

超新星における磁気回転不安定の シミュレーション

澤井秀朋

高度情報科学技術研究機構(RIST)

早稲田大学

共同研究者

山田章一 早稲田大学

西村信哉 キール大学

滝脇智也 理化学研究所

Sawai & Yamada 2015, in prep

Nishimura, Sawai, Takiwaki, Yamada 2015, in prep

平成26年度ユース・ミーティング 国立天文台

OUTLINE

1. Introduction
2. 昨年度までに行った関連する研究
3. 今年度の研究
 - 3.1 超新星におけるMRIのParametric Study
 - 3.2 MRIとr-process元素合成
4. まとめと今後の課題

OUTLINE

1. Introduction

- 2. 昨年度までに行った関連する研究
- 3. 今年度の研究
 - 3.1 超新星におけるMRIのParametric Study
 - 3.2 MRIとr-process元素合成
- 4. まとめと今後の課題

磁気駆動超新星爆発

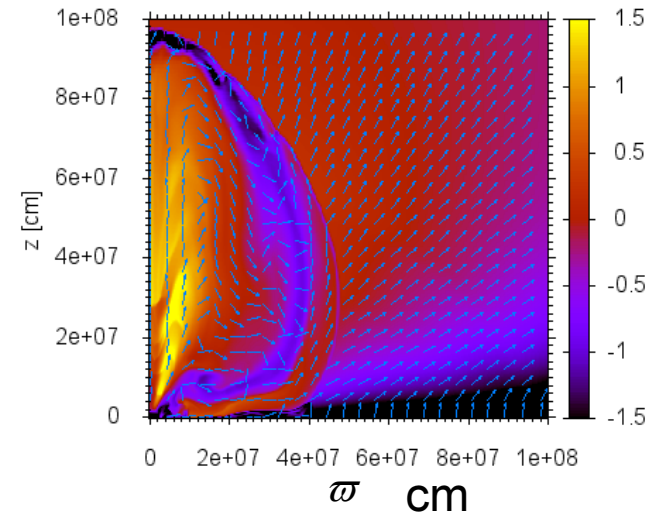
強磁場と高速回転を伴う重力崩壊型超新星

- 数値計算で超新星爆発が成功する例として過去10年間よく研究されてきた.
- マグネター級磁場が必要.

どうやってマグネター級磁場を得るか？

- ✓ 親星がマグネター級磁束を持つ
 - OB型星の観測 (Wade+14 for review)
 - 過去の多くの研究はこれを仮定.
- ✓ 親星の磁場は弱い但重力崩壊後に増幅される.
 - 対流, SASI, 磁気回転不安定
 - 十分に調べられていない.

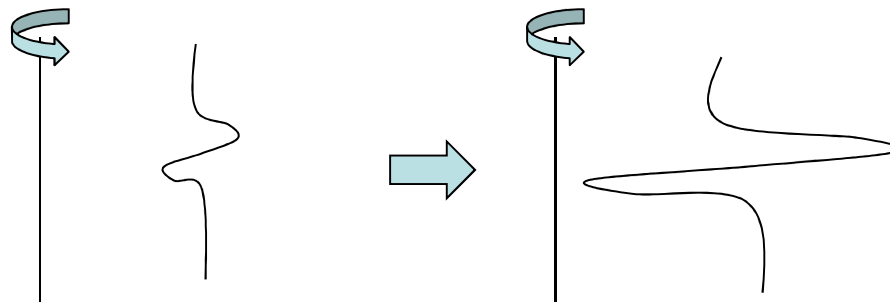
B-field direction & Pm/P



Sawai+ 13

磁気回転不安定 (MRI) Balbus & Hawley 91, 95

磁場・差動回転を伴うシステムで起こる不安定.



重力崩壊型超新星での研究例

- Akiyama+03 Semi-analytic, MRIの重要性を指摘
- Masada+06,07 線形解析 (非軸対称モード, ニュートリノ粘性)
- Shibata+06 強磁場 2D simulations
- Cerda-Duran+07 2D passive MHD simulations
- Obergaulinger+09 弱磁場 3D ローカル・シミュレーション
- Masada+12 弱磁場 3D ローカル・シミュレーション
- Sawai+13, 14 弱磁場 2D グローバル・シミュレーション
- Masada+15 弱磁場 3D セミ・グローバル・シミュレーション

親星の回転

✓ 星の進化計算

15 Msun, Z_{sun} , $v_{\text{rot,ZAMS}} = 200 \text{ km/s} \rightarrow P_{\text{NS}} = 11 \text{ ms}$ (Heger+05)

16 Msun, Z_{sun} , $v_{\text{rot,ZAMS}} = 360 \text{ km/s} \rightarrow P_{\text{NS}} = 2.3 - 9.7 \text{ ms}$
(Woosley&Heger+06)

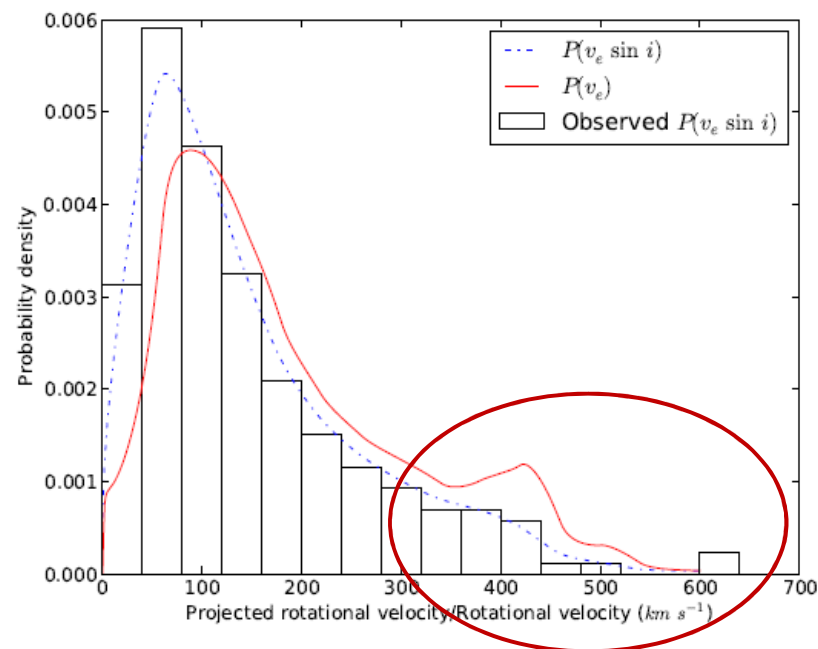
✓ 216個の O型星の可視光観測 (Ramirez-Agudelo+13)

約 **20%** が **300 km/s** 以上の表面速度を持つ.

→ 高速回転する星が稀ではないことを示唆.

今回は弱磁場, 高速回転星を扱う

磁場増幅, ダイナミクス,
r-process元素合成に注目.



OUTLINE

1. Introduction

2. 昨年度までに行った関連する研究

3. 今年度の研究

3.1 超新星におけるMRIのParametric Study

3.2 MRIとr-process元素合成

4. まとめと今後の課題

計算手法

◆超新星におけるMRIのシミュレーションには空間高解像度が必要.

$$\lambda_{MRI} \sim \sqrt{\frac{\pi}{\rho}} \frac{B}{\Omega} \sim 500 \text{ m} \times \left(\frac{\rho}{10^{11} \text{ g/cm}^3} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{B}{10^{13} \text{ G}} \right) \left(\frac{\Omega}{10^3 \text{ rad/s}} \right)^{-1} \Rightarrow \Delta r \sim 50 \text{ m} \ll 1000 \text{ km (iron core)}$$

◆計算領域: 鉄コアの一部

$$10\text{-}50 < (r / \text{km}) < 500 \text{ (MRI runs)}$$

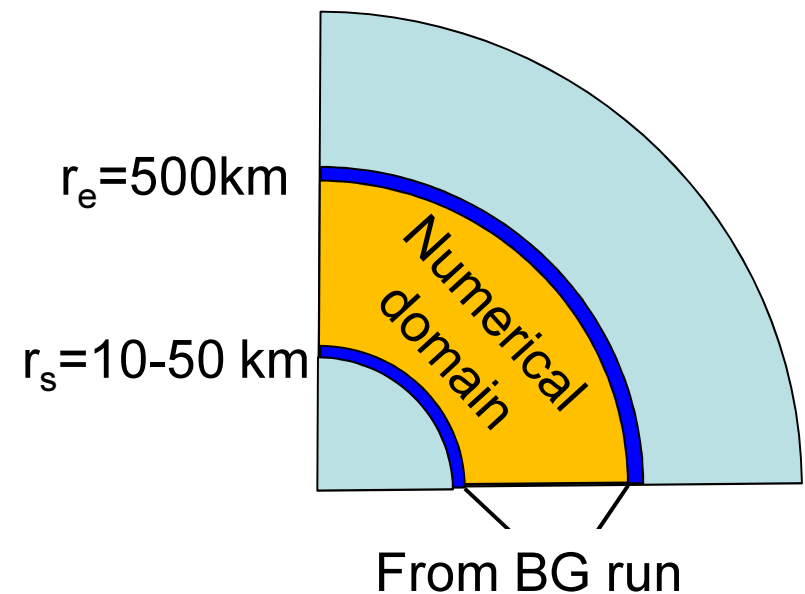
軸対称, 赤道面对称を仮定.

◆手順

✓ 半径4000kmの広い領域の重力崩壊を粗い空間解像度でバウンス後数100ms追う.
(BackGround runs)

✓ バウンス後6 ms のBG run のデータをMRI runs の計算領域にマッピング.

✓ BG runデータは時々刻々MRI runsの境界条件にも用いる.

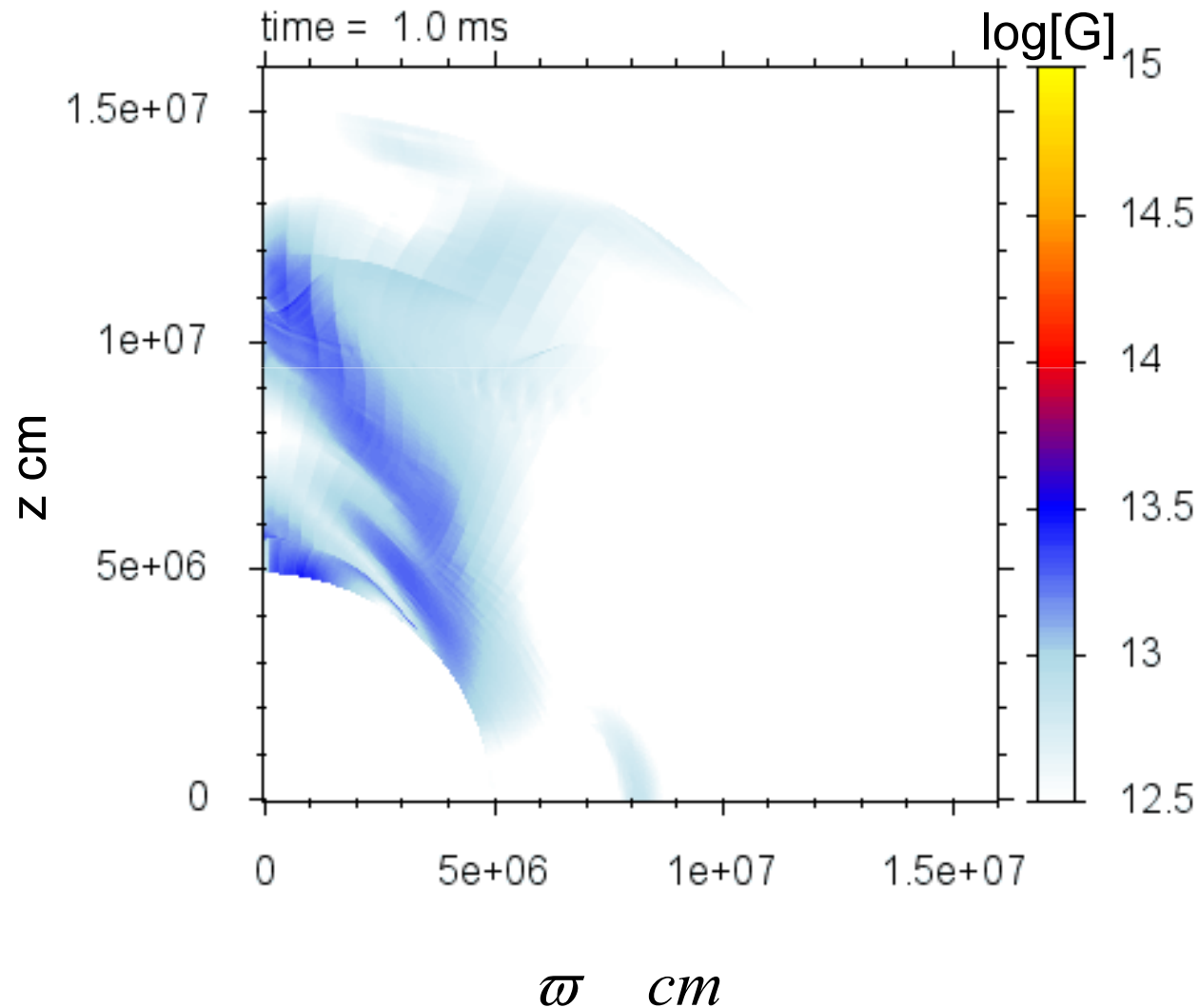


超新星におけるMRIの2Dグローバルシミュレーション

Sawai+13

ポロイダル磁場強度分布

$\Delta r_{\min} = 25 \text{ m}$

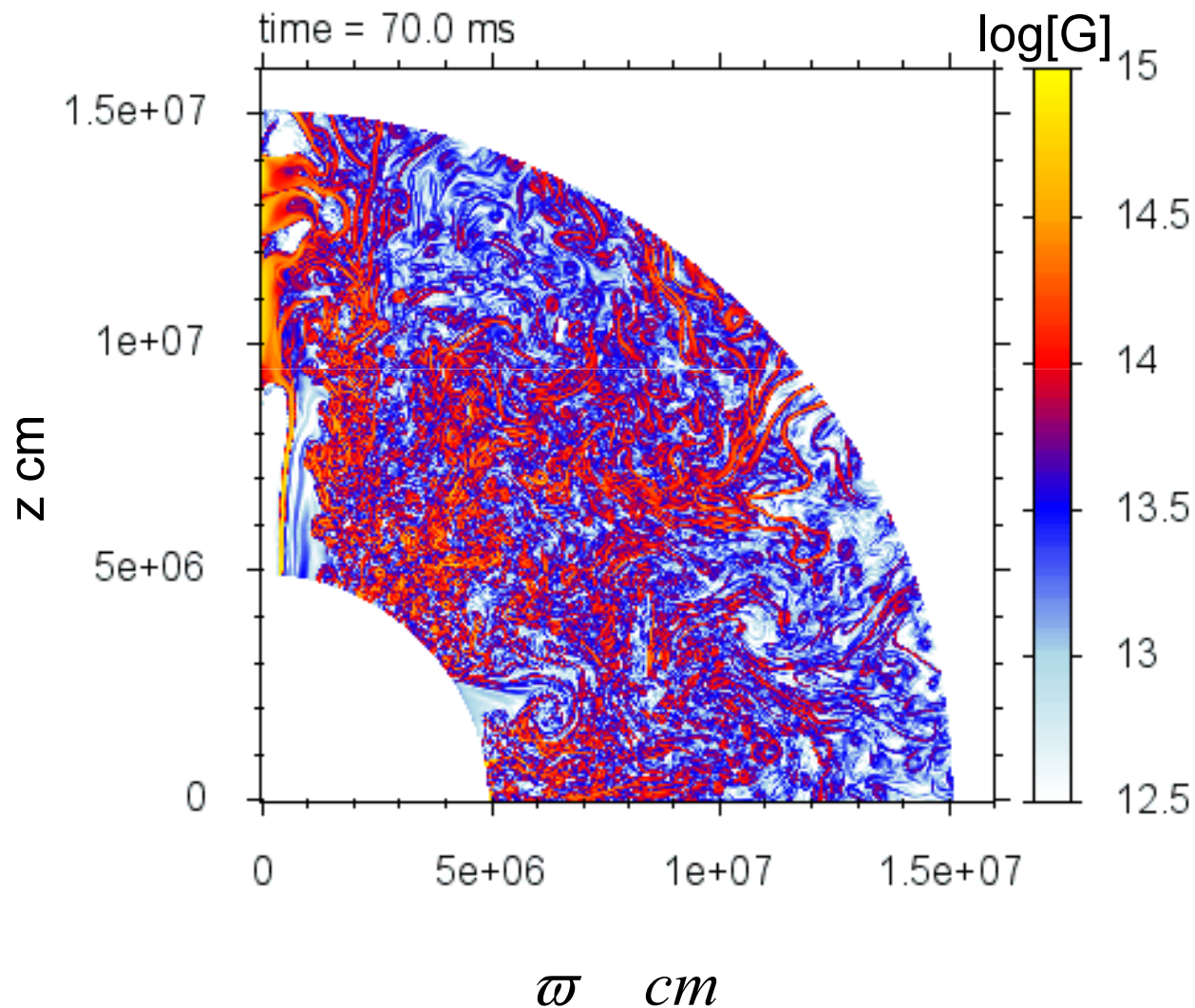


超新星におけるMRIの2Dグローバルシミュレーション

Sawai+13

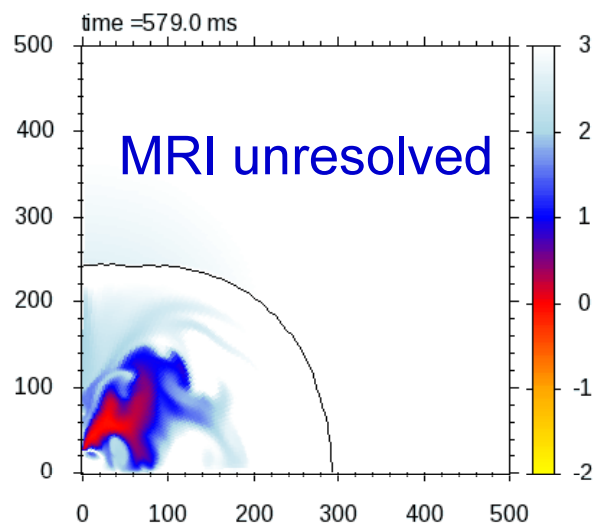
ポロイダル磁場強度分布

$$\Delta r_{\min} = 25 \text{ m}$$



MRIに助けられるニュートリノ加熱爆発 Sawai+14

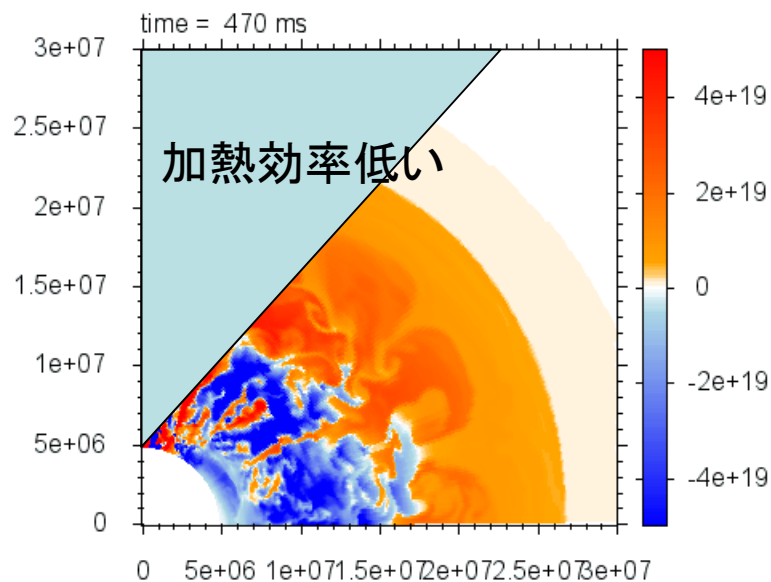
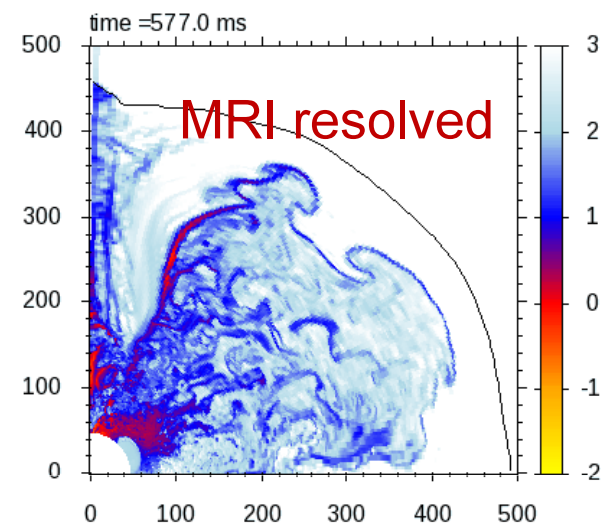
最低解像度 $\Delta_{\min} = 100 \text{ m}$



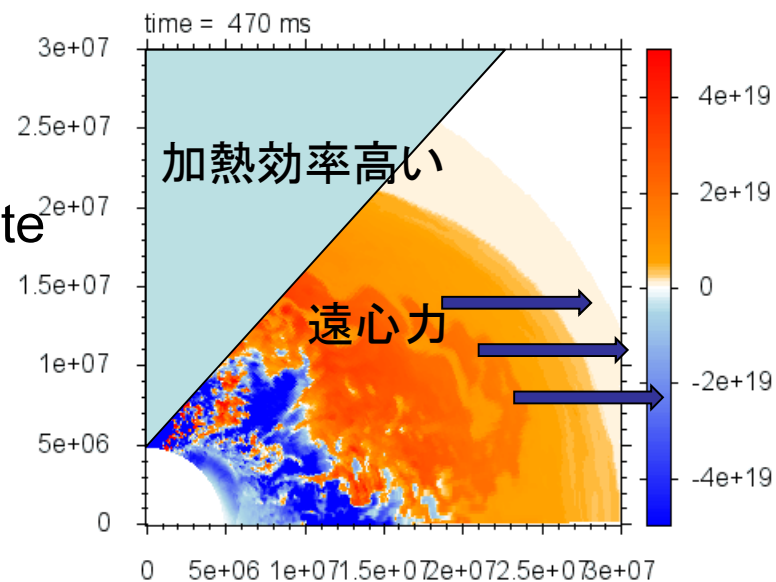
$$B_{c,in} = 5.0 \times 10^{10} \text{ G}$$

Plasma beta
 $\text{Log}[p/p_B]$

最高解像度 $\Delta_{\min} = 25 \text{ m}$



Net heating rate
[erg/g.s]



OUTLINE

1. Introduction
2. 昨年度までに行った関連する研究
- 3. 今年度の研究**
 - 3.1 超新星におけるMRIのParametric Study**
 - 3.2 MRIとr-process元素合成
4. まとめと今後の課題

✓ 解く方程式: 理想磁気流体方程式 (2次元軸対称)

✓ ニュートリノ: Cooling function + Light bulb ($L_{\nu_e} = 1 \times 10^{52}$ erg/s)

✓ 親星: 15 Msun (Woosley '95)

✓ 磁場: Dipole-like, 弱磁場

$$B_{c,in} = 5.0 \times 10^{10} \text{ -- } 2.0 \times 10^{11} \text{ G} \rightarrow B_{PNS} \sim 10^{13} \text{ -- } 10^{14} \text{ G}$$

✓ 回転: 高速, 差動回転

$$(T/W)_{in} = 0.25 \% (\Omega_{in} = 2.7 \text{ rad/s})$$

✓ MRI runsは4種類の解像度で行う.

Number of grids

$$\Delta r_{min} = 12.5 \text{ m } (9250 \times 6400)$$

$$\Delta r_{min} = 25 \text{ m } (4700 \times 3200)$$

$$\Delta r_{min} = 50 \text{ m } (2500 \times 1600)$$

$$\Delta r_{min} = 100 \text{ m } (1200 \times 800)$$

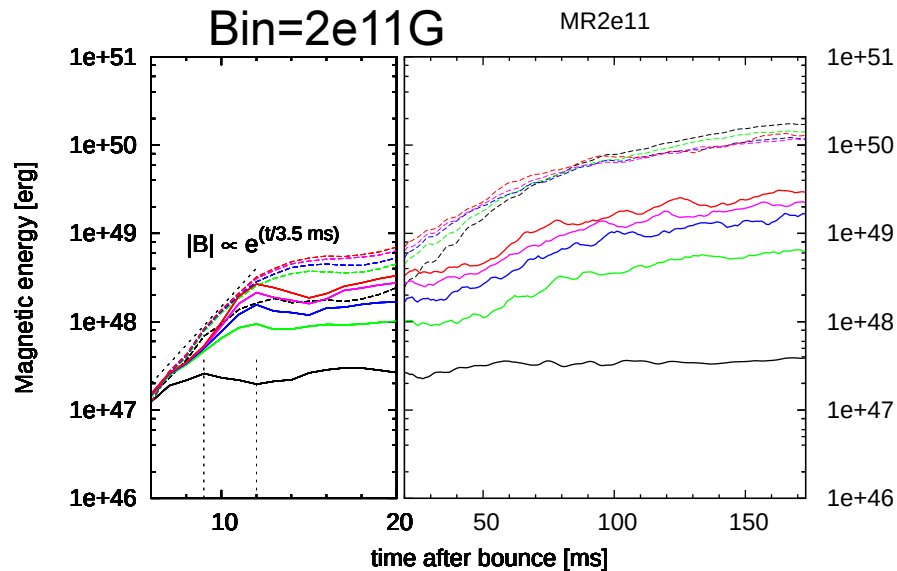
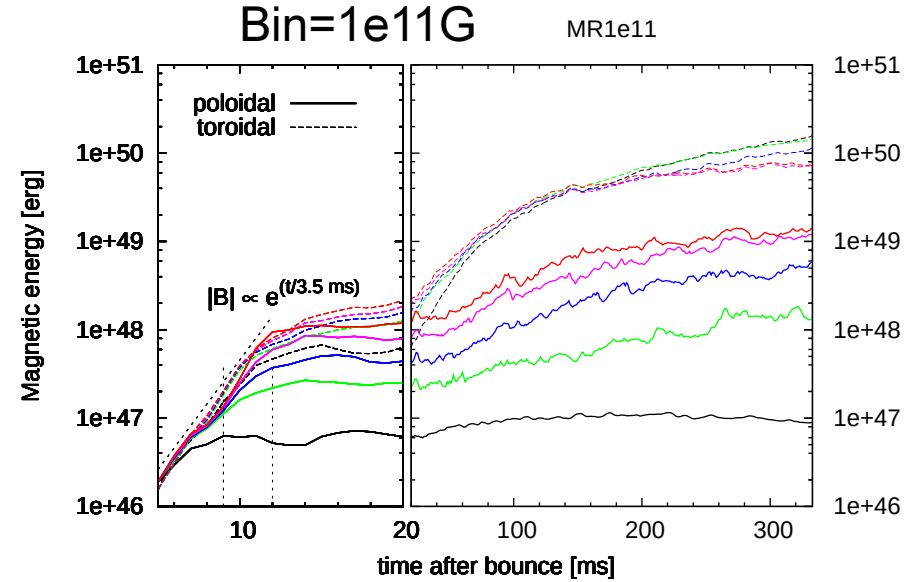
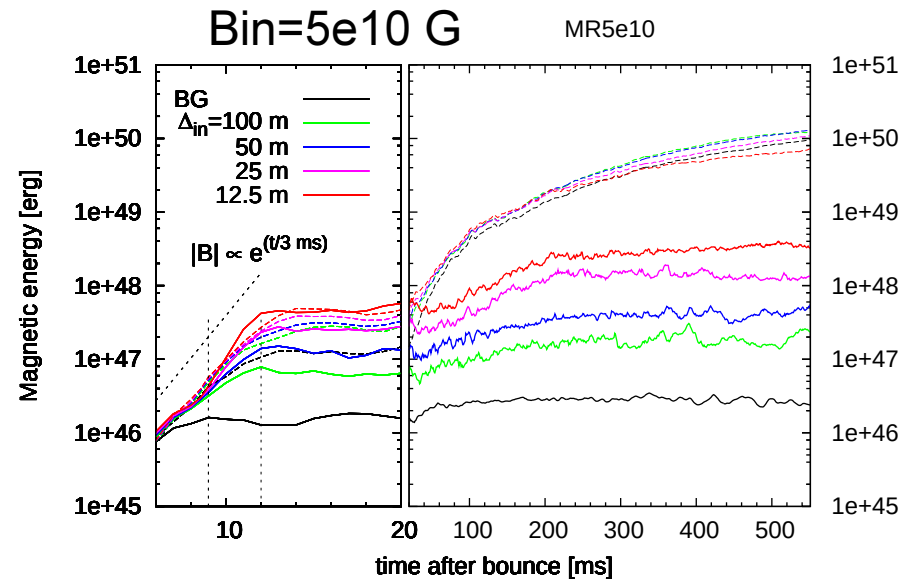
差動回転

$$\Omega = \Omega_0 \frac{r_0^2}{r_0^2 + r^2}$$

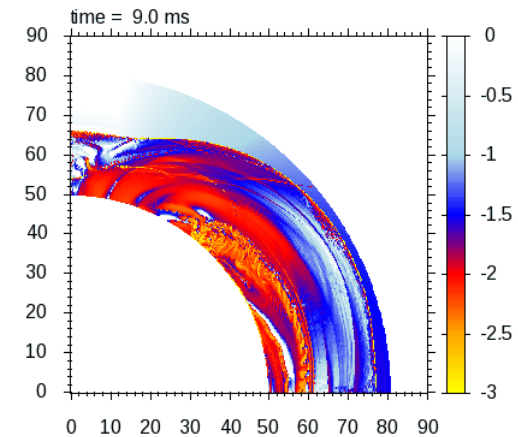
$$r_0 = 1000 \text{ km}$$

計算はXC30(国立天文台),
SR16000(京大基研)で実行.

磁場の時間発展



線形解析によるFGMの
成長タイムスケール



軸対称MRIの線形解析 ～2つの不安定モード～

安定条件: $C \equiv (G_z B_z \tan^2 \theta_k - 2G_z B_{\varpi} \tan \theta_k + G_{\varpi} B_{\varpi} + R_{\varpi})/\Omega^2 > 0$

ただし、 $G \equiv \frac{\nabla p}{\rho}$

$B \equiv \frac{\nabla \rho}{\rho} - \frac{\nabla P}{\Gamma_1 P}$

$R \equiv \varpi \nabla \Omega^2$

θ_k : 摂動の波が進む
方向とz軸のなす角

Balbus & Hawley 95,
Oberbaulinger+09

$-8 < C < 0$: **Alfven mode**

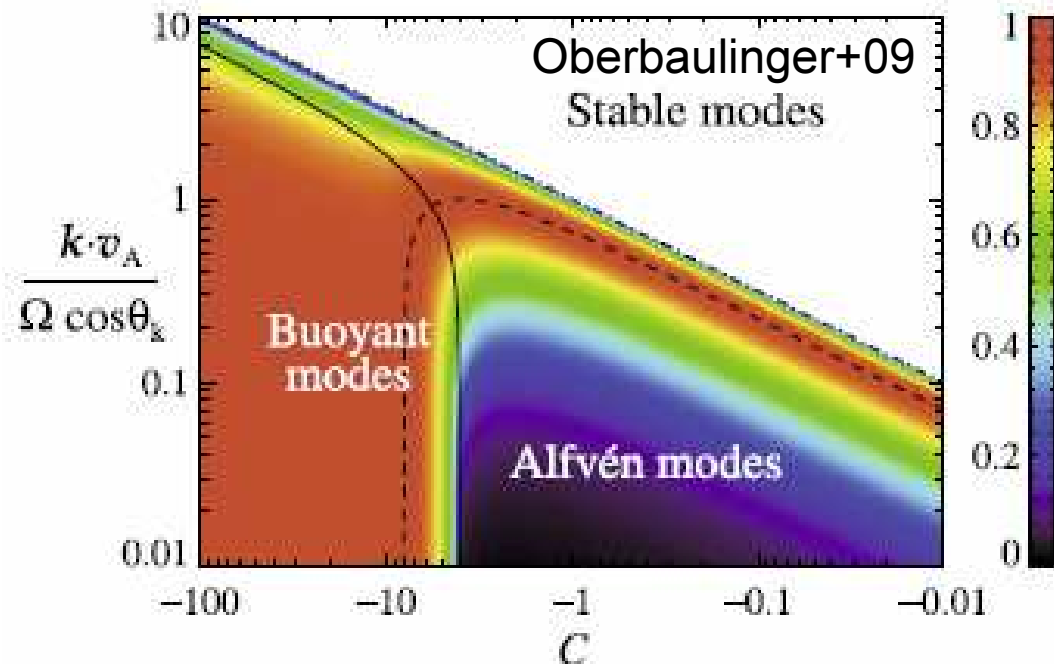
FGMの波長は種磁場の強さに比例.

$$\omega_{FGM} = \cos \theta_k \frac{\sqrt{-C^2}}{4}$$

$C < -8$: **Buoyant mode**

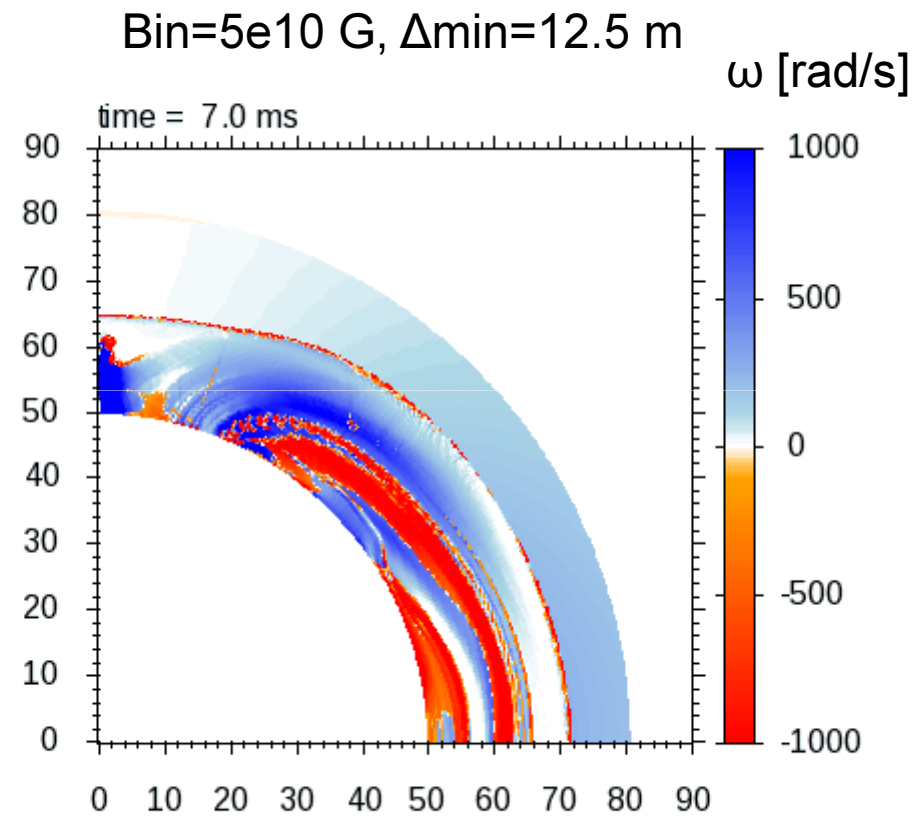
FGMの波長が種磁場の強さに
よらない.

$$\omega_{FGM} = \cos \theta_k \sqrt{C + 4}$$



卓越するモードの分布

色が濃いほど
成長率大



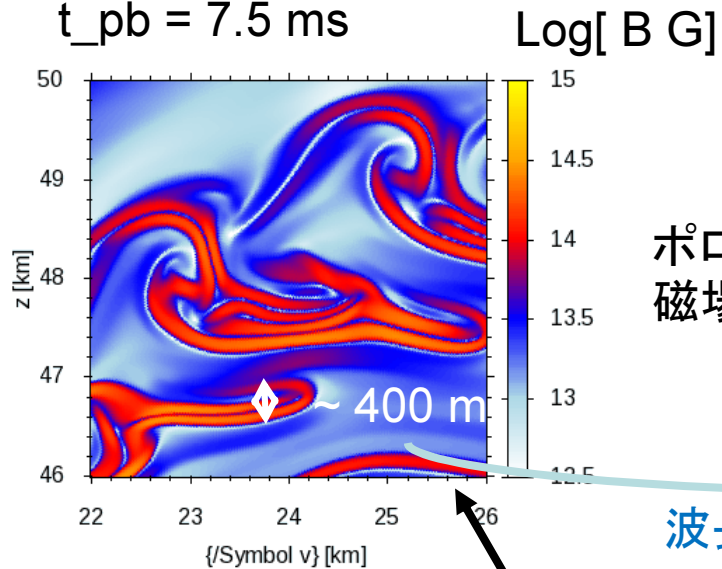
赤: Buoyant mode

青: Alfven mode

Alfven mode

Bin=5e10 G, $\Delta_{\min}=12.5$ m

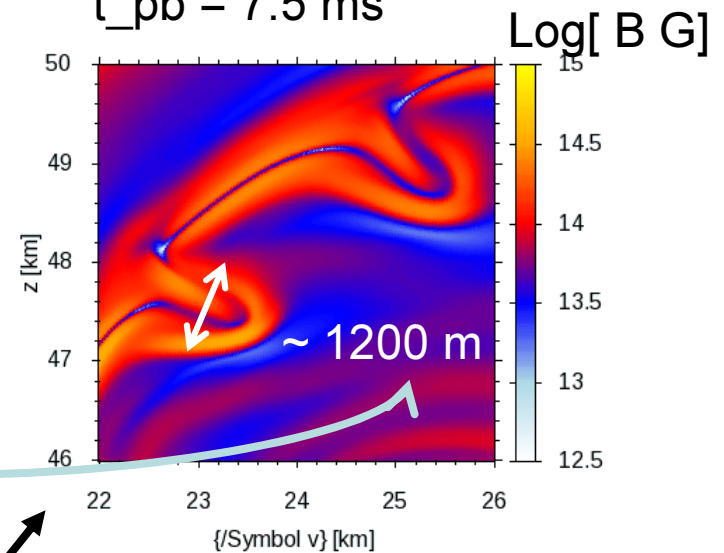
t_pb = 7.5 ms



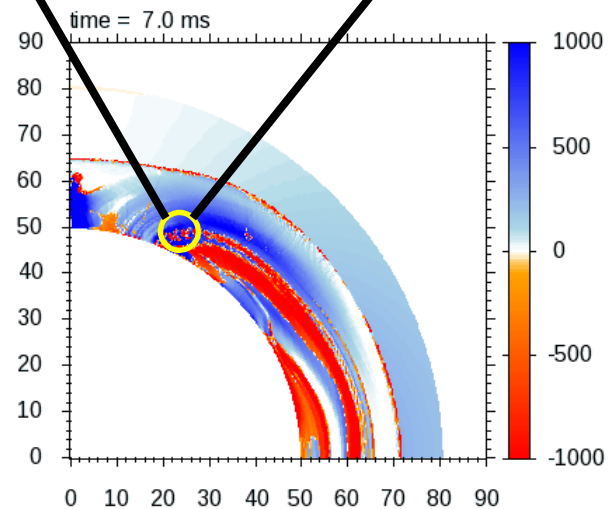
ポロイダル
磁場の強度

Bin=2e11 G, $\Delta_{\min}=12.5$ m

t_pb = 7.5 ms



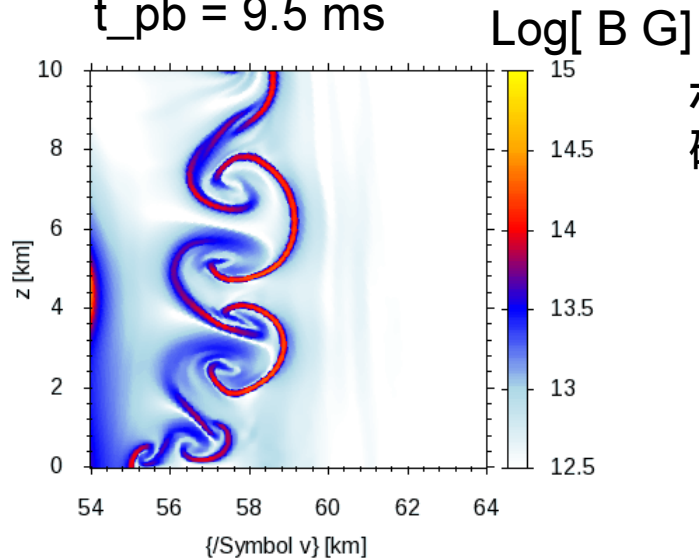
波長約3倍



Buoyant mode

Bin=5e10 G, $\Delta_{\min}=12.5$ m

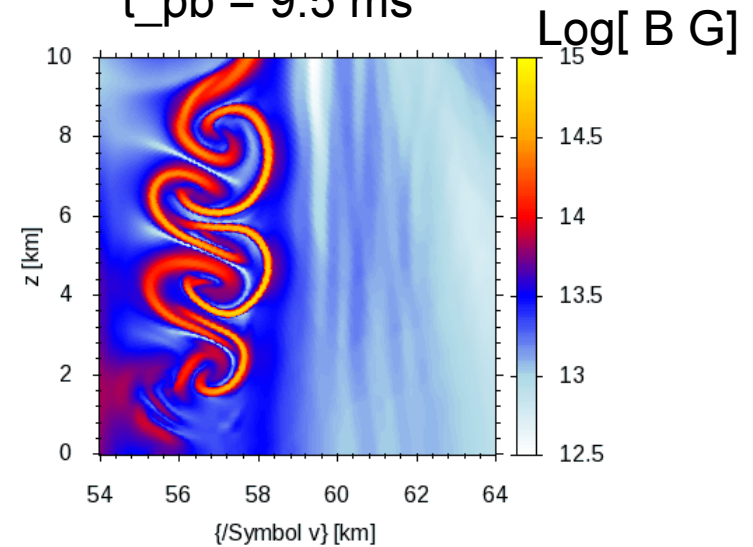
t_pb = 9.5 ms



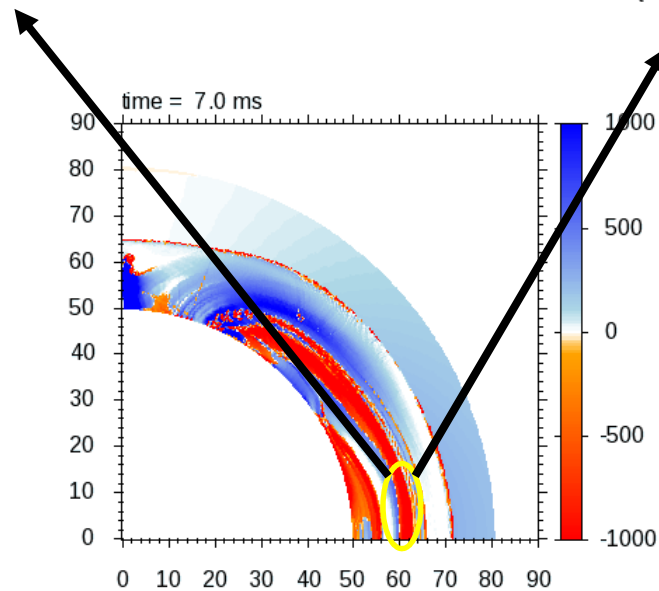
ポロイダル
磁場の強度

Bin=2e11 G, $\Delta_{\min}=12.5$ m

t_pb = 9.5 ms



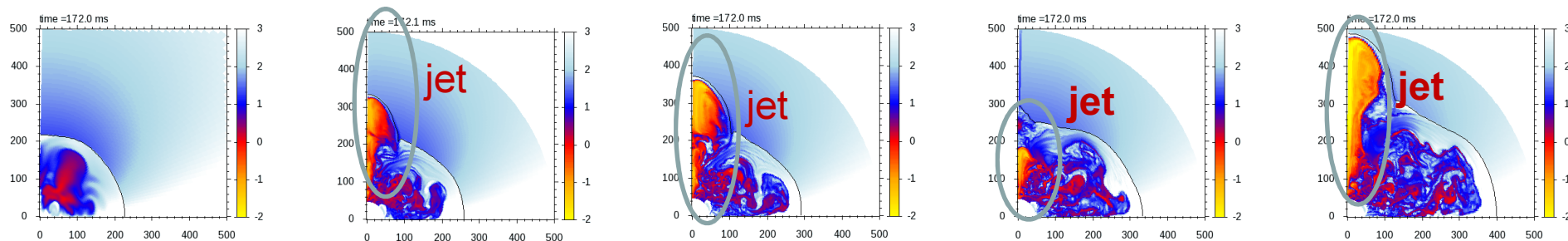
種磁場の強さが変わっても
不安定波長は一定



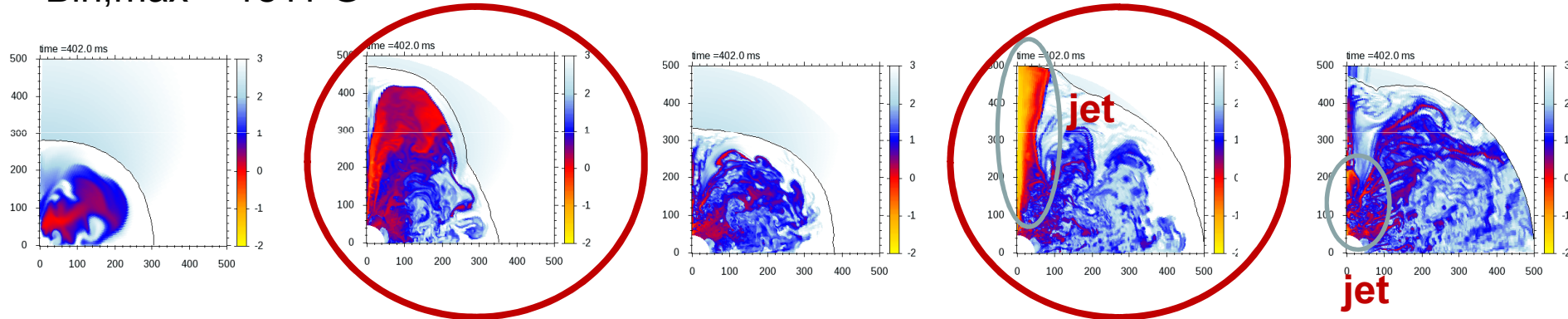
ダイナミクス プラズマ β

Bin,max = 2e11 G

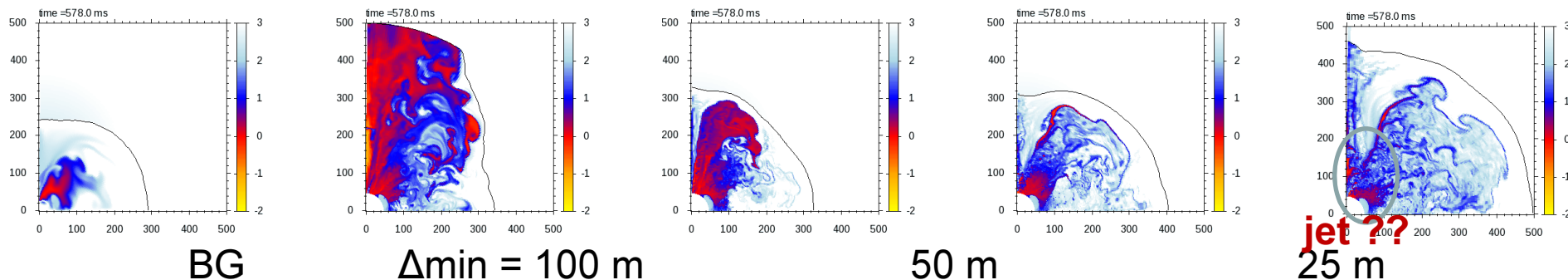
解像度が高いほど赤道での衝撃波
半径大&ジェットが形成されやすい。



Bin,max = 1e11 G



Bin,max = 5e10 G



BG
12.5 m

$\Delta_{\min} = 100$ m

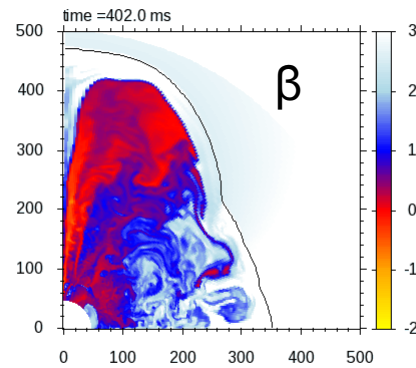
50 m

25 m

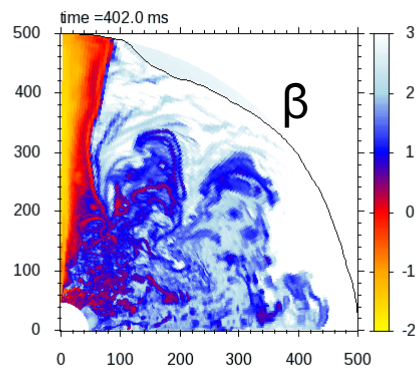
解像度

Bin,max = 1e11 G

$\Delta_{\min} = 100 \text{ m}$

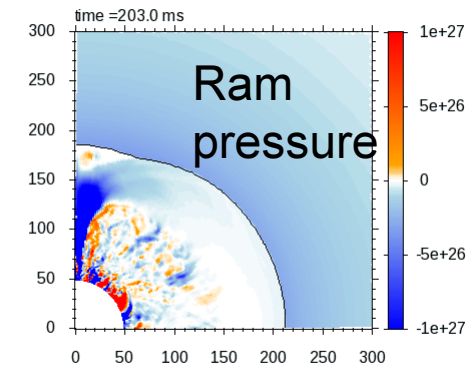
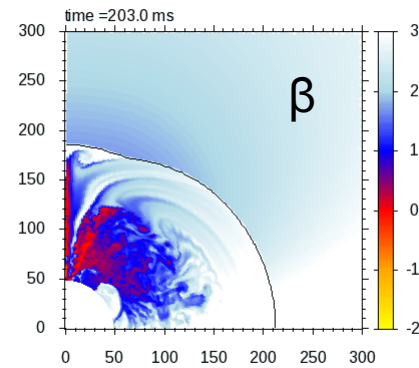


$\Delta_{\min} = 25 \text{ m}$

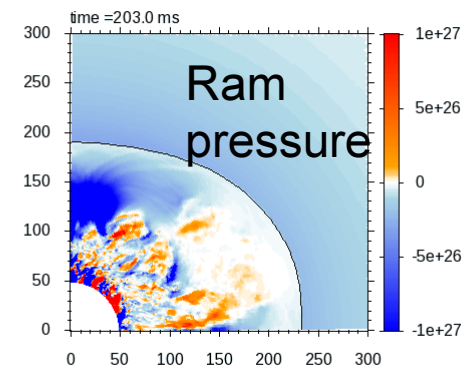
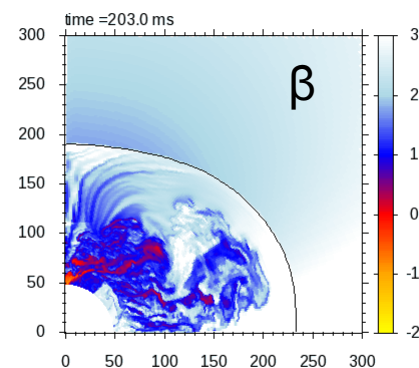


2つのモデルの比較

下のモデルでジェットが打ちあがる直前の時刻



↑むしろこちらの方が
磁気圧が効いている.



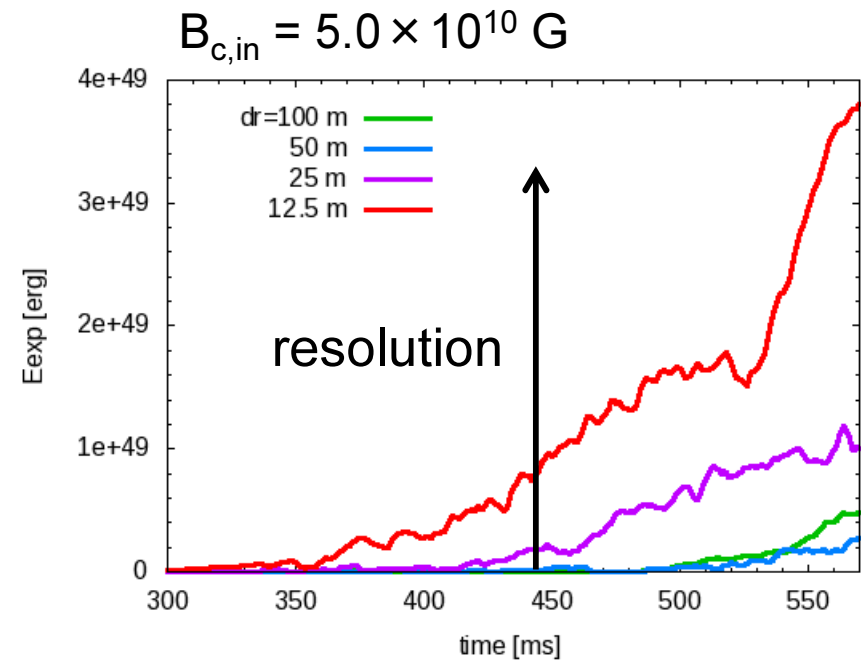
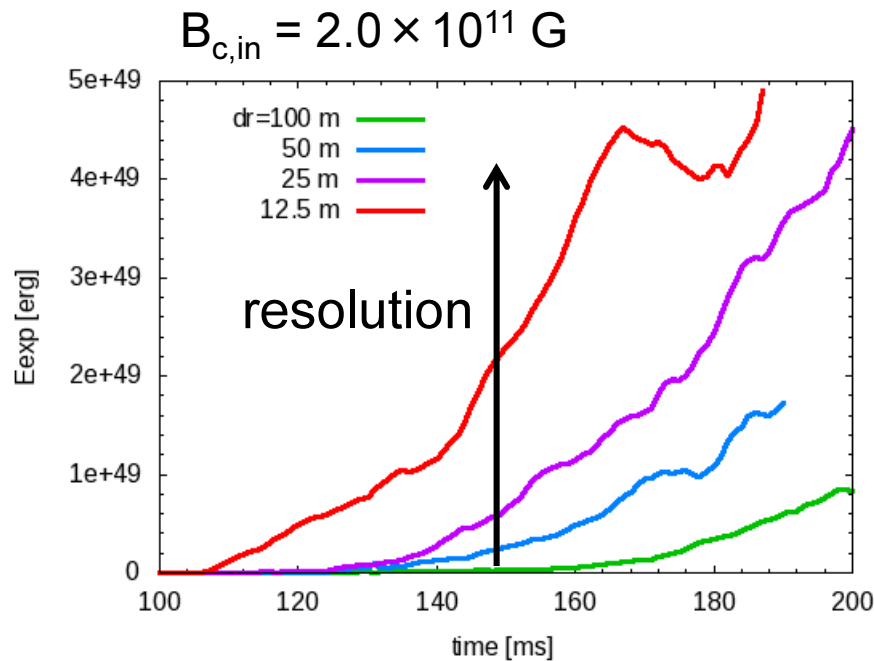
乱流によるかきまぜが軸付近の
質量降着のラム圧を下げる

◆Diagnostic爆発エネルギーの時間進化

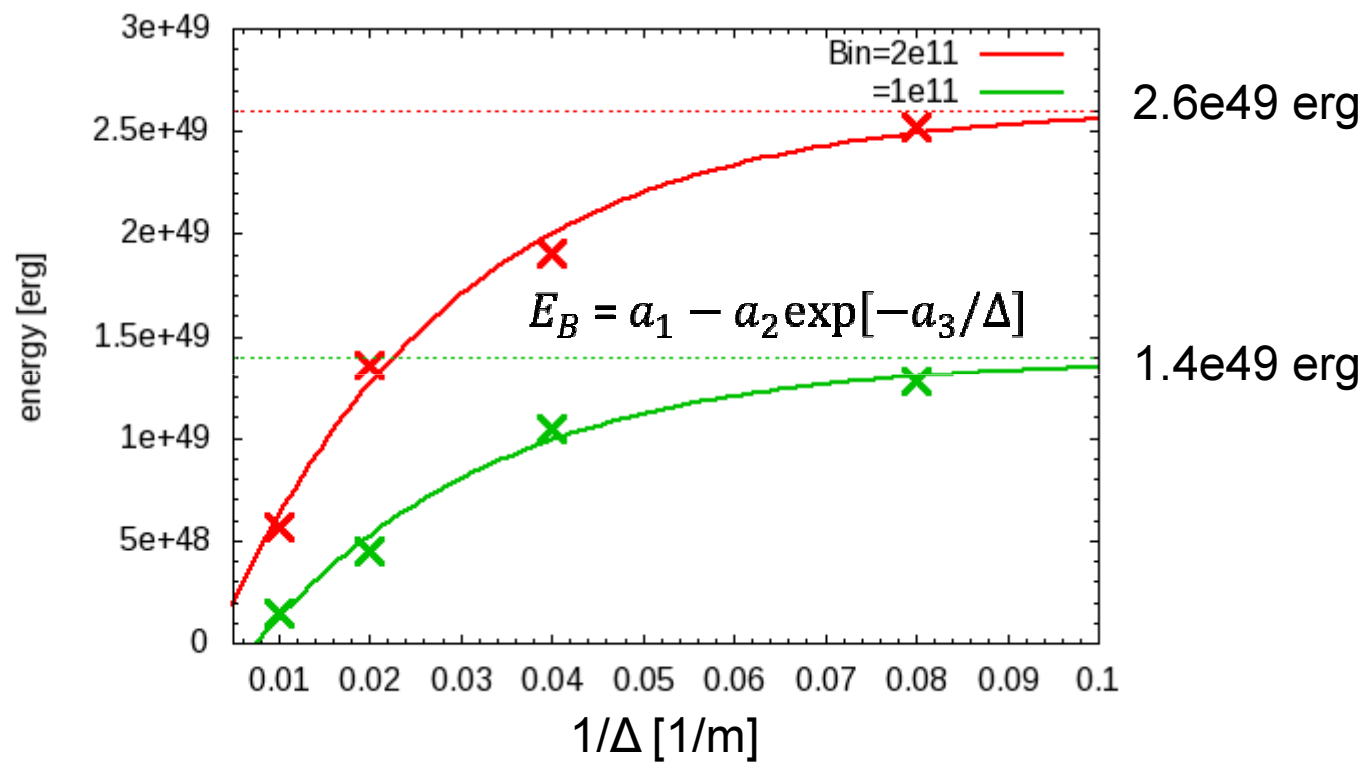
高解像度 $\Rightarrow$ 爆発エネルギー大 explosion energy.

(爆発エネルギーが $< 10^{51}$ ergなのはLnuを小さく設定しているため.)

解像度による収束はまだ見られない.



Saturation of magnetic energy of poloidal B field



解像度

OUTLINE

1. Introduction
2. 昨年度までに行った関連する研究
- 3. 今年度の研究**
 - 3.1 超新星におけるMRIのParametric Study
 - 3.2 MRIとr-process元素合成**
4. まとめと今後の課題

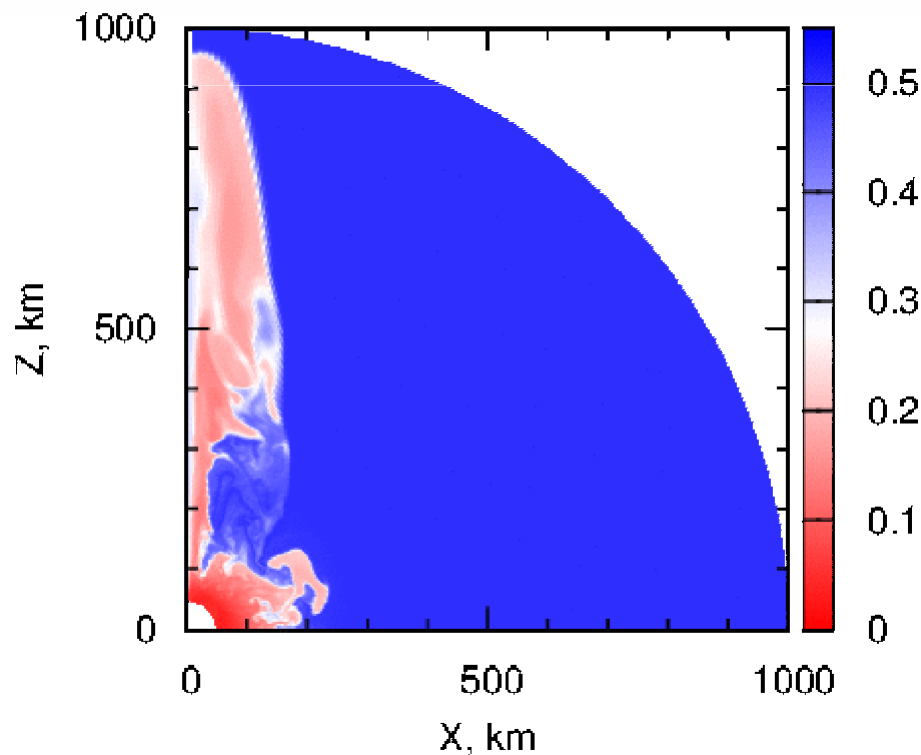
4. MRIとr-process元素合成

MRI-ニュートリノ加熱爆発の数値計算結果をもとに
ポストプロセスでr-process元素合成を計算

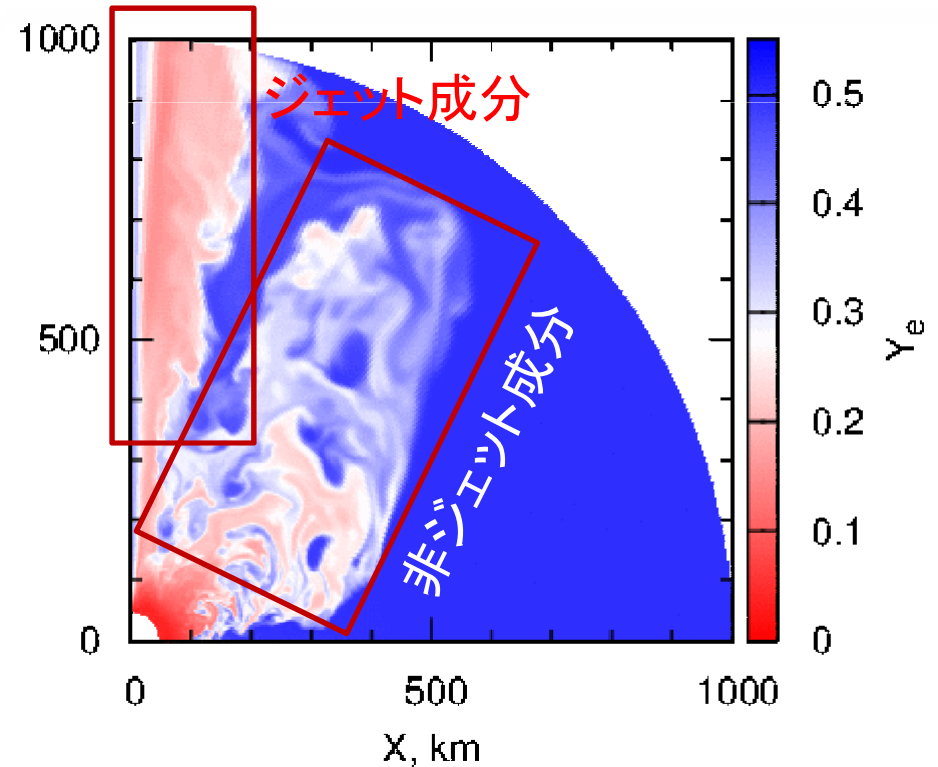
$$B_{c,in} = 2.0 \times 10^{11} \text{ G}$$

Ye分布

バウンス後185 ms

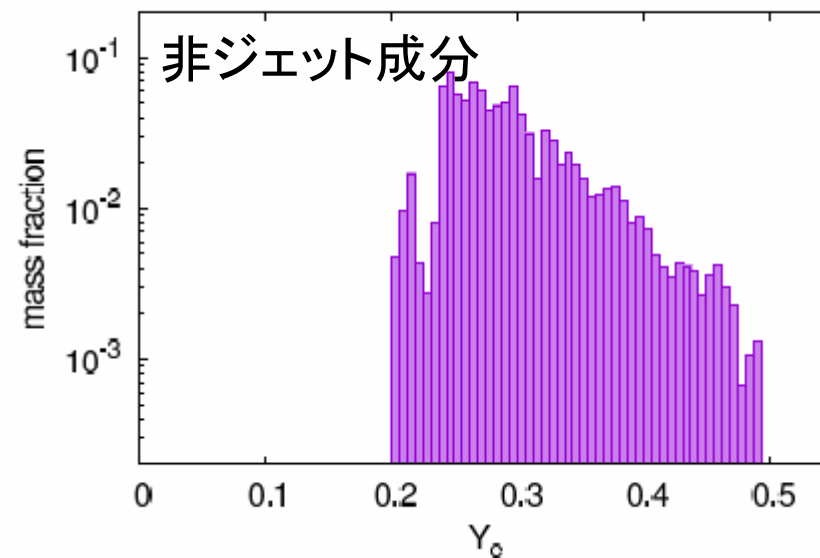
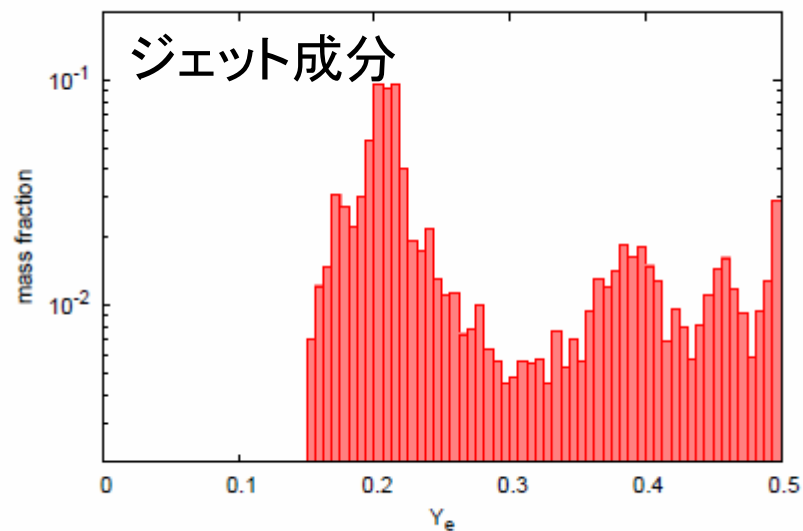


バウンス後285 ms



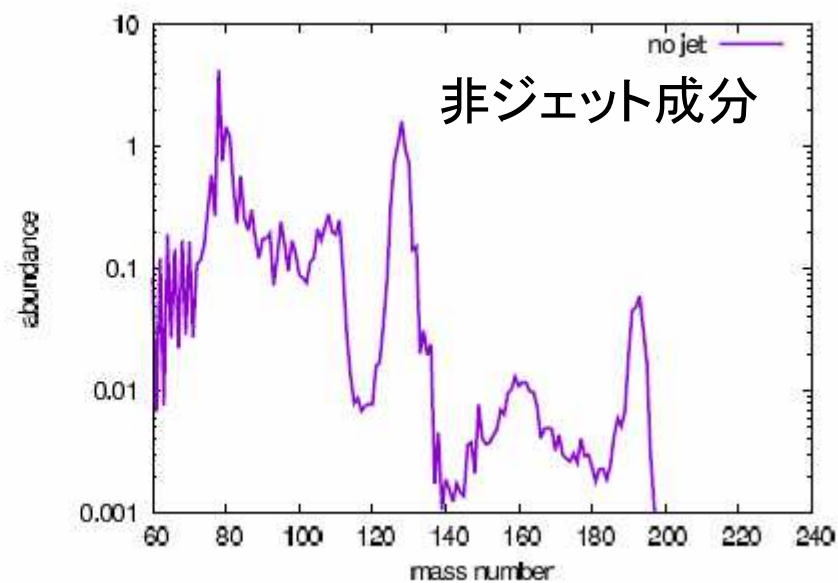
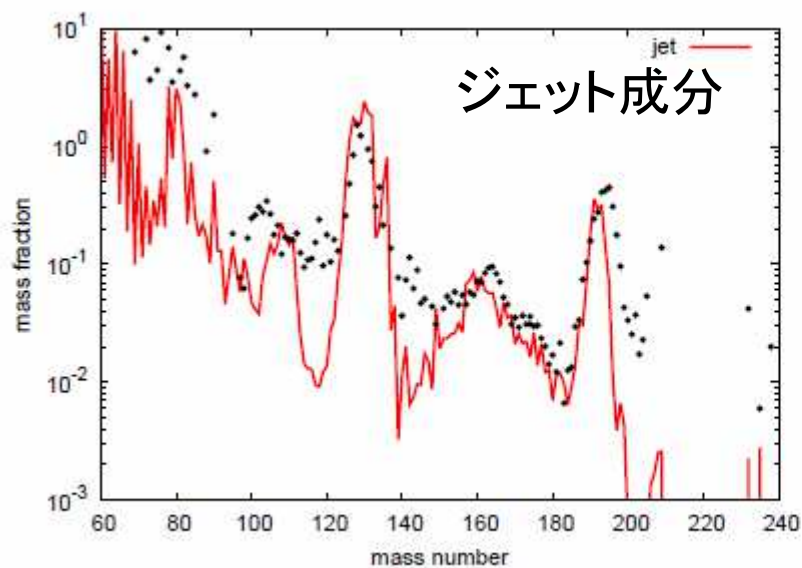
Yeのヒストグラム

Ejectaに低Ye成分



組成分布

ジェットでは3rd peak, 非ジェットでは2nd peak



OUTLINE

1. Introduction
2. 昨年度までに行った関連する研究
3. 今年度の研究
 - 3.1 超新星におけるMRIのParametric Study
 - 3.2 MRIとr-process元素合成
- 4. まとめと今後の課題**

弱磁場・高速回転を伴う重力崩壊の2次元軸対称理想磁気流体シミュレーションを行った.

- ✓ MRIによる磁場増幅が確認された.
 - MRIを捉えるために十分な解像度.
 - 指数関数的増幅の時間スケールは線形解析のものと大まかに一致.
 - Alfvén modeとBuoyant modeの両方を確認.
- ✓ MRIによる爆発の促進が確認された.
 - MRIが良く捉えられているモデルほど爆発エネルギー大.
 - MRIがニュートリノ加熱を助けるため.
 - MRIが良く捉えられているモデルではジェット形成.
 - 乱流によるかきまぜが軸付近の質量降着を弱めるため.
- ✓ MRI-neutrino加熱爆発では3rd peakまでつくるr-process元素合成.

Future works

- ✓ 回転の遅いケースの研究. (MRI-SASI相互作用)
- ✓ より高解像度のシミュレーション/ より数値拡散の少ないスキーム
- ✓ 非軸対称計算 (3Dシミュレーション)