

# 超新星前兆ニュートリノと 重力崩壊直前における大質量星の内部構造進化

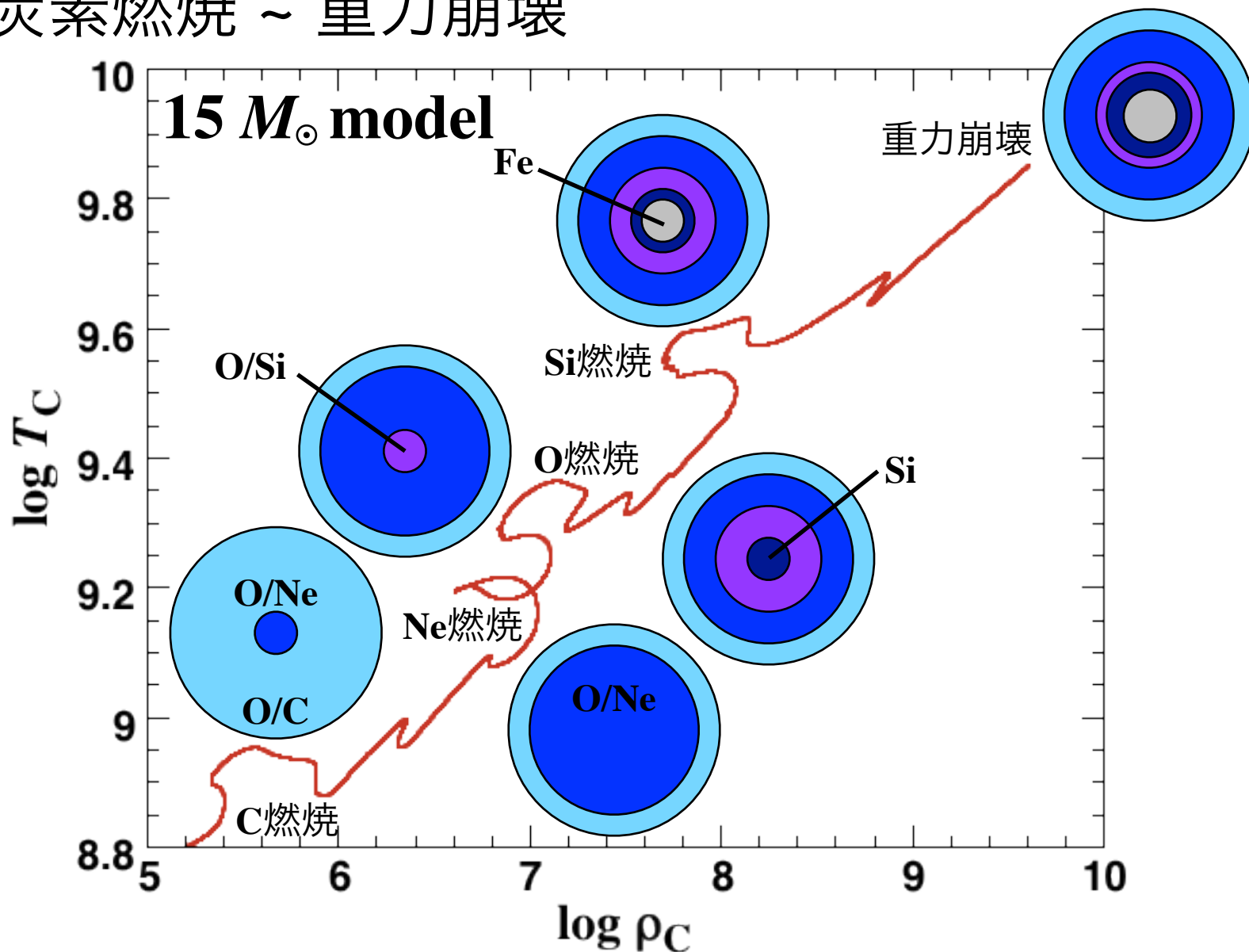
吉田 敬, 梅田秀之, 高橋 亘  
(東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)

新学術「地下素核研究」第二回超新星ニュートリノ研究会  
2016年1月6日 富山商工会議所

# 大質量星の後期進化

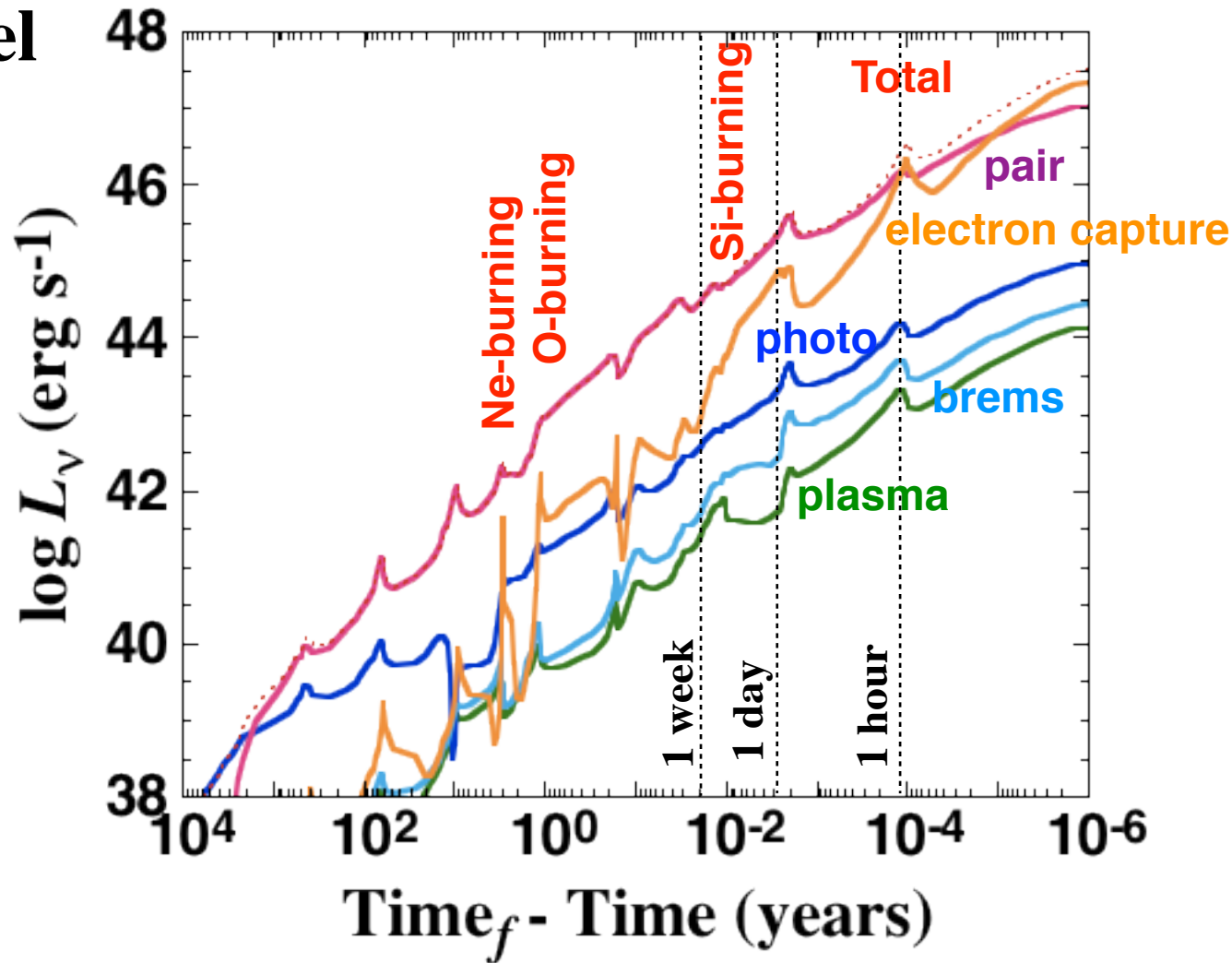
- 大質量星(初期質量 $8-10M_{\odot}$ 以上の星)の後期進化

➡ 炭素燃焼 ~ 重力崩壊



# 大質量星から放出されるニュートリノ

15  $M_{\odot}$  model



- pair neutrinoが主な生成過程
- 重力崩壊直前はelectron captureが重要に

# 超新星前兆ニュートリノの最近の研究

---

2000年代 ~

- 素過程を元にしたニュートリノスペクトルの計算
  - **pair neutrinos**  
**Ordzywolek et al. (2004); Misiaszek et al. (2006)**
  - **plasma neutrinos**  
**Ordzywolek (2007)**
  - **neutrinos by weak interactions**  
**Ordzywolek (2009)**
- **presupernova neutrinoのevent数 (proceedings)**  
**Ordzywolek et al. (2007); Ordzywolek & Heger (2010)**

2015年

- **presupernovaからのneutrinoの生成率とevent数**
  - Kato et al. (2015)**      **Electron capture SNと重力崩壊型SNとの比較**
  - Asakura et al. (2015, arXiv)**      **KamLANDでの観測予測**
  - Patton & Lunardini (2015, arXiv)**      **スペクトルのsnapshot**

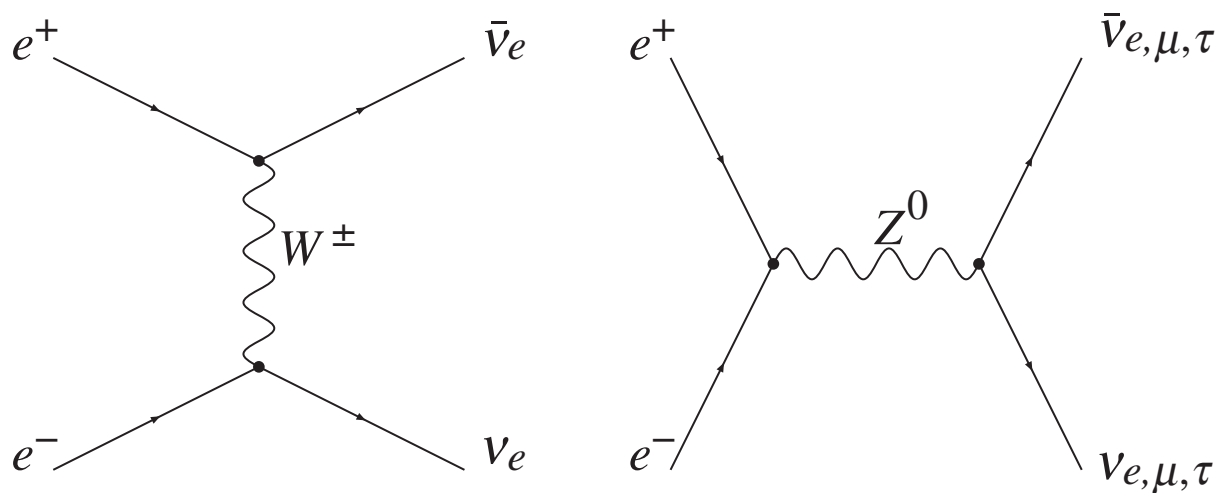
# 今日の発表内容

---

- **pair neutrino process**によるニュートリノ放出  
…温度, 密度依存性
- **15M<sub>☉</sub>**モデルの**Si**燃焼から重力崩壊に至るまでの  
ニュートリノ放出とスペクトルの変化
- **12, 15, 20M<sub>☉</sub>**モデルにおけるニュートリノ放出と  
**KamLAND**による観測可能性
- **KamLAND, JUNO**による超新星ニュートリノ **alert**
- 超新星前兆ニュートリノから燃焼過程を探れるか？

# Pair neutrino process

- 電子陽電子対消滅によるneutrino放出



(Misiaszek et al. 2006)

- charged current反応 →  $\nu_e, \bar{\nu}_e$ を放出
- neutral current反応 →  $(\nu_e, \bar{\nu}_e), (\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu), (\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau)$ を放出

neutrino生成率, スペクトルは温度, 電子陽電子数密度に依存

# Neutrino spectraの見積もり

- pair neutrinoによるneutrino放出
  - neutrino放出率 (Yakovlev et al. 2001)

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

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

	$C_V$	$C_A$
$\nu_e$	$0.5 + 2\sin^2\theta_w$	$0.5$
$\nu_{\mu\tau}$	$-0.5 + 2\sin^2\theta_w$	$-0.5$

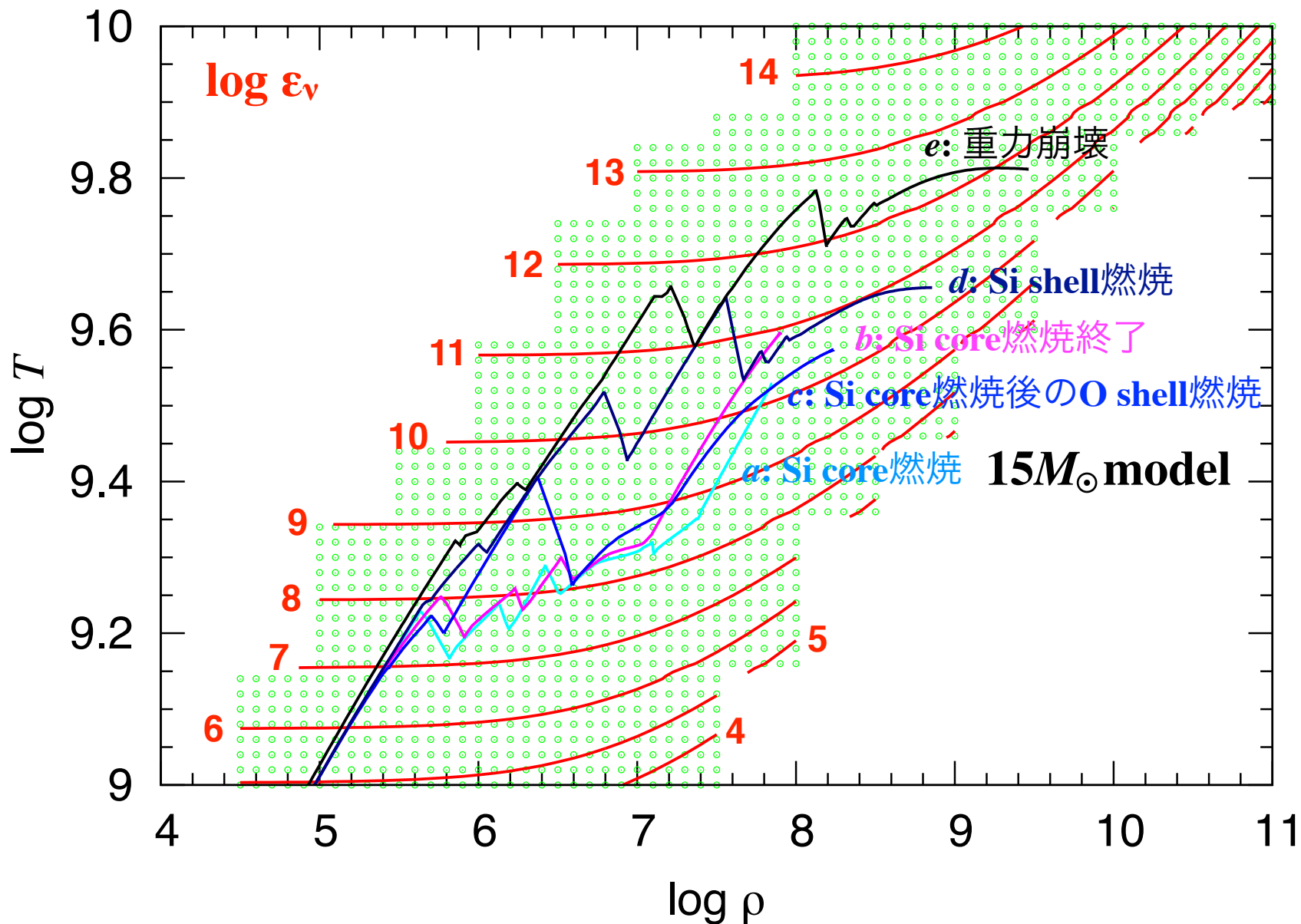
➡  $\nu_e$ の方が $\nu_{\mu\tau}$ よりも放出率が高い

➡ 普通は $\nu_e, \nu_{\mu\tau}$ の方が $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_{\mu\tau}$ よりも平均エネルギーが高い

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

# pair neutrinoによるエネルギー放出率

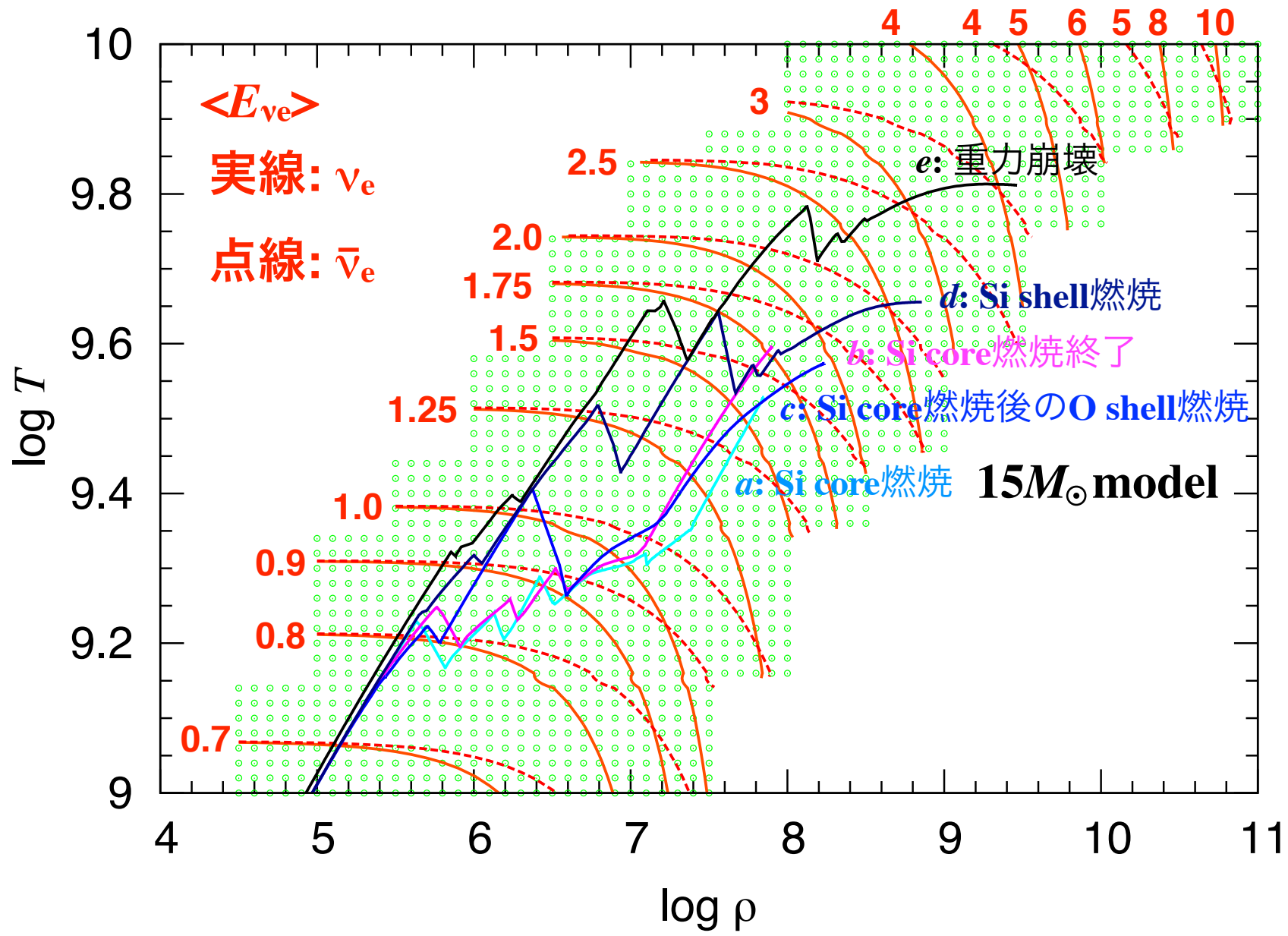
- 単位質量当たりのエネルギー放出率 ( $\text{erg g}^{-1} \text{s}^{-1}$ )





# pair neutrinoの平均エネルギー

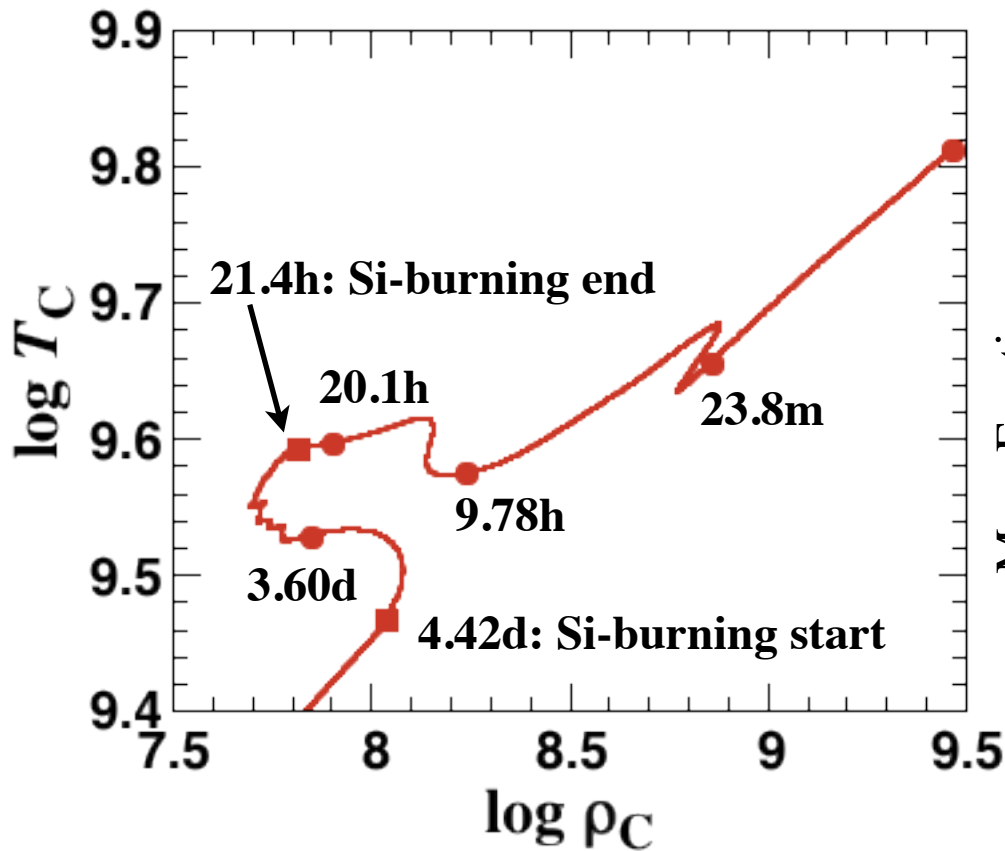
●  $\nu_e, \bar{\nu}_e$  の平均エネルギー (MeV)



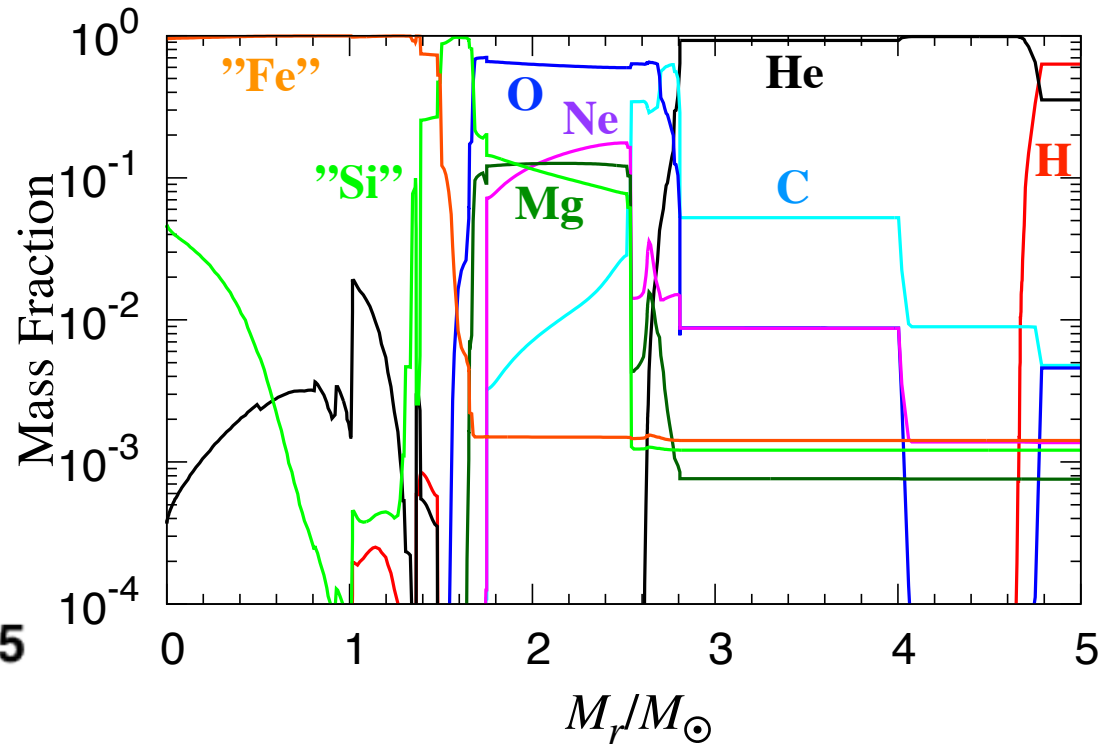
# 15M<sub>⊙</sub> モデルの後期進化とneutrino放出

## ● 15M<sub>⊙</sub> モデル

$M/M_{\odot}$	$M_f$	$M_{\text{He}}$	$M_{\text{CO}}$	$M_{\text{Si}}$	$M_{\text{Fe}}$	Si-b (d)
15	12.3	4.66	2.74	1.65	1.50	4.42



最終組成分布



# 15M<sub>⊙</sub> モデルの後期進化とneutrino放出

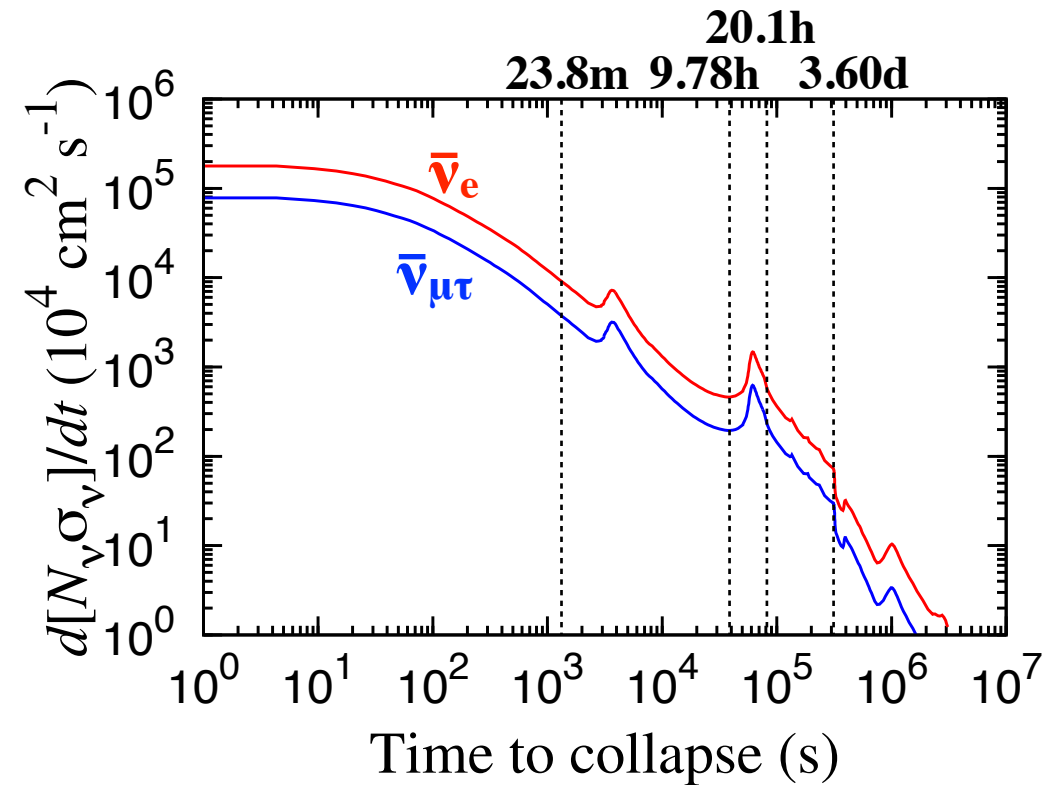
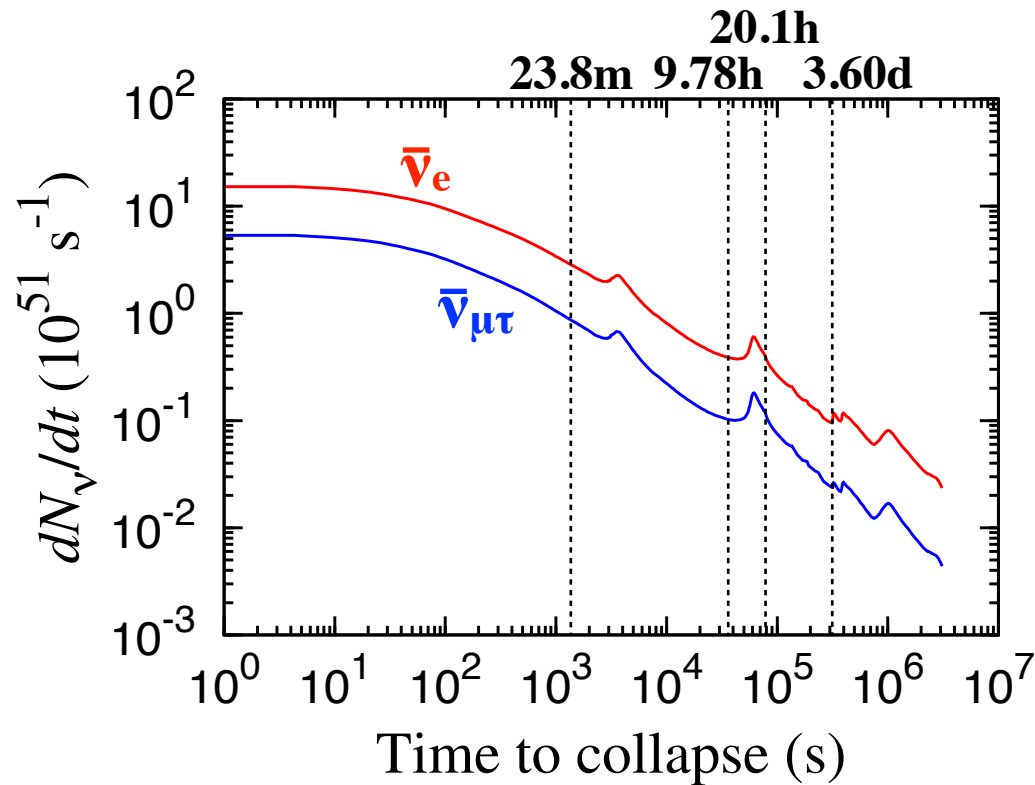
## ● 15M<sub>⊙</sub> モデル

$M/M_{\odot}$	$M_f$	$M_{\text{He}}$	$M_{\text{CO}}$	$M_{\text{Si}}$	$M_{\text{Fe}}$	Si-b (d)
15	12.3	4.66	2.74	1.65	1.50	4.42

## ● ニュートリノ放出率

●  $\int \phi_{\bar{\nu}}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r$

$\sigma(p+\bar{\nu}_e \rightarrow n+e^+)$ : Strumia & Vissani (2003)



# Si 燃焼初期における neutrino spectra

## ● $15M_{\odot}$ モデルにおける neutrino spectra

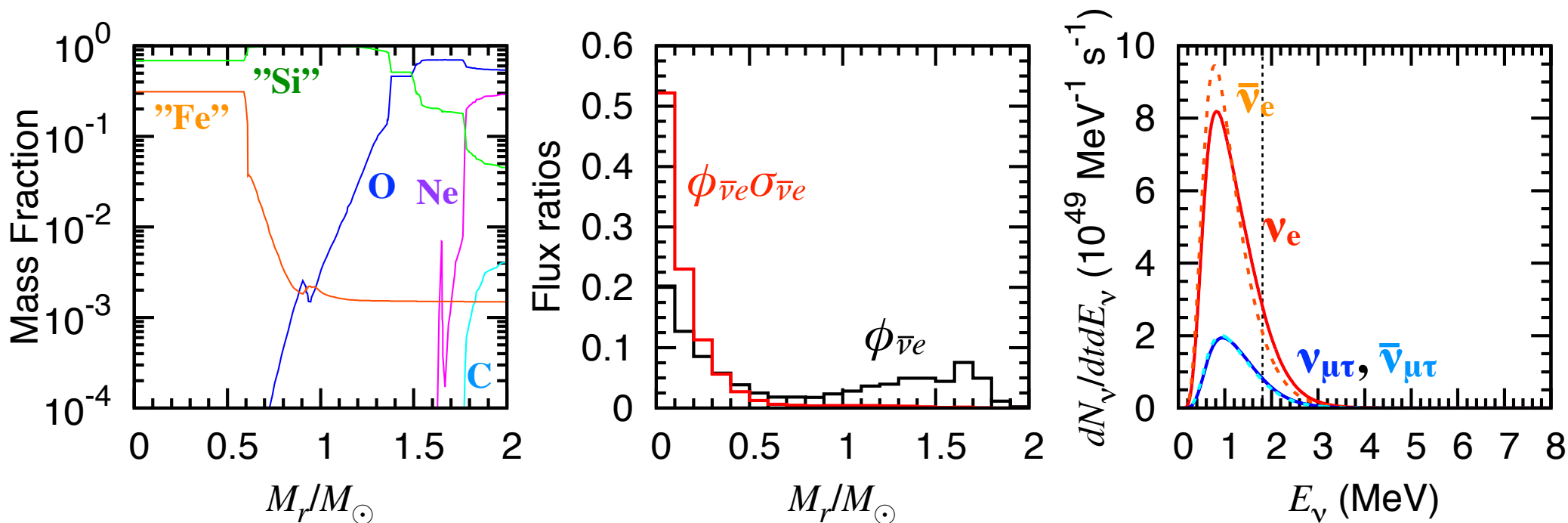
● 左図: 質量比分布

● 中図:  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) dE_{\nu} dM_r$ ,  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r$  の分布

● 右図: neutrino spectra

● 最終stepまで 3.60 days (Si core 燃焼中)

$\log T_C = 9.53$ ,  $\log \rho_C = 7.85$



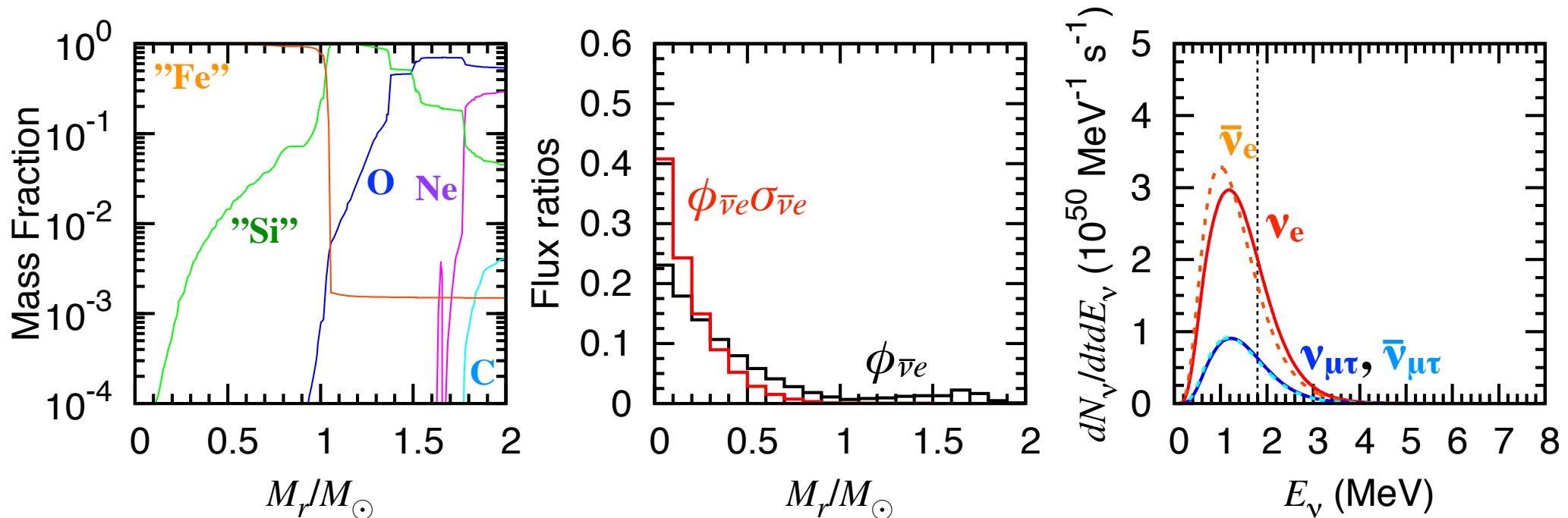
# Si 燃焼後における neutrino spectra

## ● $15M_{\odot}$ モデルにおける neutrino spectra

- 左図: 質量比分布
- 中図:  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) dE_{\nu} dM_r$ ,  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r$  の分布
- 右図: neutrino spectra

## ● 最終stepまで 20.1 hours (core Si 燃焼後)

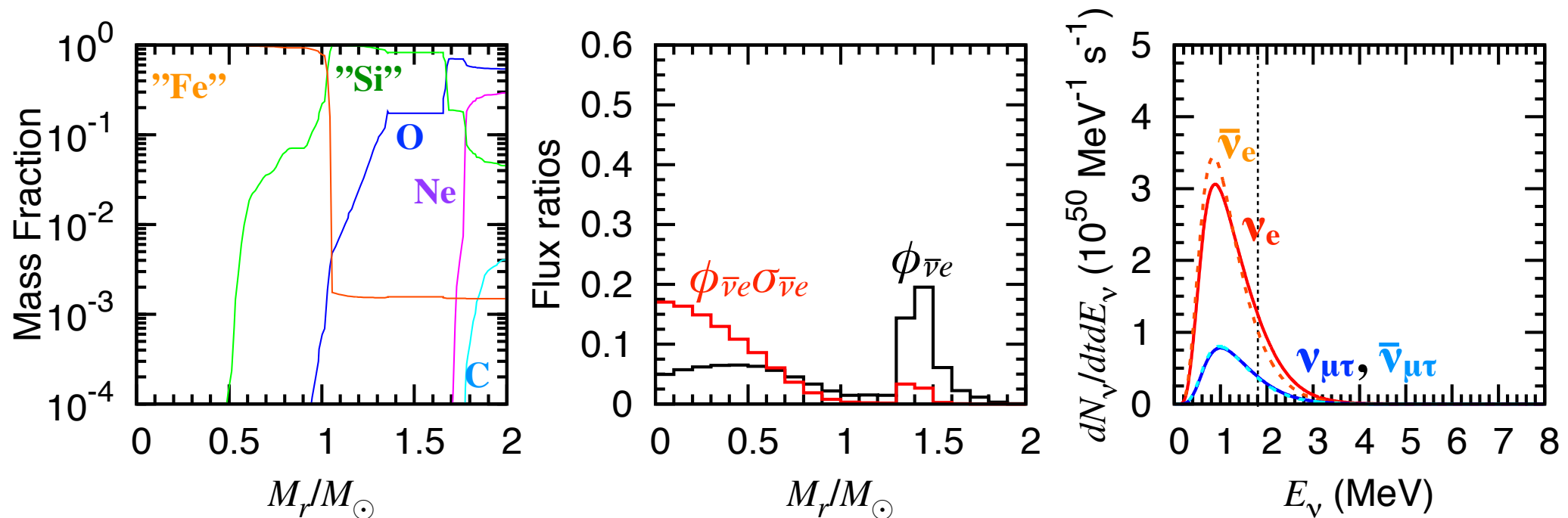
$\log T_C = 9.70$ ,  $\log \rho_C = 7.91$



# Si 燃焼後の O shell 燃焼における neutrino spectra

## ● $15M_{\odot}$ モデルにおける neutrino spectra

- 左図: 質量比分布
  - 中図:  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) dE_{\nu} dM_r$ ,  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r$  の分布
  - 右図: neutrino spectra
- 最終stepまで 9.78 hours (O shell 燃焼中)  
 $\log T_C = 9.57$ ,  $\log \rho_C = 8.24$



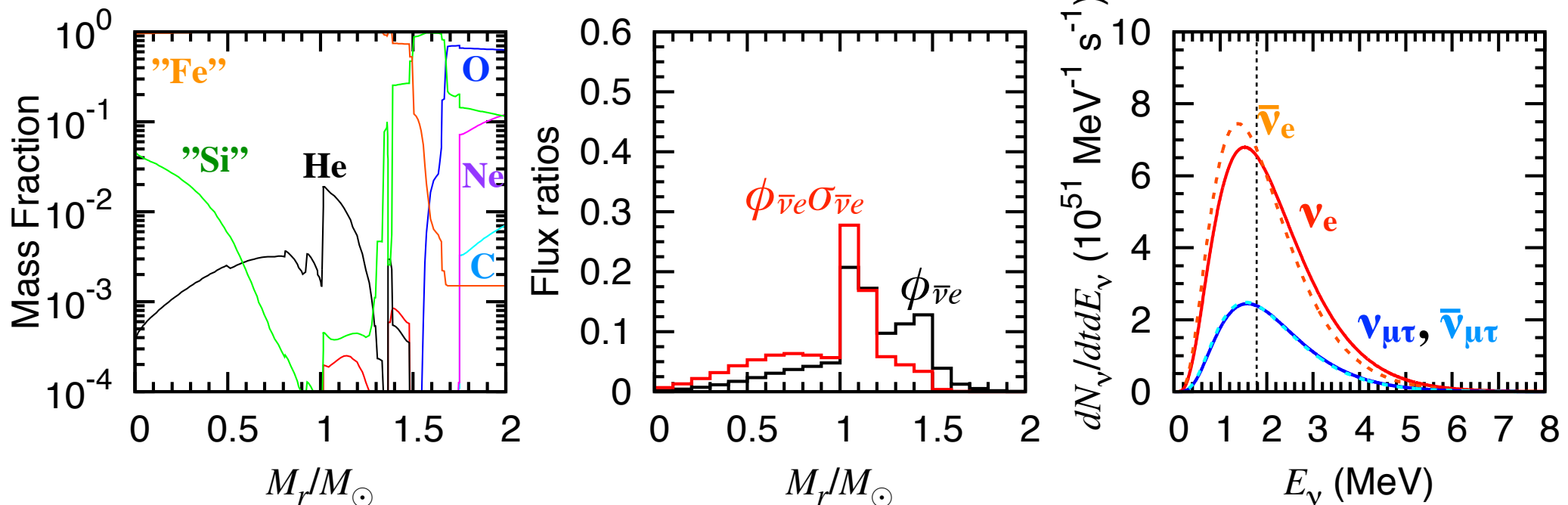
# 最終stepにおけるneutrino spectra

## ● $15M_{\odot}$ モデルにおけるneutrino spectra

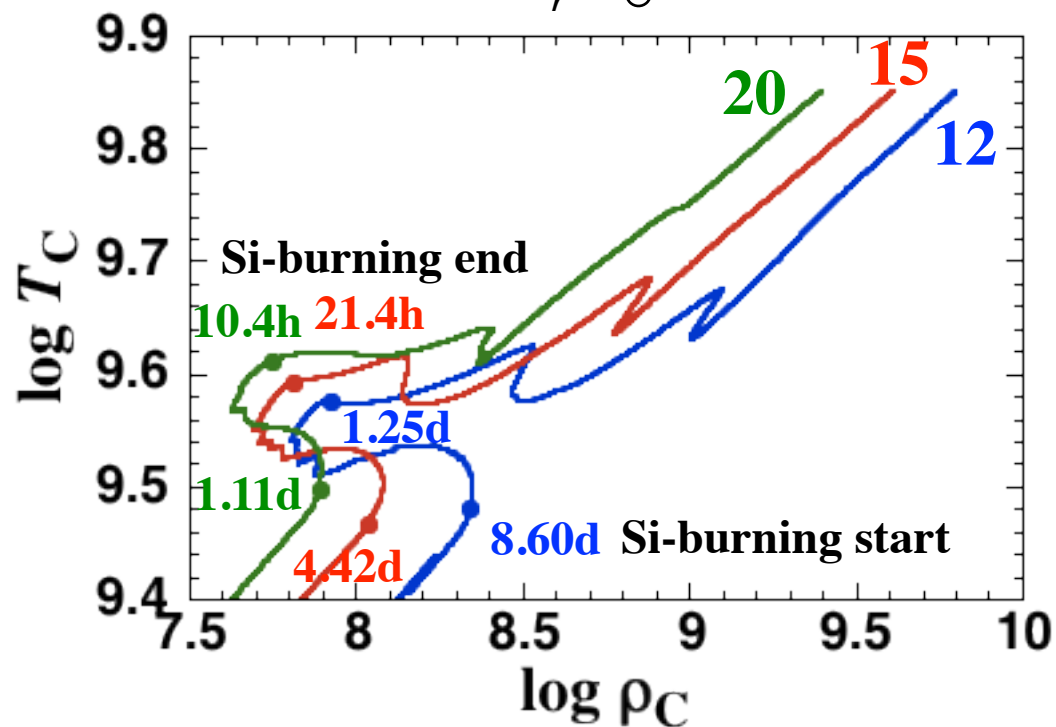
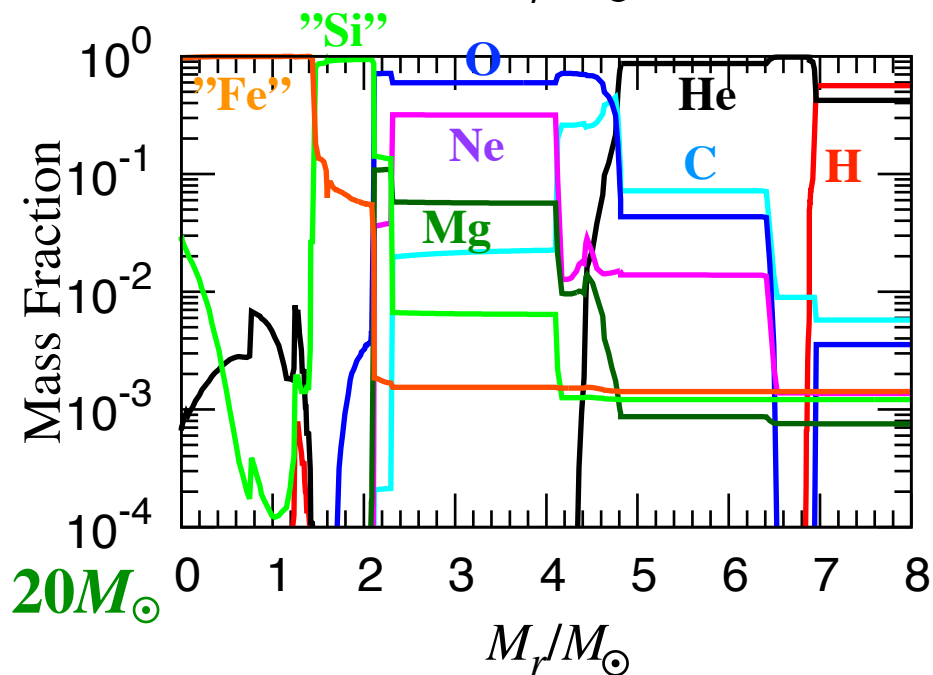
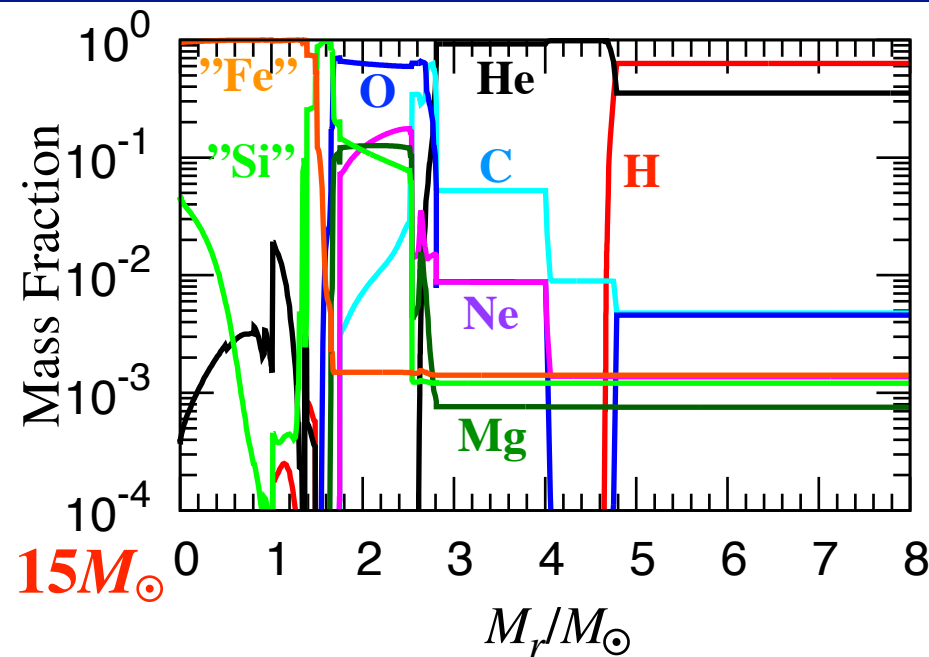
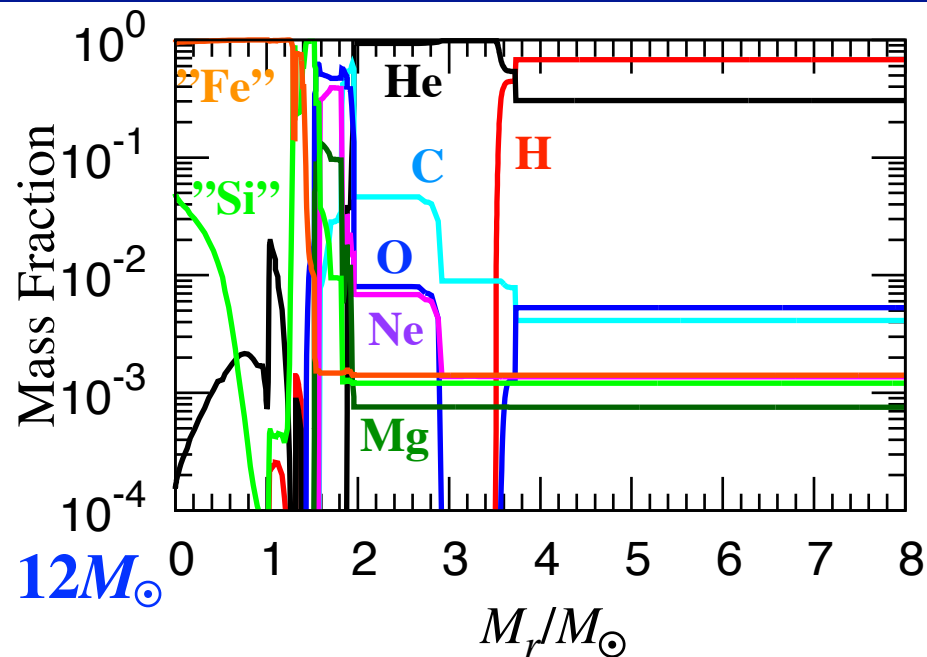
- 左図: 質量比分布
- 中図:  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) dE_{\nu} dM_r$ ,  $\int \phi_{\nu\bar{e}}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\nu\bar{e}}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r$  の分布
- 右図: neutrino spectra

## ● 最終step

$$\log T_C = 9.81, \log \rho_C = 9.47$$



# 12, 15, 20 $M_{\odot}$ モデルの後期進化

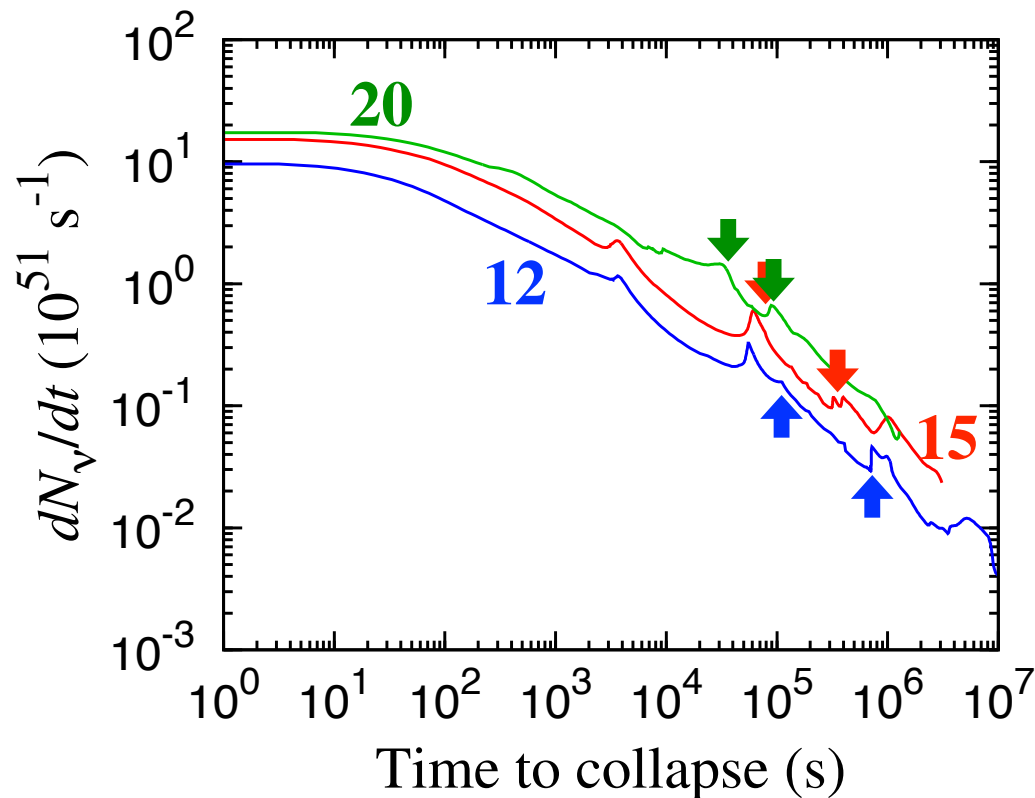




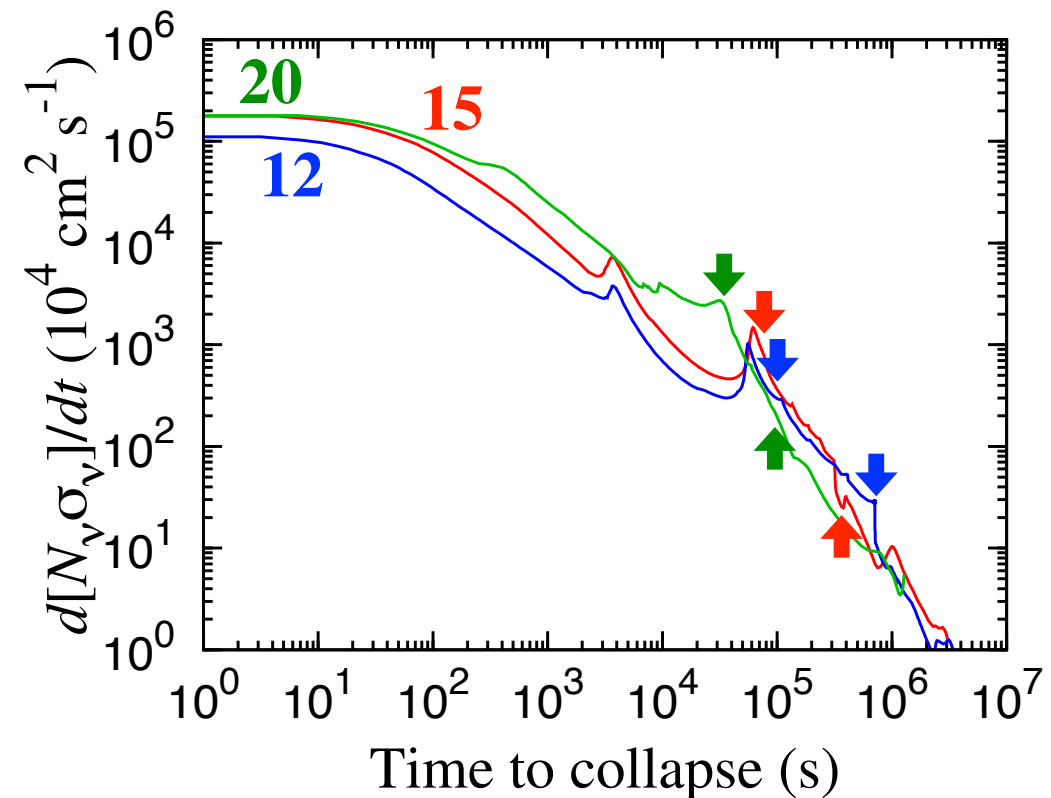
# 12, 15, 20 $M_{\odot}$ モデルの後期進化とneutrino放出

$M/M_{\odot}$	$M_f$	$M_{\text{He}}$	$M_{\text{CO}}$	$M_{\text{Si}}$	$M_{\text{Fe}}$	Si-b (d)
12	10.6	3.52	1.82	1.52	1.38	8.60
15	12.3	4.66	2.74	1.65	1.50	4.42
20	14.3	6.86	4.64	2.11	1.44	1.11

●  $\bar{\nu}_e$  放出率



●  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r$

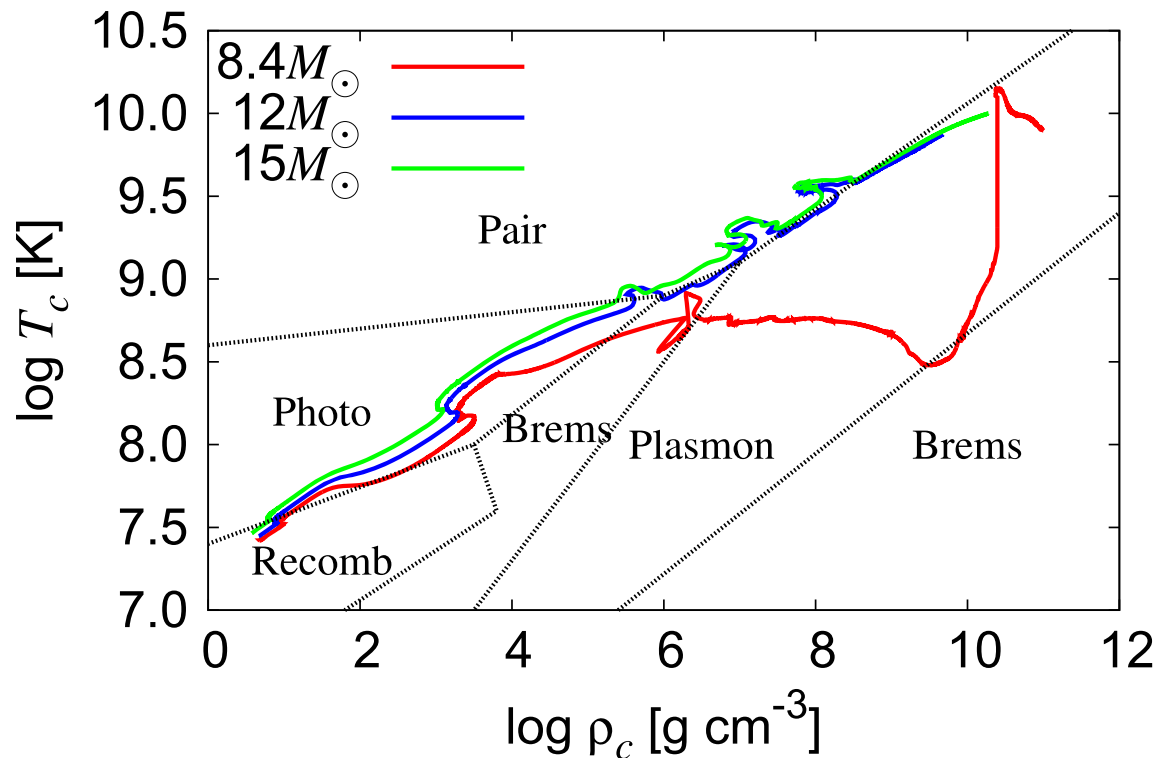


# Electron capture SN progenitorからのneutrino

## ● Electron capture (EC) SN progenitorからのneutrino放出

➡ 主にplasma neutrinoによって放出

(Kato et al. 2015; ApJ 808, 168)



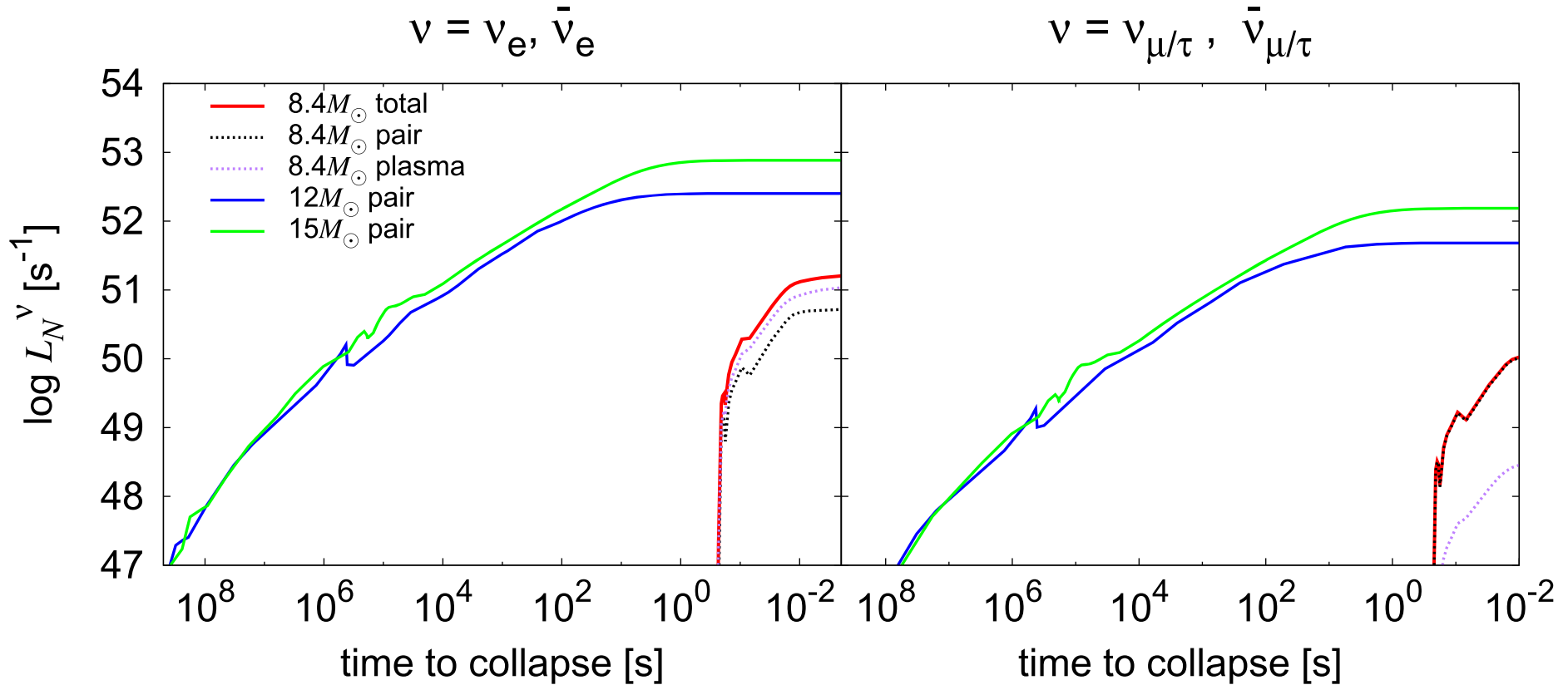
8.4 $M_{\odot}$ : ECSN

12, 15 $M_{\odot}$ : 重力崩壊型SN

# Electron capture SN progenitorからのneutrino

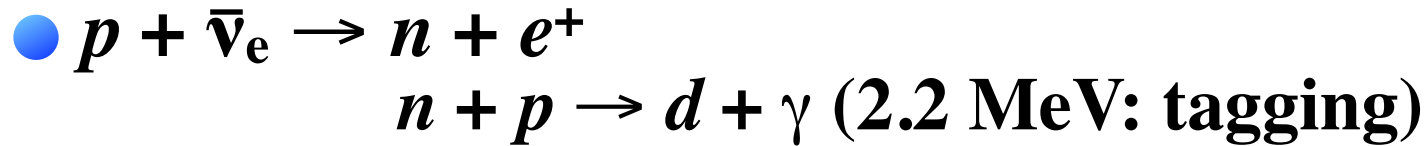
## ● Electron capture (EC) SN progenitorからのneutrino放出

➡ 主にplasma neutrinoによって放出 (Kato et al. 2015; ApJ 808, 168)



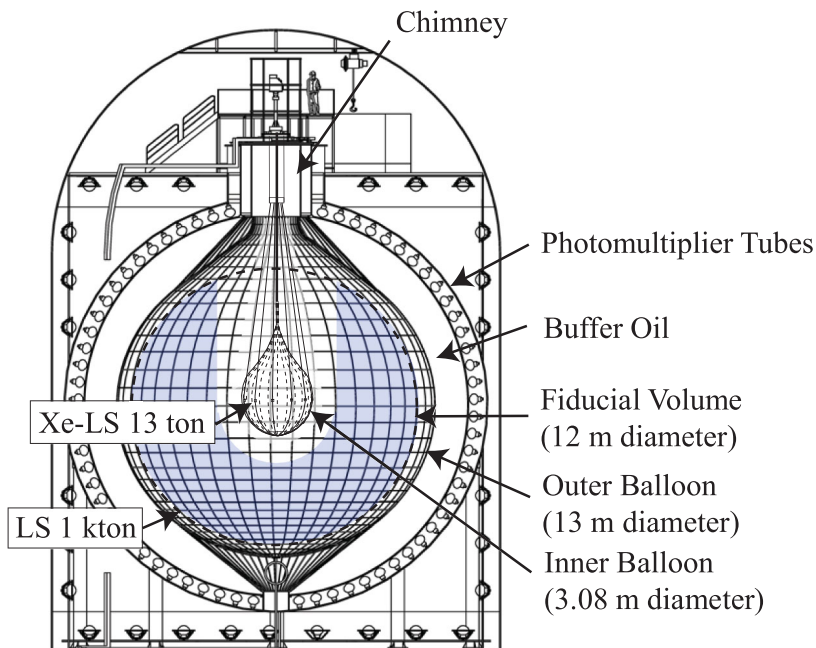
## ● ECSN progenitorからのneutrino放出量は非常に少ない KamLANDでは ~0.0015 events

# KamLANDによる超新星前兆neutrino観測



- $\bar{\nu}_e$  event rate

$$\frac{dN_{\nu}}{dt} = \frac{N_p}{4\pi d^2} \int \{P_{ee} \lambda_{\nu e}(E_{\nu}) + (1-P_{ee}) \lambda_{\nu x}(E_{\nu})\} \sigma(E_{\nu}) dE_{\nu}$$



(Gando et al. 2013)

$$N_p = 5.98 \times 10^{31} \text{ (Gando et al. 2013)}$$

$d = 200 \text{ pc}$  : distance to Betelgeuse

$P_{ee}$ : Transition probability of  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$

$P_{ee} = 1$  for no mixing

$P_{ee} = 0.68$  for normal

$P_{ee} = 0.02$  inverted

$\sigma(E_{\nu})$ : neutrino reaction cross section

(Strumia & Vissani 2003)

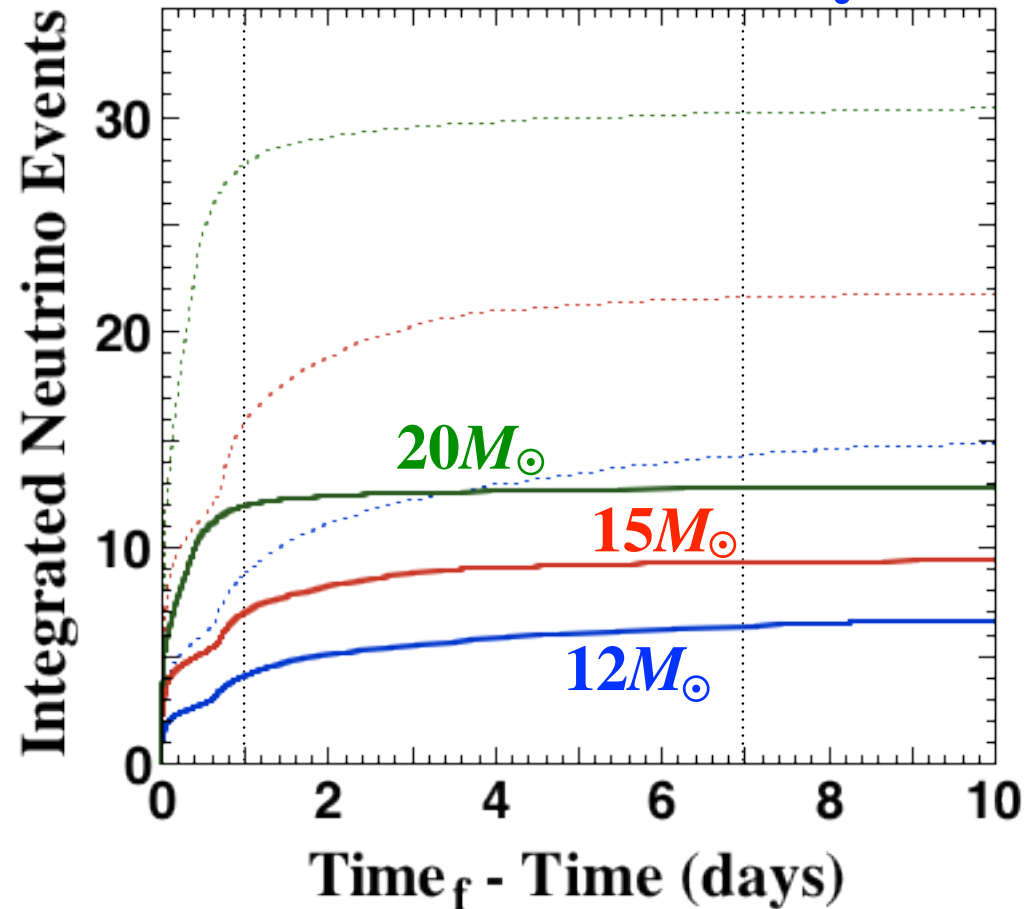
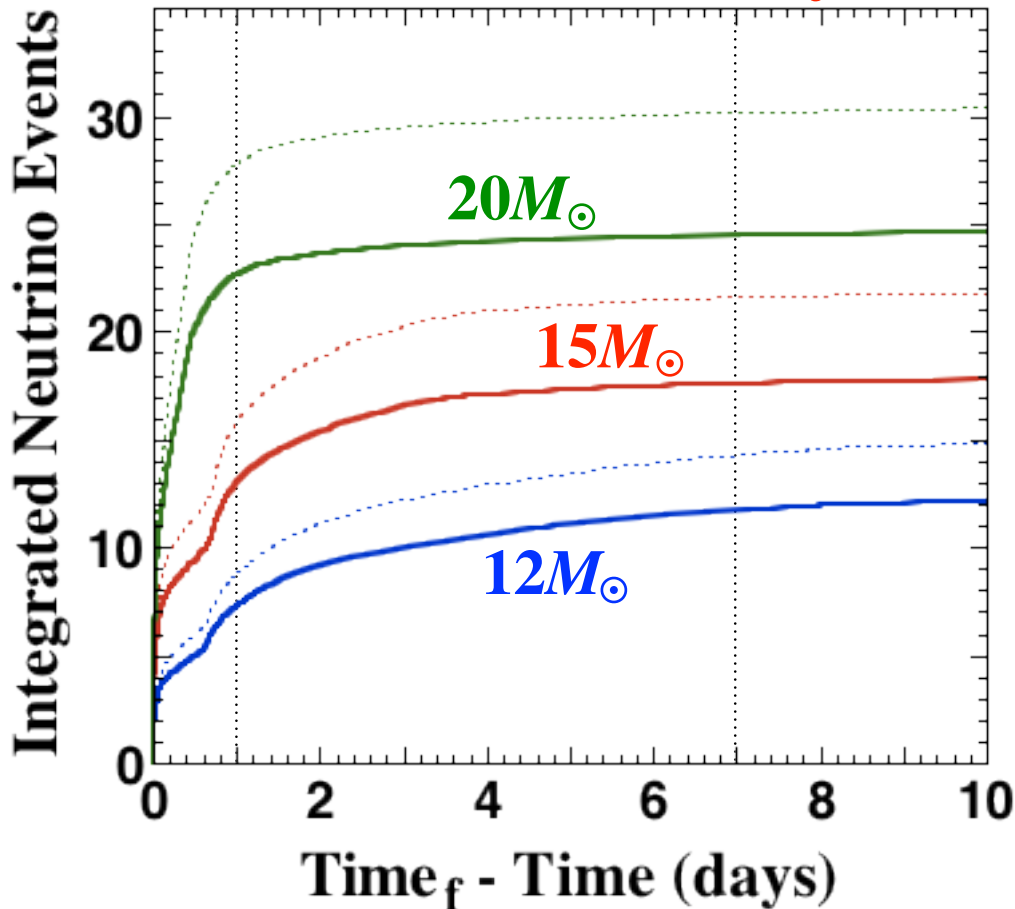
# 前兆neutrino event数の予測

- 前兆neutrino @  $d = 200\text{pc}$  (ベテルギウスの距離)

KamLANDによる検出  $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$

Normal mass hierarchy

Inverted mass hierarchy



- 一週間でのNeutrino events

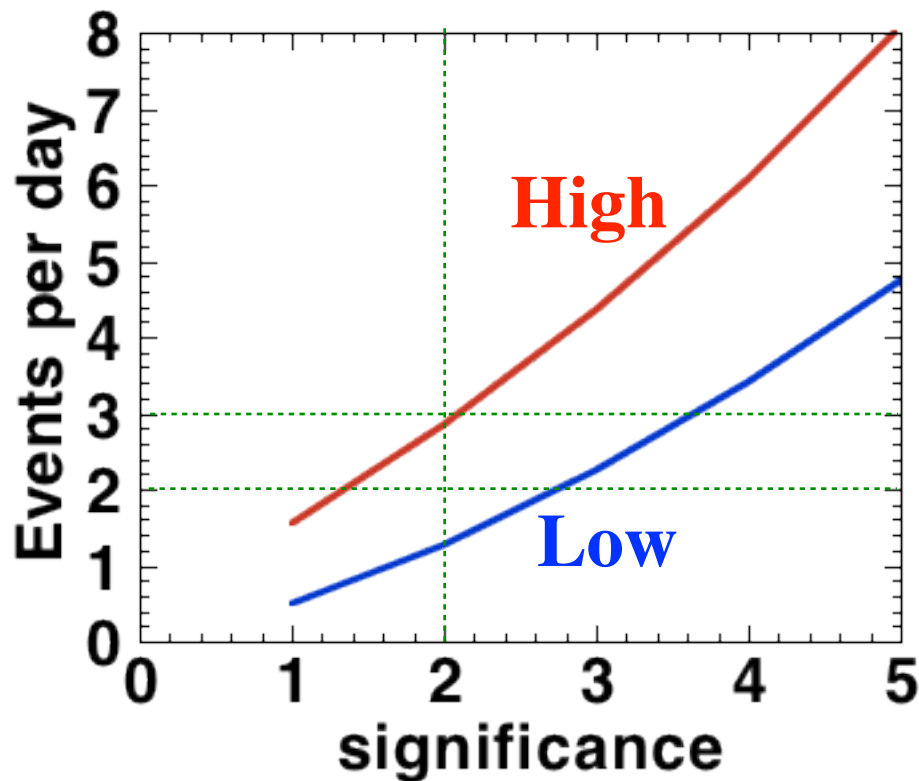
➡ ~ 12, 18, 24 (normal), ~ 6, 9, 13 (inverted)

# KamLANDによる超新星alert

## ● KamLANDによる通常のneutrino event数

(Asakura et al. 2015)

➡  $7.1 \times 10^{-2}$  events/day (low)  
0.355 events/day (high)



### ● Low background

➡ 一日に 2 event あれば  
 $2\sigma$ 以上の事象になりうる

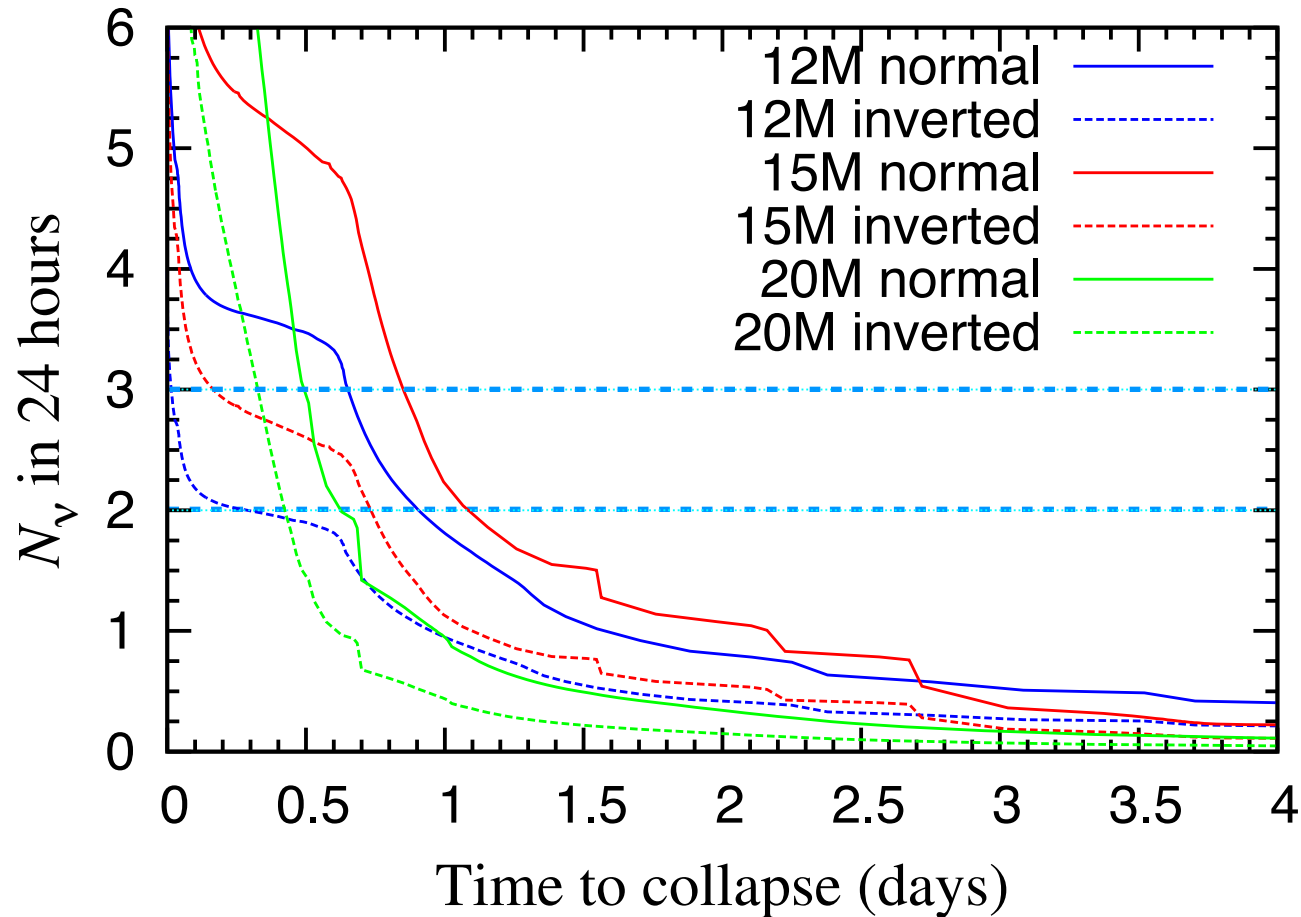
### ● High background

➡ 一日に 3 event あれば  
 $2\sigma$ 以上の事象になりうる

本田さんポスター

# KamLANDによる超新星alert

- KamLANDによる24時間での超新星前兆neutrino events SN@200pc



- low backgroundでは爆発前日-半日前にalert可能

# JUNOとRENO-50

- JUNO(中国,EU), RENO-50(韓国)

➡ ~20kt sizeのliquid scintillation neutrino観測装置

- JUNOのbackground (An et al. 2015; arXiv:1507.05613)

Selection	IBD efficiency	IBD	Geo- $\nu$ s	Accidental	${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	Fast $n$	$(\alpha, n)$
-	-	83	1.5	$\sim 5.7 \times 10^4$	84	-	-
Fiducial volume	91.8%	76	1.4	410	77	0.1	0.05
Energy cut	97.8%	73	1.3		71		
Time cut	99.1%				1.1		
Vertex cut	98.7%	60	1.1	0.9	1.6		
Muon veto	83%						
Combined	73%	60	3.8				

Table 2-1: The efficiencies of antineutrino selection cuts, signal and backgrounds rates.

➡ High: 60 events/day; Low: 3.8 events/day

➡ High: 2.5 events/hour; Low: 0.16 events/hour

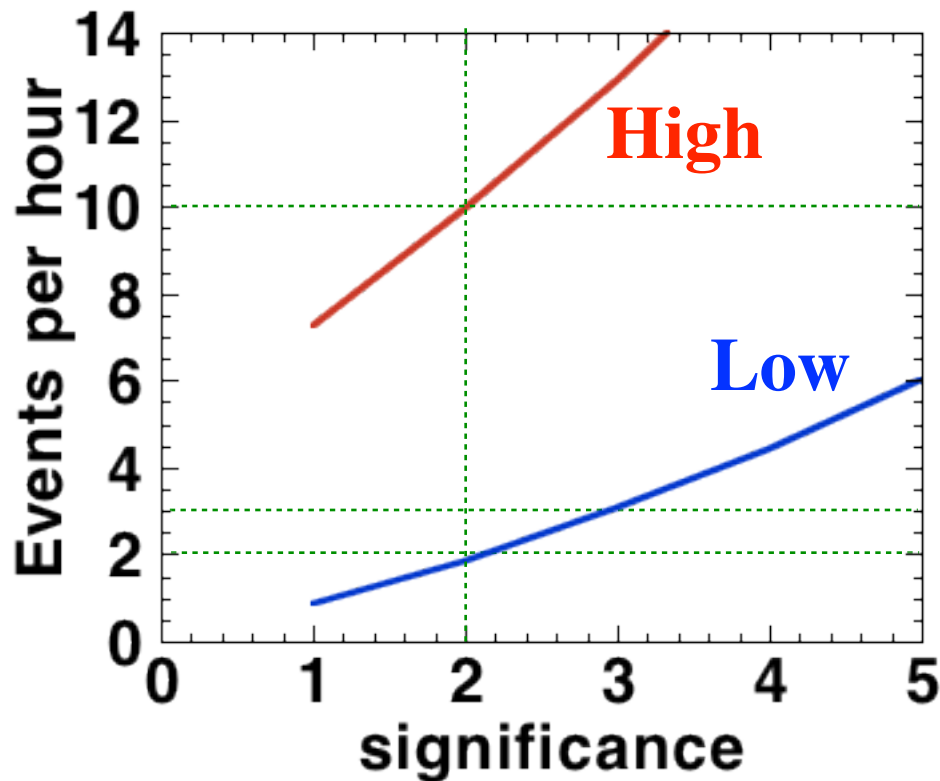


# JUNOによる超新星前兆neutrino alert

- JUNOによるneutrino event数 (An et al. 2015)

- ➡ 0.158 events/hour (low)

- 2.5 events/hour (high: 原子炉実験中)



- Low background

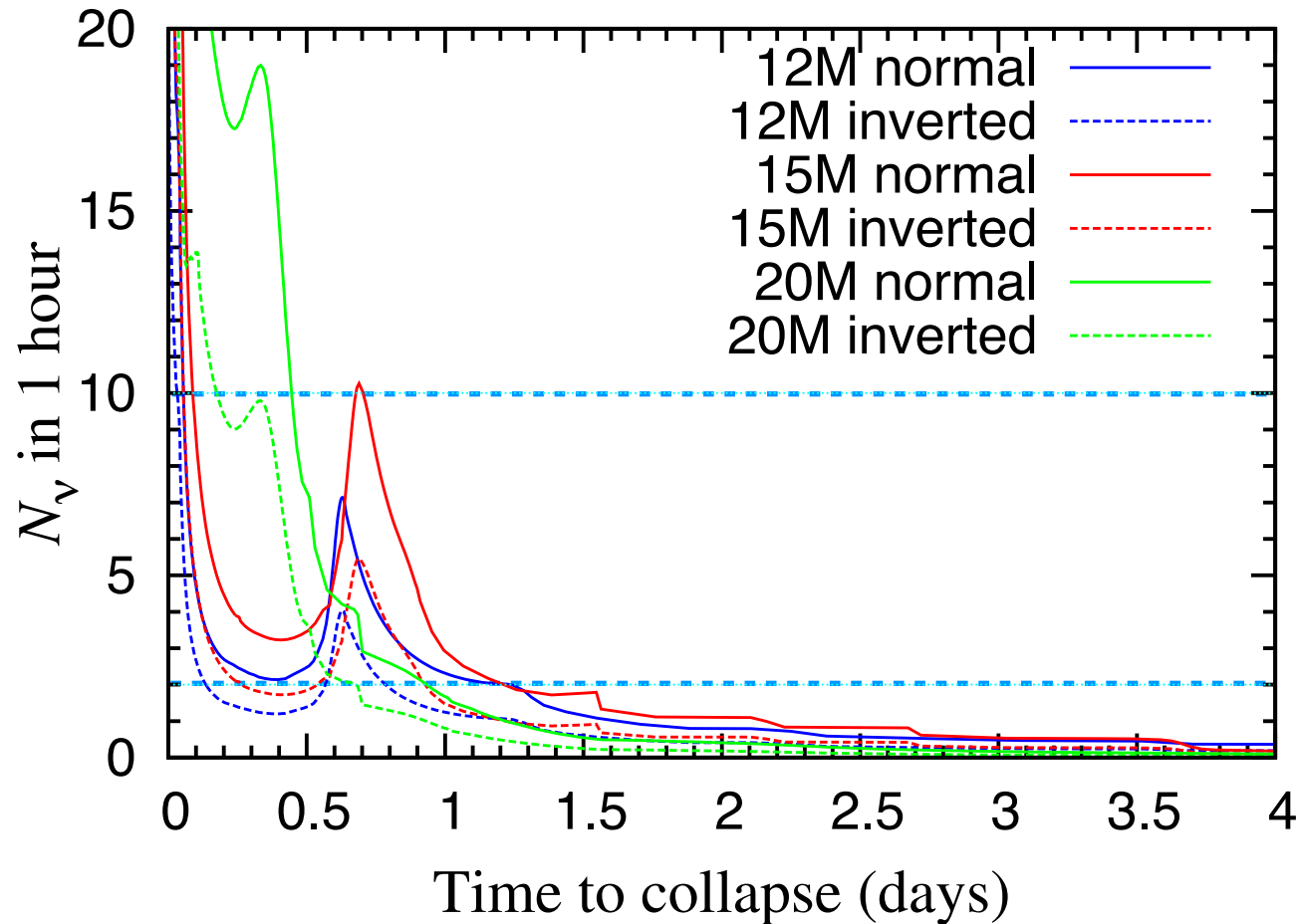
- ➡ 一時間に 2 event あれば  $2\sigma$ 以上の事象になりうる

- High background

- ➡  $2\sigma$ 以上の事象になるには一時間に 10 event 必要

# JUNOによる超新星前兆neutrino alert

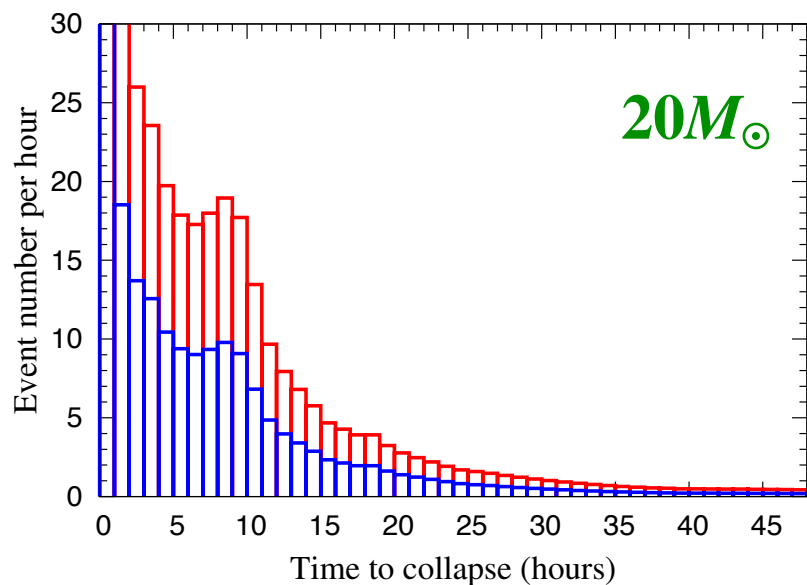
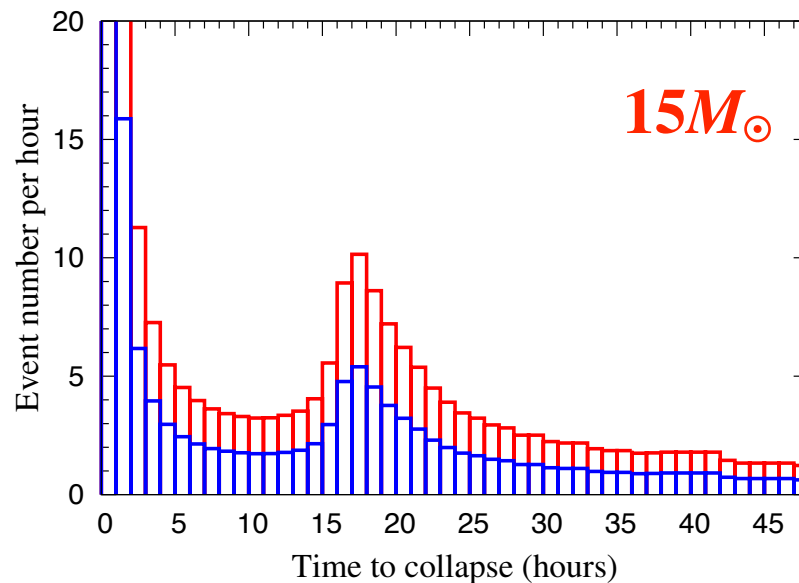
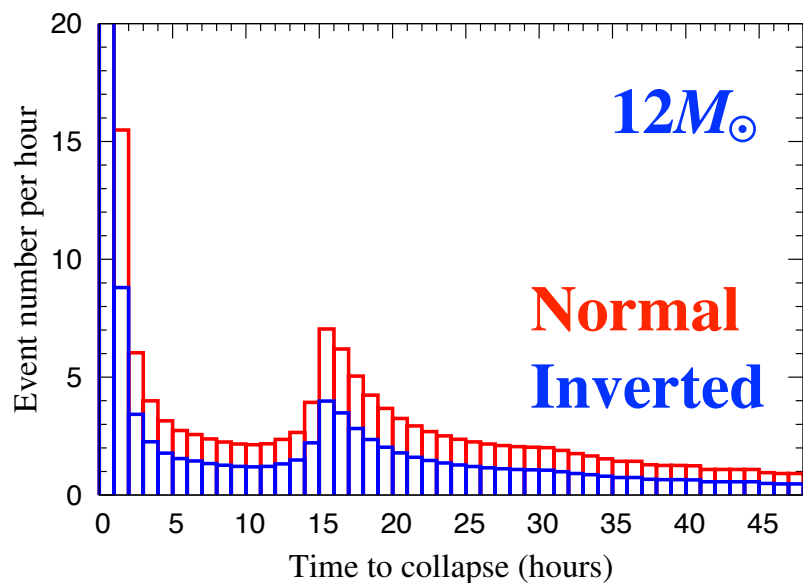
- JUNOによる1時間での超新星前兆neutrino events  
SN@200pc



- low backgroundでは alert はKamLANDとほぼ同時
- 原子炉実験中のalertは難しいかもしれない

# 超新星前兆neutrinoから最終進化を探る

## ● JUNOによる1時間での超新星前兆neutrino events SN@200pc



● 15 - 20時間前



neutrino eventの減少

Si燃焼→O shell燃焼の移行

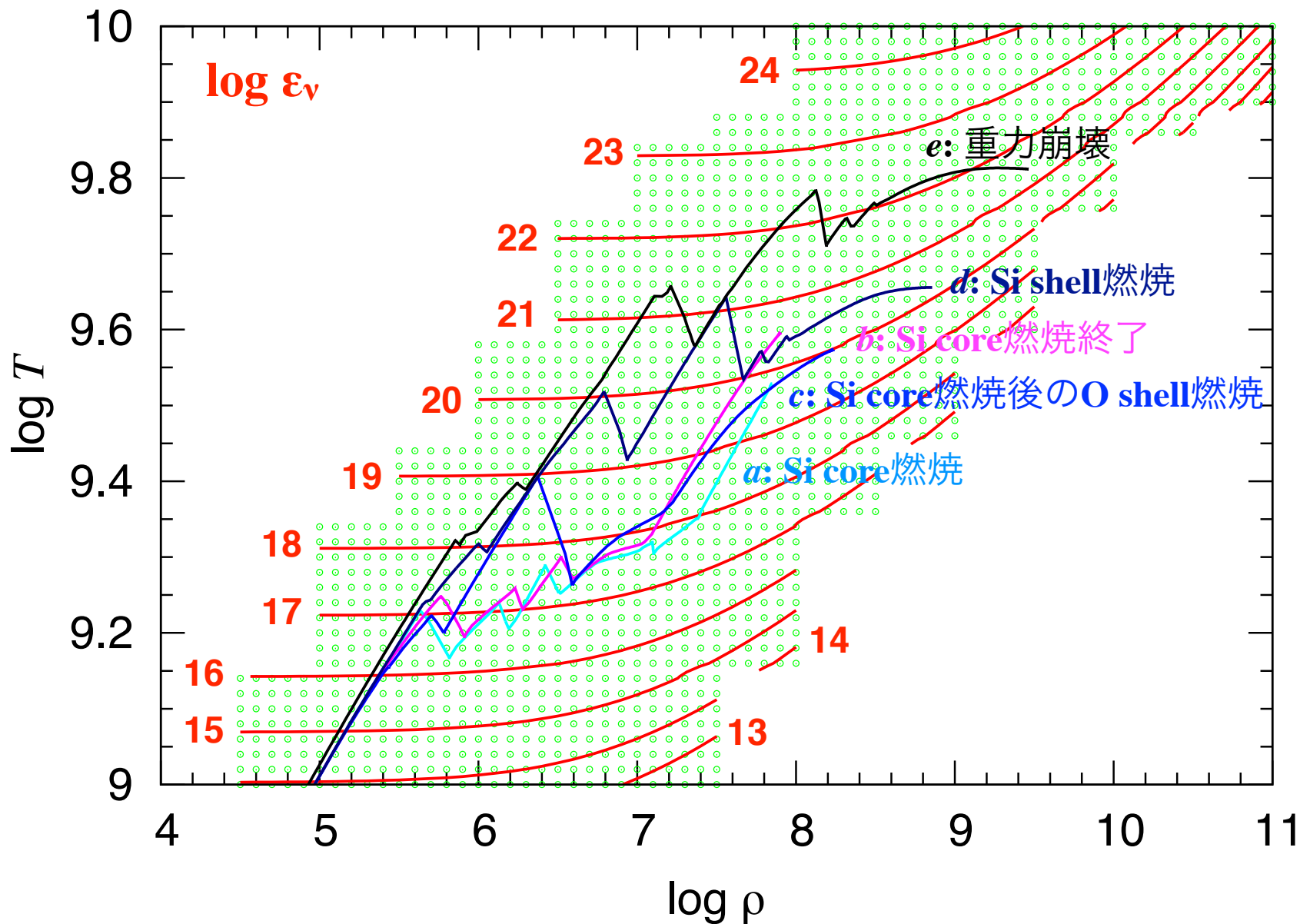
# まとめ

---

- 大質量星のSi燃焼以降におけるニュートリノ放出
  - **15  $M_{\odot}$  model**
    - **neutrino**放出率, スペクトルの時間変化
      - ➡ 星の構造, 燃焼過程の変化を反映
  - 星の質量の違い
    - ➡ **neutrino event**数, **time scale**に依存性
- **KamLAND**による超新星**alert**
  - ➡ 超新星爆発の半日 - 一日前に**alert**可能
- 大質量星の最終進化を探る
  - ➡  **$\gtrsim 10$  events/hour**程度の観測で燃焼過程の変化を観測的に示せる可能性

# pair neutrinoによるエネルギー放出率

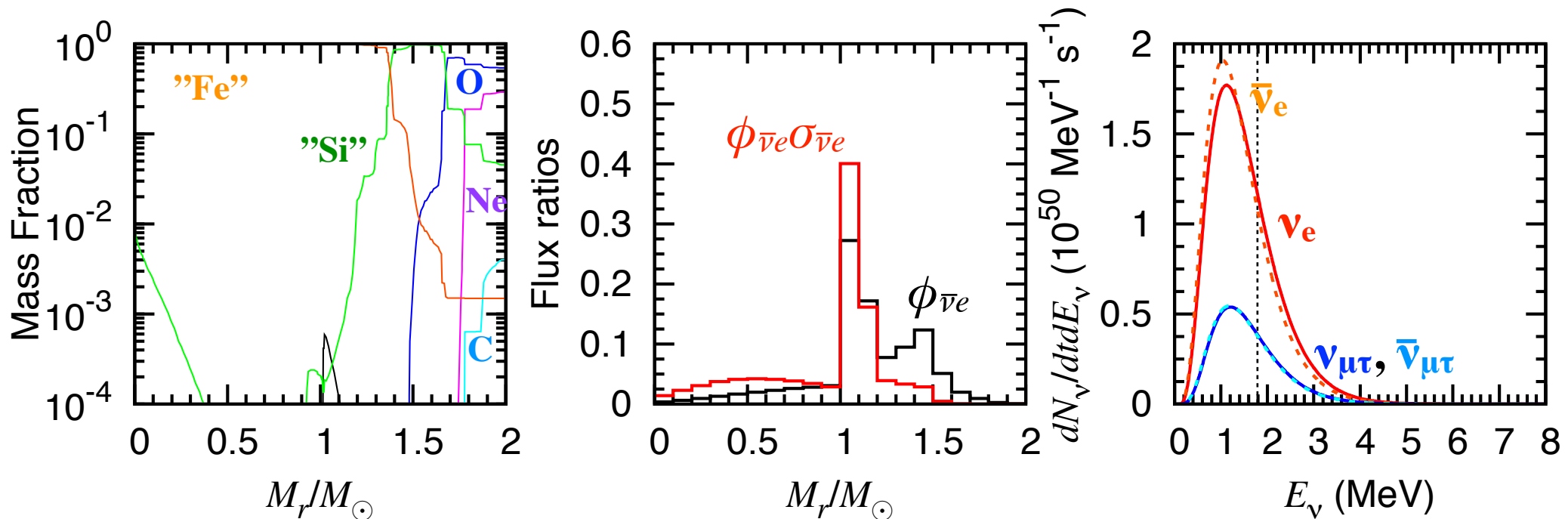
- 単位体積当たりのエネルギー放出率 ( $\text{erg/cm}^3/\text{s}$ )



# Si 燃焼後の O shell 燃焼における neutrino spectra

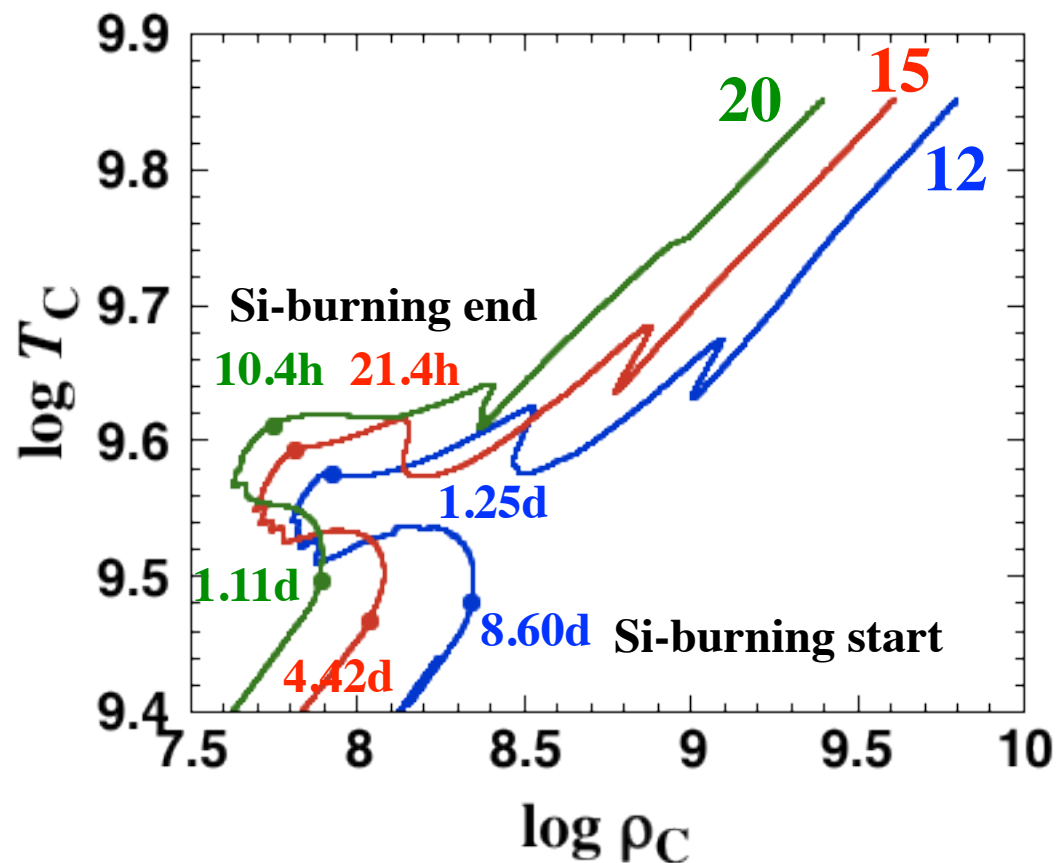
## ● $15M_{\odot}$ モデルにおける neutrino spectra

- 左図: 質量比分布
  - 中図:  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) dE_{\nu} dM_r$ ,  $\int \phi_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r$  の分布
  - 右図: neutrino spectra
- 最終stepまで 23.8 minutes  
 $\log T_C = 9.66$ ,  $\log \rho_C = 8.86$



# 12, 15, 20 $M_{\odot}$ モデルの後期進化

$M/M_{\odot}$	$M_f$	$M_{\text{He}}$	$M_{\text{CO}}$	$M_{\text{Si}}$	$M_{\text{Fe}}$	Si-b (d)
12	10.6	3.52	1.82	1.52	1.38	8.60
15	12.3	4.66	2.74	1.65	1.50	4.42
20	14.3	6.86	4.64	2.11	1.44	1.11



# JUNOとRENO-50

- JUNO(中国,EU), RENO-50(韓国)

➡ ~20kt sizeのシンチレーション型neutrino観測装置

- 原子炉ニュートリノによるニュートリノ振動パラメータの解明

- 低threshold

➡ 超新星前兆ニュートリノの観測も可能

- JUNOのbackground

Selection	IBD efficiency	IBD	Geo- $\nu$ s	Accidental	${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	Fast $n$	$(\alpha, n)$
-	-	83	1.5	$\sim 5.7 \times 10^4$	84	-	-
Fiducial volume	91.8%	76	1.4	410	77	0.1	0.05
Energy cut	97.8%	73	1.3		71		
Time cut	99.1%				1.1		
Vertex cut	98.7%	60	1.1	0.9	1.6		
Muon veto	83%			3.8			
Combined	73%	60					

Table 2-1: The efficiencies of antineutrino selection cuts, signal and backgrounds rates.



# 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  $\neq 0$

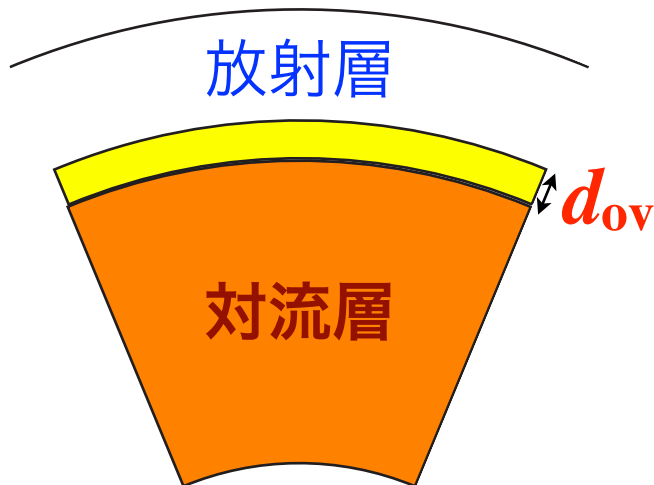
→ **overshooting** (He燃焼まで)

領域の広さ:  $d_{ov} = \alpha_{ov} H_p$

$\alpha_{ov}$ : パラメータ

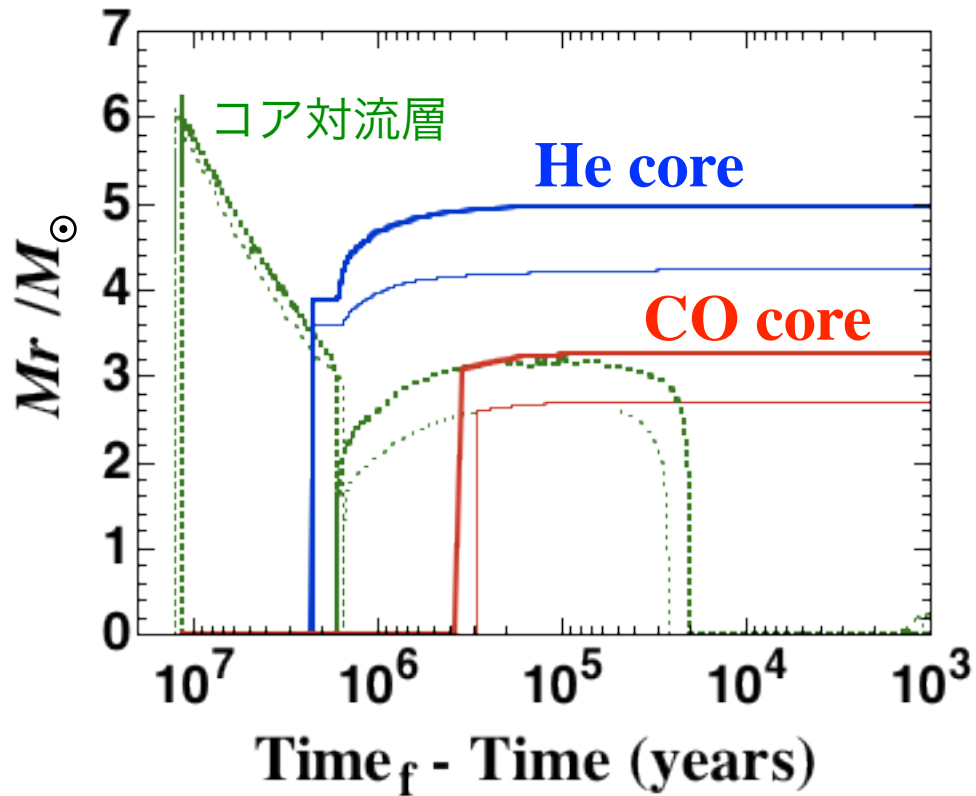
- 大きな**overshooting**

→ 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  
 $\alpha_{ov} = 0.005$

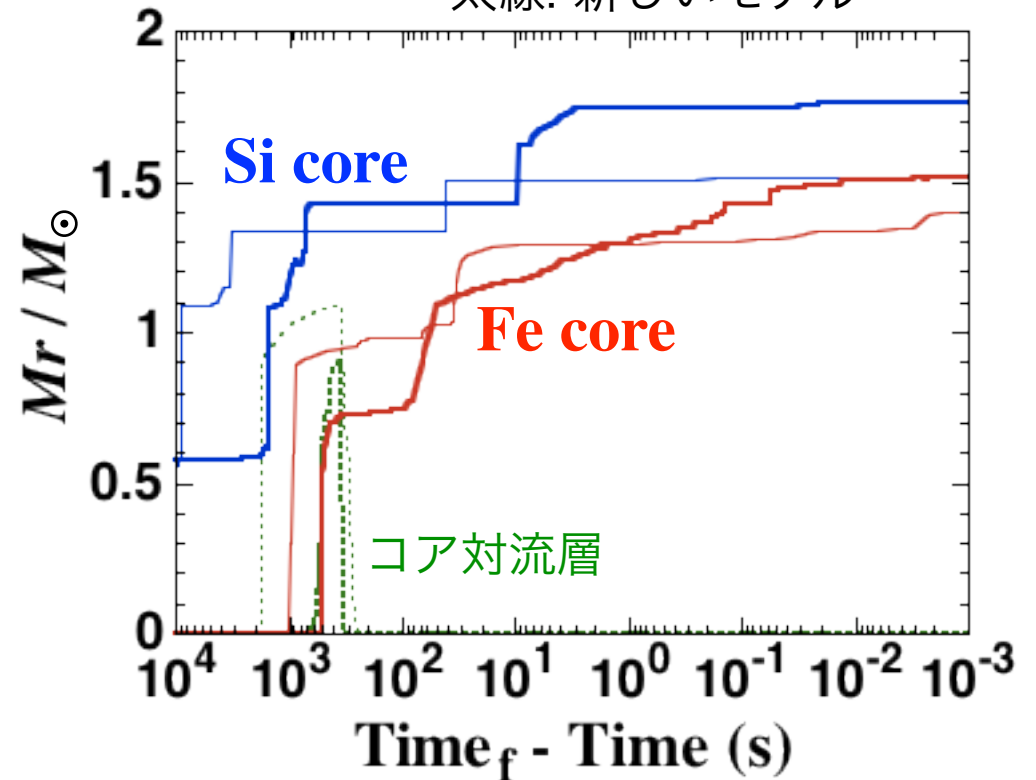
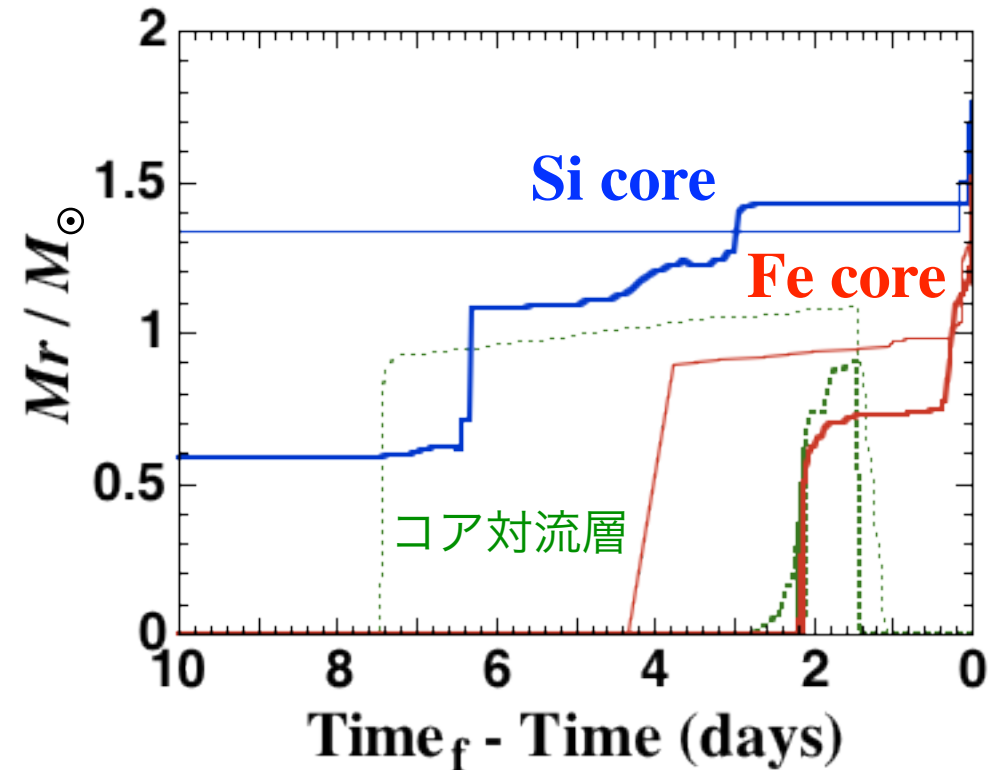
- 新しいモデル  
Ledoux対流条件  
 $\alpha_{ov} = 0.005$

➡ 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

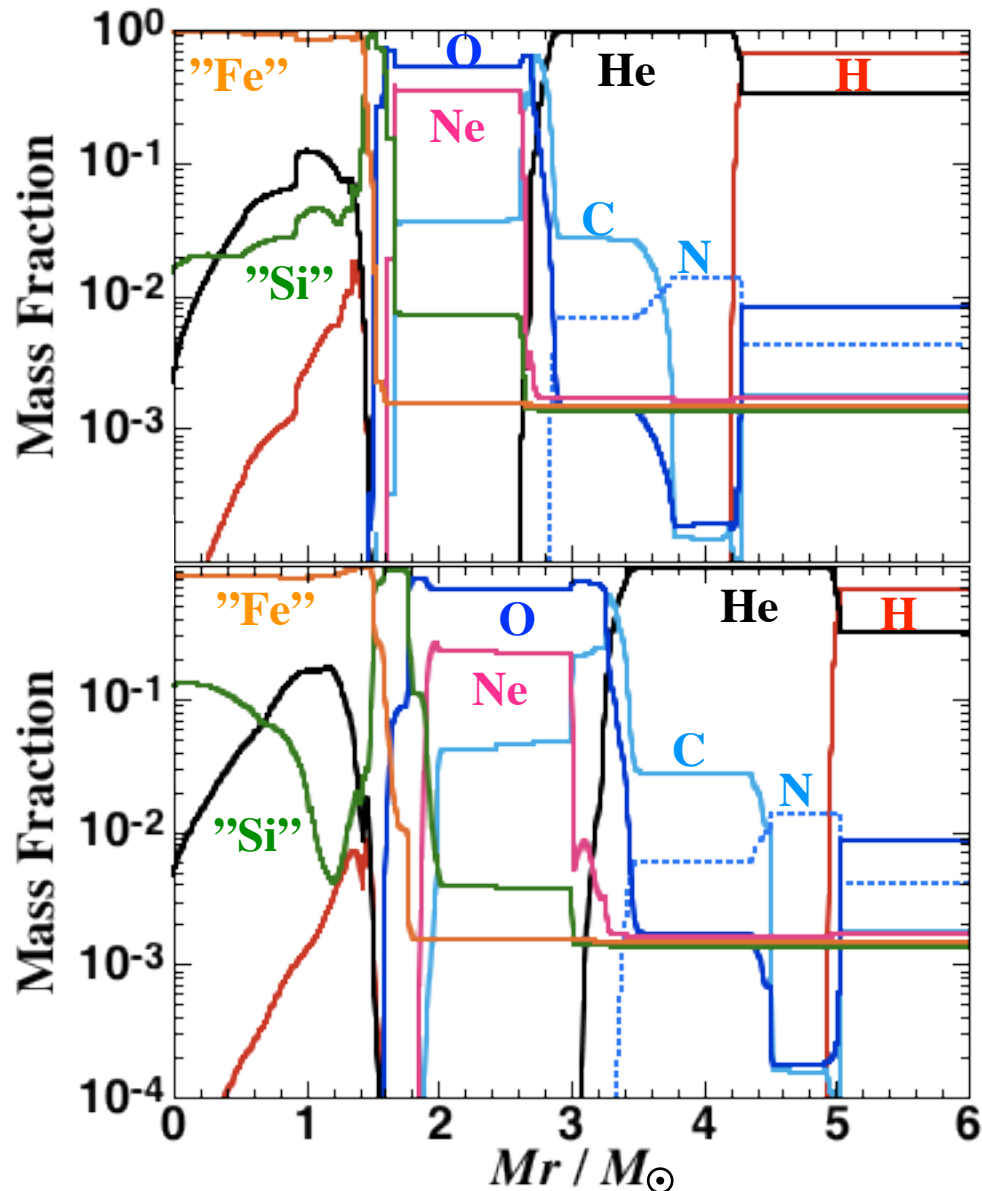
● Si燃焼期間 → ~2日 (~7日)

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

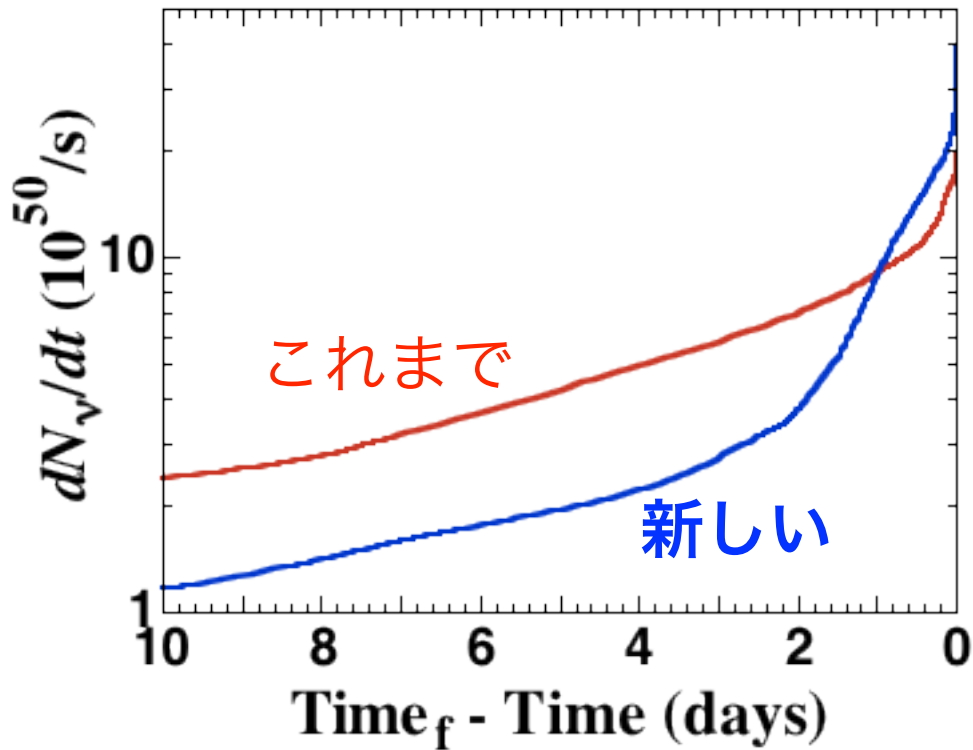
$$M_f = 14.0 M_{\odot}$$

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

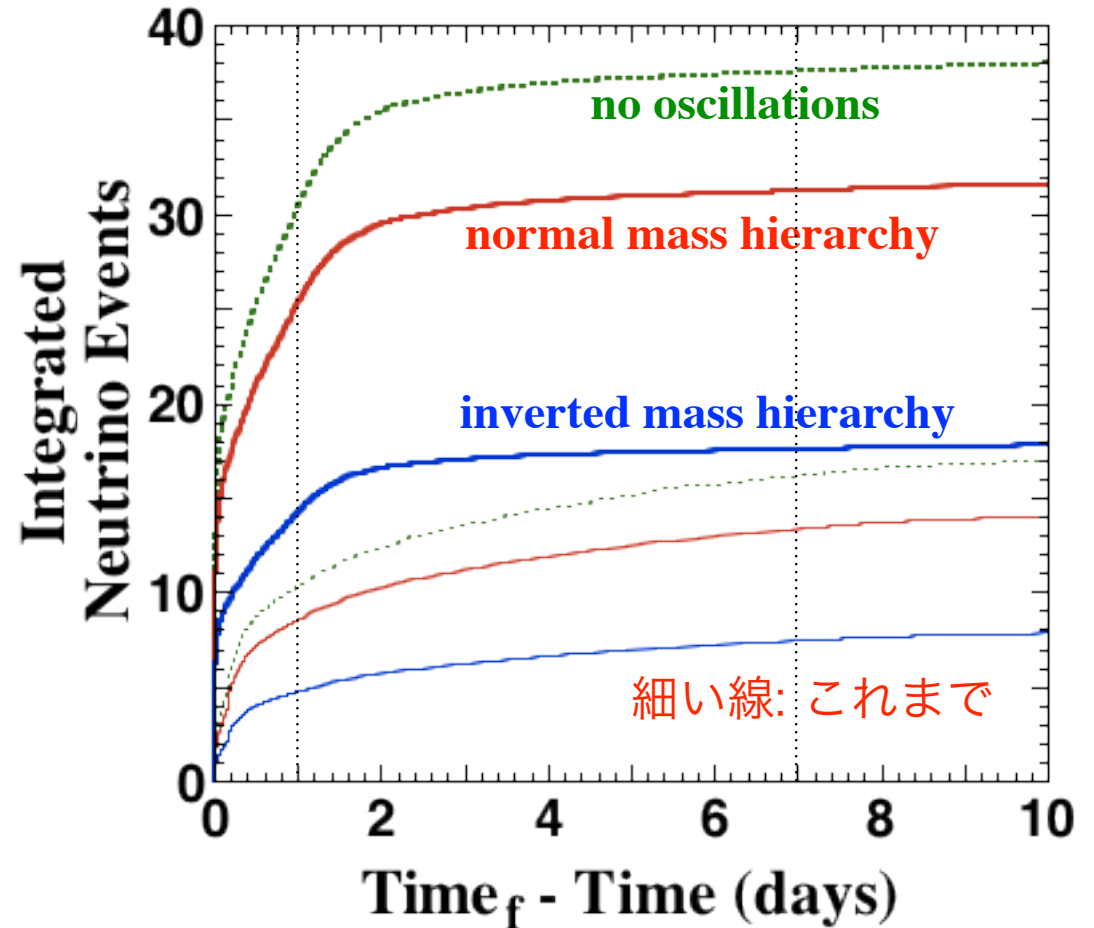
$$M_{Fe} = 1.51 M_{\odot}$$

# 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



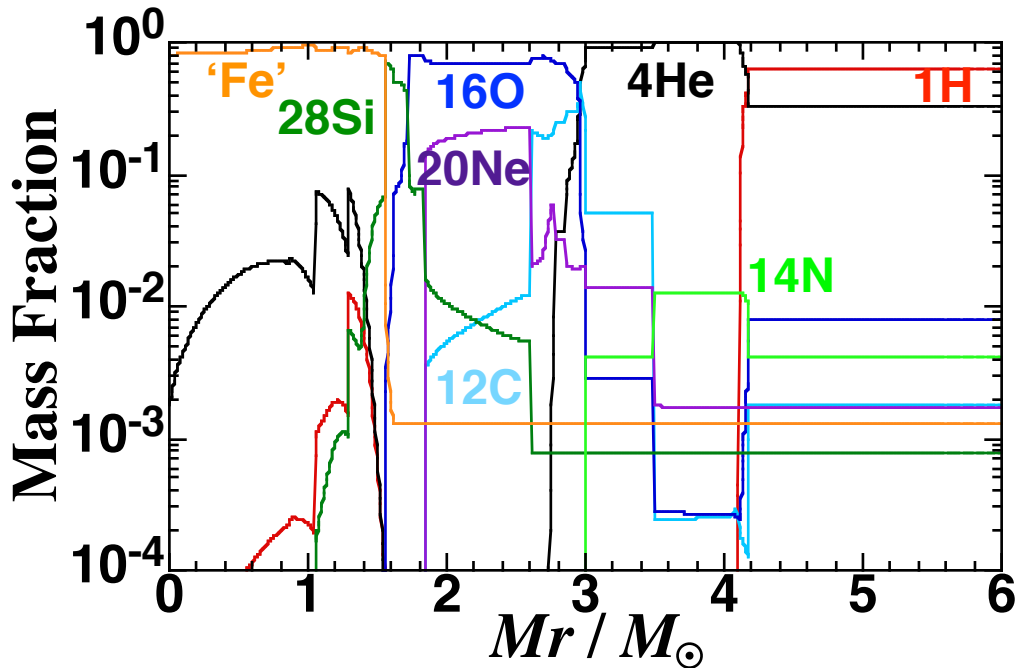
● ケイ素燃焼の期間の違い

● 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)

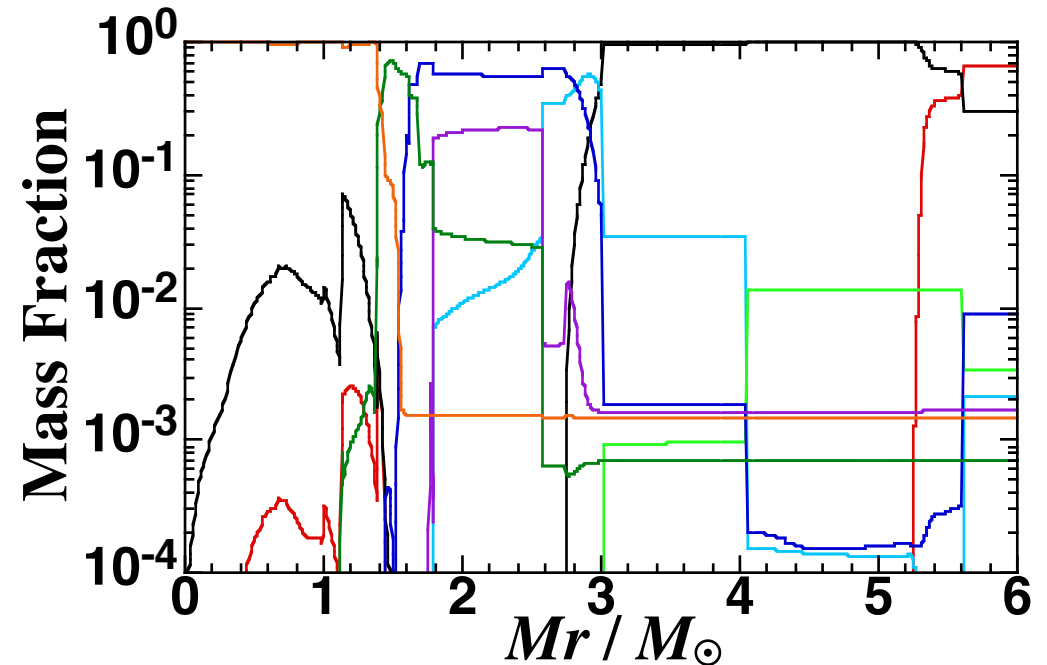


$$M_f = 12.6 M_{\odot}$$

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

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

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

# 大質量星モデルの違い

---

- 対流領域の扱い

- **Schwartzschild**条件

$$\nabla_{\text{ad}} < \nabla_{\text{rad}} \quad \longrightarrow \quad \text{対流層}$$

- **Ledoux**条件

$$\nabla_{\text{ad}} < \nabla_{\text{rad}} + \frac{\varphi}{\delta} \nabla_{\mu} \quad \longrightarrow \quad \text{対流層}$$

- 対流条件が組成分布にも依存

# 大質量星進化モデル

- 大質量星進化モデル

(TY & Umeda 2011; Umeda, TY, Takahashi 2012; Takahashi, TY, Umeda 2013; TY, Okita, Umeda 2014; Takahashi, Umeda, TY 2014)

$$\frac{\partial P}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} - \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

$$\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} = \min(\nabla_{\text{ad}}, \nabla_{\text{rad}})$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \epsilon_{\text{nucl}} - \epsilon_{\nu} + \epsilon_{\text{grav}}$$

- 元素合成とエネルギー生成

➡ 300核種( $n, \text{H} - \text{Br}$ ), 対流混合を拡散的に考慮

- 進化の途中での質量放出を考慮

- 初期組成 ➡ 太陽系元素存在度 (Anders & Grevesse 1989)



# 大質量星におけるニュートリノ生成過程

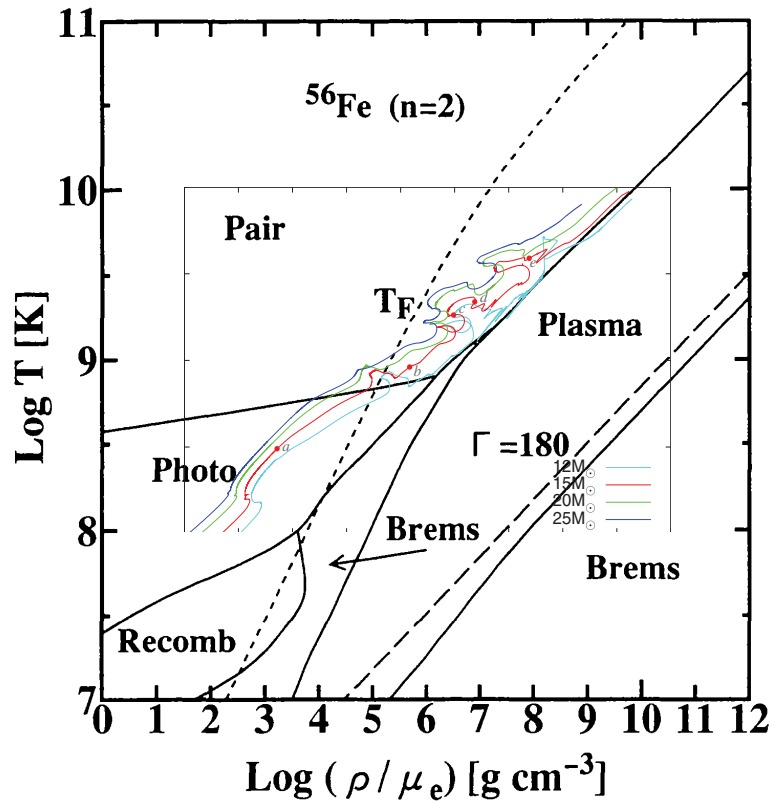


FIG. 13.—Same as Fig. 13, in the case of  $^{56}\text{Fe}$  matter

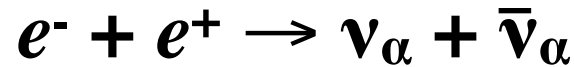
主要なエネルギー放出過程

(Itoh et al. 1996)

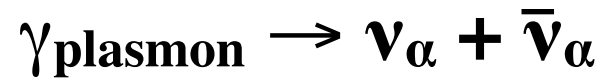
大質量星の進化経路

(Umeda, TY, Takahashi 2012)

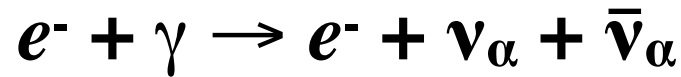
- **pair neutrinos**



- **plasma neutrinos**



- **photo neutrinos**

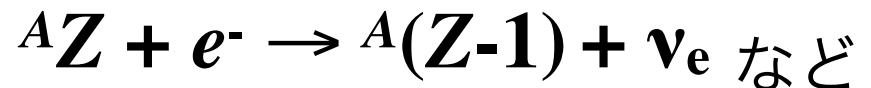


- **Bremsstrahlung neutrinos**



- **recombination neutrinos**

- **weak interactions**



# Neutrinoで探る超新星progenitor

- 星の質量, 距離などに対するニュートリノ検出数の依存性

➡ 15, 17, 20, 40  $M_{\odot}$  modelなど

- ベテルギウス ➡  $d = 197.2 \pm 44.9$  pc  
 $\log L/L_{\odot} = 5.12$  @ 200 pc  
(Harper et al. 2008)

$M_{\text{MS}} \sim 17 M_{\odot}$

- アンタレス ➡  $d = 180 \pm 15\%$  pc  
 $\log L/L_{\odot} = 4.76 \pm 0.12$   
 $M_{\text{MS}} \sim 12 M_{\odot}$  (Schröder & Cunz 2007)

- $\gamma^2$  Velorum  
(binary) ➡  $d = 336 +8, -7$  pc (North et al. 2007)  
 $d = 368 +38, -13$  pc (Millour et al. 2007)  
 $M_{\text{WR}} = 9.0 \pm 0.6 M_{\odot}$  (North et al. 2007)

# 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?

**TABLE 3.** Signals for selected neutrino detectors from Betelgeuse. Detection prospects are very good in this case, but mainly during during last 3 hours before core-collapse. Earlier detection will be possible in the GADZOOKS!, due to large target mass and detection of  $\sim 2$  MeV neutrinos using Gd-doped neutron tagging. Of course, any larger and more advanced detector will perform better, cf. next table.

Detector	Target mass	Min. $\bar{\nu}_e$ energy	Events 48-24 hours before collapse	Events 24-0 hours before collapse	Events 3-0 hours before collapse
Super-K	32 kt	5 MeV	0.6	173	158
GADZOOKS!	22.5 kt	3.8(1.8) MeV	9 (204)	442 (1883)	345 (1130)
Borexino	0.3 kt	2 MeV	2	22	13
KamLAND	1 kt	2 MeV	11	108	65

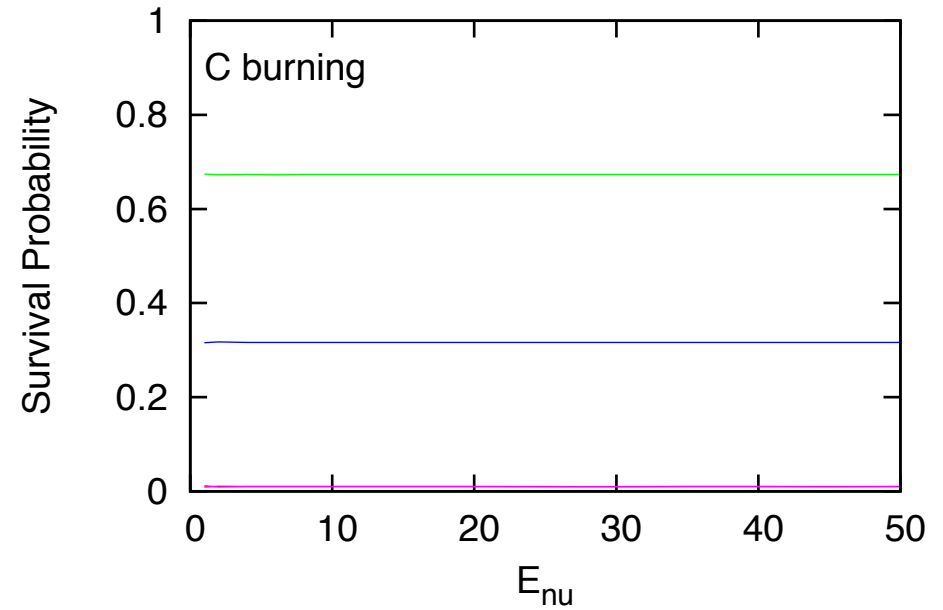
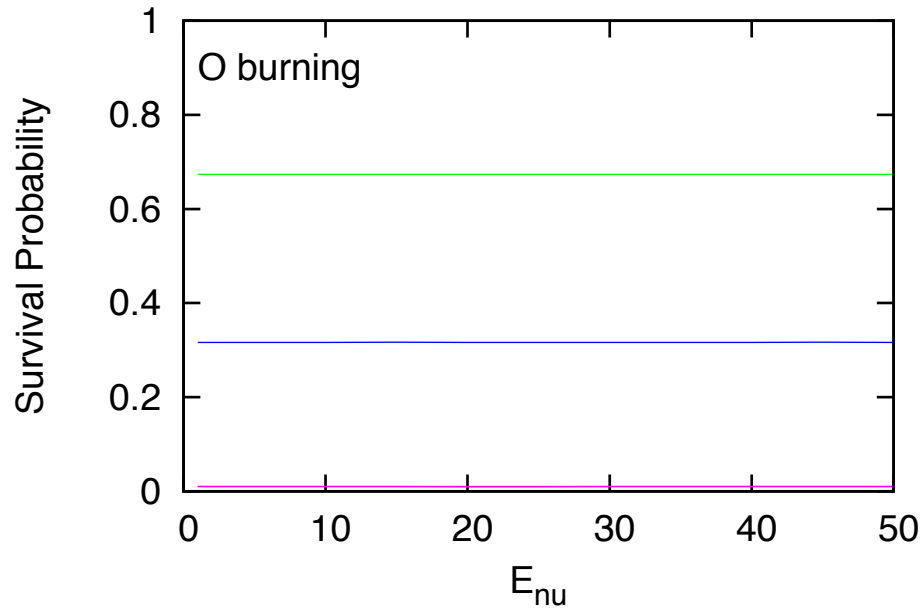
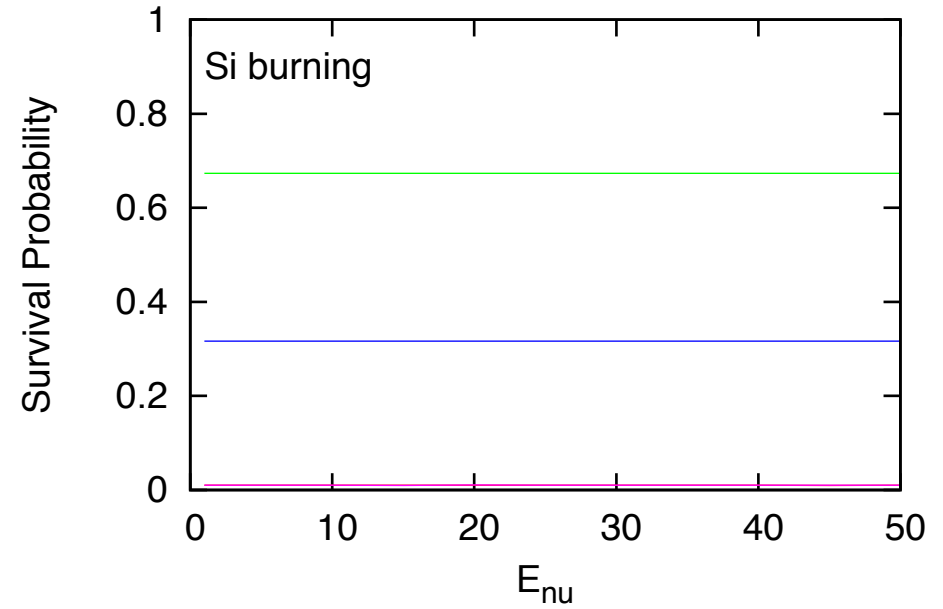
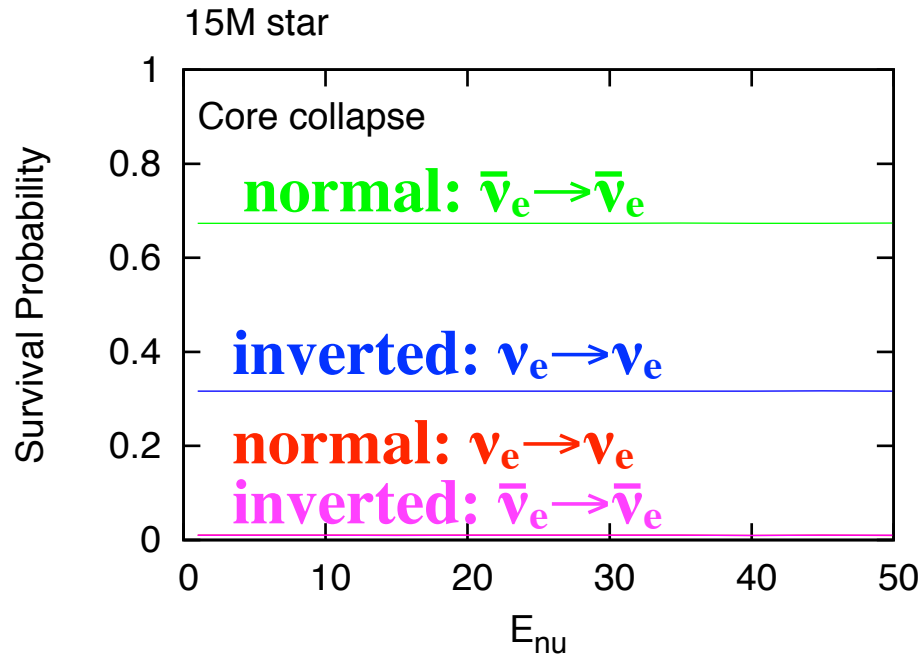
**5**

**46**

**27**

**130pcを仮定: 200pcだと0.42倍になる**

# ニュートリノ振動の効果



# Neutrinoで探る超新星progenitor

---

- ニュートリノ検出時期, 検出数

➡ Si燃焼を反映

- ほ座 $\gamma^2$ (WR星)

$d \sim 350$  pc

$M_{\text{MS}} \sim 40 M_{\odot}$

ベテルギウス

$d \sim 200$  pc

$M_{\text{MS}} \sim 17 M_{\odot}$

アンタレス

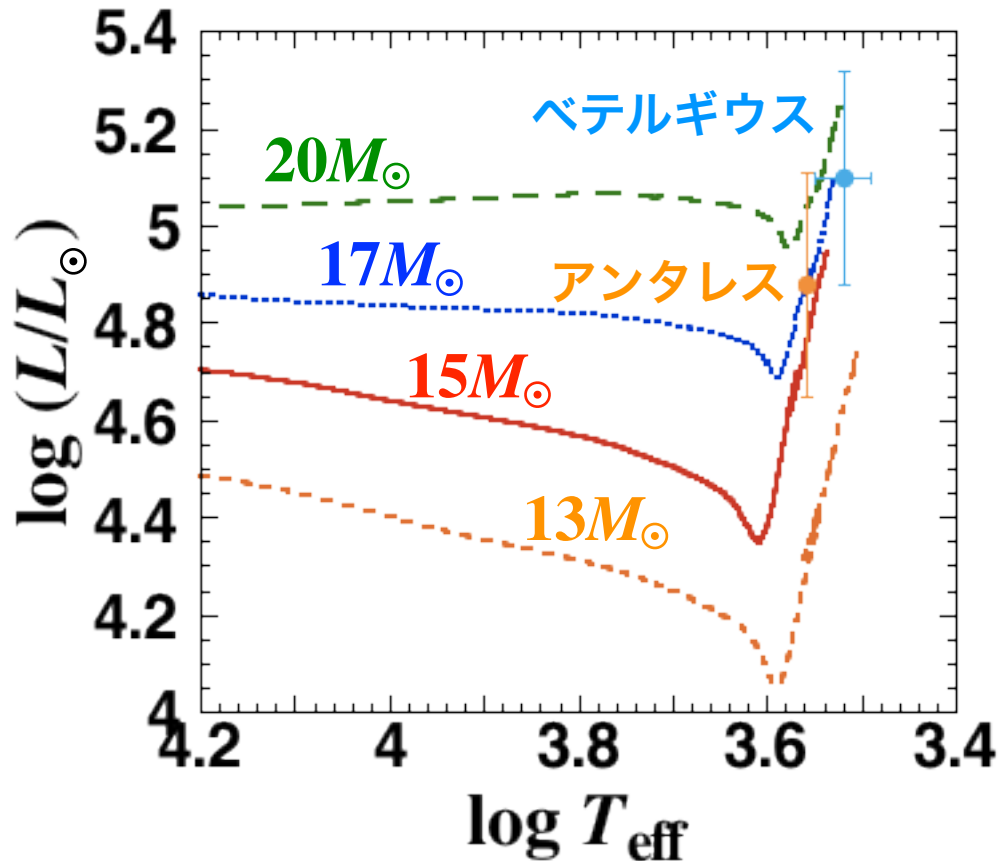
$d \sim 180$  pc

$M_{\text{MS}} \sim 13 M_{\odot}$

---

# 星の不定性による影響

- 距離の不定性 → 星の質量の不定性



- ベテルギウス

→  $d = 197 \pm 45 \text{ pc}$

$\log L/L_{\odot} = 5.10 \pm 0.22$

(Harper et al. 2008)

→  $M_{\text{MS}} \sim 14 - 21 M_{\odot}$

- 精度の高い距離測定が望ましい

- 星の質量に対する前兆neutrinoの依存性も重要