

# 概要

超新星爆発により放出された噴出物は周囲の星間物質を掃き集めながら広がるため、その相互作用により衝撃波が生成される。一般に爆発後しばらくは衝撃波がその速度を保ちながら自由膨張するが、掃き集めた星間物質が噴出物の質量を上回ると徐々に減速しながら拡大する。このように、超新星残骸 (SNR) の衝撃波速度は周辺密度や SNR の年齢などを反映するため、爆発前の親星や SNR の進化過程を探る上で重要な手がかりである。この衝撃波速度の推定は一般に X 線や可視光にて衝撃波面の運動の直接測定が用いられている (e.g., Katsuda et al., 2009; Yamaguchi et al., 2016; Shimoda et al., 2022)。また、加熱されたプラズマの温度は衝撃波の速度に強く依存するため、可視光放射から得られる衝撃波加熱直後の陽子温度をもとに衝撃波速度を測定することもできるが (e.g., Long & Blair, 1990; Sollerman et al., 2003), この放射が観測されている例は少ない。同様に、熱的 X 線放射から測定したプラズマの温度を衝撃波速度の推定に用いることは原理的に可能であり、直接運動の観測が難しい遠方の SNR や視線方向速度の影響が大きい SNR 内部の衝撃波にも有効である。ただし、X 線で観測できるのは衝撃波通過から数百~数千年経過したプラズマであるため、加熱直後の温度を推定するには、プラズマ中で複雑に絡み合いながら進行する温度と電離の平衡過程をさかのぼらなければならない。そこで、我々はこのプラズマ平衡過程を同時に解く自己無撞着なモデルを開発した (Ohshiro et al., 2024)。従来のモデルでは考慮されていなかった電子温度とイオン温度の平衡過程も同時に解くことで衝撃波加熱直後の温度、ひいては衝撃波速度の推定が可能となる。さらに、本モデルを衝撃波加熱された星間物質からの熱的 X 線放射が強い大マゼラン雲の超新星残骸 N132D に適用し、その X 線の熱的放射から得られる物理量である電子温度と電離度をもとに衝撃波速度を推定した。その結果、衝撃波速度は方位角方向に依存し、 $800 - 1500 \text{ km s}^{-1}$  の幅を持つことが分かった。さらに、熱的放射から推定された速度をプラズマの直接観測から得られた衝撃波速度 (Plucinsky et al., 2024) と比較したところ我々の推定した値の方が全体的に小さい傾向がみられた。この違いは、我々のモデルから推定できる衝撃波速度は熱的エネルギーを速度に換算した値に相当するのに対し、直接観測によって得られる速度は実際の衝撃波面の運動を反映していることに起因すると考えられる。これは、衝撃波から星間物質の加熱に散逸されたエネルギーが想定よりも極めて小さいことを示唆し、高効率の粒子加速に分配された (最大 90%) とすればこの乖離を説明できる。これは理論的に予測される加速効率は約 10% であることを鑑みると、N132D の衝撃波は非常に高効率な加速現場となっている可能性がある。これは、宇宙物理学における最大の謎の一つである宇宙線の起源が未解明となっている一因の加速効率の大きさを推定する新たな手法を提供するものである。今後は年齢や周辺環境が異なる複数の超新星残骸を対象に同様の手法で系統的に解析を行い、超新星残骸での宇宙線加速効率を明らかにする。