## 超新星爆発のニュートリノ加熱 における一般相対論及び 3次元の影響

(in preparation)

国立天文台理論研究部
黒田 仰生
固武 慶
滝脇 知也

『超新星爆発と数値シミュレーション』 京都大学 H23/12/27

## 1. これからの超新星数値計算へ向けて

近年様々な数値計算で超新星爆発の報告がなされている。 1次元球対称では爆発しないが、多次元にすると爆発する。

Neutrino Driven Explosion

2D : Buras+, '06, Marek&Janka,'09, Suwa+,'10

3D : Takiwaki+,'11

✓Acoustic mechanism

2D : Burrows+, '06

Magneto-rotational Explosion
 2D:Yamada&Sawai,'04,Kotake+'05
 ,Burrows+'07,Takiwaki+'09
 3D:Mikami+,'08,Scheidegger+,'10,KT&Umeda,'10





過去の計算で、GRはどのように結果に影響を及ぼしていたか?



GRの効果は爆発に有利に働く場合もある



#### 過去の計算で、GRはどのように結果に影響を及ぼしていたか?





過去の計算で、GRはどのように結果に影響を及ぼしていたか?



Post-Newtonianの2次元計算では 有利に働いている

コードの概要

 $\partial_t (e^{6\phi}F_i) + \partial_j [e^{6\phi}(\alpha P_i^j - \beta^j F_i)] = e^{6\phi} [-E\partial_i \alpha + F_j \partial_i \beta^j + (\alpha/2)P^{jk}\partial_i \gamma_{jk} + \alpha Q^\mu \gamma_{i\mu}]$  $\partial_t (e^{6\phi}E) + \partial_i [e^{6\phi}(\alpha F^i - \beta^i E)] = e^{6\phi}(\alpha P^{ij}K_{ij} - F^i\partial_i \alpha - \alpha Q^\mu n_\mu)$ 



Closure relation (M1 closure), cf. Shibata+,`11

$$\begin{split} P^{ij} &= \frac{3\chi - 1}{2} P^{ij}_{thin} + \frac{3(1 - \chi)}{2} P^{ij}_{thick} \\ P^{ij}_{thin} &= E \frac{F^i F^j}{F_k F^k} \\ P^{ij}_{thick} &= \mathcal{J} \frac{\gamma^{ij} + 4\gamma^{ik} \gamma^{jl} u_k u_l}{3} + \gamma^{jk} \mathcal{H}^i u_k + \gamma^{ik} \mathcal{H}^j u_k \\ \chi &= \frac{3 + 4\bar{F}^2}{5 + 2\sqrt{4 - 3\bar{F}^2}} \\ \bar{F}^2 &\equiv \frac{F^i F_i}{E^2} \end{split}$$

1) エネルギ-フラックスがr<sup>-2</sup>で落ちているか?



3.15M<sub>☉</sub>におけるニュートリノ加熱

Progenitor: Woosley & Weaver, '95の15Msun EOS: Shen eos (Shen+,'98)+e⁻e⁺+photon(+neutrino)

|    | GR  | SR  |
|----|---|---|
| 3D | 時空:BSSN方式   | 時空 : Δφ=4πρ <sub>0</sub> , α=1, β=0, γ <sup>ij</sup> =δ <sup>ij</sup>   |
|    | 時空:BSSN方式   | 時空 : Δφ=4πρ <sub>0</sub> , α=1, β=0, γ <sup>ij</sup> =δ <sup>ij</sup>   |
| 1D | 毎ステップ $\left\{ u^{i} = \frac{u^{\kappa}x_{k}}{r^{2}}x^{i} \right\}$ を課す | 毎ステップ $\left\{ u^{i} = \frac{u^{\kappa}x_{k}}{r^{2}}x^{i} \right\}$ を課す |

◆8^3個のAMR boxの8段階多層構造(dx<sub>min</sub>~600m) ◆計算は天文台Cray XT4 (256core) で ~2.5ms/1day(GR)

# 3.15M<sub>☉</sub>におけるニュートリノ加熱



## 3.15M<sub>☉</sub>におけるニュートリノ加熱





ニュートリノ光度は ①次元をあげると上がる。 ②SR→GRにしても上がる。

3.15M。におけるニュートリノ加熱



ニュートリノのエネルギーは: SR→GRにすると高くなる 3D→1Dにすると高くなる

3.15M。におけるニュートリノ加熱









 $\tau_{heat} \equiv \frac{-e_{bind}}{\dot{Q}}$  binding energyがニュートリノ加熱 により0になるまでの時間

3.15M。におけるニュートリノ加熱



#### まとめ

・ニュートリノ輻射入りの3DGRMHDコードの開発
・コアバウンス後100msの初期段階において 3DGRはニュートリノ加熱に有利
・理由は3DGRはニュートリノエネルギーが高く、 結果的に加熱の効率が一番良い