

大質量星の進化と超新星前兆ニュートリノ

吉田 敬

(京都大学基礎物理学研究所)

梅田秀之, 高橋亘

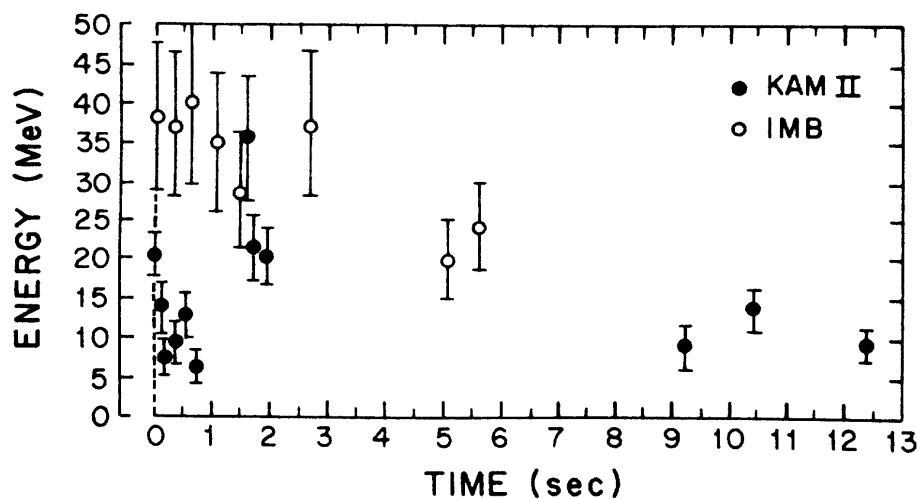
(東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)

「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」2015年領域研究会

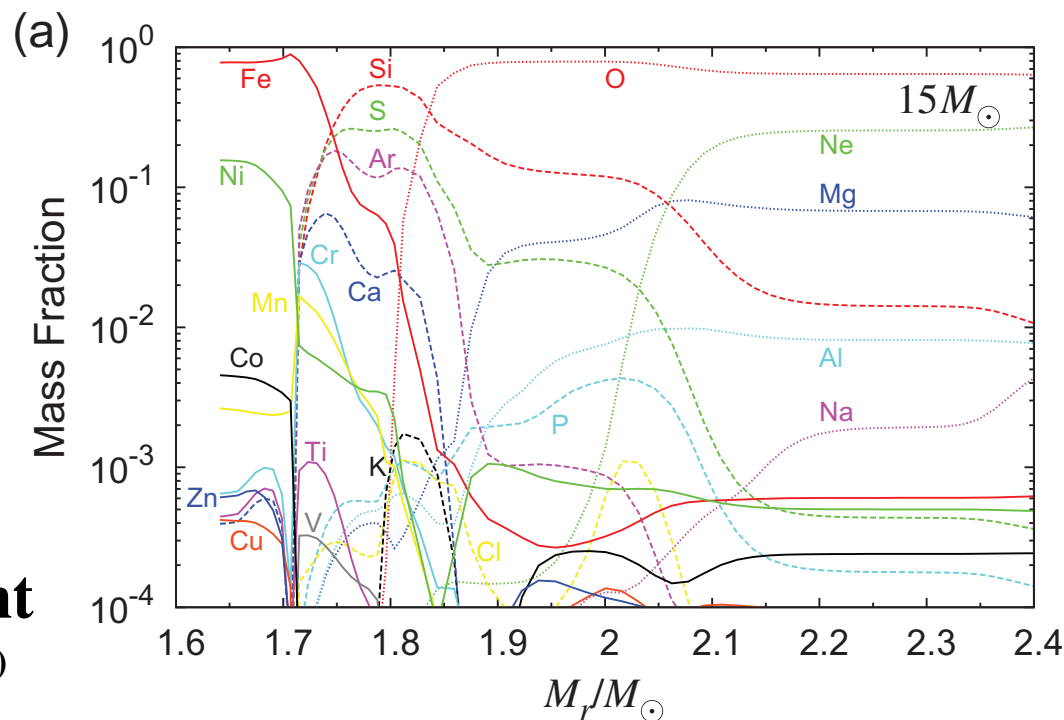
2015年5月15日 神戸大学

超新星爆発と大質量星

- 超新星爆発 → 大質量星(初期質量 $8-10M_{\odot}$ 以上)の最期に起こる爆発現象
- 大量のニュートリノを生成
さまざまな元素の供給源



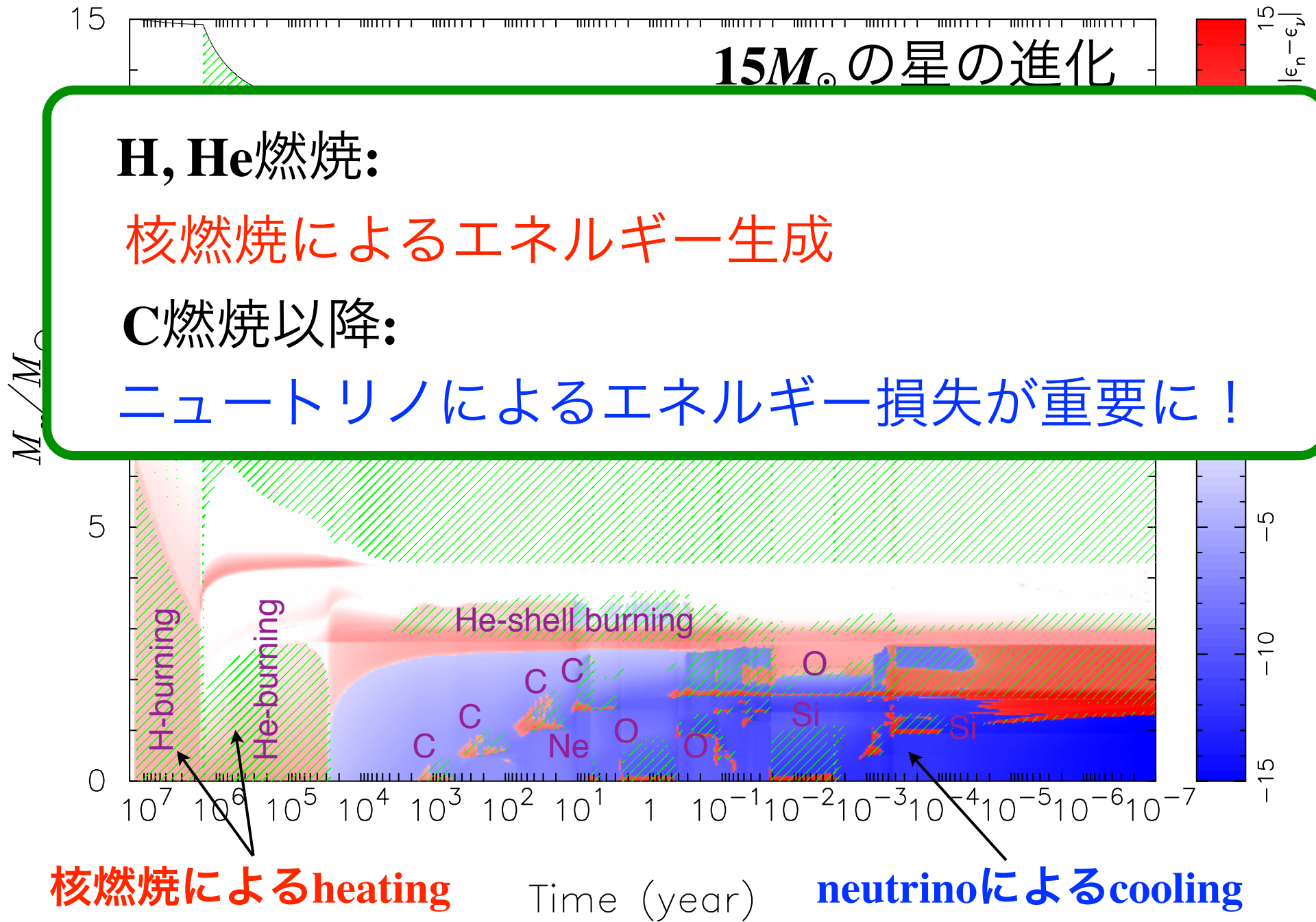
SN1987Aで観測されたneutrino event
(Hirata et al. 1988)



$15M_{\odot}$ 超新星モデルの元素組成分布

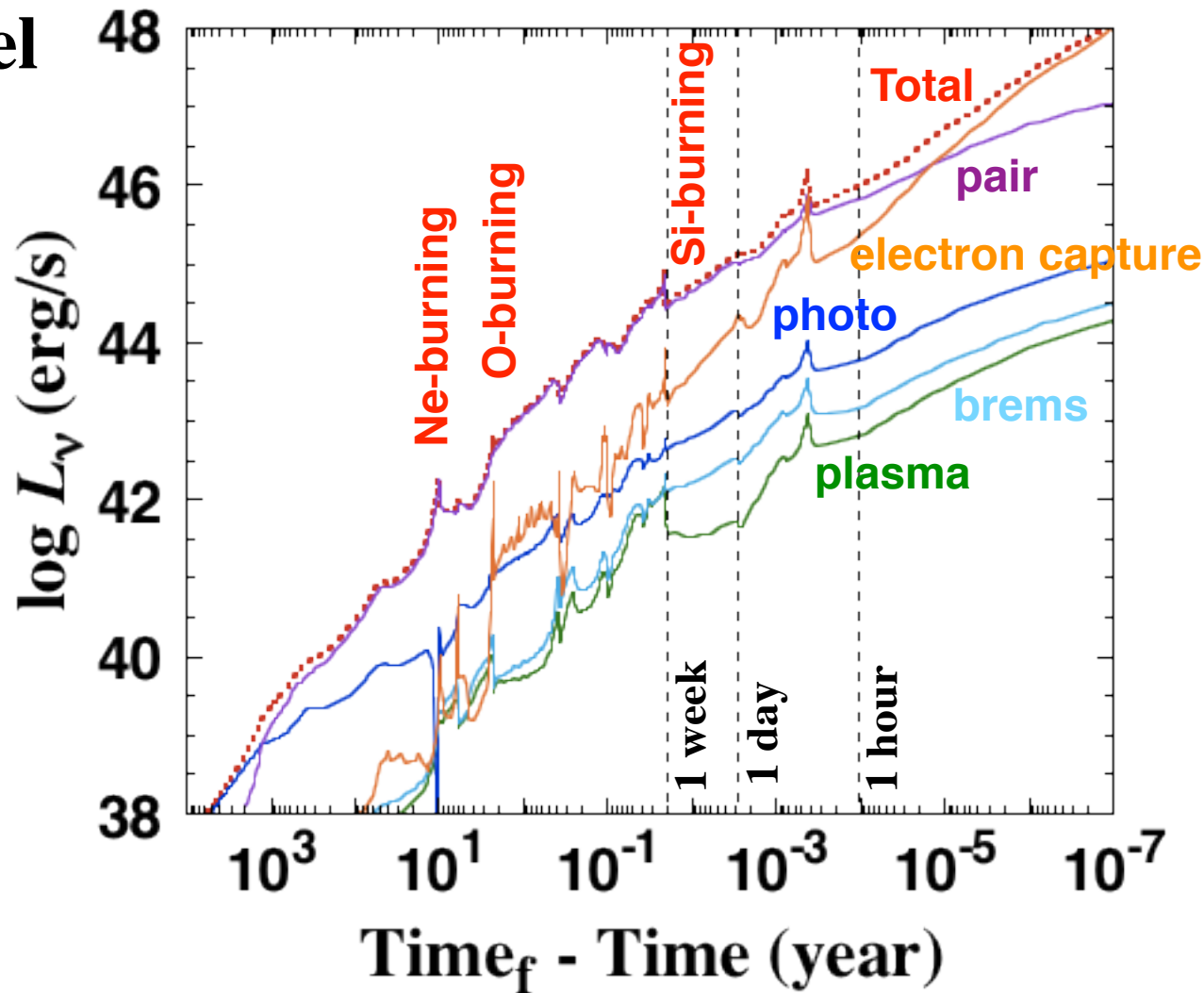
(Umeda, TY, Takahashi 2012)

大質量星の進化



ニュートリノ光度の進化

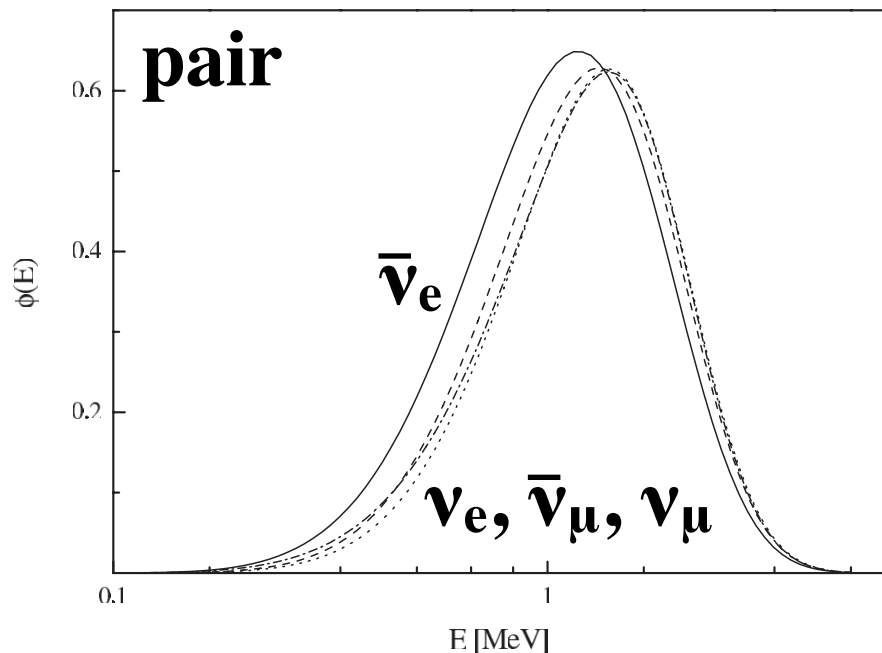
15 M_{\odot} model



- pair neutrinoが主な生成過程
- plasma neutrinoの重要性 → 加藤さんポスター

Si 燃焼における Neutrino spectra

- pair neutrino による neutrino spectra
(Odrzywolek et al. 2004; Misiaszek et al. 2006)
- ベテルギウスが超新星爆発を起こしたときの KamLAND, SK, GADZOOKS などでの観測可能性 (Odrzywolek et al. 2007)
➡ 我々の見積りよりも多い…進化モデルの依存性?
- plasma neutrino (Odrzywolek 2007)
- NSE 時の weak interaction (Odrzywolek 2009)



$$kT = 0.319 \text{ MeV}$$
$$\mu = 0.85 + m_e \text{ MeV}$$

(Misiaszek et al. 2006)

研究目的

研究目的

- ケイ素燃焼以降のニュートリノ放出を調べる
 - **KamLAND**や**SK**での観測可能性
 - 星の質量に対する依存性
 - ➡ 進化の違い, **CO**, **Fe**コアの大きさの違い
自転の効果

Neutrino spectraの見積もりの変更

- pair neutrinoによるneutrino放出

モンテカルロシミュレーションで ν spectraを求める
(Odrzywolek et al. 2004の方法を改良)

$$r(\varepsilon_\nu, \varepsilon_{\bar{\nu}}) = \frac{c}{16(2\pi)^{12}\hbar^{12}} \int f_{e^-} f_{e^+} (2\pi)^4 \delta^4(p_{e^-} + p_{e^+} - p_\nu - p_{\bar{\nu}}) \frac{|M|^2}{\varepsilon_e - \varepsilon_{e^+} - \varepsilon_\nu - \varepsilon_{\bar{\nu}}} d^3p_{e^-} d^3p_{e^+} d\Omega_\nu d\Omega_{\bar{\nu}}$$

$$|M|^2 = 16G_F^2(\hbar c)^2 \{ (C_A - C_V)^2 (p_{e^-} \cdot p_\nu)(p_{e^+} \cdot p_{\bar{\nu}}) + (C_A + C_V)^2 (p_{e^+} \cdot p_\nu)(p_{e^-} \cdot p_{\bar{\nu}}) + m_e^2 c^4 (C_A^2 - C_V^2)(p_\nu \cdot p_{\bar{\nu}}) \}$$

- コード改良 (修正中)

- neutrinoエネルギー生成率

➡ Fermi積分を行う方法に変更 (Yakovlev et al. 2002)

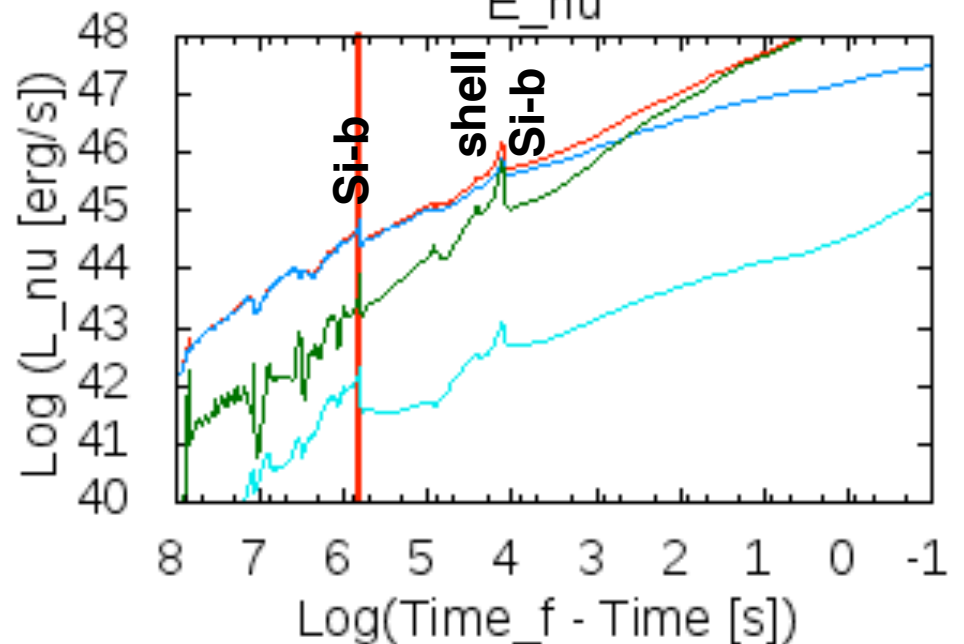
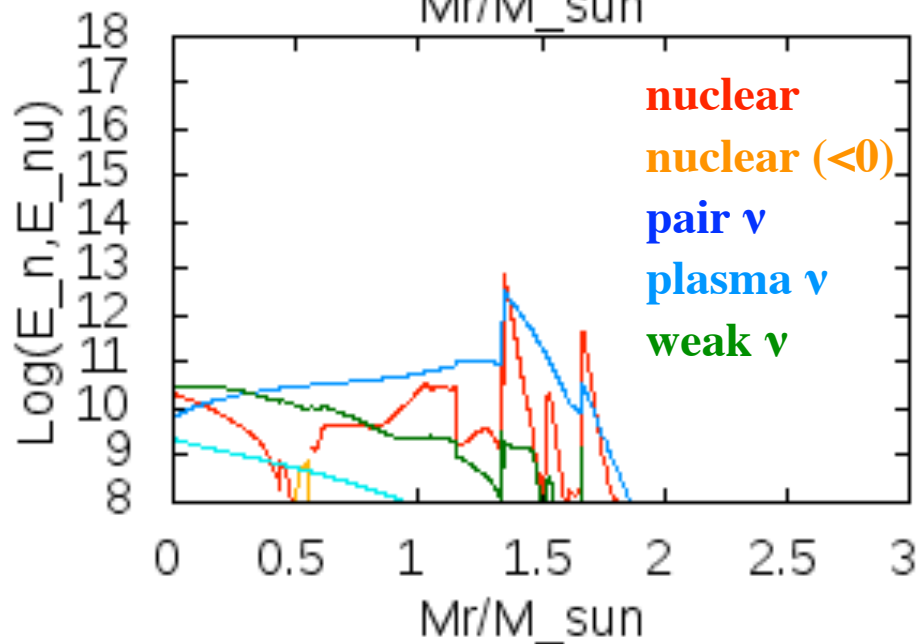
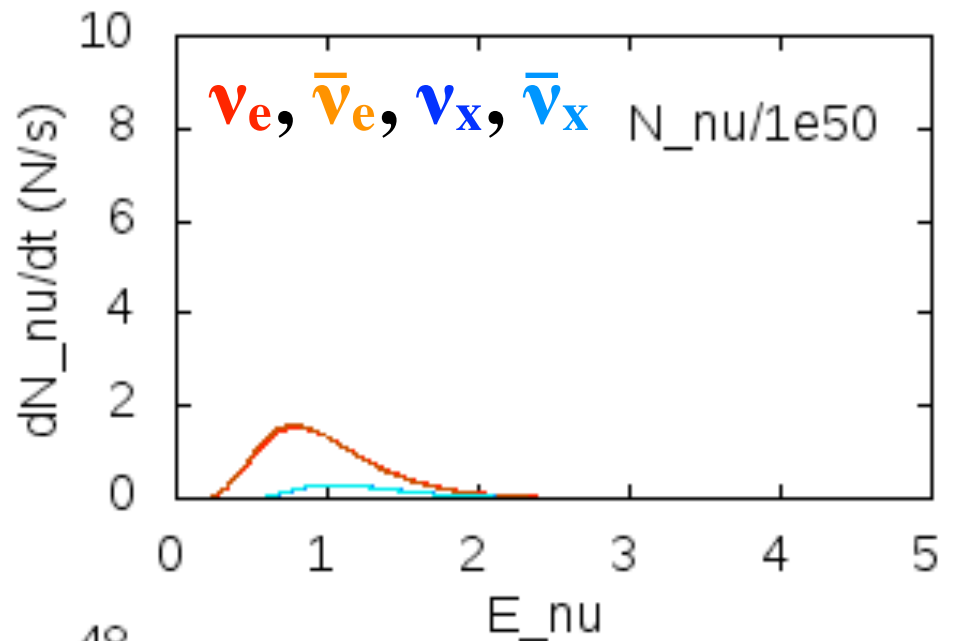
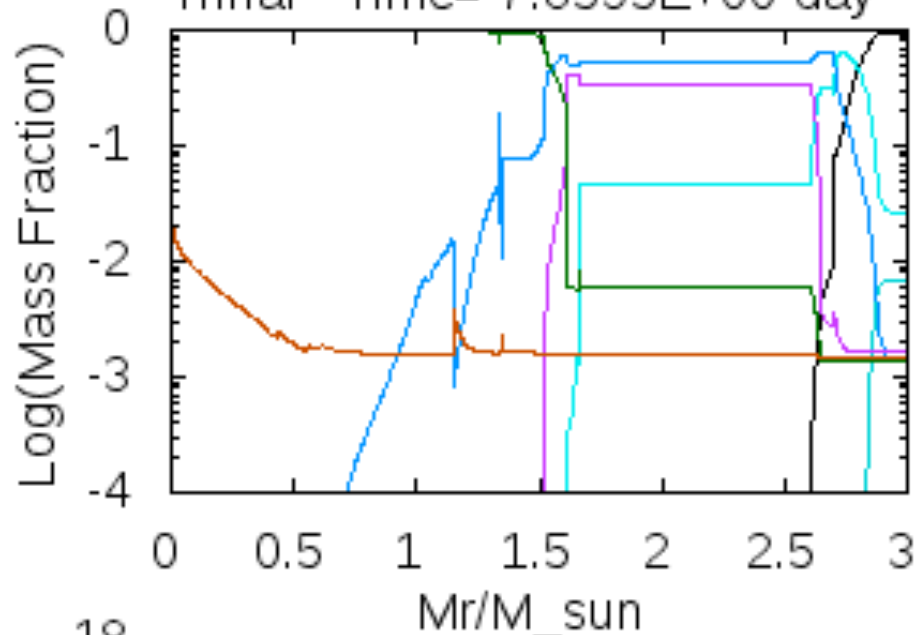
- エネルギー生成率を $\nu_e \bar{\nu}_e$, $\nu_x \bar{\nu}_x$ で別に計算

- 表のgrid間隔を狭くする (273点→1581点)

ニュートリノスペクトルの進化(15M_⊙)

nstg= 5034 H,He,C,N,O,Ne,"Si","Fe"

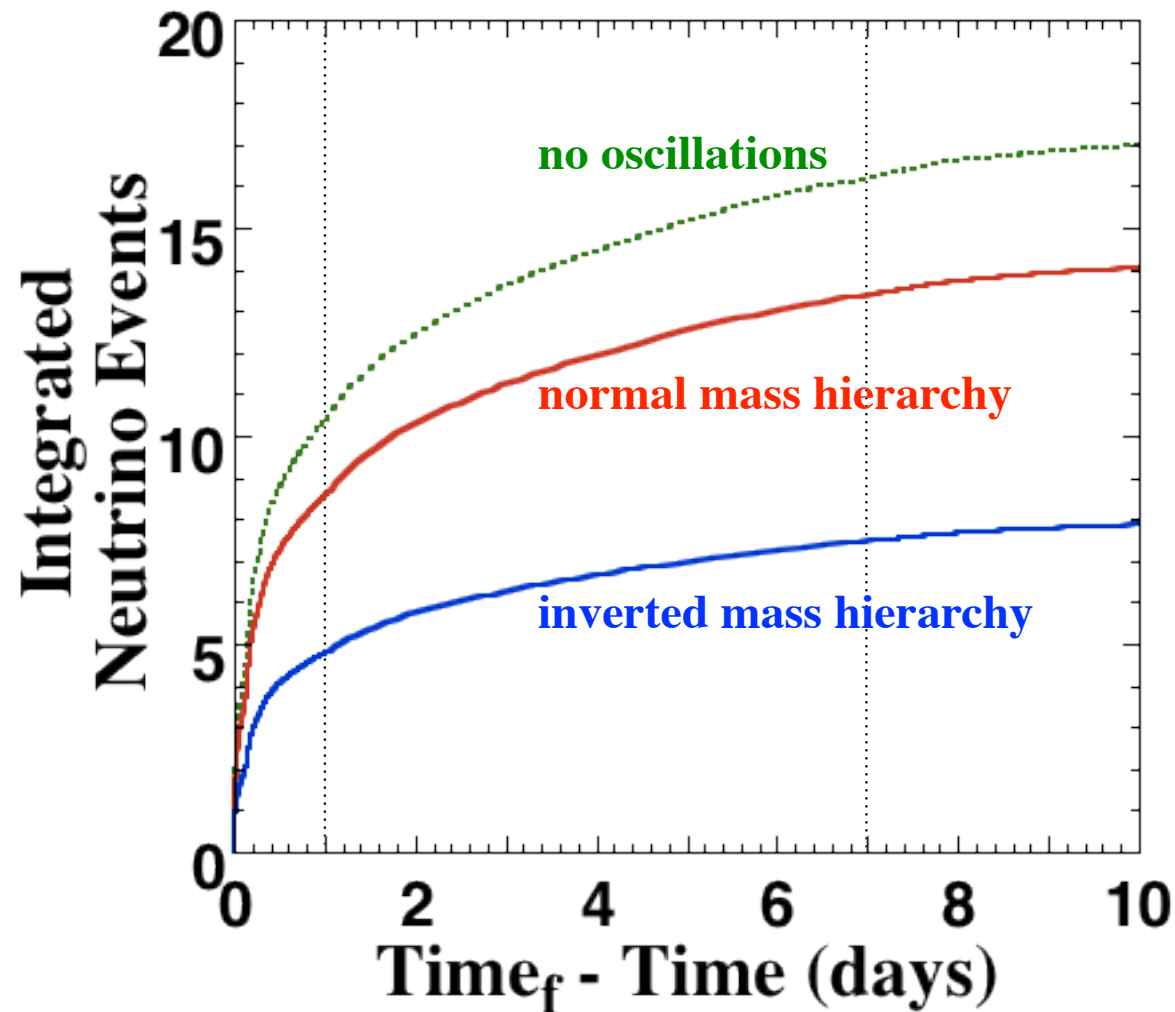
Tfinal - Time= 7.8595E+00 day



前兆neutrino event数の予測

- $15 M_{\odot}$ model @ $d = 200 \text{ pc}$ (ベテルギウスの距離)

KamLANDによる検出 ($N_p = 5.98 \times 10^{31}$) $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$



- Neutrino検出数は~14個 (normal), ~8個 (inverted)

大質量星モデルの違い

新しい大質量星モデル

- 対流領域の扱い

- **Schwarzschild**条件

断熱温度勾配 < 放射温度勾配 → 対流

- **Ledoux**条件 → 組成分布の違いも考慮

- 対流層境界

対流層の境界で流体速度 $\neq 0$

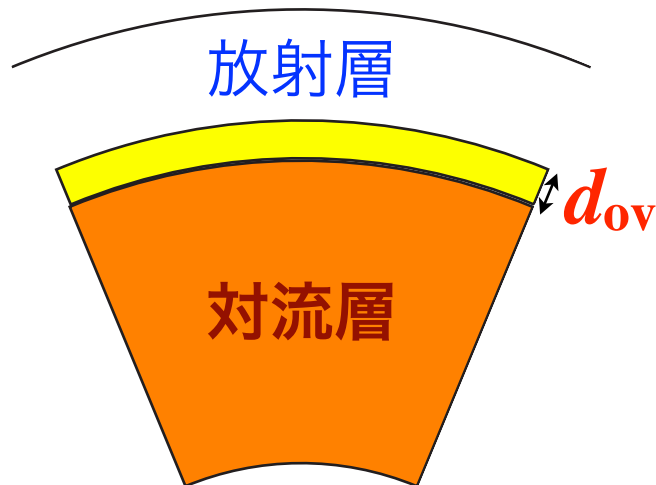
→ **overshooting** (He燃焼まで)

領域の広さ: $d_{ov} = \alpha_{ov} H_p$

α_{ov} : パラメータ

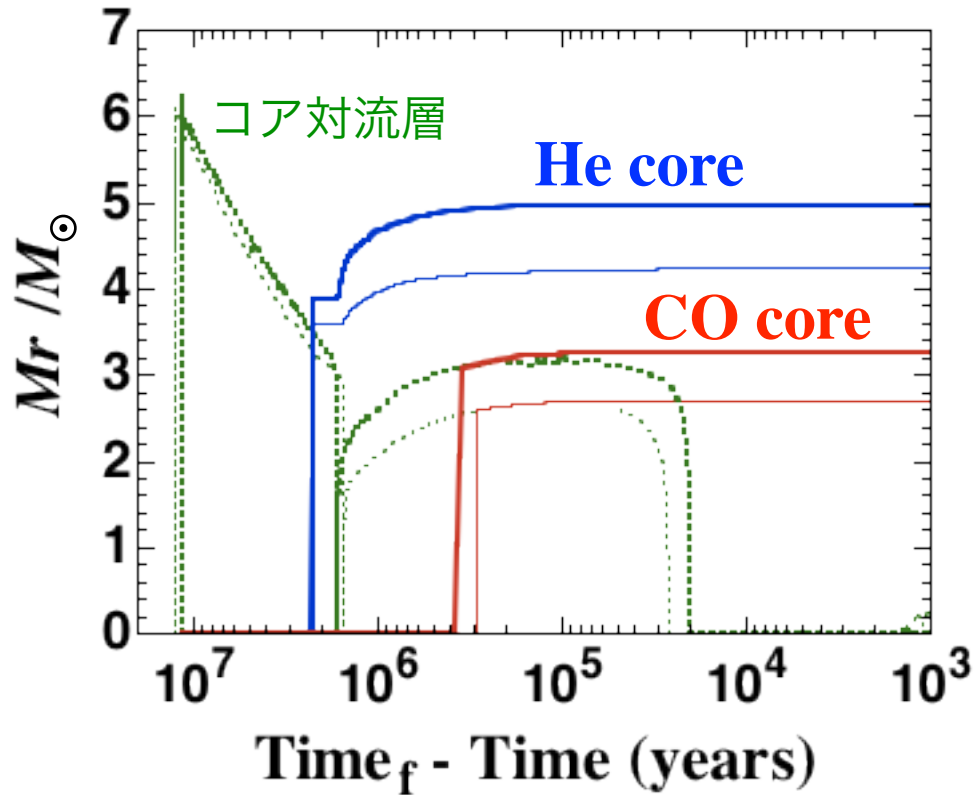
- 大きな**overshooting**

→ 大きな**COコア**



大質量星モデルの違い

● 対流領域とHe, COコアの時間進化



細線: これまでのモデル

太線: 新しいモデル

- これまでのモデル
Schwarzschild対流条件
 $\alpha_{ov} = 0.005$

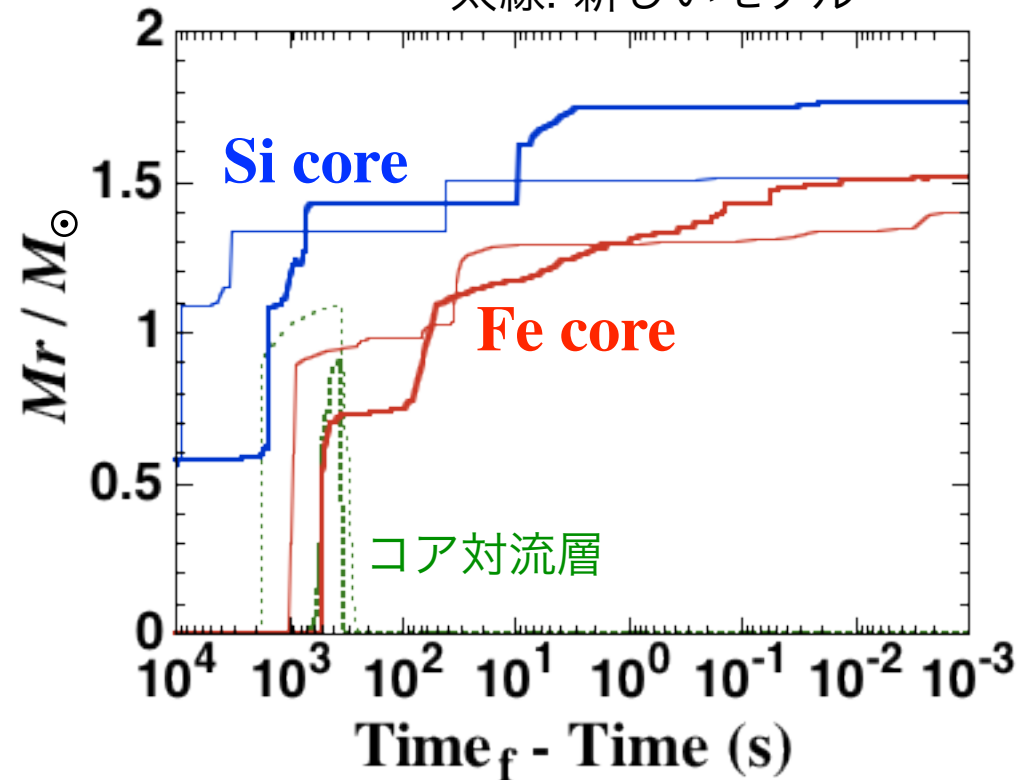
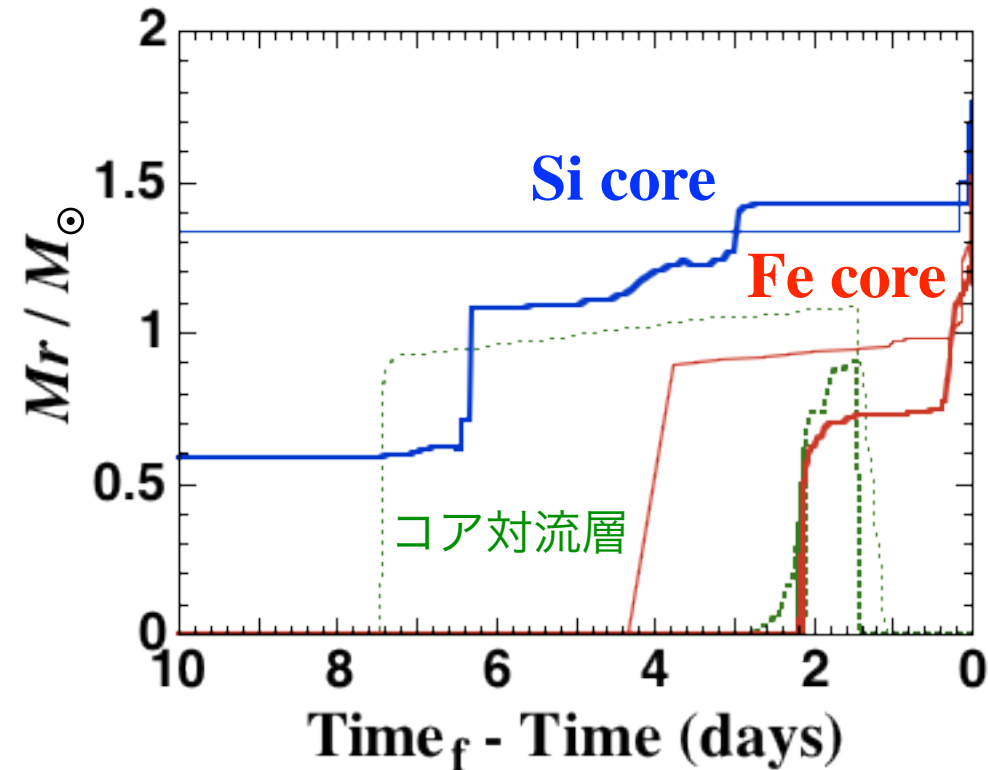
- 新しいモデル
Ledoux対流条件
 $\alpha_{ov} = 0.005$

➡ 大きなHe, COコア
強いovershootingの影響

大質量星モデルの違い

● 対流領域とFeコアの時間進化

細線: これまでのモデル
太線: 新しいモデル



● 新しい(これまでの)モデル

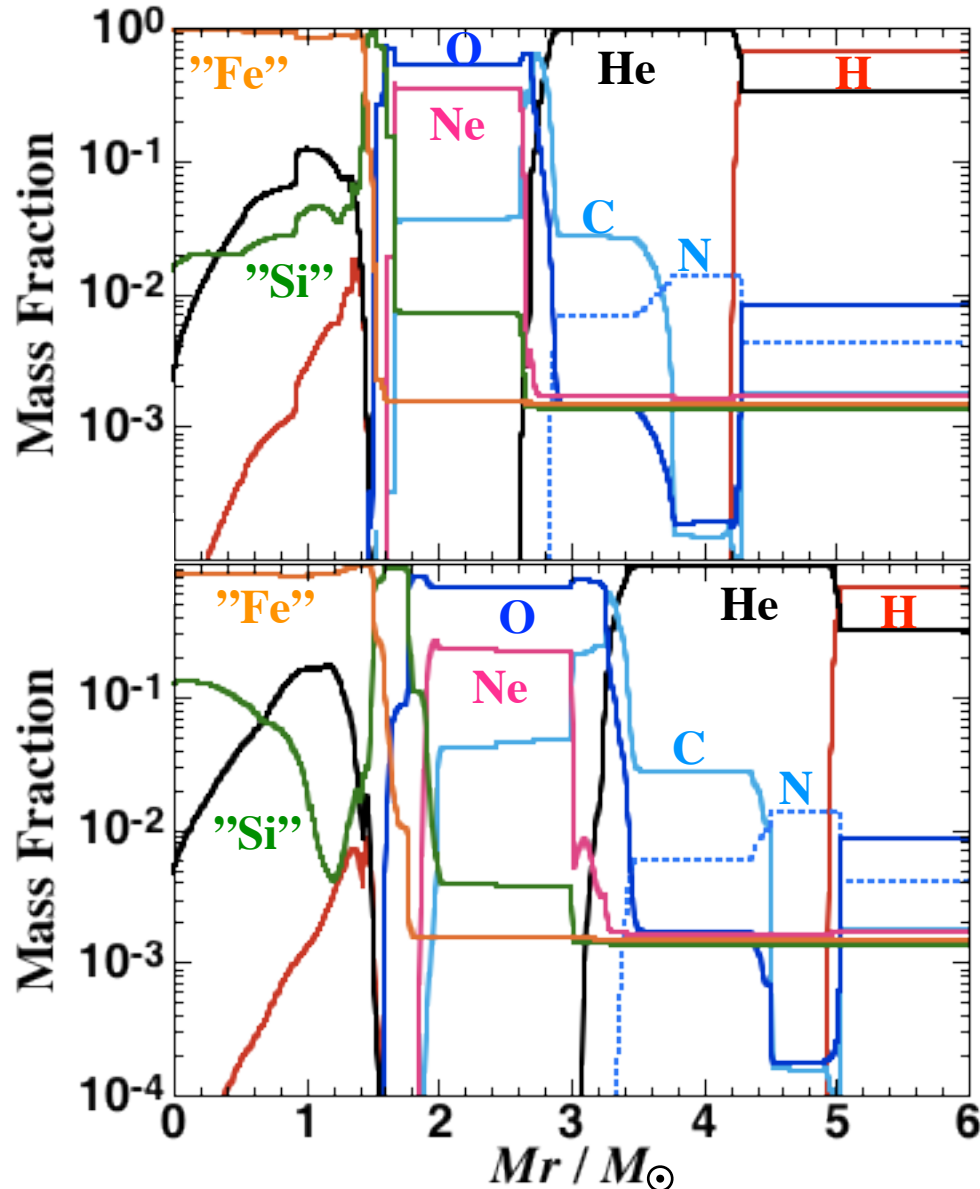
● Si燃焼期間 → ~2日(~7日)

大きなCOコア → 短時間での収縮

Ledoux条件 → 対流はこれまでよりも弱い

大質量星モデルの違い

● $15M_{\odot}$ モデルの最終的な組成分布の違い



これまでのモデル

$$M_f = 13.3 M_{\odot}$$

$$M_{CO} = 2.81 M_{\odot}$$

$$M_{Fe} = 1.45 M_{\odot}$$

新しいモデル

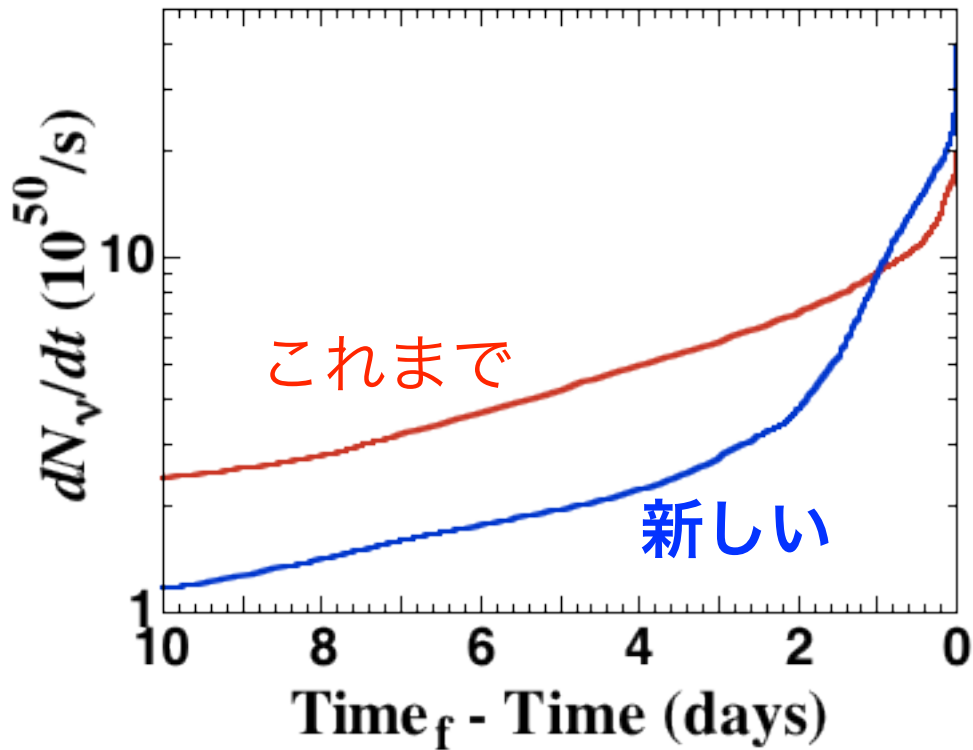
$$M_f = 14.0 M_{\odot}$$

$$M_{CO} = 3.35 M_{\odot}$$

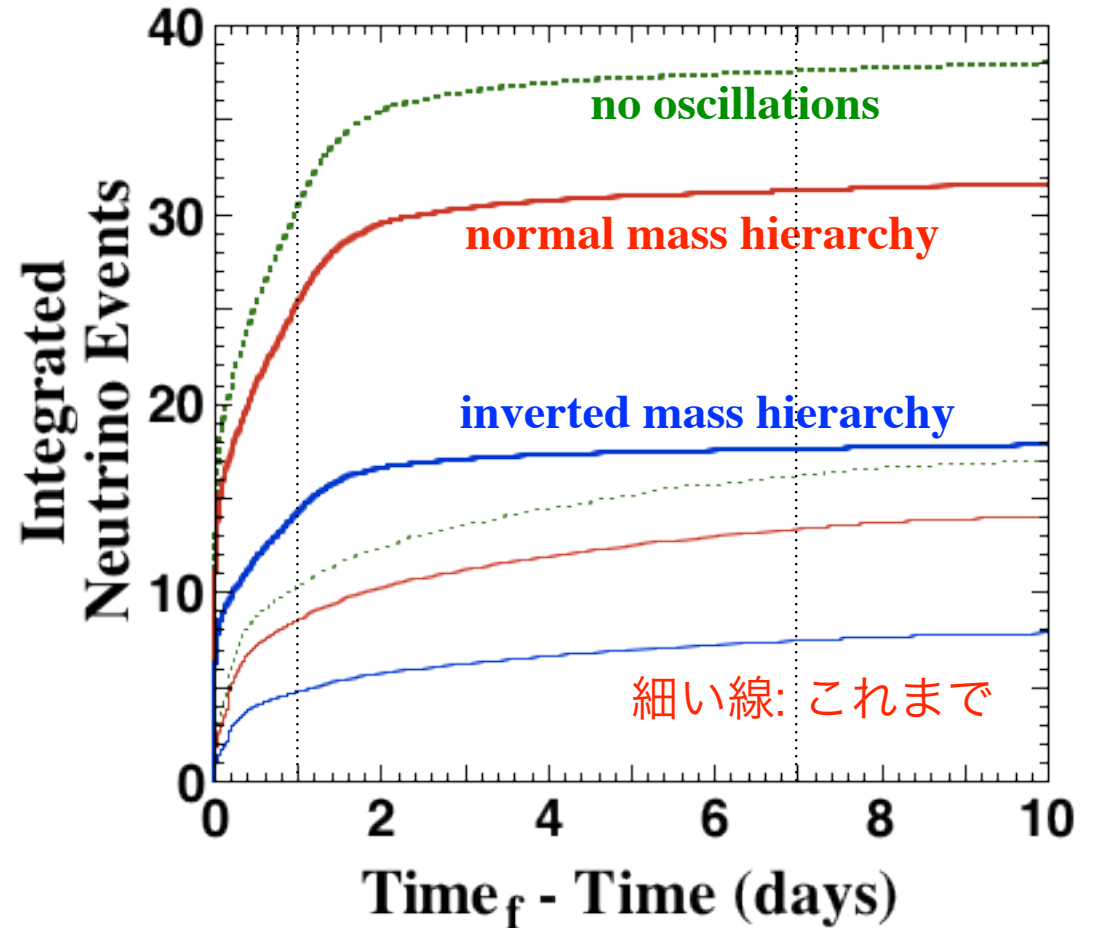
$$M_{Fe} = 1.51 M_{\odot}$$

ニュートリノ生成率とevent数

● 電子反ニュートリノ生成率



● KamLANDでのevent数



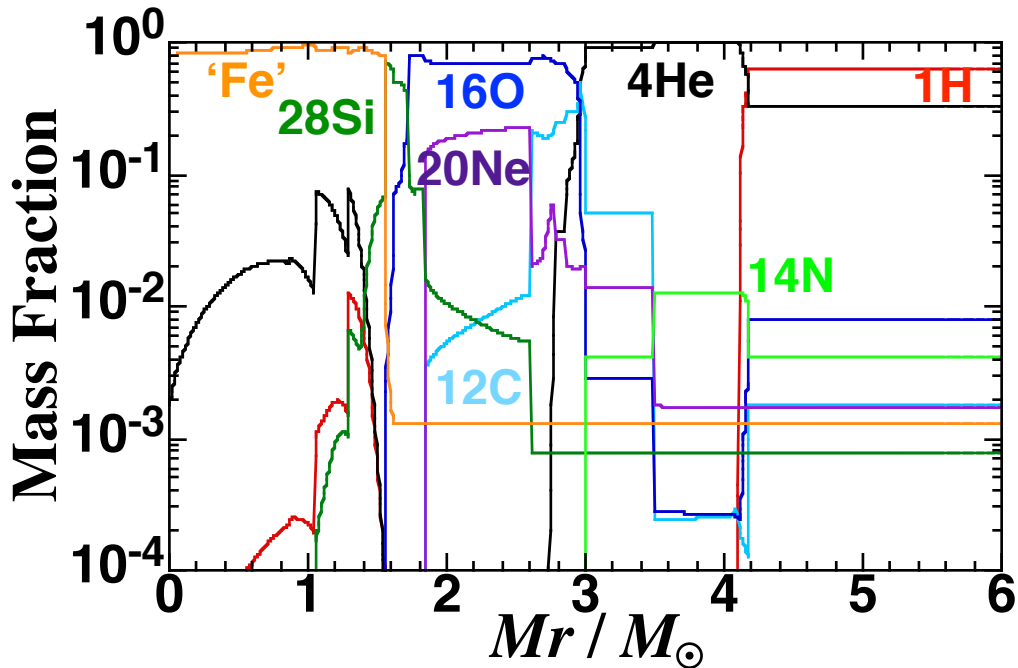
● ケイ素燃焼の期間の違い

● より多くのニュートリノを放出

他の大質量星モデルとの比較

● $15 M_{\odot}$ models

Woosley, Heger, Wever (2002)

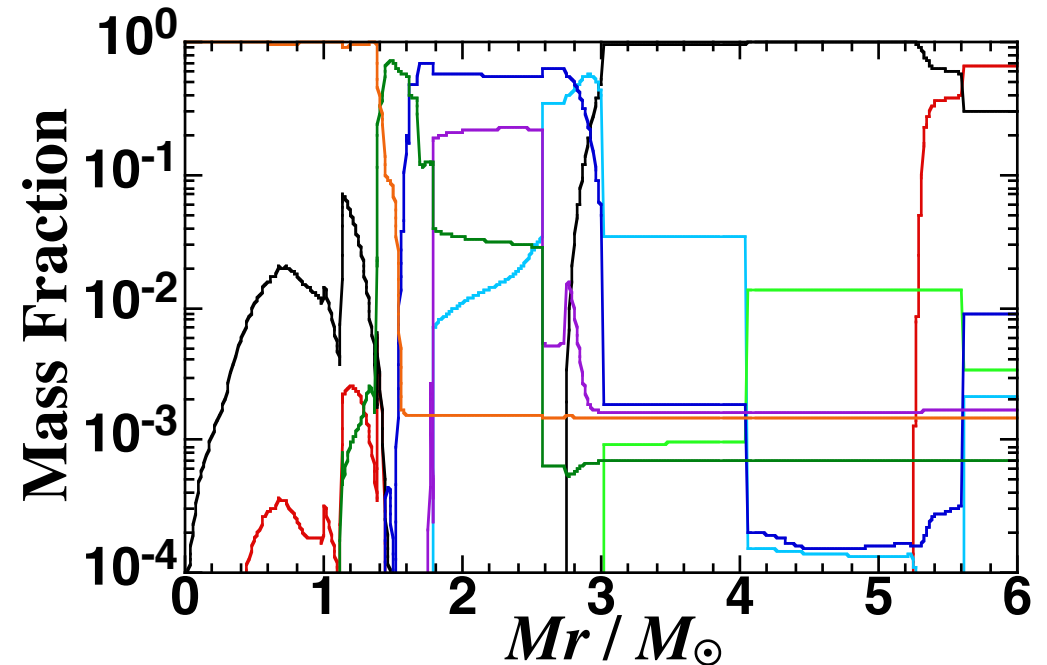


$$M_f = 12.6 M_{\odot}$$

$$M_{\text{CO}} = 2.85 M_{\odot}$$

$$M_{\text{Fe}} = 1.54 M_{\odot}$$

Limongi & Chieffi (2006)



$$M_f = 13.4 M_{\odot}$$

$$M_{\text{CO}} = 2.99 M_{\odot}$$

$$M_{\text{Fe}} = 1.39 M_{\odot}$$

● 新しいモデルはCOコアが大きめ

今後の方針

- 新しい大質量星進化モデルでの進化計算

- 太陽系元素存在度

➡ Asplund et al. (2009), Lodders et al. (2009)

- 対流に関するパラメータ

➡ HR図を再現するように決定 (Castro et al. 2014)

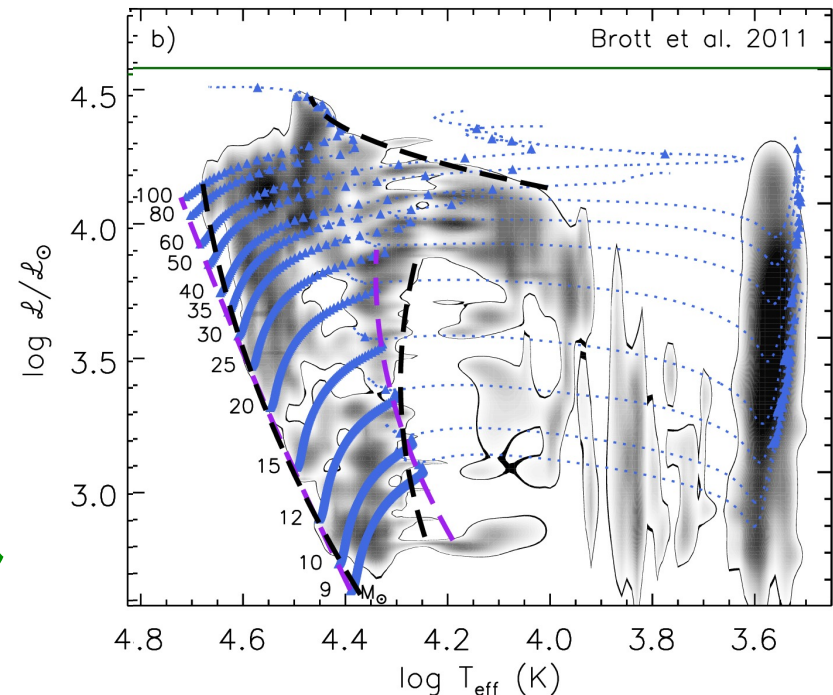
- Input physicsの改良

- 初期質量の範囲

➡ ECSN $\sim 300M_{\odot}$ +

- ν スペクトル生成コードの修正

➡ 前兆ニュートリノのスペクトル進化とevent数の予測



まとめ

- ケイ素燃焼以降での大質量星からのニュートリノ放出
 - ニュートリノ放出コードの改良(修正中)
 - 新しい大質量星進化モデルでの結果
15 M_{\odot} model
 - **KamLAND**での爆発前1週間での検出数
 - ➡ **31個(normal), 18個(inverted) @ $d=200\text{pc}$**
[これまでのモデル: 17個(normal), 8個(inverted)]
- 新しい大質量星進化モデルの計算
 - ➡ **ECSN ~ 300 M_{\odot} models +**