

超新星残骸における乱流と磁場増幅

岡本 良太 (名古屋大学大学院 物理学研究科 M1)

Abstract

一般的に星間媒質 (ISM) は高温側に warm neutrals medium (WNM; $n \sim 0.5 \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 8000 \text{ K}$)、低温側に cold neutral medium (CNM; $n \sim 50 \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 100 \text{ K}$) の熱的に安定な相を持ち、等圧下でこれらの相は共存することができる。Inoue et al. 2009 は、この非一様性を持つ ISM と超新星爆発による衝撃波の相互作用を 2 次元磁気流体力学シミュレーションを用いて調べた。結果として、最大磁場強度はプラズマのベータ値が 1 あたりとなる条件まで増幅し、超新星爆発の典型的な衝撃波速度である 10^3 km s^{-1} 程度の衝撃を伝搬させた場合においては数 mG のオーダーまで増幅された。この磁場増強機構は、ISM の非一様性によって Richtmyer-Meshkov 不安定である。その結果生じた乱流によるダイナモ効果により磁場が増幅されたと考えられる。また近年の X 線放射の観測で、いくつかの超新星残骸 (SNR) では数 mG 程度の磁場を帯びた 0.05 pc 程度のスケールの X 線強度変動領域が発見されており、この空間スケールと磁場強度はシミュレーション結果と非常に良く一致している。

本講演では非一様性を考慮した ISM と衝撃波の相互作用の 2 次元磁気流体力学シミュレーションの結果から磁場増幅機構の説明と観測結果との対応を詳しく述べた論文 (Inoue et al. 2009) を紹介する。

1 Introduction

近年 X 線放射の観測でいくつかの SNR から、数年単位で変動する X 線強度変動領域が発見された。このことから SNR が数 mG 程度の磁場を持つと示唆され、典型的な ISM の磁場強度 ($5 \mu \text{ G}$) と比べると数百倍程度の磁場増幅機構が必要である。

SNR の磁場増幅機構の理論はいくつか提唱されている。単原子ガスの衝撃波圧縮による機構、衝撃波面近傍で発生するプラズマの非熱的不安定性による Lucek-Bell 機構、一様な星間媒質を乱流により磁場が巻き上げられることによりダイナモ的な機構などである。しかし、その磁場増幅率は 10 倍程度と数百倍の磁場増幅を説明できるものではなかった。

実際の ISM は、薄く広がった WNM 中に密度が 10 倍以上濃密な CNM が埋め込まれた非一様な媒質であり、このことを考慮すると乱流による磁場増幅は上で述べた機構に比べ大きなものになると考えられる。よって、非一様性を考慮した ISM に超新星爆発による強い衝撃波が伝搬した場合、観測結果を説明できるような磁場増幅がみられるか 2 次元磁気流体力学シミュレーションを用いて理論的に調べる。

2 Methods

2.1 Basic Assumption and Numerical Methods

直交座標系における理想気体の MHD 基本方程式は、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(p + \frac{B^2}{8\pi} + \rho \vec{v} \otimes \vec{v} - \frac{\vec{B} \otimes \vec{B}}{4\pi} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[\left(e + p + \frac{B^2}{8\pi} \right) \vec{v} - \frac{\vec{B} \cdot \vec{v}}{4\pi} \vec{B} \right] = \vec{\nabla} \cdot \kappa \vec{\nabla} T - L(n, T) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{B} \times \vec{v}) \quad (4)$$

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho \vec{v}^2}{2} + \frac{B^2}{8\pi} \quad (5)$$

である。ここで、 ρ は密度、 \vec{v} は流体の速度、 \vec{B} は磁場、 p は圧力、 e は単位体積辺りの総エネルギー、 κ は熱伝導率、 n は粒子数密度、 T は温度、 $L(n, T)$ は正味の冷却関数を表す。

これらの方程式を基礎として 2 次元磁気流体力学

シミュレーションを行う。計算領域は $0 \leq x, y \leq 2pc$ としセル数は 4096^2 ($\Delta x = \Delta y = 4.9 \times 10^{-4} pc$) とする。境界条件については後述する。

本研究では、以上を用いて超新星爆発による衝撃波が非一様な ISM に伝搬することで近年観測されている数百倍程度の磁場増幅が見られるか調べる。

2.2 Generation of a Preshock Two Phase Mediums

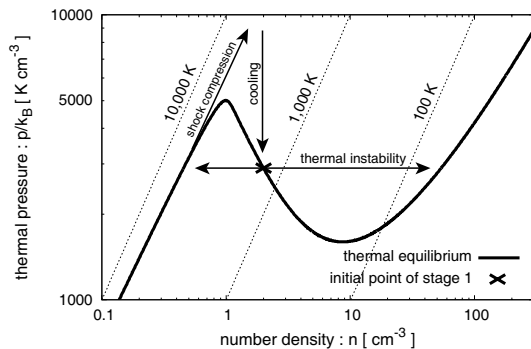


図 1: 星間媒質の輻射平行状態 (太線)

まず、WMN と CNM の混相系である ISM を作ることを考える。

ISM はダストからの光電加熱と輝線放射による冷却が物理的状态に大きく影響するエネルギー開放系であり、熱平衡状態は図 1 の様になる。約 $8000K$ の高温側と約 $100K$ の低温側に熱的に安定な相を持ちこれらをつなぐ状態は熱的に不安定である。高温側の安定な相である星間媒質に $10 km s^{-1}$ 程度の衝撃波を加えると、図 1 の矢印で示したように、まず衝撃波圧縮が起こり、次に冷却され、不安定な熱平衡状態に行き高温側低温側の 2 相に分かれて行くような進化をたどる。

今回の 2 次元磁気流体シミュレーションでは、熱的に不安定で一般的なガス (粒子数を $n = 2.0 \times cm^{-3}$ 、圧力を $p/k_B = 2900 K cm^{-3}$) に一般的な磁場 $B_0 = 6.0 \mu G$ をかけた状況を初期条件とし、周期境界の下で熱的不安定性から混相系 ISM を作る。混相系は ISM の冷却時間 ~ 数 Myr で形成される。従って計算は $4 Myr$ で止める。

その結果生成された非一様な ISM に関する結果を

図 2 に示す。フィラメント状の密度構造が現れており、この領域の数密度は周りと比べて 10 倍以上高い。この領域が大局磁場に対して垂直に伸びたような構造を持っているが、これは磁場に垂直な方向に対して磁気圧は強く働くためである。

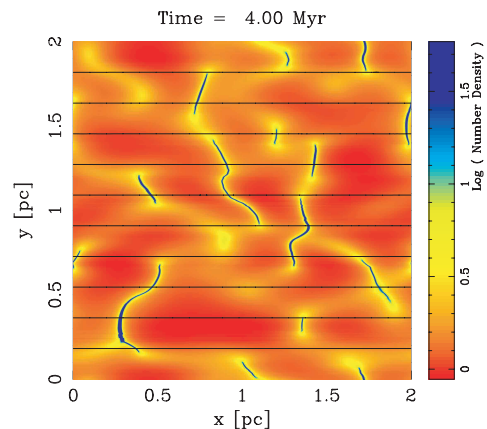


図 2: 熱的不安定性の成長により生成された非一様な媒質の密度構造。大局磁場は+x 方向

2.3 Injection of a Shock Wave

次に、超新星爆発による衝撃波を想定し、初期条件として作った非一様な ISM に衝撃波が伝搬することを考える。衝撃波を誘発させるために境界に数密度を $n = 0.1 cm^{-3}$ 、圧力 p/k_B を $3.0 \times 10^7 \sim 3.0 \times 10^8$ の間でいくつか選び、大局磁場に水平・平行な境界に hot plasma を置く 4 通りのモデルを考えた (表 1)。この段階では hot plasma を置いた境界の反対側には自由境界条件を、その両側では周期的境界条件を課した。また、ISM が混相系となるまでの時間スケールは数 Myr なのに対し、この力学的な時間スケールは $1000 yr$ と短く、放射による加熱・冷却効果は省くことにする。

表 1: 各モデルのパラメーター

Model	p_{th}/k_B	Shock Type	Shock Speed
1	$3.0 \times 10^8 K cm^{-3}$	Perpendicular shock	$1256 km s^{-1}$
2	$3.0 \times 10^8 K cm^{-3}$	Parallel shock	$1289 km s^{-1}$
3	$1.0 \times 10^8 K cm^{-3}$	Parallel shock	$726 km s^{-1}$
4	$3.0 \times 10^7 K cm^{-3}$	Parallel shock	$397 km s^{-1}$

3 Results and Interpretations

次に図 2 を初期条件として衝撃波を伝搬させた Model 1 の結果を図 3 に示す。平均磁場、最大磁場強度、プラズマのベータ値の時間変化を図 4 に示す。

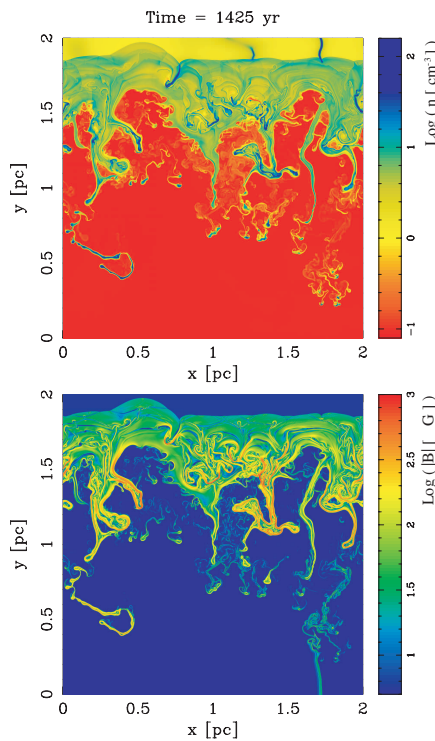


図 3: Model 1 のシミュレーション結果。上図は密度構造、下図は磁場強度を表す。

図 3 は時刻 $t = 1425 yr$ の状態である。上図を見ると衝撃波面ではマッシュルームの様な形状を作っており、衝撃波面後方 ($\sim 1 pc$) では乱流により渦が生成されていることが分かる。この形状は Richtmyer-

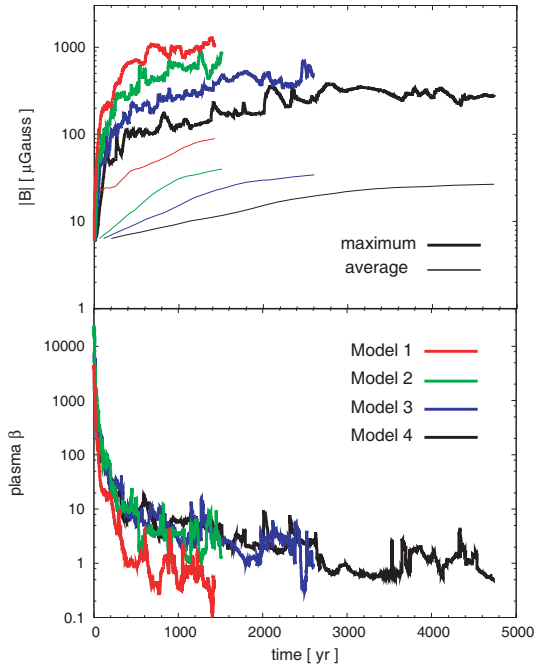


図 4: 上図は shell 内部の最大磁場と平均磁場の時間変化。下図は shell 内部の β 値 (赤) の時間変化を表す。

Meshkov 不安定性で形成される渦の特徴であり、混相系により密度比があることが原因である。また、下図を見ると $0.05 pc$ 程度の長さを持つフィラメント状の領域があり、その領域の最大磁場強度は数 mG まで増強されている。図 4 から、プラズマのベータ値が 1 の辺りで最大磁場強度の増幅が止まっているのが分かる。これは乱流の速度分散が音速程度となり、熱的な圧力と磁気圧とが釣り合うようになったからである。平均磁場強度の増幅は 4 倍程度であり、局所的な磁場増幅による為ではなく、大局的な衝撃波圧縮によるものである。

4 Summary and Discussions

混相系の非一様な ISM と超新星爆発で生じる衝撃波との相互作用の 2 次元のシミュレーションを行った。その結果、密度の非一様性により衝撃波面後方では Richtmyer-Meshkov 不安定性による乱流が生成され、ダイナモ的に磁場が増幅した。磁場は磁気圧と熱的な圧力が釣り合うベータ値 ~ 1 となる条件ま

で増幅し、実際に観測されているような数 mG 程度の磁場増幅が見られた。近年 SNR の X 線観測で、Uchiyama et al. 2007 と Uchiyama & Aharonian 2008 によりフィラメント状の数 mG 程度の磁場強度を持つシンクロトロン X 線の hot spot が発見されている。この hot spot の空間スケールは $0.05pc$ 程で、シミュレーション結果における数 mG 程度の磁場増幅のスケールが一致している。また、hot spot は衝撃波面後方 $0.1pc$ 程度の所に位置しており、シミュレーション結果と良く一致する。つまり、今回の結果から数 mG 程度の磁場ができる原因は非一様な ISM に超新星爆発による衝撃波が伝搬するためと考えられる。

今回は 2 次元のシミュレーションであったが、3 次元のシミュレーションも行われている (Inoue et al.2012)。その研究では非一様性媒質が 2 次的な衝撃波を生み、それが超新星残骸における粒子加速機構を上手く説明できると考えられている。

今後の展望としては、超新星残骸における磁場増幅をより詳細に明らかにして行くとともに、宇宙線の粒子加速機構を解明して行きたい。

Reference

Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S. Apj, 695, 825 (2009)

Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., & Fukui, Y. Apj, 744, 71 (2012)