

分子雲と相互作用する超新星残骸の流体シミュレーション

:体積占有率と衝撃波速度の関係

No.440 辰己 賢太 (理論)

超新星残骸(SNR)は宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子の加速源であると考えられている。超新星爆発は星形成の現場である分子雲の近傍で発生することが考えられるが、SNR と分子雲との相互作用は、乱流磁場増幅による粒子加速の促進や X 線やガンマ線放射の促進等の効果を通して、SNR の性質に大きな影響を及ぼすことが知られている(Inoue et al. 2012)。

SNR からのガンマ線の起源としてプロトン起源説が提唱されており、SNR で加速された宇宙線プロトンと分子雲に含まれるプロトンが衝突することにより、 π 中間子生成を経由してガンマ線が放出される。ガンマ線で最も明るい SNR である RXJ1713.7-3946 はその大部分の放射がプロトン起源であると考えられている(Fukui et al. 2021)。SNR 周辺の分子雲観測の結果から RXJ1713.7-3946 の宇宙線陽子の全エネルギーは約 10^{48} erg と見積もられている(Fukui et al. 2012)。この値は SNR 起源の宇宙線が銀河系内の宇宙線エネルギー密度を説明するために加速しなければならない値に比べて 1 桁小さい。しかしながら、この見積もりは SNR 近傍における分子雲の体積占有率が 100% 近くであることを仮定した場合の値であり、体積占有率が低ければ、宇宙線のエネルギーは大きくなり得る。

大質量星の重力崩壊が引き金となる重力崩壊型超新星爆発の場合、爆発前に発生する恒星風や輻射による電離領域の膨張によって分子雲内部の低密度部分が吹き飛ばされ、密度の濃いクランプ状の分子雲構造が残る。我々は分子雲に普遍的に観測される超音速の乱流を初期条件として考えたシミュレーションを行うことでクランプ状の分子雲構造を再現した。再現された構造から低密度ガスを様々な閾密度値で取り除くことによって、分子ガス体積占有率が異なる複数の環境を用意し、そのような環境下で点原爆発による SNR の形成シミュレーションを行うことで、体積占有率が SNR の進化に与える影響を調べた。その結果、図 1 から体積占有率が高いほど衝撃波がクランプの隙間を伝播することで球対称状に広がり、分子雲と相互作用しない場合の衝撃波速度に近くなっていくことを確認できた。また図 2 から体積占有率が 0.1 以上大きくなると、衝撃波の伝播速度が 1000km/s 以下となり、観測されるものよりも優位に小さくなってしまったことを発見した。体積占有率が 0.1 以下であることを踏まえて RXJ1713.7-3946 の宇宙線陽子の全エネルギーを再計算すると 10^{49} erg 以上となる。これは RXJ1713.7-3946 では実は十分な量の宇宙線が加速されていること示しており、宇宙線の SNR 起源説を支持する結果となる。

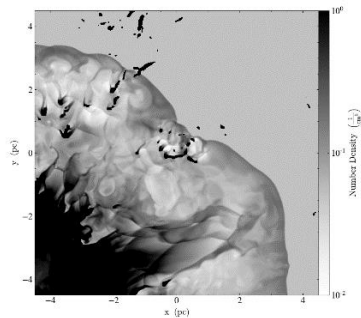


図 1. 体積占有率が 0.01 のときの温度
の Slice map ($t = 1000\text{yr}$)

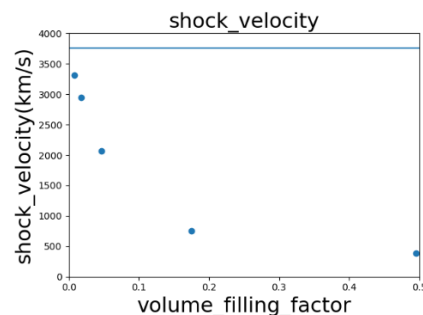


図 2. 衝撃波速度と体積占有率の関係、青線は分子雲
と相互作用しないときの衝撃波速度