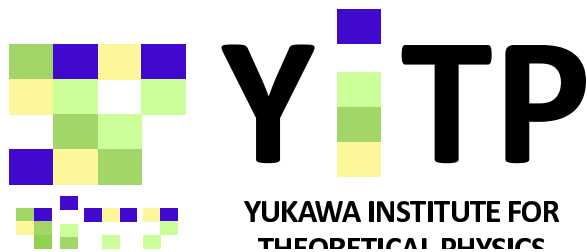


ボルツマン輻射流体コードを用いた 大質量星の重力崩壊計算

サブ課題B, 爆発天体-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

- 長倉洋樹 (Caltech)
- 岩上わかな、大川博督 (京大基研/早大)
- 原田了 (東大)、山田章一 (早大)
- 住吉光介 (沼津高専)、古澤峻 (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

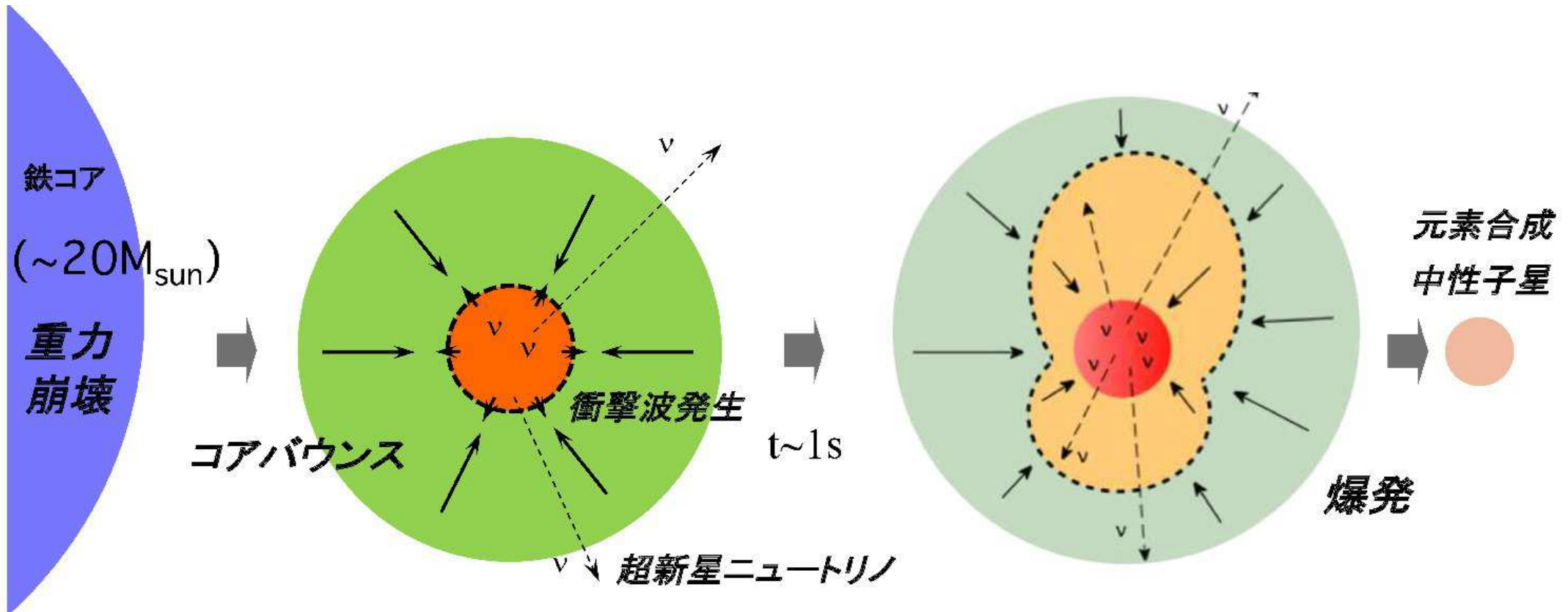
- 固武慶、中村航 (福岡大)、滝脇知也 (国立天文台)
- 黒田仰生 (バーゼル大)、諏訪雄大 (京大基研)

系統計算によるメカニズム探索と観測連携

目次

- 導入
- 昨年度までの成果について
(空間 2 次元、ボルツマン 6 次元)
- 今年度以降の予定と準備について
(空間 3 次元へ)
- まとめ

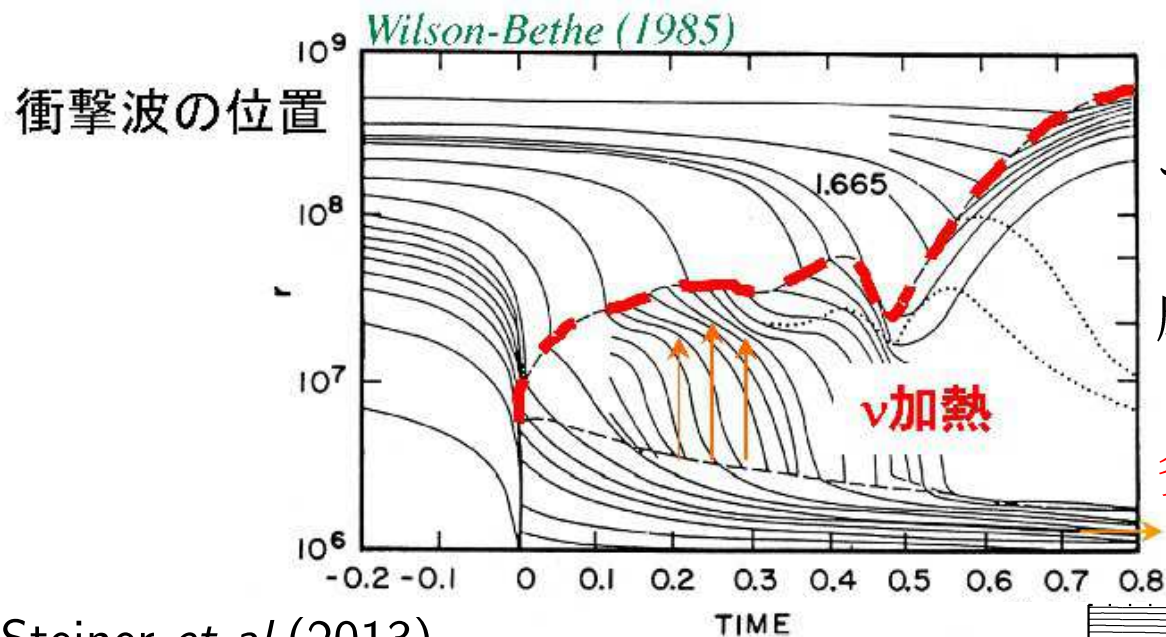
超新星の爆発メカニズムの検証



問題点：停滞した衝撃波を復活できるか？

- ニュートリノ加熱メカニズム
- 音響メカニズム

1次元球対称計算



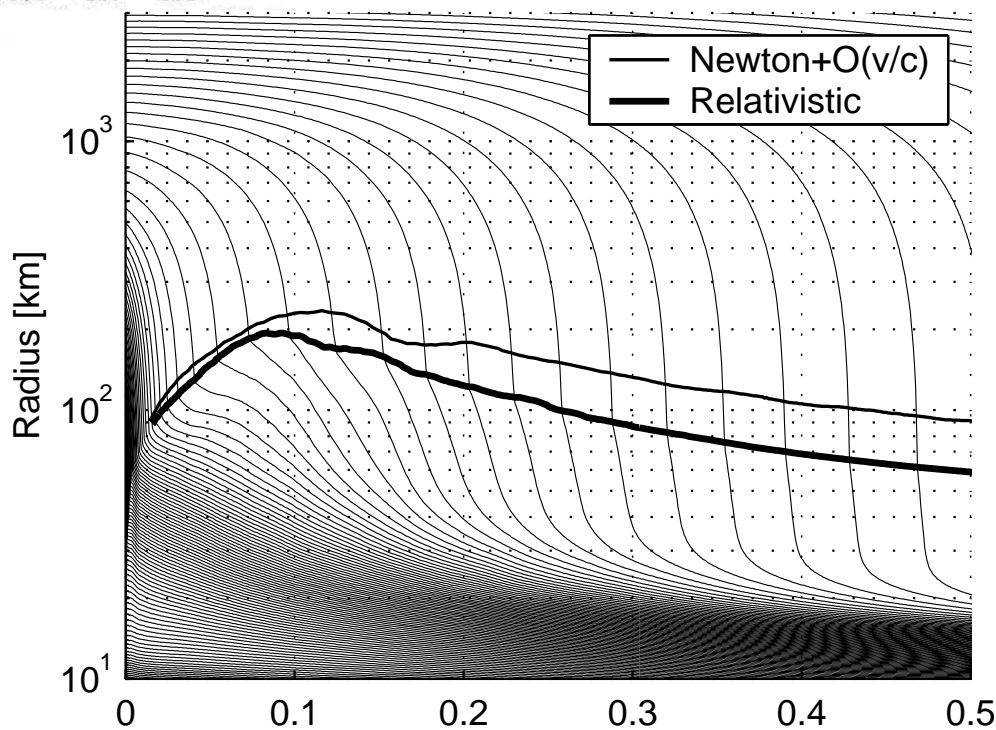
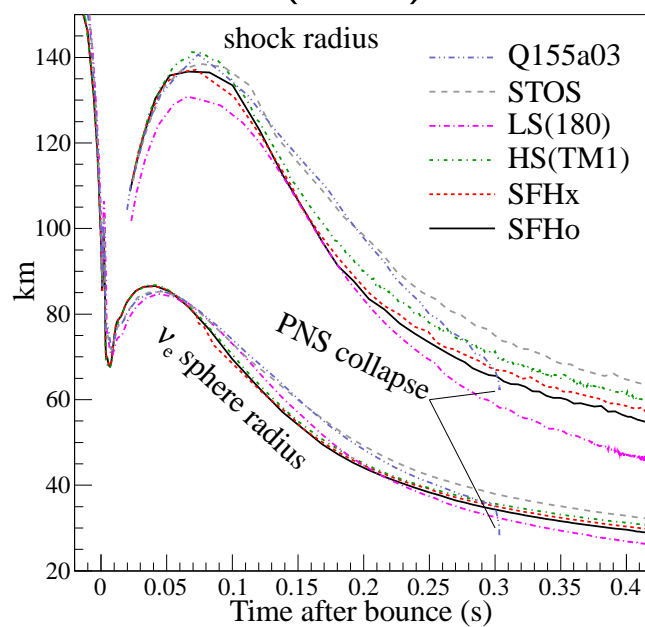
ニュートリノ加熱メカニズムの検証

厳密計算では爆発せず

多次元の効果？

Liebendörfer *et al.* (2001)

Steiner *et al.* (2013)



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

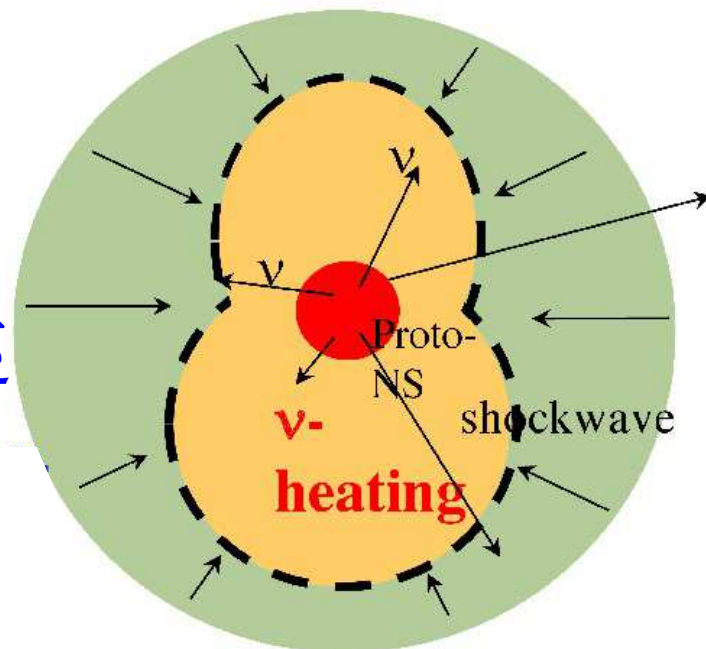
天体ダイナミクス	1D	2D/3D	2D(→3D)
流体	○	○	○
ν輻射輸送	厳密	近似	厳密
一般相対論	○	△	一部

- 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

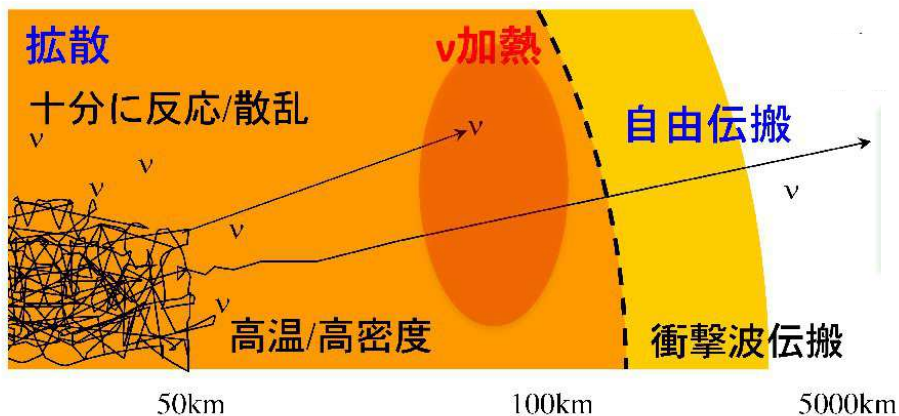
ニュートリノ放射輸送

多次元流体ダイナミクスとニュートリノ加熱

- 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

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

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)

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

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)

6次元ニュートリノ輻射流体計算コードの特徴

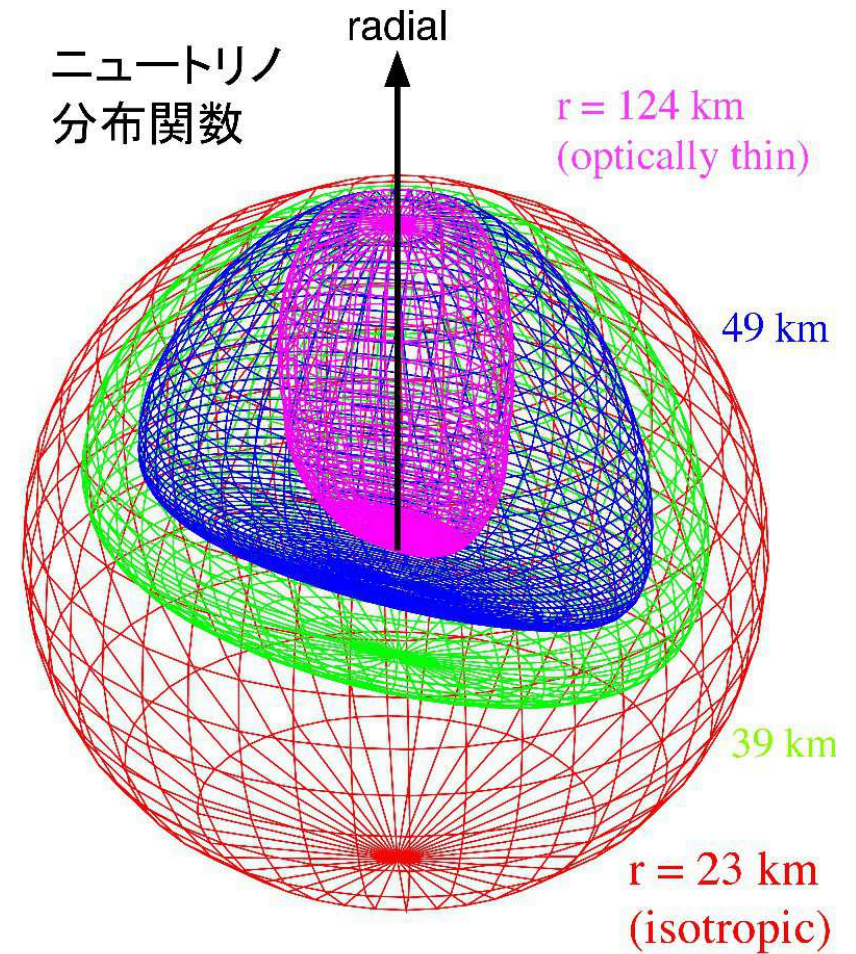
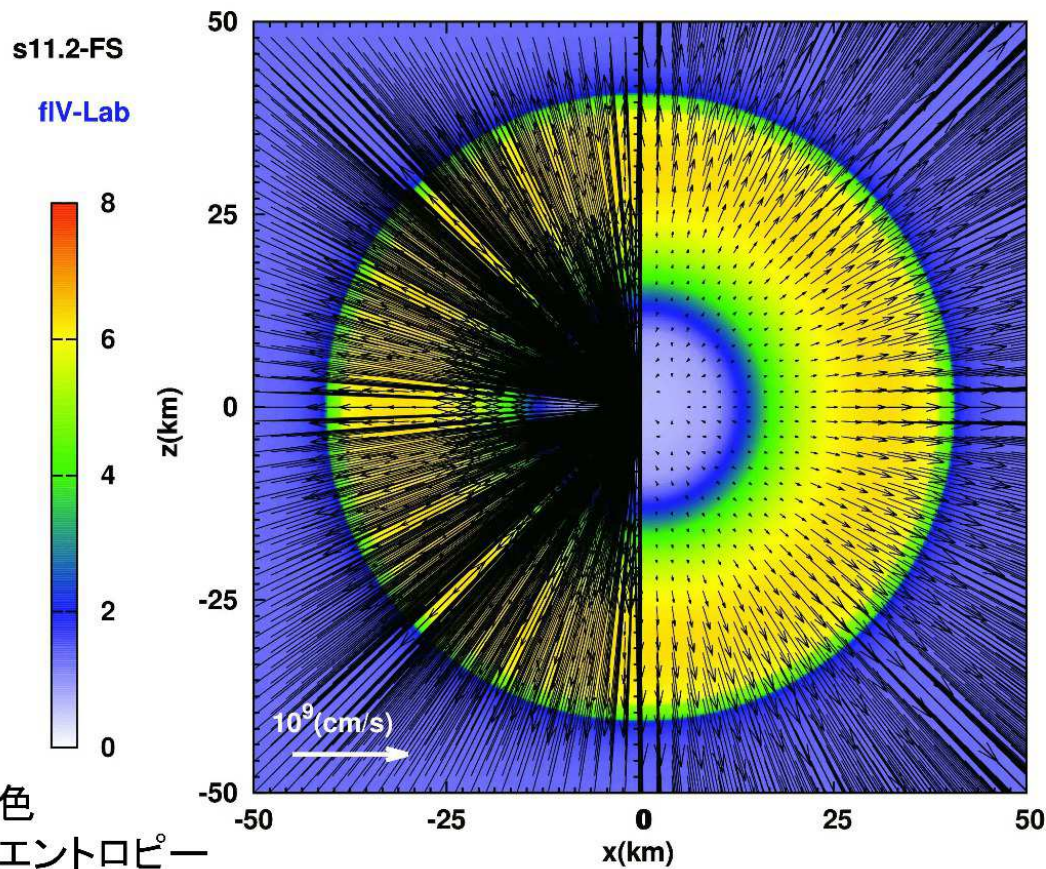
Nagakura *et al.*(2017)

流体中のニュートリノ輻射

角度分布の非対称性

流体速度

ニュートリノ流束



- 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

- 等方から前方集中へ
- r 方向周りで非対称

空間 2 次元軸対称ボルツマン計算

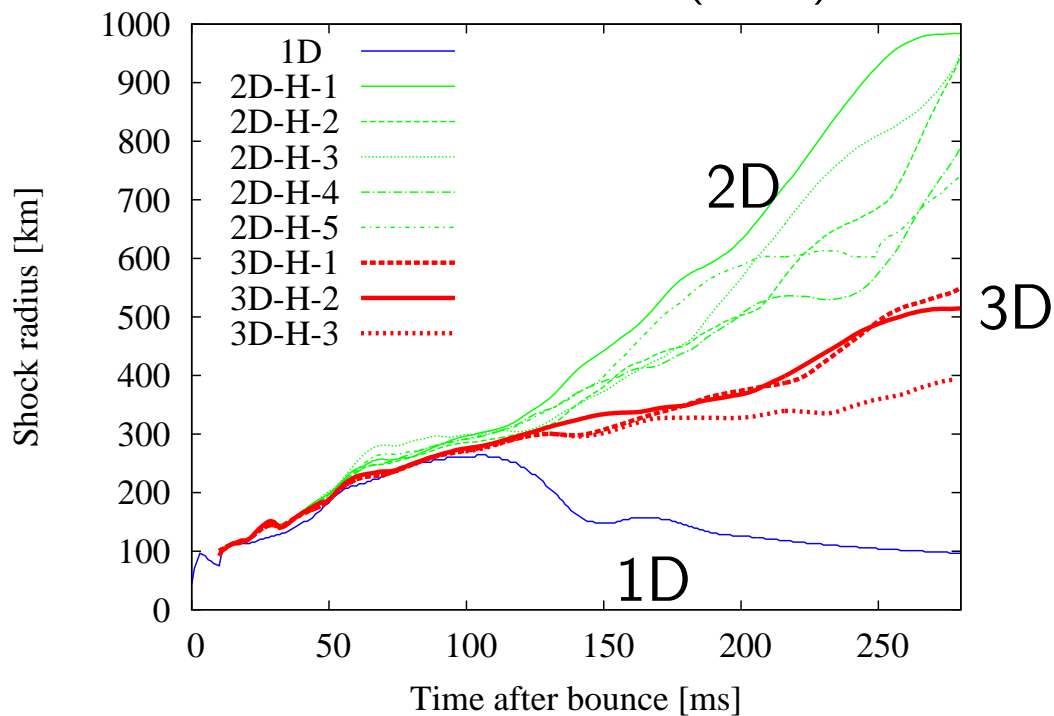
空間 3 次元計算

ニュートリノ輻射輸送: 近似

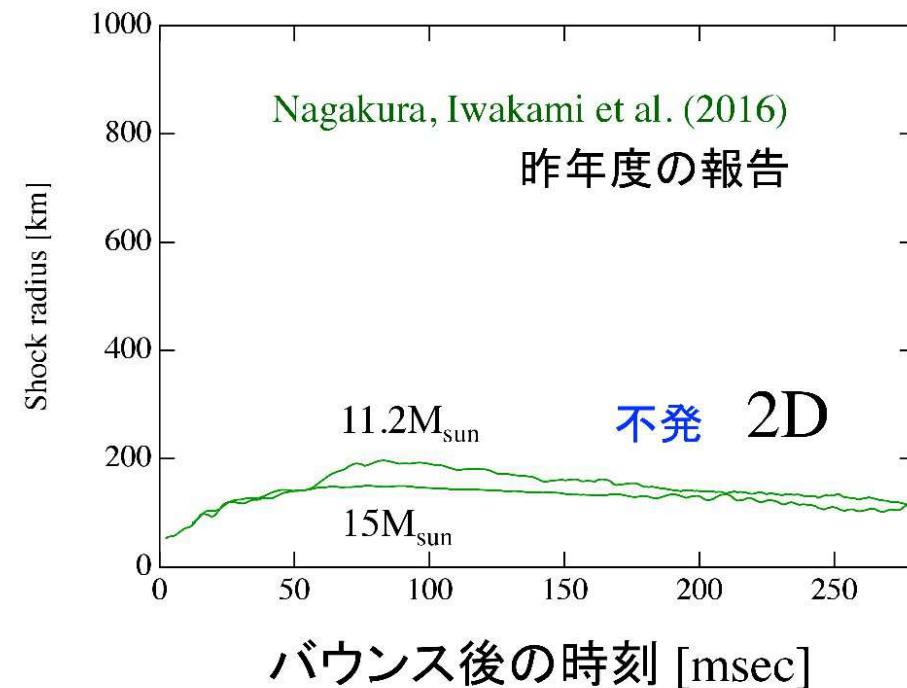
空間 2 次元計算

ニュートリノ輻射輸送: ボルツマン

Takiwaki *et al.* (2014)



位置 [km]



状態方程式は固定

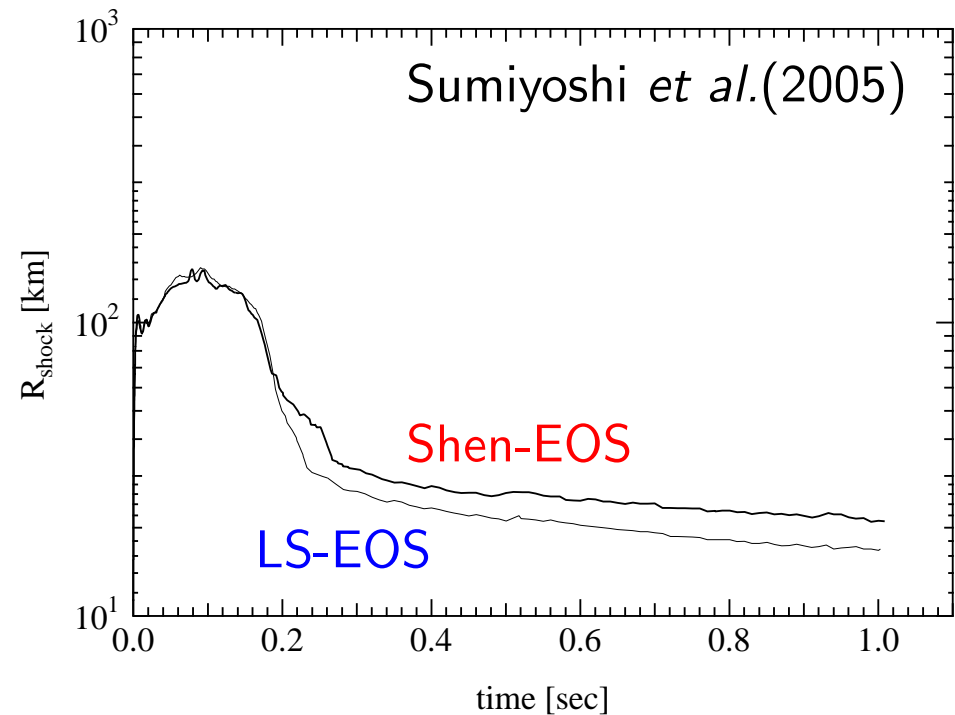
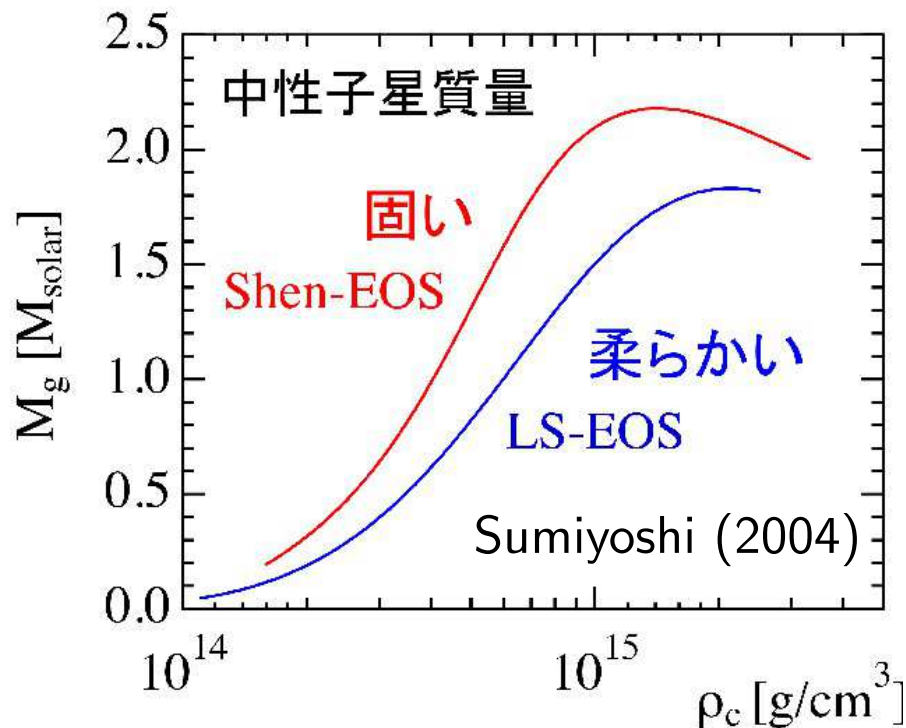
球対称計算と状態方程式

柔らかい状態方程式でも球対称では爆発しない。

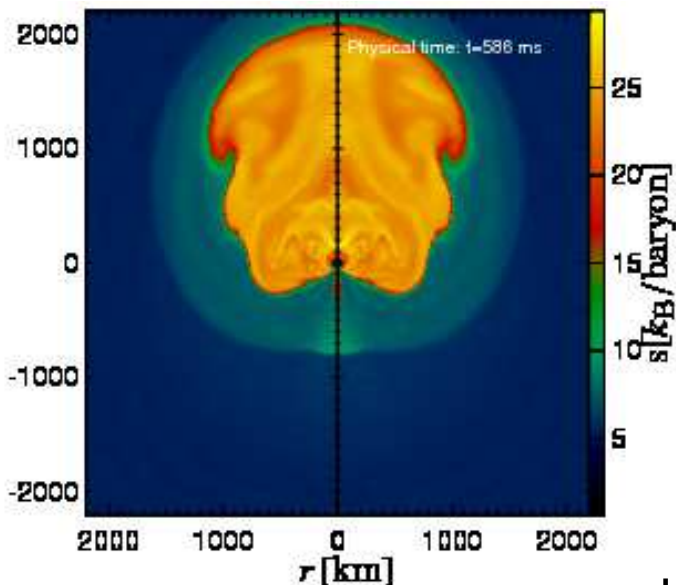
状態方程式データテーブル (代表 2 系統)

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

柔らかい Lattimer-Swesty: Skyrme

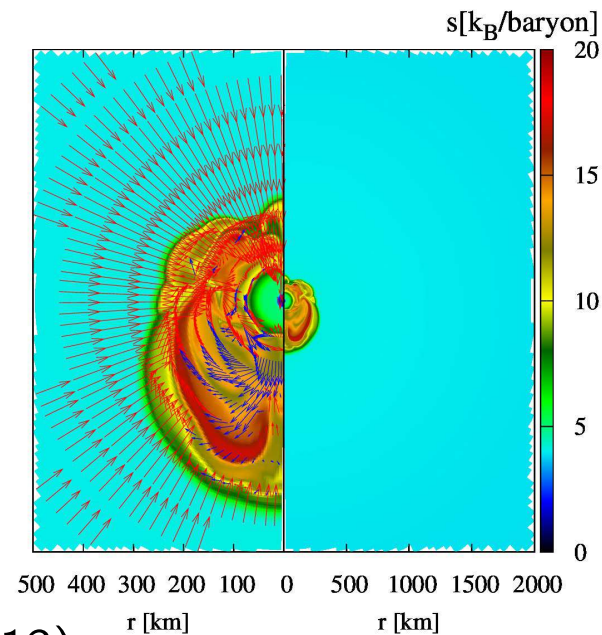


2次元軸対称計算と状態方程式

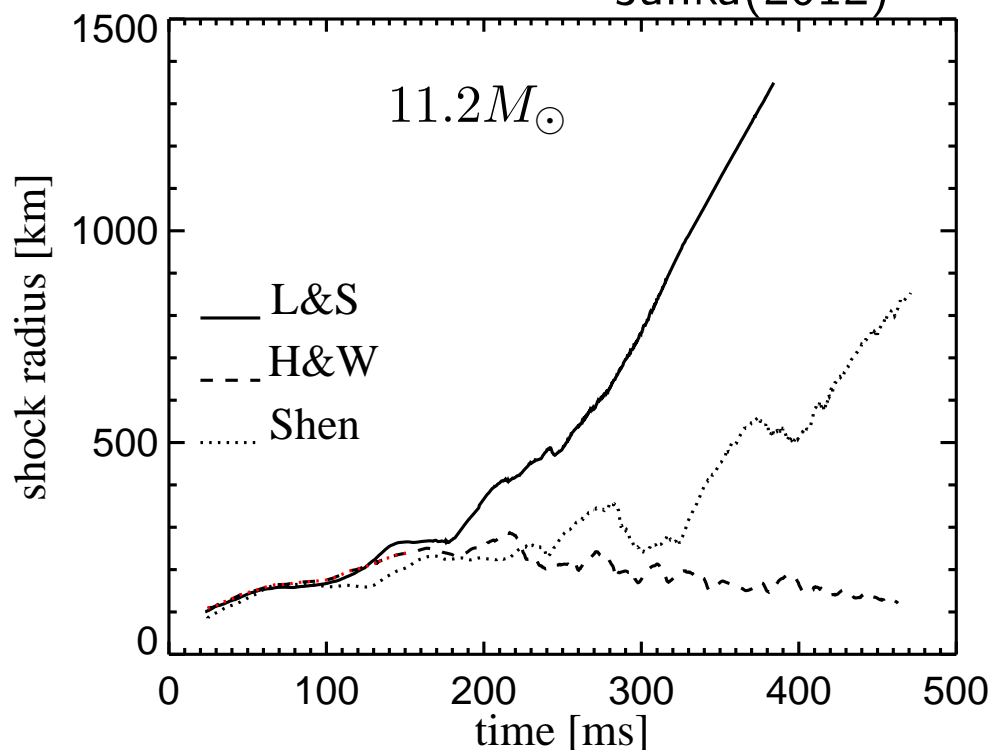


柔らかい状態方程式は爆発に有利に働く。

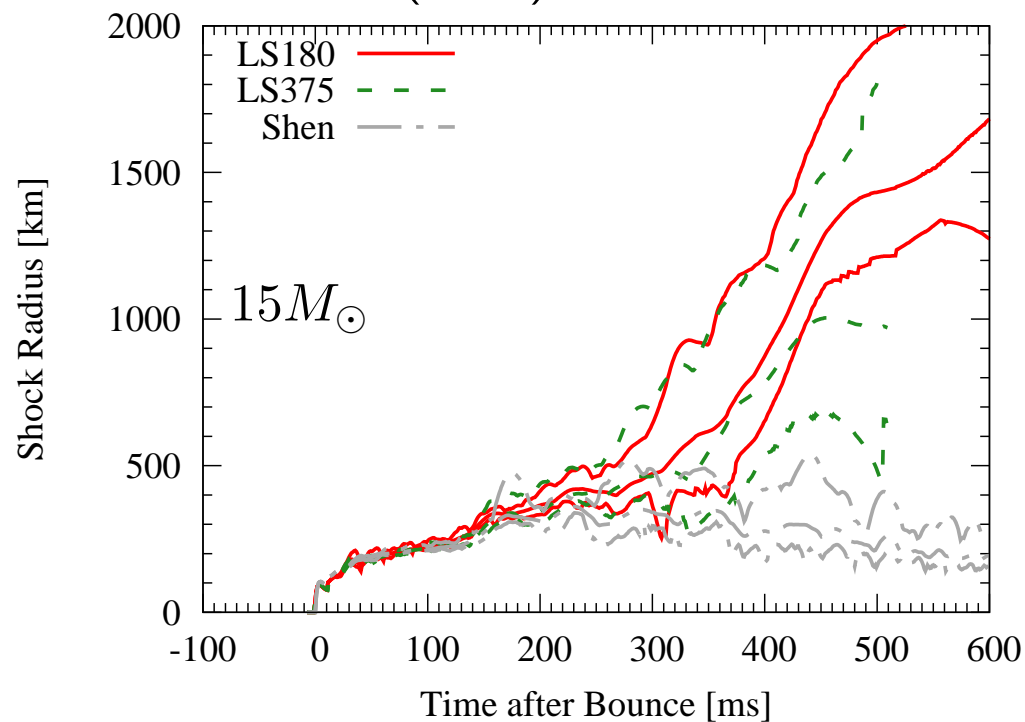
親星や近似手法の違いによっても爆発/不発の結果が分かれる。



Janka(2012)



Suwa *et al.*(2013)



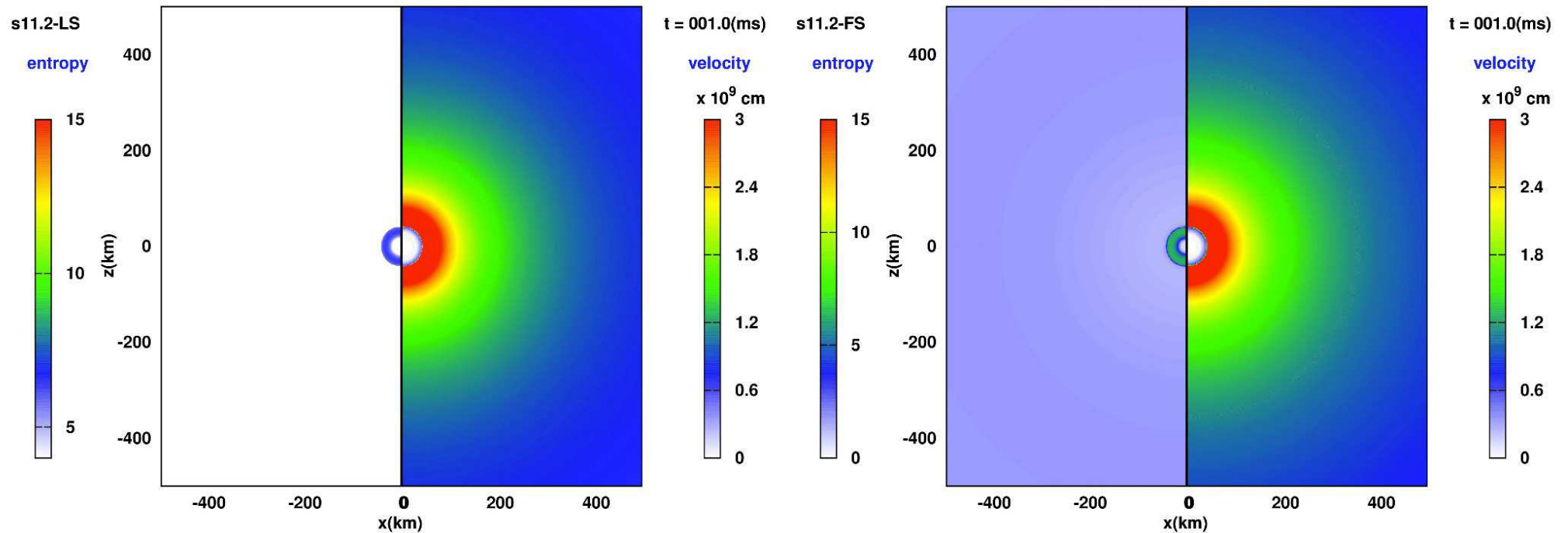
2次元軸対称ボルツマン計算での比較計算

Nagakura et al.(2017)

Lattimer-Swesty EOS

VS

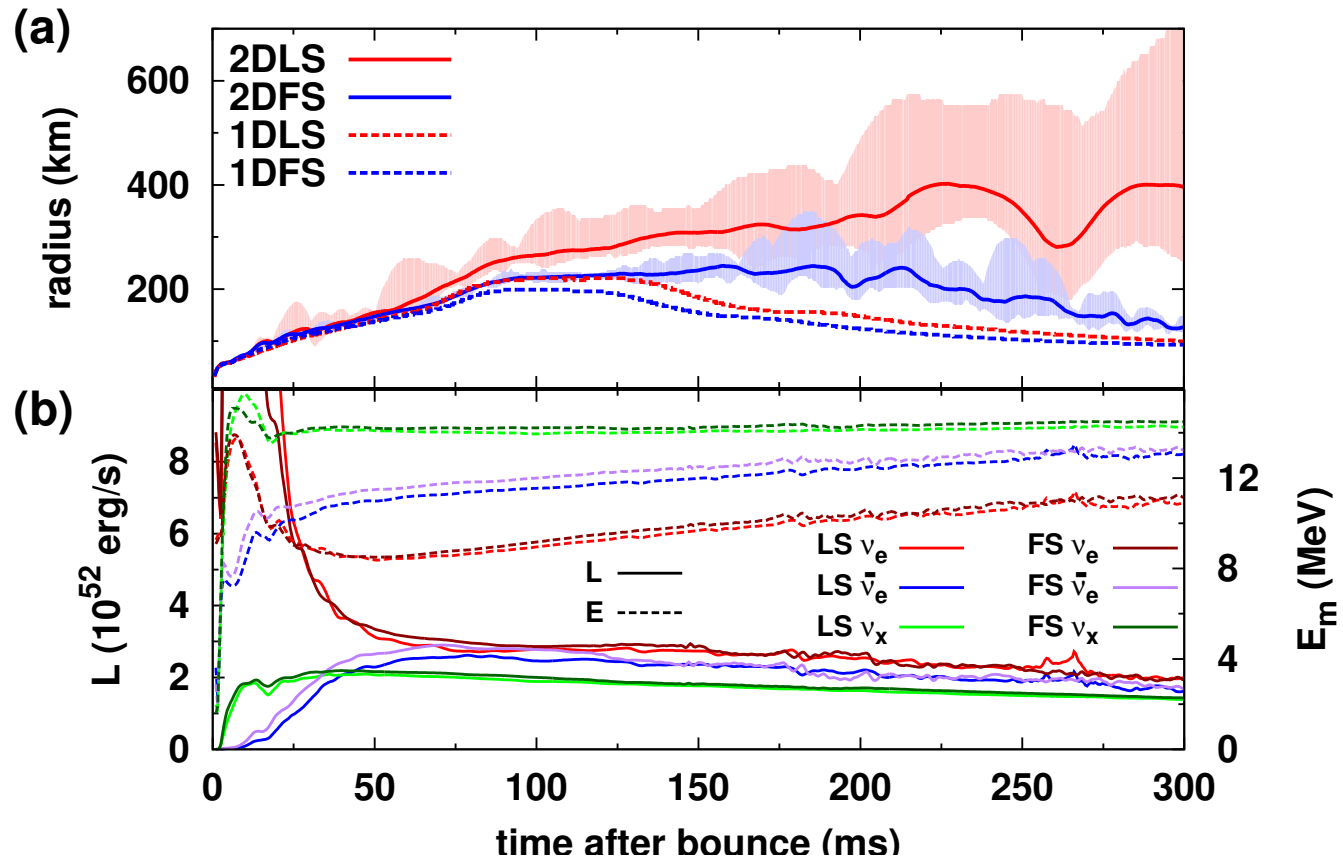
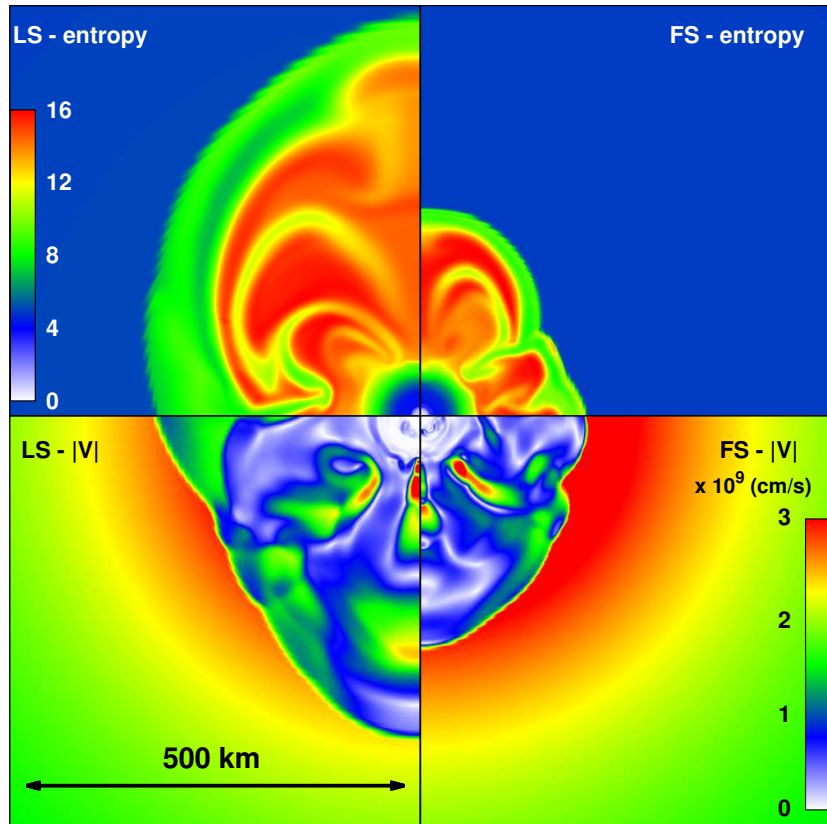
古澤 EOS “*Shen EOS*拡張版”



- ニュートリノ輻射 (SR 6D Boltzmann) + 2D 流体 + 2D 重力
- 初期条件: 親星 $11.2M_{\odot}$ 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の爆発例

Nagakura *et al.*(2017)

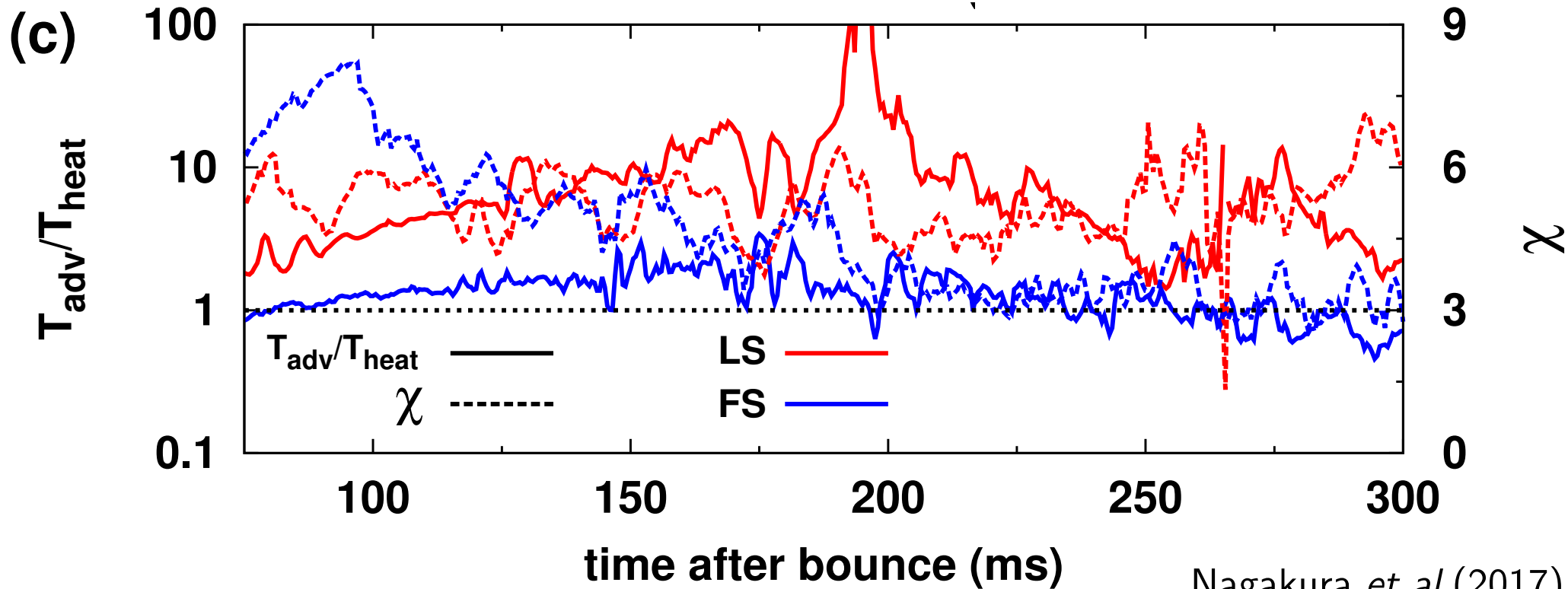
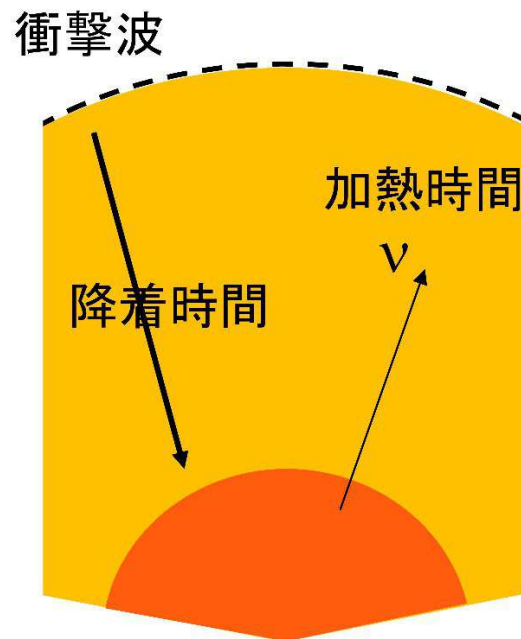


- 柔らかい状態方程式はより飛ぶ傾向
 - 一次元球対称では爆発しない

加熱効率

降着時間 > 加熱時間 :

落下する間に十分加熱する時間がある。



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

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

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

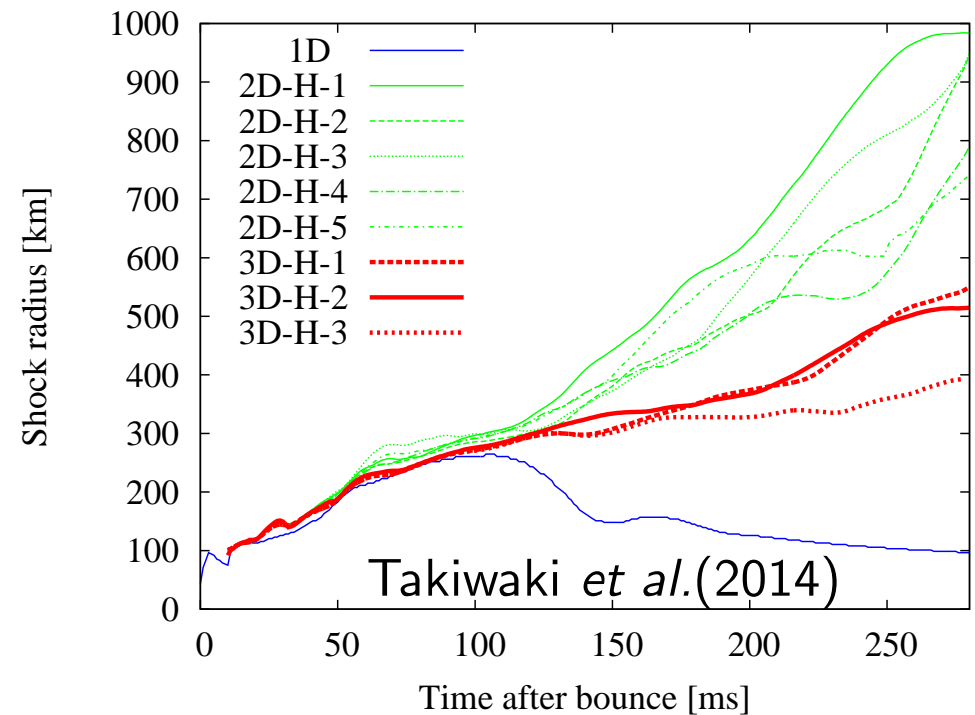
$$3 \text{次元} : (256 \times 64 \times 96) \times (16 \times 6 \times 6)$$

– 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)

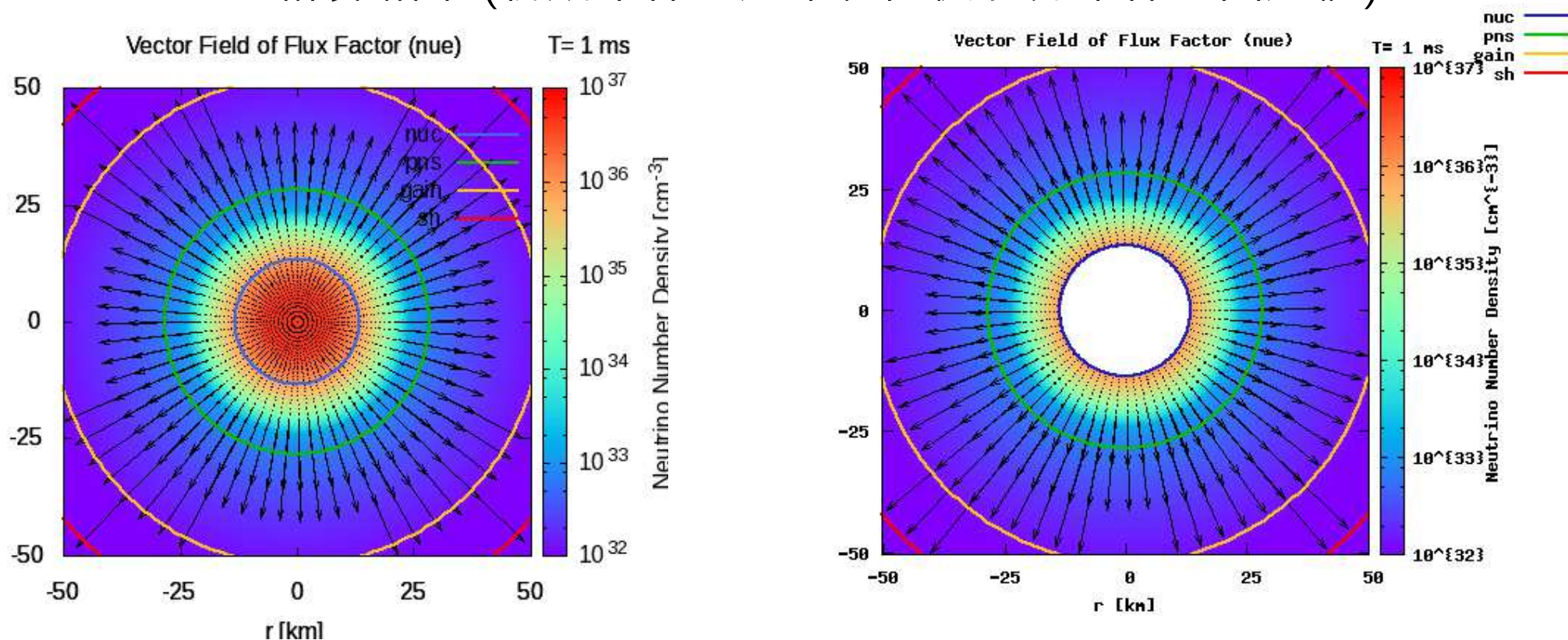


ニュートリノ輻射流体計算と中心部の取り扱いについて

3Dでの計算負荷を軽減するため、様々な中心部の取り扱い方法について検証

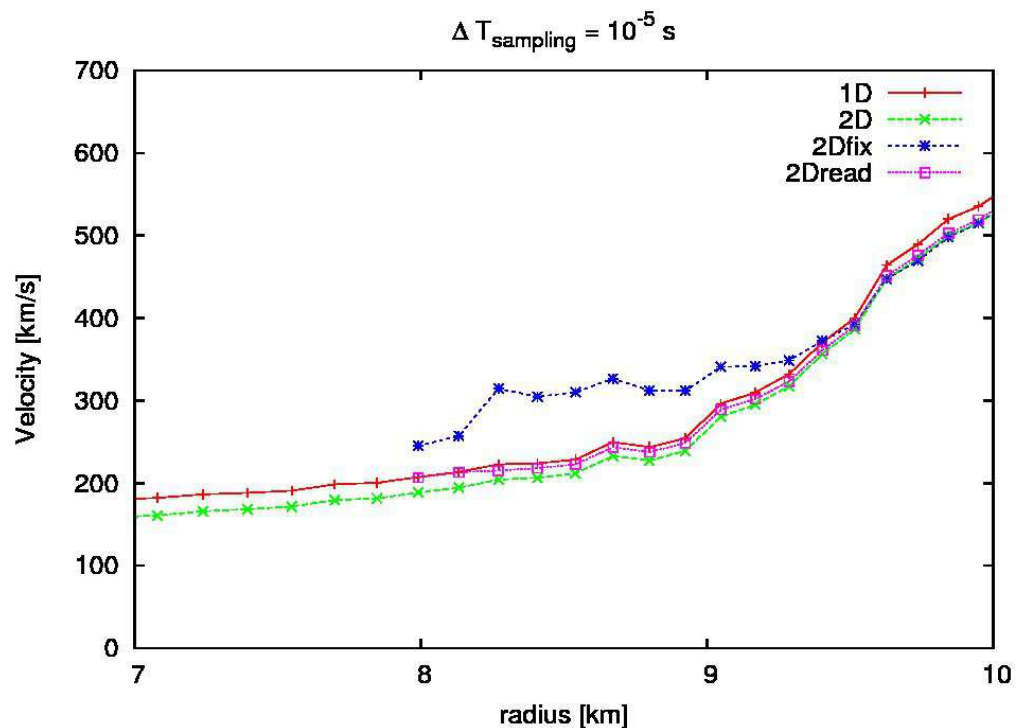
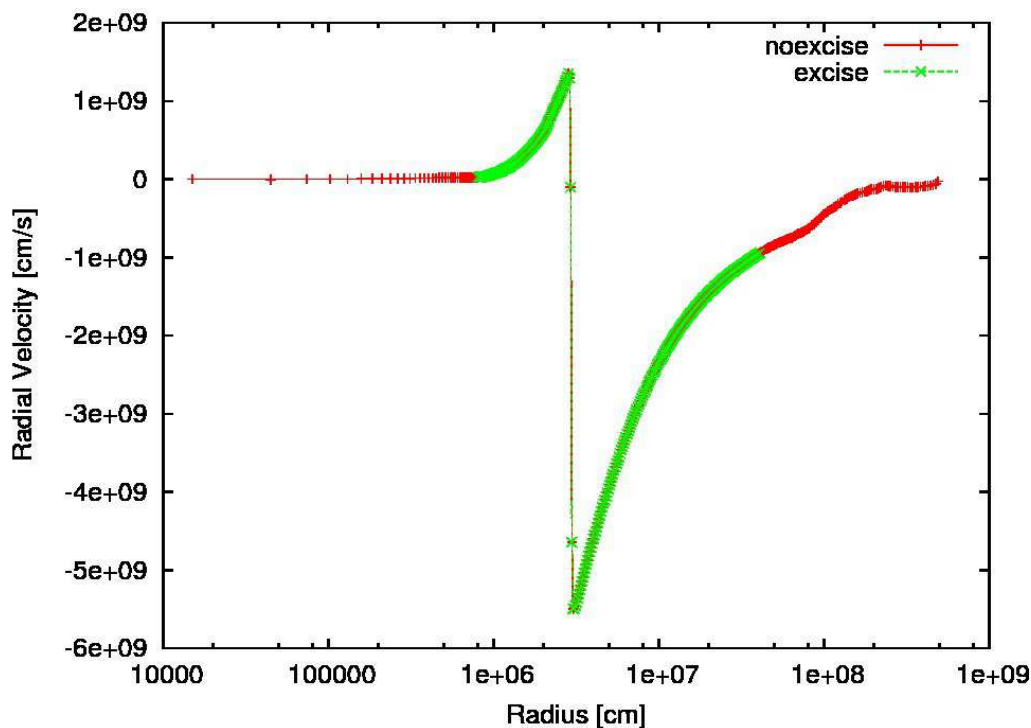
- 2次元軸対称くり抜きテスト計算

計算結果 (初期条件は定常、内側境界条件は固定値)



くり抜き計算の境界条件の改良

- 内側と外側の境界条件として、1D 球対称計算の時間発展データを利用



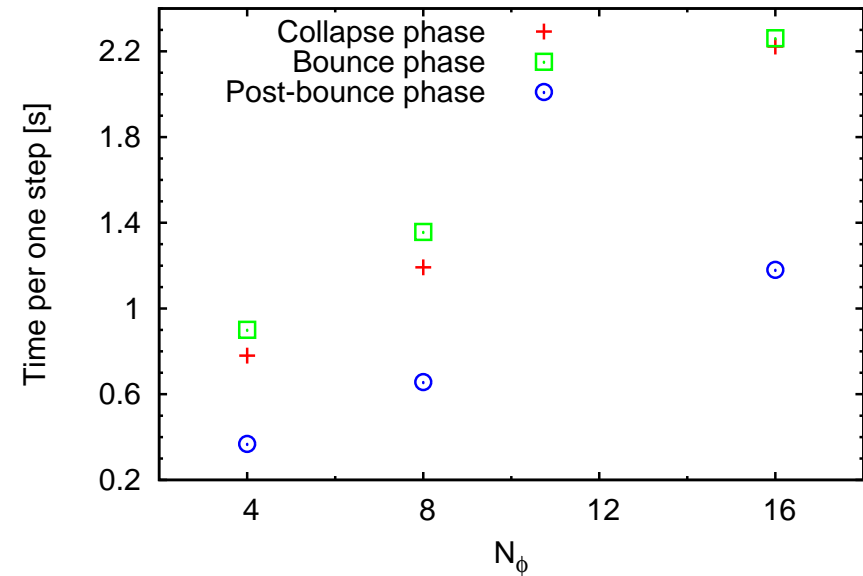
- 固定境界条件 (青) で生じていた内側境界付近のずれが時間発展境界条件 (ピンク) に変更することで改善された。
- その他、内側の領域を ray-by-ray で解く取り扱い方法についても検討中。

空間3次元化のために必要なこと

- 7次元ニュートリノ輻射流体計算コードが「京」で動く
 - 1ステップ当たりの計算時間と角度方向の解像度の関係
 - 目指す解像度においてコードが動くこと
 - 解析コードの整備
- ポスト「京」へ向けた開発/整備
 - コード構造化
 - 一般相対論化

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
(グリッド数でスケール)



- 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, メモリ ~30GB)。
- 「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使用量削減を行った。
「京」でテスト計算中 (3072MPI, 8threads, メモリ ~10GB)。

状態方程式のパッチ化

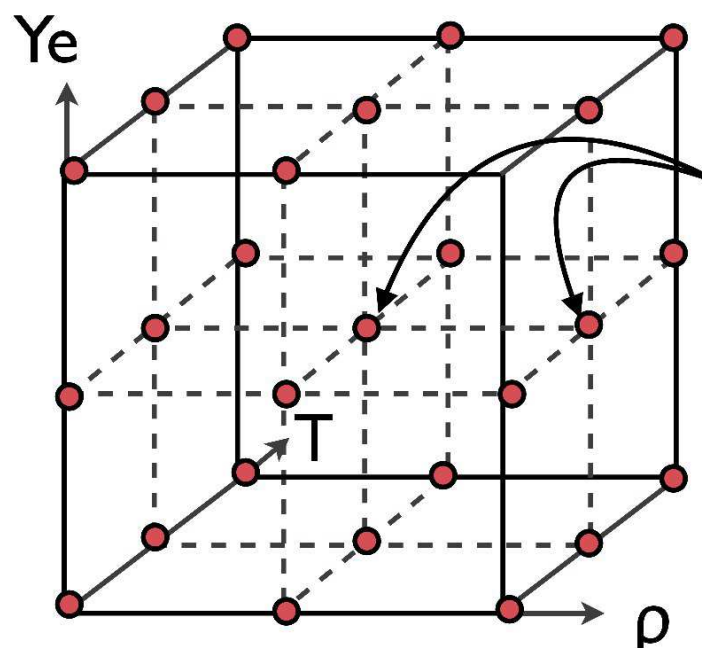
状態方程式の変数

(Shen *et al.* '98, Furusawa *et al.* '15)

密度 ρ : $10^5 \sim 10^{15.5} \text{ g/cm}^3$

温度 T : $0.1 \sim 50 \text{ MeV}$

Electron Fraction Y_e : $0.01 \sim 0.55$



EOS tableの模式図

各点にそれぞれ
18~27個の物理量
が定義されている

- 巨大なテーブル化された状態方程式の配列を分割しメモリを削減
- データ点の数は元のまま領域を各方向で例えば半分にしテーブルサイズを1/8にする。
- 各ノードで移流も考慮し適切なテーブルを読み込む。
- 旧バージョンのコードでメモリが0.62倍に減少することを確認。

コード整備

- データ出力とデータ解析
 - 空間3次元 + 運動量空間3次元
 - すべて出力するためには、~1PB/1モデル必要
 - Pre/Post 処理ノード (メモリ 0.5~2 TB)
- コードの構造化
 - 部品ごとに整理
 - 分割コンパイル用の Makefile
 - 一般相対論化など

まとめと展望

- 第一原理的な計算による超新星研究
 - 流体と共にニュートリノ輻射輸送を厳密に解く
- 空間2次元計算による核物理の影響
 - 柔らかい状態方程式で爆発
- 空間3次元でバウンス後の衝撃波の発展を探る
- 空間2次元で親星、回転、核物理の影響を探る
- (エクサスケール)
空間3次元フルボルツマン輻射流体計算