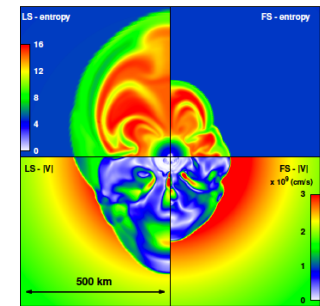


多次元ボルツマン輻射流体計算による 重力崩壊型超新星の研究

住吉光介 (沼津高専)

重点課題9, サブ課題B, 爆発天体-超新星ボルツマン班



ニュートリノ輻射輸送: 近似から厳密計算へ
究極の第一原理計算へ向けて

空間 2 次元(軸対称): 状態方程式の影響
空間 3 次元: 計算コードの発展/テスト

[arxiv:1702.01752](https://arxiv.org/abs/1702.01752)

超新星研究グループメンバー

- 長倉洋樹 (Caltech)
- 岩上わかな, 大川博督(京大基研/早稲田大)
- 原田了 (東大), 山田章一 (早稲田大),
- 住吉光介 (沼津高専), 古澤峻 (FIAS→理研)
- 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

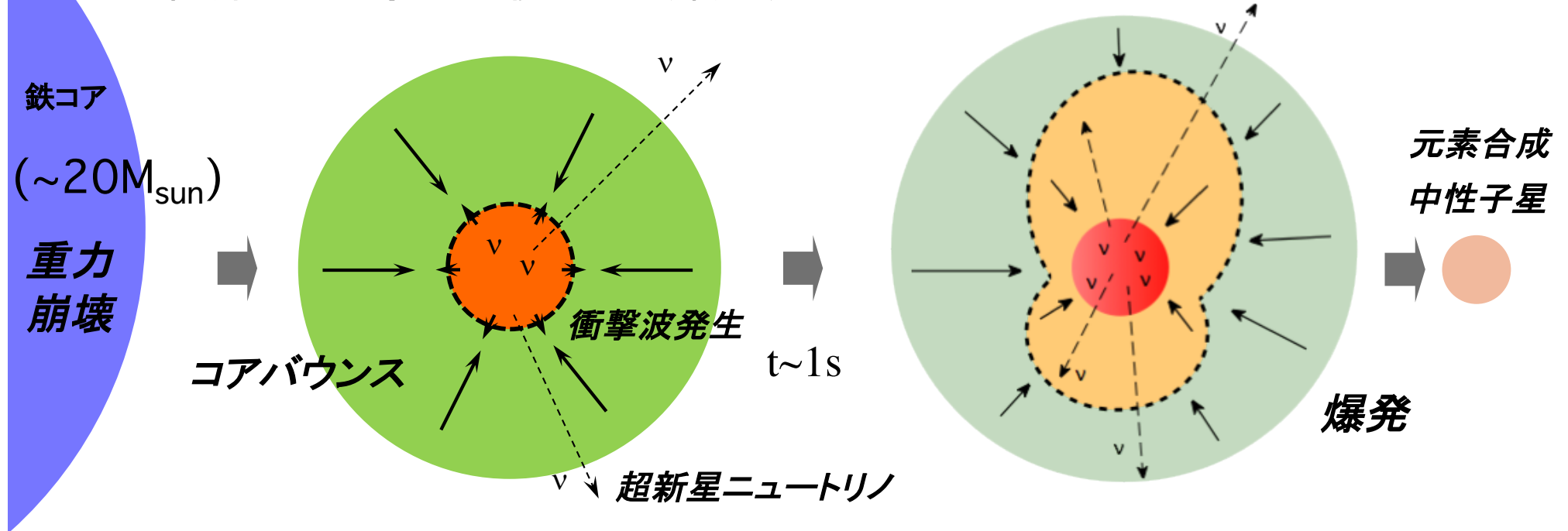


- 固武慶, 中村航 (福岡大), 滝脇知也 (国立天文台)
- 黒田仰生(バーゼル大学), 諏訪雄大 (京大基研)

系統計算によるメカニズム探索と観測連携

超新星爆発解明の新たな段階: 探索から検証へ

停滞した衝撃波が復活して爆発するか？ 爆発の本質は？



現状 • 1D (球対称): 爆発しない, 2D (軸対称)/3D: 爆発する
(ただし, 近似計算と厳密計算に違いあり)

残る課題

- 流体力学
- ニュートリノ輻射輸送
- 一般相対論

天体ダイナミクス

- 状態方程式
- 電子捕獲反応
- ニュートリノ核反応

原子核物理

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流体計算が究極

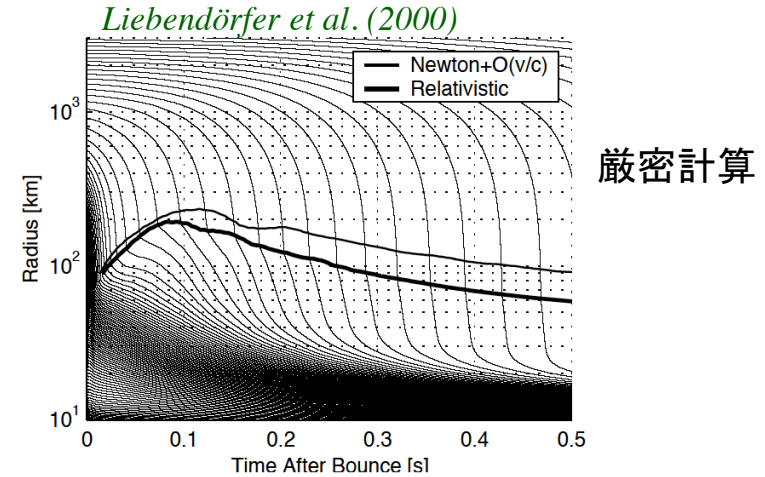
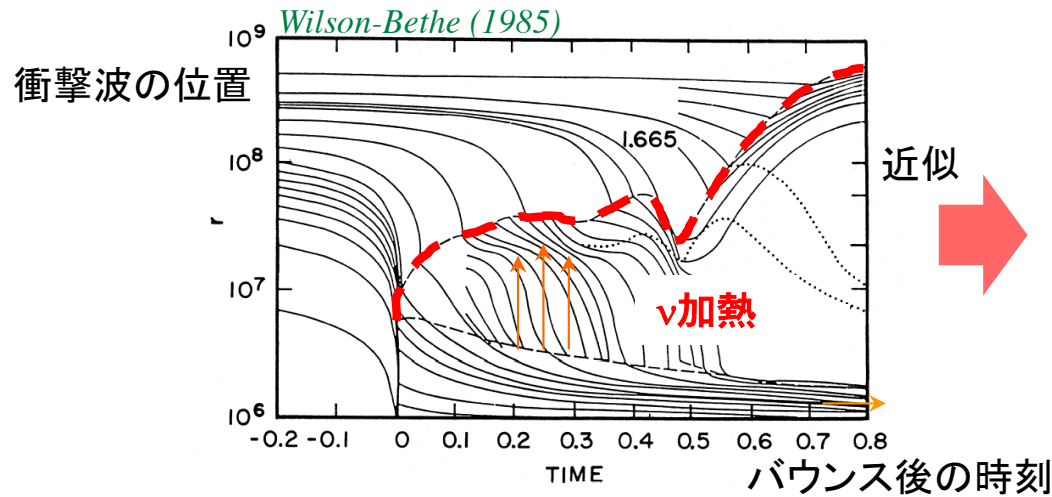
これまで			→ 本研究	今後
天体ダイナミクス	1 D	2 D/3D		2D →3D
流体	○	○		○
ニュートリノ 輻射輸送	厳密	近似	➡	厳密
一般相対論	○	△		一部 →○

ニュートン重力

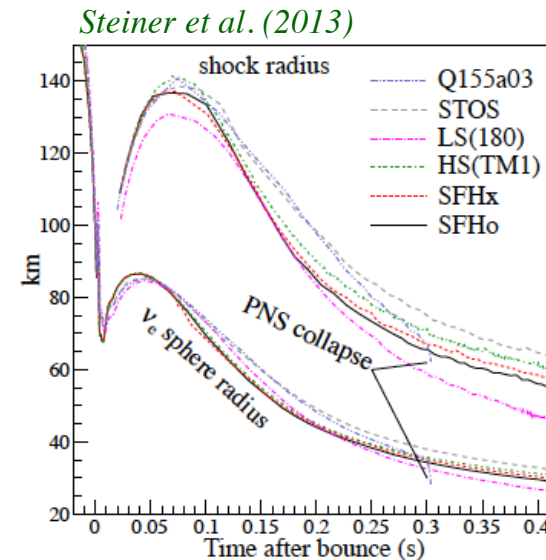
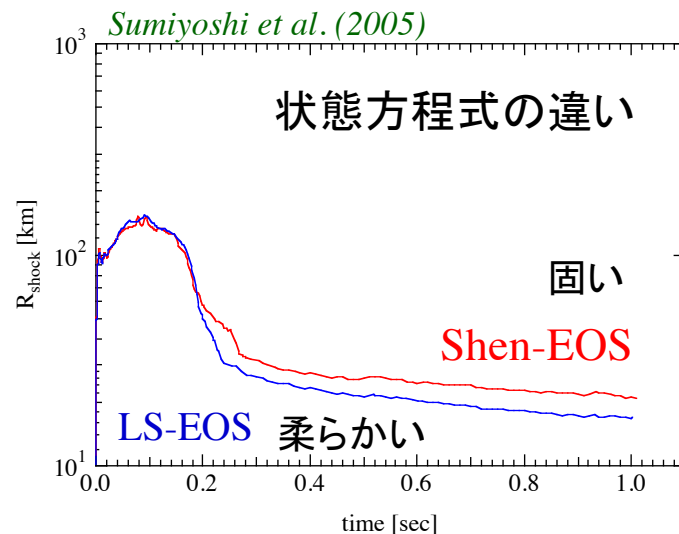
- ニュートリノ輻射輸送に焦点：近似を取り除く
 - 衝撃波ダイナミクスの結末は？
 - 2D/3Dでニュートリノ核物理の影響を探りたい

球対称: 第一原理計算により確立

- ニュートリノ加熱メカニズムを検証 → 不十分



- 原子核物理の依存性を調べた → 爆発しない



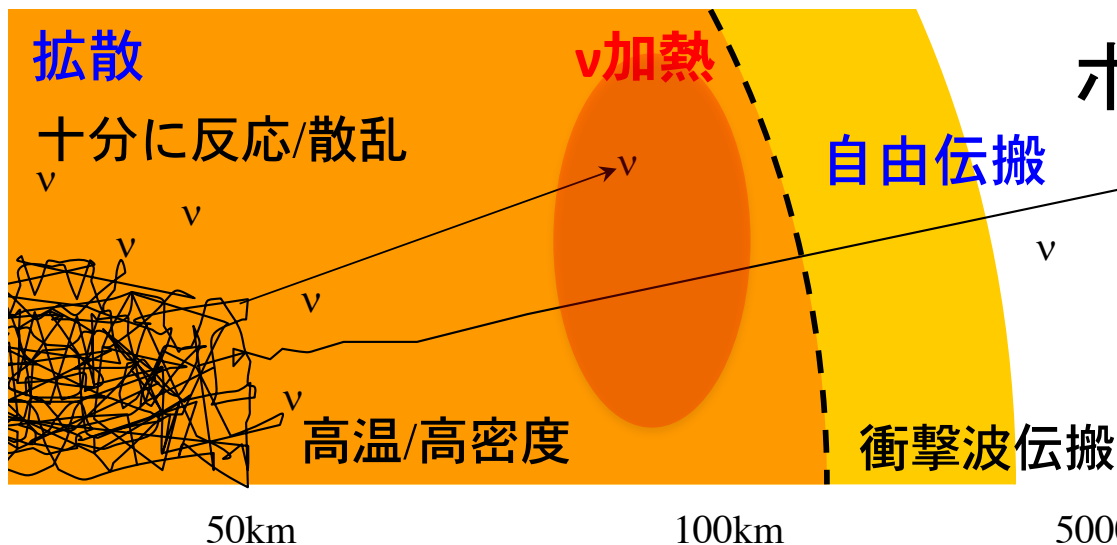
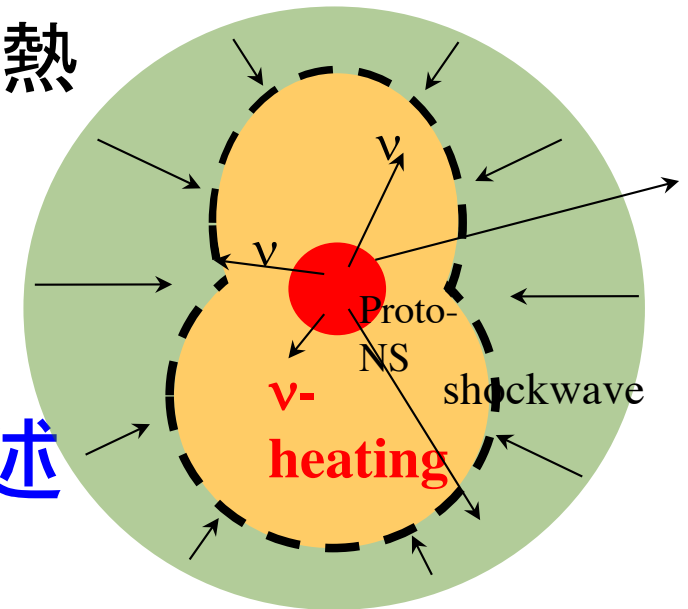
→ 2次元, 3次元ではどうなのか?

ニュートリノ輻射輸送が鍵を握る

多次元流体ダイナミクス＋ニュートリノ加熱

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

→ 近似計算から厳密計算へ



ボルツマン方程式を解く必要

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

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. ApJS (2014), ApJS (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, ApJS (2012)*

$$f_{\nu}(r, \theta, \phi; \varepsilon_{\nu}, \theta_{\nu}, \phi_{\nu}; t) \quad \text{空間 3 次元 + 運動量 3 次元}$$

Boltzmann eq.

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

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

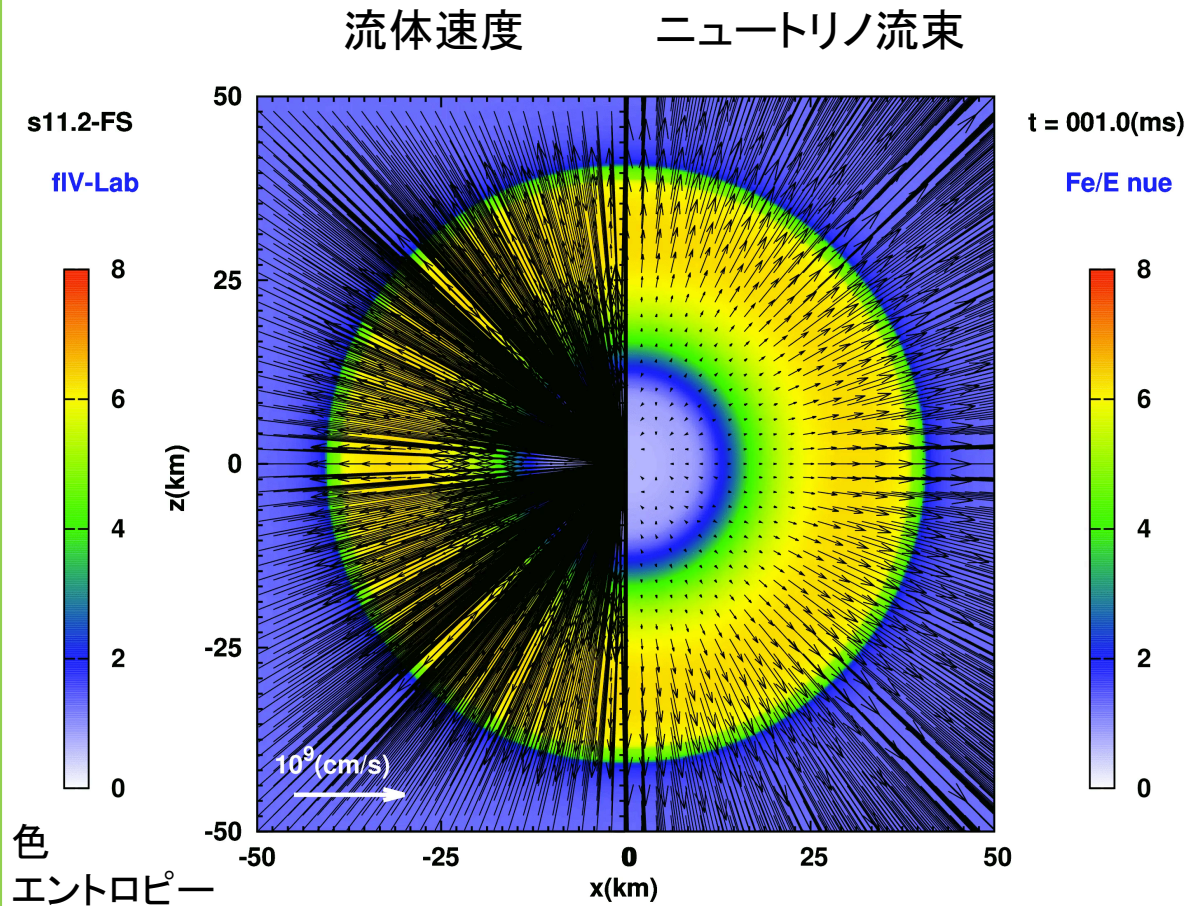
→ 大規模計算

全領域で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*

6次元ニュートリノ輻射流体計算コードの特徴

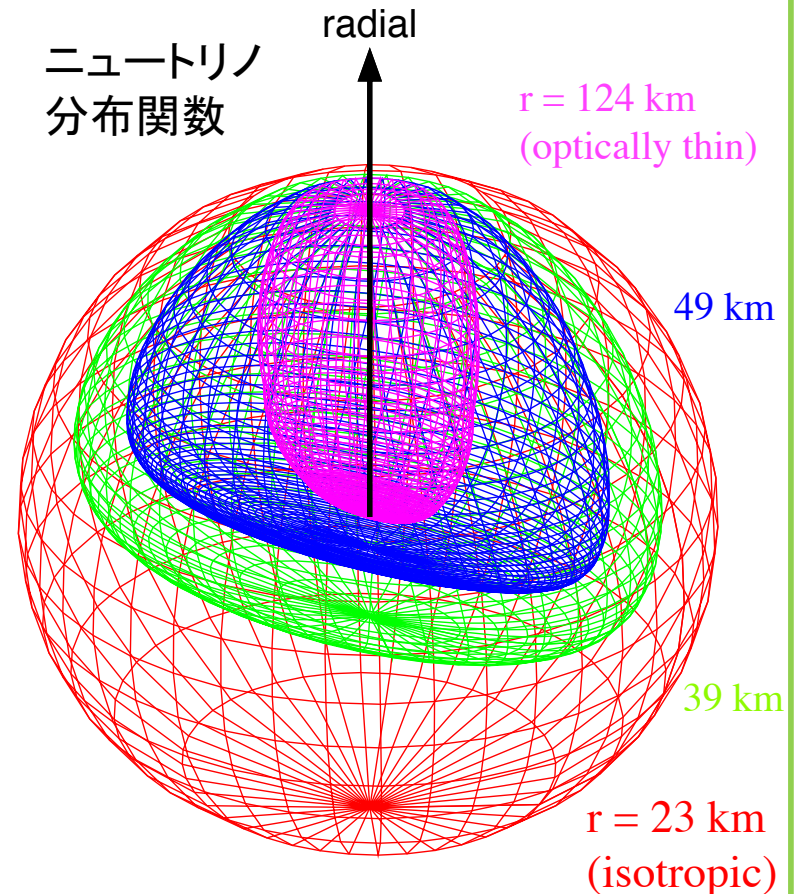
Nagakura et al., arxiv:1702.01752

– 流体中のニュートリノ輻射



- 対流中では流体と一緒に流束
- 外へ動径/非動径方向の流束

– 角度分布の非対称性

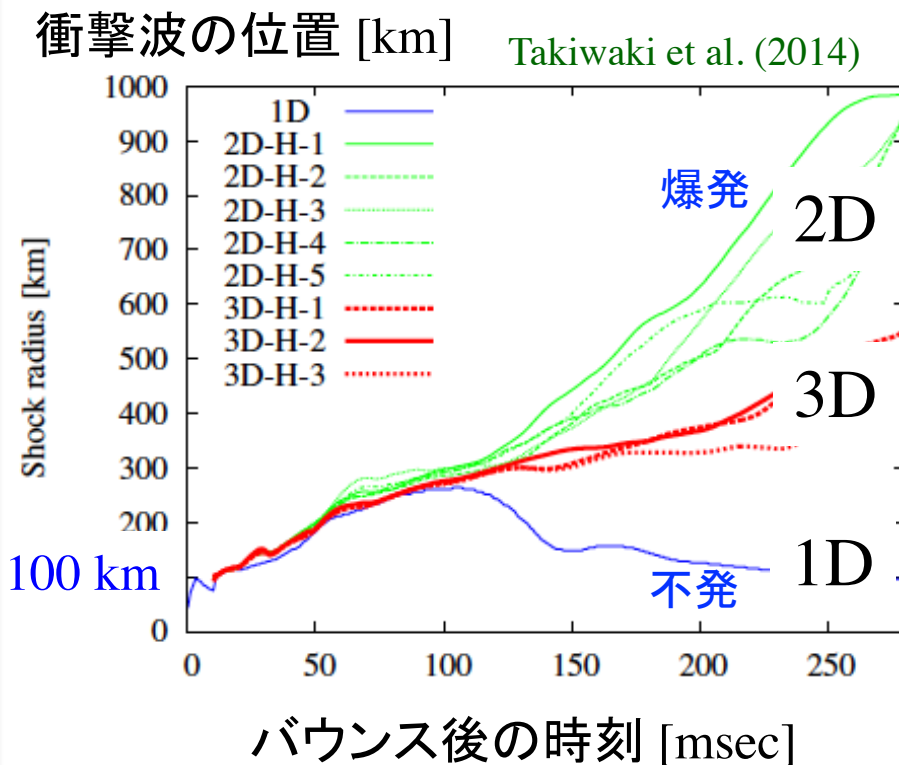


- 等方から前方集中へ
- r方向周りで非対称

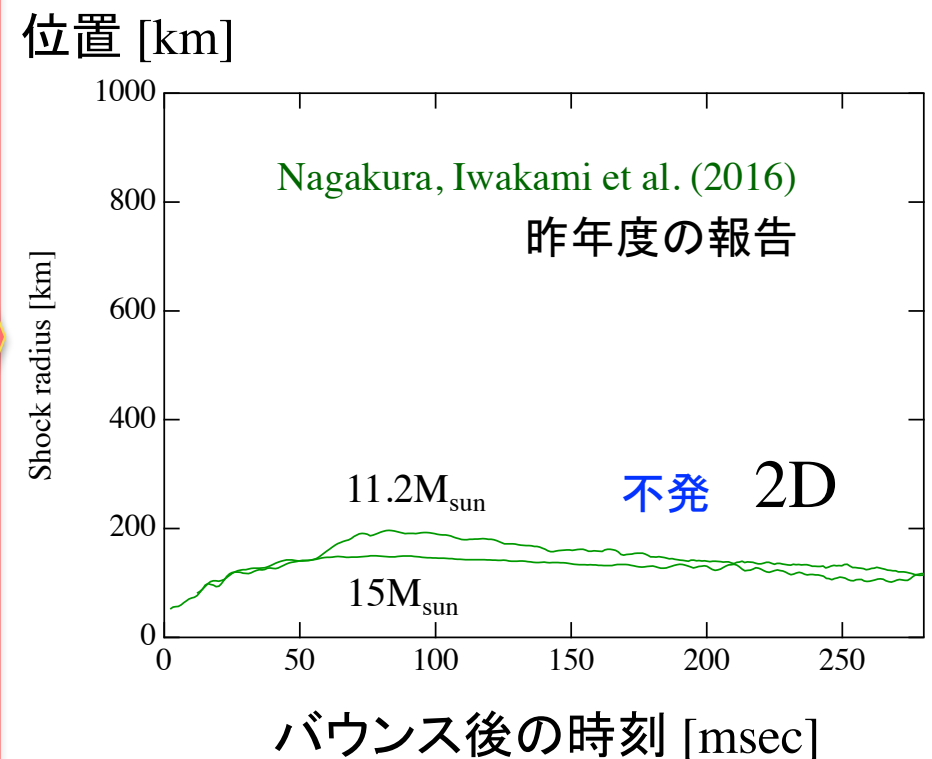
空間 2 次元(軸対称)厳密計算が可能となった

大質量星の重力崩壊から衝撃波伝搬まで: 爆発の可否を探る

- 近似を含むが3Dへ



- 厳密な扱いで2Dを実現



→ 厳密計算では爆発しないのか? 但し, 状態方程式は固定

状態方程式(EOS)の影響を調べる

1985

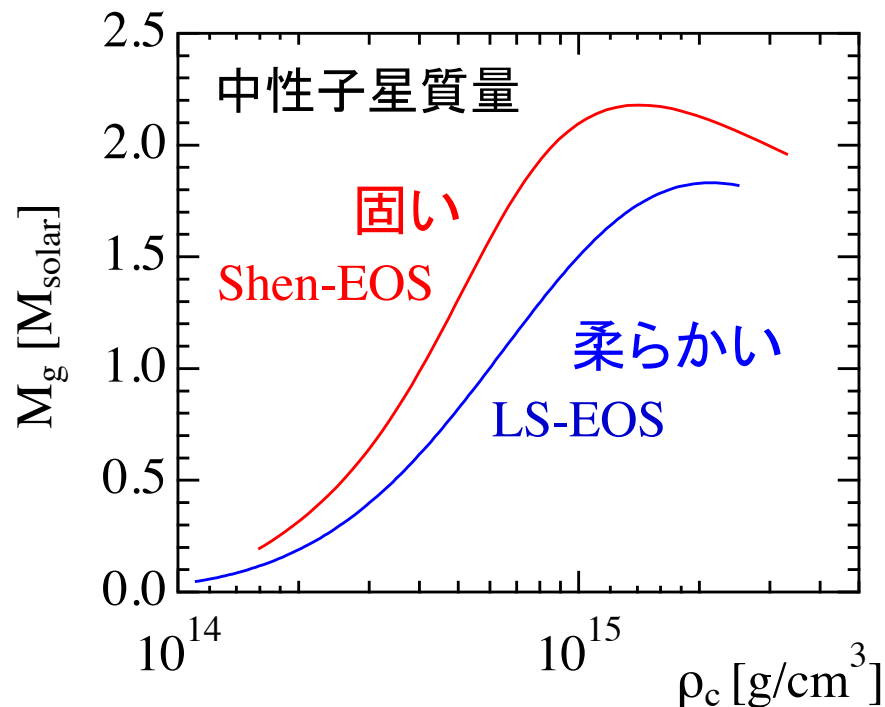
2005

柔らかいEOSが有利だろう → 球対称爆発しない

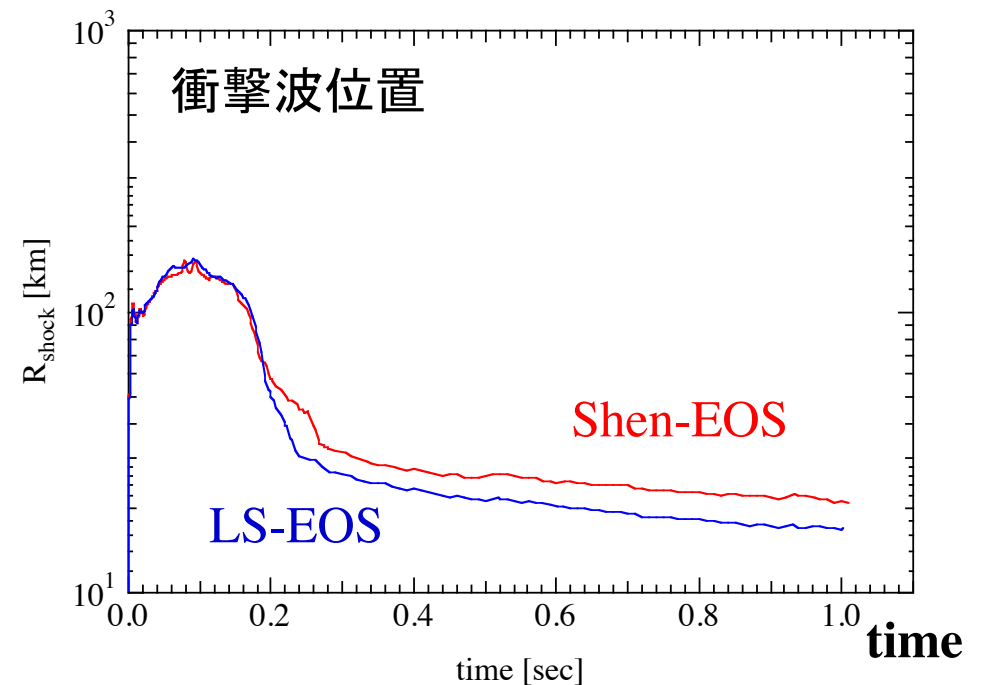
- EOSデータテーブル (代表2系統)

固い – Shen: Rel. Mean Field → 古澤 (拡張:多核種)

柔らかい – Lattimer-Swesty: Skyrme



Sumiyoshi (2004)

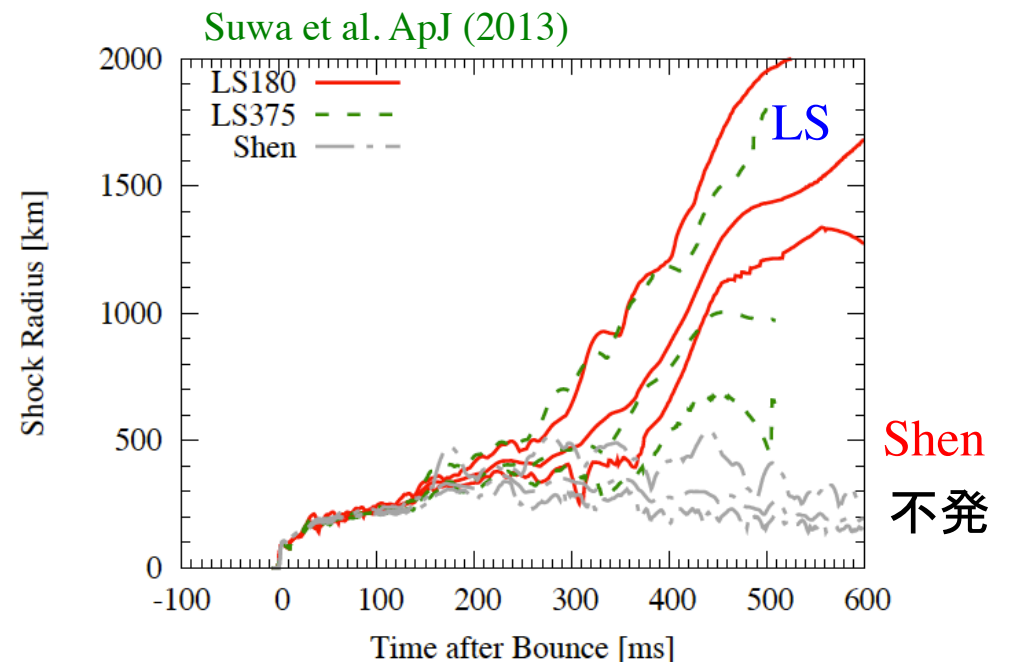
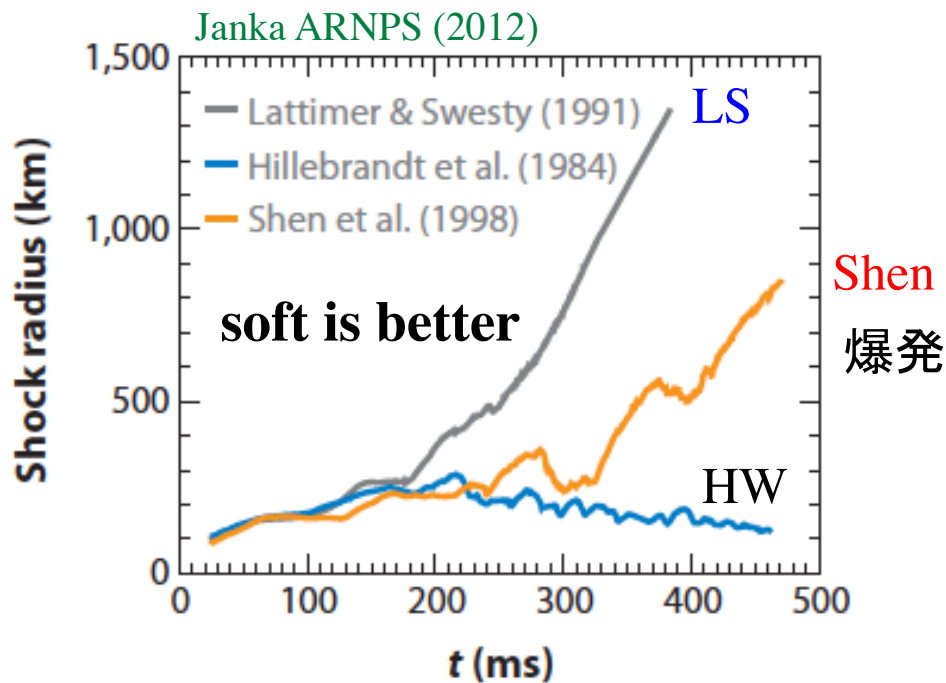
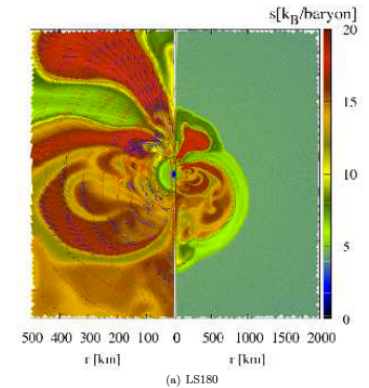
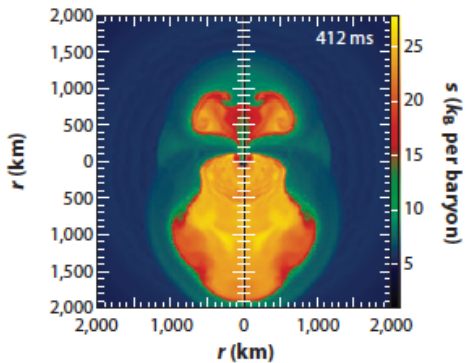


$15 M_{\text{solar}}$

Sumiyoshi et al. (2005) 10

2D軸対称での状態方程式(EOS)の影響

- 柔らかいEOSが有利か
- 爆発/不発の結果分かれる
近似計算処方の違い



ニュートリノ輻射輸送を厳密に → 2D EOSの影響を調べたい

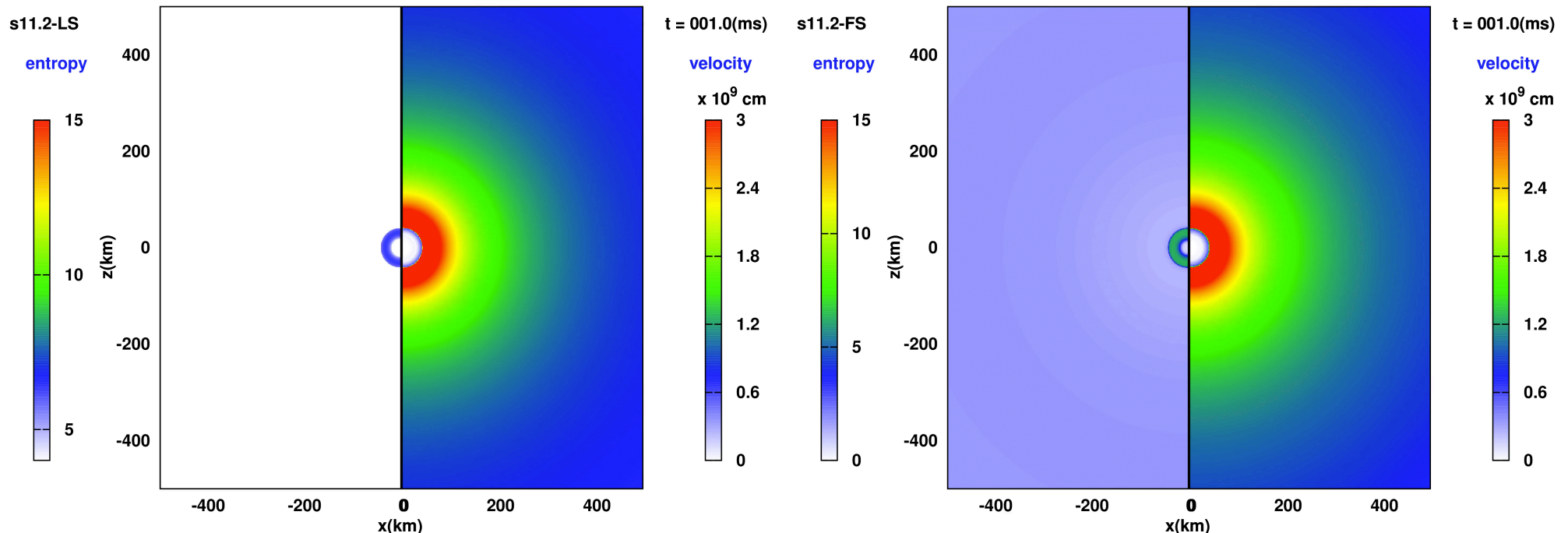
2D軸対称での比較計算@京コンピュータ

Nagakura, Iwakami, Okawa, Harada et al. submitted to PRL, arxiv:1702.01752

Lattimer-Swesty EOS

VS

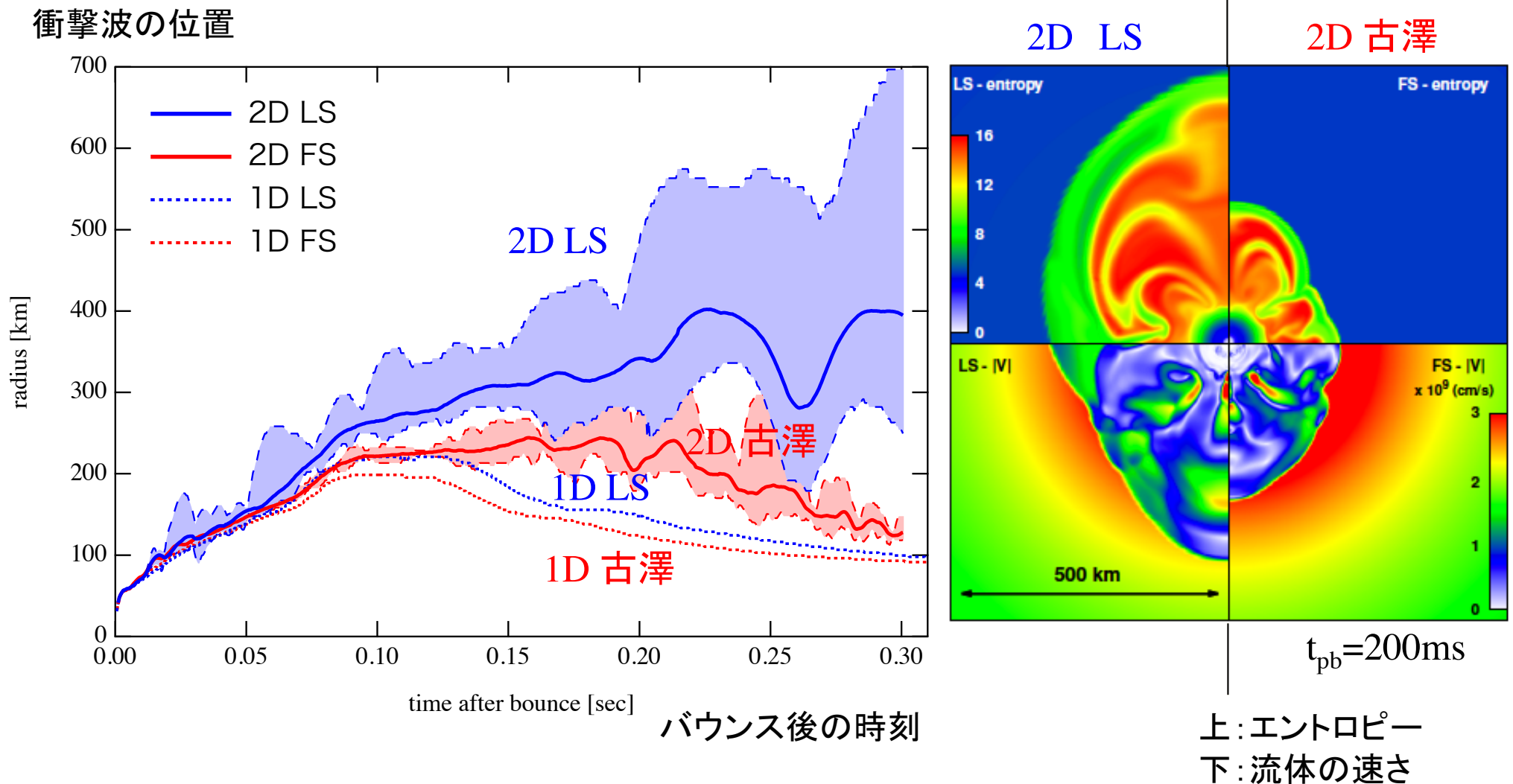
古澤 EOS “*Shen EOS* 拡張版”



- ニュートリノ輻射(SR 6D Boltzmann)+2D流体+2D重力
- 初期条件: 親星 $11.2M_{\text{sun}}$ の鉄コア
 - 重力崩壊からコアバウンス・衝撃波伝搬を追う
 - ニュートリノ反応/原子核電子捕獲率 (共通)

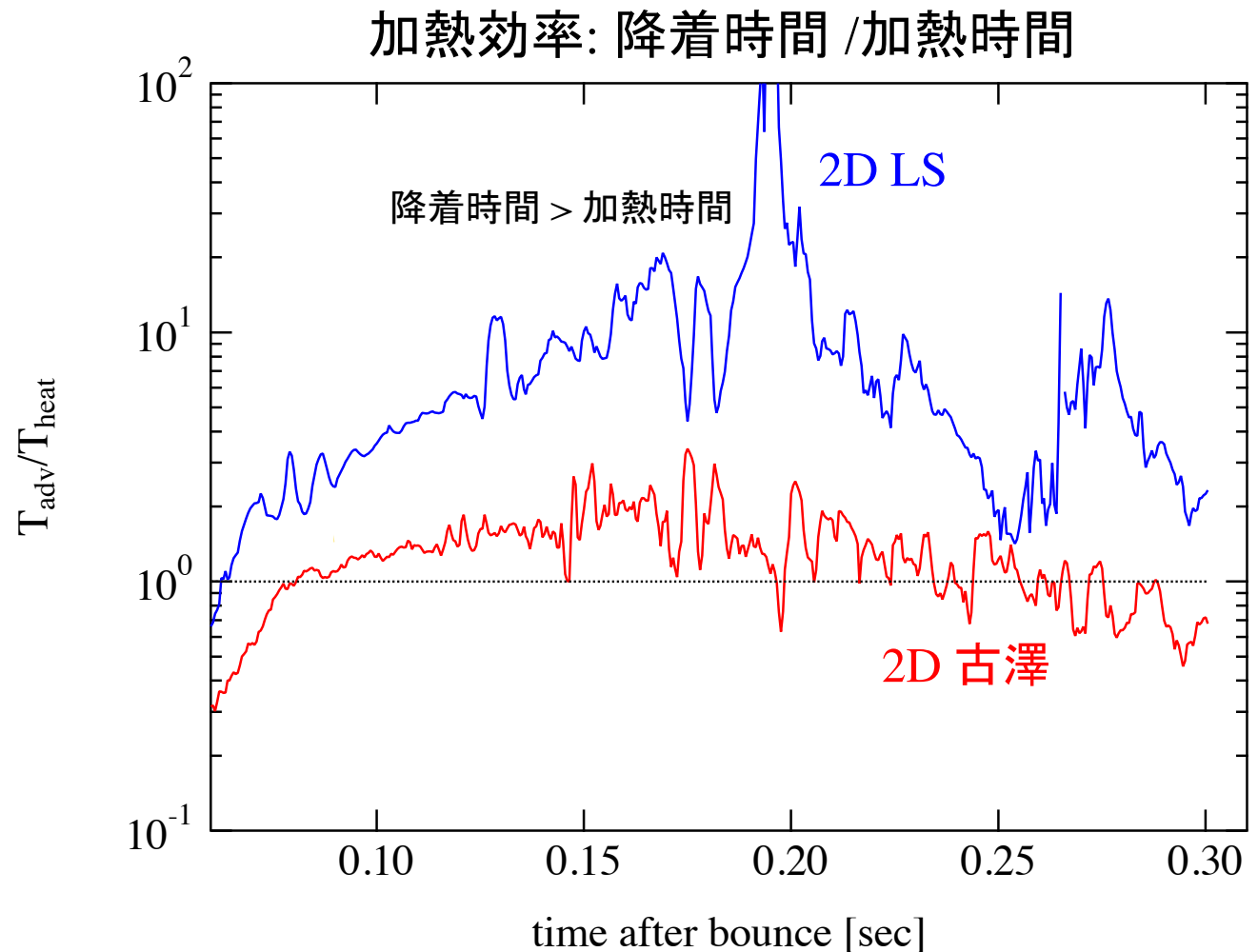
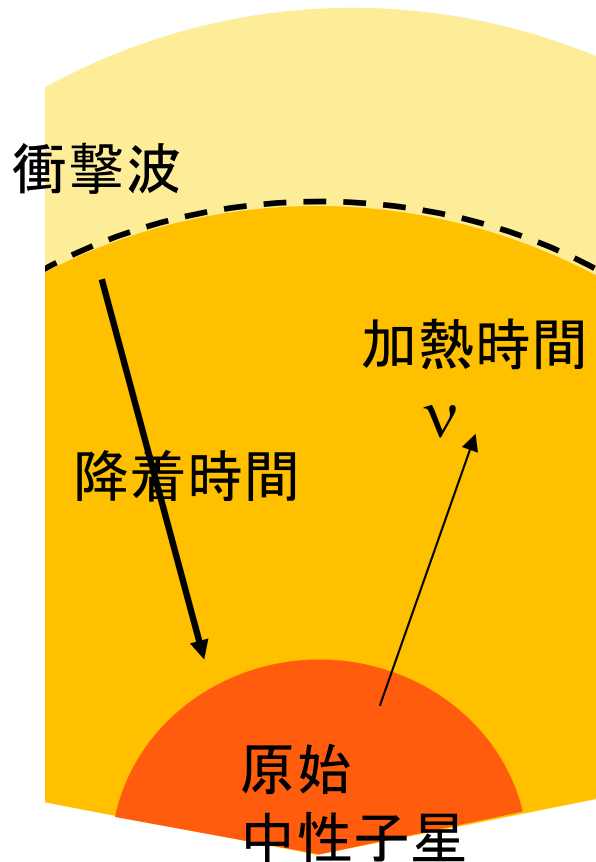
2次元軸対称ボルツマン計算で爆発する例あり

- 柔らかい状態方程式(LS)はより飛ぶ傾向
 - 1次元球対称では不発, 差は小さい



加熱効率には違い

- 降着時間 > 加熱時間なら爆発に有利
 - 落下する間に十分に加熱する時間がある



空間 3 次元: 近似から厳密計算へ

- 2次元から3次元へ: 爆発は弱い?

Takiwaki et al. (2013)

- 計算コスト: 30~100倍

- グリッド, ステップ数 ↑

- 計算負荷を抑える工夫

- 厳密計算を段階的に実現

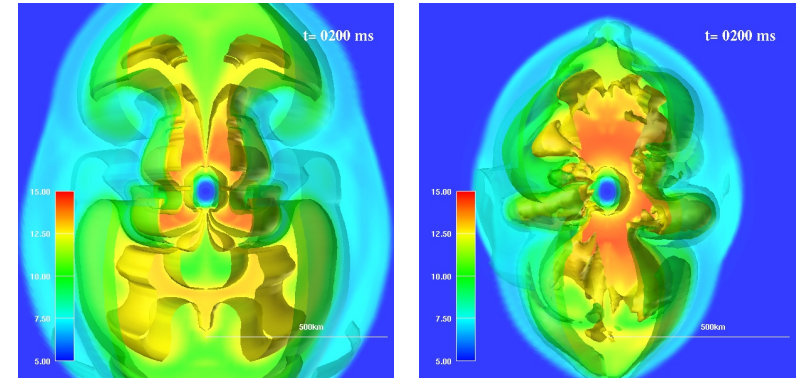
(1) 中心部をカット

時間ステップ制限を緩める

クーラン条件
$$\Delta t_{CFL} = \frac{r \sin \theta d\phi}{c}$$

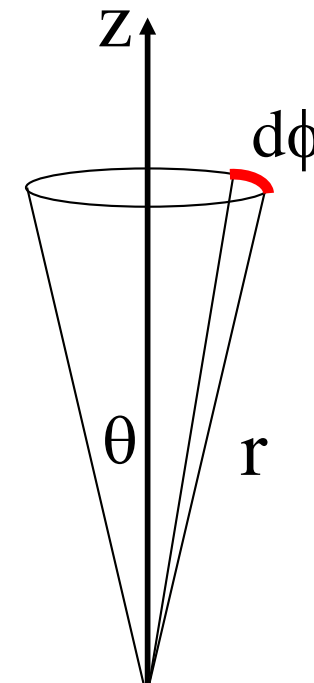
球面座標系におけるZ軸周辺が厳しい

(2) 最終的には全領域を解く



2D

3D



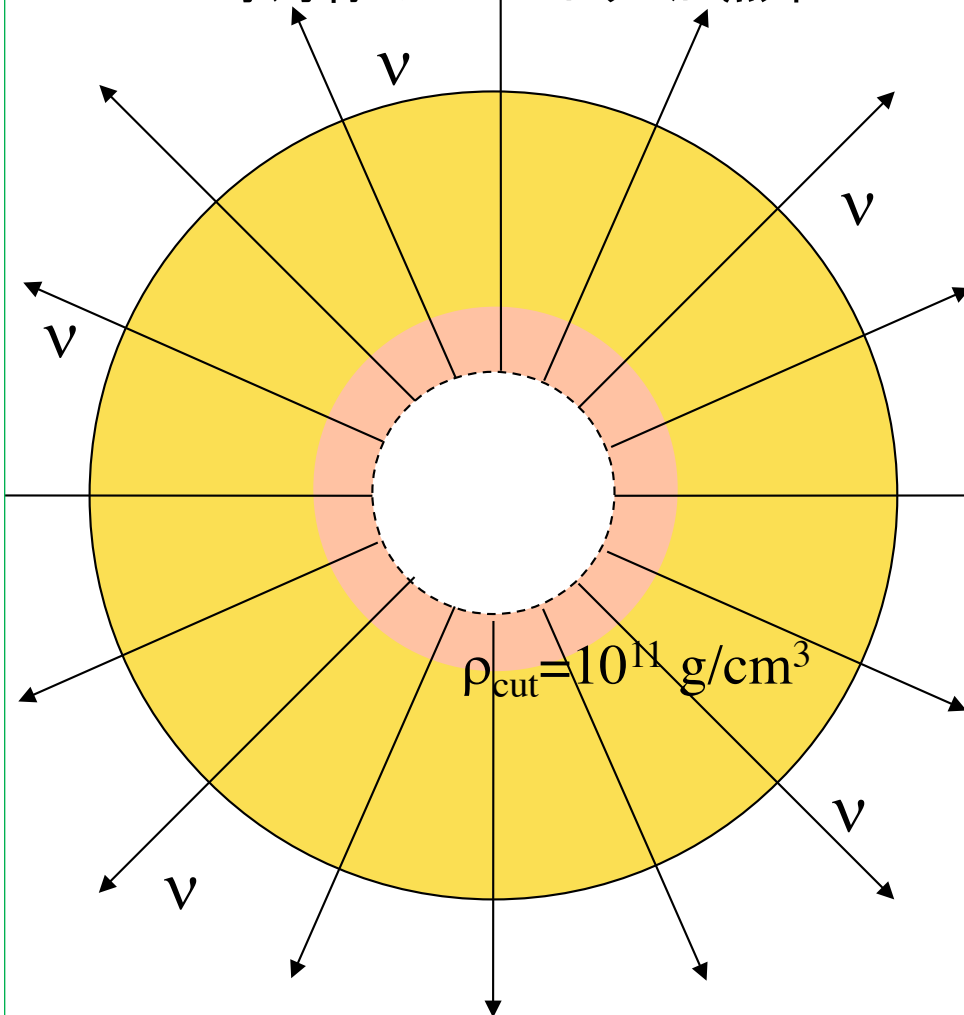
2D/3D衝撃波の長時間発展を追いたい

Blondin, Ohnishi

- 中心部をカット, 外側だけを解く処方 元素合成など応用

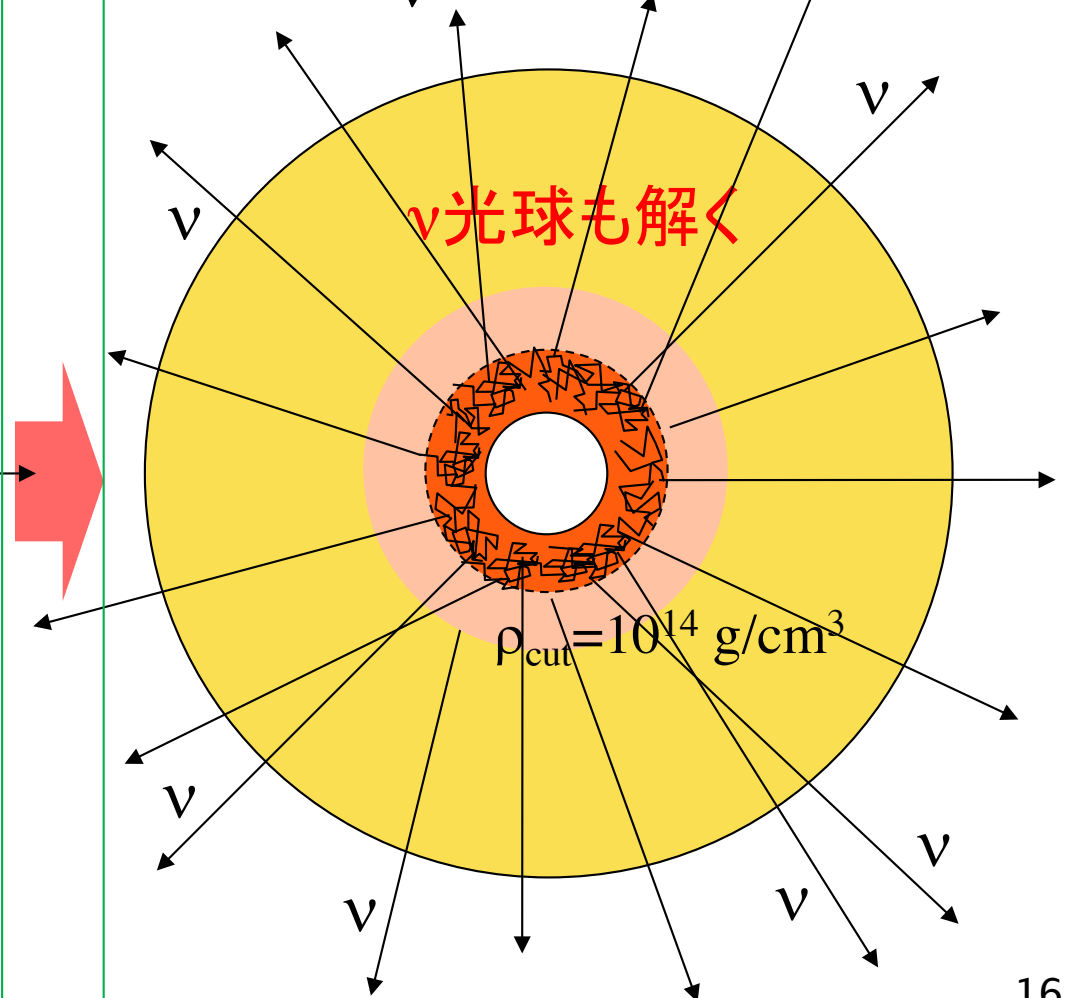
Light bulb近似

ニュートリノ光度はパラメーター
球対称のニュートリノ加熱率



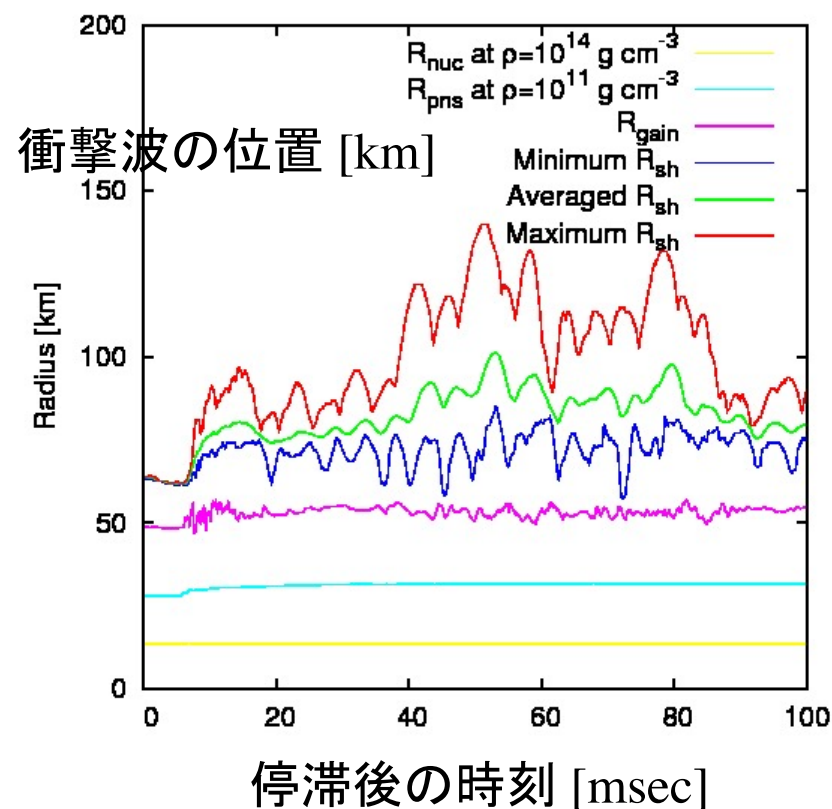
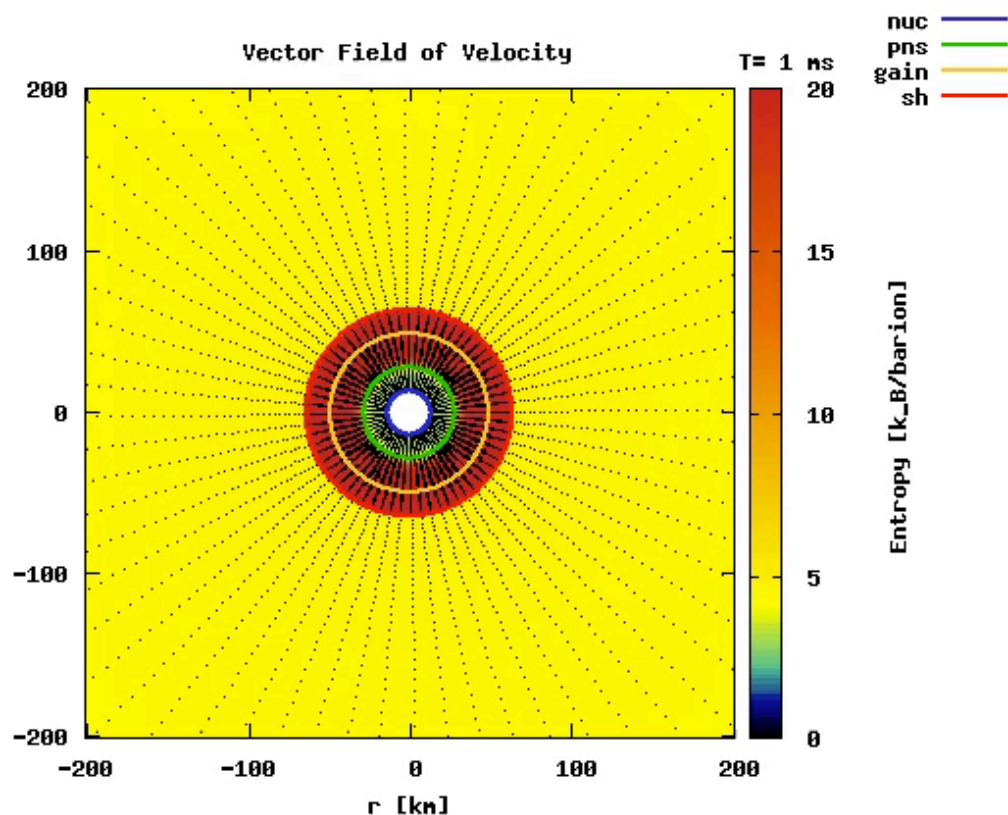
ボルツマン方程式

物質分布で決まる平衡分布から
3次元のニュートリノ輻射輸送



厳密ニュートリノ輻射流体計算: 中心部カット

- バウンス後に停滞した衝撃波が復活するか否か
 - バウンス後の衝撃波の長時間発展に着目
 - 2次元軸対称での計算はできた (内側境界条件の設定)

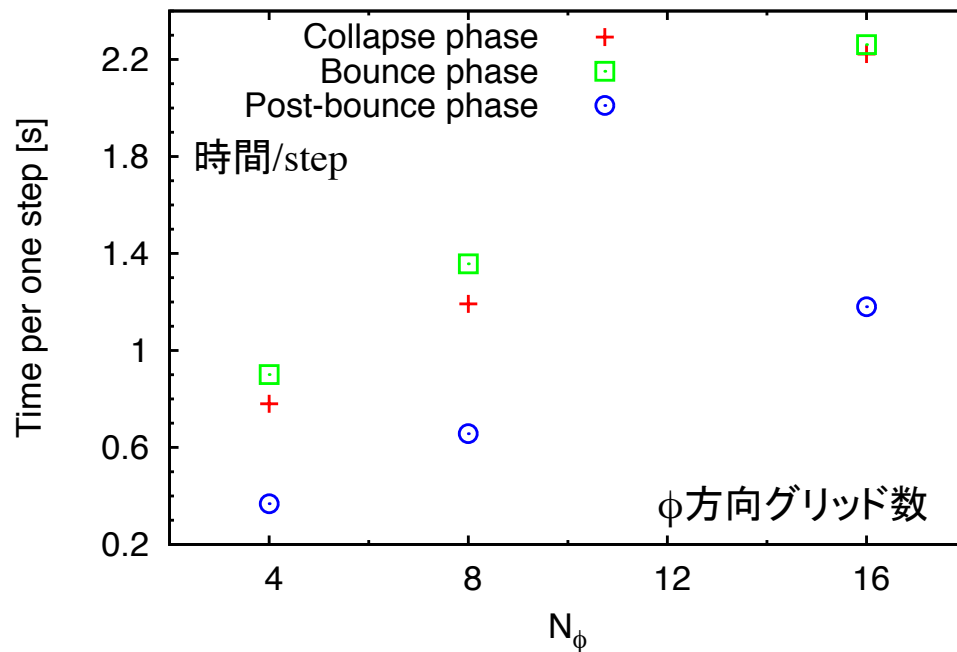


カラー: エントロピー, 矢印: 速度

3次元超新星爆発の厳密計算へ向けた開発

- 3Dスケールアップ

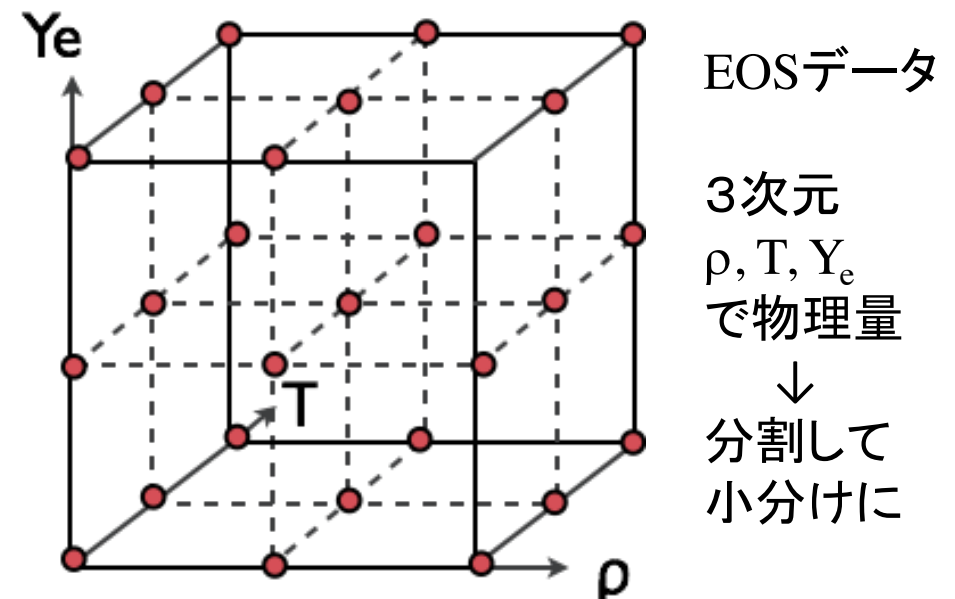
- 空間グリッド数でスケール



京コンピュータで3次元 ~100 msの発展を追う

- メモリ削減の努力

- 状態方程式データ分割化



各MPIプロセスで流体部分の領域を保持

- 計算コードの応用/発展

- データ解析コード, 近似手法の検証など
- コード構造化, 一般相対論化

空間 3 次元で厳密ニュートリノ輻射流体を実現

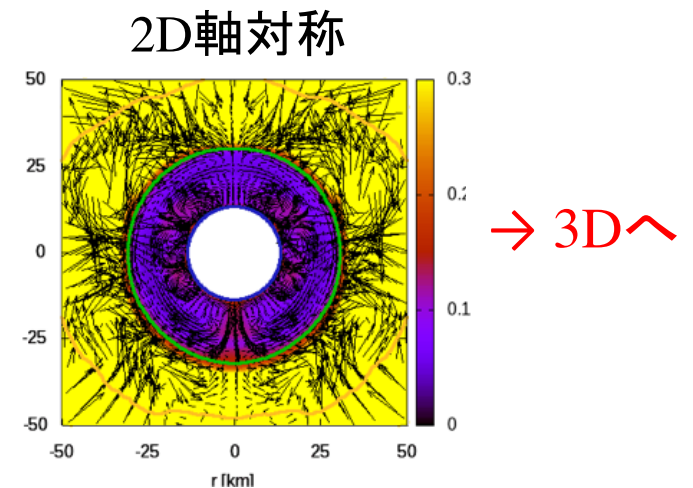
• 3Dで衝撃波復活を探る H29年度~

– 新たな3D輻射流体ダイナミクス

- 対称性を仮定しない cf. 2D

– 近似計算との違い cf. light bulb法

- $N_{\text{space}}=256 \times 64 \times 96$, $N_v=16 \times 6 \times 6$

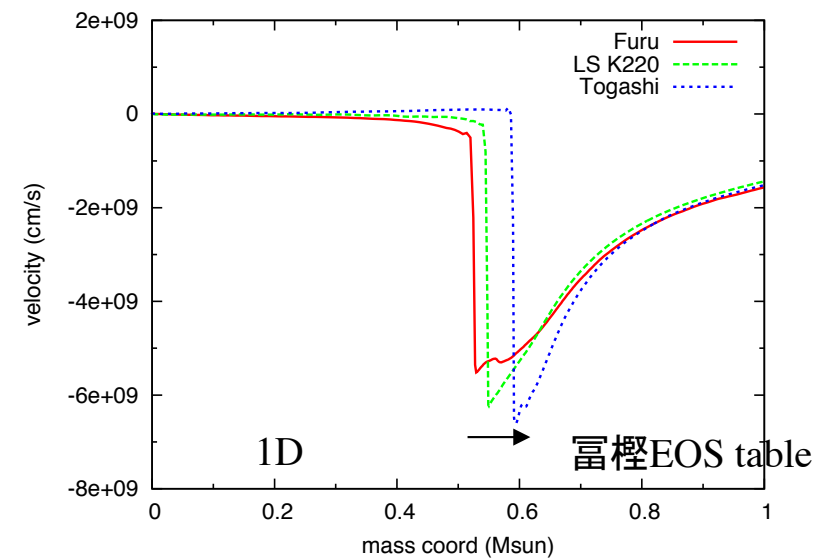


• 2Dで核物理の影響を検証

– 状態方程式: Soft, $2M_{\text{ns}}$ -EOS

– 系統的な検証も必要

- $N_{\text{space}}=384 \times 128$, $N_v=20 \times 10 \times 6$



典型的には1モデル100-400ms, 3-4M nodehour@K-computer

ニュートリノ輻射流体計算@京コンピュータ

- 第一原理的な計算による超新星研究
 - 特殊相対論的6Dボルツマン方程式+流体+重力
 - 流体と共にニュートリノ輻射輸送を厳密に解く

H28 • 2D ν 輻射流体計算による核物理の影響

- 柔らかい状態方程式で爆発, 球対称より敏感
 - 相違点について調査中 系統的な計算が必要

H29 • 3Dでバウンス後の衝撃波の発展を探る

- 中心部カットで時間ステップをかせぐ
- 2Dで核物理の影響を調べる
 - 状態方程式, ニュートリノ反応, 親星, 回転

Project in collaboration with

- Numerical simulations
 - H. Nagakura
 - W. Iwakami
 - H. Okawa
 - A. Harada
 - S. Yamada
- Supernova research
 - T. Takiwaki, K. Kotake
 - Y. Sekiguchi
- Supercomputing
 - H. Matsufuru
 - A. Imakura, T. Sakurai
- EOS tables & neutrino rates
 - H. Shen, K. Oyamatsu, H. Toki
 - S. Furusawa
 - H. Togashi, M. Takano
 - S. X. Nakamura, T. Sato



Supported by PI M. Shibata

- *HPCI Strategic Program Field 5*

*Supernovae is one of the target simulations
of K-computer and Exa-scale machine*

- *HPC resources at KEK, YITP, UT, RCNP*

Grant-in-Aid for Scientific Research (24244036, 15K05093) 21