

回転に対し傾いた磁場をもつ大質量星コアの重力崩壊と超新星爆発

三上 隼人、佐藤 裕司、花輪 知幸 (千葉大学)、松本 倫明 (法政大学)

Introduction

非球対称に爆発するII型超新星のモデルとして3次元MHDシミュレーションを行った。初期モデルは中心密度が $7 \times 10^9 \text{ g/cm}^3$ に達した15太陽質量の星 (Heger, Langer, & Woosley 2000) に、 10^{12} G 程度の磁場と、周期 5.17 秒程度 (1.2 rad/s) の回転を加え作成した。磁場や回転は強さだけでなく、相互の角度も変えて計算した。磁場が回転軸に対し傾いている場合、爆発速度は初期の回転軸方向で大きくなった。

基礎方程式

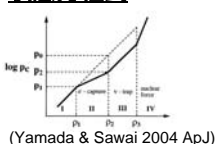
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \frac{1}{c} \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \rho \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\Delta \Phi = 4\pi G \rho$$

状態方程式



$$P_{\text{tot}}(\rho, \epsilon_t) = P_c(\rho) + P_t(\rho, \epsilon_t)$$

$$P_c(\rho) = K \rho^\Gamma$$

$$P_t(\rho, \epsilon_t) = (\gamma_t - 1) \rho \epsilon_t$$

$$\Gamma = \frac{4}{3} \quad (\rho < \rho_1 = 10^9 \text{ g/cm}^3)$$

$$= 1.31 \quad (\rho_1 \leq \rho < \rho_2 = 10^{12} \text{ g/cm}^3)$$

$$= \frac{4}{3} \quad (\rho_2 \leq \rho < \rho_3 = 2.8 \times 10^{13} \text{ g/cm}^3)$$

$$= 2.5 \quad (\rho_3 \leq \rho)$$

親星のモデル

1.4太陽質量のコアを持つ15太陽質量の星 (Heger, Langer, & Woosley 2000)

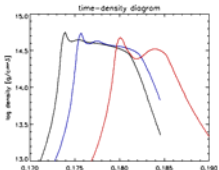
中心の初期角速度 (全体は差動回転) 0 rad/s, 1.2 rad/s, 2.4 rad/s

初期の磁場強度 $1.90 \times 10^{11} \text{ G}$, $2.85 \times 10^{11} \text{ G}$, $3.79 \times 10^{11} \text{ G}$, $7.57 \times 10^{11} \text{ G}$

回転軸と磁場の方向の角度 0度、15度、30度、60度、90度

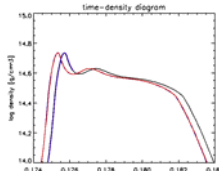
最大密度の時間発展

初期速度依存性



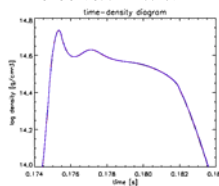
右図は初期回転への依存性が見られるよう、磁場の無いモデルを出力している。初期角速度0、1.2、2.4 rad/sそれぞれの重力崩壊後のバウンスによる振動が見られ、その周期は約4、5、8 msである。

初期磁場依存性



右図は初期磁場への依存性が見られるよう、初期角速度1.2 rad/sで、初期磁場の強度が異なるモデルを出力している。5つのモデルがあるが、崩壊までの時間が早いモデルと遅いモデルの2つに別れている。早いモデルは $1.90 \times 10^{11} \text{ G}$, $2.85 \times 10^{11} \text{ G}$ で、遅いモデルは 0.0 G , $3.79 \times 10^{11} \text{ G}$, $7.57 \times 10^{11} \text{ G}$ である。

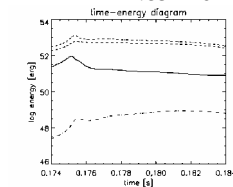
回転軸と磁場との角度依存性



右図は初期磁場の方向と回転軸の方向の違いが見られるよう、初期角速度1.2 rad/s、磁場強度 $2.85 \times 10^{11} \text{ G}$ のモデルで出力している。磁場と回転軸の角度はそれぞれ0度、15度、30度、60度、90度のモデルがあるが、最大密度で見るとほぼ同じ重力崩壊の進み方をしているように見える。

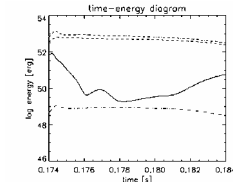
エネルギーの時間発展

1.2 rad/s $2.85 \times 10^{11} \text{ G}$



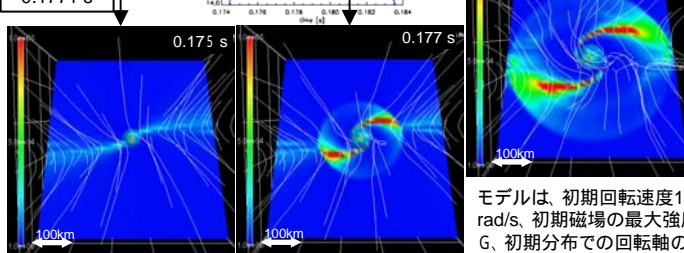
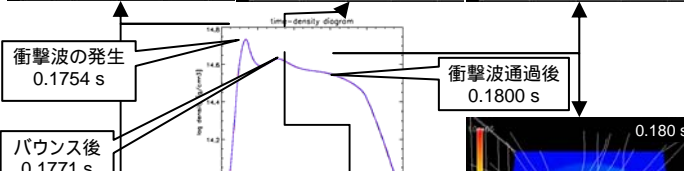
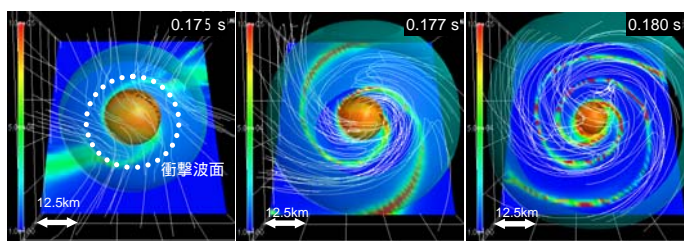
図は初期角速度1.2 rad/s、初期磁場の最大強度 $2.85 \times 10^{11} \text{ G}$ 、初期の磁場と回転軸の角度60度のモデルについて、上から順に内部エネルギー、縮退エネルギー、運動エネルギー、磁気エネルギーを出力したものである。また、考慮した領域は、コア中心を中心とした、一辺60 kmの立方体である。重力収縮でエネルギーは増加し、収縮後に衝撃波などにより、運動エネルギーが他のエネルギーへと変換されている。磁気エネルギーは、重力収縮後に収縮時よりも増加しており、1.815 sで $1.00 \times 10^{49} \text{ erg}$ まで増加する。これは回転により磁場が巻かれることに起因しており、初期回転の無いモデル(図)では見られない効果である。

0.0 rad/s $7.57 \times 10^{11} \text{ G}$



図に見られる運動エネルギーの増加は、バウンス後の収縮による増加であり、中心付近の領域のみを考慮したために出現した増加である。

崩壊、爆発における磁場の形状と強さ



図について

断面：回転軸に直交し、コアの中心付近を通る面(上図 YZ面(右図))

等値色：プラズマ圧力指数(上図)

$$\beta = \frac{P_{\text{gas}}}{P_{\text{mag}}}$$

エントロピー(右図)

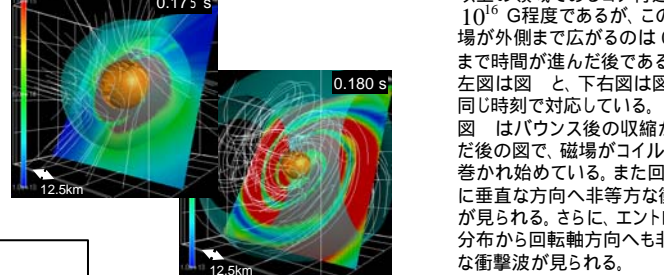
磁場強度(下図)

流線

球面

内側 $2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$

外側 $1.0 \times 10^{12} \text{ g/cm}^3$



モデルは、初期回転速度1.2 rad/s、初期磁場の最大強度 10^{16} G 、初期分布での回転軸の角度60度。図は、この時間発展を回転軸付近から見下ろす視点で描いている。

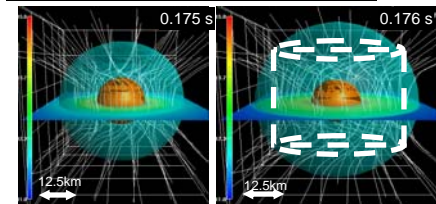
図は衝撃波が発生した直後の図で、衝撃波面において磁場が折りたたまれた構造が見られる。また、衝撃波面より内側の領域において、プラズマ圧力指数の低い領域では、磁場強度が 10^{16} G 程度であるが、衝撃波面より外側では 10^{14} G 程度である。この後も、密度 $1.0 \times 10^{12} \text{ g/cm}^3$ 以上の領域であるコア付近では 10^{16} G 程度であるが、この強磁場が外側まで広がるのは0.18 sまで時間が進んだ後である。下左図は図と、下右図は図と同じ時刻で対応している。図はバウンス後の収縮が進んだ後の図で、磁場がコイル状に巻かれ始めている。また回転軸に垂直な方向へ非等方な衝撃波が見られる。さらに、エントロピー分布から回転軸方向へも非等方な衝撃波が見られる。

図はコイル状に巻かれた磁場が形成された時の図である。衝撃波の通過により、コアから離れた領域にある磁場まで歪められている。同じ時間の下左図から、バウンス後コイル状に巻かれた磁場は全体として管状の構造を形成していることが分かる。非等方な衝撃波は回転軸方向で確認。

まとめ

他のエネルギーに比べ微小なエネルギーの磁場であっても、重力崩壊の過程で折り畳まれ局所的には 10^{16} G と非常に強く、非等方な衝撃波を生み出す原因となっている。また、折り畳まれた磁場はコイル状に巻かれ、管状構造を形成し、バウンスの間の回転によりさらに強度を増し広範囲に広がっている。非等方な衝撃波は、回転軸方向のみならず、回転面上でも確認することができたが、この衝撃波についてさらに詳しく解析する必要がある。

楕円型の崩壊と管状のバウンス



図について

断面：YZ面

等値色：密度

流線：磁力線

球面：等密度面

内側 $2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$

外側 $1.0 \times 10^{12} \text{ g/cm}^3$

初期速度1.2 rad/s、初期磁場の最大強度 $2.85 \times 10^{11} \text{ G}$ 、初期分布は回転軸と平行。面はXY面に等値色で密度を描いたものである。密度分布は、重力収縮する際にはoblateした分布をしており、0.175 sに衝撃波が発生した直後、バウンス開始直後では、磁場の分布によると思われる管状の分布している。この分布は、回転軸と磁場が平行でないモデルでも見られる。