における重要な要素であることが明らかになりつつある。本研究の対象である超新星残骸 Cassiopeia A (以降、Cas A) は、銀河内で最も X 線で明るい超新星残骸の 1 つであり、1671 年頃に IIb 型超新星爆発を引き起こしたとされる。また Cas A では、逆行衝撃波による加熱を受けた爆発噴出物 (イジェクタ) からの熱的 X 線放射が支配的であり、その非対称な空間分布が特徴的である。爆発メカニズムを詳細に解明するためには、これらの衝撃波加熱前の放出速度を制限することが重要であり、これにより爆発の非対称性や元素分布の特性を理解する手がかりが得られる。

本研究では、2023 年に打ち上げられた XRISM 衛星に搭載された精密分光器 Resolve を用いて Cas A を観測し、ケイ素 (Si) および硫黄 (S) を含むイジェクタの速度構造を解析した。Resolve の優れた分光性能 (5 eV @ 6 keV) により、各輝線のドップラーシフトから 100 km s^{-1} 単位で精密に視線方向の速度測定を行うことが可能となった。その結果、北西領域では赤方偏移、南東領域では青方偏移する速度構造が確認され、これは先行研究と一致する。さらに、原子核と電子 1 つずつからなる水素状イオン (Si XIV および S XVI) が、原子核と電子 2 つからなるヘリウム状イオン (Si XIII および S XV) よりも視線方向速度で約 300 km s^{-1} 速いことを発見した。このような同一元素で電離度の異なる成分の速度差の検出は史上初めてであり、逆行衝撃波が初期に通過した外層領域に水素状イオンが多く存在することを示唆する結果である。さらに、Chandra 衛星の固有運動測定データを組み合わせることで、Si および S イジェクタの 3 次元速度分布を再構築した。その結果、視線方向速度に対して固有運動速度が約 2-3 倍の非対称な速度分布が確認された。また、これらを基に、Si と S イジェクタが逆行衝撃波によって加熱される際の自由膨張速度と逆行衝撃波速度を推定したところ、北部ではそれぞれ $2400\text{--}5000 \text{ km s}^{-1}$ と $1600\text{--}4200 \text{ km s}^{-1}$ 、南部ではそれぞれ $4900\text{--}7000 \text{ km s}^{-1}$ と $3300\text{--}5400 \text{ km s}^{-1}$ であった。自由膨張速度は北部で大きい傾向があり、非対称な速度分布を示している。これは、特に北部において強い爆発が起こったことを示唆しており、中性子星のキックに伴う非対称な爆発シナリオと一致する結果を得た。

本研究は、Resolve の高い分光性能を活用し、Cas A におけるイジェクタの非対称的な速度分布を明らかにすることで、重力崩壊型超新星爆発の非対称性の理解に貢献した。今後は、同様の手法を他の元素や超新星残骸に適用し、爆発メカニズムの系統的な解明を進めるとともに、観測データと数値シミュレーションの比較を通じて、重力崩壊型超新星爆発の全体像を明らかにすることを目指す。