

# Impact of the Neutrino Oscillation on Core-Collapse Supernovae

諏訪 雄大

(京都大学 基礎物理学研究所)

共同研究者

固武慶、滝脇知也(国立天文台)、佐藤勝彦(自然科学研究機構)、  
M. Liebendörfer (Univ. Basel)

# Core-Collapse Supernovae

- \* 宇宙で最も激しい爆発現象の一つ

- $E_{\text{exp}} \sim 10^{51} \text{ erg}$

- $E_{\text{grav}} \sim 10^{53} \text{ erg}$  ( $\sim 0.1 M_{\odot} c^2$ )

- $E_{\nu} \sim 10^{53} \text{ erg}$

- \* 中性子星／ブラックホール形成

- \* ガンマ線バースト形成

- ❖ 物理学における既知のすべての相互作用が重要

- **Macrophysics**

- ▶ **gravitation**

- core collapse

- ▶ **electro-magnetic field**

- pulsar, magnetar,  
magnetorotational explosion

- **Microphysics**

- ▶ **weak interaction**

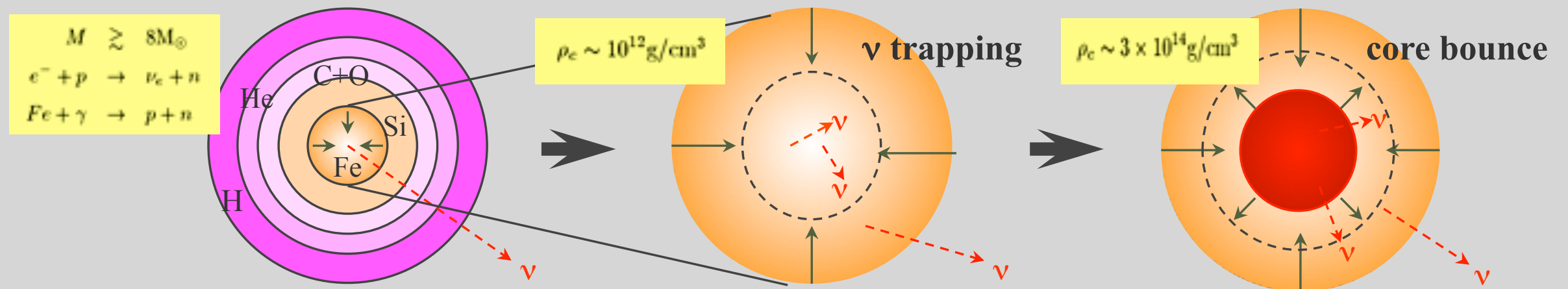
- neutrino physics

- ▶ **nuclear physics**

- equation of state of dense matter

# Supernova scenario

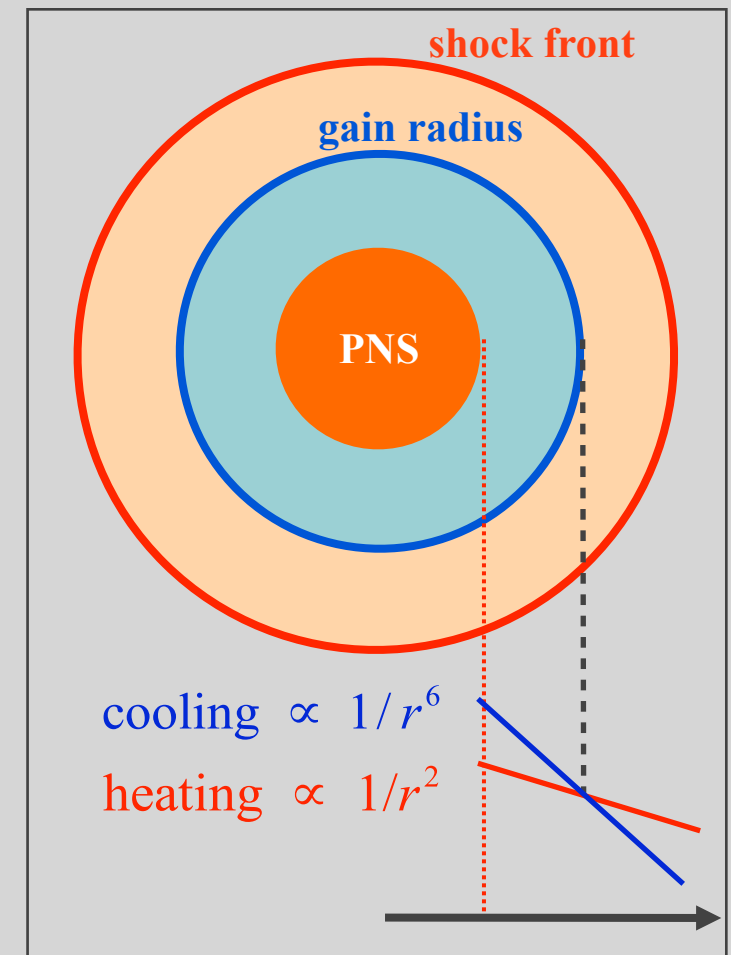
- \* 初期質量  $\gtrsim 10M_{\odot}$  の星：中心に鉄コア形成
- \* 電子捕獲反応、鉄の光分解反応→鉄コア崩壊
- \* 核密度を超えると状態方程式が硬くなる→core bounce
- \* コア表面で衝撃波形成、伝搬→外層を吹き飛ばせばいい(“**prompt explosion**”)



# Neutrino heating mechanism

- \* neutrino **cooling** (electron capture) rate:  $Q_{\nu}^{-} \propto T^6 \propto r^{-6}$
- \* neutrino **heating** (neutrino capture) rate:  $Q_{\nu}^{+} \propto L_{\nu} r^{-2} \propto r^{-2}$
- \* gain radius:  $Q_{\nu}^{-} = Q_{\nu}^{+}$
- \* heating between gain radius and shock:
$$L_{\nu, \text{heat}} \sim 3 \times 10^{51} \text{erg s}^{-1} \left( \frac{M}{0.1 M_{\odot}} \right) \left( \frac{L_{\nu}}{10^{53} \text{erg s}^{-1}} \right) \left( \frac{\langle \varepsilon^2 \rangle}{(15 \text{MeV})^2} \right) \left( \frac{r}{200 \text{km}} \right)^{-2}$$
- \* shock revival by neutrino heating

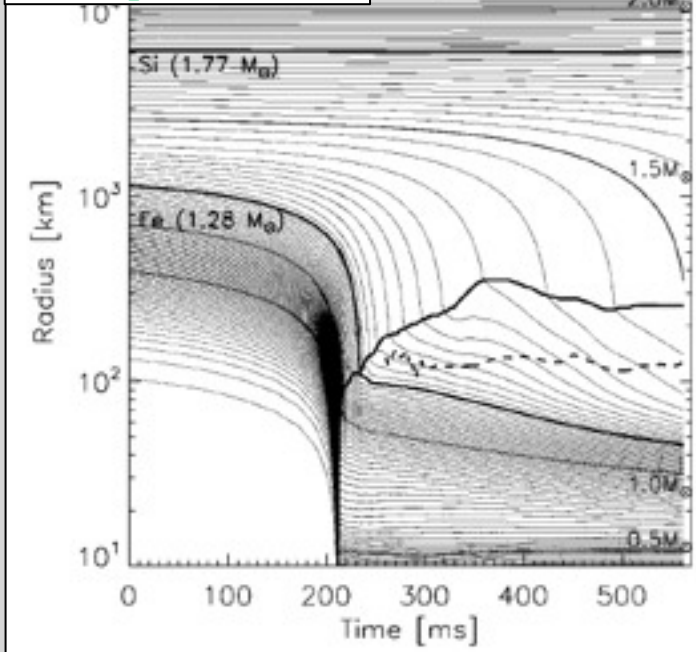
➡ “**delayed explosion**”



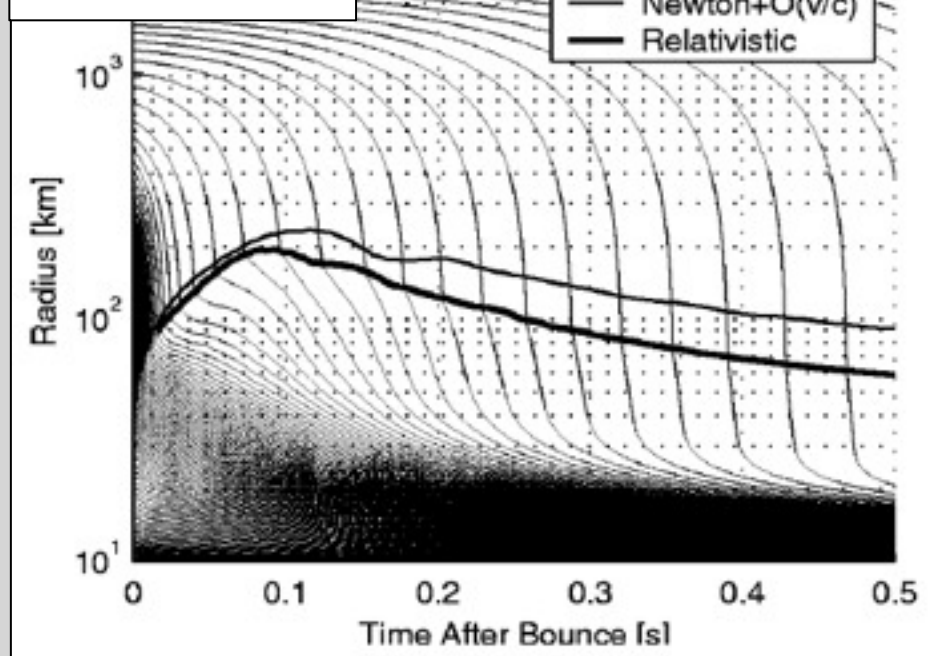


# Current status of 1D: fail to explode

Rampp & Janka 00



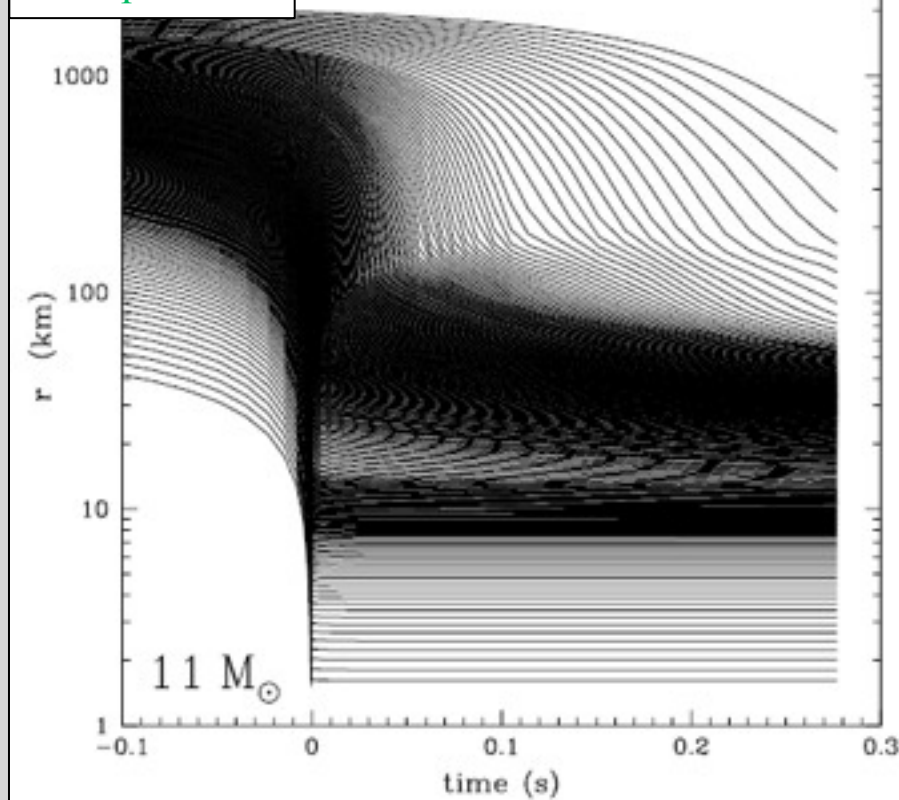
Liebendörfer+ 01



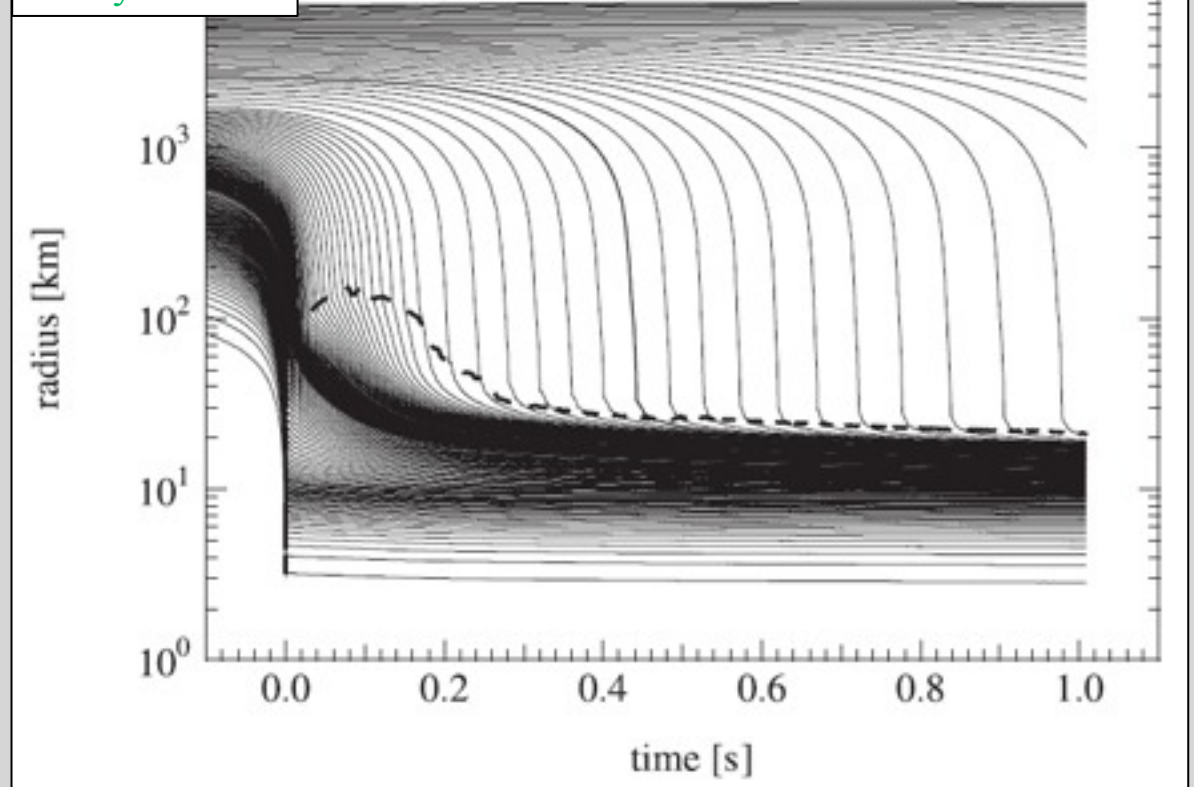
~100 km

**state-of-the-art simulations do not obtain explosion!**

Thompson+ 03



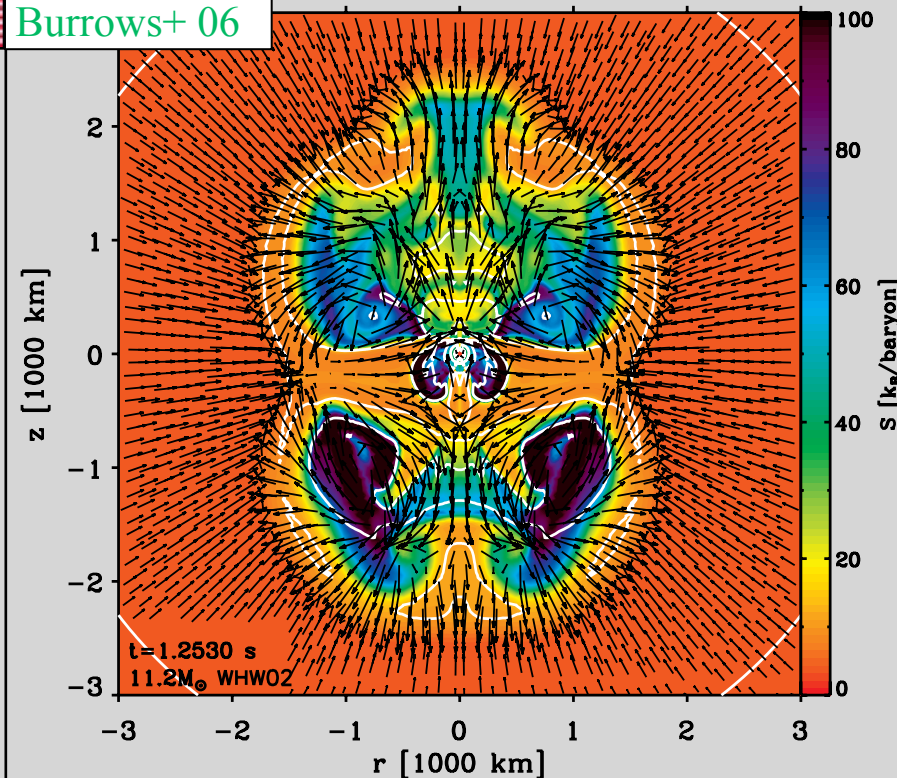
Sumiyoshi+ 05



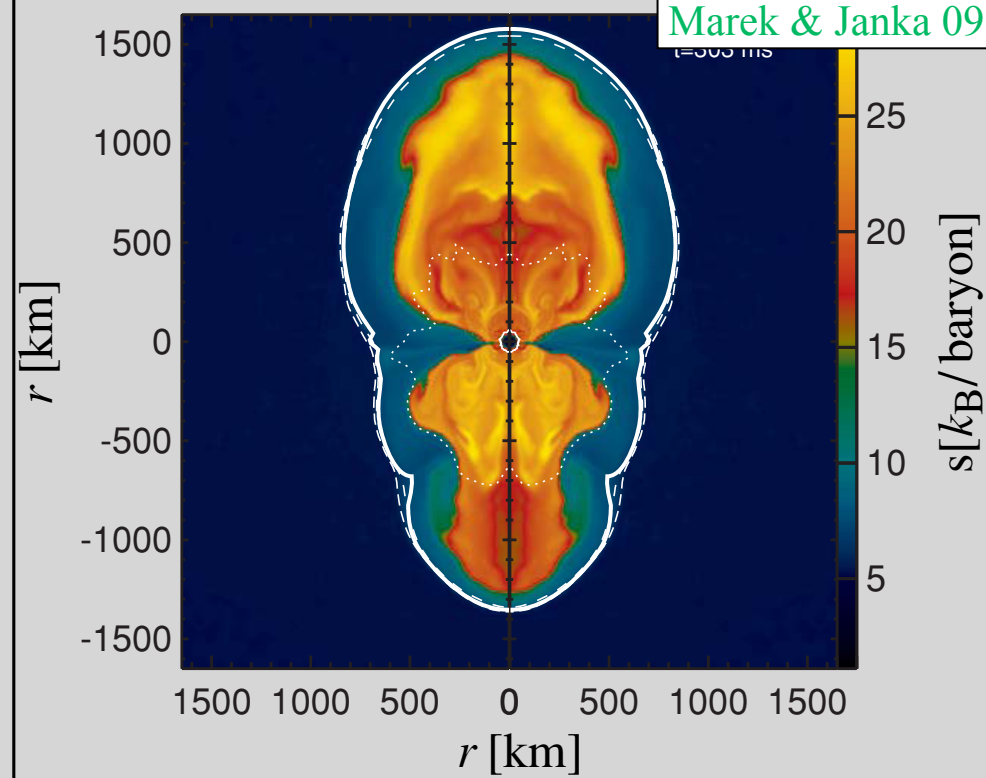
# Multi-D simulations



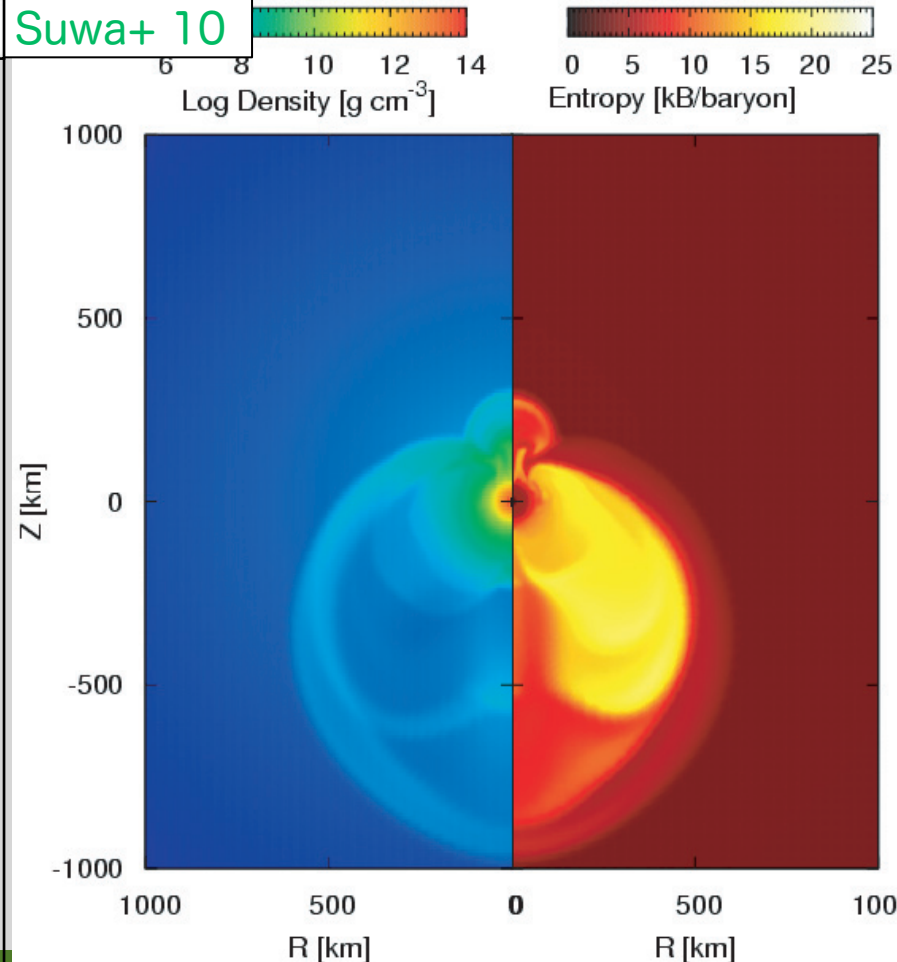
Burrows+ 06



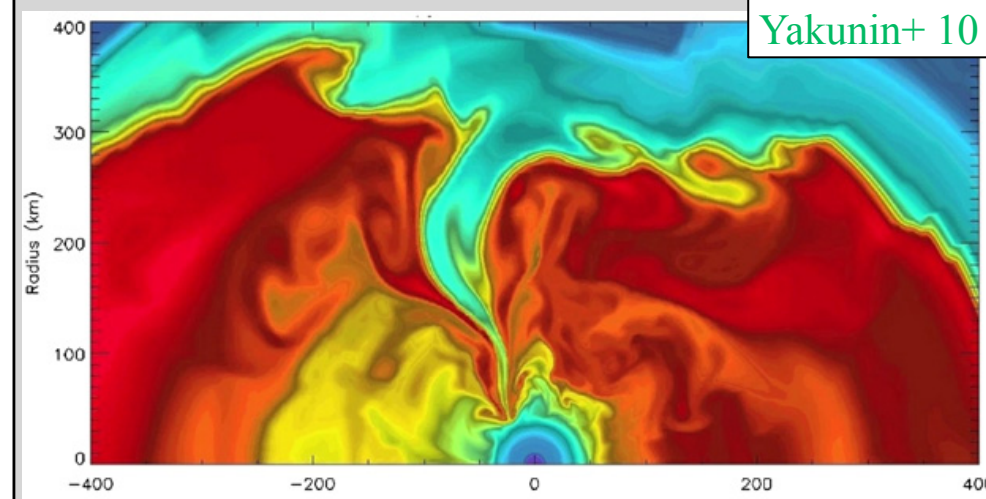
Marek & Janka 09



Suwa+ 10



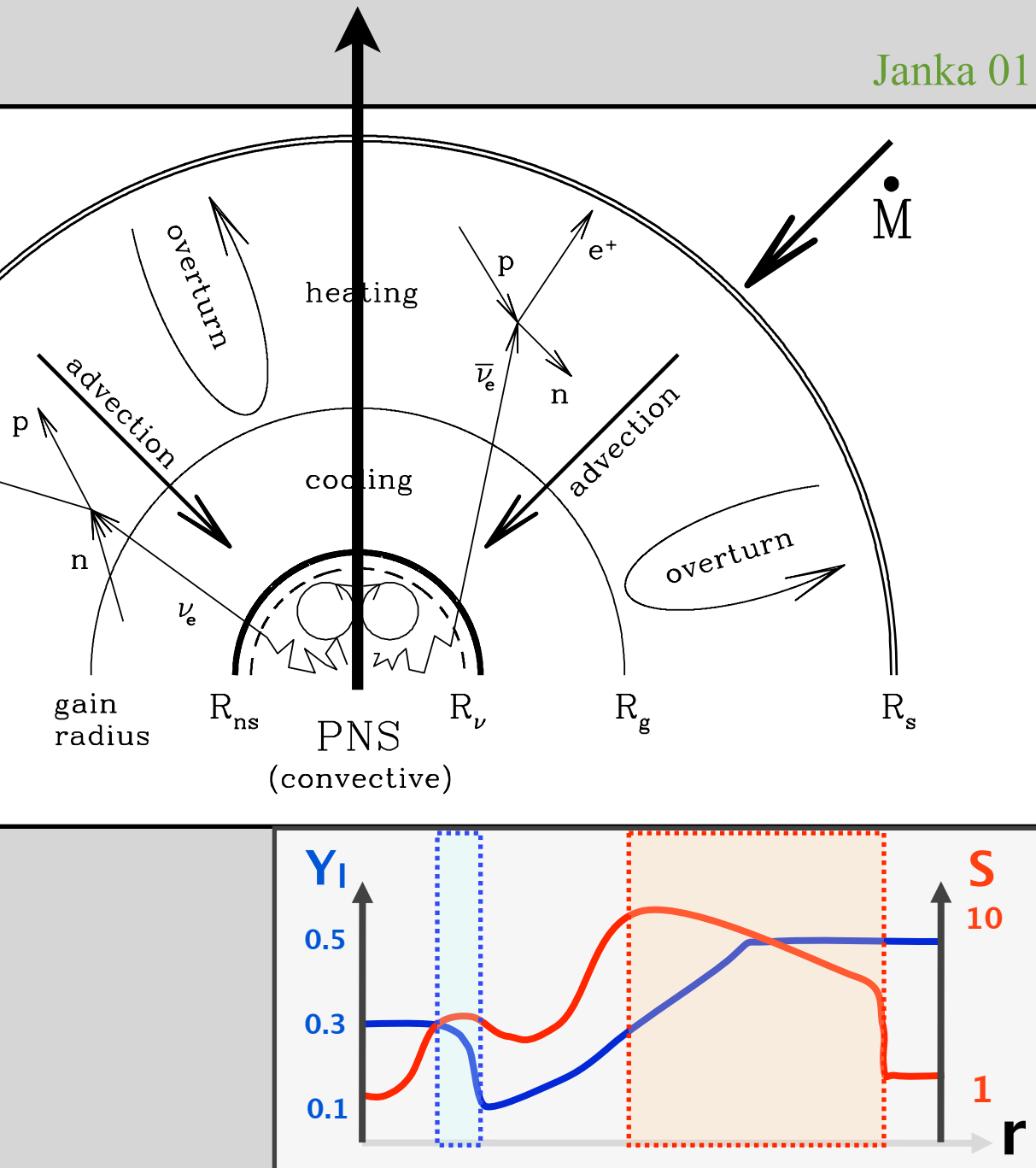
Yakunin+ 10



衝撃波は1000kmを突破。  
マイナーな進歩に見えるかもしれないが、すでに鉄コアは出ているので、ラム圧は急速に落ちる。  
この衝撃波は膨張し続けると考えられる。



# Convectively unstable regions



## \* PNS convection

- induced by negative  $Y_I$  gradient due to neutrino cooling

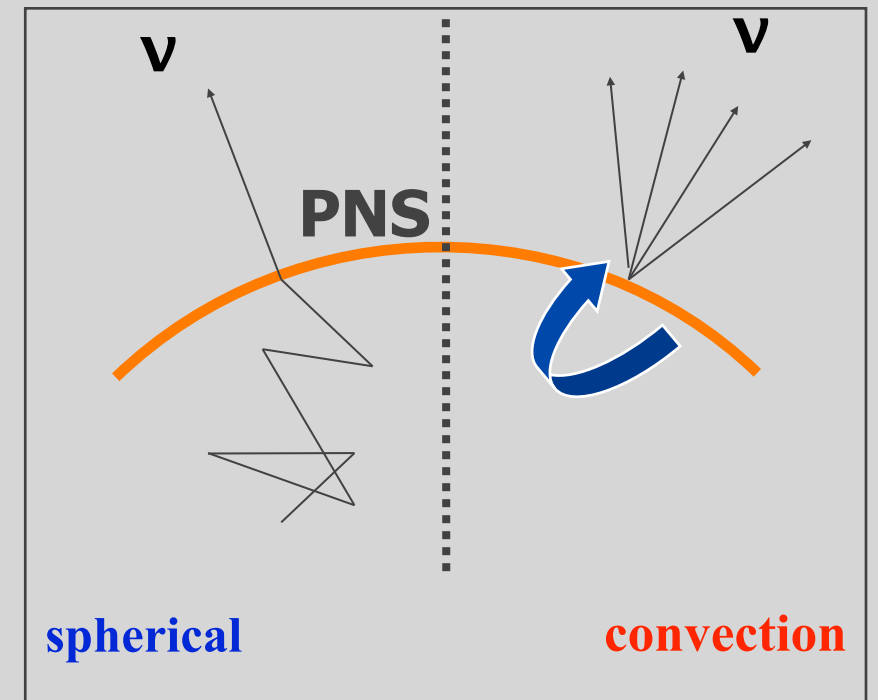
## \* Neutrino-driven convection

- induced by negative entropy gradient due to neutrino heating

# How convection aids explosion?

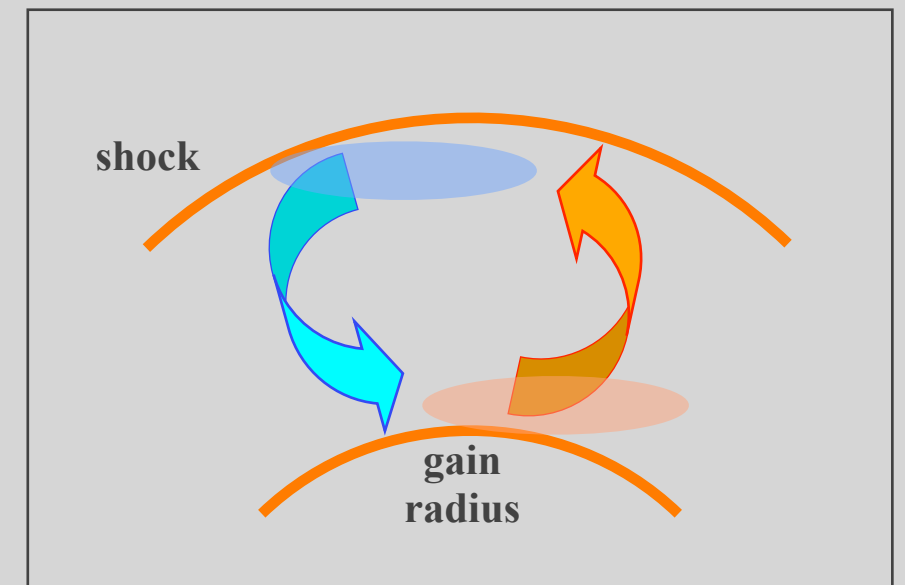
## \* PNS convection

- ✓ 球対称: ニュートリノは散乱の時間スケールで放出される
- ✓ 対流によって、ニュートリノが効率よくニュートリノ球の外に運ばれる



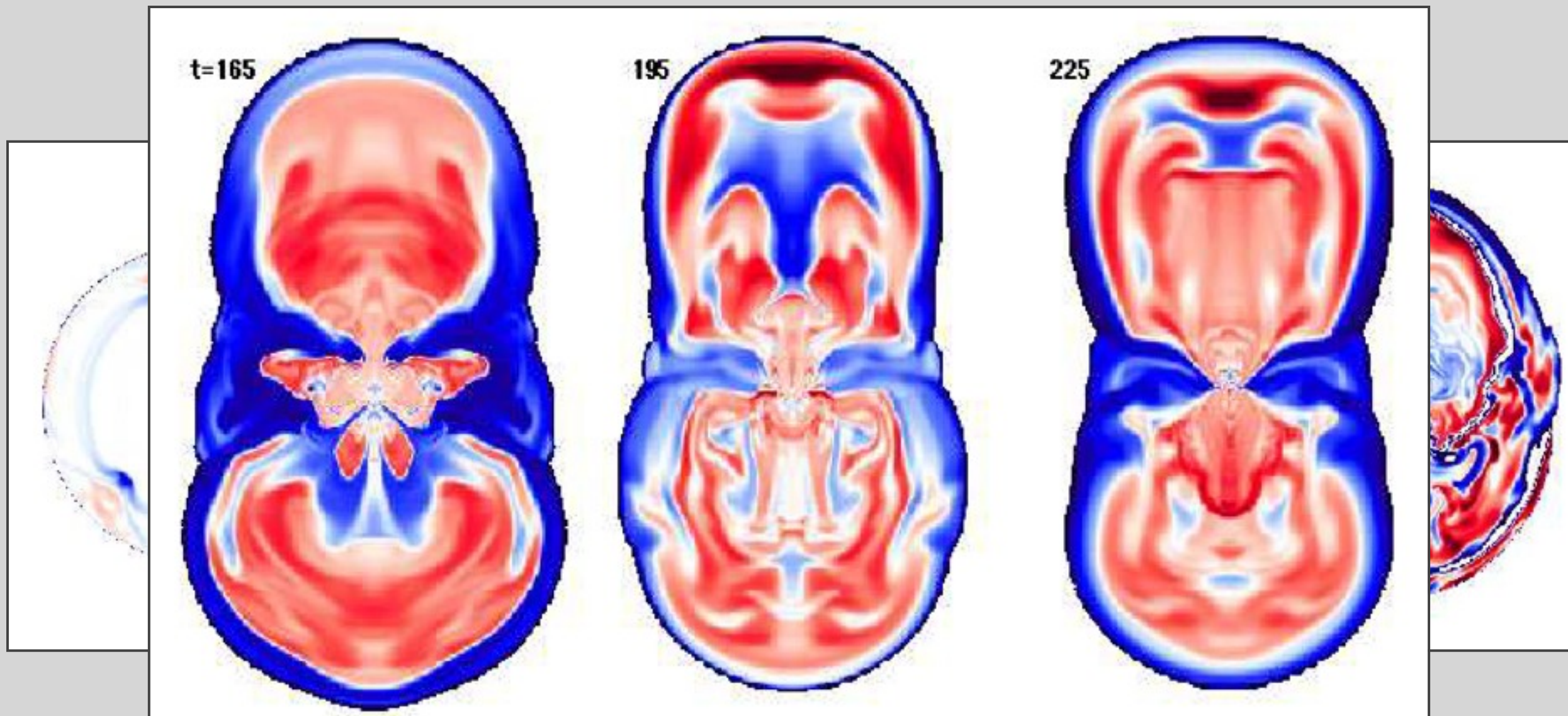
## \* Neutrino-driven convection

- ✓ 冷たい物質は下へ
- ✓ 暖かい物質は上へ  
=> 物質は長い時間加熱領域に留まる



## \* Standing Accretion Shock Instability

- Non-radial, non-local low-mode ( $l=1,2$ ) instability of flow behind standing accretion shock



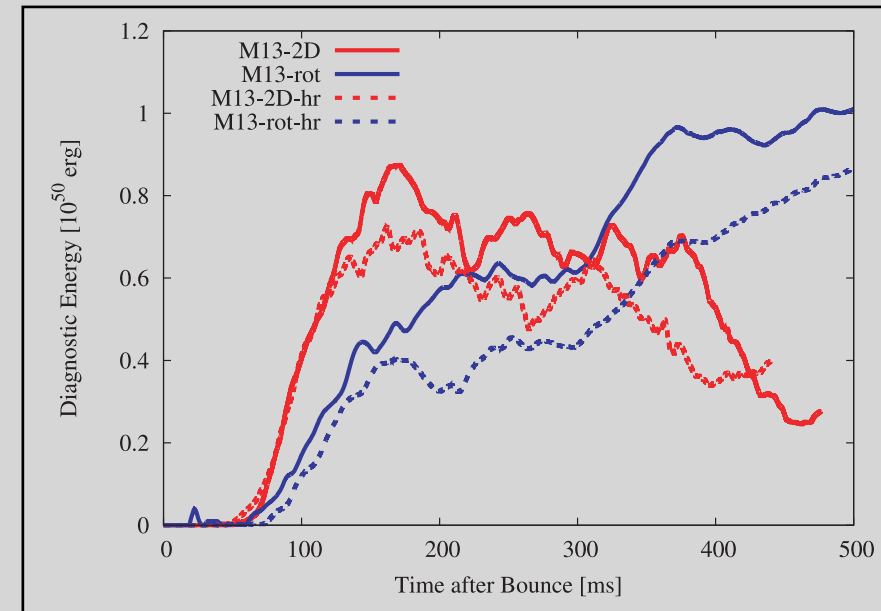
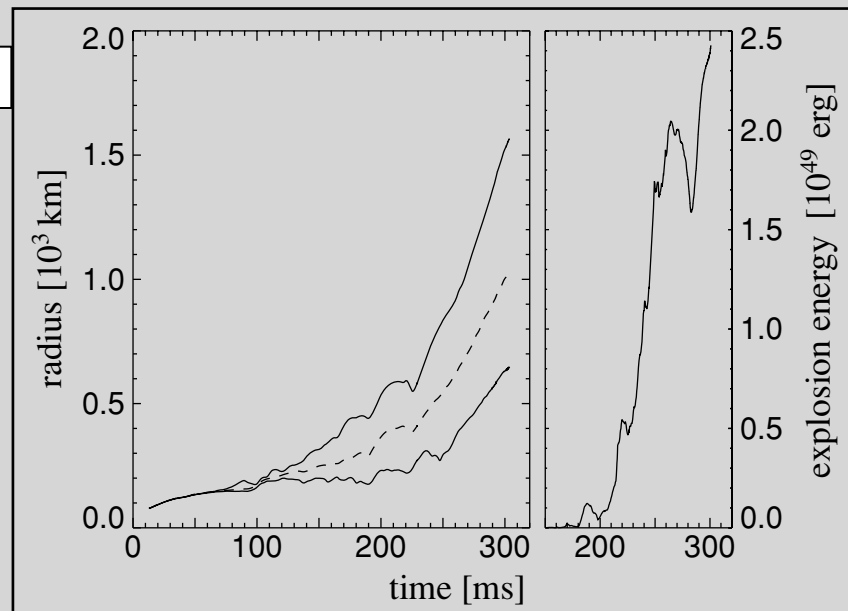
Bolondon+ 2003, 2006



# Problems of 2D simulations

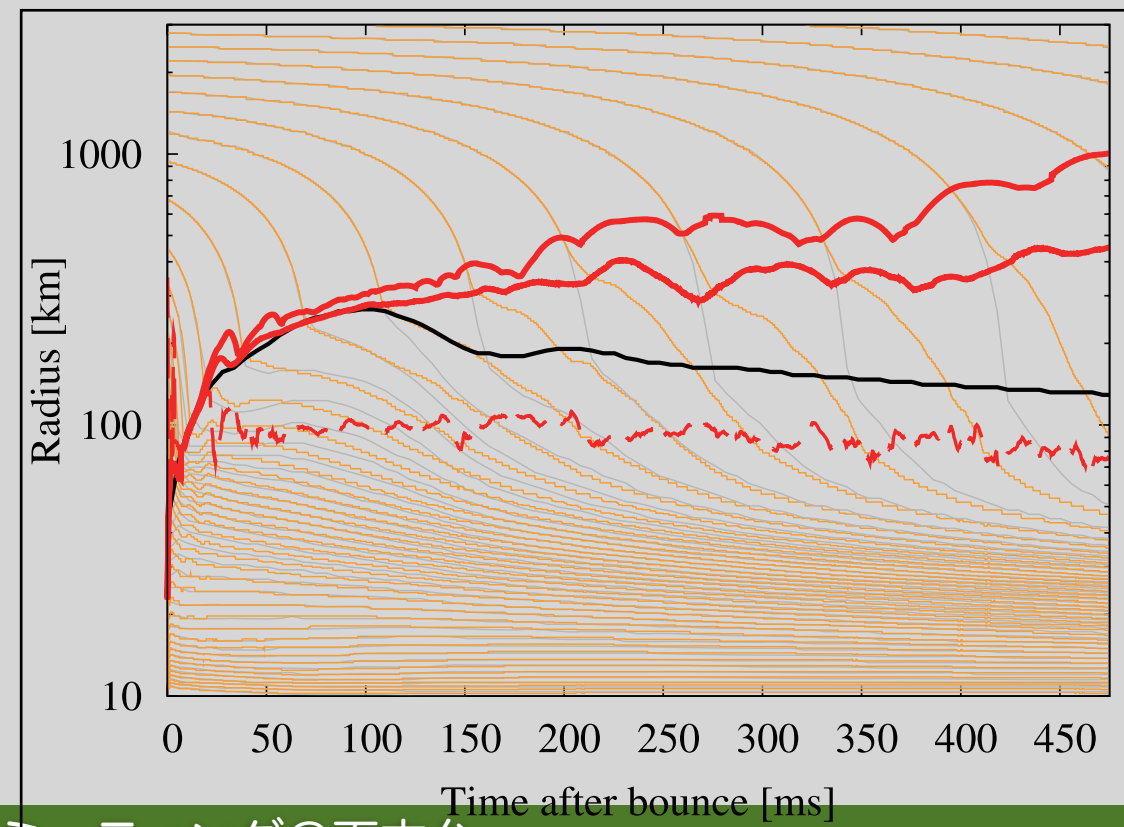
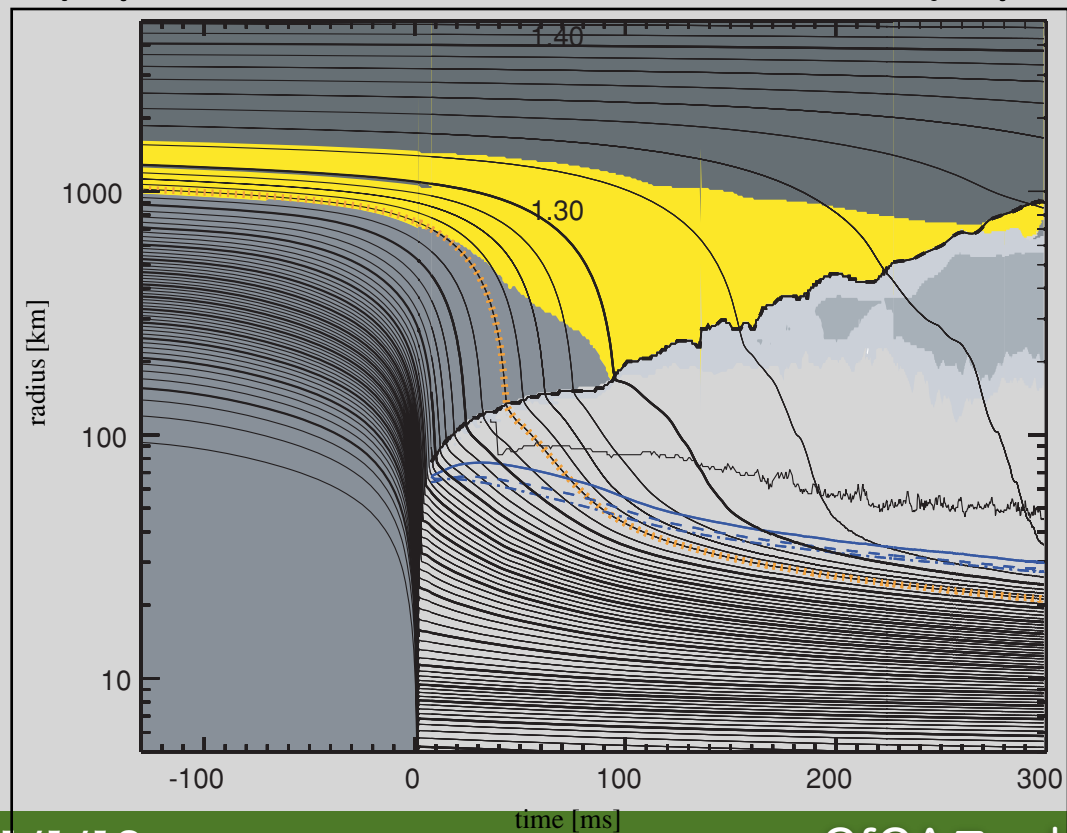
- \* 爆発エネルギーが小さい ( $\sim 10^{49}$ - $10^{50}$  erg)

Marek & Janka 09



Suwa+ 10

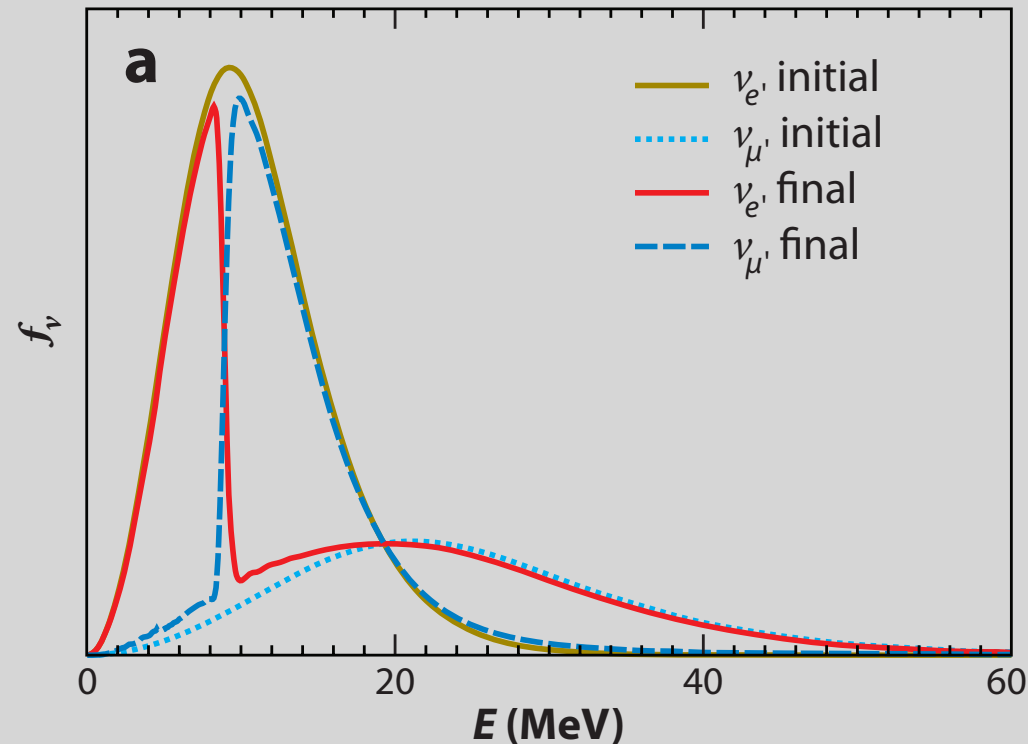
- \* 降着が止まらない=中性子星ができない



# How to solve these problems?

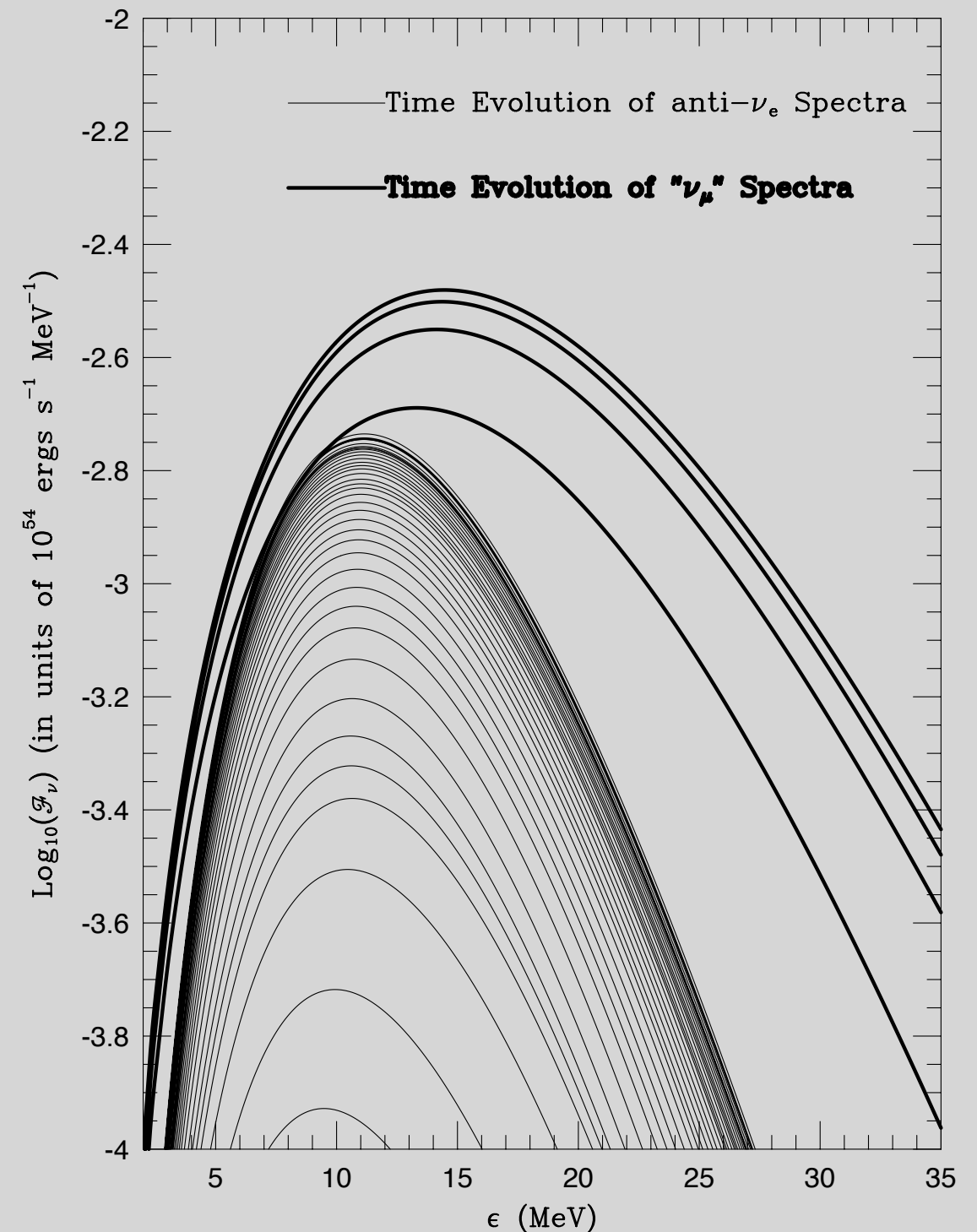
---

# Collective oscillation of neutrinos



Duan+ 10

Burrows & Thompson 02



- \* ニュートリノが質量を有するために、伝搬中に種族が振動する
- \* 放射されたときと吸収されるときでスペクトルが異なっている可能性
- \* 特に  $\nu_{\mu/\tau} \rightarrow \nu_e$  への振動はかなり重要
  - ニュートリノ反応率:  $\sigma \propto E^2$
  - 平均エネルギー:  $\nu_{\mu/\tau} > \nu_e$

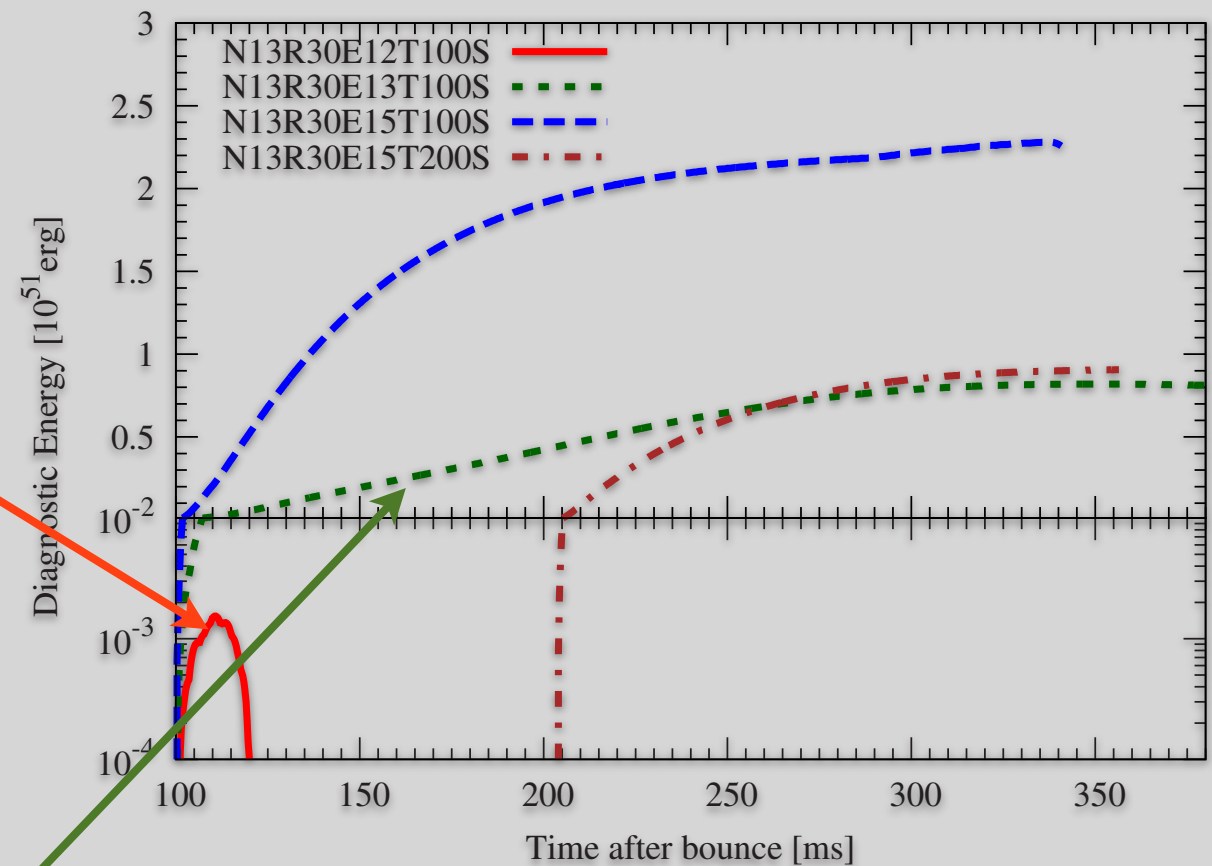
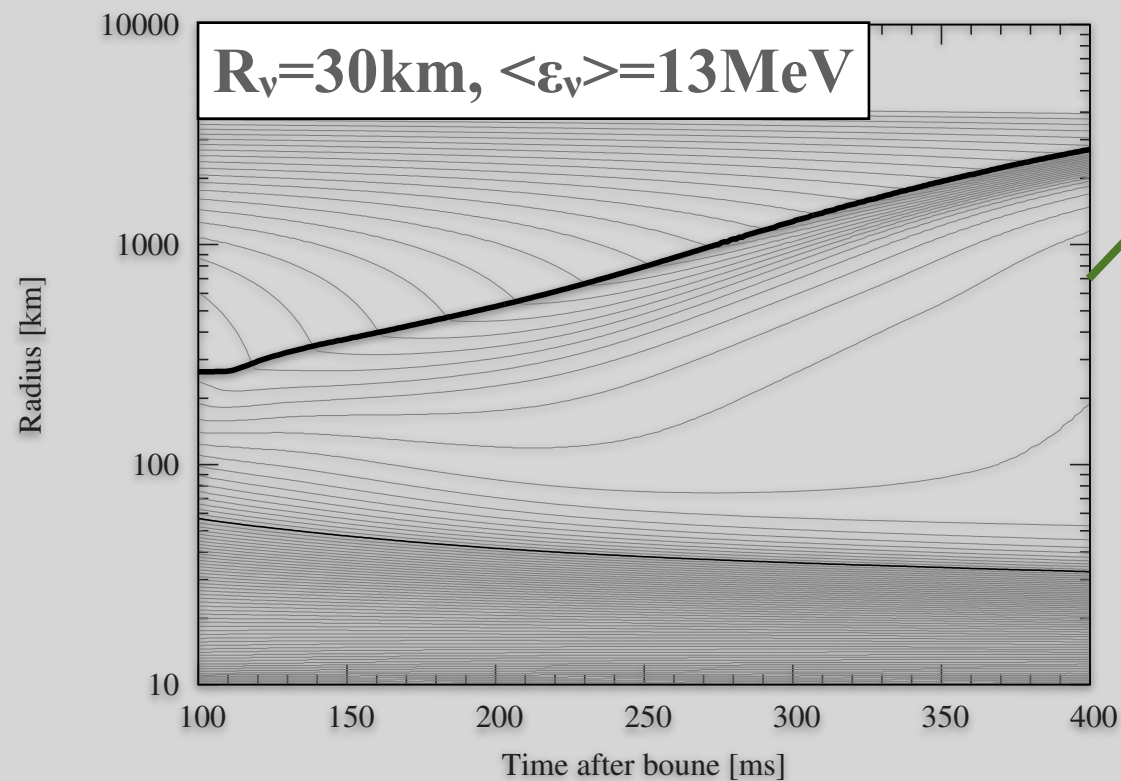
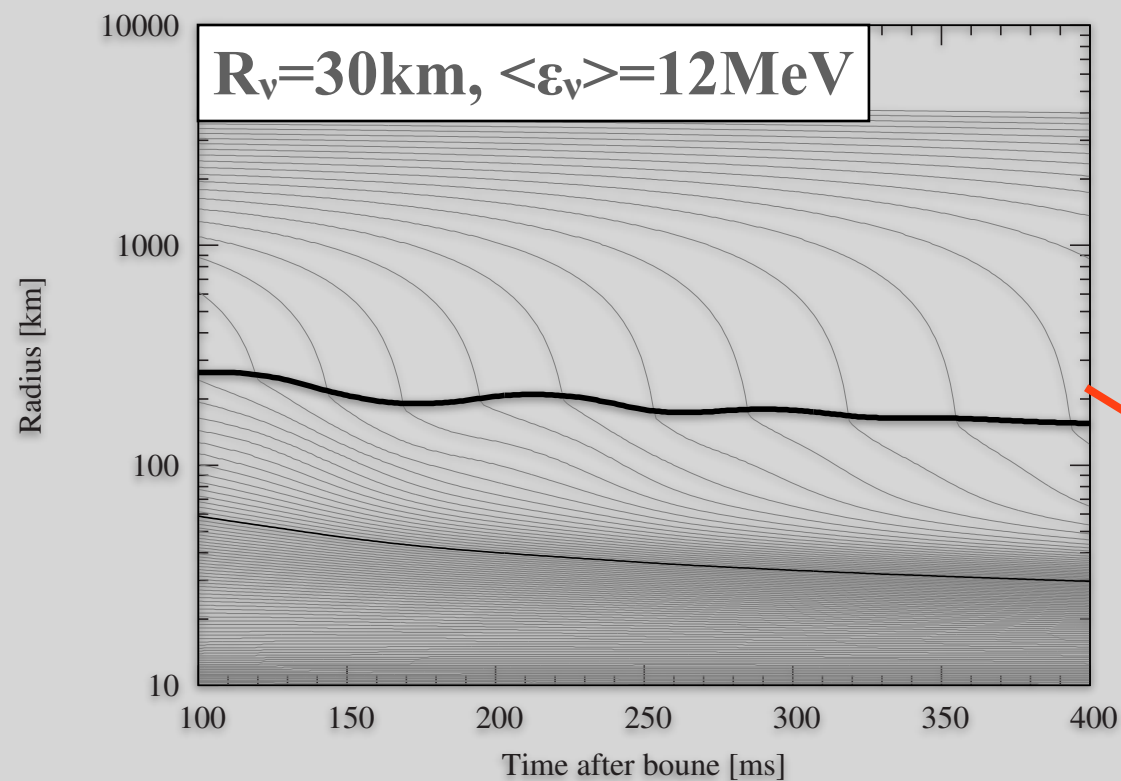


# Numerical simulation

- \* 2次元流体計算(ZEUS-2D) (Stone & Norman 92)
- \* 流体＋ニュートリノ輸送
  - Isotropic Diffusion Source Approximation (Liebendörfer+ 09)
  - electron-type neutrino and anti-neutrino
- \* progenitor:  $13 M_{\odot}$  (Nomoto+ 88)
- \* Collective oscillation parameters:  $R_{\nu}$ ,  $\langle \epsilon_{\nu} \rangle$

$$L_{\nu} = 2.62 \times 10^{52} \left( \frac{\langle \epsilon_{\nu} \rangle}{15 \text{ MeV}} \right)^4 \left( \frac{R_{\nu}}{30 \text{ km}} \right)^2 \text{ erg s}^{-1}$$

# Collective oscillation-1



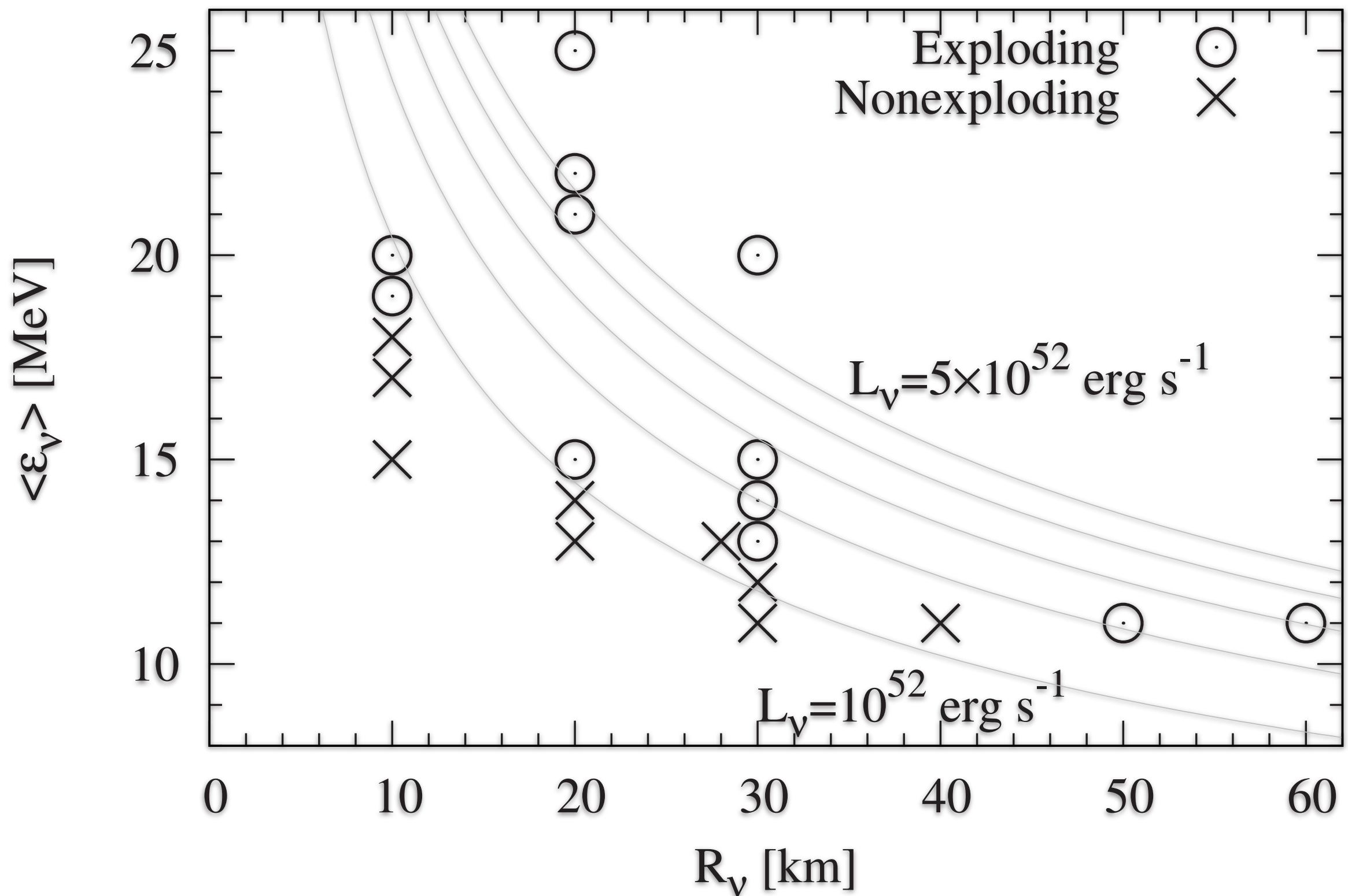
- \* critical な加熱率が存在
- \* 爆発エネルギー $\sim 10^{51}\text{ erg}$
- \* 中性子星( $\sim 1M_{\odot}$ )も残る

# Collective oscillation-2

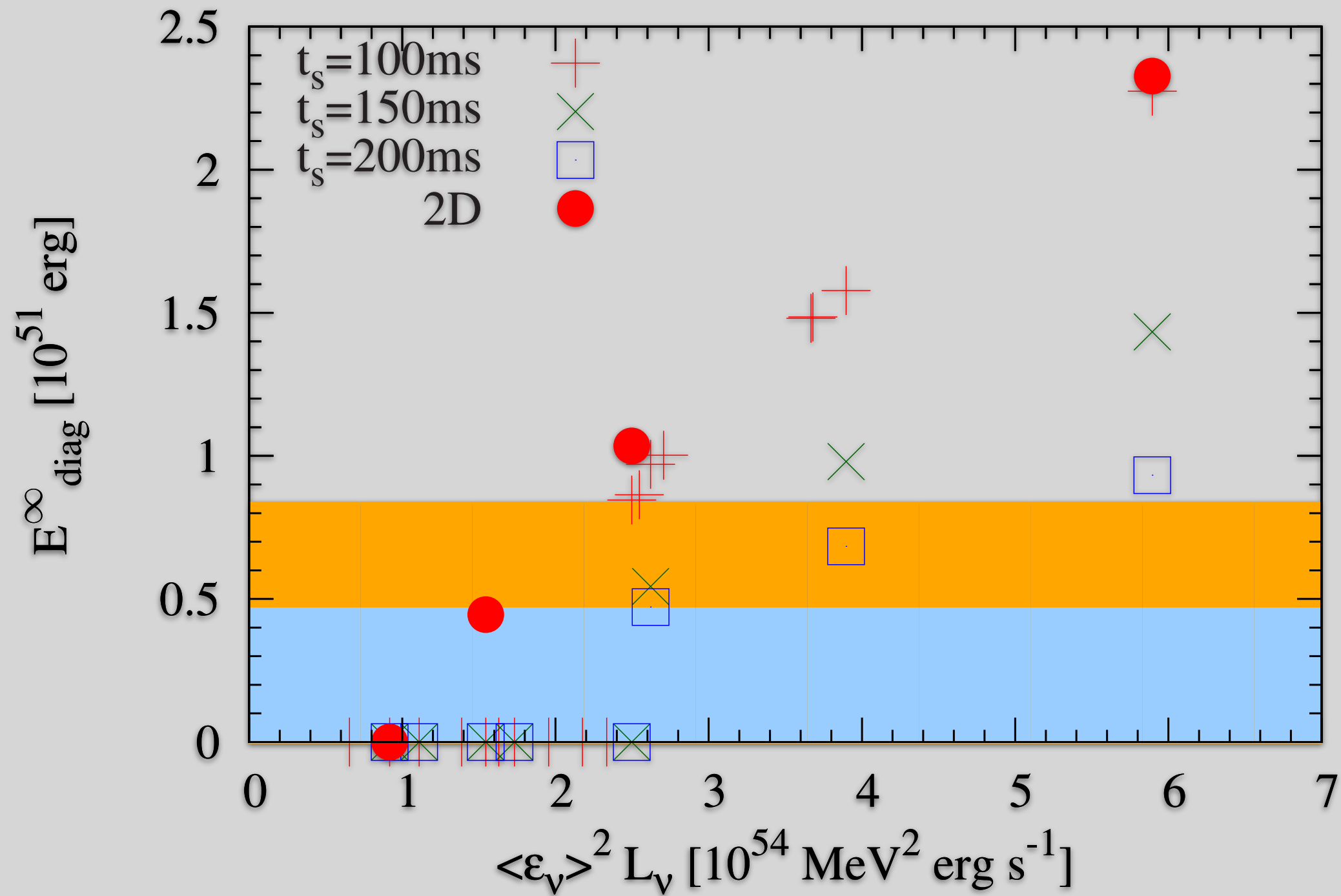
TABLE 1  
1D SIMULATIONS

Model	Dimension	$R_\nu$ [km]	$k_B T_\nu^{-1}$ [MeV $^{-1}$ ]	$L_\nu$ [ $10^{52}$ erg s $^{-1}$ ]	$t_s$ [ms]	Explosion	$E_{\text{diag}}^\infty$ [ $10^{51}$ erg]	$M_{10}^{t=t_s}$ [ $M_\odot$ ]	$M_{10}^\infty$ [ $M_\odot$ ]
N13R10E15T100S	1D	10	0.2101 (15MeV)	0.29	100	No	—	1.18	—
N13R10E17T100S	1D	10	0.1854 (17MeV)	0.48	100	No	—	1.18	—
N13R10E18T100S	1D	10	0.1751 (18MeV)	0.60	100	No	—	1.18	—
N13R10E19T100S	1D	10	0.1658 (19MeV)	0.75	100	Yes	1.00	1.18	1.14
N13R10E20T100S	1D	10	0.1575 (20MeV)	0.92	100	Yes	1.49	1.18	1.12
N13R20E13T100S	1D	20	0.2424 (13MeV)	0.66	100	No	—	1.18	—
N13R20E13T150S	1D	20	0.2424 (13MeV)	0.66	150	No	—	1.21	—
N13R20E13T200S	1D	20	0.2424 (13MeV)	0.66	200	No	—	1.25	—
N13R20E14T100S	1D	20	0.2251 (14MeV)	0.88	100	No	—	1.18	—
N13R20E14T150S	1D	20	0.2251 (14MeV)	0.88	150	No	—	1.21	—
N13R20E14T200S	1D	20	0.2251 (14MeV)	0.88	200	No	—	1.25	—
N13R20E15T100S	1D	20	0.2101 (15MeV)	1.16	100	Yes	0.97	1.18	1.15
N13R20E15T150S	1D	20	0.2101 (15MeV)	1.16	150	Yes	0.54	1.21	< 1.24
N13R20E15T200S	1D	20	0.2101 (15MeV)	1.16	200	Yes	0.47	1.25	< 1.26
N13R20E21T100S	1D	20	0.1500 (21MeV)	4.47	100	Yes	5.56	1.18	1.07
N13R20E22T100S	1D	20	0.1432 (22MeV)	5.39	100	Yes	6.50	1.18	1.07
N13R28E13T100S	1D	28	0.2424 (13MeV)	1.29	100	No	—	1.18	—
N13R29E13T100S	1D	29	0.2424 (13MeV)	1.38	100	No	—	1.18	—
N13R30E11T100S	1D	30	0.2865 (11MeV)	0.76	100	No	—	1.18	—
N13R30E11T150S	1D	30	0.2865 (11MeV)	0.76	150	No	—	1.21	—
N13R30E11T200S	1D	30	0.2865 (11MeV)	0.76	200	No	—	1.25	—
N13R30E12T100S	1D	30	0.2626 (12MeV)	1.07	100	No	—	1.18	—
N13R30E12T150S	1D	30	0.2626 (12MeV)	1.07	150	No	—	1.21	—
N13R30E12T200S	1D	30	0.2626 (12MeV)	1.07	200	No	—	1.25	—
N13R30E13T100S	1D	30	0.2424 (13MeV)	1.48	100	Yes	0.85	1.18	< 1.19
N13R30E13T150S	1D	30	0.2424 (13MeV)	1.48	150	No	—	1.21	—
N13R30E13T200S	1D	30	0.2424 (13MeV)	1.48	200	No	—	1.25	—
N13R30E14T100S	1D	30	0.2251 (14MeV)	1.99	100	Yes	1.58	1.18	1.12
N13R30E14T150S	1D	30	0.2251 (14MeV)	1.99	150	Yes	0.98	1.21	1.19
N13R30E14T200S	1D	30	0.2251 (14MeV)	1.99	200	Yes	0.68	1.25	1.22
N13R30E15T100S	1D	30	0.2101 (15MeV)	2.62	100	Yes	2.27	1.18	1.10
N13R30E15T150S	1D	30	0.2101 (15MeV)	2.62	150	Yes	1.43	1.21	1.16
N13R30E15T200S	1D	30	0.2101 (15MeV)	2.62	200	Yes	0.93	1.25	1.22
N13R30E20T100S	1D	30	0.1575 (20MeV)	8.28	100	Yes	6.84	1.18	1.07
N13R40E11T100S	1D	40	0.2865 (11MeV)	1.35	100	No	—	1.18	—
N13R50E11T100S	1D	50	0.2865 (11MeV)	2.10	100	Yes	0.86	1.18	< 1.18
N13R60E11T100S	1D	60	0.2865 (11MeV)	3.03	100	Yes	1.48	1.18	1.12

# Collective oscillation-3



# Collective oscillation-4





# Summary

---

- \* 近年の超新星爆発シミュレーション
  - ✦ 1D: 爆発せず
  - ✦ 2D: 爆発（しそう）；衝撃波は鉄コア外まで行けそう
    - ▶ 爆発エネルギーが足りない
    - ▶ 中性子星が作れない
- \* ニュートリノ集団振動（collective oscillation）  
が鍵となる可能性を示唆
- \* もっと真面目にやるには、Boltzmann方程式レベルから  
書き換えが必要 (Strack & Burrows 05)
- \* XT4/中規模サーバを利用させていただきありがとうございます！