重力崩壊計算の為の３次元GRMHDコード開発

新学術領域A03班第2回研究会

〇黒田　仰生、梅田　秀之（東大）

Outline

- 現在までの研究（３DMHD）
- GRMHDコードの概要
- 大質量星の重力崩壊
  ニュートニアン近似との比較
- まとめ

現在までの研究（３DMHD）

重力崩壊型超新星爆発の爆発機構

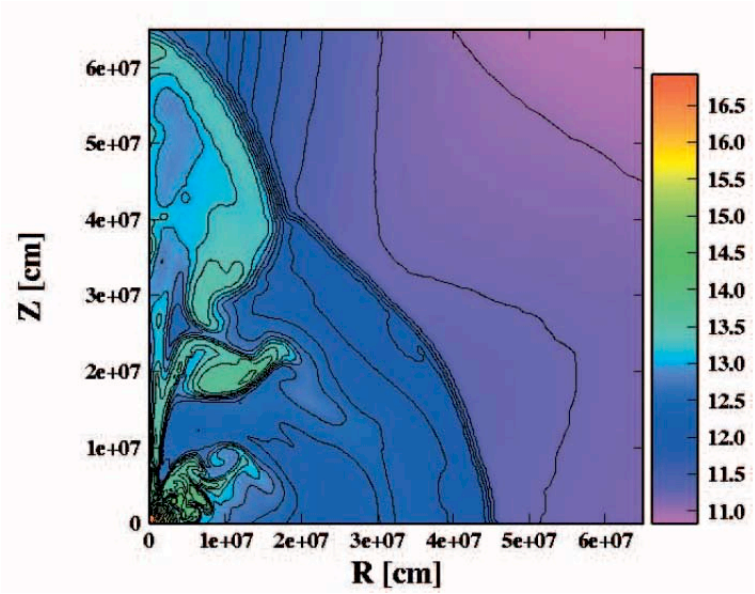
✓ニュートリノ駆動型
✓Acoustic mechanism
✓磁気回転型爆発

磁場と回転を伴う親星が起こす爆発。

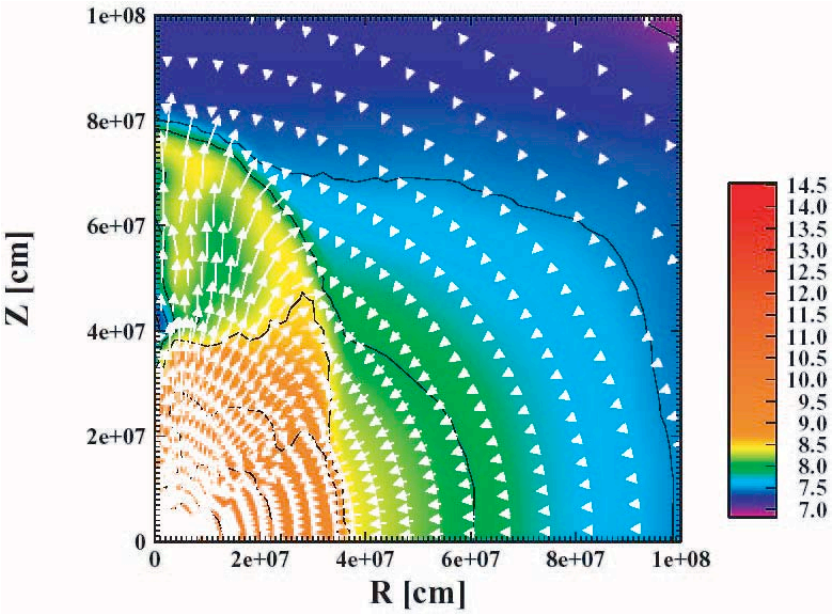
十分な強磁場(~10^{15}G)が生じると、
中心天体の回転エネルギーが抜かれ、
高速のアウトフローが出現。

現在までの研究（３DMHD）

２次元軸対称での先行研究は多数ある。



Kotake +, ‘04



Sawai +, ‘05

では３次元非軸対称ではどのような発展を遂げるか？

現在までの研究（３DMHD）

軸対称計算と３次元計算の最も大きな違い。

原始中性子星の**回転不安定**にある。

① Dynamical instability (|T/W|>0.27) …… Rampp et.al. ’98
② Secular instability (|T/W|>0.13) …… Chandrasekhar ’70
③ Low |T/W| instability (|T/W|>0.01) …… Watts et.al. ’05

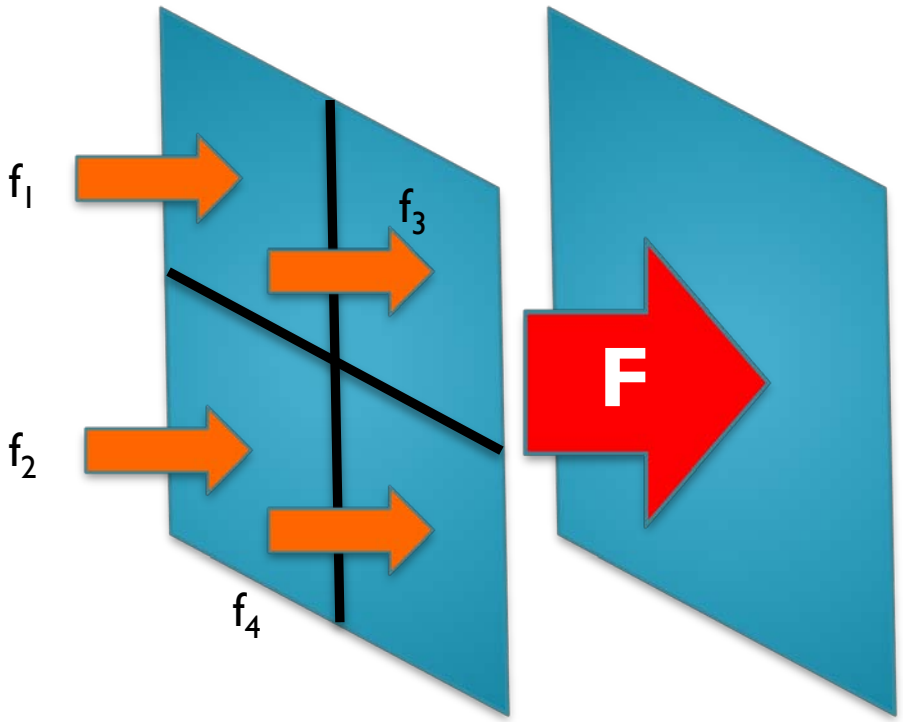
磁気回転型爆発シナリオに絡めれば‥

- 現実的な初期磁場(~10^9G(？))の成長。
- その後爆発へと寄与するのか？

３次元MHDでの先行研究　Scheidegger +,’08　Mikami +, ’08　極僅か。

現在までの研究（３DMHD）

- ３次元AMR磁気流体コードで計算
- 最内層（60x60x60 km）はdX~600m

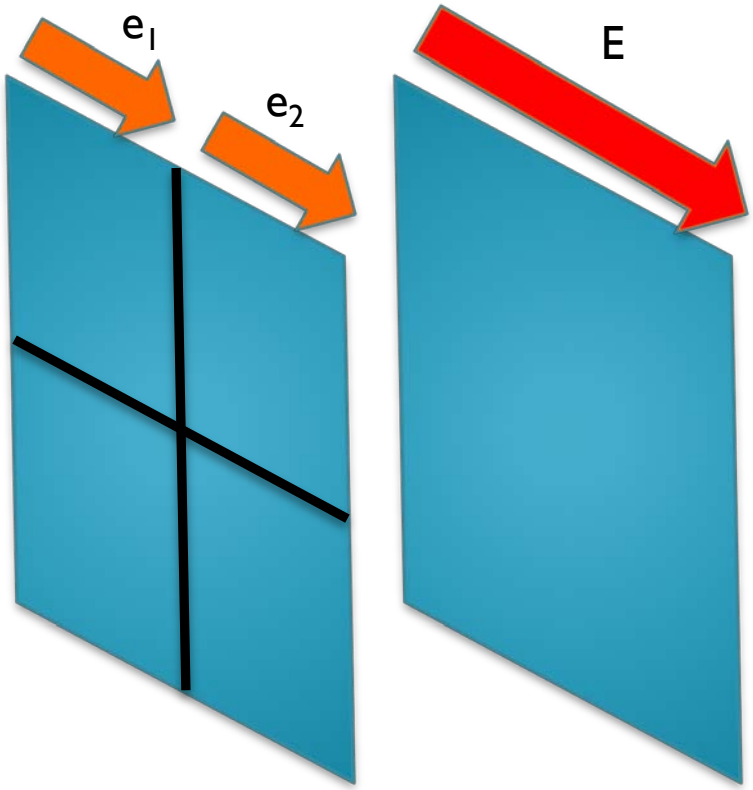


flux補正

$$F = \sum_i f$$

現在までの研究（３DMHD）

- ３次元AMR磁気流体コードで計算
- 最内層（60x60x60 km）はdX~600m



電場補正

$$E = \sum_i e/2$$

現在までの研究（３DMHD）

- １５太陽質量星(Umeda & Nomoto '08)を採用

- 状態方程式

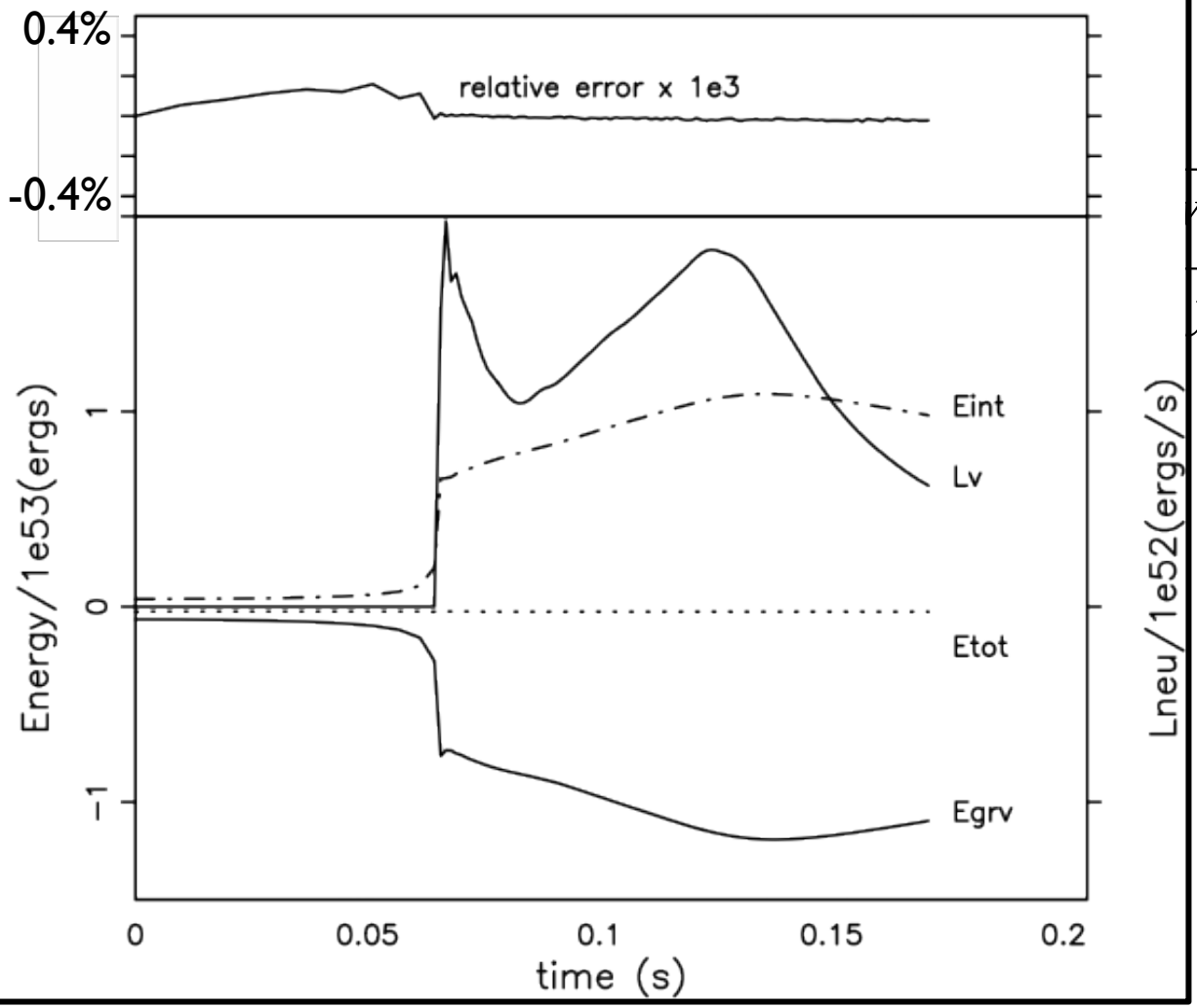
$$P = K_i \rho^{\Gamma_i} + \rho RT$$

$$\varepsilon = \int_0^{\rho} \frac{P_0}{\rho^2} d\rho + \frac{RT}{\gamma_t - 1}$$

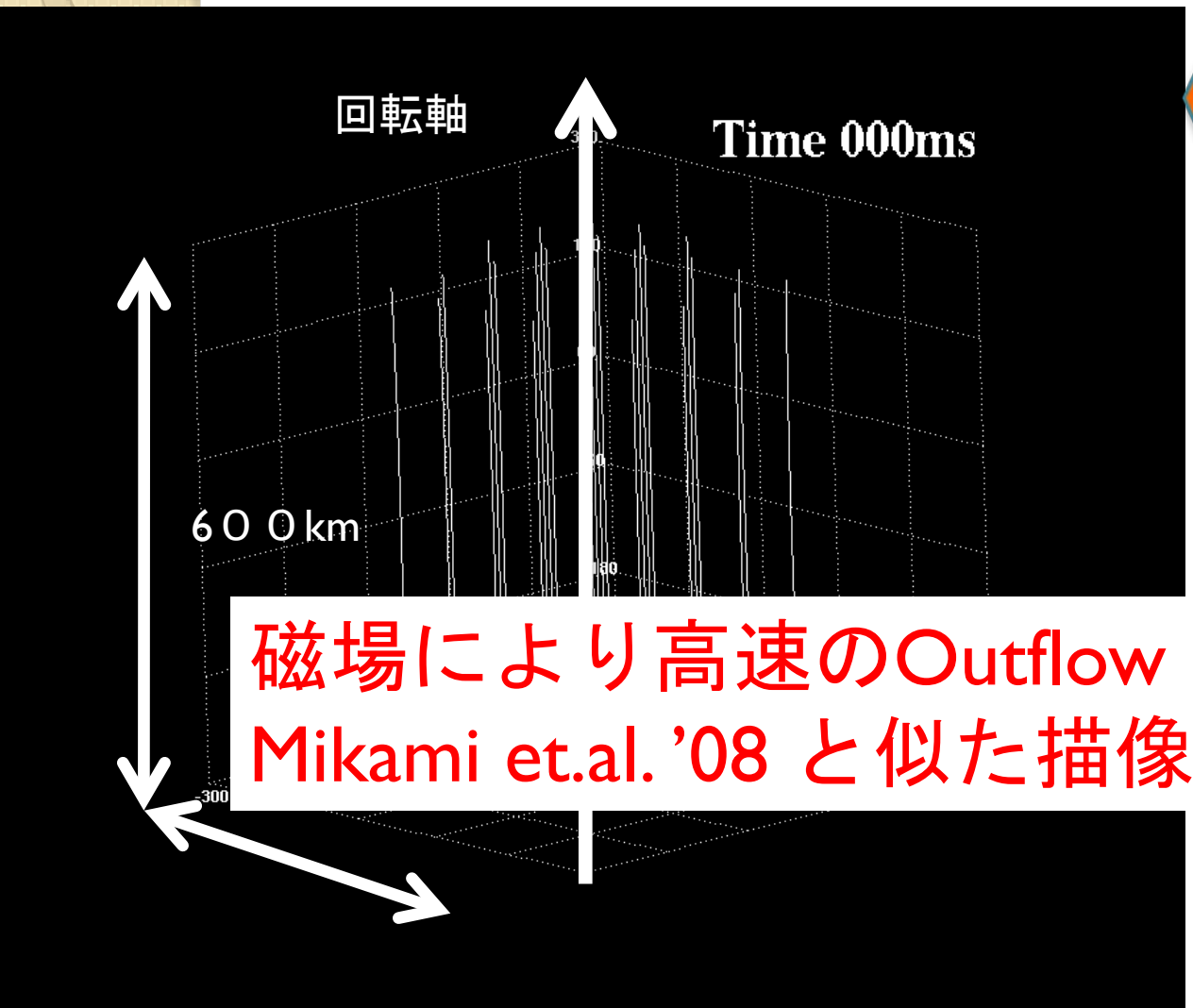
Takahara & Sato '88

$$\Gamma = 4/3 \leftrightarrow (\rho < 4 \times 10^9 \, g/cc)$$
$$\Gamma = 1.29 \leftrightarrow (4 \times 10^9 \, g/cc < \rho < 1 \times 10^{12} \, g/cc)$$
$$\Gamma = 1.32 \leftrightarrow (1 \times 10^{12} \, g/cc < \rho < 2 \times 10^{14} \, g/cc)$$
$$\Gamma = 2.5 \leftrightarrow (\rho > 2 \times 10^{14} \, g/cc)$$

コードの計算誤差

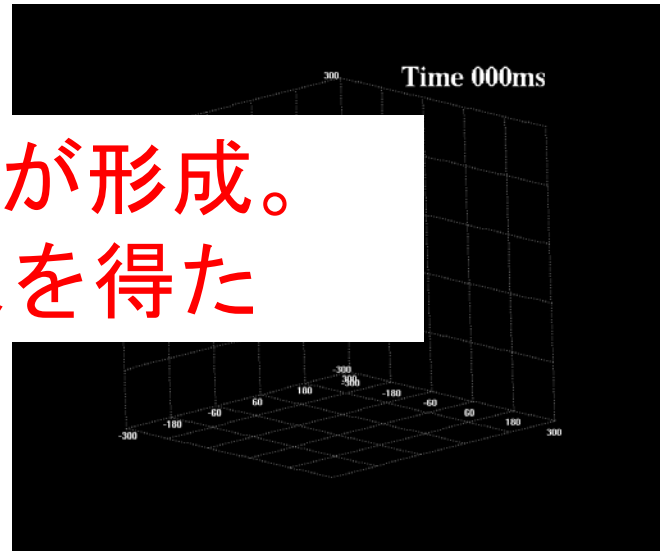

0.4%
-0.4%
relative error x 1e3
Energy/1e53(ergs)
Lneu/1e52(ergs/s)
1
0
−1
Eint
Lv
Etot
Egrv
0
0.05
0.1
0.15
0.2
time (s)

現在までの研究（３DMHD）



磁場有り

磁場無し

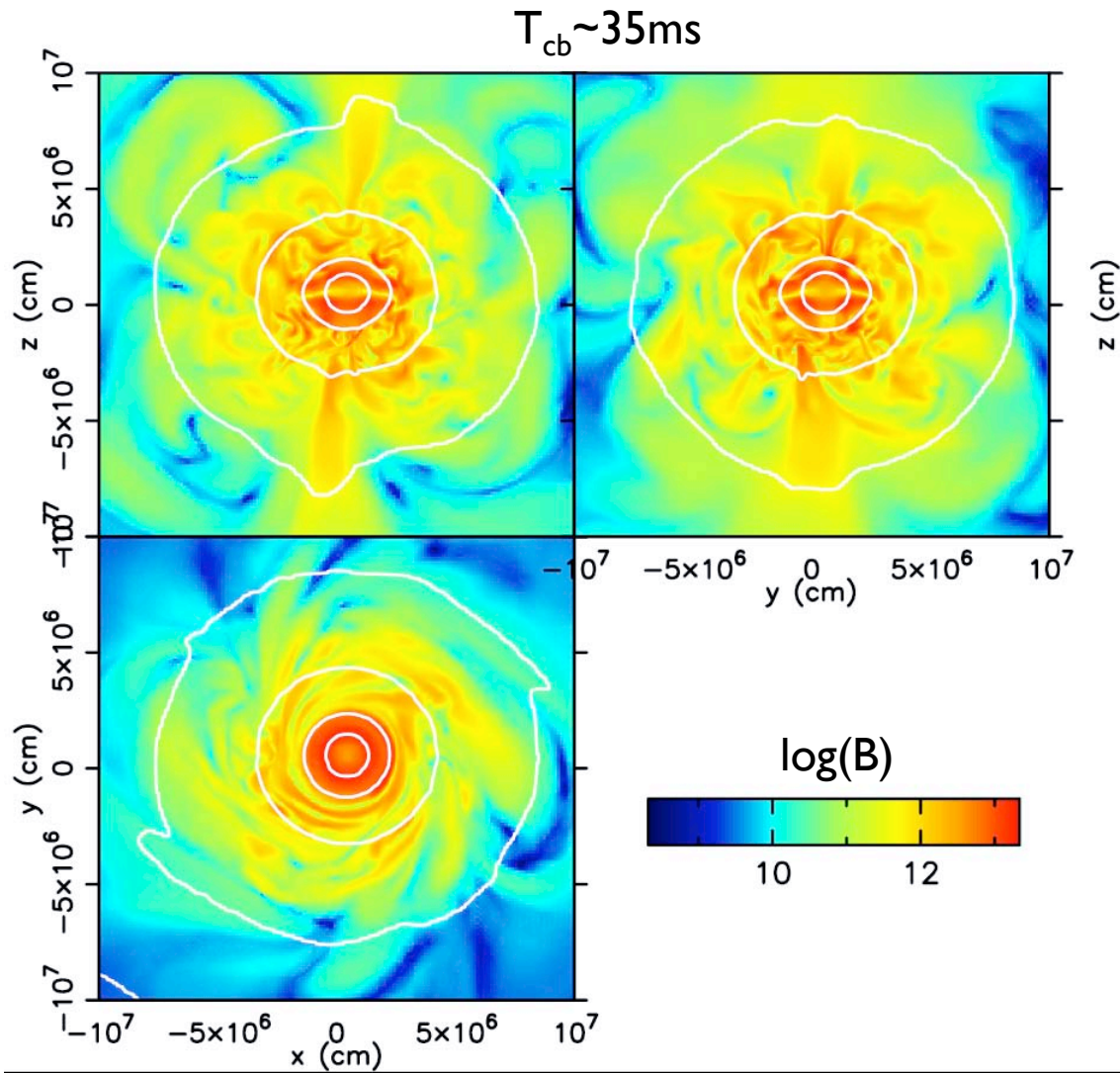


磁場により高速のOutflow が形成。
Mikami et.al. ’08 と似た描像を得た

現在までの研究（３DMHD）

強磁場($B_0=10^{12}$G)
では定性的に２次
元軸対称と
同じ描像を得た。

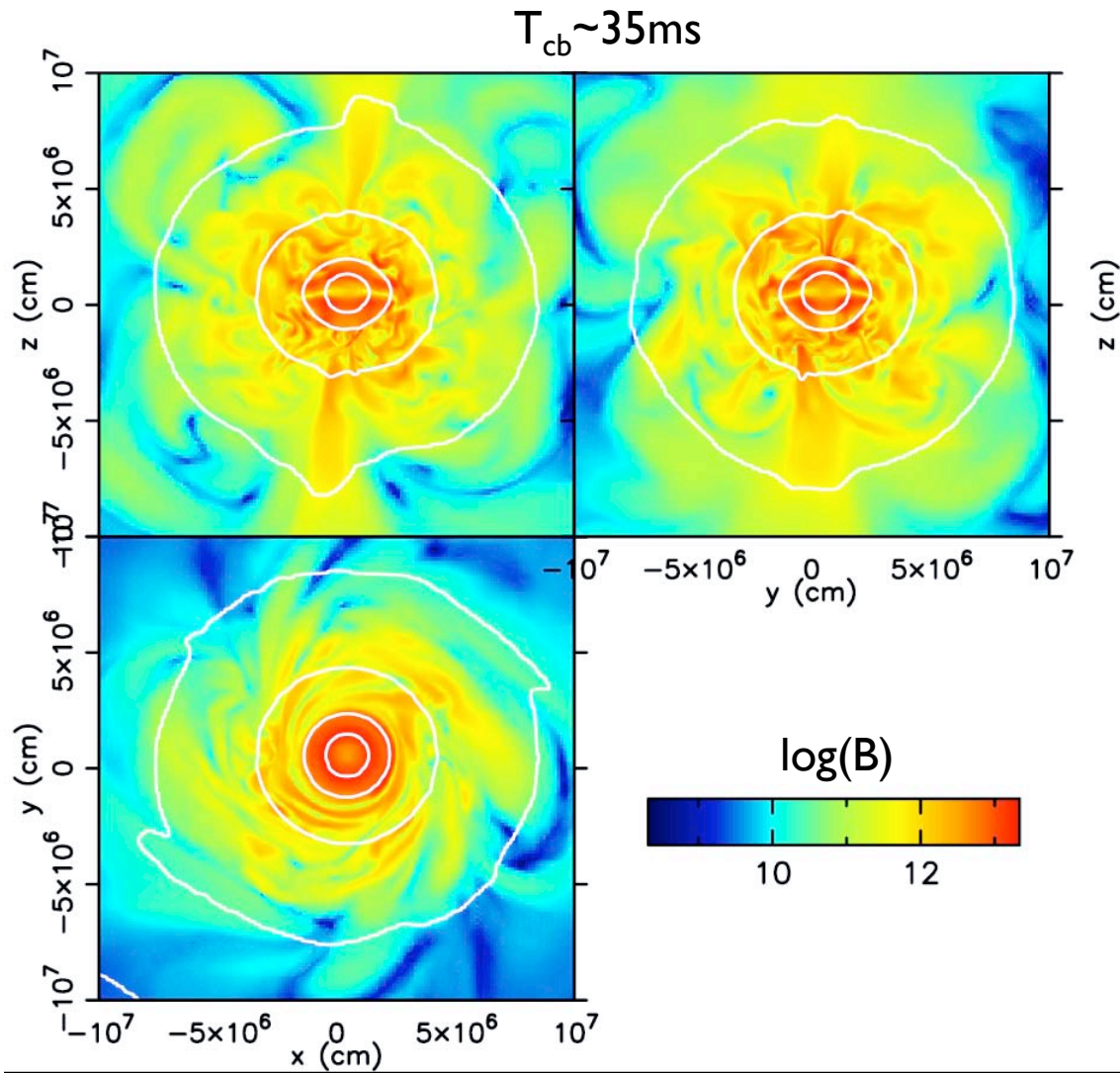
弱磁場($B_0=10^{9}$G)
では？



現在までの研究（３DMHD）

❖対流効果で
顕著な非球対称性。

❖コアバウンス後
~40ms以内では、
強磁場及びOutflow
形成されず。



現在までの研究（３DMHD）

Summary

●初期に超強磁場(B_0~10^{12}G)が存在する場合、回転軸方向に高速のOutflow形成。定性的には２次元軸対称計算と同様。

●高解像度計算では対流効果等で非軸対称性が生じたが、弱磁場の指数関数的増幅はT_{cb}~40ms以内では見られない。

GRMHDコードの概要

- 初期磁場が弱い場合長時間計算が要求される。
- 実際の重力崩壊の現場は時空が非常に歪んでいる。
- 我々が直接的に重力崩壊の現場を観測する手段のうちの一つとして、重力波が挙げられる。

from Newtonian MHD

to Full General Relativistic MHD !!

GRMHDコードの概要

Fo

$$(\partial_t - \beta^k \partial_k)\tilde{\gamma}_{ij} = -2\alpha \tilde{A}_{ij} + \tilde{\gamma}_{ik}\beta^k{}_{,j} + \tilde{\gamma}_{jk}\beta^k{}_{,i} - \frac{2}{3}\tilde{\gamma}_{ij}\beta^k{}_{,k}, \tag{2·16}$$

$$\begin{aligned}(\partial_t - \beta^k \partial_k)\tilde{A}_{ij} = {} & e^{-4\phi}\left[\alpha\left(R_{ij} - \frac{1}{3}\gamma_{ij}R\right) - \left(D_i D_j \alpha - \frac{1}{3}\gamma_{ij} D_k D^k \alpha\right)\right] \\ & + \alpha(K\tilde{A}_{ij} - 2\tilde{A}_{ik}\tilde{A}_j{}^k) + \beta^k{}_{,i}\tilde{A}_{kj} + \beta^k{}_{,j}\tilde{A}_{ki} - \frac{2}{3}\beta^k{}_{,k}\tilde{A}_{ij} \\ & - 8\pi\alpha e^{-4\phi}\left(S_{ij} - \frac{1}{3}\gamma_{ij}S_k{}^k\right),\end{aligned} \tag{2·17}$$

$$(\partial_t - \beta^k \partial_k)\phi = \frac{1}{6}\left(-\alpha K + \beta^k{}_{,k}\right), \tag{2·18}$$

$$(\partial_t - \beta^k \partial_k)K = \alpha\left(\tilde{A}_{ij}\tilde{A}^{ij} + \frac{1}{3}K^2\right) - D_k D^k \alpha + 4\pi\alpha(E + S_k{}^k), \tag{2·19}$$

$$\begin{aligned}(\partial_t - \beta^k \partial_k)F_i = {} & 2\alpha\left(f^{kj}\tilde{A}_{ik,j} + f^{kj}{}_{,j}\tilde{A}_{ik} - \frac{1}{2}\tilde{A}^{jl}h_{lj,i} + 6\phi_{,k}\tilde{A}^k{}_i - \frac{2}{3}K_{,i}\right) \\ & - 2\delta^{jk}\alpha_{,k}\tilde{A}_{ij} + \delta^{jl}\beta^k{}_{,l}h_{ij,k} + \left(\tilde{\gamma}_{il}\beta^l{}_{,j} + \tilde{\gamma}_{jl}\beta^l{}_{,i} - \frac{2}{3}\tilde{\gamma}_{ij}\beta^l{}_{,l}\right)_{,k}\delta^{jk} \\ & - 16\pi\alpha J_i,\end{aligned} \tag{2·24}$$

nt

nt

Baumgarte, Shapiro, Shibata & Nakamura formalism (c.f. Shibata & Nakamura, '99)

GRMHDコードの概要

gauge conditions

$$\partial_t \alpha = \beta^i \partial_i \alpha - 2\alpha K$$

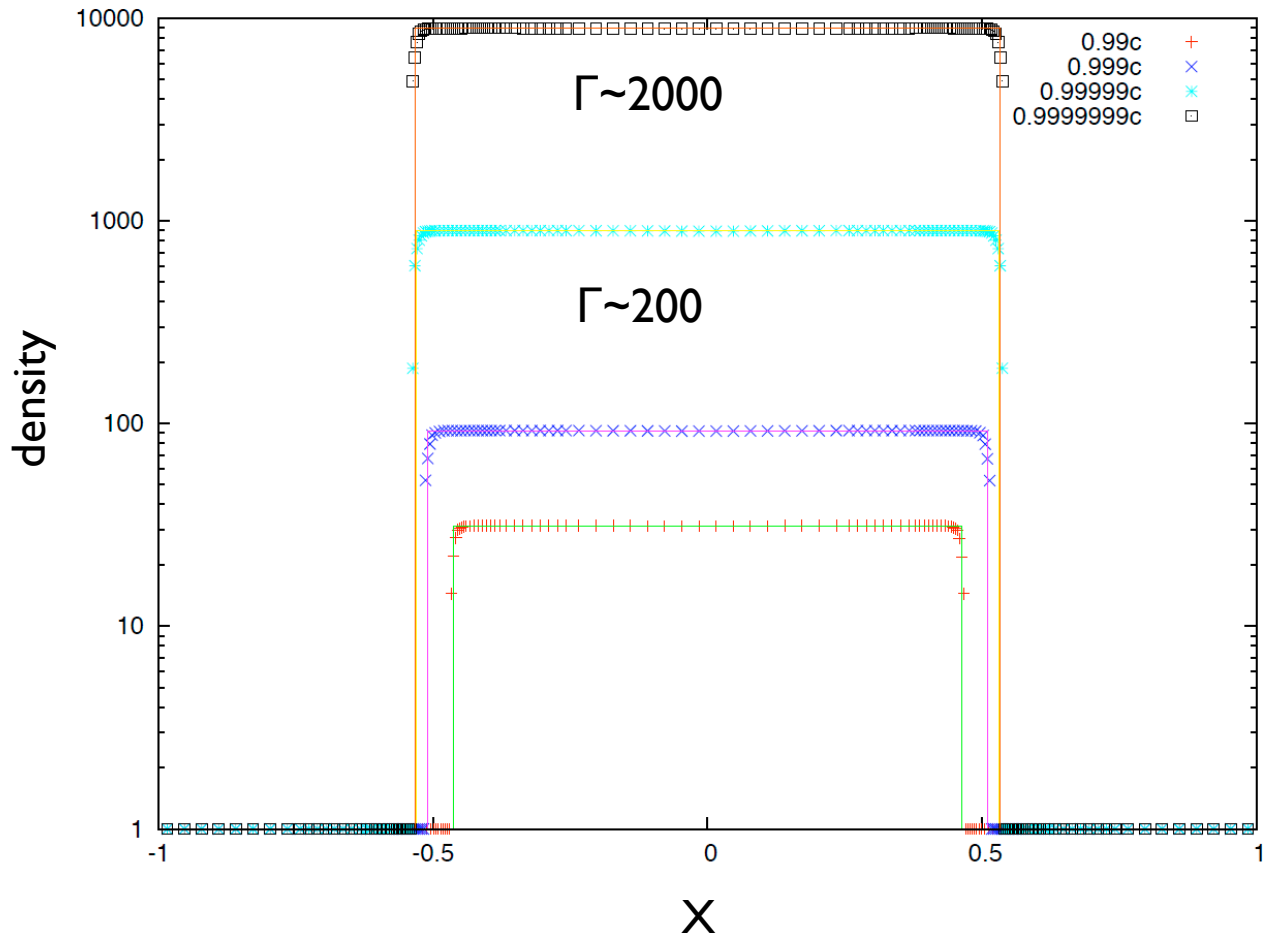
$$\partial_t \beta^i = \tilde{\gamma}^{ik}(F_k + \Delta t \partial_t F_k)$$ (Shibata '03)

このgauge condition のおかげで、
初期条件(Hamiltonian & Momentum constraint)で
解く以外は、Poisson eq. を扱う必要がなくなる。

GRMHDコードの概要(test 1)

Test suite in Minkowsky space time.

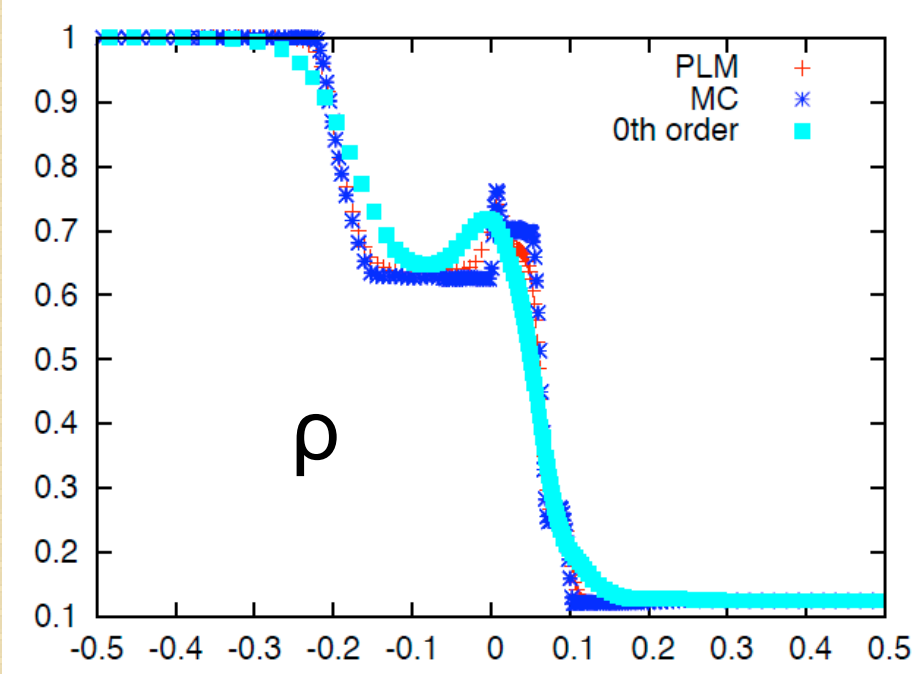
Planar shock reflection

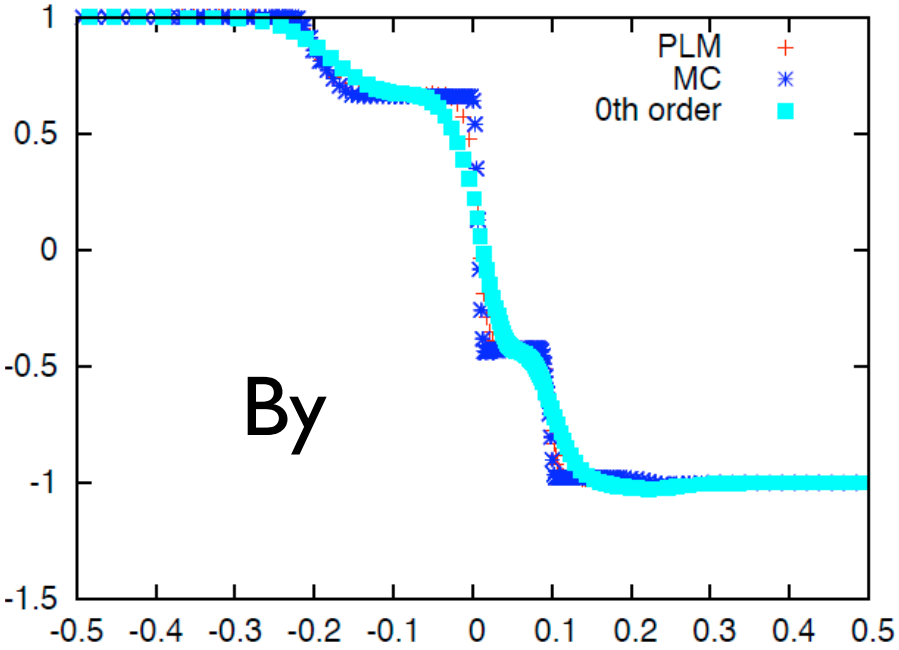


GRMHDコードの概要(test 2)

Test suite in Minkowsky space time.

Brio & Wu shock tube test

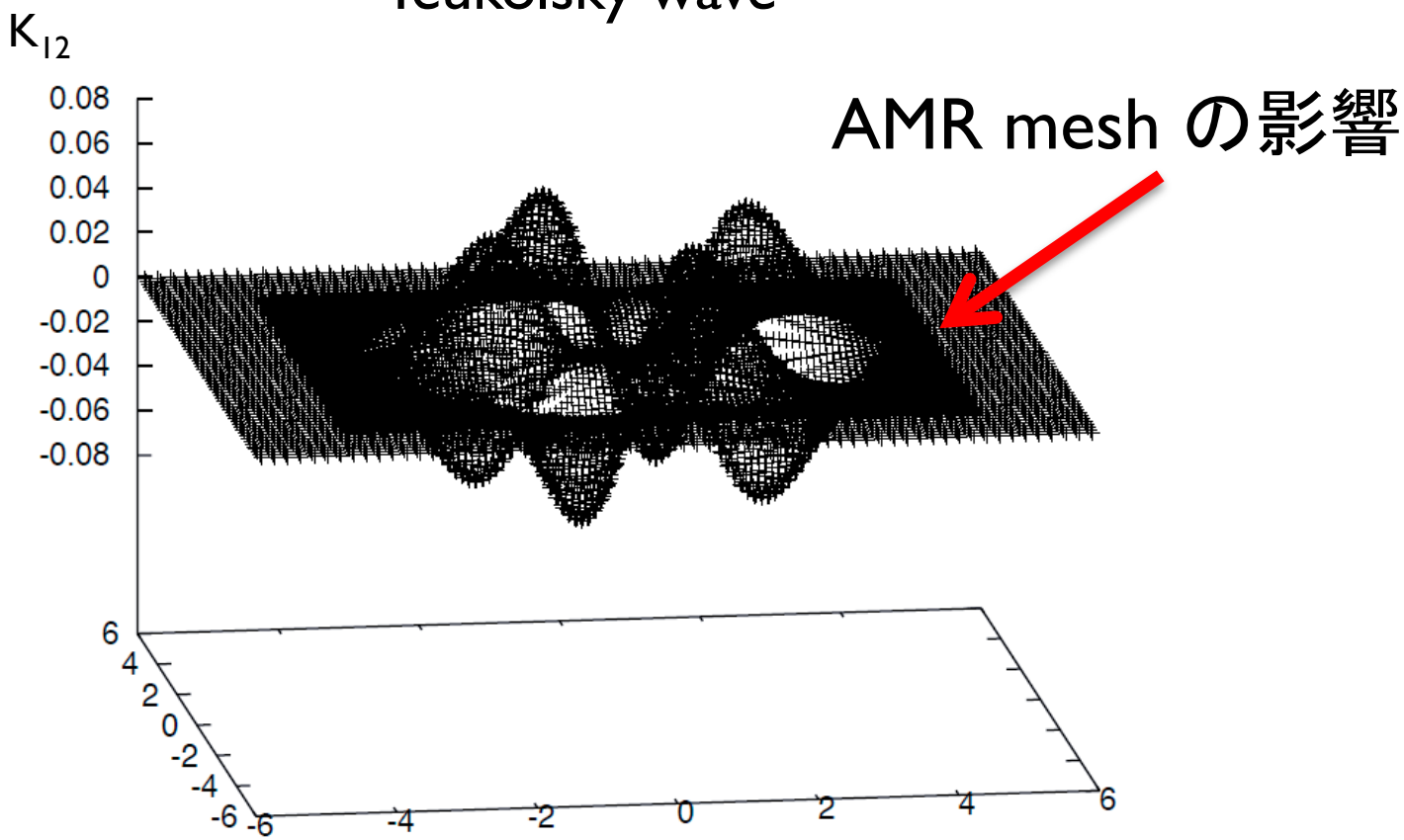




GRMHDコードの概要(test 3)

Test suite in dynamical space time.

Teukolsky wave

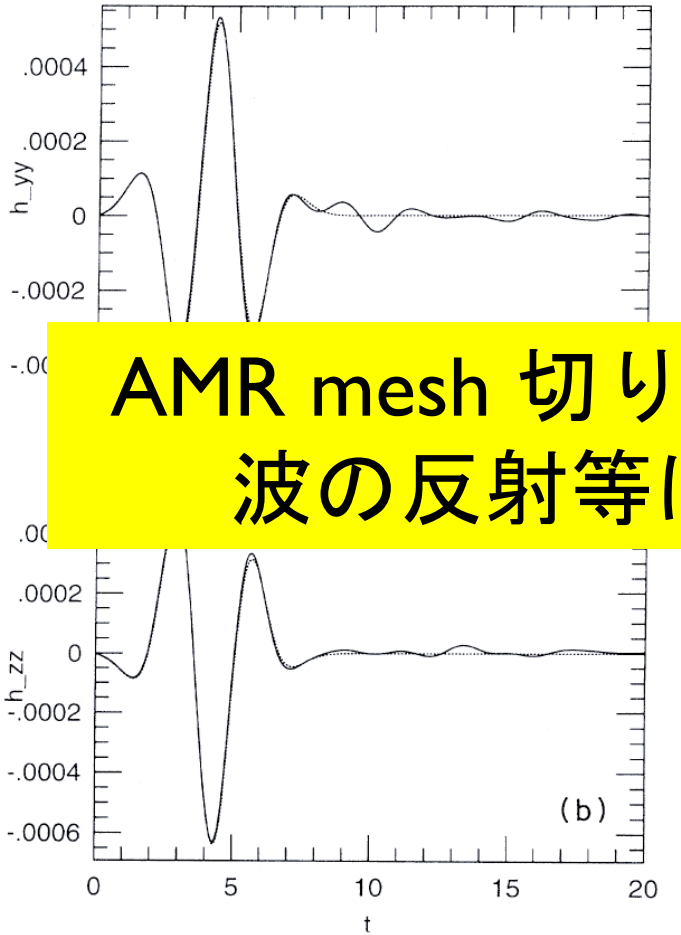


Vacuum space + liner gravitational wave

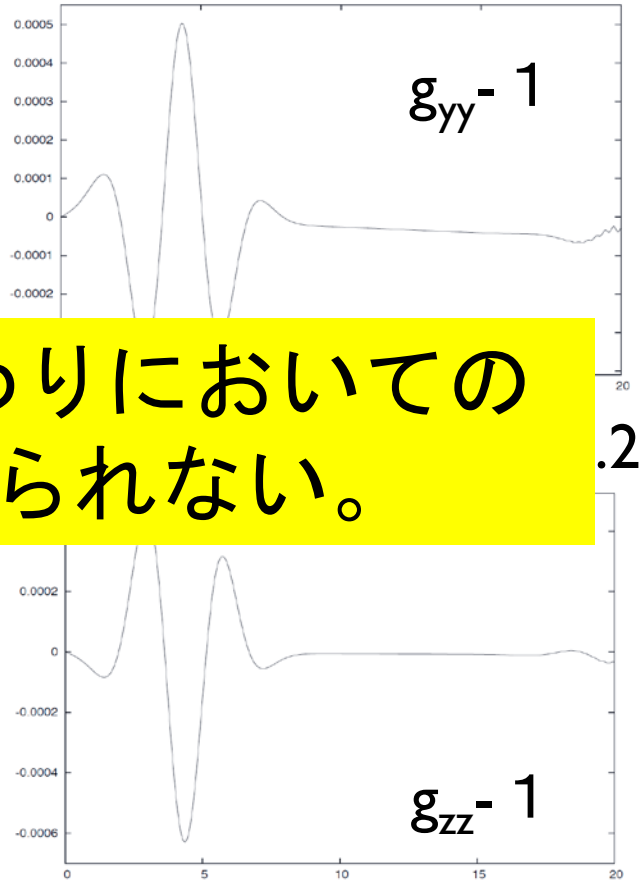
GRMHDコードの概要(test 3)

Test suite in dynamical space time.

Teukolsky wave



(Shibata & Nakamura, '95)



AMR mesh 切り替わりにおいての波の反射等は見られない。

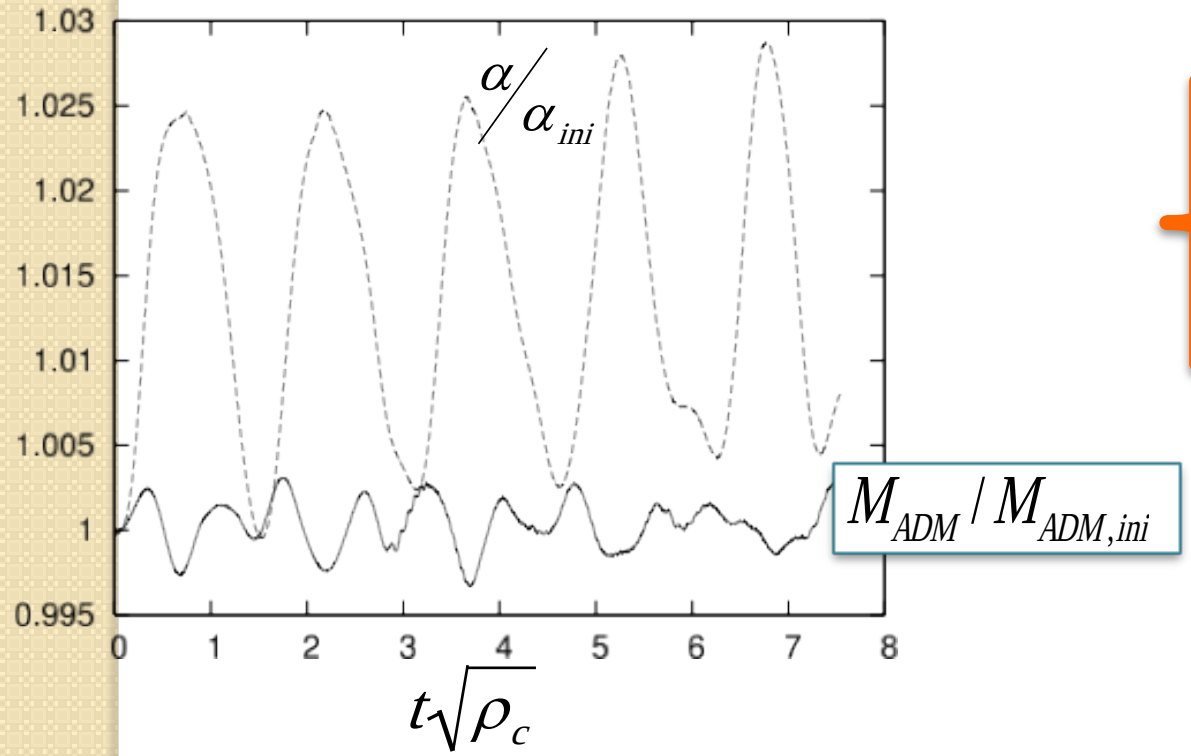
.2,0,0)

Our results

GRMHDコードの概要(test 4)

平衡状態の回転中性子星

evolution of stably rotating NS



$$\begin{cases} P = K\rho^{\Gamma} & \text{(K=10,Γ=5/3)} \\ \rho_c = 10^{-3} \\ \Omega_c = 10^{-3} & \text{剛体回転} \end{cases}$$

$$\alpha_c = 0.76$$

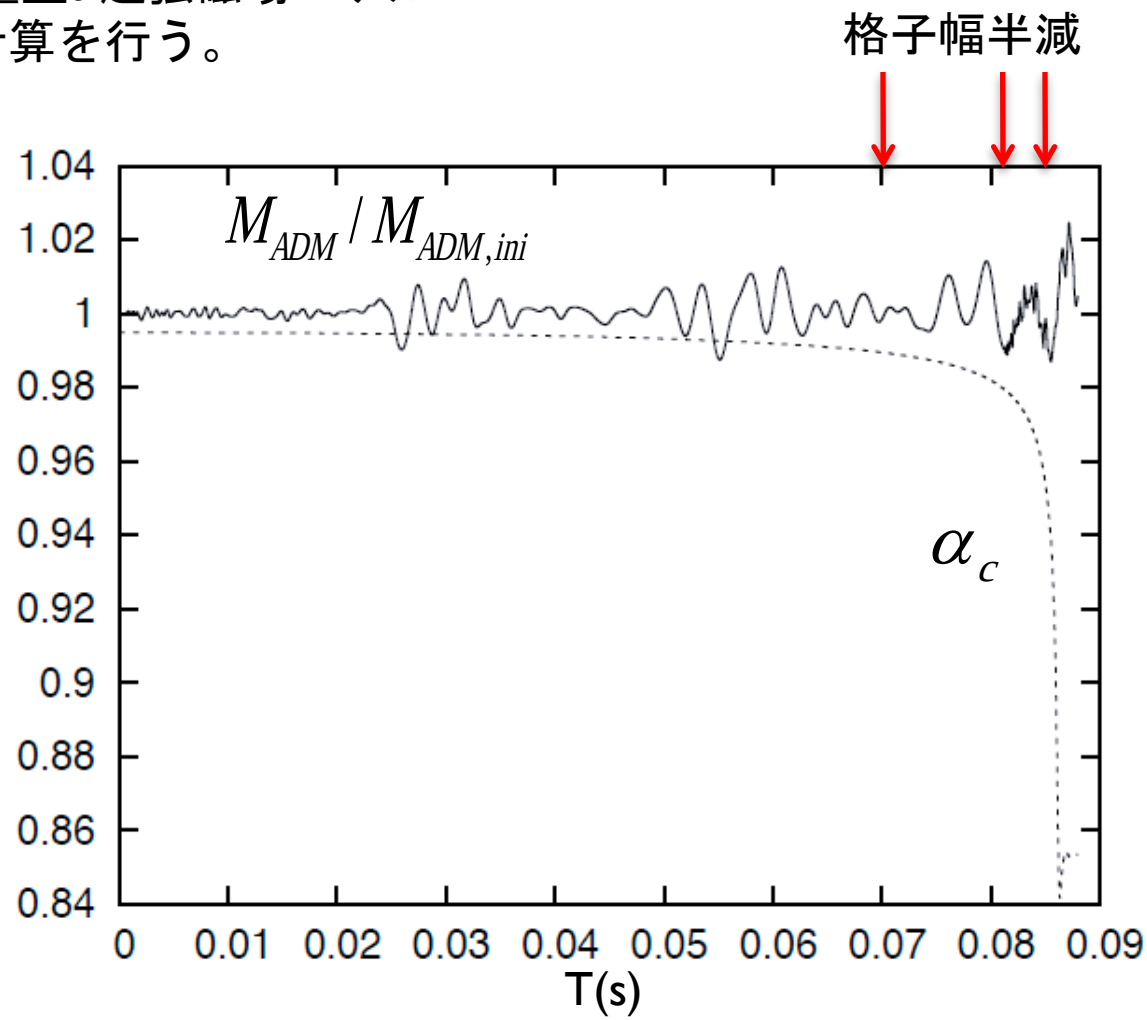
$$M_{ADM} = 1.44$$

大質量星の重力崩壊

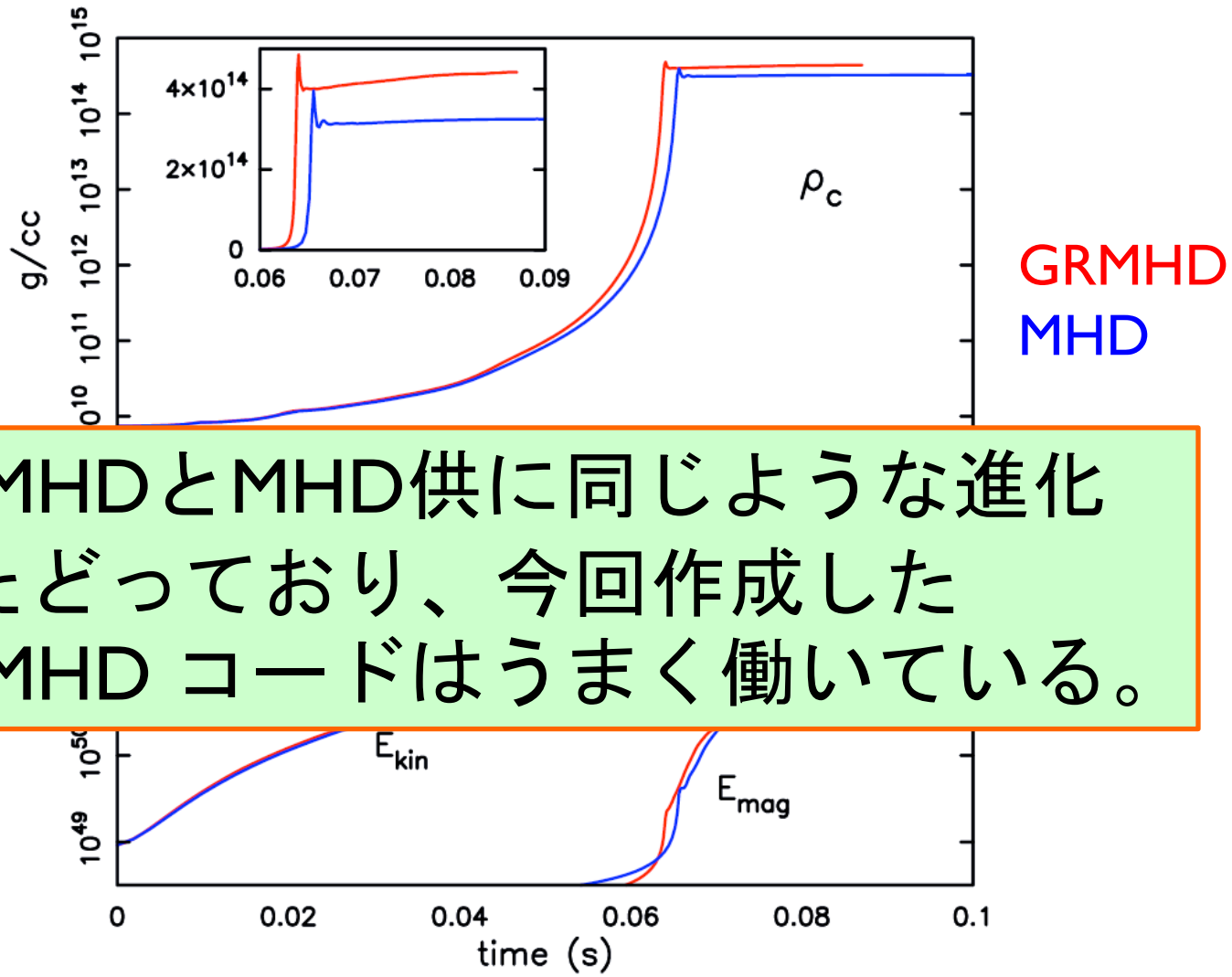
MHDでの15太陽質量星&超強磁場モデル
と同じ初期条件で計算を行う。

計算時間短縮のため
中心密度上昇に伴い
AMR level を上げる。

Mesh Refinement に
伴うADM mass 等の
不審な挙動は見ら
れない。

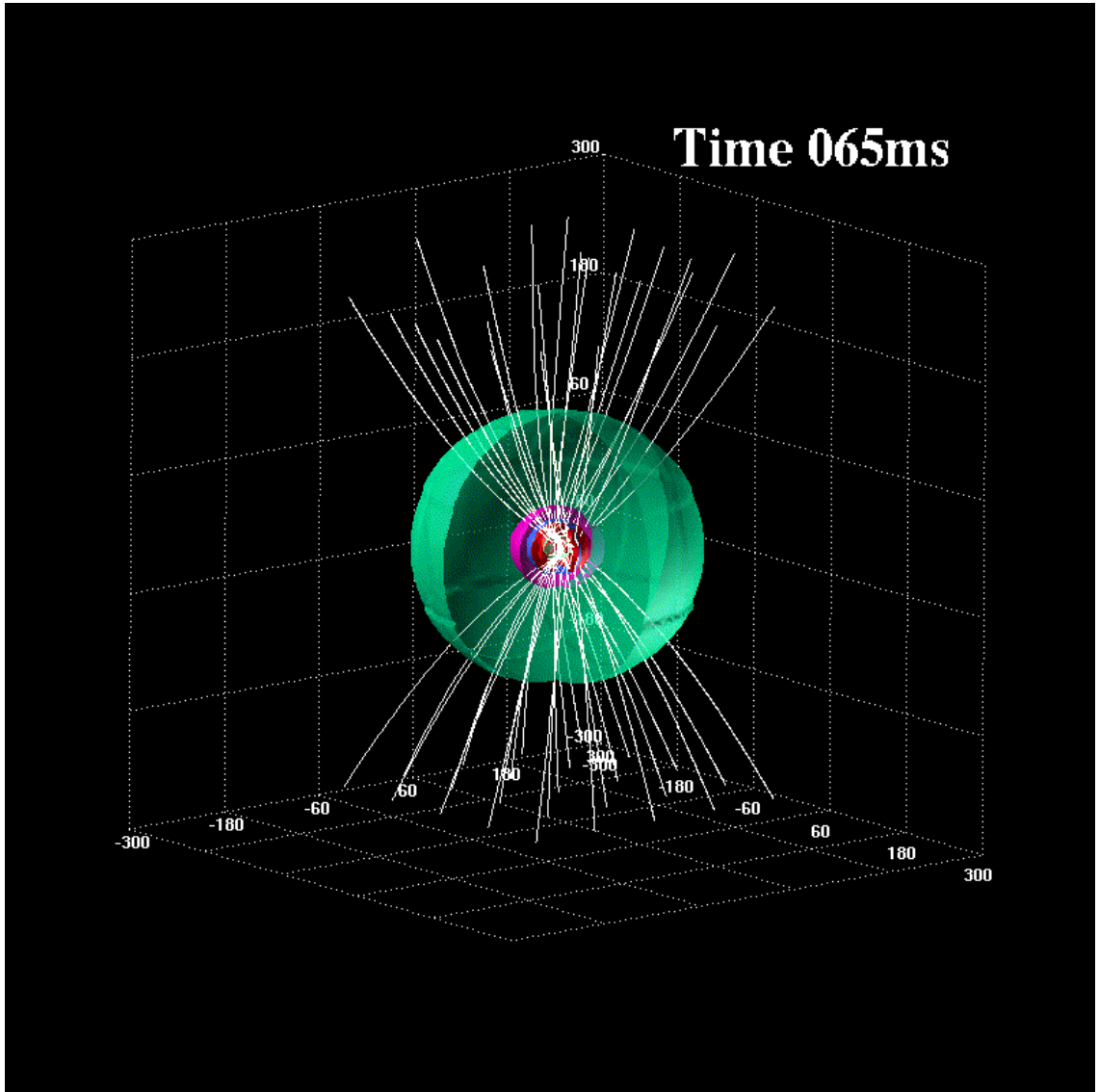


大質量星の重力崩壊

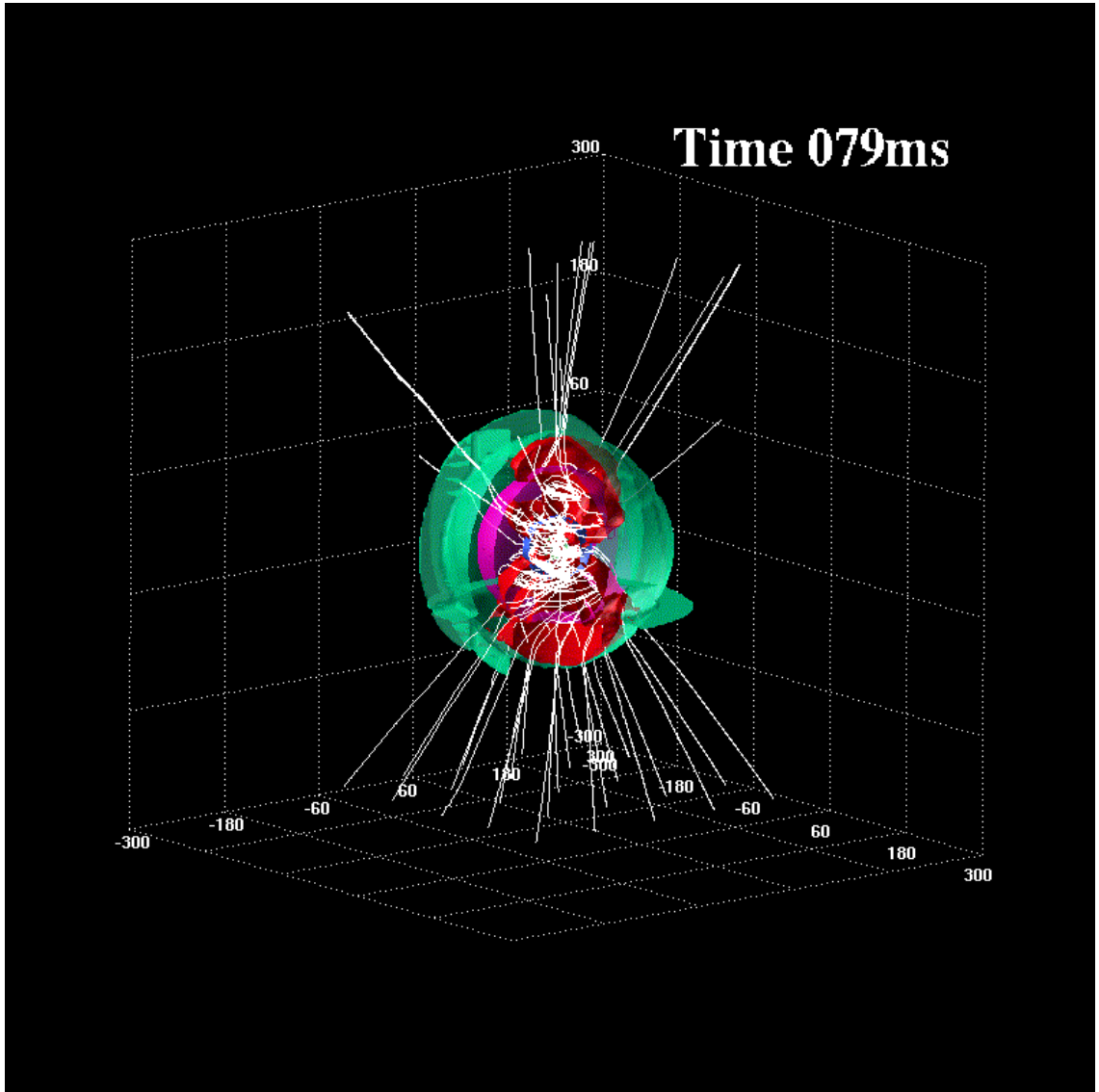


GRMHDとMHD供に同じような進化をたどっており、今回作成したGRMHD コードはうまく働いている。

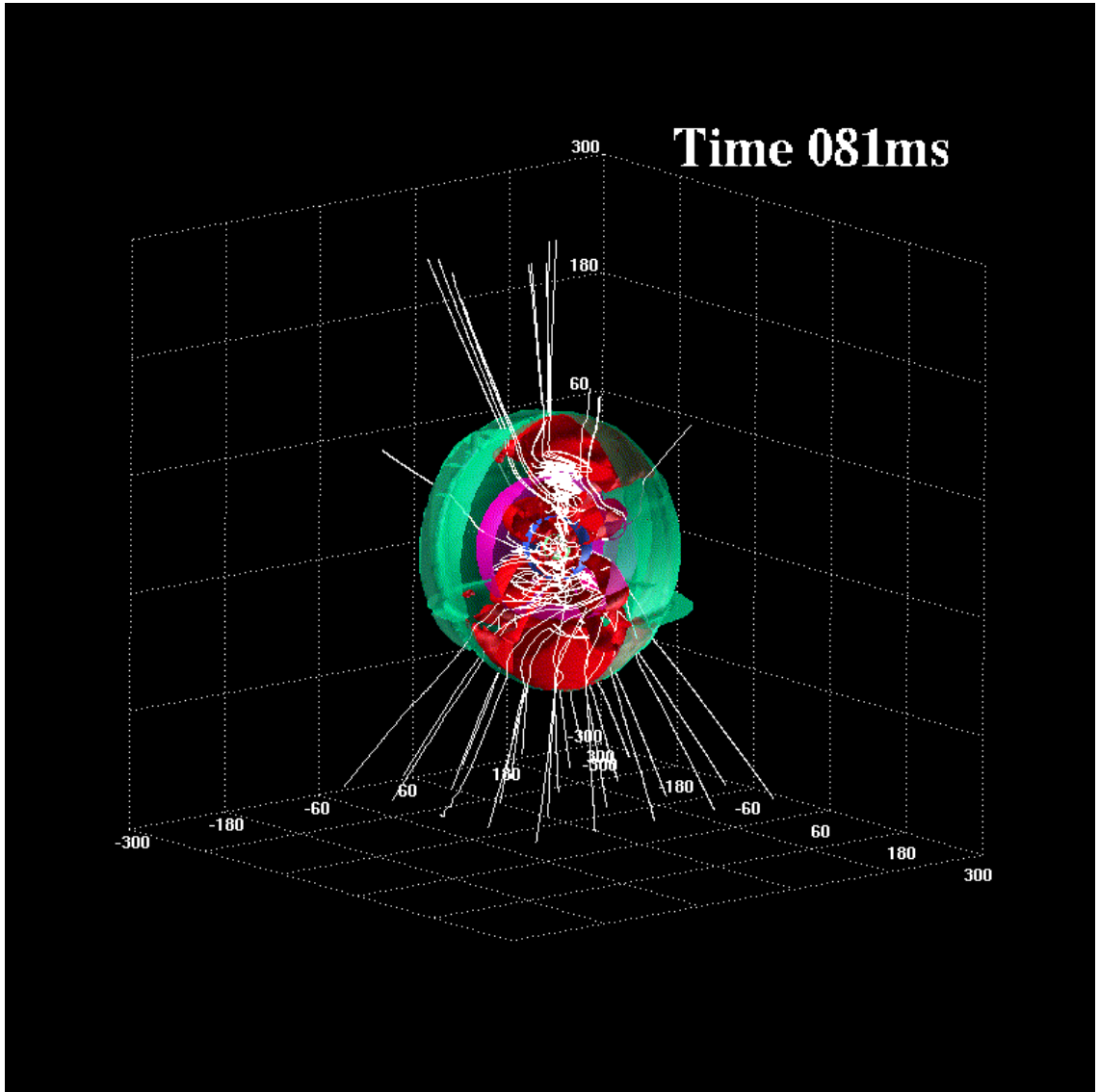
大質量星の重力崩壊



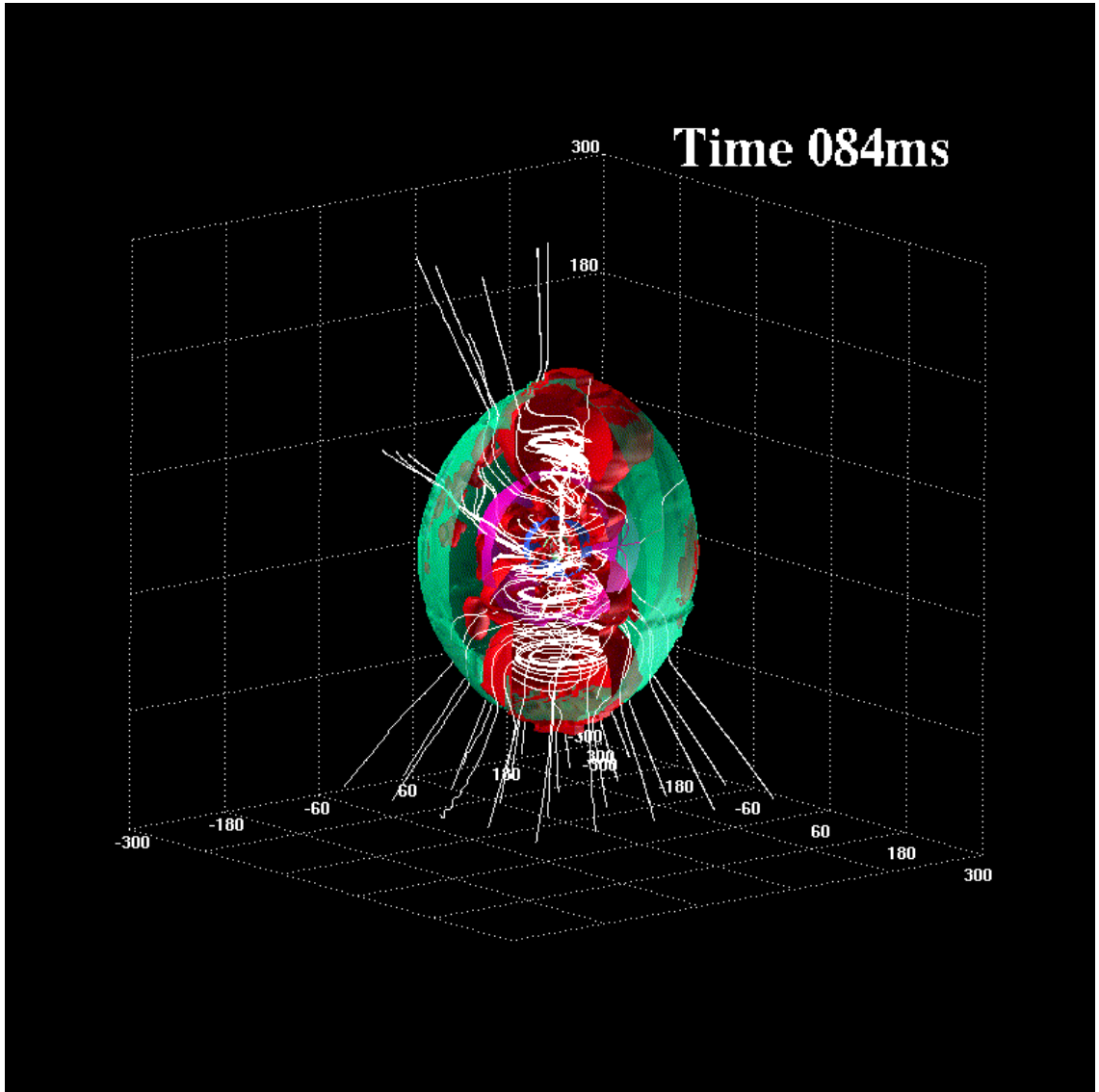
大質量星の重力崩壊



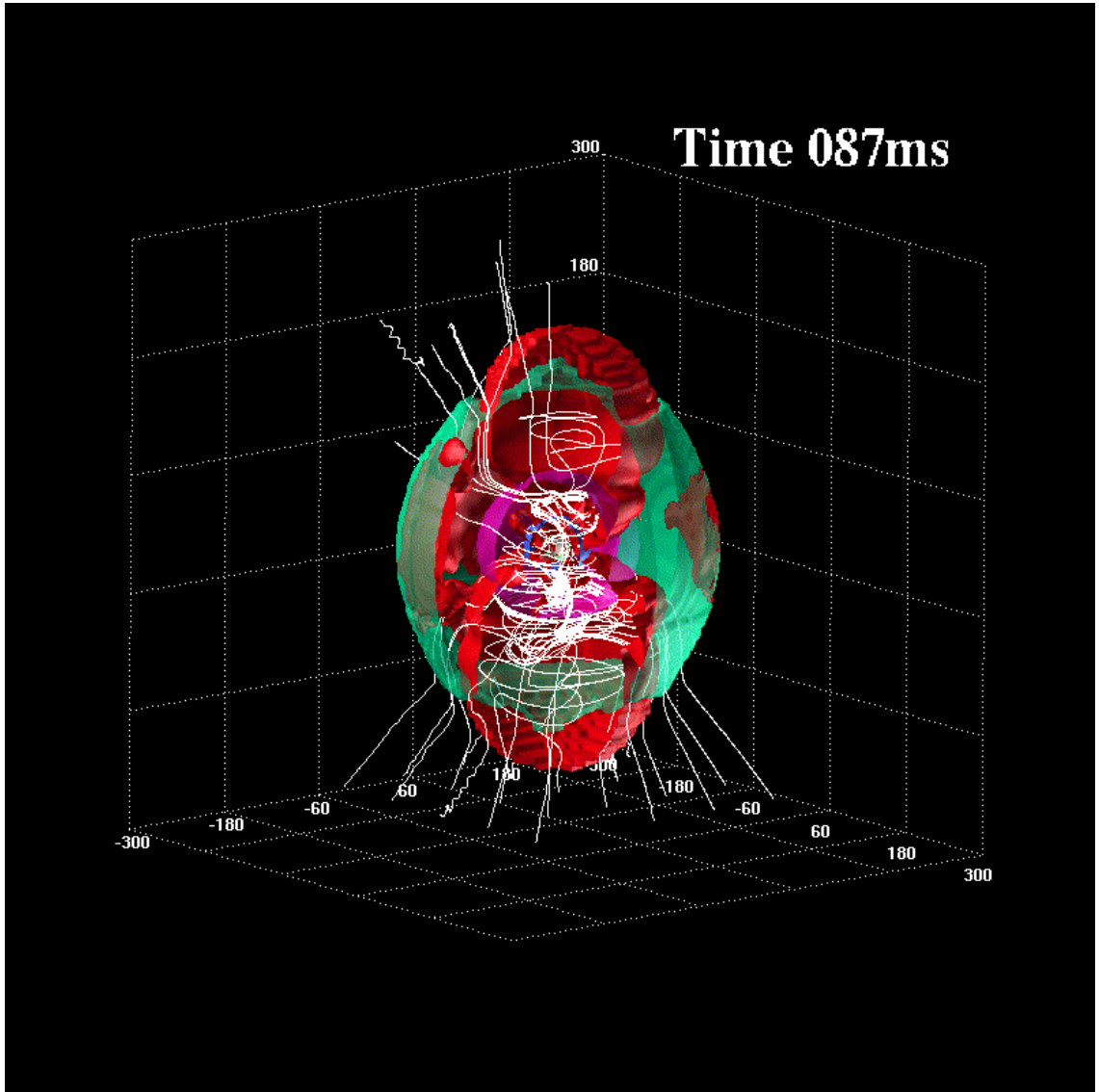
大質量星の重力崩壊



大質量星の重力崩壊



大質量星の重力崩壊

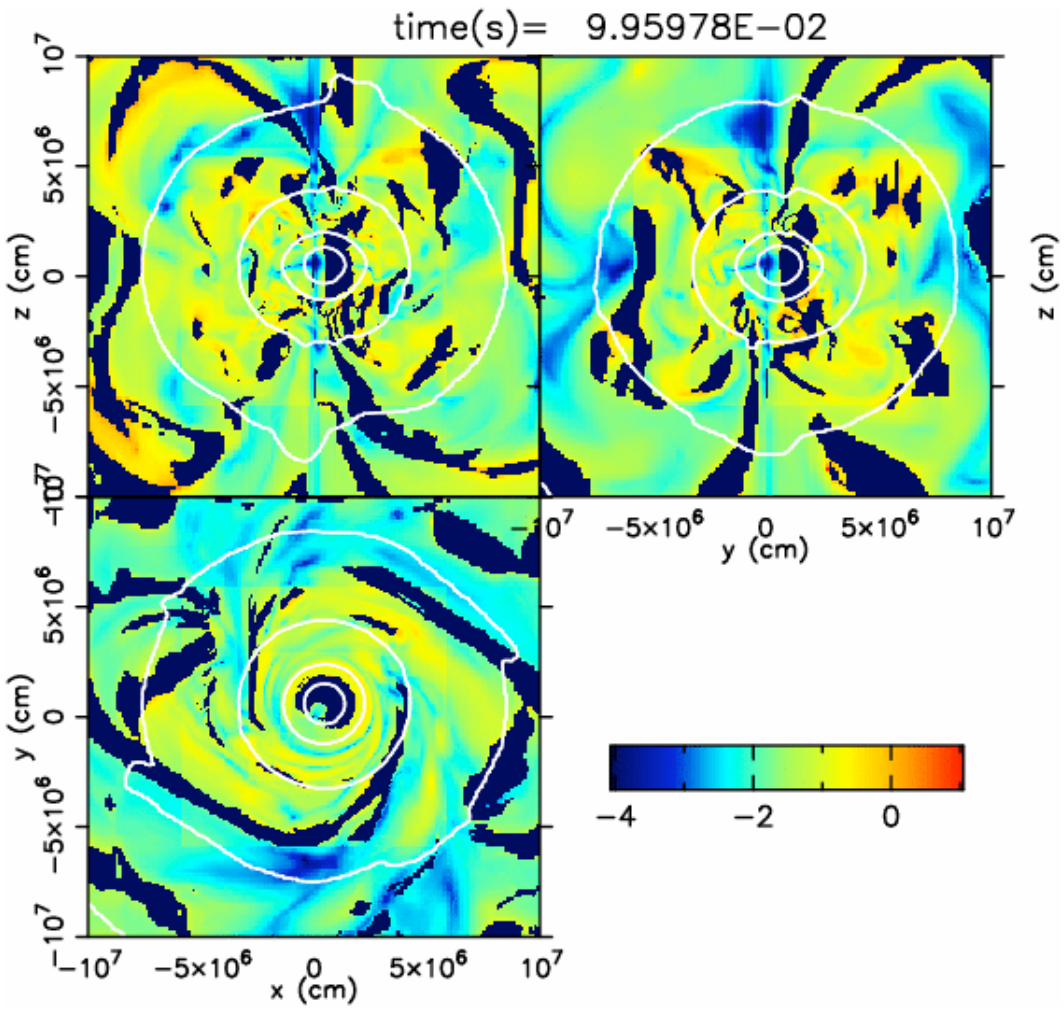


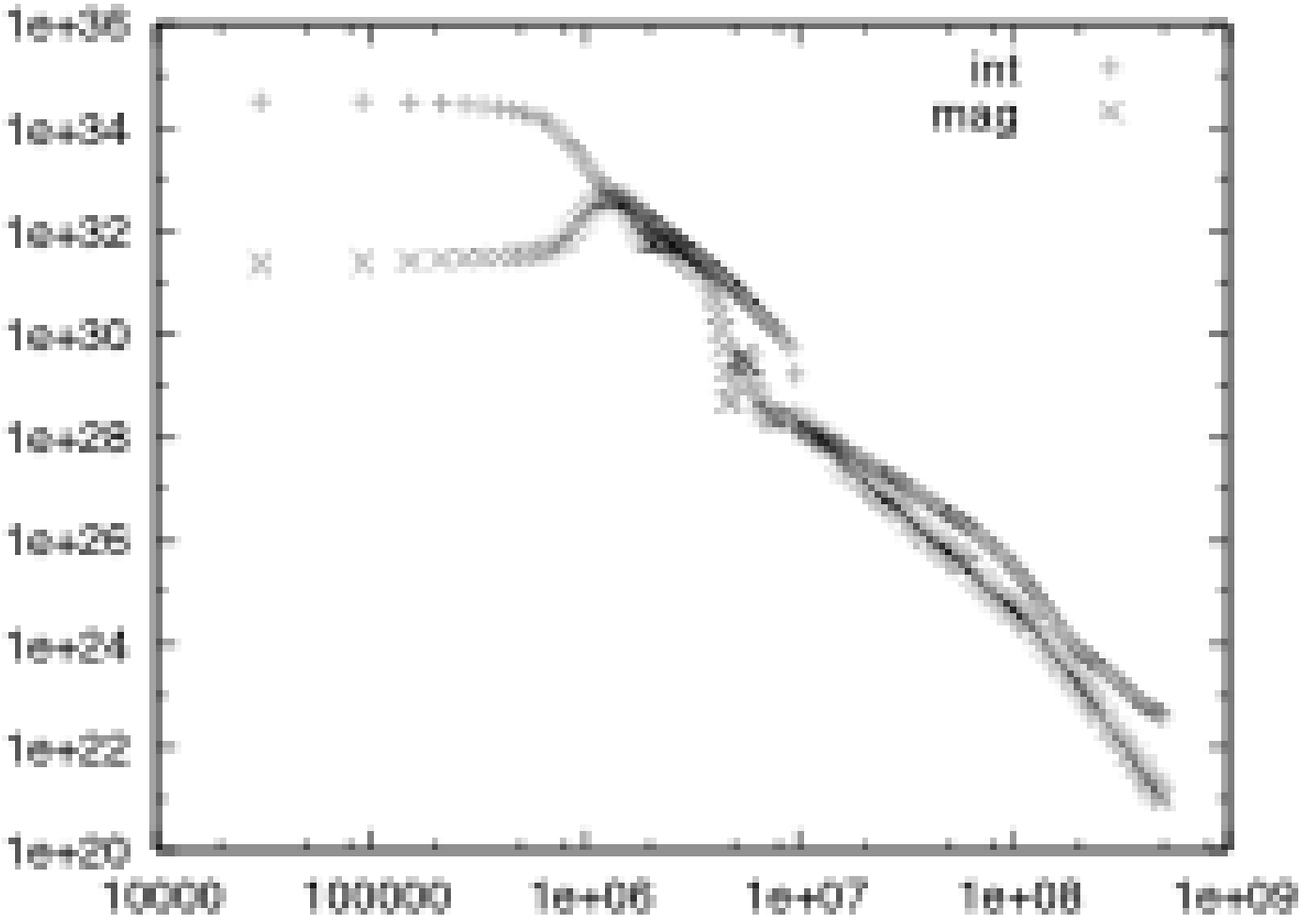
まとめ

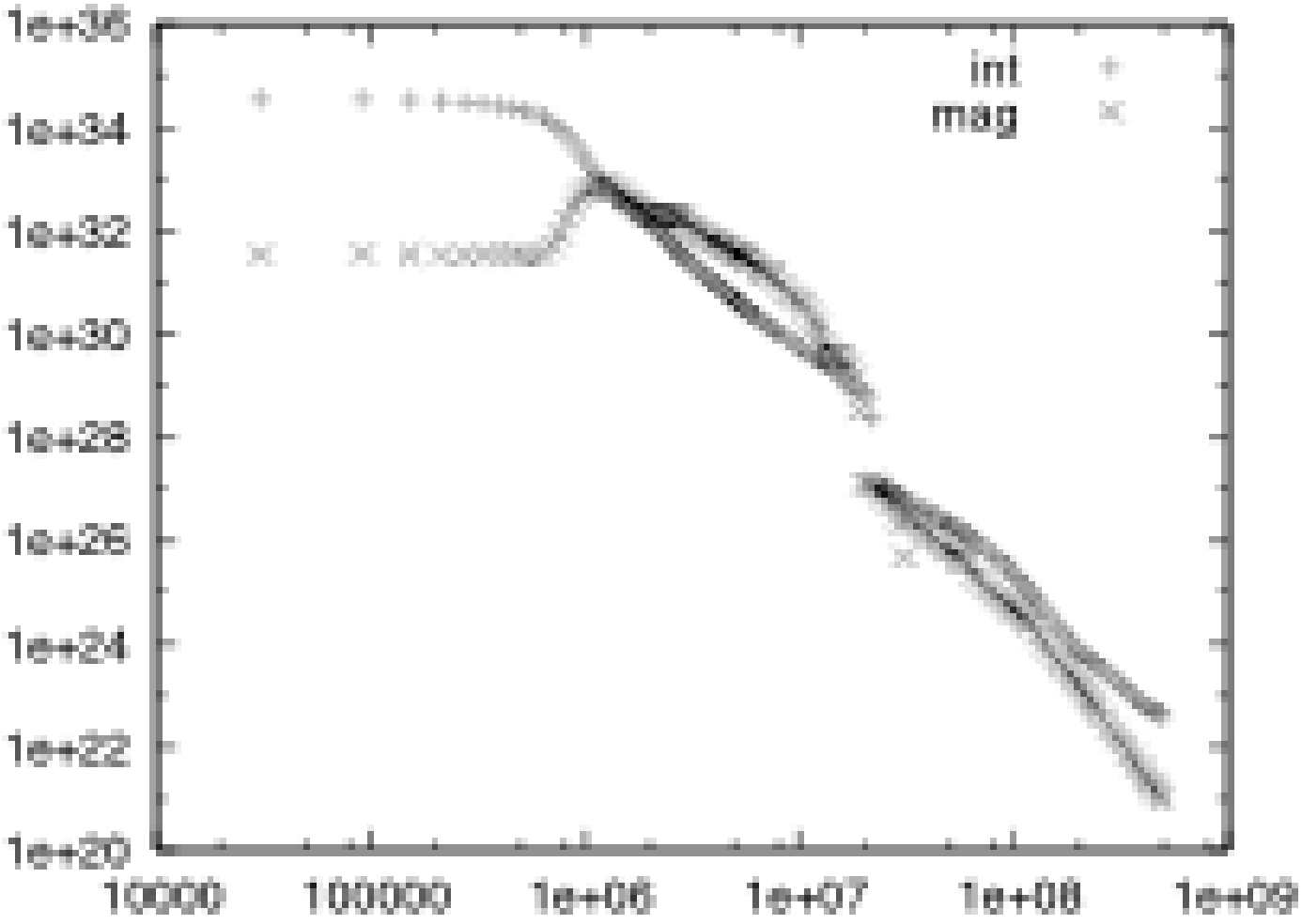
- 今回新たに3DAMR-GRMHDコードを作成し、各種テストを行った。

- 低質量の大質量星重力崩壊計算ではMHD計算とGRMHDがほぼ同じ進化をたどっている。

- 今後はBHを取り扱える様に改良を行い、~40Msun以上の星での重力崩壊、BH形成を一連の流れで取り扱う予定。


time(s)= 9.95978E−02
z (cm)
y (cm)
x (cm)
z (cm)
y (cm)
−10^7
−5×10^6
0
5×10^6
10^7
−4
−2
0


1e+36
1e+34
1e+32
1e+30
1e+28
1e+26
1e+24
1e+22
1e+20
10000
100000
1e+06
1e+07
1e+08
1e+09
int
mag


1e+36
1e+34
1e+32
1e+30
1e+28
1e+26
1e+24
1e+22
1e+20
10000
100000
1e+06
1e+07
1e+08
1e+09
int
mag