

重力崩壊型超新星爆発における3次元MHD効果

三上 隼人、佐藤 裕司、花輪 知幸（千葉大）、松本 倫明（法政大）

アブストラクト

重力崩壊型超新星爆発に見られる非対称性に着目して、双極磁場を持ち、差動回転している大質量星コアの3次元シミュレーションを行った。重力崩壊後に多くの磁気エネルギーがたまるまでアウトフローの発生を遅らせることで、高速で高エネルギーのジェットが得られると考え、角速度分布を変えたモデルを試した。中心に近い領域で角速度勾配を持つ初期モデルでは、重力崩壊後に中心付近の高密度領域で磁気エネルギーがためられた。この磁気エネルギーは長く保たれたが、一部は半径 60 kmまで上昇しジェットへ変換された。どのモデルでもジェットが放出されるまでの時間はバウンスから 17 ms後となった。

イントロダクション

重力崩壊型超新星の爆発機構はいまだに謎である。これまでに一般相対論やニュートリノ輸送、高密度ガスの状態方程式などを考慮したシミュレーションも行われているが、球対称を仮定したモデルでは爆発を再現できていない。また超新星爆発が非球対称であるという観測的証拠や状況証拠も増えてきている。このようなことから近年、超新星爆発の非対称性を解明する研究やシミュレーションが盛んになってきた。

超新星爆発を非対称にする要因の一つとして回転と磁場が考えられており、軸対称を仮定したシミュレーションが行われている。我々はこれを発展させ、初期磁場が回転軸に対して傾いている場合を考慮し3次元シミュレーションを行ってきた。その結果、回転軸に対し磁軸が傾いている場合、原始中性子星の赤道面に磁気反転層が形成されることが分った。また、原始中性子星の回転エネルギー(〜10⁵¹ erg)の一部が磁気エネルギーへと変換された時点でジェットが放出されてしまうことが分った。

より多くの磁気エネルギーがたまるまでジェットの放出を送らせれば、少ない回転エネルギーでも、より高速で高エネルギーのジェットが得られると考え、角速度分布を変えたモデルを試してみた。

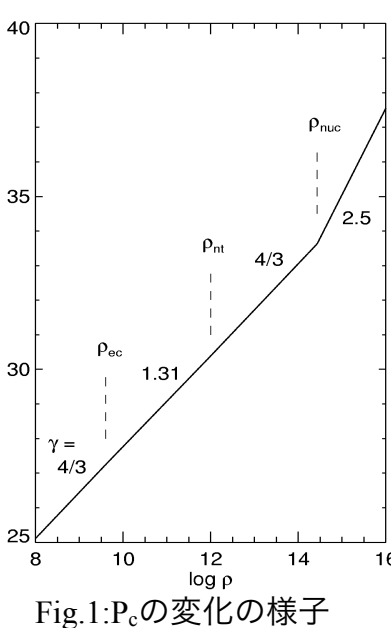
計算モデル

1. 基礎方程式(理想MHD方程式)

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0 \\ \rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right\} &= -\nabla P + \frac{1}{c} \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \rho \nabla \Phi \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \Delta \Phi &= 4\pi G \rho\end{aligned}$$

2. 状態方程式(Takahara & Sato, 1982)

$$\begin{aligned}P_{\text{tot}}(\rho, \varepsilon_T) &= P_T(\rho, \varepsilon_T) + P_c(\rho) \\ P_T(\rho, \varepsilon_T) &= (\gamma_T - 1) \rho \varepsilon_T \\ P_c(\rho) &= K \rho^\gamma \\ \gamma &= \begin{cases} 4/3 & (\rho < 4.0 \times 10^9 \text{ g cm}^{-3}) \\ 1.31 & (4.0 \times 10^9 \leq \rho < 10^{12} \text{ g cm}^{-3}) \\ 4/3 & (10^{12} \leq \rho < 2.8 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}) \\ 2.5 & (2.8 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3} \leq \rho) \end{cases}\end{aligned}$$



3. 親星モデル

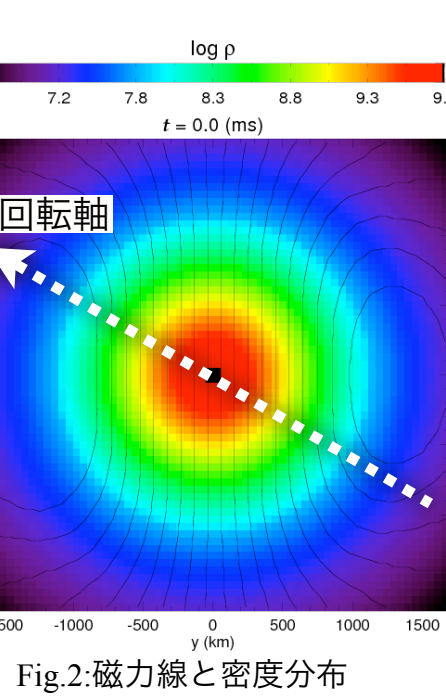
☆ 15 M_⊙モデル(Woosley et al., 2002)のFeコア

☆ 微分回転

$$\Omega(r) = \frac{\Omega_i a^2}{r^2 + a^2}$$

☆ 双極磁場 r_a, r_b は846, 1691 km

$$\begin{aligned}B_x(r) &= \begin{cases} -B_i \frac{2(r_a - r_b)}{3} \cos \theta & (0 \leq r < r_a) \\ -B_i \left(\frac{2r_a}{3} + \frac{1}{3}r + \frac{r^2}{6} \frac{1}{r^3} \right) \cos \theta & (r_a \leq r < r_b) \\ -B_i \frac{r^2 - r_b^2}{6} \frac{1}{r^3} \cos \theta & (r_b \leq r) \end{cases} \\ B_\theta(r) &= \begin{cases} B_i \frac{2(r_a - r_b)}{3} \sin \theta & (0 \leq r < r_a) \\ B_i \left(\frac{2r_a}{3} + \frac{1}{3}r + \frac{r^2}{12} \frac{1}{r^3} \right) \sin \theta & (r_a \leq r < r_b) \\ -B_i \frac{r^2 - r_b^2}{12} \frac{1}{r^3} \sin \theta & (r_b \leq r) \end{cases} \\ B_\phi(r) &= 0\end{aligned}$$



4. 計算手法

☆ Roe法 + マルチグリッド法

☆ 多層格子法(64×64×64メッシュ×8グリッド)

5. パラメータ

☆ 中心角速度 Ω_i は1.2 rad s⁻¹

☆ 中心磁場強度 B_i は 3.0×10¹² G

☆ 回転軸と磁軸のなす角度は 60°

☆ 剛体回転領域を表す a は 848, 636, 424, 212 km

より多くの磁気エネルギーがたまるまでジェット放出を遅らせれば、より高速で高エネルギーのジェットが得られると考え、角速度分布を変えたモデルを試した。

重力崩壊からジェット放出

剛体回転領域が最も広い、 $a=848$ kmのモデルでは、即時衝撃波が発生後、原始中性子星の回転により赤道面付近に磁気反転層が作られた。この磁気エネルギーが2×10⁴⁹ ergまでためられると同時に、数万 km s⁻¹の速度で、10⁴⁸ erg程度のエネルギーをもったMHDジェットが出た。

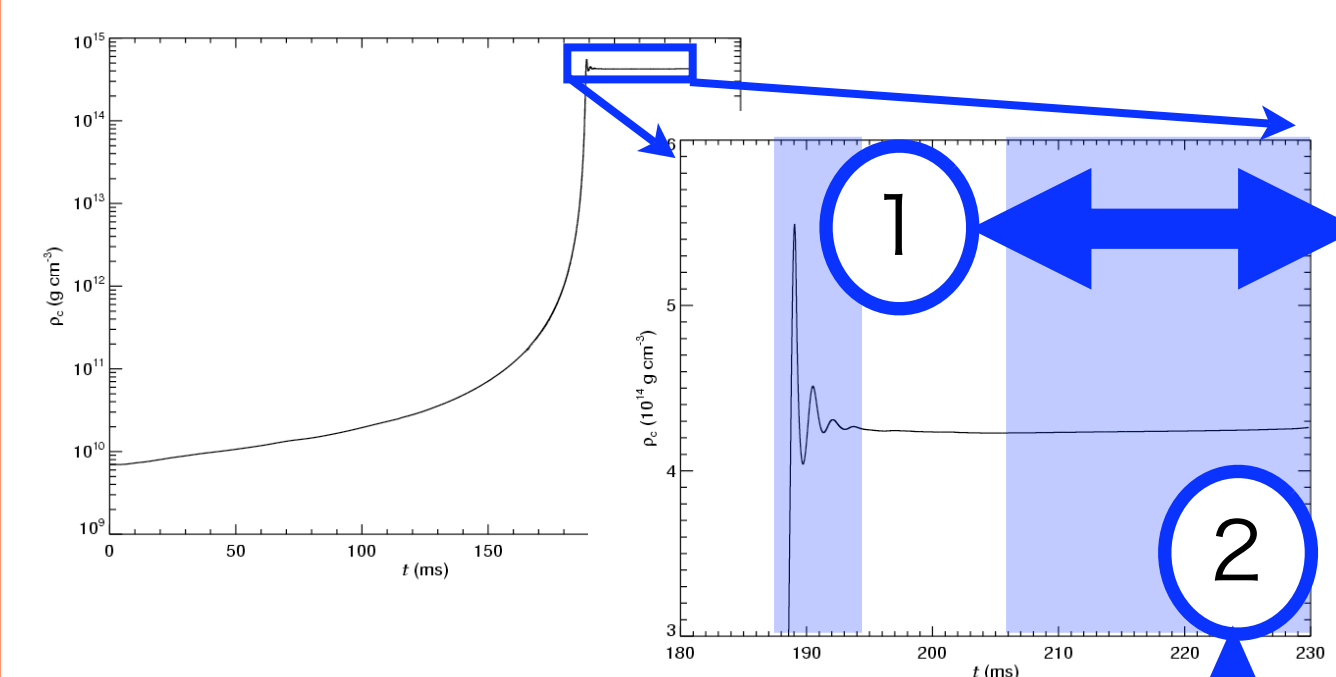


Fig.1: 中心密度の時間発展。横軸は計算開始からの時間、縦軸は密度を表している。

2. MHDジェット

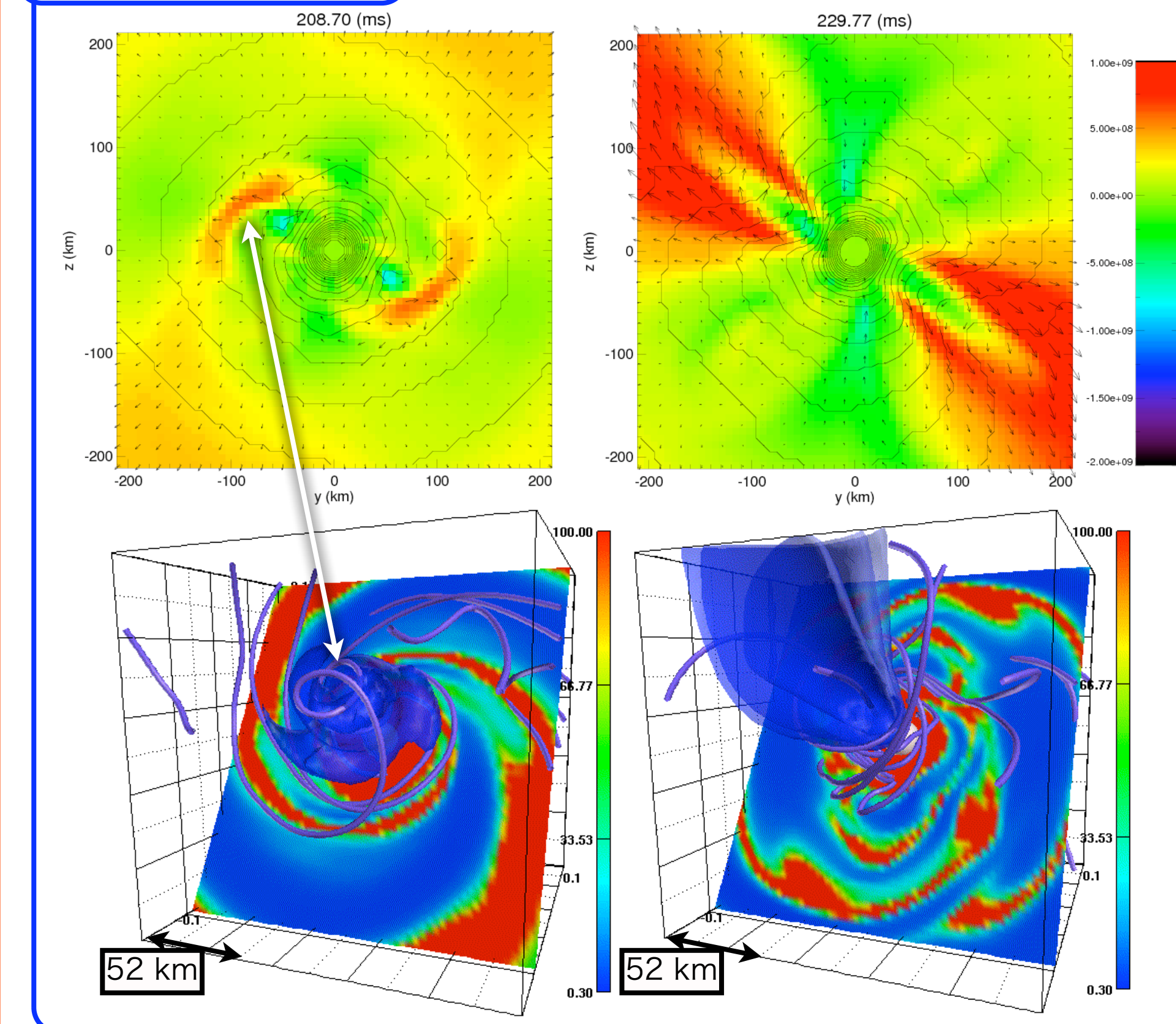


Fig.3: 左から順に計算開始から208.70, 229.77 ms後のジェット(上段)と低プラズマ圧力指数領域(下段)の分布。上段の等値色は速度、矢印は速度ベクトル、等値線は密度を表している。下段の断面は赤道面、紫色線は磁力線、等値色はプラズマ圧力指数、白色面は原始中性子星(>10¹⁴ g cm⁻³)を表している。また、等値面は低プラズマ圧力指数領域を表している。

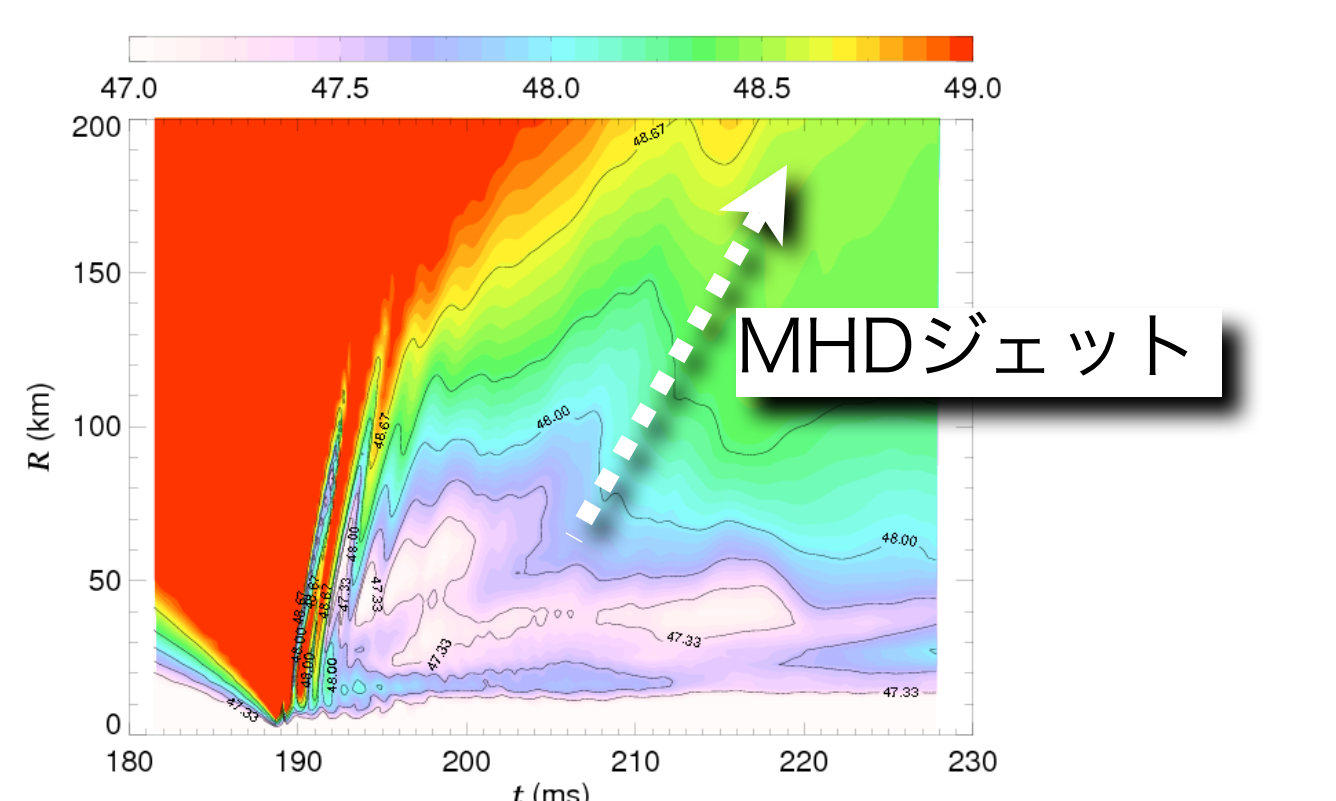


Fig.4: 動径方向の運動エネルギーの空間分布と時間発展。横軸は計算開始からの時間、縦軸は星の中心からの距離、等値線および等値色は角度方向に積分したエネルギーを表示している。エネルギーの算出は以下のように行った。

$$E_{v_r} = E_k - E_{\text{rot}} = \int 2\pi \rho v_r^2 r^3 d(\ln r)$$

磁気エネルギーの蓄積と放出

$a=636, 424, 212$ kmのモデルでは、それぞれ半径が60, 25, 12 kmの領域に磁気エネルギーがためられた。この磁気エネルギーは長く保たれたが、半径60 kmの上空にためられた磁気エネルギーだけがジェットへ変換され、どのモデルでもバウンスから17 ms後にジェットが放出された。 a が小さいモデルでは外層にためられる磁気エネルギーが少ないため、ジェットの速度はむしろ低くなった。

Fig.6: 原始中性子星の中心から200 km圏内における、アウトフローの最大速度の時間発展。モデルパラメータは $a=848$ (赤), 636 (黄), 424 (水色), 212 (青) kmである。

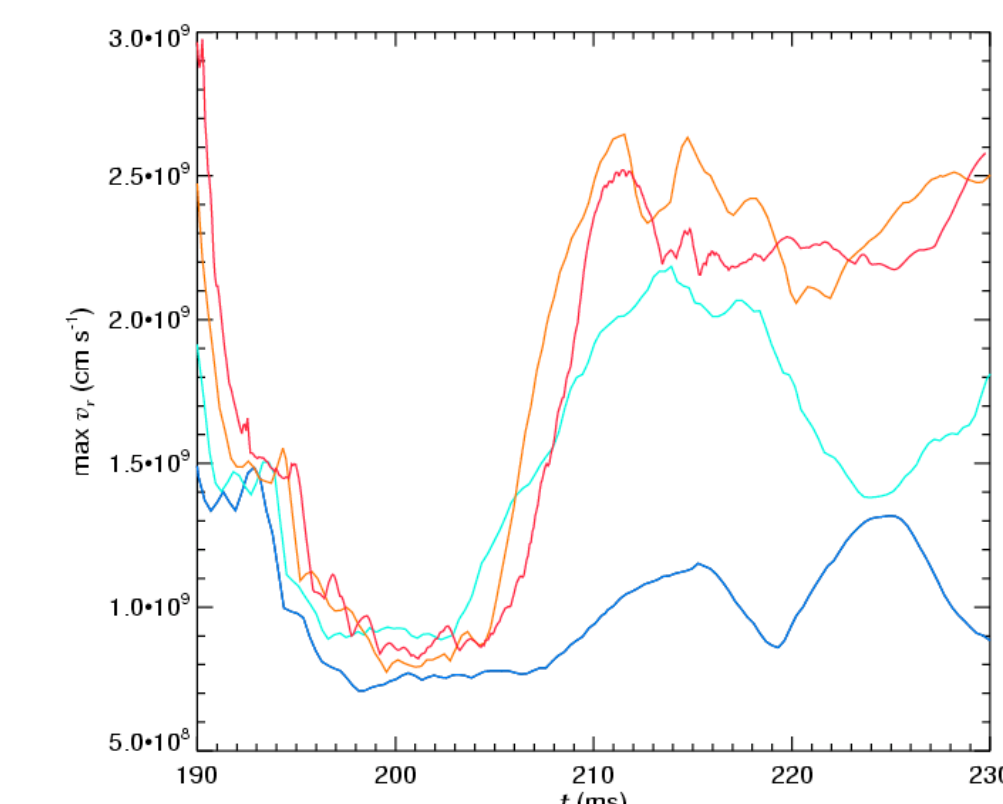
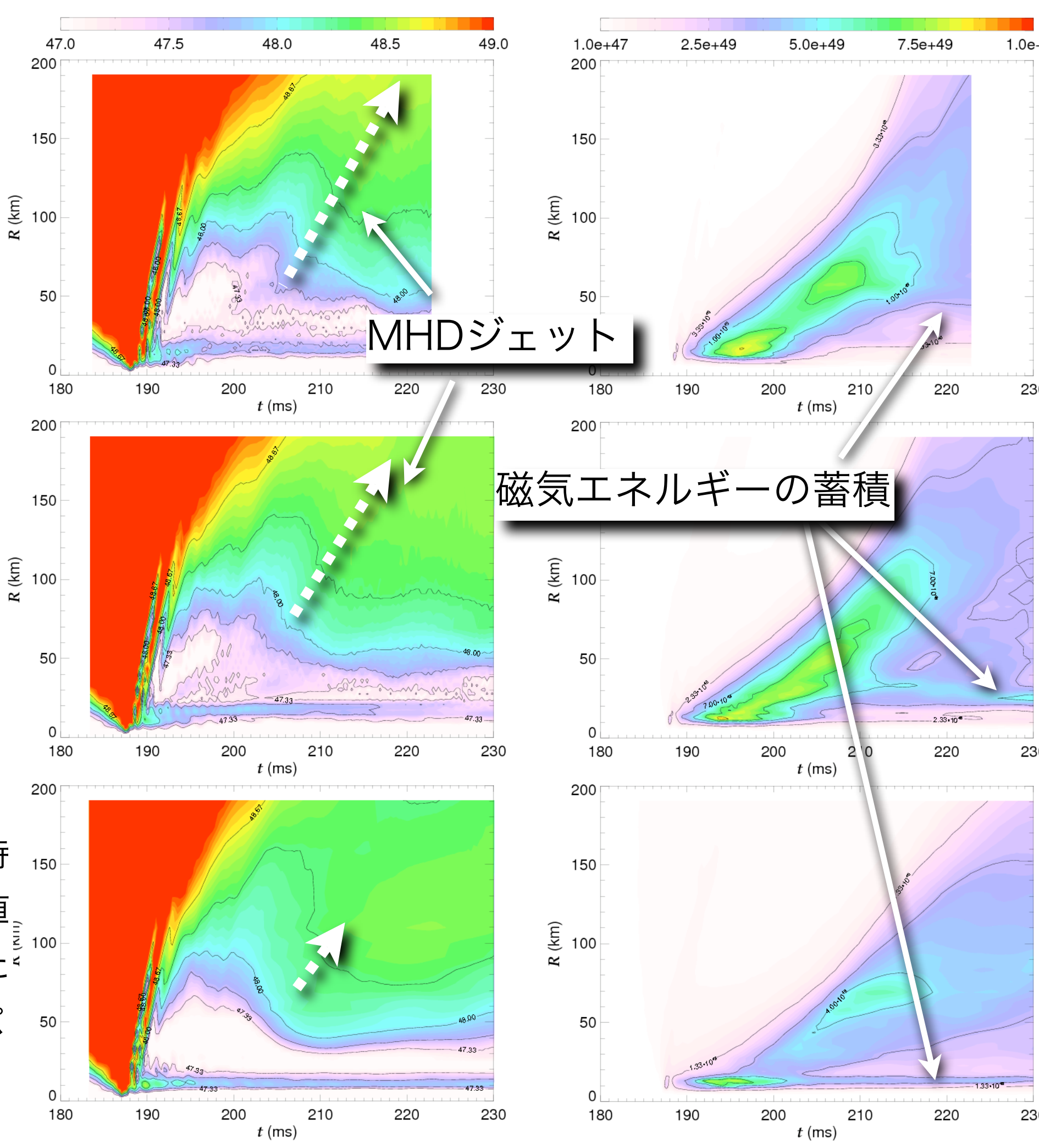


Fig.5: 磁気エネルギー(右列)と動径方向の運動エネルギー(左列)の空間分布と時間発展。横軸は計算開始からの時間、縦軸は星の中心からの距離、等値線および等値色は角度方向に積分したエネルギーを表示している。モデルパラメータは上から順に $a=636, 424, 212$ kmである。



結論

角速度分布の違いによらず、半径60 kmの上空でためられた磁気エネルギーはコアバウンス後17 msにジェットとして解放されることを確認した。また、初期に中心に近い領域で大きな角速度勾配がある場合、重力崩壊後に高密度領域で磁気エネルギーが長く保たれることを確認した。ジェットの速度は a の値が小さい程低くなった。これは上空では角速度勾配が少ないために磁気エネルギーがたくわえられなかったこと、内部でためられた磁気エネルギーが解放されにくいことによる。