

相対論的多次元ボルツマン流体コードの開発

長倉 洋樹
(京都大学基礎物理学研究所)

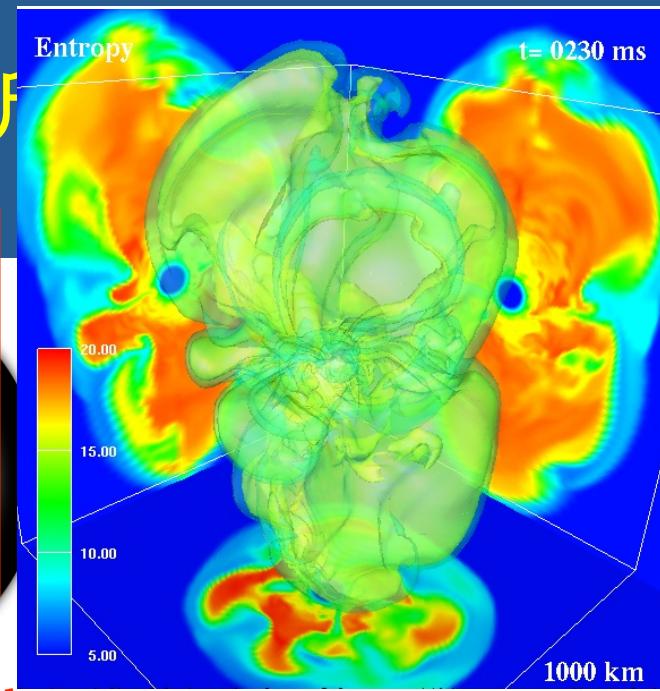
共同研究者
住吉光介(沼津高専)、岩上わかな(早稲田)、古澤峻(早稲田)
山田章一(早稲田)、今倉暁(筑波)、松古栄夫(KEK)

アウトライン

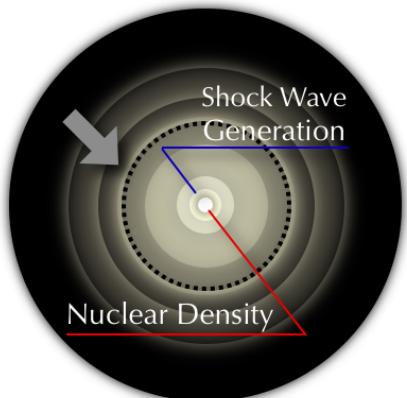
1. 重力崩壊型超新星爆発とニュートリノ輻射流体計算
2. ボルツマン輻射流体計算の現状
3. まとめと今後の課題

重力崩壊型超新

多次元的な流体不安定性
+
ニュートリノによるエネルギー輸送
が爆発の鍵
(右図は滝脇さんスライドより)



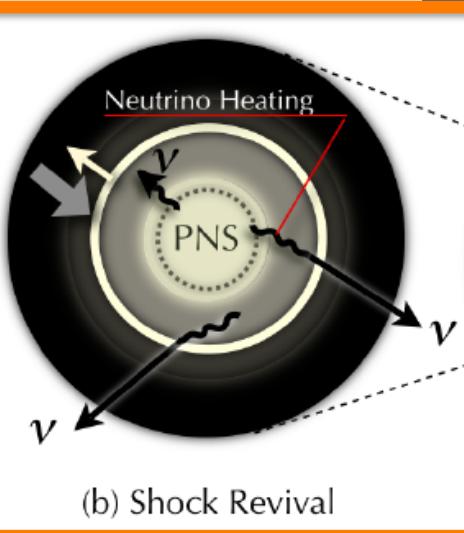
(a) Red Super Giant



(b) Gravitational Collapse



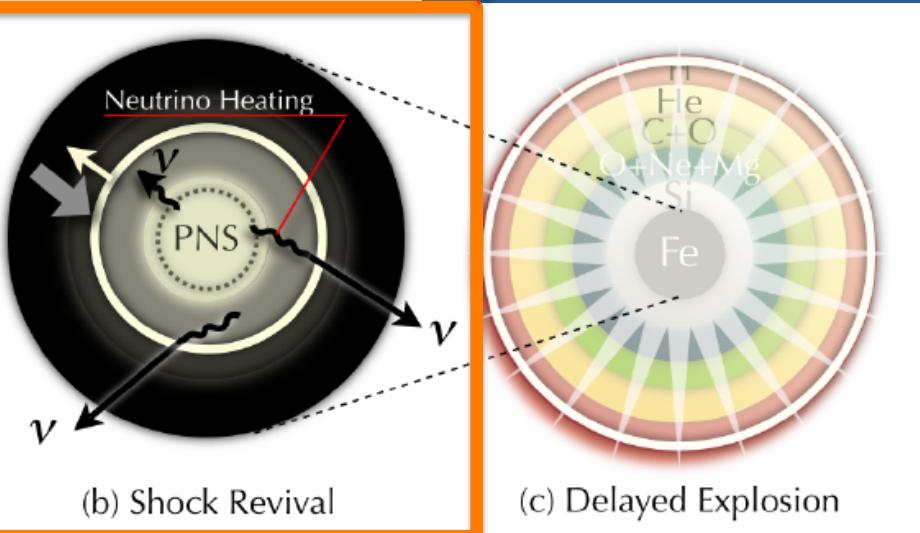
(c) Neutrino Trapping



(d) Core Bounce

Cartoon From Iwakami D thesis

(a) Shock Stall



(b) Shock Revival

(c) Delayed Explosion

To solve neutrino transport

- Work in 6D: 3D space + 3D momentum

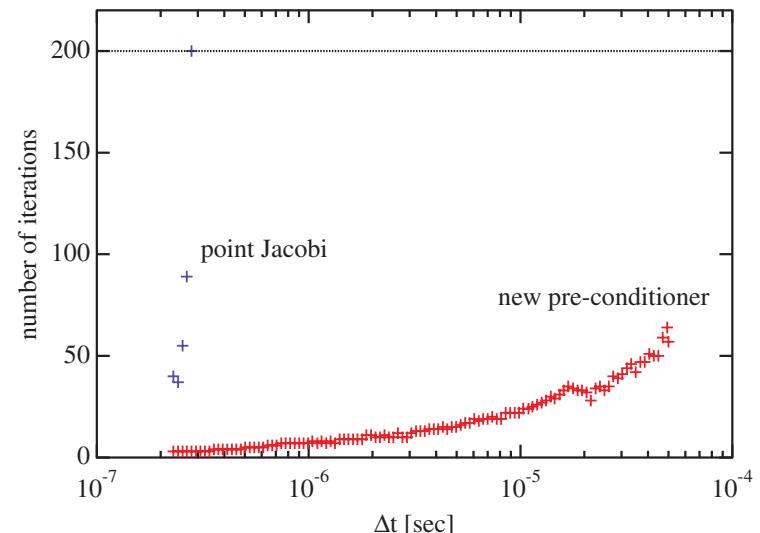
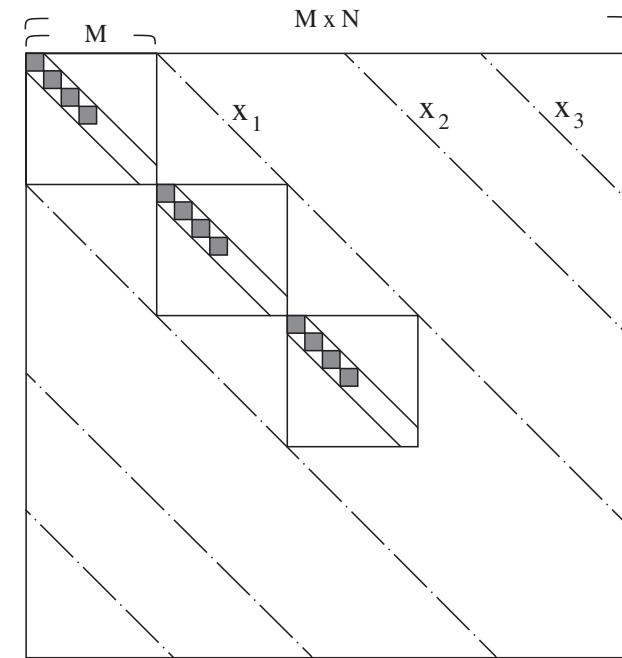
$$f_\nu(r, \theta, \phi; \varepsilon_\nu, \theta_\nu, \phi_\nu; t)$$

- Neutrino energy (ε_ν), angle (θ_ν, ϕ_ν)
- Time evolution of 6D-distribution function

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

- Left: Neutrino number change
- Right: Change by neutrino reaction
- Energy, angle-dependent reaction rates
- Compositions by EOS tables

住吉さんのトラペを拝借



今倉 & 松古 (行列解法)

多次元ボルツマン流体計算の困難

- ▽ 次元が多い(空間3次元+運動量空間3次元+時間1次元)
=> 計算コストが大 (解像度チェックを行うにも大変)

- ▽ 新しい数値計算アルゴリズムの開発が必要
これまでの1次元球対称計算とは全く違った手法が必要

Lagrangian Code
(流体comoving系をベースに解く)

Eulerian Code
(実験室系をベースに解く)

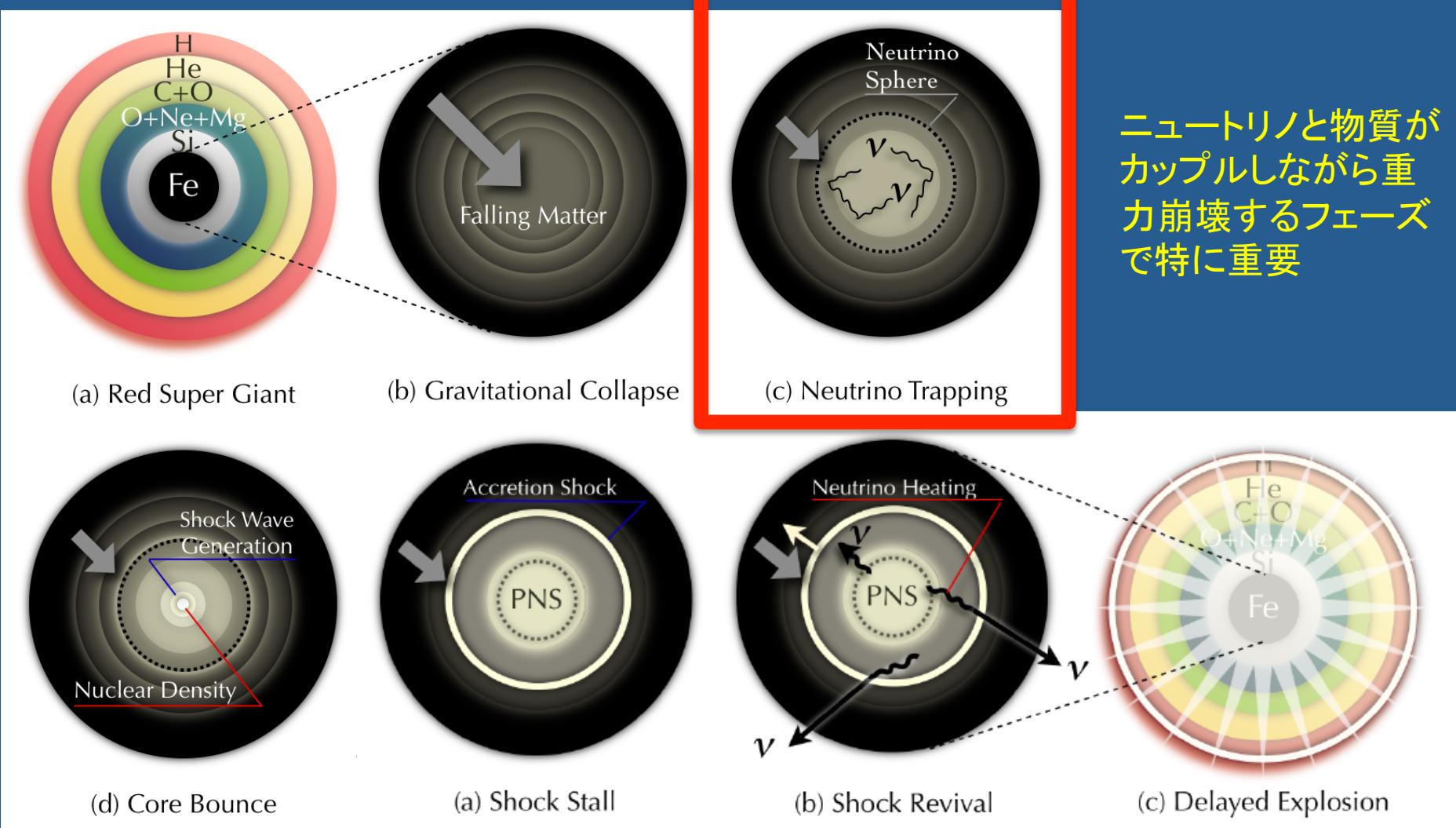
ニュートリノ輸送(ボルマン)ソルバー

重力ソルバー

流体ソルバー

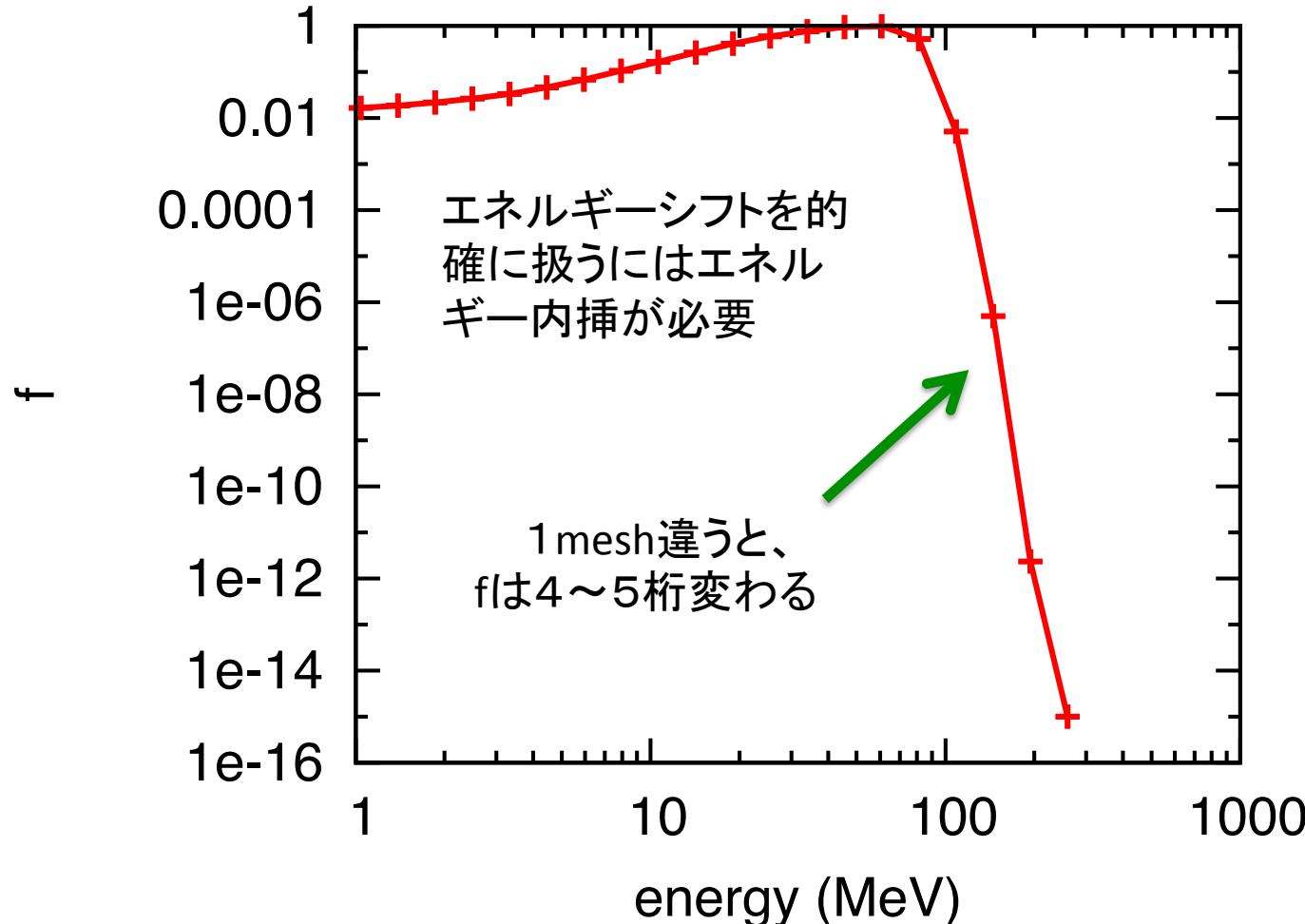
相対論的ボルツマン流体計算

超新星計算には必須



流体静止系（ニュートリノは等方分布）

ニュートリノエネルギースペクトル(典型例)

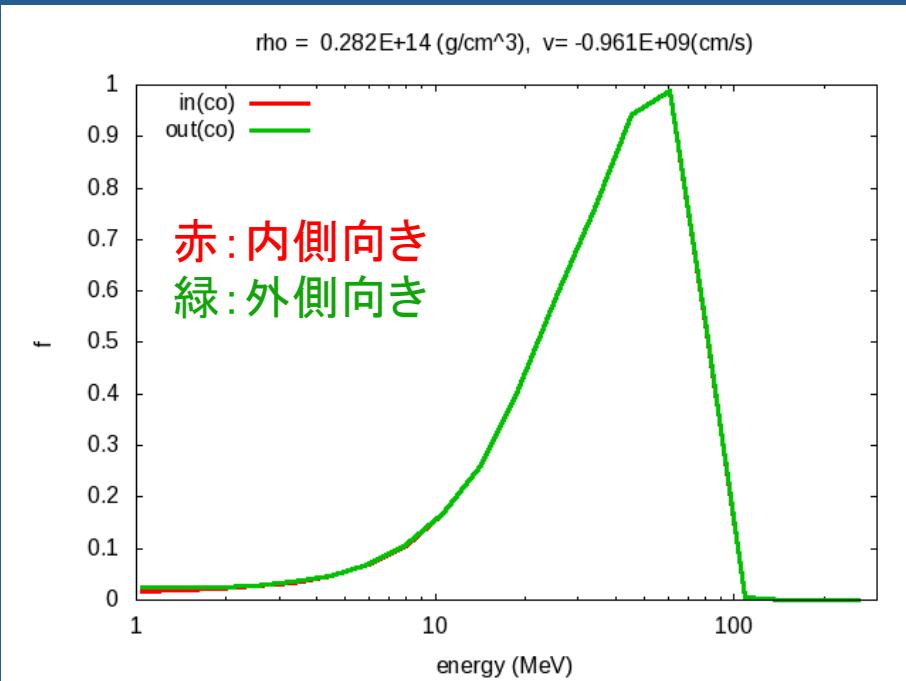


アウトライン

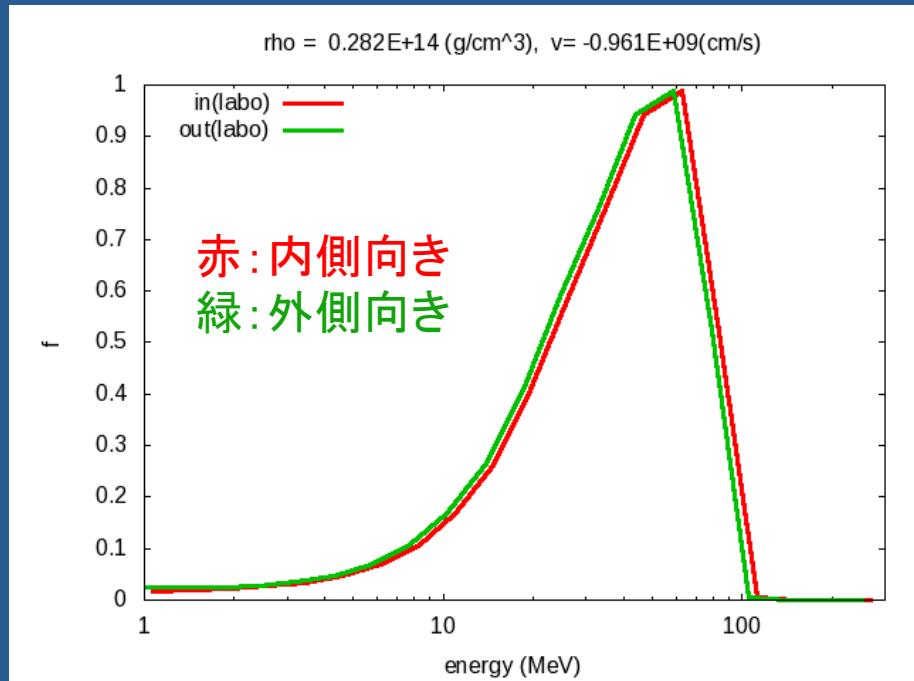
1. 重力崩壊型超新星爆発とニュートリノ輻射流体計算
2. ボルツマン輻射流体計算の現状
3. まとめと今後の課題

バウンス(衝撃波形成)直前のニュートリノ分布の進化

流体静止系(エネルギースペクトル)



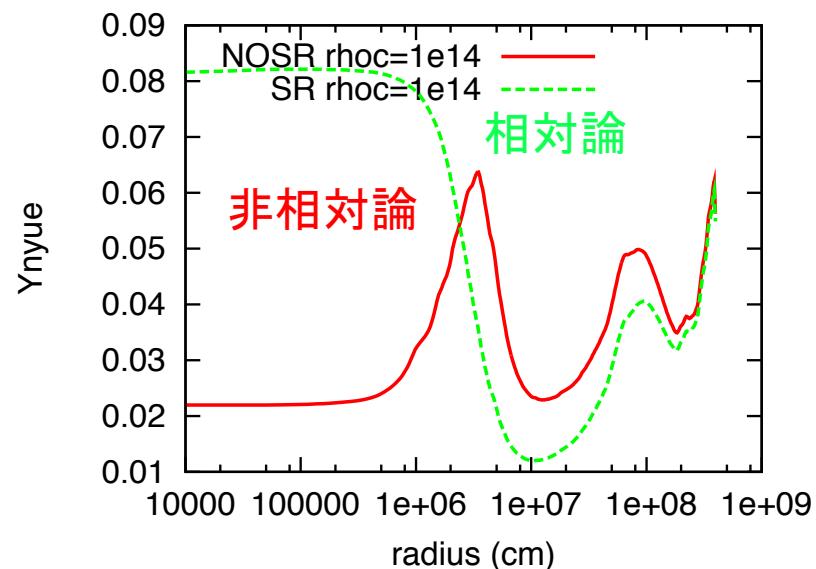
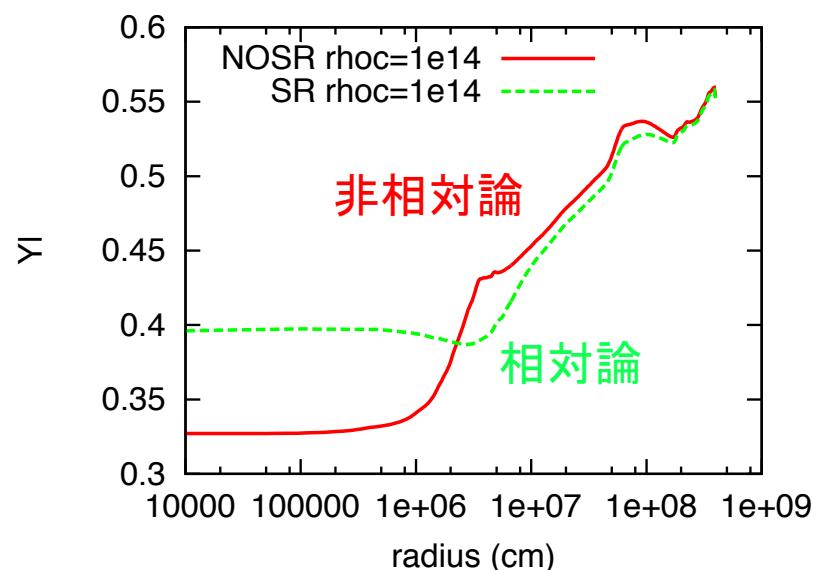
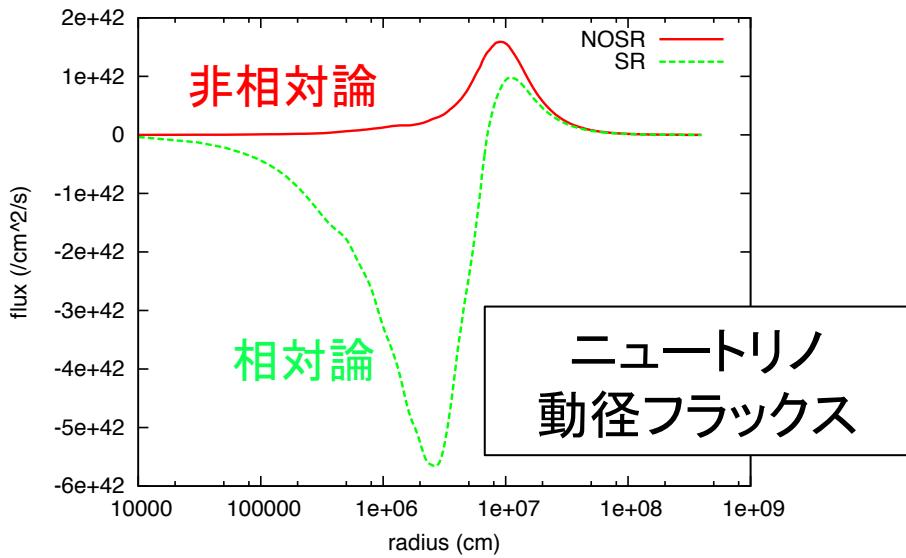
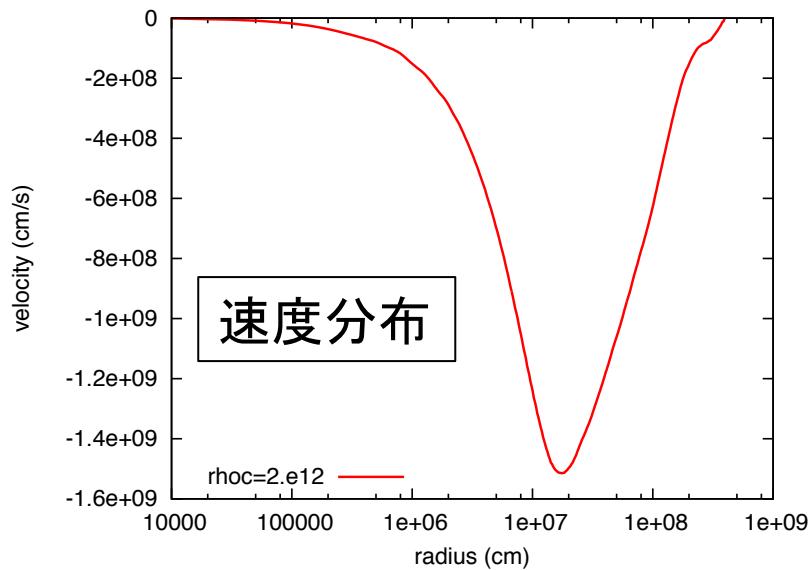
実験室系(エネルギースペクトル)



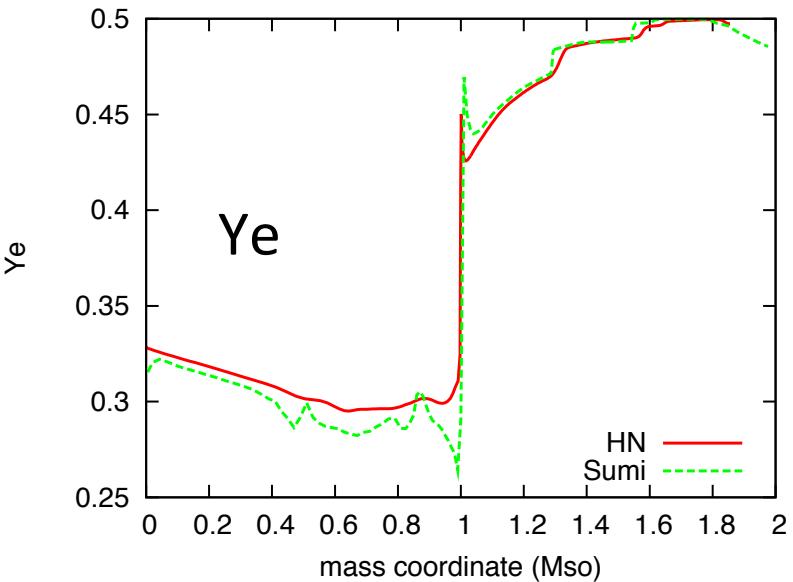
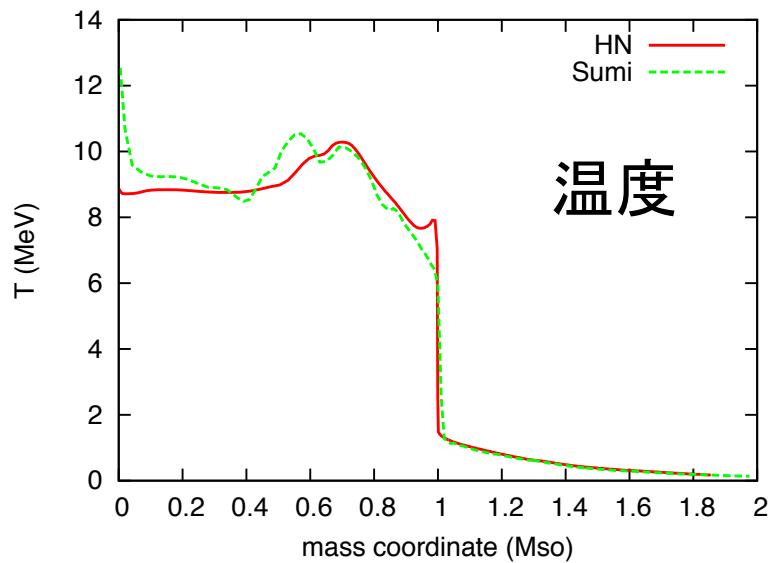
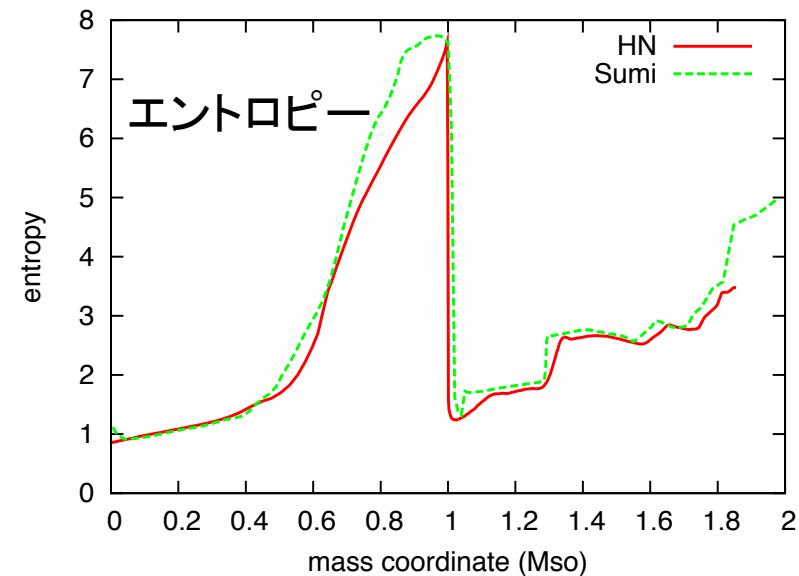
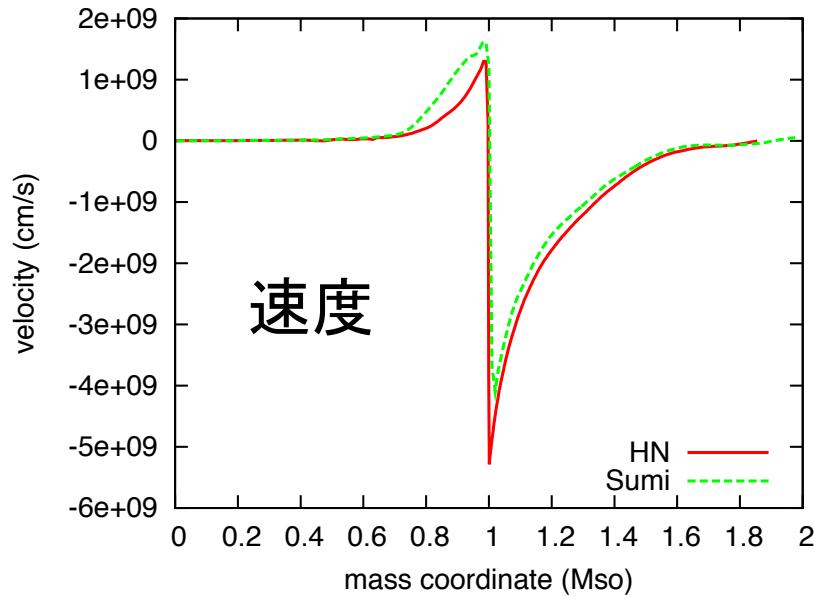
流体静止系ではきっちり等方
(low energy側を除いて)

実験室系では非等方

ニュートリノトラップへの影響

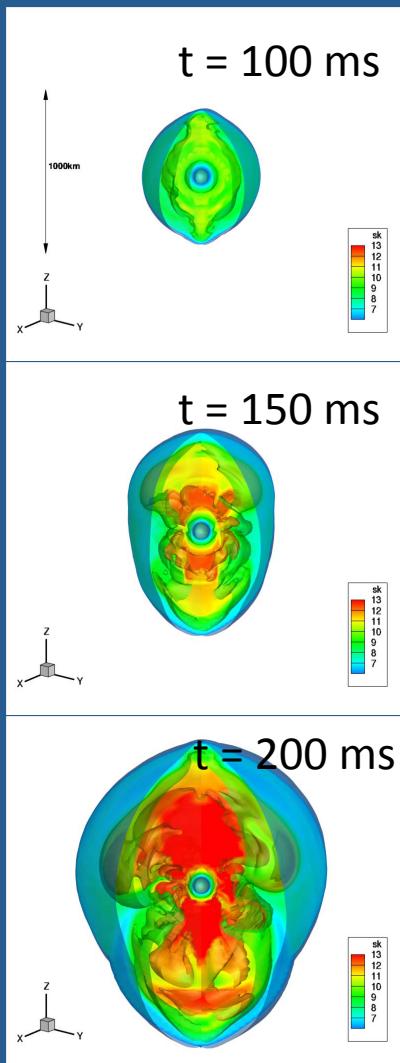


バウンス後の進化も安定に計算可能

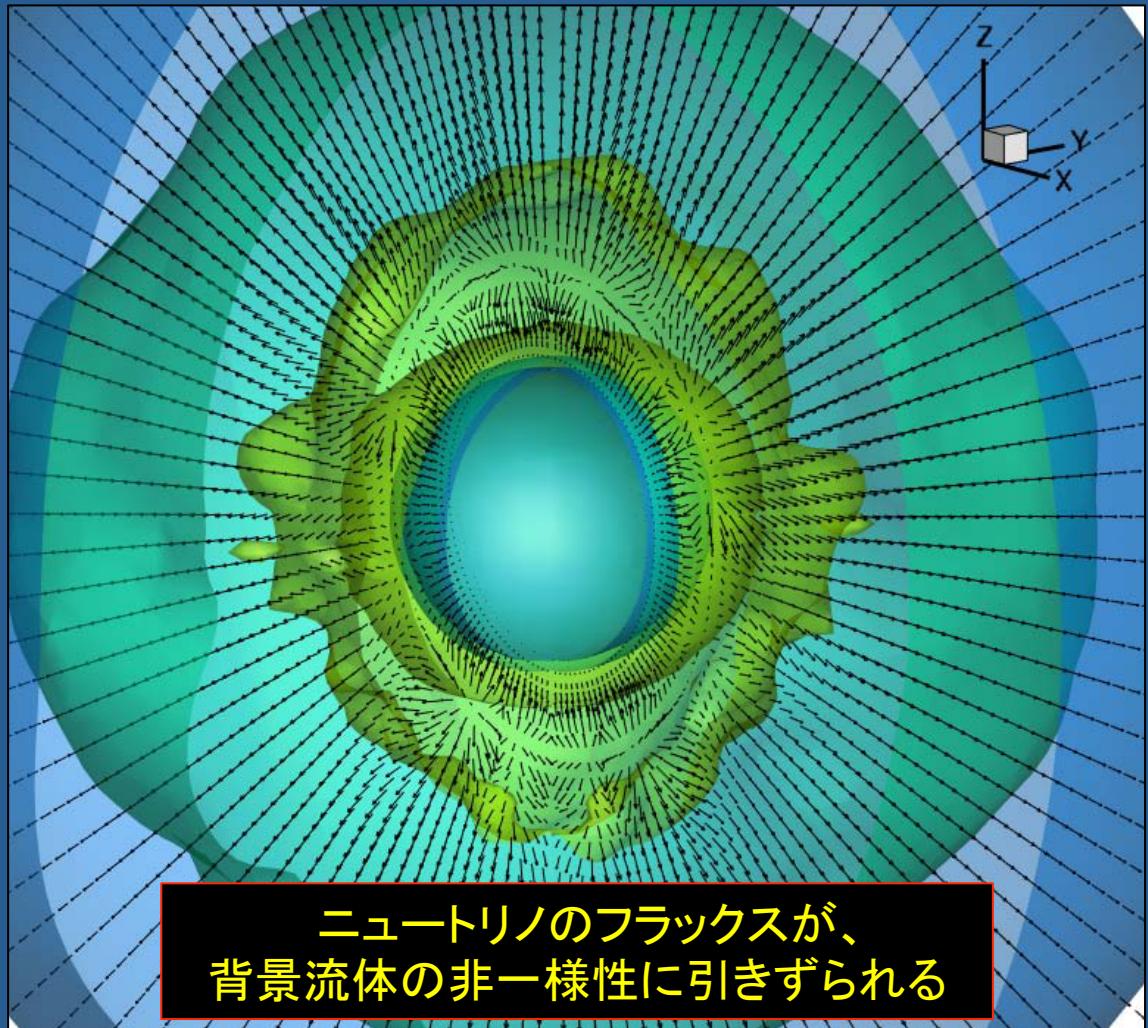


3次元超新星プロファイル中のニュートリノ分布

Sumiyoshi et al. submitted



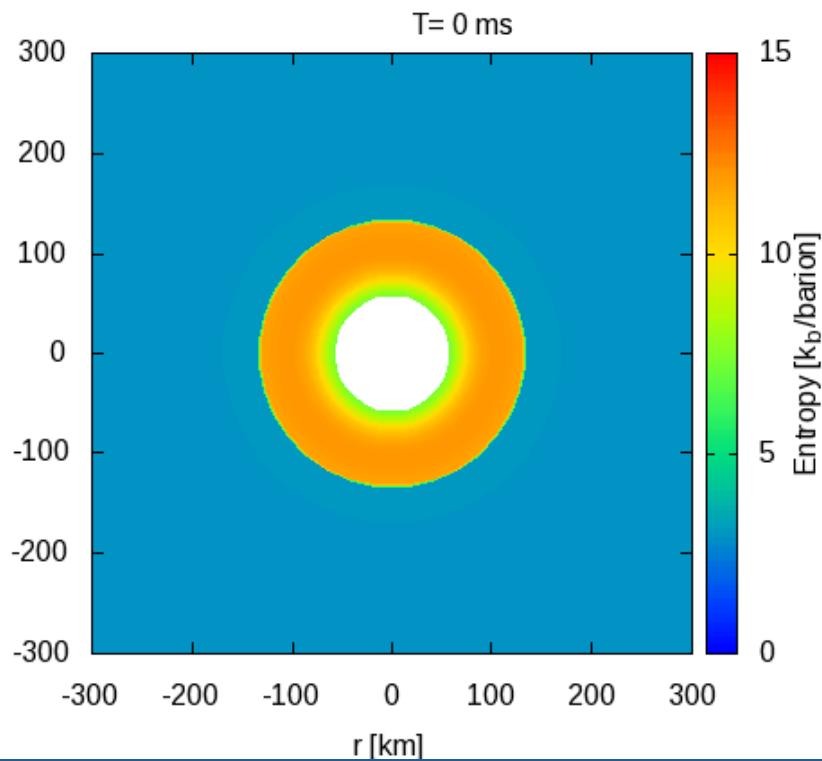
エントロピー分布(3D湍流計算)



ニュートリノ密度のコンターマップ

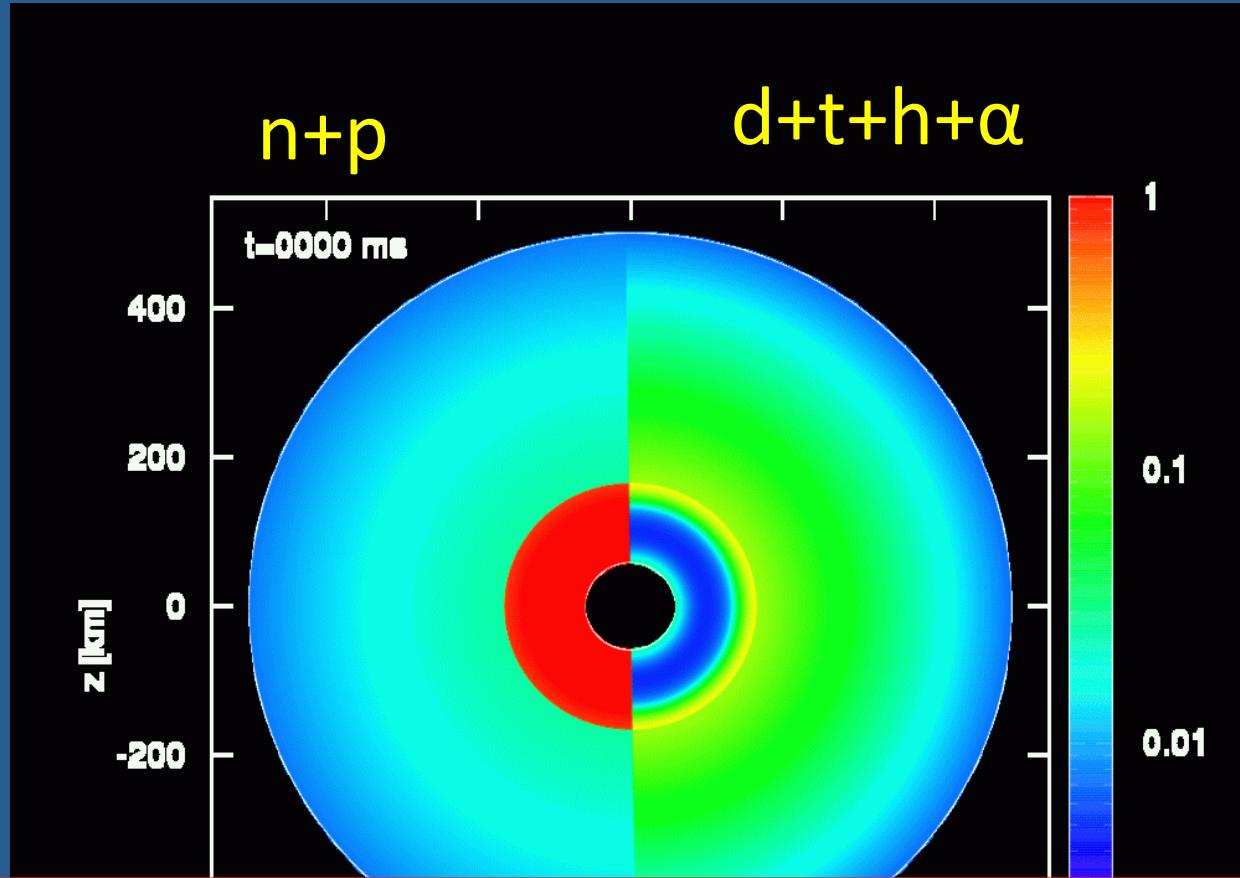
2次元軸対称ボルツマン流体計算(Post-bounce Phase)

Iwakami et al. 2014 in prep



- ✓ 先攻研究とよく一致
- ✓ 問題が非常にシンプルかつ、time stepの時間幅も長くとれる
- ✓ 内側の境界条件を適切に設定し、最終的には3D計算を行う
- ✓ 現在岩上さんを中心にコードをチューニング、並列化中
(来年度後期に京に載せる予定)

2次元軸対称計算 with New EOS (Furusawa et al. 2013)



NSE with Multi-Nuclei EOS

新しいニュートリノ加熱or冷却起源
原子核 electron capture 反応

まとめと今後の課題

- ∨ 多次元相対論的ボルツマンコード開発は、ほぼ終了
(但し、もう少し先攻研究と定量的な比較は必要)
- ∨ 2D軸対称post-bounce計算は問題なく走る
- ∨ これから半年間は、コードの並列化、高速化が主なテーマ
- ∨ Microphysicsの修正、及び一般相対論的效果の取り込みを行う