

2010年5月31日

---

# 球対称拡散近似ニュートリノ輻射流体計算コードの開発

---

東京理科大学 理工 物理 鈴木研究室 菊地 英仁

# 1 発表の流れ

---

- 研究目的
- 流体コード
- ニュートリノフラックス
- 初期モデル
- 計算結果
- 今後の展望

## 2 研究目的

---

計算負荷の軽い計算をする。

- 一次元球対称モデルを採用する。
- ニュートリノのエネルギー分布と角度分布についての計算を行わない近似的な取り扱い(エネルギー分布をフェルミ分布と近似)をする。
- その一方で、計算コストが低いことを活かした計算をする(コアから外層までの長時間の進化を一貫して計算する、ニュートリノ振動や元素合成、対流の効果なども取り入れた計算をするなど)。

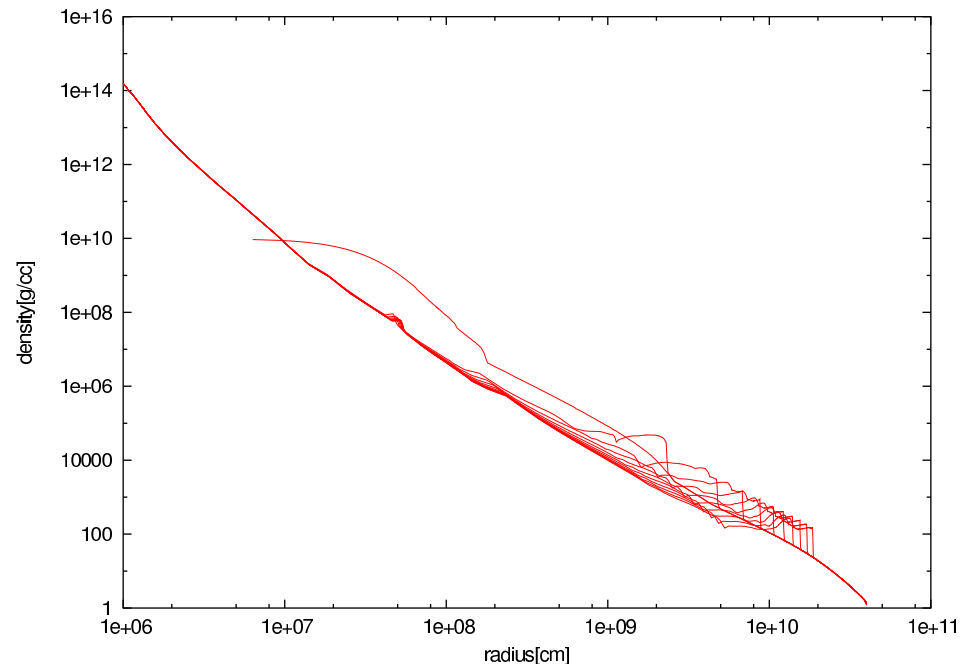


図1 15太陽質量の星の超新星爆発後の1秒毎の密度の時間変化  
(当研究室川越修士論文より引用)

- ニュートリノ輸送を扱わないと、現実的でないモデルとなる。
- ニュートリノ輸送を取り込む必要性

## 2.1 ニュートリノ輸送の扱いの方法

- 超新星爆発の数値シミュレーションコードは、一般相対論を考慮した流体計算とニュートリノ輸送の二つからなっている。一次元ニュートリノ輸送の扱いの方法には、以下のようなものがある。

	エネルギー分布	角度分布	計算負荷
1. ボルツマン方程式を解く			高
2. Multigroup flux limited diffusion法を用いる		×	中
3. エネルギー分布をフェルミ分布と近似 (本研究で採用)	×	×	低

# 3 流体コード

---

- 陰解法 (早稲田大学 山田)

- 計量 (一般相対論的、球対称)

$$ds^2 = e^{2\phi(t,m)} dt^2 - e^{2\lambda(t,m)} dm^2 - R^2 d\Omega^2 \quad (d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

- ADMではない(ブラックホールの形成の計算には対応していない)

## 4 ニュートリノフラックス

---

ニュートリノフラックスとして、以下の形を採用する。

$$F_\nu = - \int \frac{c\Lambda_\nu(\epsilon_\nu)}{3} 4\pi r^2 \rho e^{-3\phi} \frac{\partial}{\partial m} (N_\nu(\epsilon_\nu) e^{3\phi}) d\epsilon_\nu$$

ここで  $\Lambda_\nu$  は flux limiter で、

$$\Lambda_\nu(\epsilon_\nu) \equiv \frac{1}{\frac{1}{\lambda_\nu(\epsilon_\nu)} + \frac{|\frac{1}{3} e^{-3\phi} 4\pi r^2 \rho (\frac{\partial}{\partial m} (N_\nu(\epsilon_\nu)) e^{3\phi})|}{N_\nu(\epsilon_\nu)}}$$

# 5 扱っているニュートリノの反応

---

- $n + \nu_e \rightleftharpoons p + e^-$
- $p + \bar{\nu}_e \rightleftharpoons n + e^+$
- 原子核散乱

現段階では扱っていないもの

- $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
- $\nu_e + \bar{\nu}_e \rightleftharpoons e^- + e^+$
- 電子散乱
- 核子散乱

など



## 6 独立変数の種類

---

流体計算部分では、 $\tau, U, \varepsilon, Y_e, r, \lambda, \Gamma, \phi, \tilde{m}, h, S_k$  の11種類を独立変数としている。

ニュートリノに関する計算をするために、以下の変数を追加する。

- $N_{\nu_e}, E_{\nu_e}, T_{\nu_e}, \mu_{\nu_e}$
- $N_{\bar{\nu}_e}, E_{\bar{\nu}_e}, T_{\bar{\nu}_e}, \mu_{\bar{\nu}_e}$

# 7 初期モデル

---

Woosley の星の進化計算の結果

- $M = 4.23$  [solar] の He コア

# 8 EOS

---

## Shen-EOS

- NSE
- $\rho \geq 10^6 [\text{g}/\text{cm}^3]$  の領域で使用

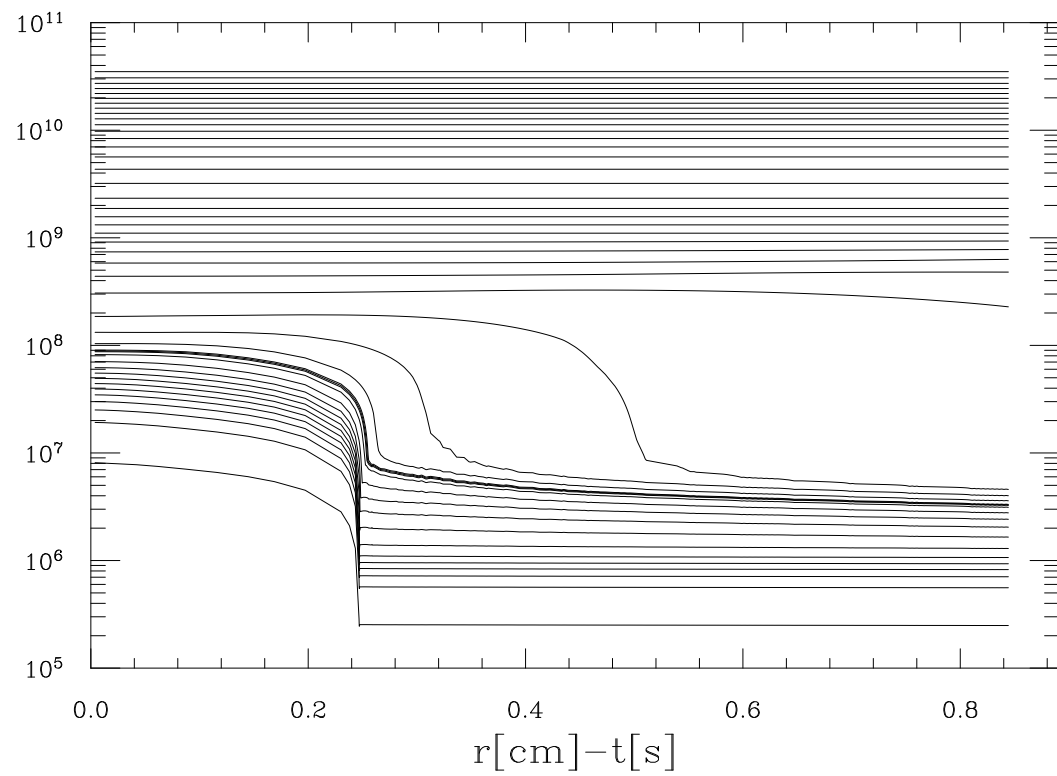
## helmholtz EOS (Timmes)

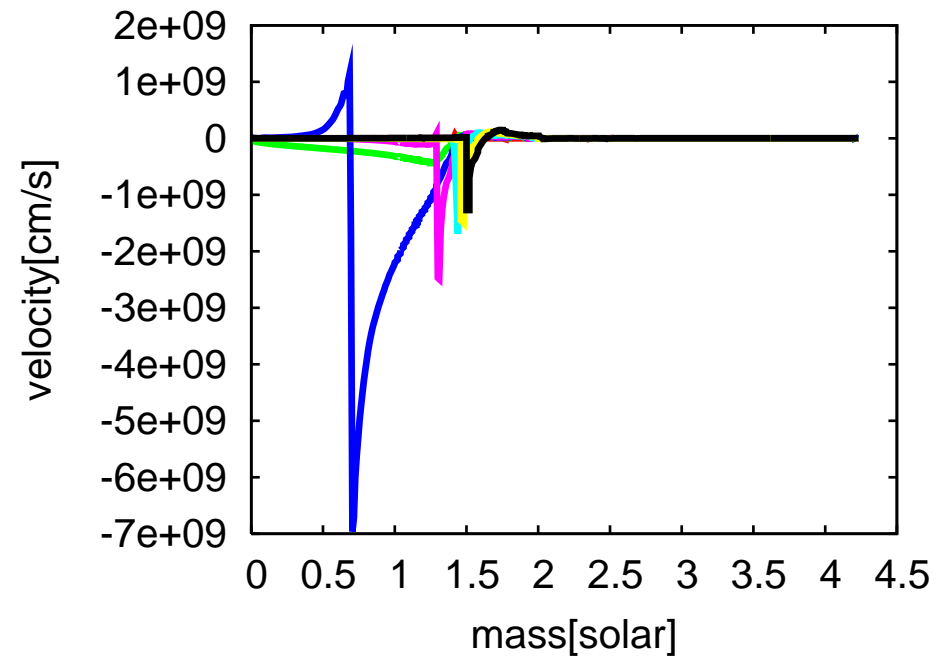
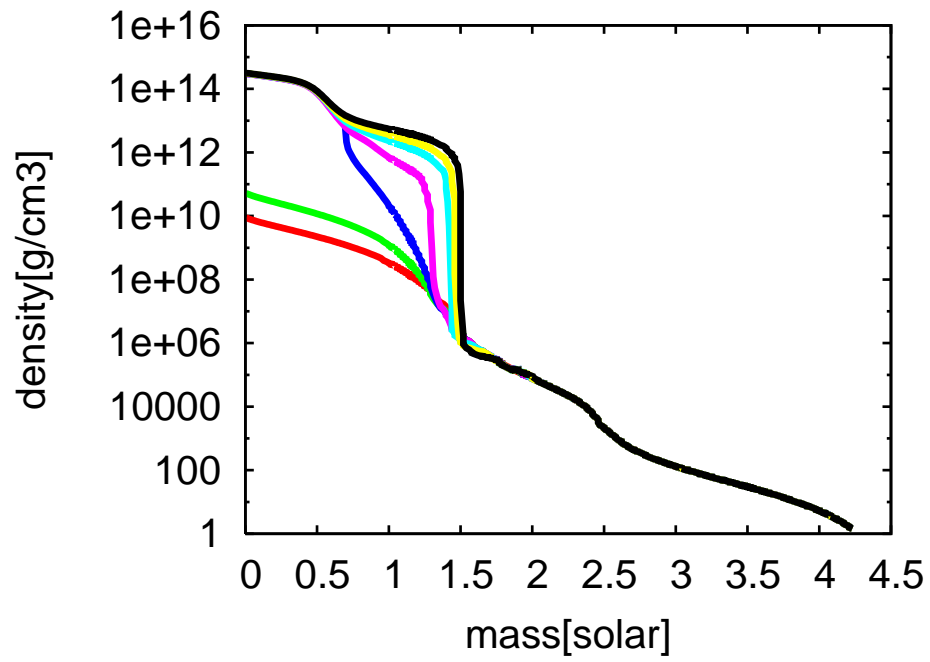
- non-NSE
- $\rho \leq 10^{5.2} [\text{g}/\text{cm}^3]$  の領域で使用

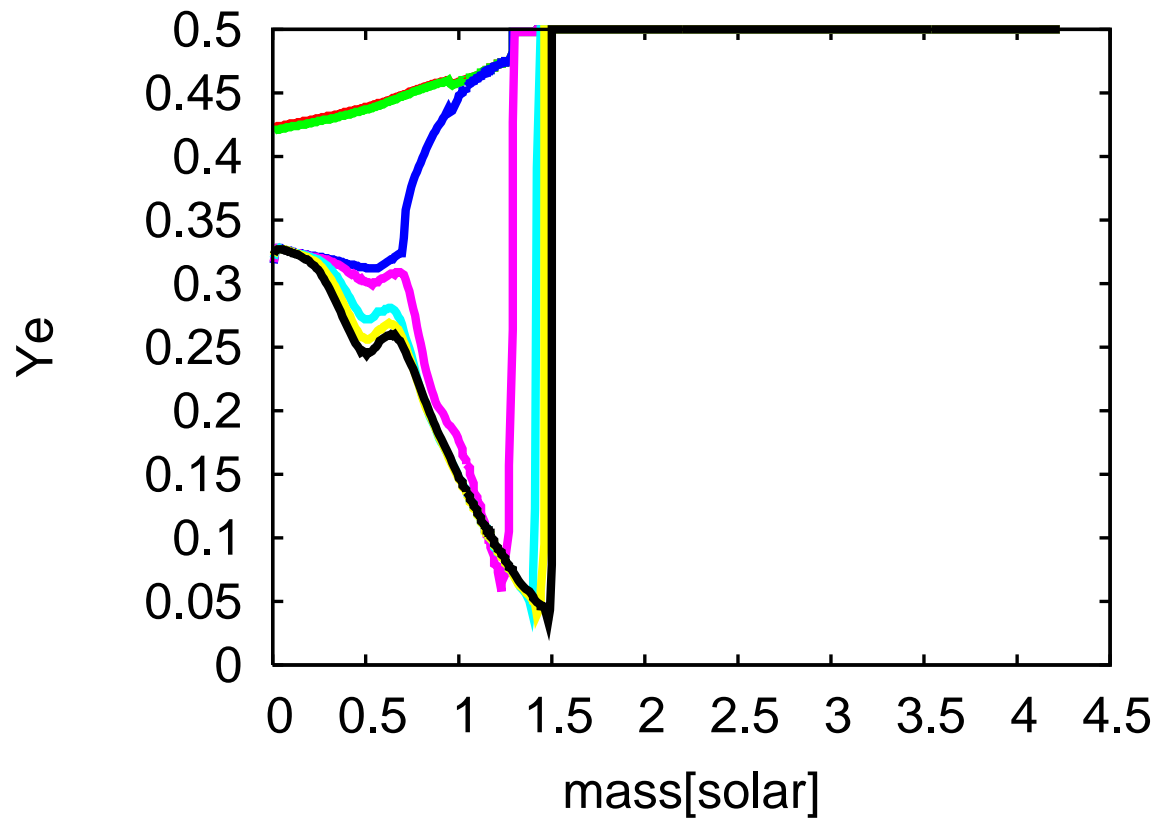
これらの中間の領域では、二つのEOSをつないでいる。

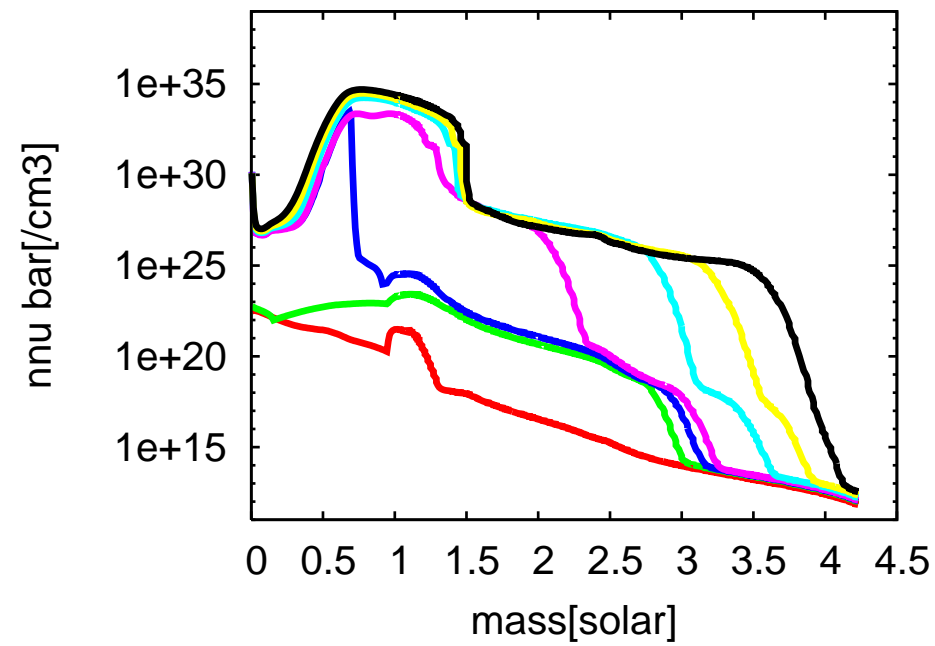
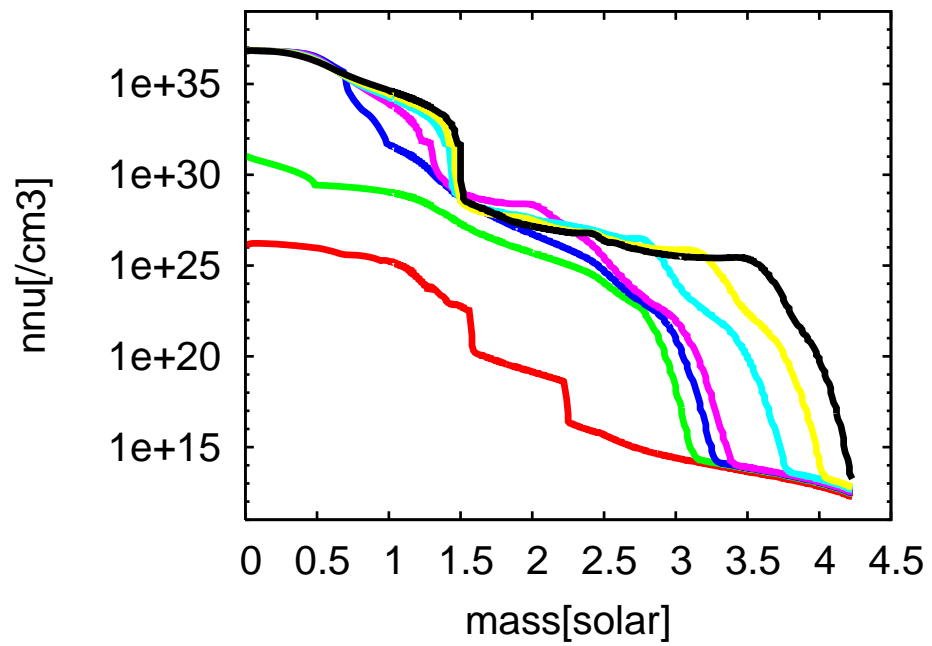
## 9 計算結果

---

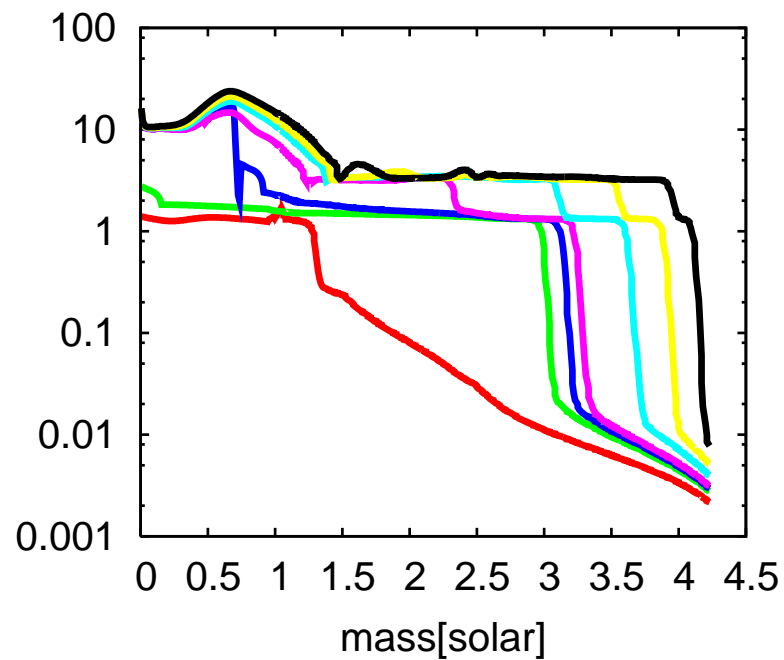
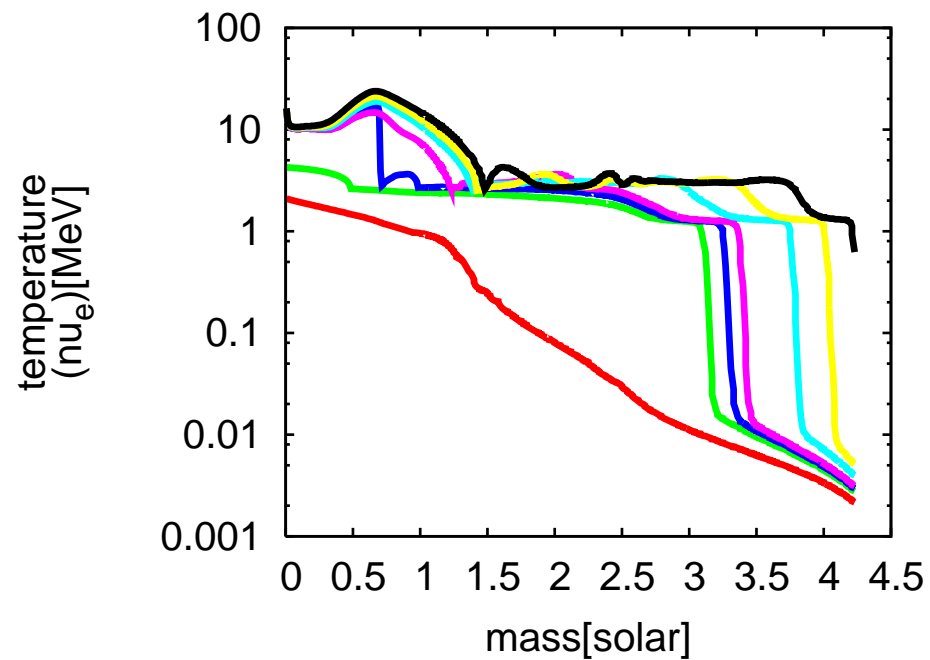
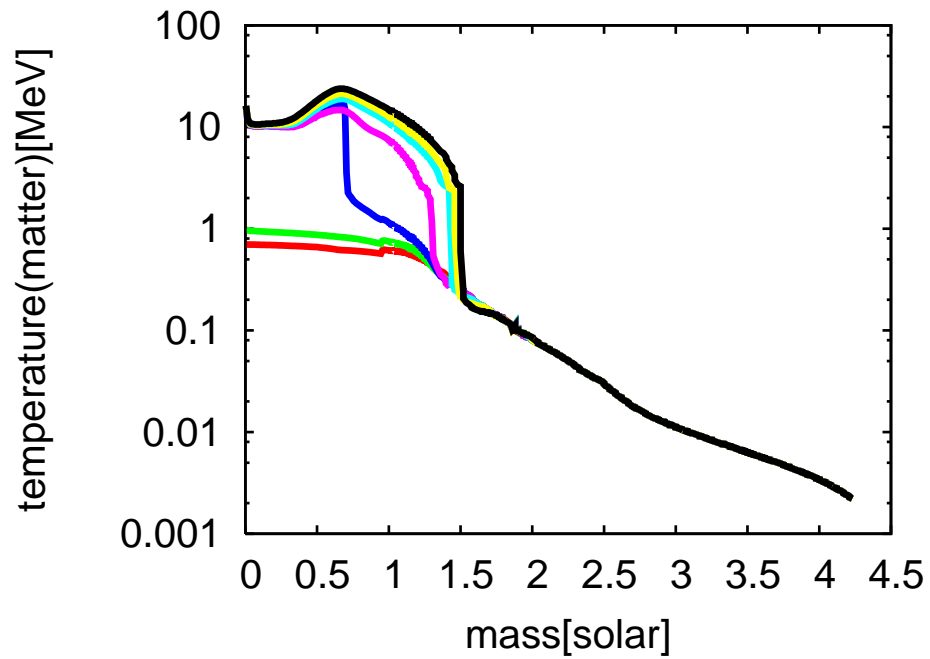


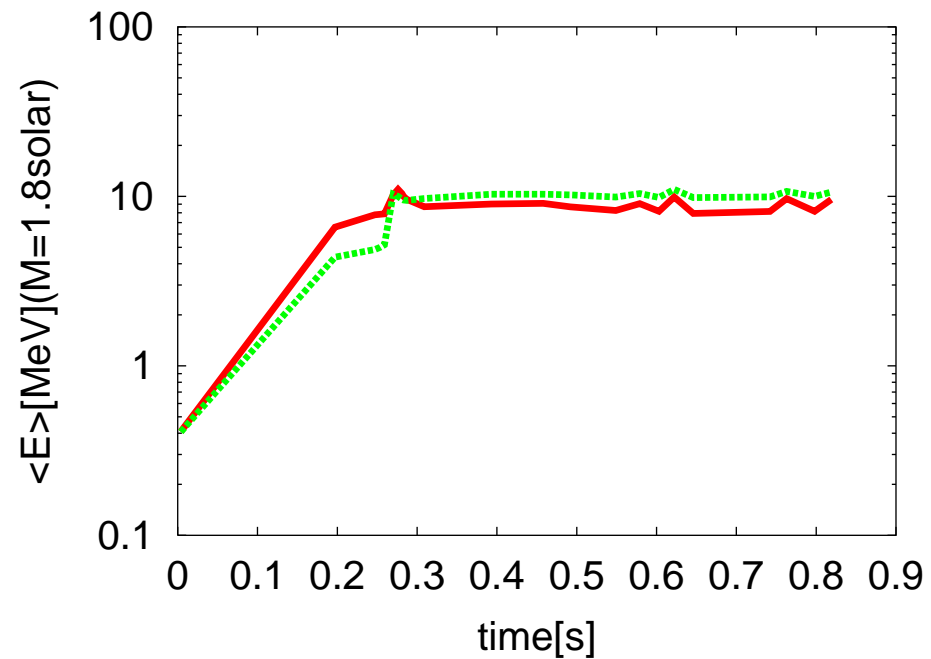
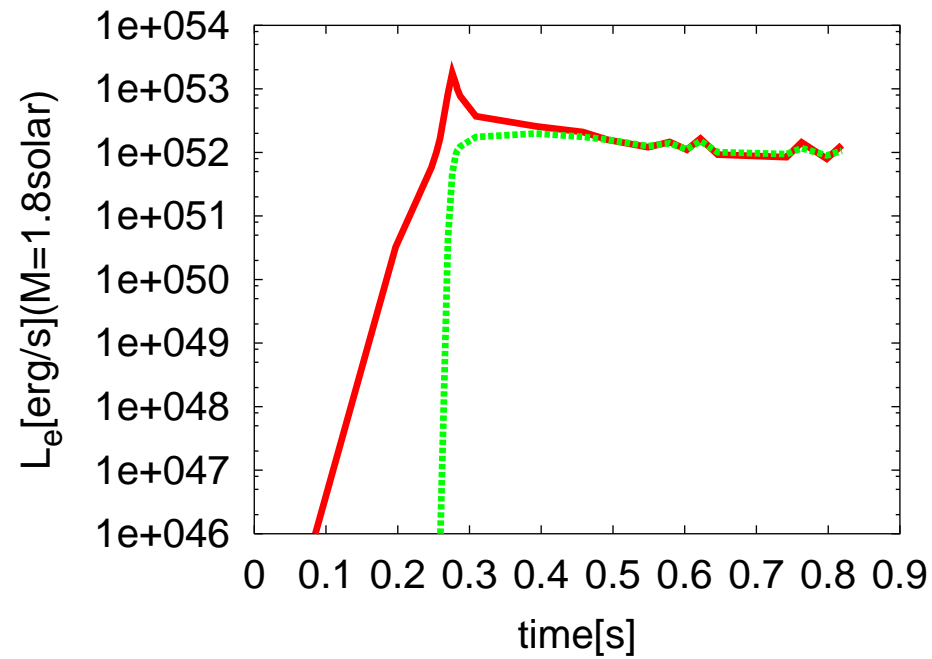
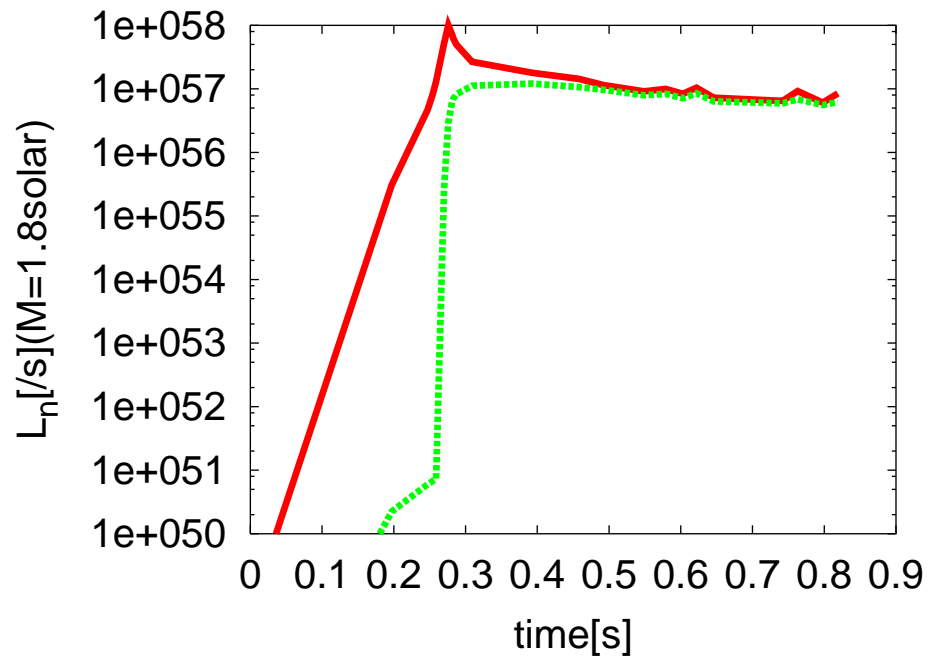












## 1.5-2秒程度の計算

物質の温度とは別に  $T_{\nu_e}$ ,  $T_{\bar{\nu}_e}$  を定義する計算で物質との平衡状態を再現

# 10 今後の課題

---

現段階では扱っていないもの

- $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
- $\nu_e + \bar{\nu}_e \rightleftharpoons e^- + e^+$
- 電子散乱

を扱う

- 対流の影響をモデル化して加える
- 爆発するモデル — ニュートリノ振動、元素合成
- ADM形式 — ブラックホールの形成
- AMR (可変メッシュ)