

重力崩壊型超新星爆発の3次元MHDシミュレーション

佐藤 裕司、花輪知幸 (プロジェクト ID: yys91b)

重力崩壊型 (II 型、Ib/c 型) の超新星は、可視光の偏光や X 線光度曲線等の観測から、非球対称性の強い爆発である事が示唆されている。我々はその非球対称性の成因として磁場と回転の効果を考え、超新星爆発に至る鉄コア爆縮過程の3次元磁気流体シミュレーションを行った。これまでも磁場を考慮した軸対称な超新星爆発のシミュレーションが行われているが、本研究では磁軸と回転軸が斜交しているという3次元効果を初めて扱っている。また数値計算には $64^3 \times 5$ 段の多層格子を用いて、鉄コアの半径 ~ 1000 km から中性子星の半径 ~ 10 km の広ダイナミックレンジと、最下段で1格子当り ~ 1 km の高解像度計算を達成している。

超新星爆発後にパルサーが形成される事を意識し、磁軸が回転軸に対して45度傾いた鉄コアを初期モデルとして考え、その効果を調べた。状態方程式には密度によって断熱指数 γ を切り替えるポリトロップ近似を採用し、簡単のために熱エネルギーやニュートリノを無視した。半径 840 km、質量 $1.5M_{\odot}$ の鉄コアの密度分布は $\gamma = 1.3$ のポリトロップの力学平衡状態と仮定し、双極磁場と微分回転を仮定した。中心磁場強度と中心角速度をパラメータとして、磁場も回転もないモデル・磁場のみ含んだモデル・回転のみ含んだモデル・両方含みパラメータが異なる5モデル、合計8モデルを計算した。

中心磁場強度が 3.6×10^{12} G、中心角速度が $1.0 \sim 4.0 \text{ s}^{-1}$ のモデルの計算結果は4つのフェーズに分かれた。最初の、自由落下時間尺度で鉄コアが収縮する「動的収縮期 (~ 192 msec 間)」では、中心密度が $\sim 8 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ に達するまで、中心磁場強度は $\rho^{2/3}$ に比例して増加し、中心角速度は $\rho^{0.57}$ に比例して増加する。前者は一樣収縮から期待される変化であるが、後者はそれよりも緩やかである。磁力線は鉄コアの収縮により動径方向に引き伸ばされ、原始中性子星コアの外ではスプリットモノポール状の磁場配位が出来る。中心密度が核密度に達すると状態方程式が硬くなり、原始中性子星コアが形成されて、重力と圧力勾配がつり合いつつガス降着が続く「準静的成長期 (~ 3 msec 間)」に入る。動的収縮期では1回転もしないが、形成された原始中性子星コアの回転角速度は十分に速い。原始中性子星コア

の回転が始まると、鉄コアの微分回転と磁軸の歳差によって磁力線が回転軸に巻き付き、回転軸を含む断面を貫く磁束 Φ_{φ} が増大する「 B_{φ} 増大期 (~ 10 msec 間)」が始まる。コアの回転数に比例して Φ_{φ} が初期磁束の2～3倍に増大し、磁気エネルギーの φ 成分 $E_{m,\varphi}$ が増大する。増大した磁気圧が動圧よりも大きくなると、衝撃波面の膨張が始まる。 Φ_{φ} の増大は続くが、 $E_{m,\varphi}$ の増加は全磁気エネルギーの40%程度で飽和する。最後は、衝撃波面が上下対称な二方向に膨張する「双極膨張期 ~ 20 msec」である。回転軸周りに巻き付いた螺旋状の磁力線がジェット状にコアから噴出される。そのポインティングフラックスによるルミノシティ $L_p \sim 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ に押されて、衝撃波面は双極的に膨張する。

図1は「 B_{φ} 増大期」と「双極膨張期」の典型的な磁力線と密度分布の図である。

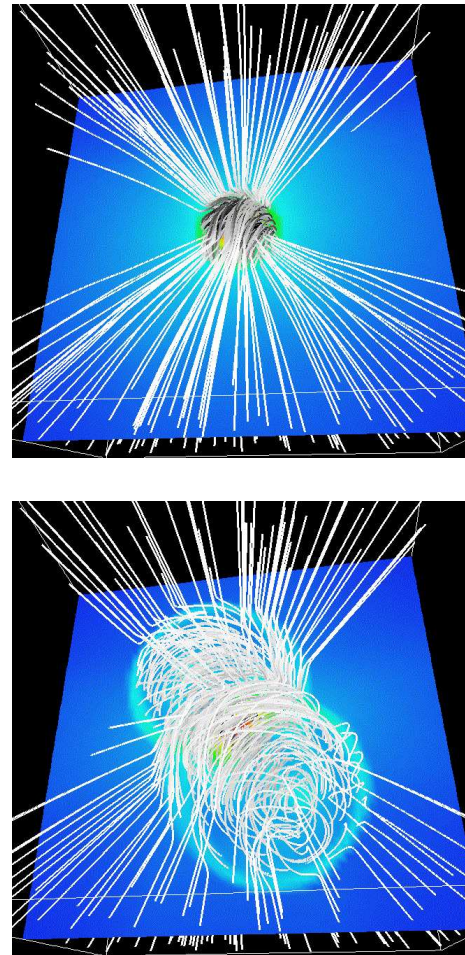


図1: 上図が $t=195$ msec 時の磁力線と密度分布。下図は $t=222$ msec 時の磁力線と密度分布。