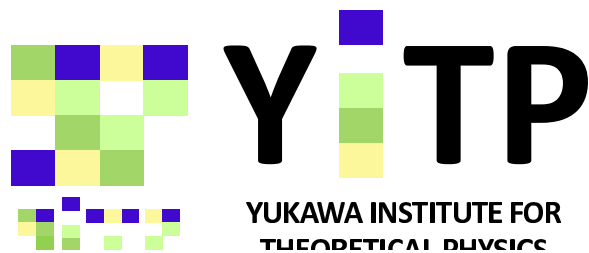


ボルツマン輻射流体コードを用いた 3次元重力崩壊計算へ向けて



サブ課題B 宇宙
(超新星ボルツマン班)

大川博督

超新星研究グループメンバー

- ⑨ 長倉洋樹 (Caltech)
- ⑨ 岩上わかな、大川博督 (京大基研/早大)
- ⑨ 原田了 (東大)、山田章一 (早大)
- ⑨ 住吉光介 (沼津高専)、古澤峻 (理研)
- ⑨ 松古栄夫 (KEK)、今倉暁 (筑波大)

第一原理計算による爆発メカニズムの検証

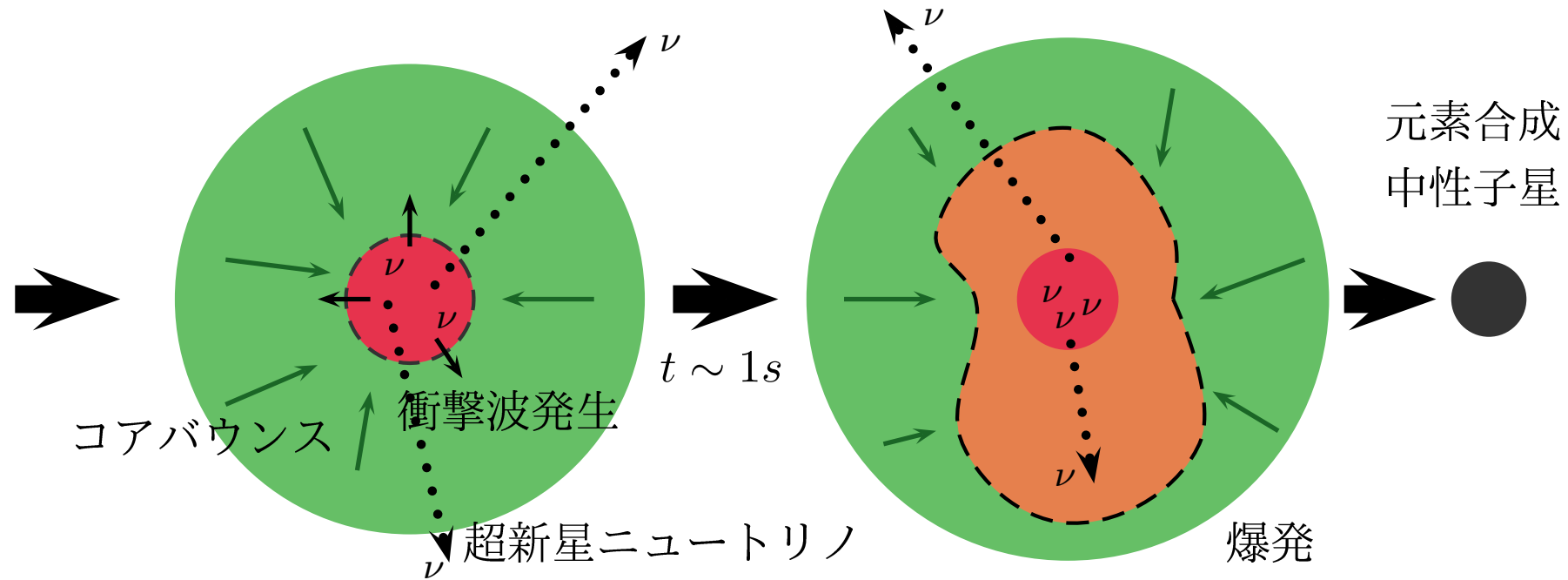
重力崩壊型超新星爆発を探る

- ⑨ 固武慶、中村航 (福岡大)、滝脇知也 (国立天文台)
- ⑨ 黒田仰生 (バーゼル大)、諏訪雄大 (京大基研)

系統計算によるメカニズム探索と観測連携

超新星の爆発メカニズムの検証

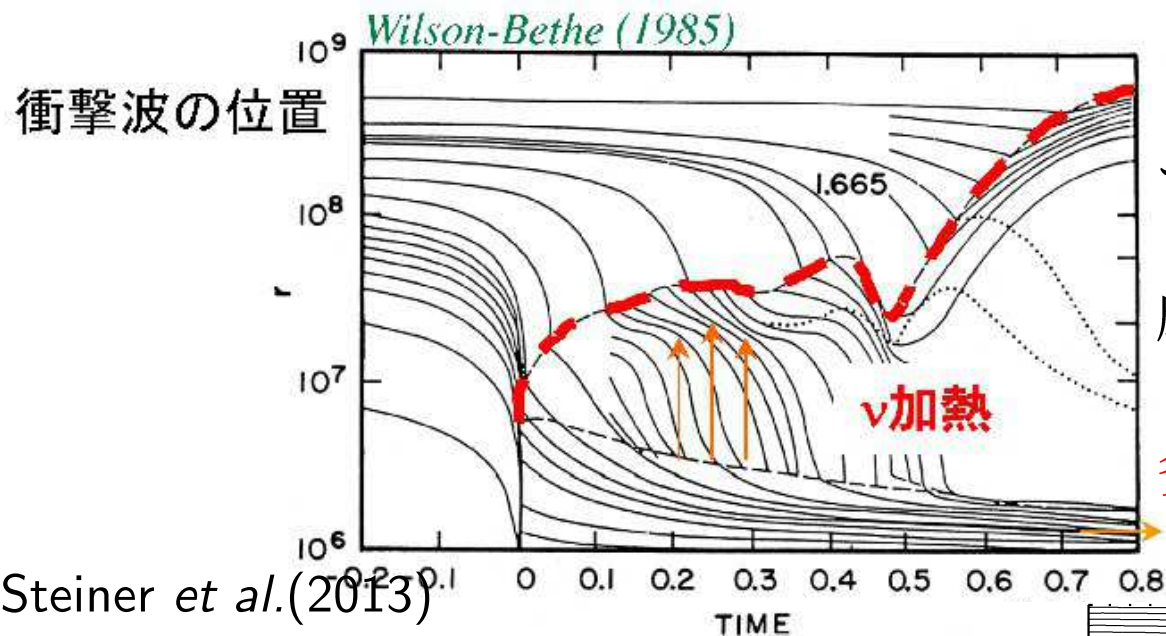
鉄コア
($\sim 20M_{\odot}$)
重力崩壊



問題点：停滞した衝撃波を復活できるか？

- ⑨ ニュートリノ加熱メカニズム
- ⑨ 音響メカニズム

1次元球対称計算

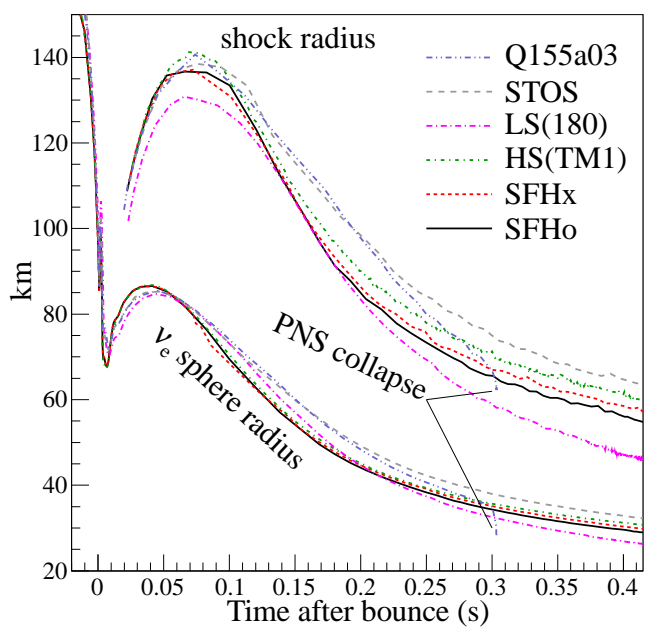


ニュートリノ加熱メカニズムの検証

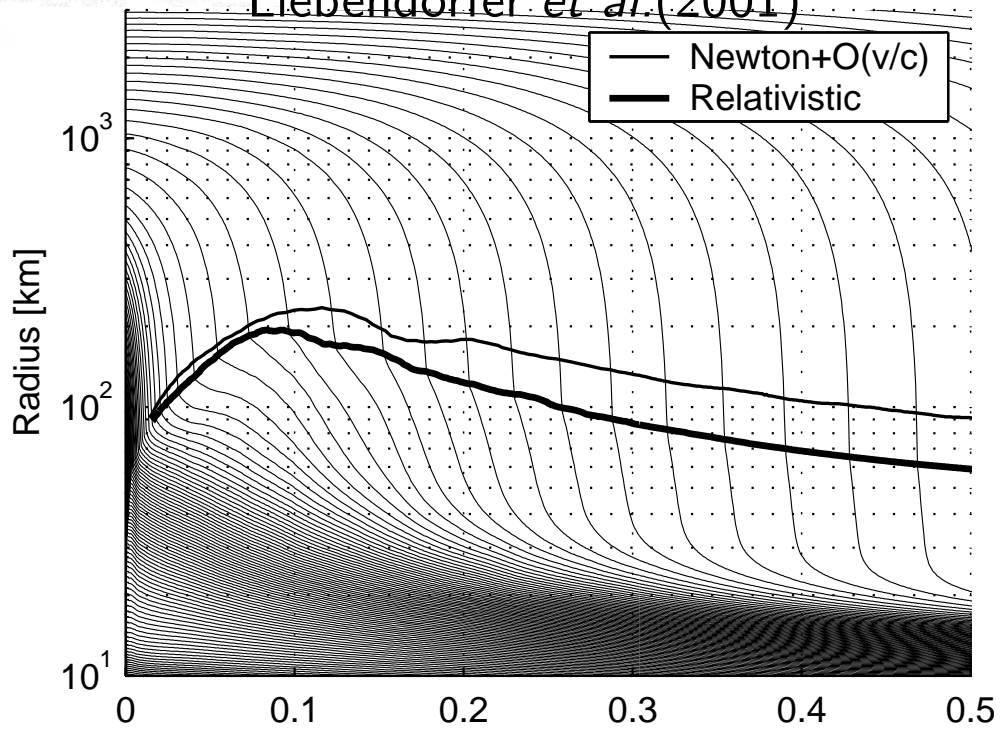
厳密計算では爆発せず

多次元の効果？

Steiner et al. (2013)



Liebrandt et al. (2001)



超新星爆発の第一原理計算へ向けてのステップ

- 一般相対論的ニュートリノ輻射輸送流体計算が究極

これまでの研究

本研究

天体ダイナミクス	1D	2D/3D	2D → 3D
流体	○	○	○
ν輻射輸送	厳密	近似	厳密
一般相対論	○	△	一部

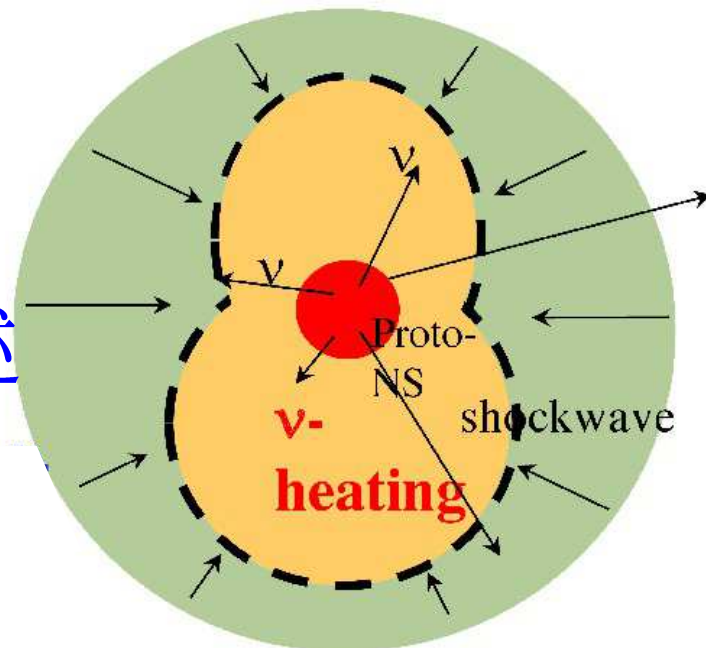
- ニュートリノ輻射輸送に焦点：近似を取り除く

- 衝撃波ダイナミクスの結末
- 多次元でのニュートリノ核物理の影響

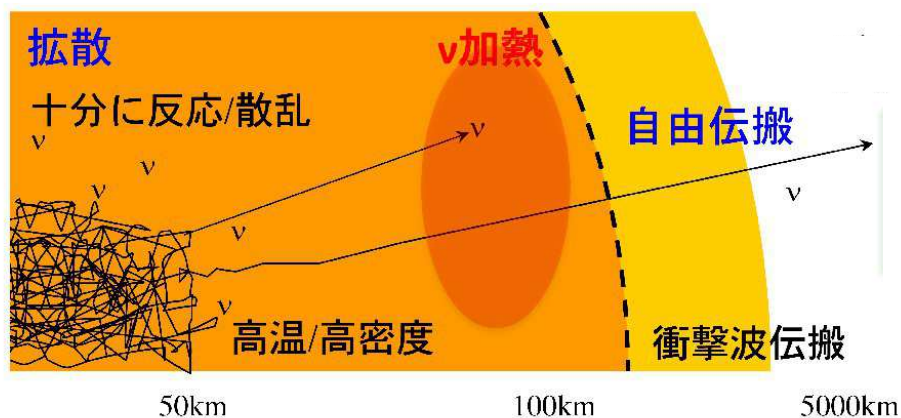
ニュートリノ放射輸送

多次元流体ダイナミクスとニュートリノ加熱

- ⑨ 正確なニュートリノ加熱量
 - ⑨ ν 閉じ込め、放出、吸収
- ⑨ 拡散領域から自由伝搬まで記述
 - ⑨ 中間領域が重要



近似計算から厳密計算へ



ボルツマン方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial f_\nu}{\partial t} + \vec{n} \cdot \vec{\nabla} f_\nu = \frac{1}{c} \left(\frac{\delta f_\nu}{\delta t} \right)_{coll}$$

計算量が膨大

6次元ニュートリノ輻射流体計算コード

Nagakura et al.(2014,2016)

6D ボルツマン + 2D 流体力学 + 2D 重力ポテンシャル

相対論効果：ドップラー効果、角度変化、moving mesh

流れの中でニュートリノ移流 (拡散から自由伝搬まで)

6次元ボルツマン方程式を解く Sumiyoshi&Yamada(2012)

$$f_\nu(r, \theta, \phi; \epsilon_\nu, \theta_\nu, \phi_\nu; t)$$

Boltzmann eq.

$$\frac{1}{c} \frac{\partial f_\nu}{\partial t} + \vec{n} \cdot \vec{\nabla} f_\nu = \frac{1}{c} \left(\frac{\delta f_\nu}{\delta t} \right)_{coll}$$

時間変動項 + 移流項 = 衝突項 (ν 反応)

衝突項は複雑

エネルギー・角度依存
固い方程式、非線形
座標系依存
大規模計算

全方向での非動径方向のニュートリノ流束を記述できる。(Cf. Ray-by-Ray 法)

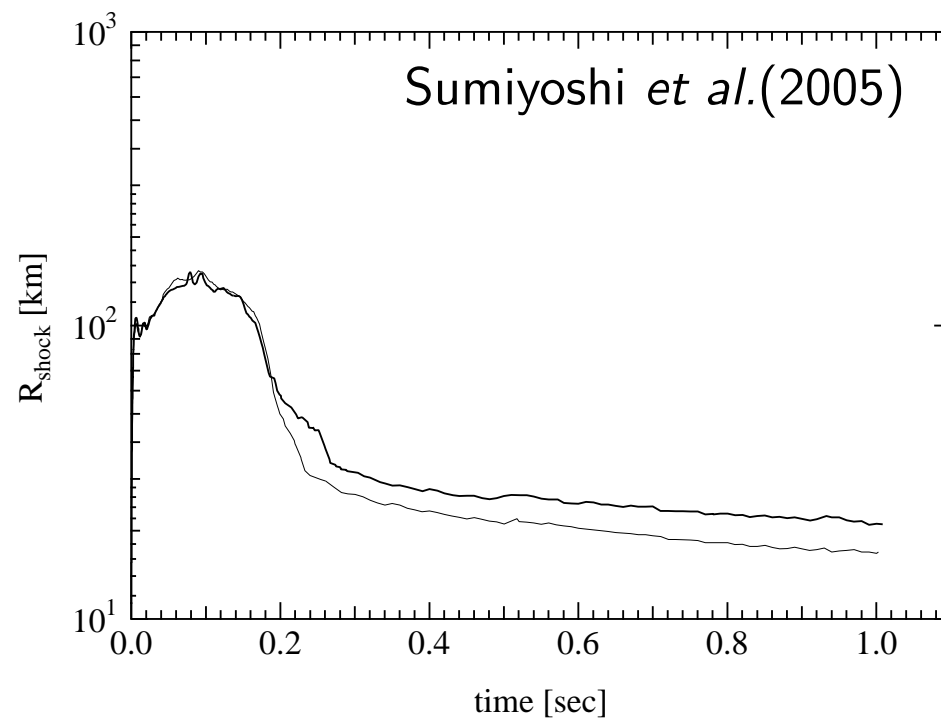
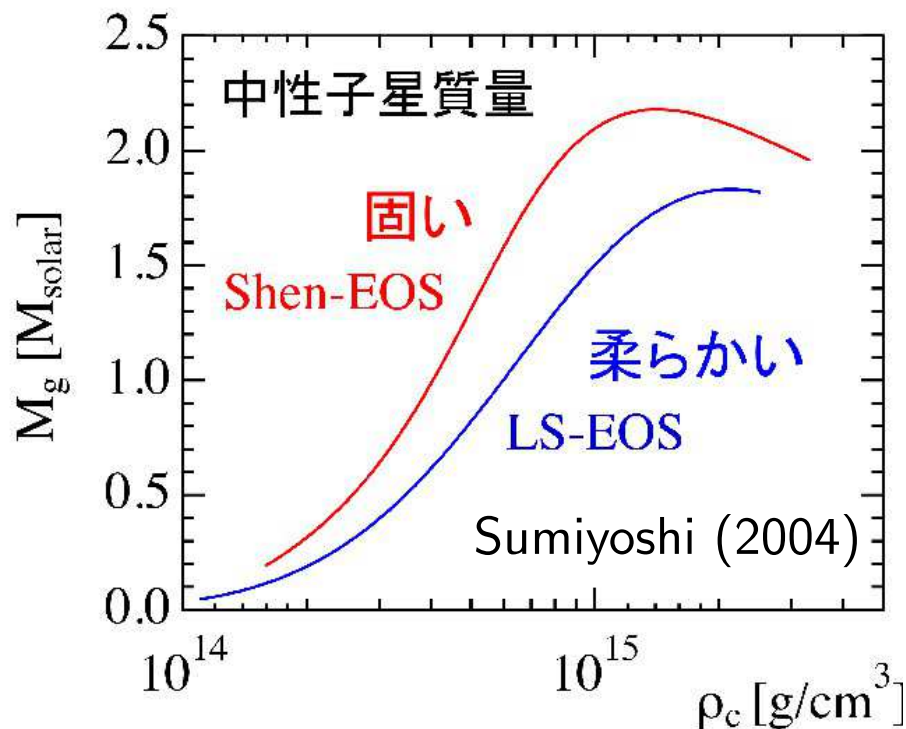
球対称計算と状態方程式

柔らかい状態方程式でも球対称では爆発しない。

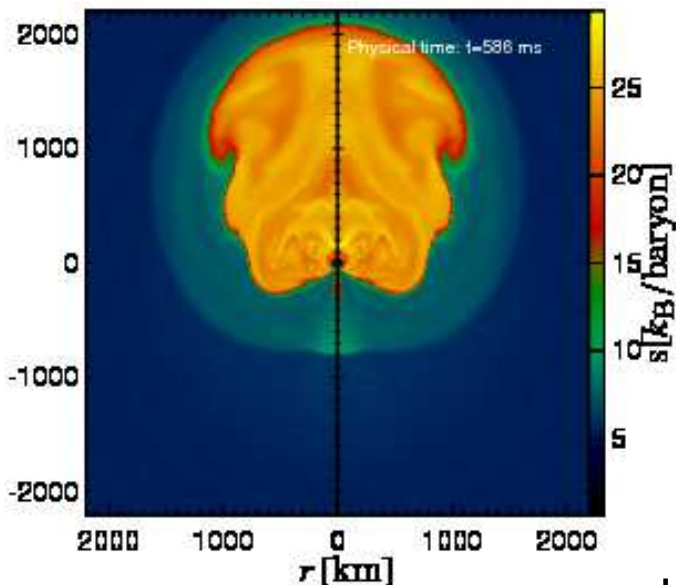
状態方程式データテーブル (代表 2 系統)

固い Shen: Relativistic Mean Field → 古澤 (拡張: 多核種)

柔らかい Lattimer-Swesty: Skyrme

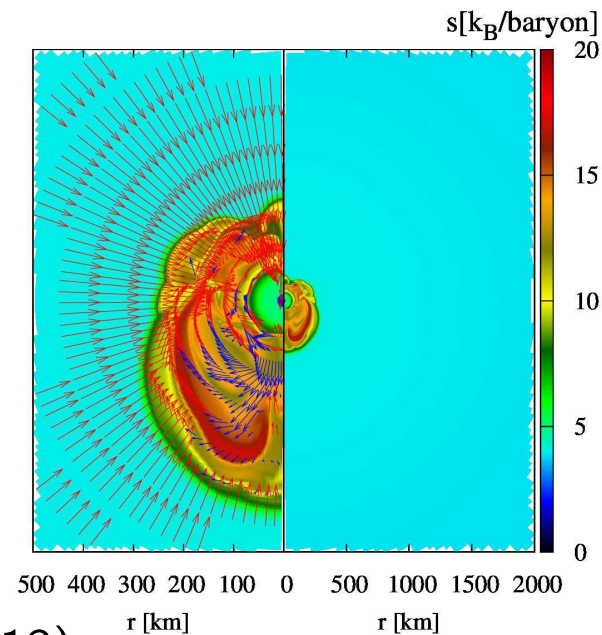


2次元軸対称計算と状態方程式

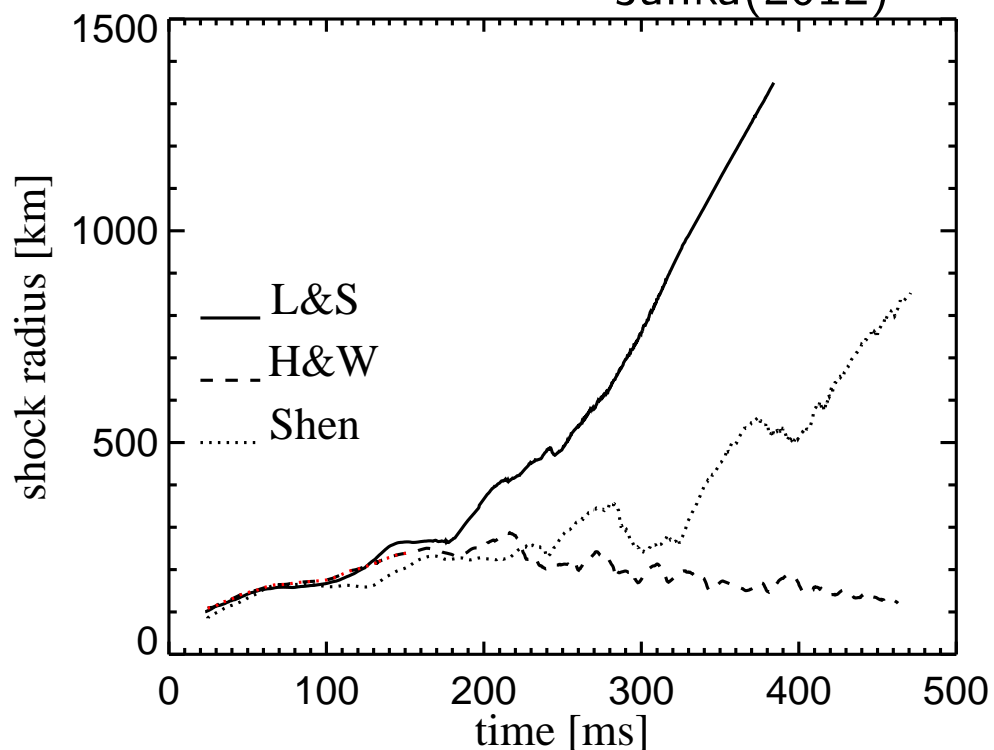


柔らかい状態方程式は
爆発に有利に働く。

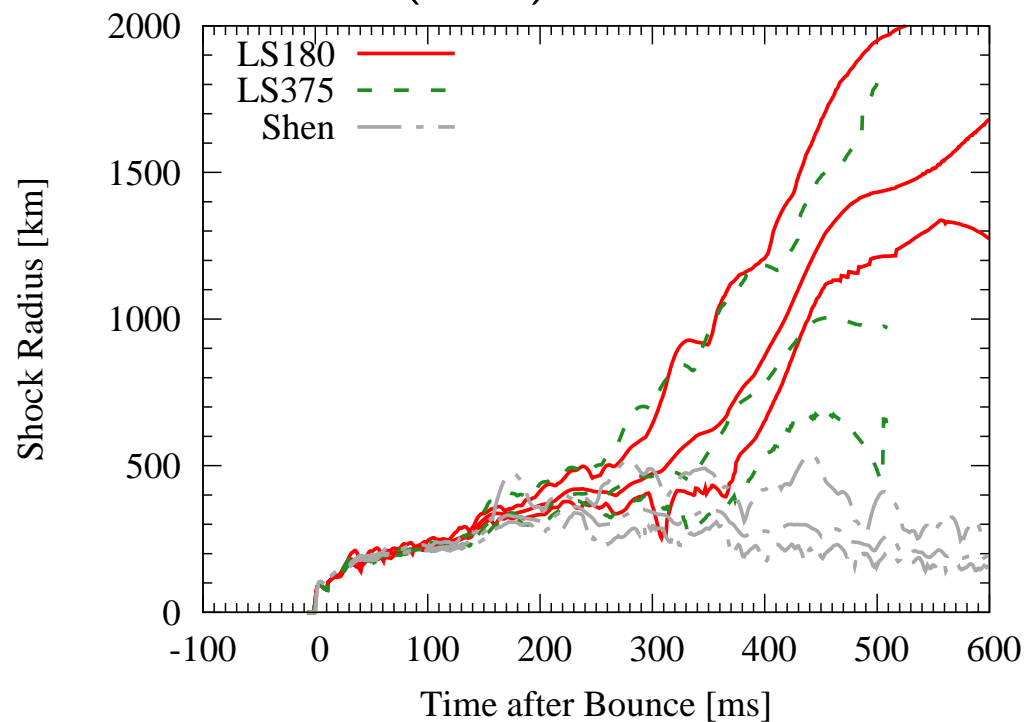
近似手法の違いによっても
爆発/不発の結果が分かれる。



Janka(2012)

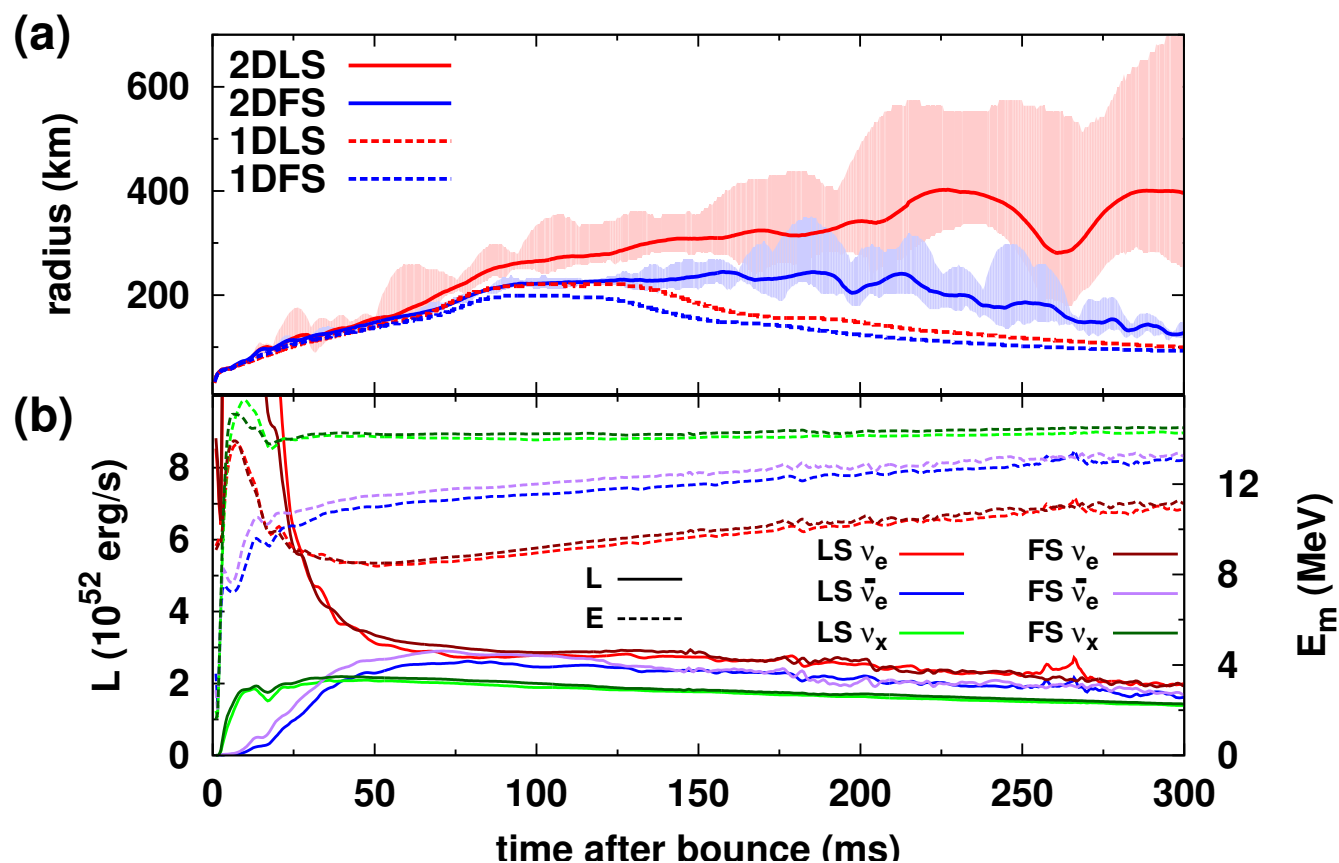
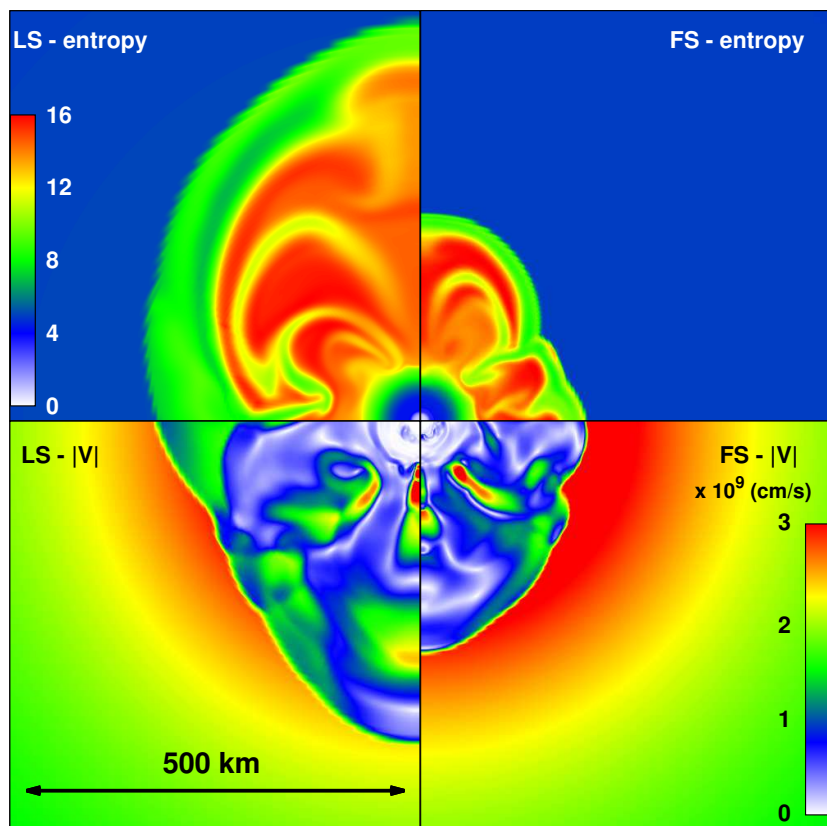


Suwa *et al.*(2013)



2次元軸対称ボルツマン計算での爆発例

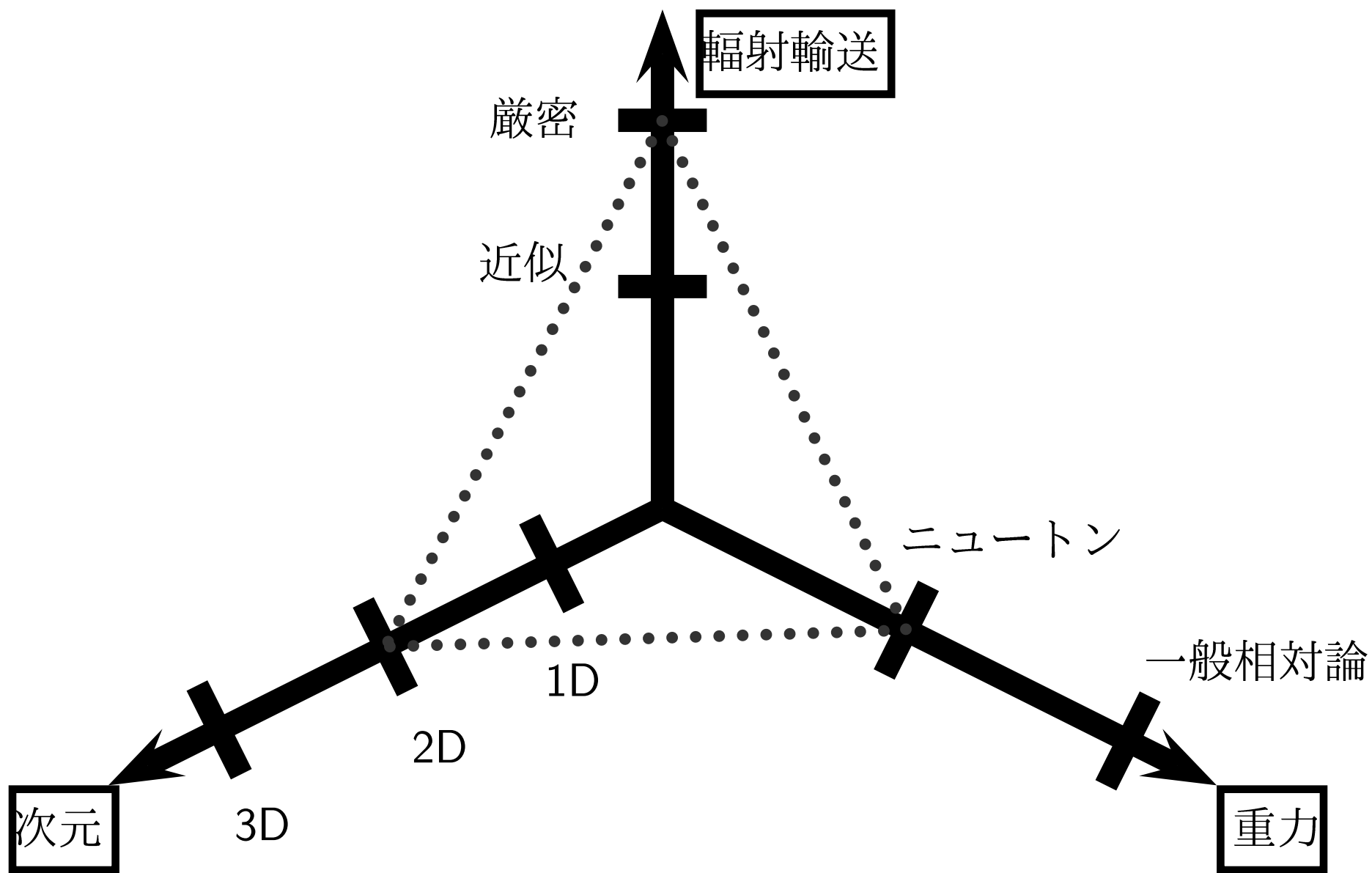
Nagakura *et al.*(2018)



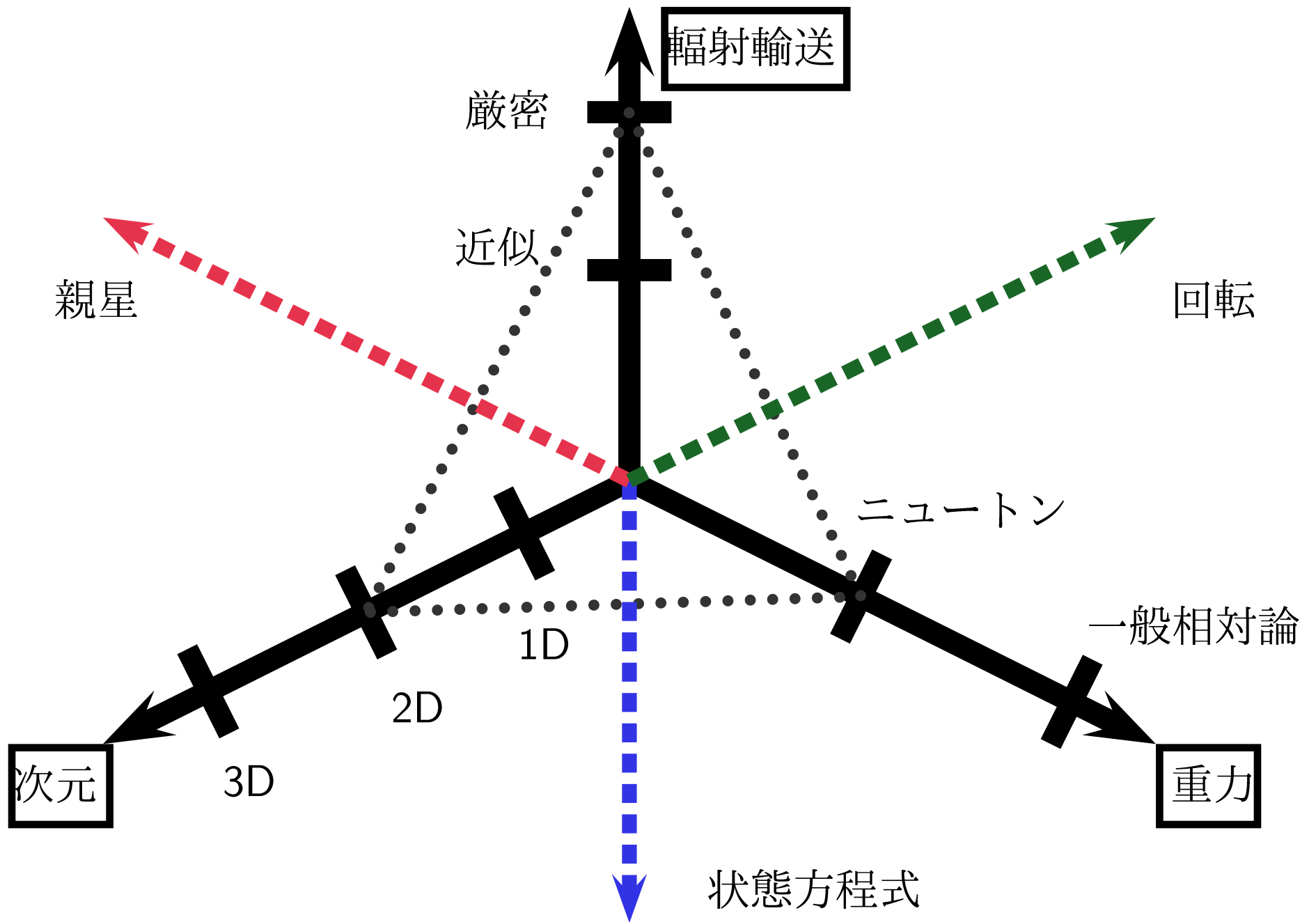
🌀 柔らかい状態方程式はより飛ぶ傾向

🌀 一次元球対称では爆発しない

問題設定の軸とモデル (パラメータ) 空間



問題設定の軸とモデル (パラメータ) 空間



近似手法との比較

⑨ 輻射輸送：ボルツマン & IDSA (Isotropic Diffusion Source Approximation)

⑨ EOS、親星、回転：固定
⑨ 次元、重力：固定

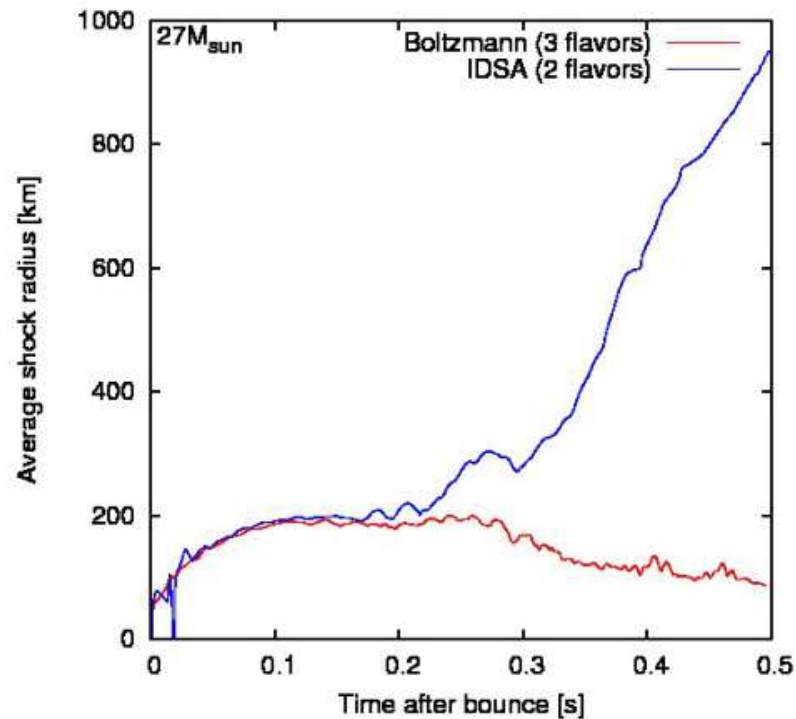
IDSA データ (中村氏)

(ただし、旧バージョンの結果)

(Iwakami '18)

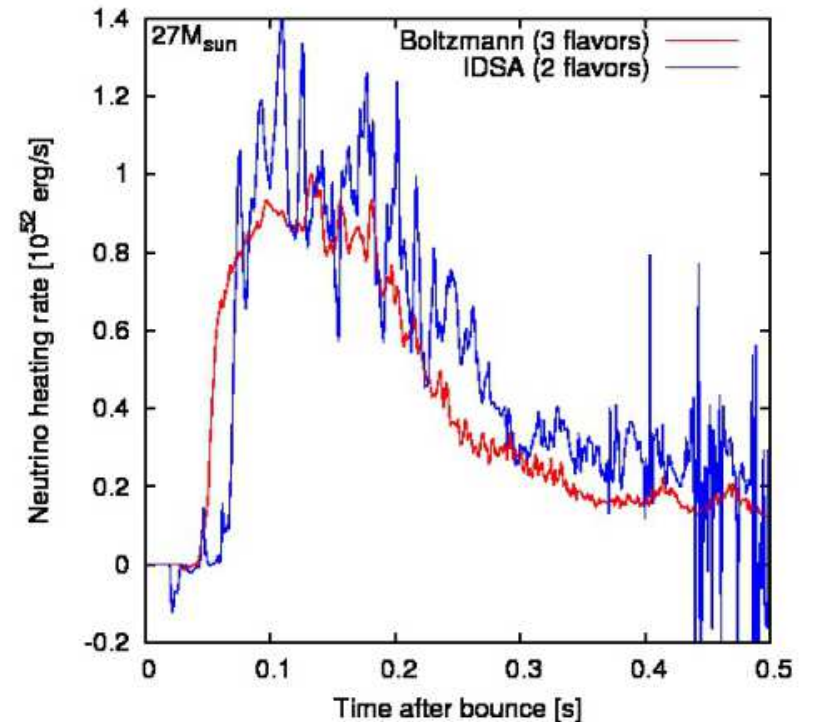
衝撃波位置

27Msol



ν 加熱効率

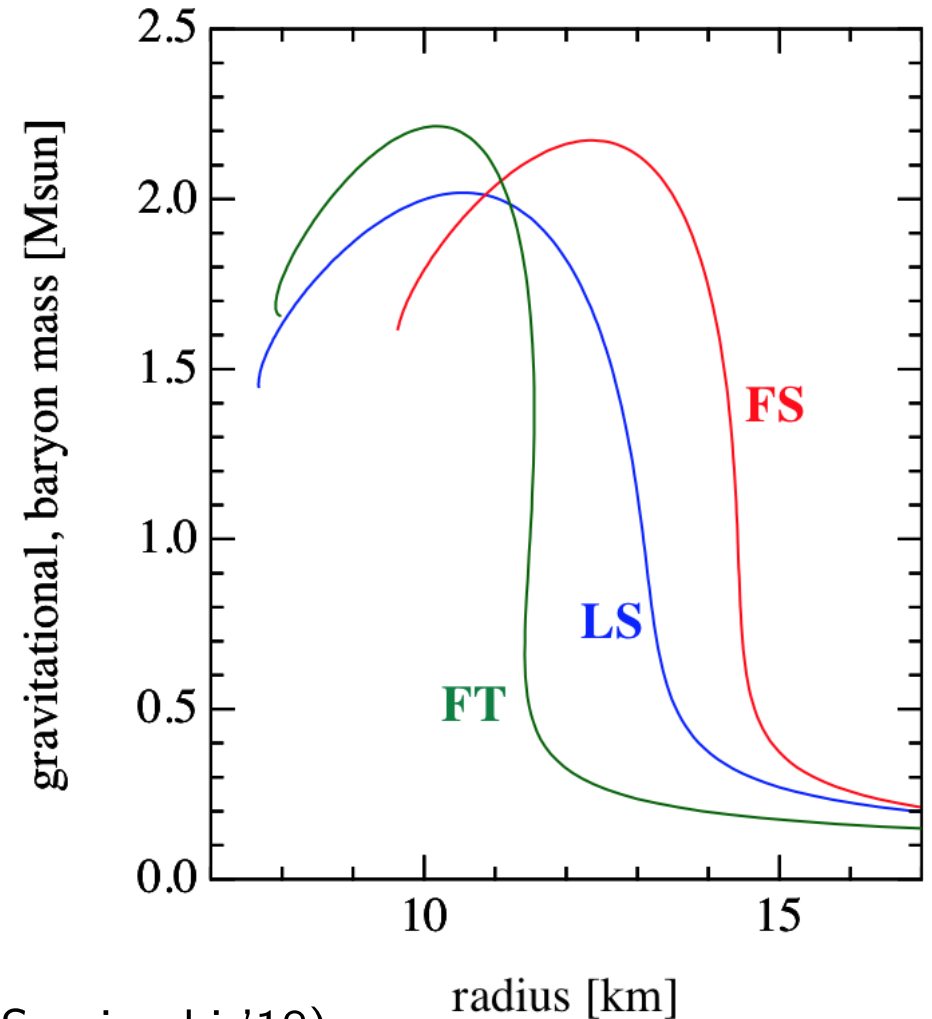
27Msol



詳細な解析と EOS の依存性

6次元ボルツマン輻射流体コードによる EOS の違い

- 詳細解析 (LS & FS)
- 新しい EOS (Furusawa, Togashi *et al.* '17)
- (次元、親星、回転、重力)



(Sumiyoshi '18)

空間3次元ボルツマン計算

2次元から3次元へ
(爆発は弱まる?)

計算コスト

$$(N_r \times N_\theta \times N_\phi) \times (N_\epsilon \times N_{\theta_\nu} \times N_{\phi_\nu})$$

$$2 \text{次元} : (384 \times 128 \times 1) \times (20 \times 10 \times 6)$$

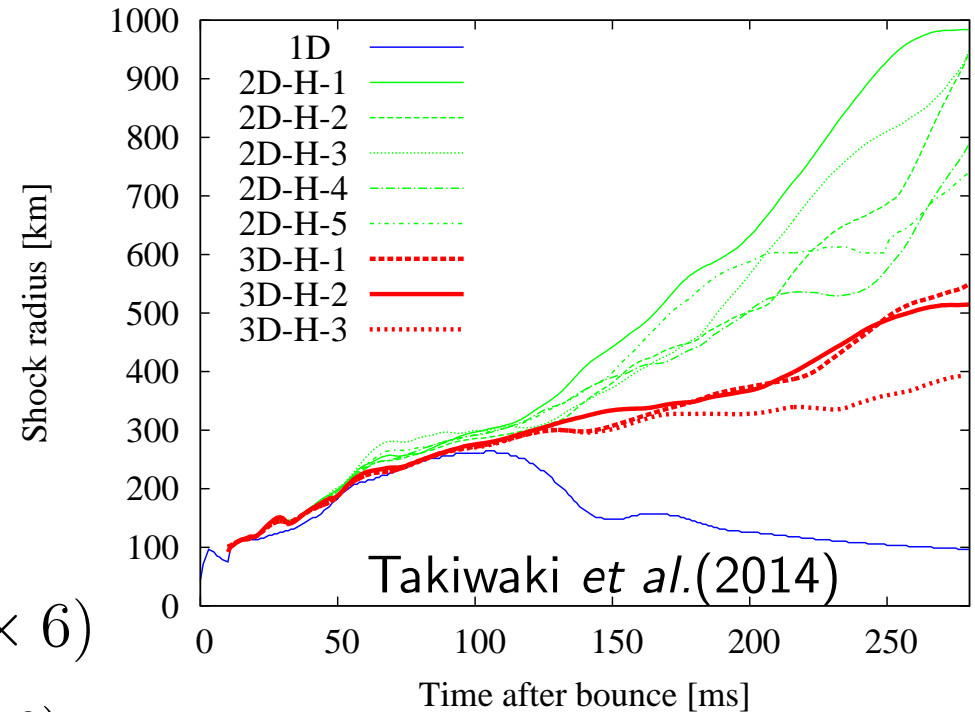
$$3 \text{次元} : (256 \times 64 \times 96) \times (16 \times 6 \times 6)$$

クーラン条件: $\Delta t = \min(dr, rd\theta, r \sin \theta d\phi)$, 1/16 だけ小さい。

ボルツマン計算: $N_r \times N_\theta \times N_\phi \times N_\epsilon \times (N_{\theta_\nu} \times N_{\phi_\nu})^2$

3次元ボルツマン計算は2次元計算の約9倍程度の時間がかかる。

総計で144倍計算時間がかかるが、1536MPI並列から3072MPI並列としても3次元計算は2次元計算に対して72倍の計算コストがかかる。
(参考: 2次元計算 400ms/半年)



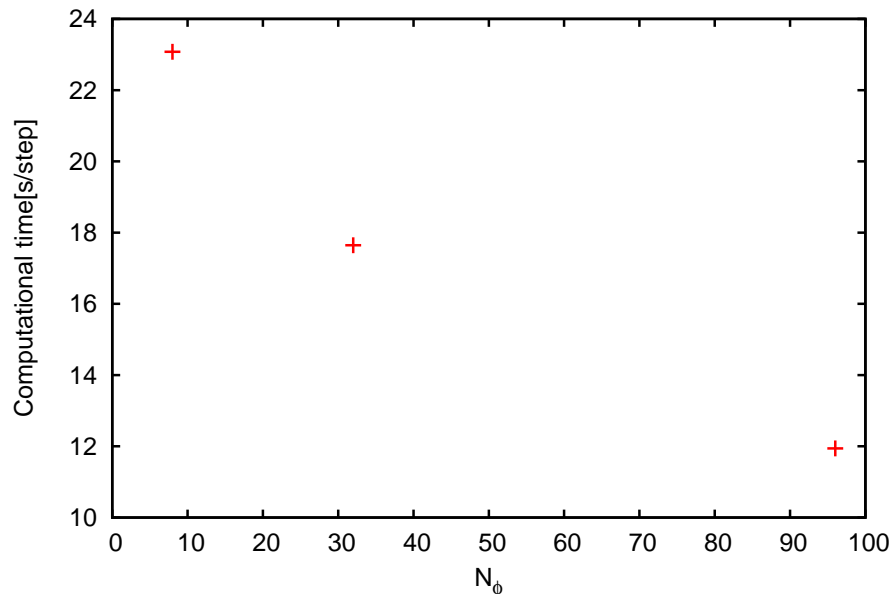
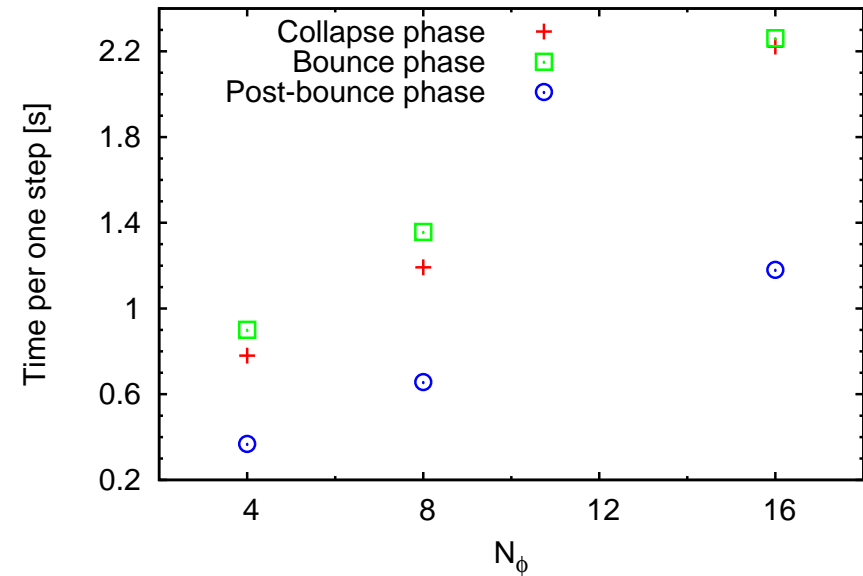
京での空間3次元ボルツマン計算

角度方向の解像度依存性

(FX10: 並列数固定)

FX10で $256 \times 64 \times 96 \times 16 \times 6 \times 6$ の計算が動くことを確認。

(2048MPI, 16threads, MEM~30GB)。



角度方向の解像度依存性

(京: 問題サイズ固定)

「京」で $256 \times 64 \times 96 \times 16 \times 6 \times 6$ の計算を動かせるよう様々なメモリ削減の努力。

「京」でも動くことを確認。
(3072MPI, 8threads, MEM~10GB)。

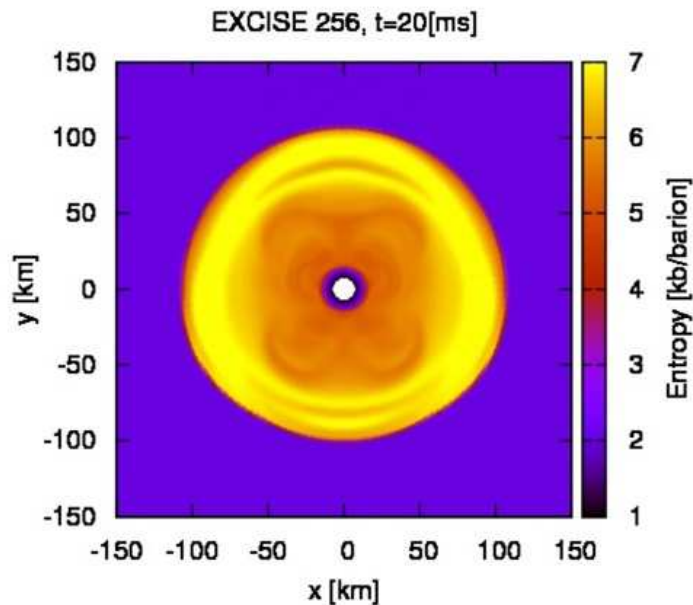
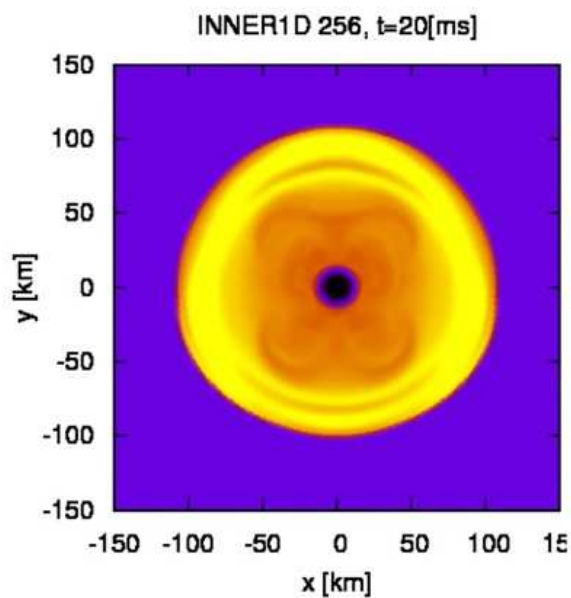
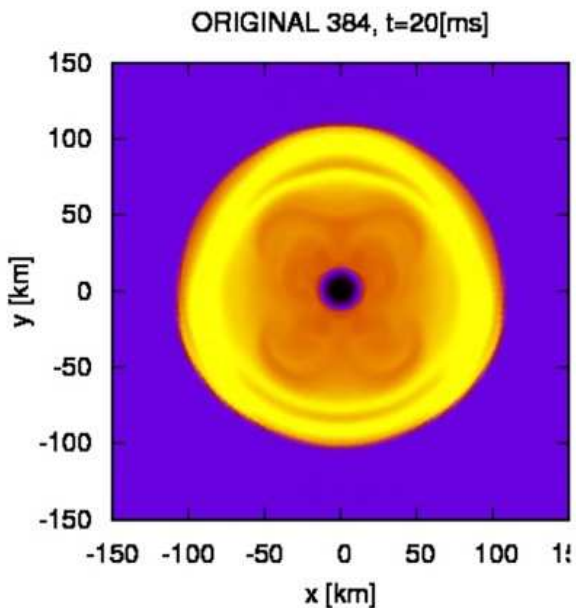
問題設定の妥当性の検証

(Iwakami '18)

2D ボルツマンデータ

内側 ray×ray

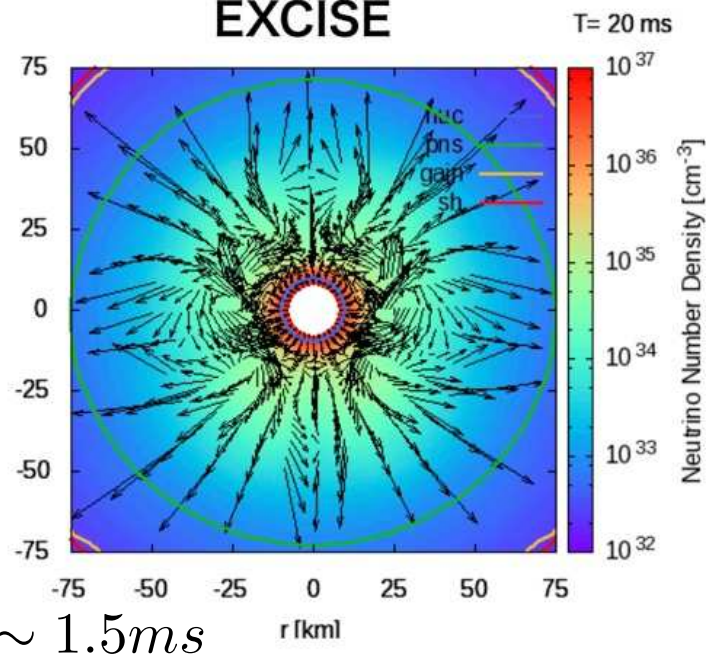
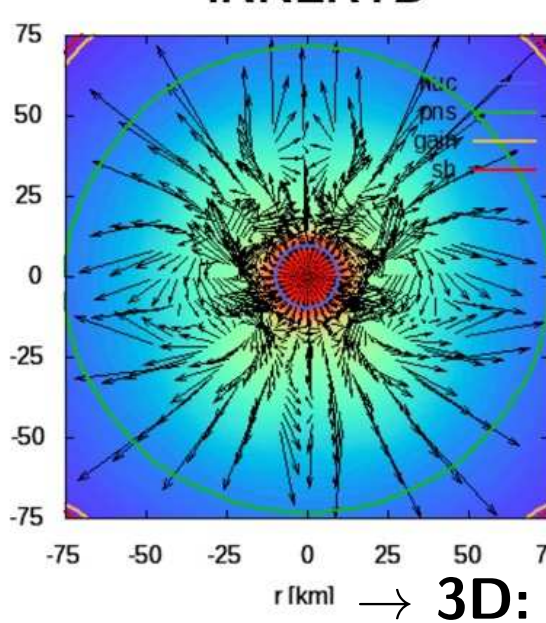
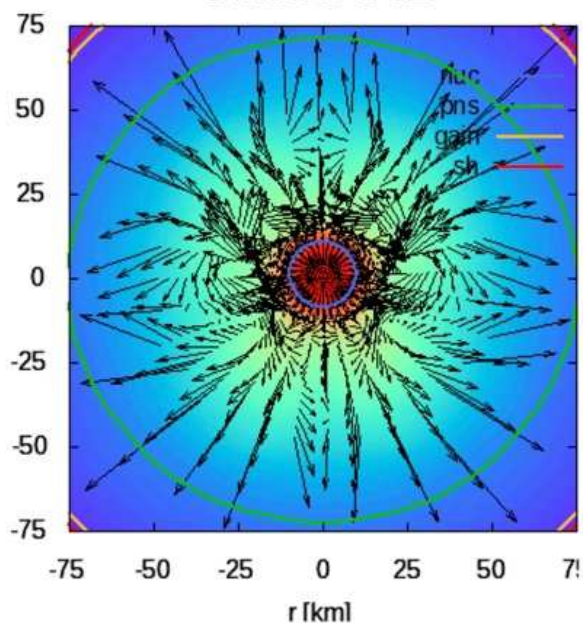
内側くり抜き



ORIGINAL

INNER1D

EXCISE



→ 3D: ~ 1.5ms

重力ソルバー

- ⑨ ニュートン重力 $\Delta\psi = 4\pi\rho$
- ⑨ (差分化後)線形ソルバーの適用 $A\vec{x} = \vec{b}$
- ⑨ 直接解法 ($N \equiv N_r \times N_\theta \times N_\phi$)
 - ⑨ 計算量 $\mathcal{O}(N^3)$ (一回のみ)
 - ⑨ メモリ $\mathcal{O}(N^2)$
 - ⑨ 並列性 (優)

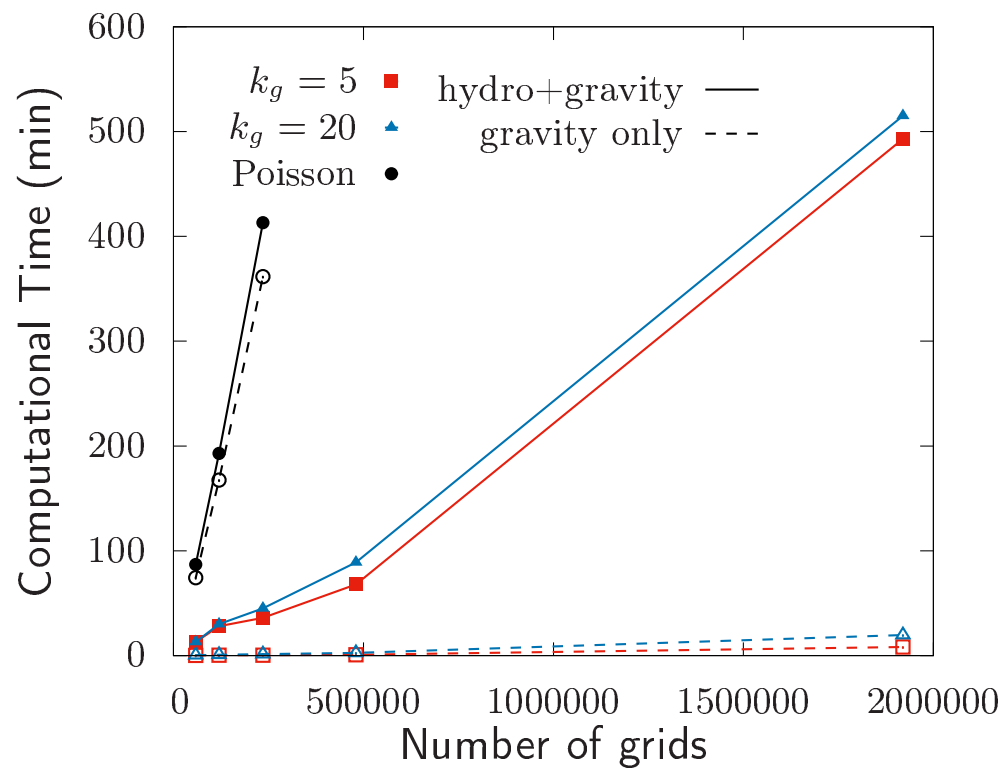
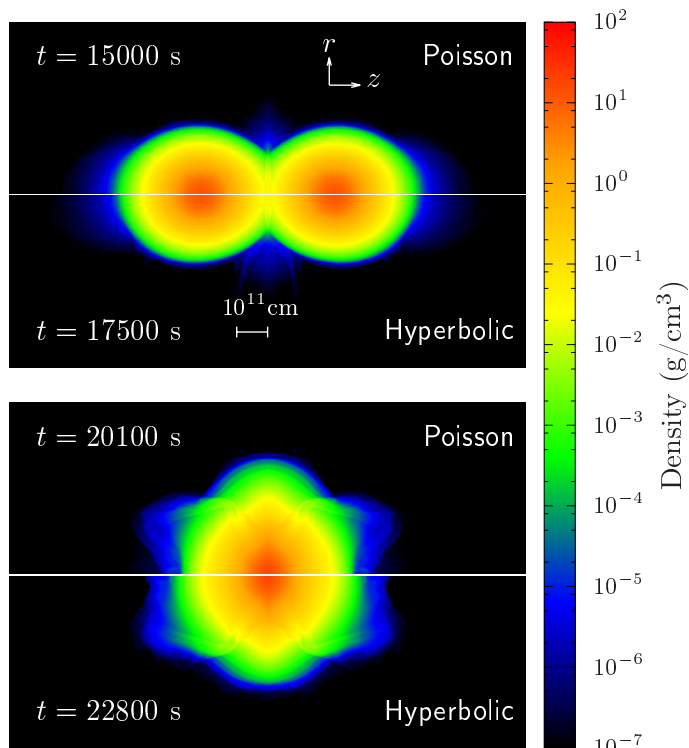
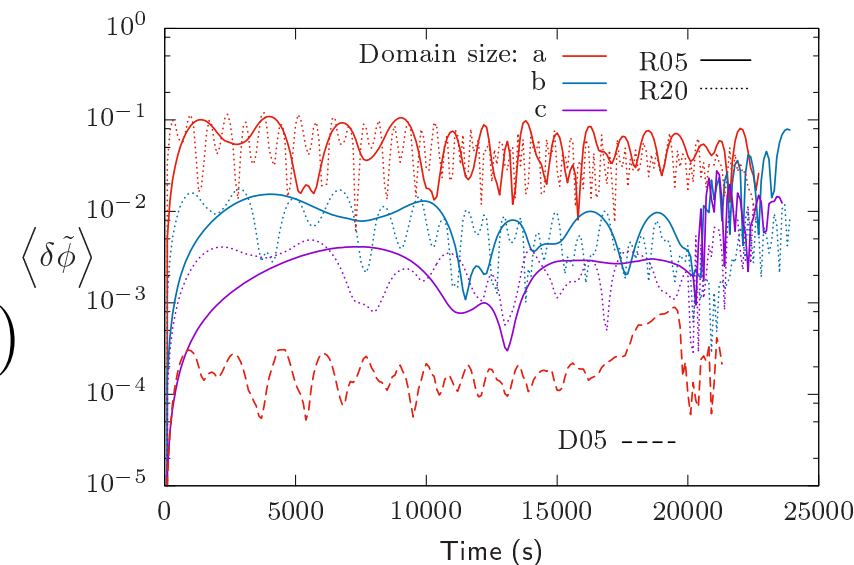
ハイパボリック重カソルバー

Hirai+ '16

$$\left(-\frac{1}{c_g^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \Delta \right) \psi = 4\pi G \rho$$

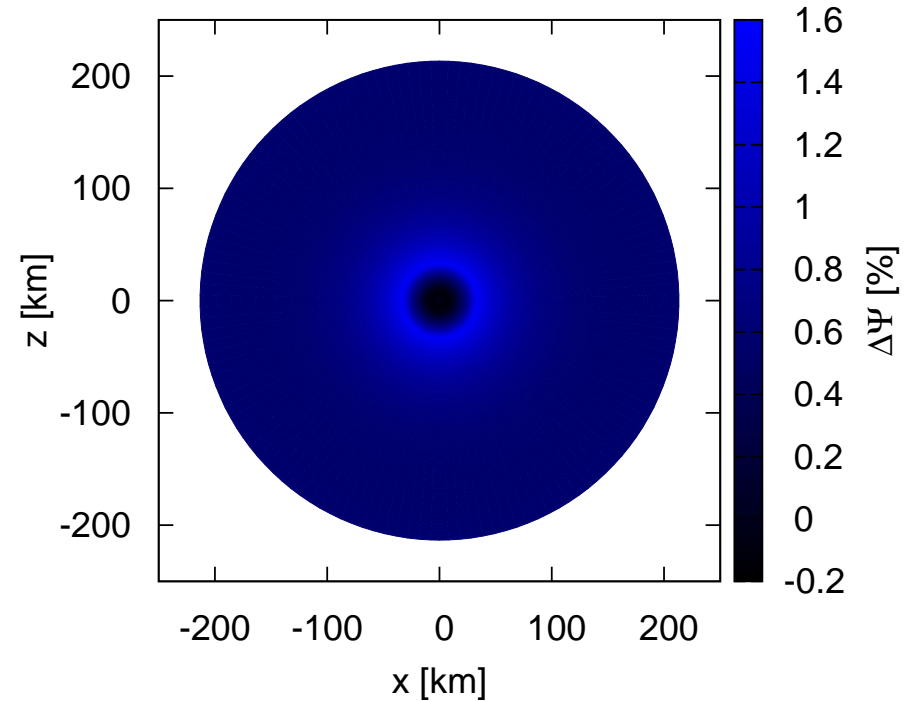
$$\left(-\frac{1}{c_g^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \Delta \right) \psi_E = -\frac{1}{c_g^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi_P \sim \mathcal{O} \left(G \rho (c_s^2 + |\mathbf{v}|^2) \right) \quad (\psi \equiv \psi_P + \psi_E)$$

$$\left| \frac{\psi_E}{\psi} \right| \sim \mathcal{O} \left(\frac{c_s^2 + |\mathbf{v}|^2}{c_g^2} \right)$$



ハイパボリック重力ソルバーの実装

ソルバー	割合 (ψ_P)	割合 (ψ_H)
Gravity	0.0029	0.00083
Hydro	0.0026	0.0026
Boltzmann	0.96	0.96
その他込み全体	1.0	1.0



- メモリ増加 : $\mathcal{O}(N)$
- 計算速度 (重力パート) : 30% UP (OpenMP 化で 8 倍程度向上予定)
- 計算誤差 : 1 ~ 2% (境界条件の改良)

ポスト京へ向けた整備

⑨ データ出力とデータ解析

⑨ 空間3次元 × 運動量空間3次元

⑨ データストレージサーバ (380TB 早稲田+沼津高専)

⑨ JLDG の活用

⑨ コードの構造化

⑨ 部品ごとに整理

⑨ 一般相対論化など

まとめと展望

- ⑨ 第一原理的な計算による超新星研究
 - ⑨ 流体と共にニュートリノ輻射輸送を厳密に解く
- ⑨ 空間2次元計算による核物理の影響
 - ⑨ 柔らかい状態方程式で爆発
- ⑨ 空間3次元でバウンス後のダイナミクスの変化を調べる
 - ⑨ コードのチューニング
- ⑨ 空間2次元で親星、回転、核物理の影響を探る