

修士論文概要書

Master's Thesis Summary

Date of submission: 01/06/2026

専攻名(専門分野) Department	物理学及 応用物理学専攻	氏名 Name	田尾 萌梨	指導 教員 Advisor	片岡 淳 印 Seal
研究指導名 Research guidance	放射線応用 物理学研究	学籍番号 Student ID number	5324A031-7 CD		
研究題目 Title	X線スペクトル解析による若い超新星残骸の乱流磁場系統探索				

【研究背景・目的】

宇宙は「宇宙線」と呼ばれる高エネルギーの粒子で満ちている。 10^{15} 電子ボルト以下の宇宙線は銀河宇宙線と呼ばれ、若い超新星残骸の衝撃波はこの加速源の有力な候補である。荷電粒子が磁場乱流によって反射され衝撃波を往復するごとに少しずつエネルギーを得るフェルミ加速によって粒子は加速されると考えられているが、 10^{15} 電子ボルトまで加速ができるのかは議論が続いている。加速される粒子の最高エネルギーは磁場の大きさに比例する。磁場増幅の観測的な証拠はこれまでいくつか見つかっている。例えばRX J1713.7-3946では年単位で強度変動するX線ホットスポットが見つかり、星間磁場($\sim \mu\text{G}$)よりも大きく増幅されたmG程度の大きさの磁場が示唆された(Uchiyama et al. 2007)。この磁場増幅は分子雲との相互作用により乱流状態が作られたことで起きたと考えられている(Inoue et al. 2012)。一方分子雲の相互作用が弱いと考えられる比較的クリーンな超新星残骸のSN 1006においてもmG程度の磁場増幅の観測的な証拠は見つかっている(Tao et al. 2024)。クリーンな環境にある超新星残骸における磁場増幅のメカニズムの一つとしてベル不安定性がある(Bell 2004)。ベル不安定性は宇宙線電流によって駆動され、乱流状態を作り出す。つまり磁場乱流は磁場増幅のメカニズムを問わず重要な影響を及ぼすのでその度合いを相互作用の強弱を考慮して議論することが必要である。

【データ解析】

本研究では密集した分子雲クランプとの衝突による衝撃波の減速が確認されている「相互作用が強い領域」と「相互作用の弱いクリーンな領域」を区別して、年齢100歳から1000歳台までの若い超新星残骸6つのX線スペクトル解析を行った。Chandra衛星のデータを使用し、Zirakashvili & Aharonian (2007)によって提案されたシンクロトン放射モデルを適用した。

【結果・考察】

放射スペクトルのカットオフエネルギーは衝撃波の速度の二乗に比例し、ボーム因子 η に反比例する。ボーム因子 η は粒子の平均自由行程をジャイロ半径で割ったものである。したがって、 η が小さいということは平均自由行程が短く磁場乱流が強いことを表す。 $\eta = 1$ は磁場乱流が最も激しい極限に対応し、これをボーム極限と言う。

図1は衝撃波速度とスペクトル解析で得られたカットオフエネルギーから求めたボーム因子をプロットしたも

ので、横軸は年齢、縦軸はボーム因子の大きさを表す。青色のプロットは密集した分子雲との相互作用が強い環境で、ボーム因子はG1.9+0.3を除いてほぼボーム極限に近い値となった。これはInoue et al. 2012で提案されたように密集した分子雲と衝撃波と相互作用した結果磁場が非常に強く乱流されていることを表す。G1.9+0.3は $\eta = 3$ 程度であったがその若い年齢から乱流が成長中であることが考えられる。一方クリーンな環境ではボーム因子は3-15程度と超新星残骸によってばらつきのある結果が得られた。この違いは超新星残骸の周囲の環境によるものだと考えられる。例えばSN 1006は銀河面から遠く、その周囲の媒質は希薄で滑らかであるため磁場乱流は純粋に宇宙線電流によって駆動される不安定性によって生成されたと考えられる。一方Tychoなどは均一な媒質の中に小さいスケールのクランプの存在が示唆されており、これにより $\eta = 3$ 程度まで乱流が進むと考えられる。

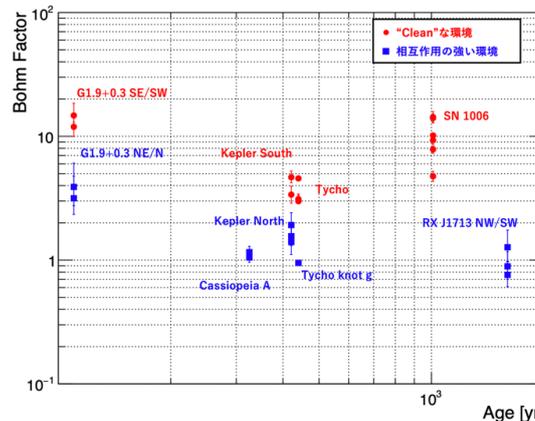


図1 年齢とボーム因子の関係

【結論と今後の展望】

本研究では周囲の環境が超新星残骸の磁場乱流に重要な影響を及ぼすことを示唆した。今後はALMA望遠鏡を用いて付随する分子雲をクランプ単位で見たり、電波やガンマ線など多波長のデータも組み合わせたりして磁場の大きさや構造を明らかにすることで超新星残骸の宇宙線加速の研究は進展すると考える。

【研究業績】

【査読付き論文】

- M. Tao et al. 2024, ApJL, 970, L27
 - M. Tao et al. 2025, ApJ, 992, 204
- 【国際学会 (Oral)】
- M. Tao et al., Gamma 2024