

超新星前兆ニュートリノ : 星の質量と対流条件に対する依存性

吉田 敬¹

高橋 亘², 梅田 秀之¹, 石徹白 晃治³

¹東大天文

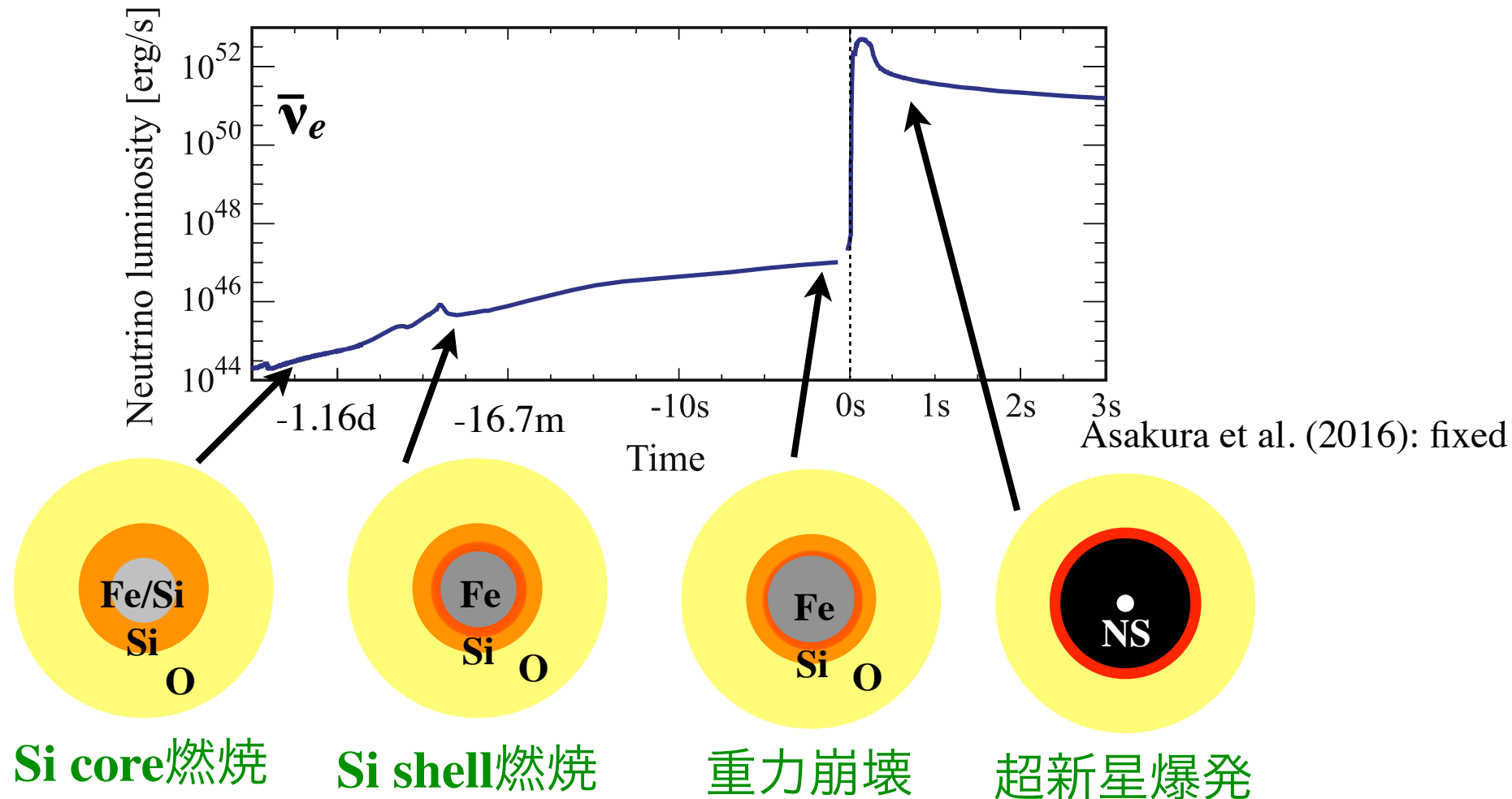
²ボン大学

³東北大ニュートリノセンター

新学術「地下素核研究」第5回超新星ニュートリノ研究会

2019年1月7日 国立天文台

超新星爆発前のニュートリノ

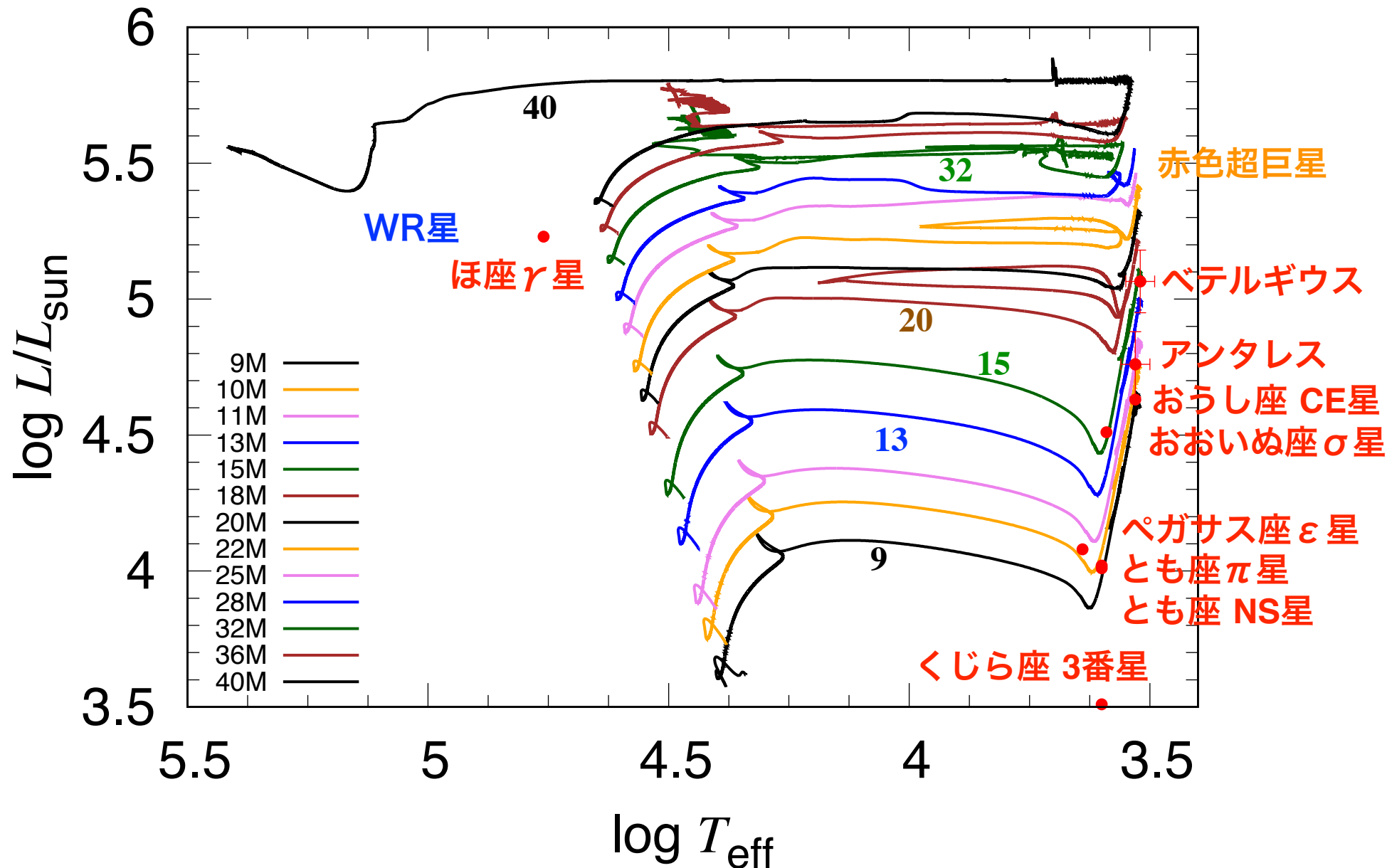


- 近傍超新星(数100pc)での前兆ニュートリノの観測可能性

(Recent studies: Kato et al. 2015, 2017; Asakura et al. 2016; Yoshida et al. 2016; Patton et al. 2016, 2017)

- 前兆ニュートリノを用いた超新星警報 (Asakura et al. 2016; Yoshida et al. 2016)

近傍にある超新星候補天体



● 初期質量 $\sim 30M_{\odot}$ までの星が近傍に存在

大質量星の進化計算

- **HO**ngo **S**tellar **H**ydrodynamics **I**nvestigator (**HOSHI**) code
(e.g., Takahashi et al. 2016, 2018)
- Yoshida et al. (2016)からの変更点
 - RSGでの質量放出率
 - 対流(overshoot)の扱い
 - pair neutrino過程によるニュートリノ生成の温度, 密度範囲の拡張
- **9 - $40M_{\odot}$, $Z = 0.014$ ($Z_{\odot}$)の大質量星の進化を計算**
9-28 ($1 M_{\odot}$ 刻み), 30, 32, 35, 38, 40 $M_{\odot}$
 **25 models** (Yoshida et al. 2019, in prep.)

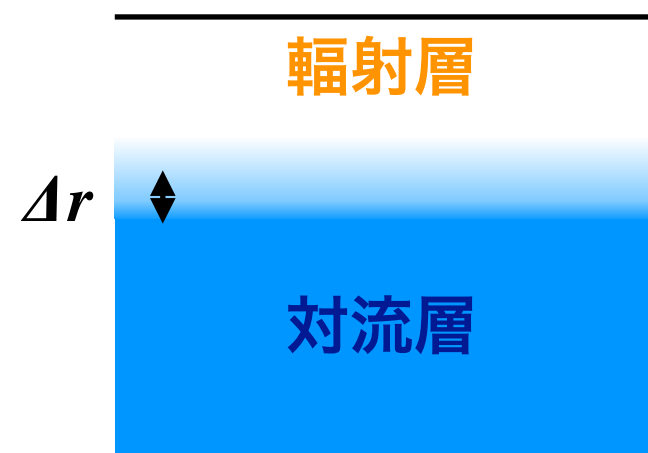
大質量星の進化計算

- **H**Ongo **S**tellar **H**ydrodynamics **I**nvestigator (**HOSHI**) code

- overshoot

➡ 対流領域の境界の少し外まで混合
観測で決まるが不定性がある
He, COコアの質量に影響

$$D_{\text{cv}}^{\text{ov}} = D_{\text{cv},0} \exp\left(-2 \frac{\Delta r}{f_{\text{ov}} H_{P0}}\right)$$



- overshoot parameter f_{ov}

He燃焼まで ➡ $f_{\text{ov}} = 0.030$ (model L), 0.010 (model M)

model L ... B-type stars in **L**MC (Brott et al. 2011)

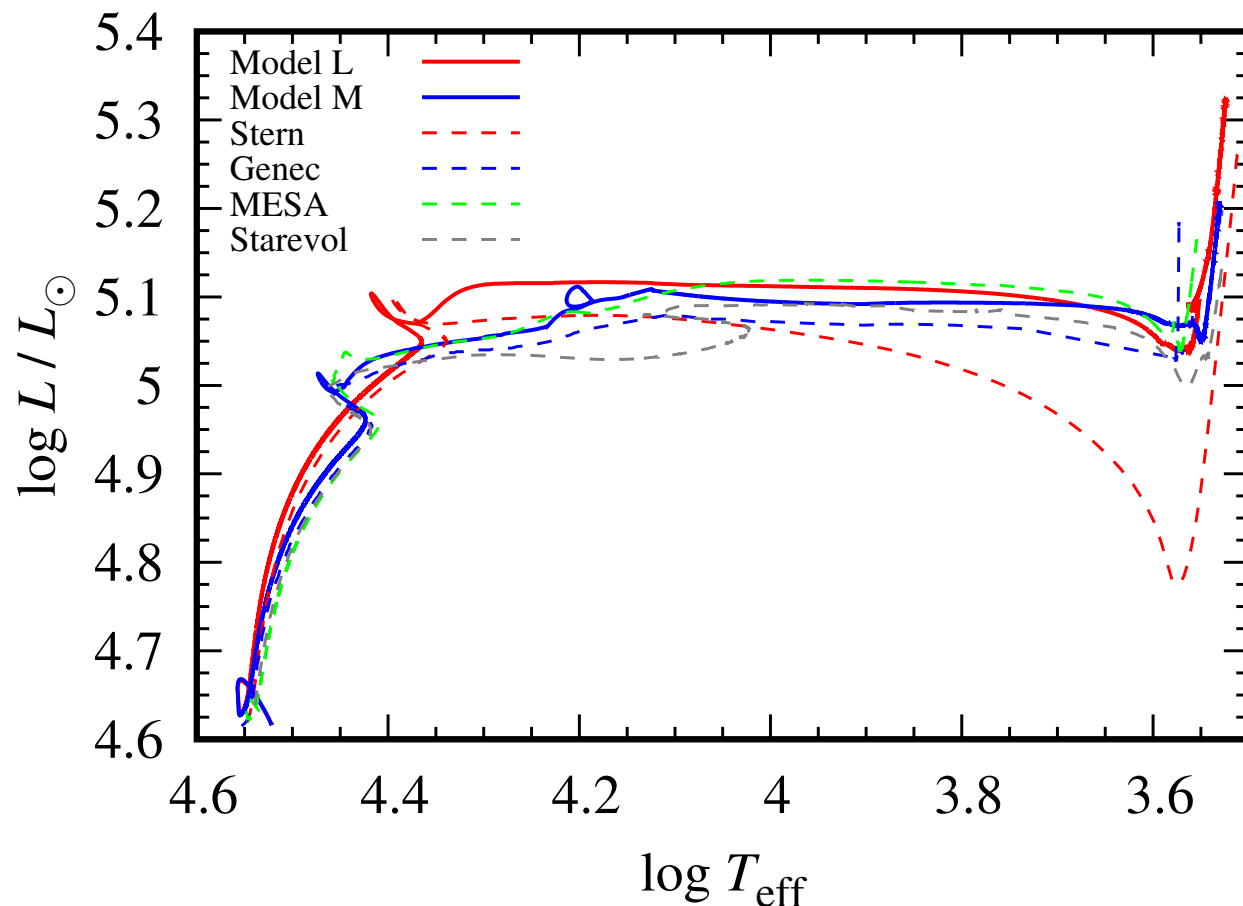
model M ... AB-type stars in **M**ilky Way Galaxy (Maeder & Meynet 1989)

He燃焼以降 ➡ $f_{\text{ov}} = 0.002$ (model ov,c), 0.000

➡ models $L_{\text{ov,c}}$, L, $M_{\text{ov,c}}$, M の4通り (Yoshida et al. 2019, in prep.)

大質量星の進化計算

● $20 M_{\odot}$ モデルのHR図と他の進化モデルとの比較



Stern: Brott et al. (2011)
Bonn

Genec: Ekström et al. (2012)
Geneva

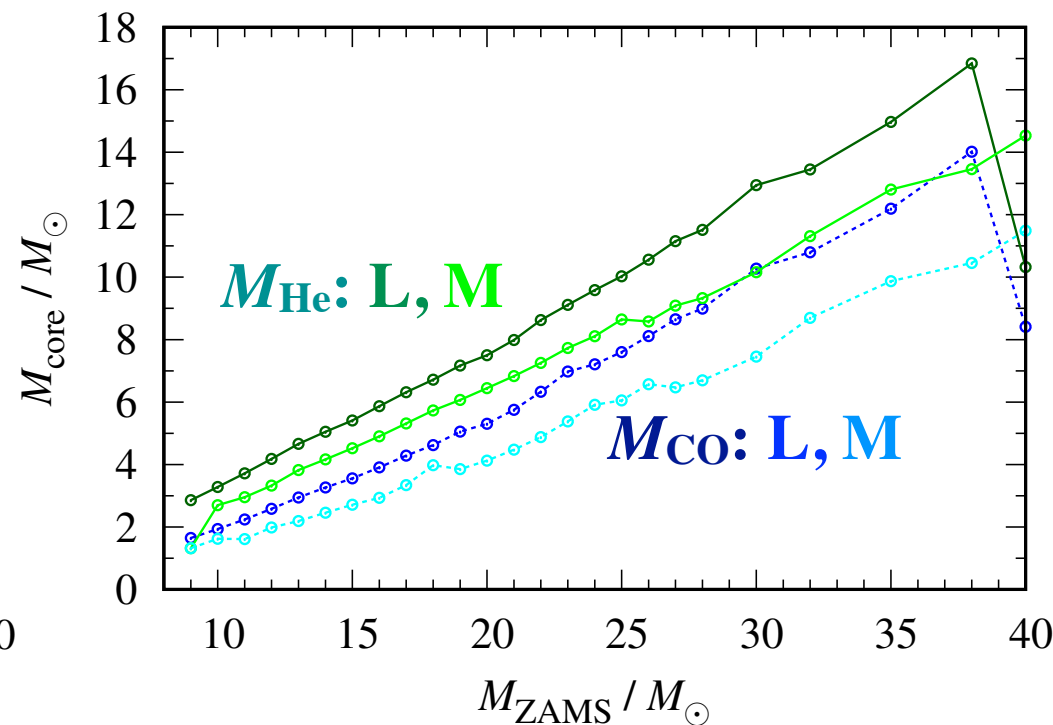
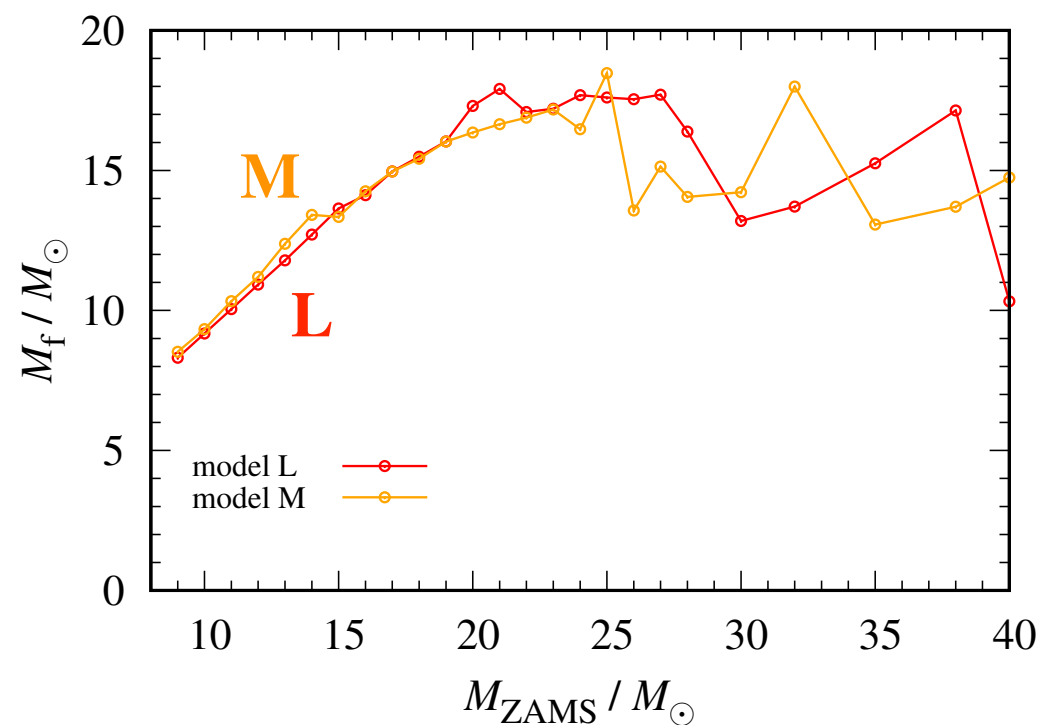
MESA: Paxton et al. (2010);
Starevol: Decressin et al. (2009)
Brussels

● H 燃焼終了時の L, T_{eff} 進化

➡ **model L** … **Stern** に近い
model M … **Genec** に近い

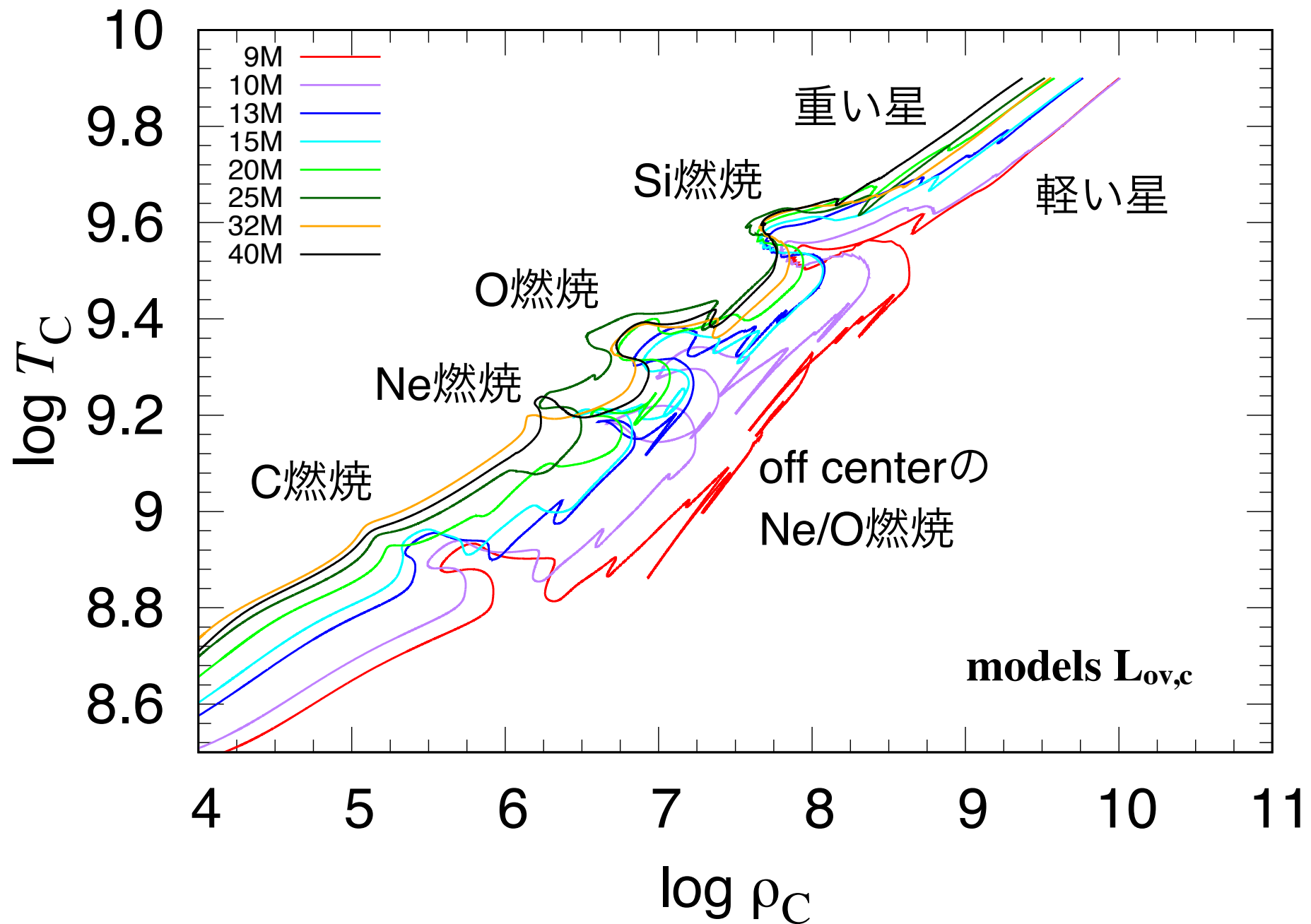
超新星爆発直前の星の性質

● 爆発直前の星の質量とHe, COコア質量



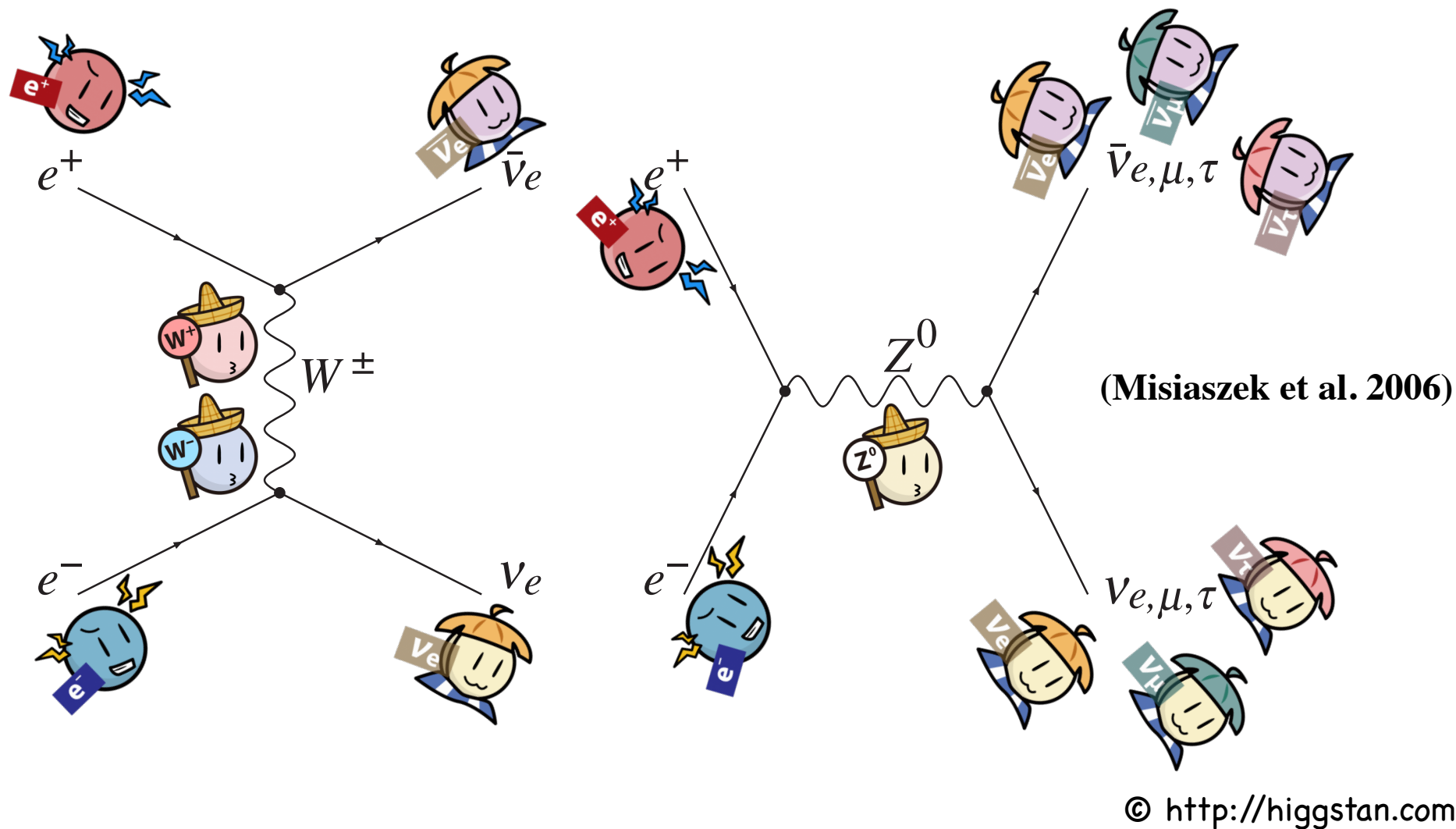
- $M_{ZAMS} < 20 M_\odot$ ➡ model L と M であまり違いはない
- $M_{ZAMS} > 30$ (35) $M_\odot$ for models L (M) ➡ Wolf-Rayet星に進化
- M_{He}, M_{CO} ➡ 同じ初期質量ではmodel L が model M より大きい

大質量星の質量による進化の違い



Pair neutrino process

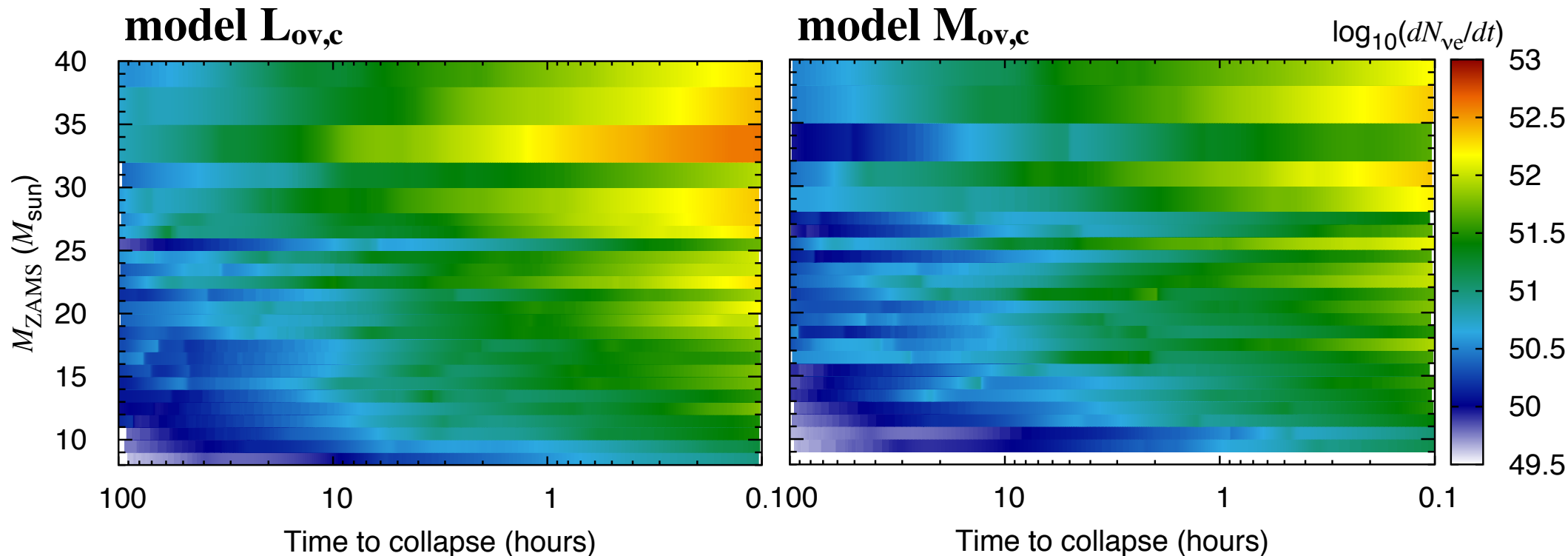
- pair neutrino processによるニュートリノ放出 (e.g., Yakovlev et al. 2001)



- Yoshida et al. (2016)と同様の方法でニュートリノスペクトルを計算

ニュートリノ放出率

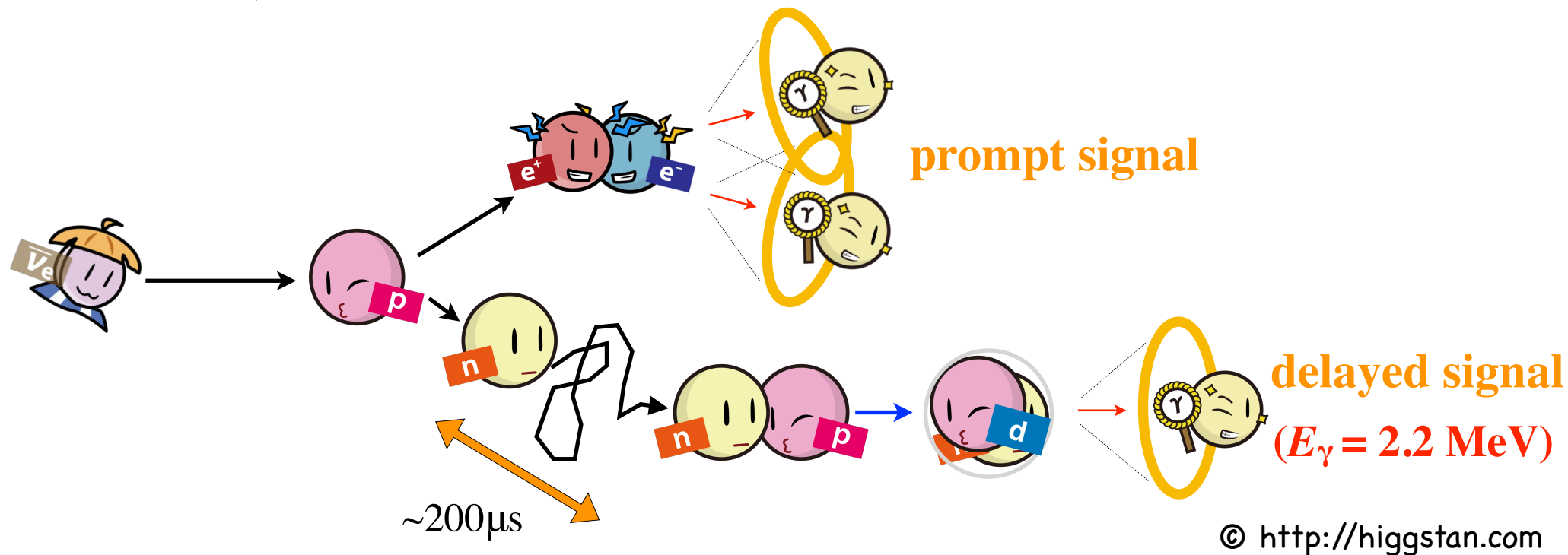
- **models $L_{\text{ov,c}}$, $M_{\text{ov,c}}$** の星からの超新星前兆ニュートリノ ν_e の放出率



- 重い質量の星の方がニュートリノを多く出す傾向
ただし、ばらつきは大きい
- **models L** の方が相対的に軽い質量の星でニュートリノが多く出る

超新星前兆ニュートリノの検出

KamLAND, JUNO



- $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+ (E_{\text{th},\nu} = 1.8 \text{ MeV})$

$$n + p \rightarrow d + \gamma (2.2 \text{ MeV})$$

- prompt γ と delayed γ から $\bar{\nu}_e$ を検出

➡ Threshold energy は **1.8 MeV**

超新星前兆ニュートリノ観測の予測

- $d = 200\text{pc}$ (ベテルギウスの距離)を仮定

- **KamLAND**

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

$$\text{検出効率 } (\epsilon_S = 0.64; \epsilon_{\text{live}} = 0.903) \\ \text{(Asakura et al. 2016)}$$

- **JUNO**

$$N_p = 1.18 \times 10^{33}$$

検出効率は考慮せず

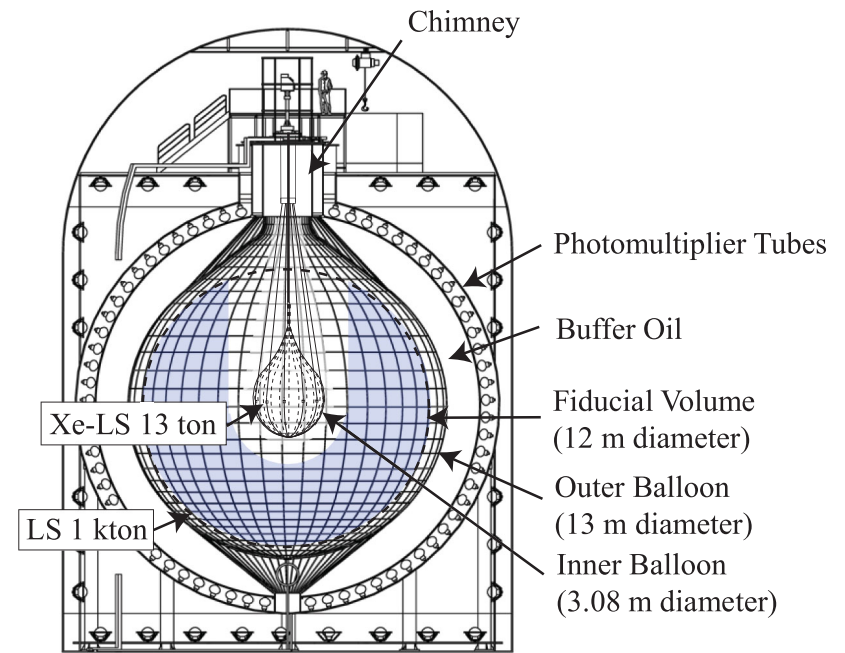
- MSW効果 (normal, inverted)

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

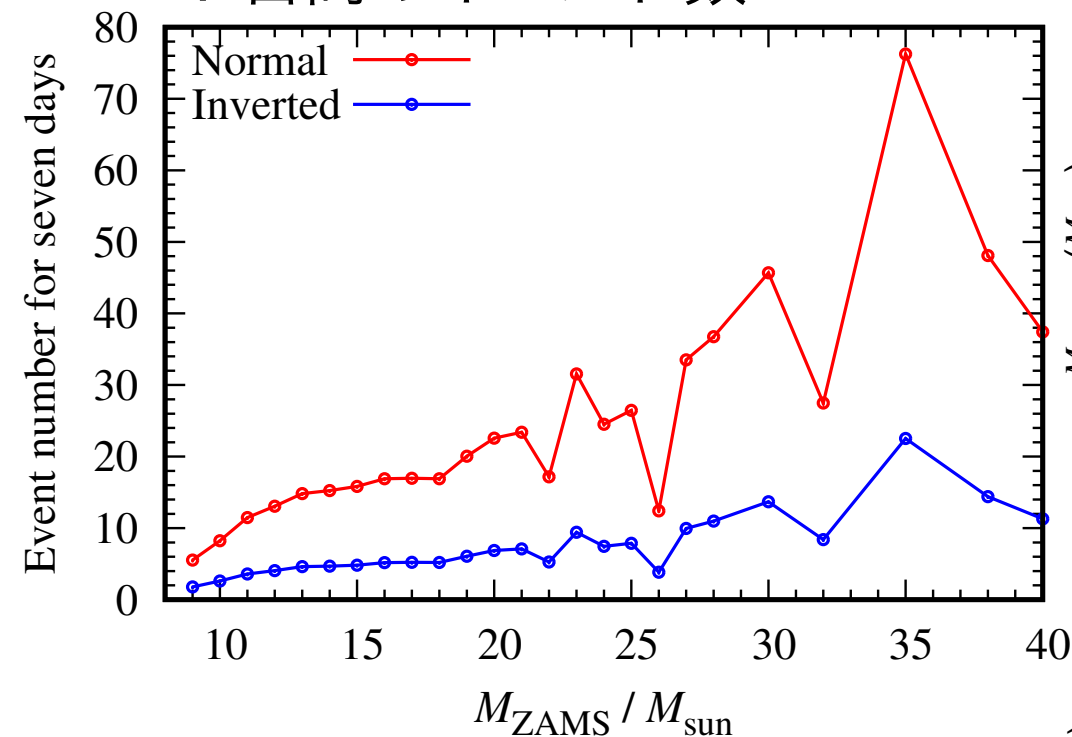


(Gando et al. 2013)

KamLANDイベント数の予測

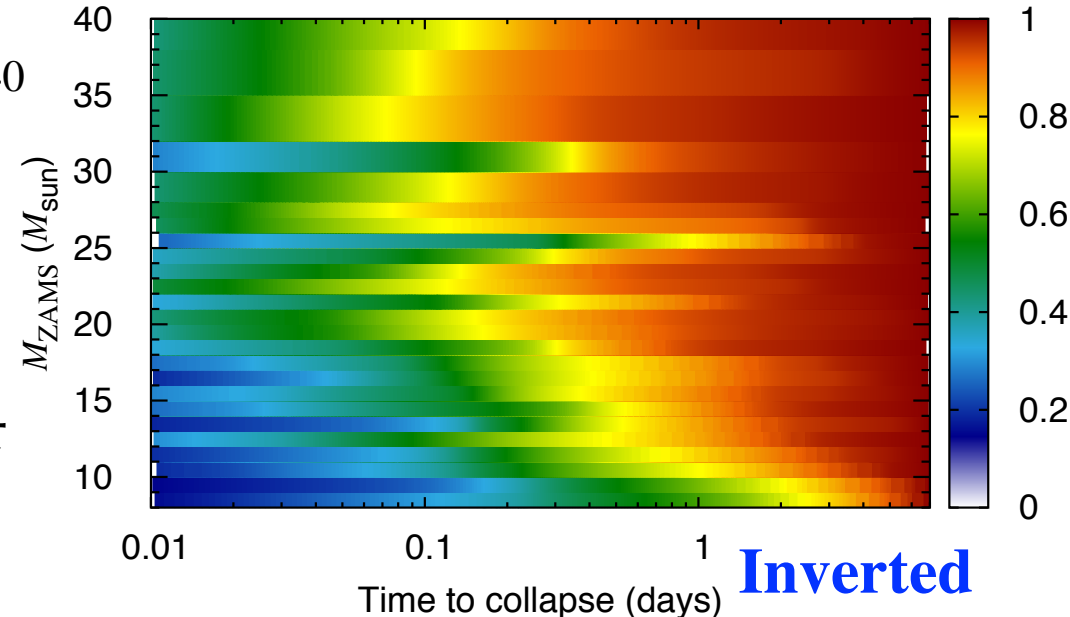
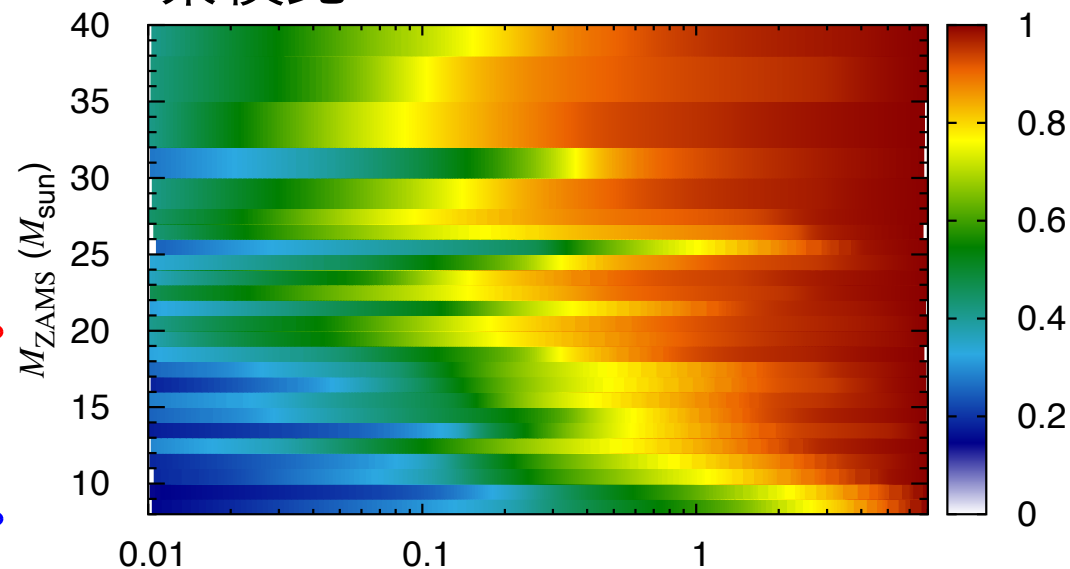
models Lov,c

7日間のイベント数



累積比

Normal



$M < 20 M_{\odot}$ stars

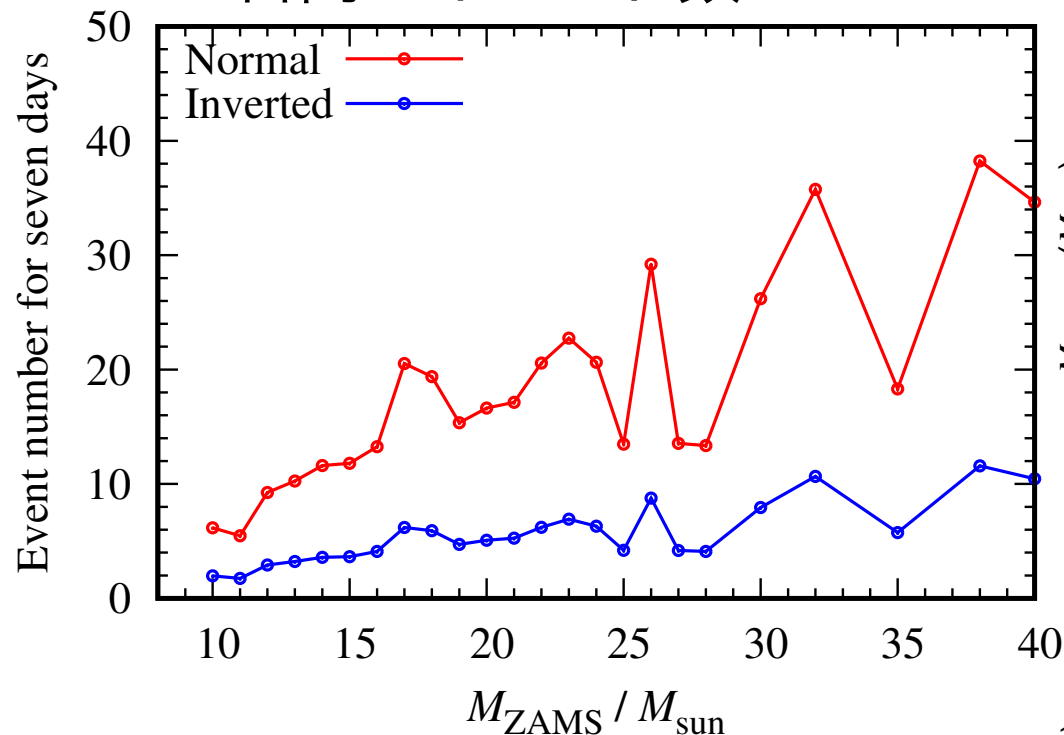
➡ おおよそ20 event以下

● Inverted ➡ Normalの半分以下

KamLANDイベント数の予測

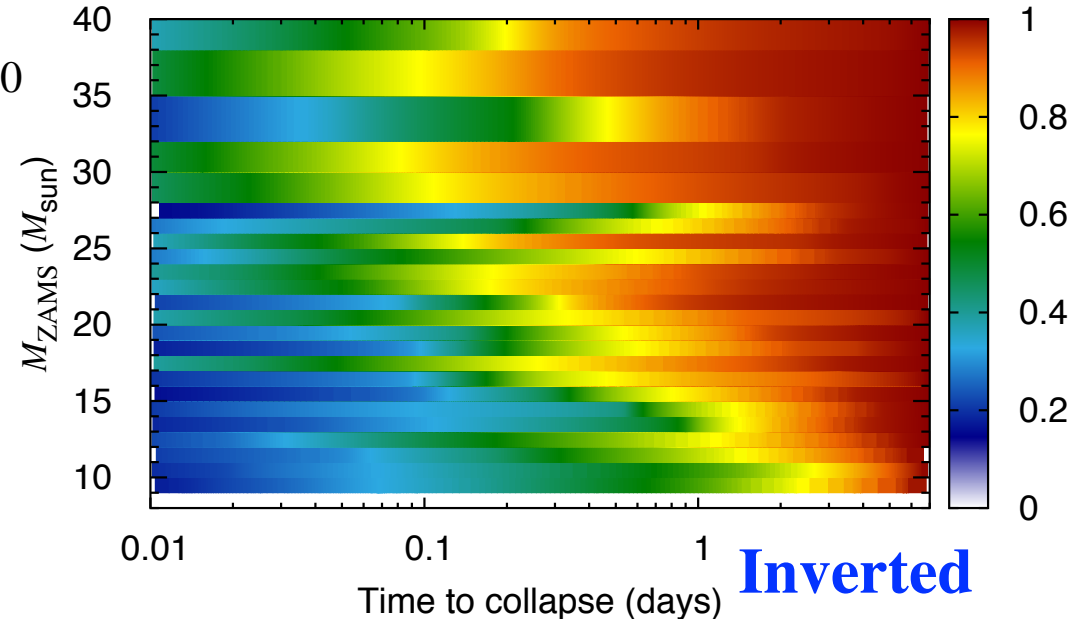
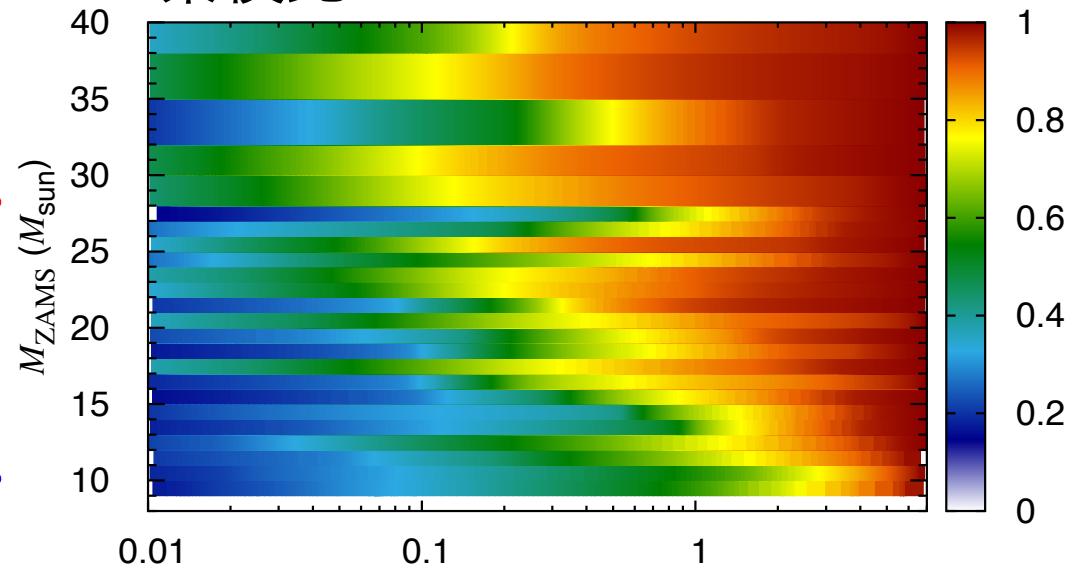
● models Mov,c

7日間のイベント数



累積比

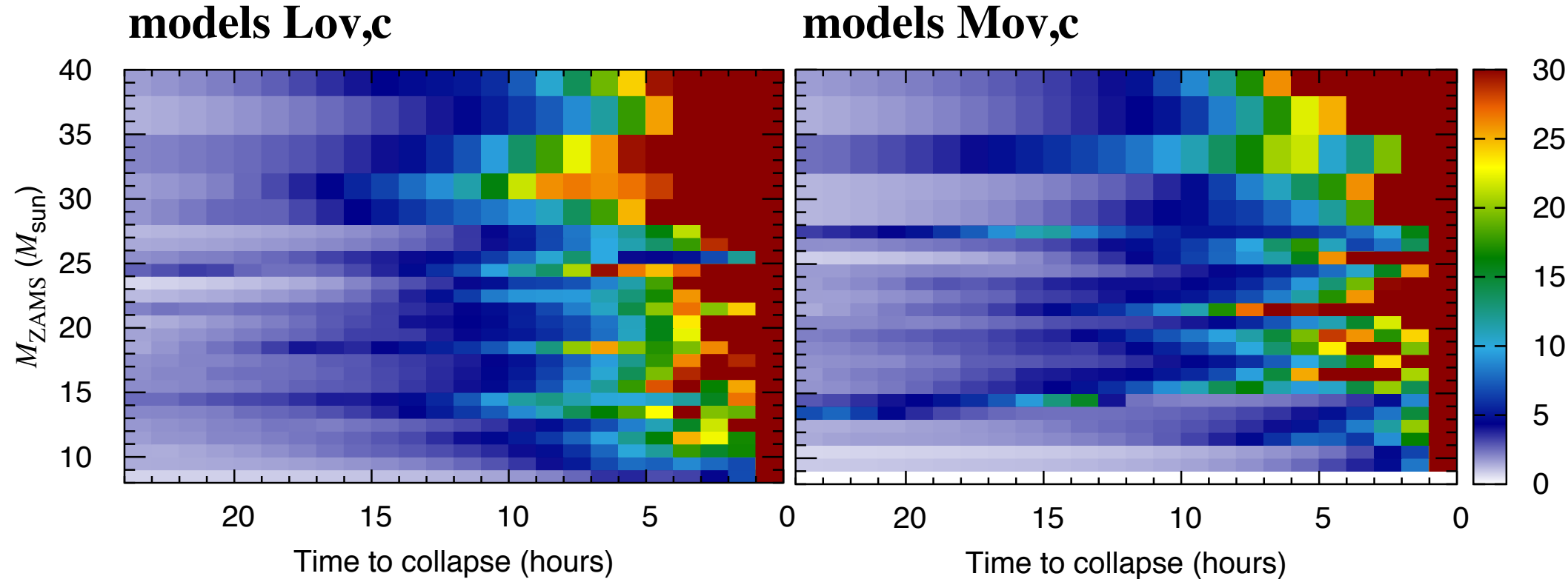
Normal



● 少し重いmodels L_{ov,c} (L)と 同じような傾向...

JUNOでの1時間あたりイベント数

- 爆発前24時間の1時間あたりイベント数 (**Normal mass ordering**)



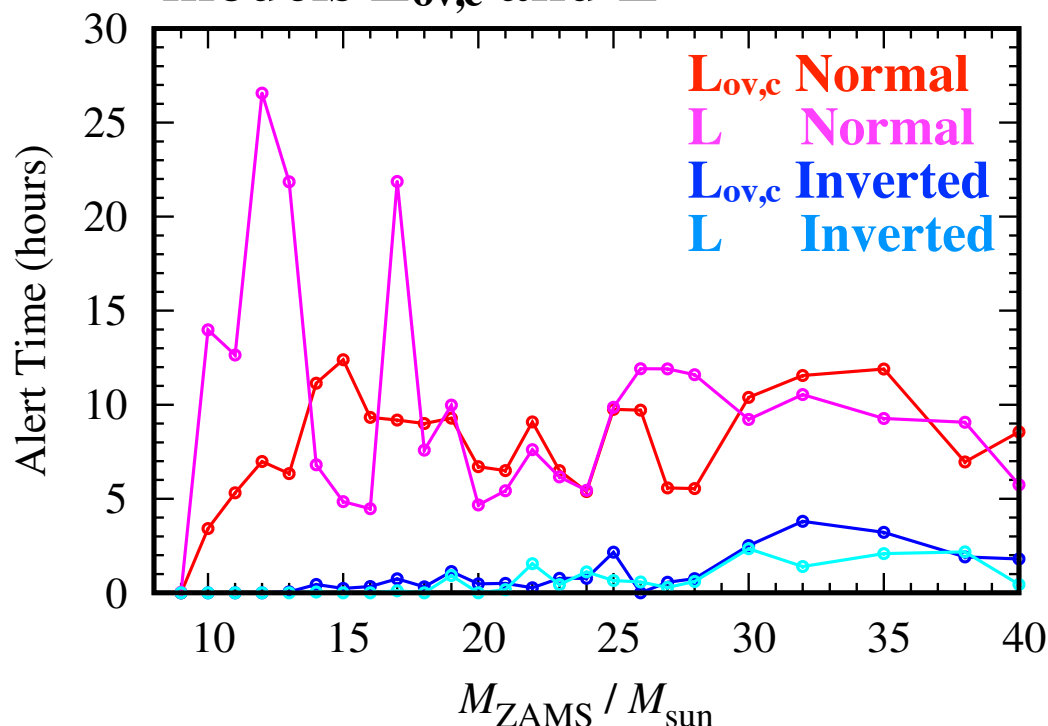
- 時間とともにイベントは増加
- 数時間~20時間前に一時的なイベントの減少
➡ O, Si shell 燃焼の影響

SN Alert by KamLAND

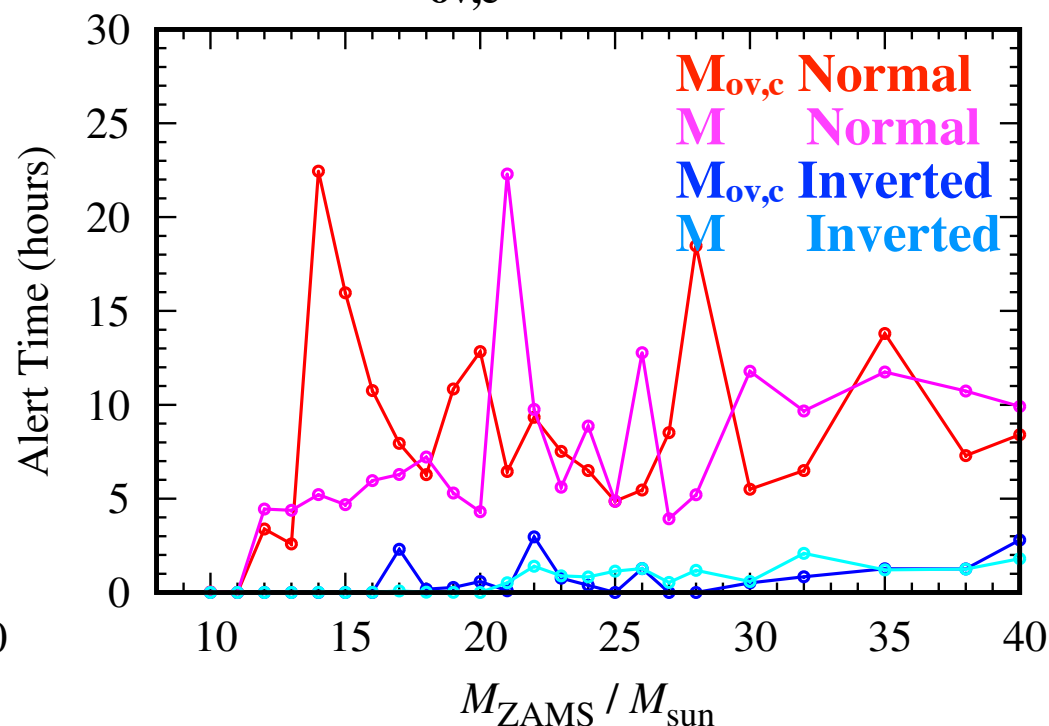
- 48時間 3 イベント ➡ low background で 3.7σ significance

(From background estimation in Asakura et al. 2016)

models $L_{\text{ov},c}$ and L



models $M_{\text{ov},c}$ and M



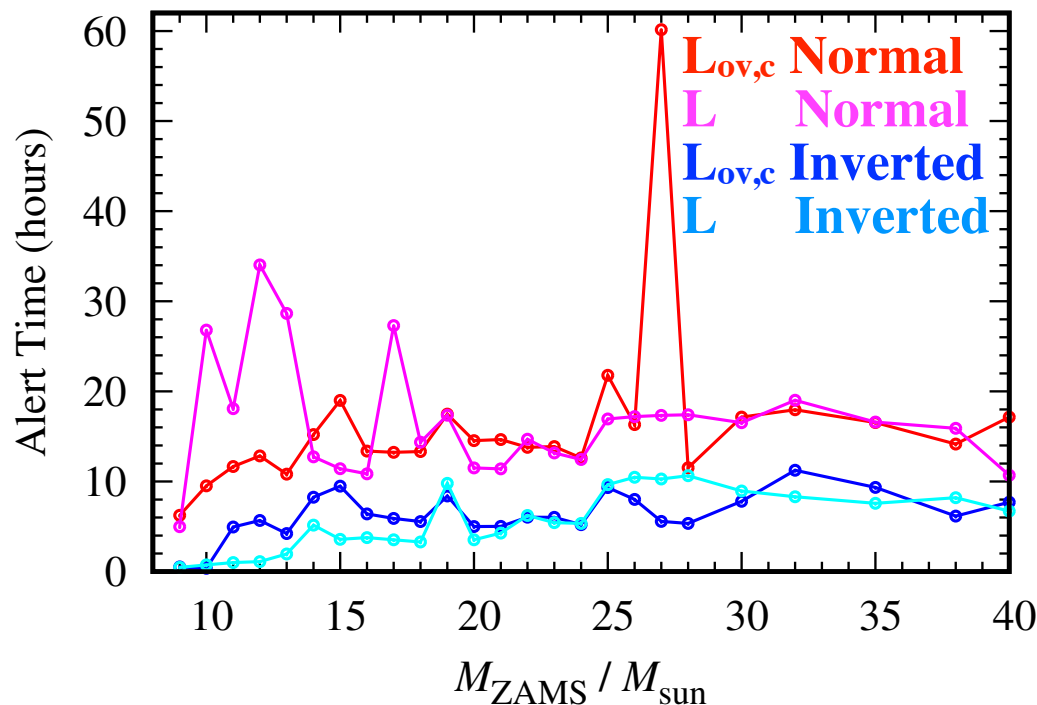
- Normal ordering ➡ 数時間~20数時間前
1 日前に出せる可能性はある
- Inverted ordering ➡ $M < 20 M_{\odot}$ では難しそう

SN Alert by JUNO

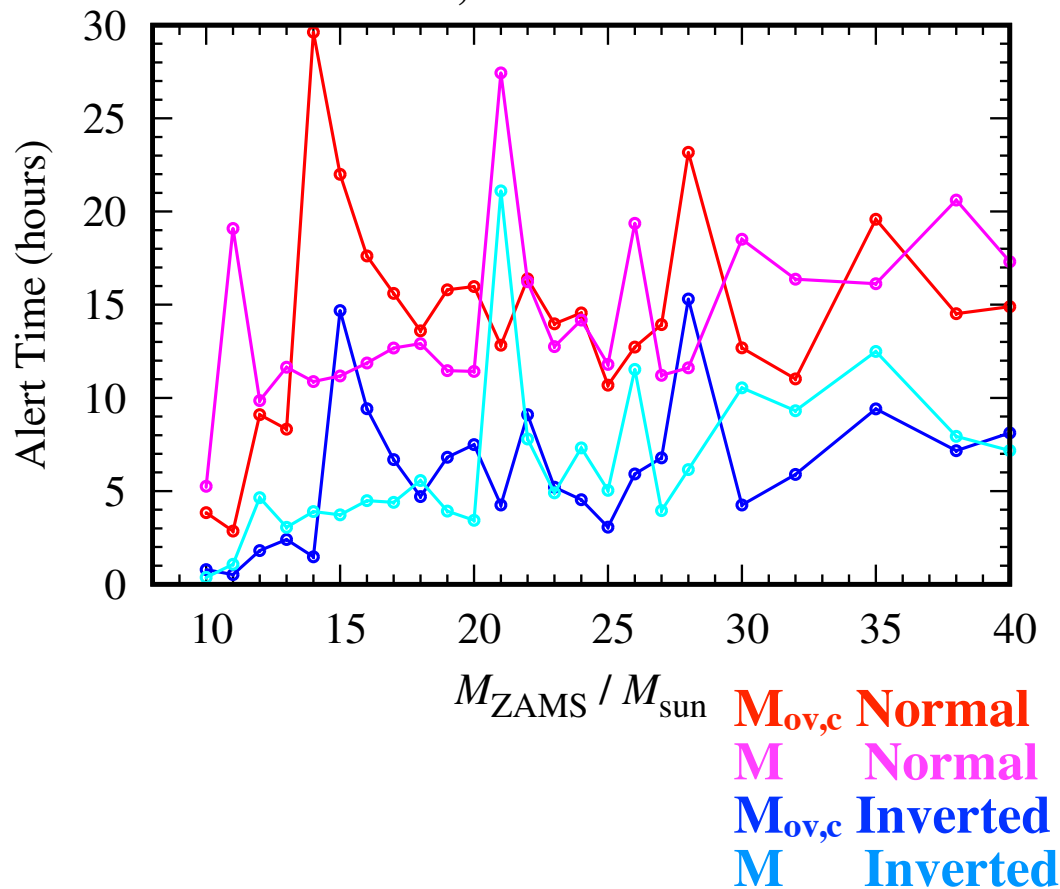
- 1 時間 3 イベント ➡ low background で $> 3\sigma$ significance

(From background estimation in An et al. 2016)

models $L_{\text{ov},c}$ and L



models $M_{\text{ov},c}$ and M



- Normal ordering ➡ 半日前くらいに出せる可能性がある

- Inverted ordering ➡ おおよそ数時間前

まとめ

- **9-40 $M_{\odot}$, $Z=0.014$ ($Z_{\odot}$)**の星から放出される超新星前兆ニュートリノ
 - 対流の混合領域の範囲の不定性を考慮した4種類のモデル
 - **Pair neutrino process**によるニュートリノ放出
- 超新星前兆ニュートリノのイベント数 ($d = 200\text{pc}$)
 - ➡ 大まかには大質量の星ほどイベント数が多い傾向

KamLAND

- $M < 20 M_{\odot}$ ➡ 爆発前1週間で **20 (normal), 8 (inverted)** 程度以下

JUNO

- 爆発の数~20時間前にイベント率の減少の観測可能性
 - ➡ **O, Si shell**燃焼の証拠

超新星alert

- **Normal ordering, low background**の場合
 - ➡ **KamLAND**: 数時間~20数時間前
 - JUNO**: 半日より前の可能性