

超新星前兆ニュートリノの星の質量に対する依存性

吉田 敬¹

高橋 亘¹, 梅田 秀之¹, 石徹白 晃治²

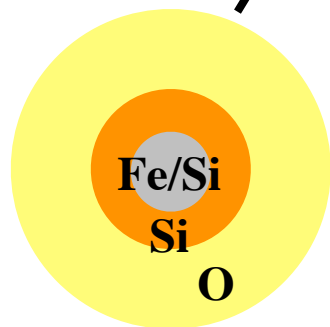
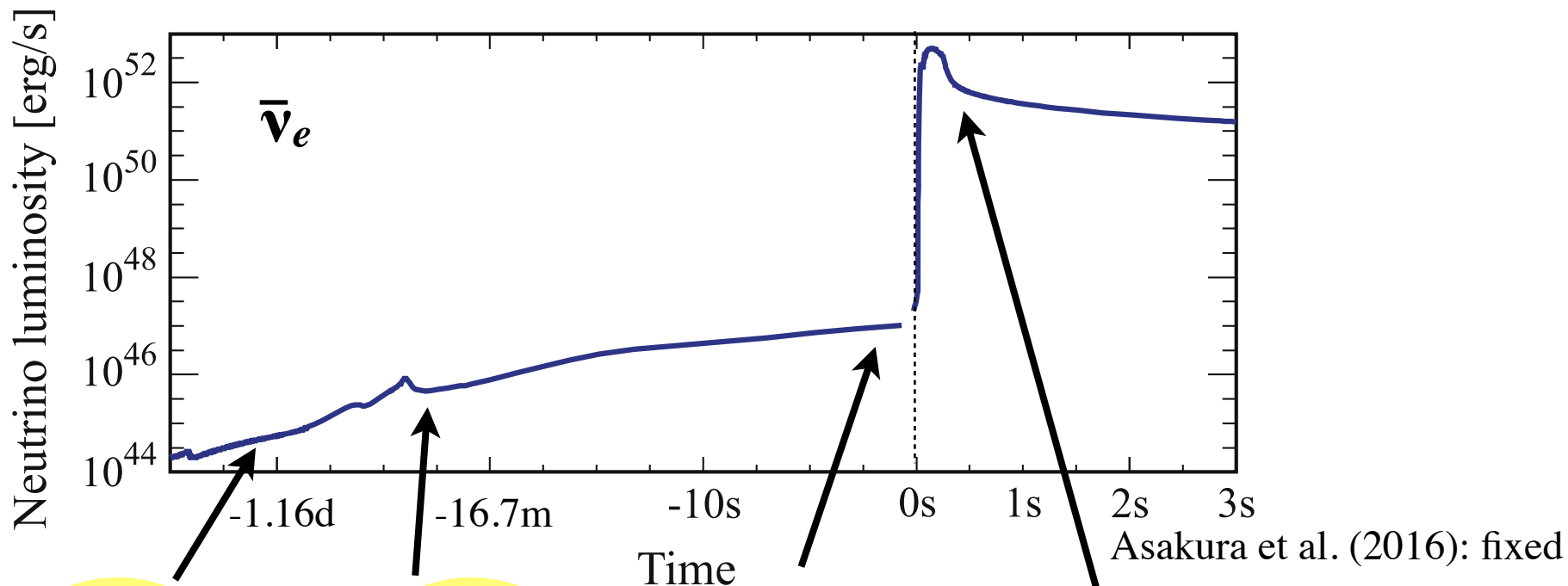
¹東大天文

²東北大ニュートリノセンター

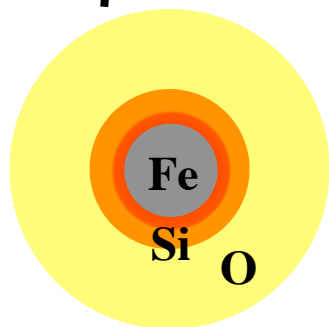
新学術「地下素核研究」第3回超新星ニュートリノ研究会

2017年3月5日 東北大学青葉山キャンパス

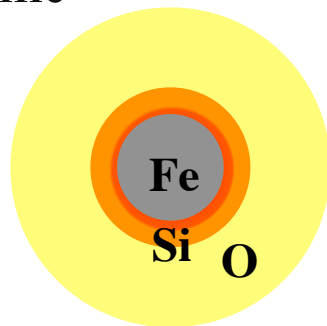
超新星爆発前のニュートリノ



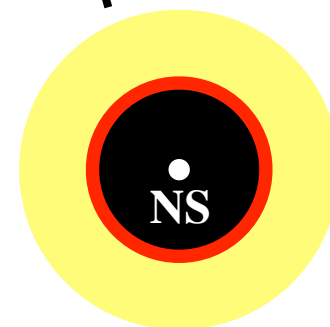
Si core 燃烧



Si shell 燃烧



重力崩壊



超新星爆発

- 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; Asakura et al. 2016; Yoshida et al. 2016)
- 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

- 太陽系近傍(数**100pc**)の進化した大質量星 (Asakura et al. 2016など)

アンタレス ~170pc

ベテルギウス ~200pc

ペガサス座 ϵ 星 ~210pc

とも座 π 星 ~250pc

ほ座 γ 星 ~340pc

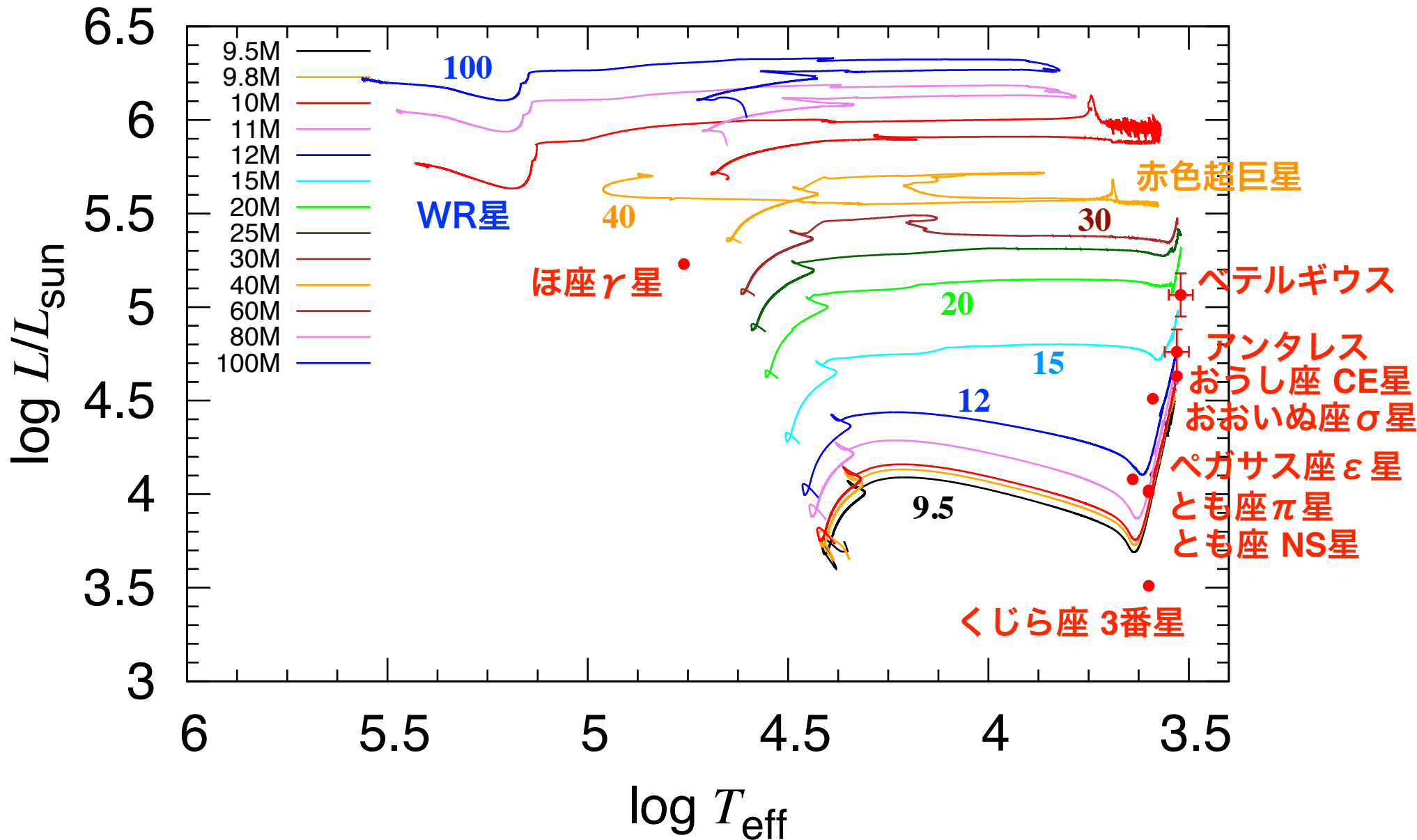
おおいぬ座 σ 星 ~340pc

とも座 NS星 ~520pc

おうし座 CE星 ~550pc

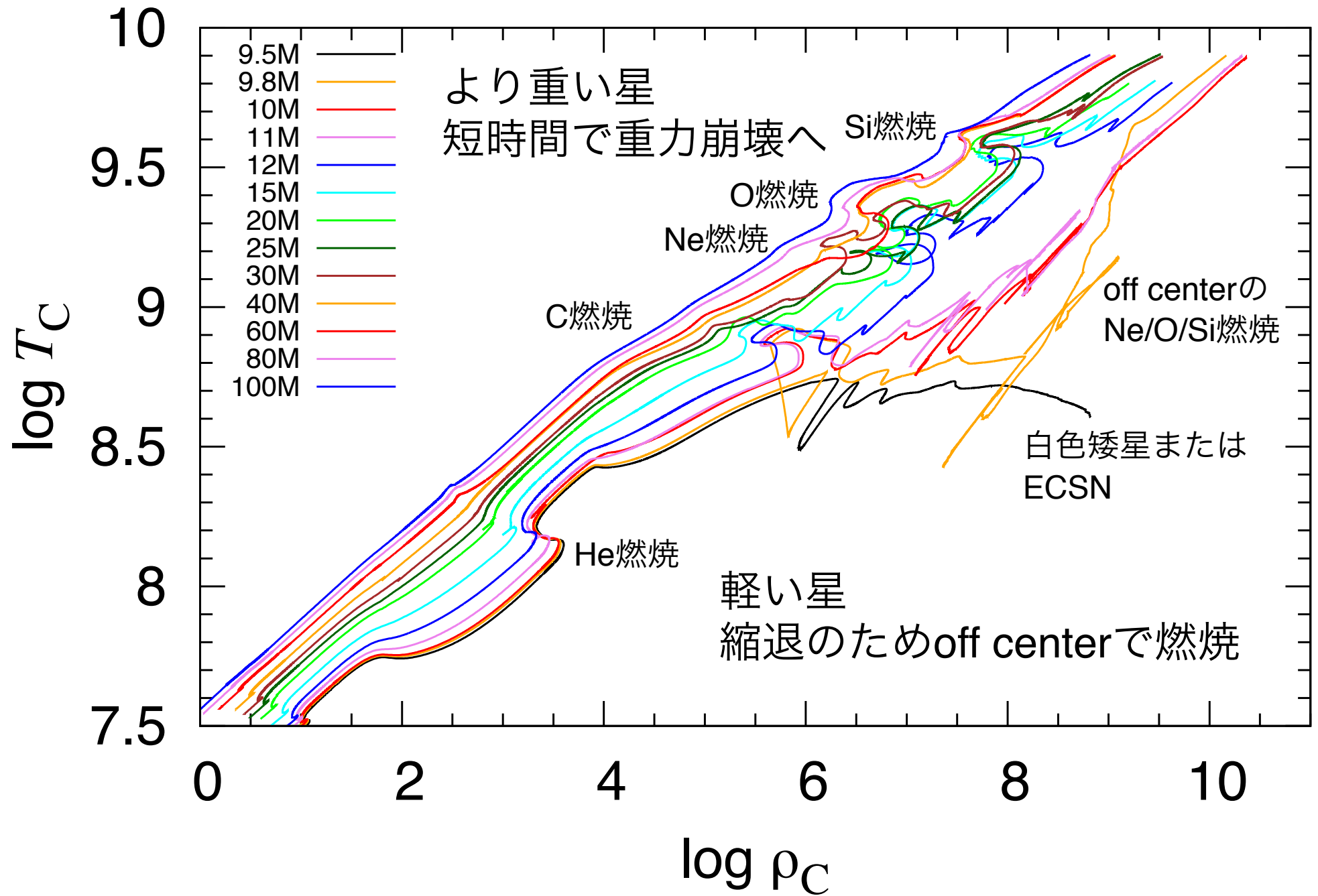
くじら座 3番星 ~640pc

近傍にある超新星候補天体

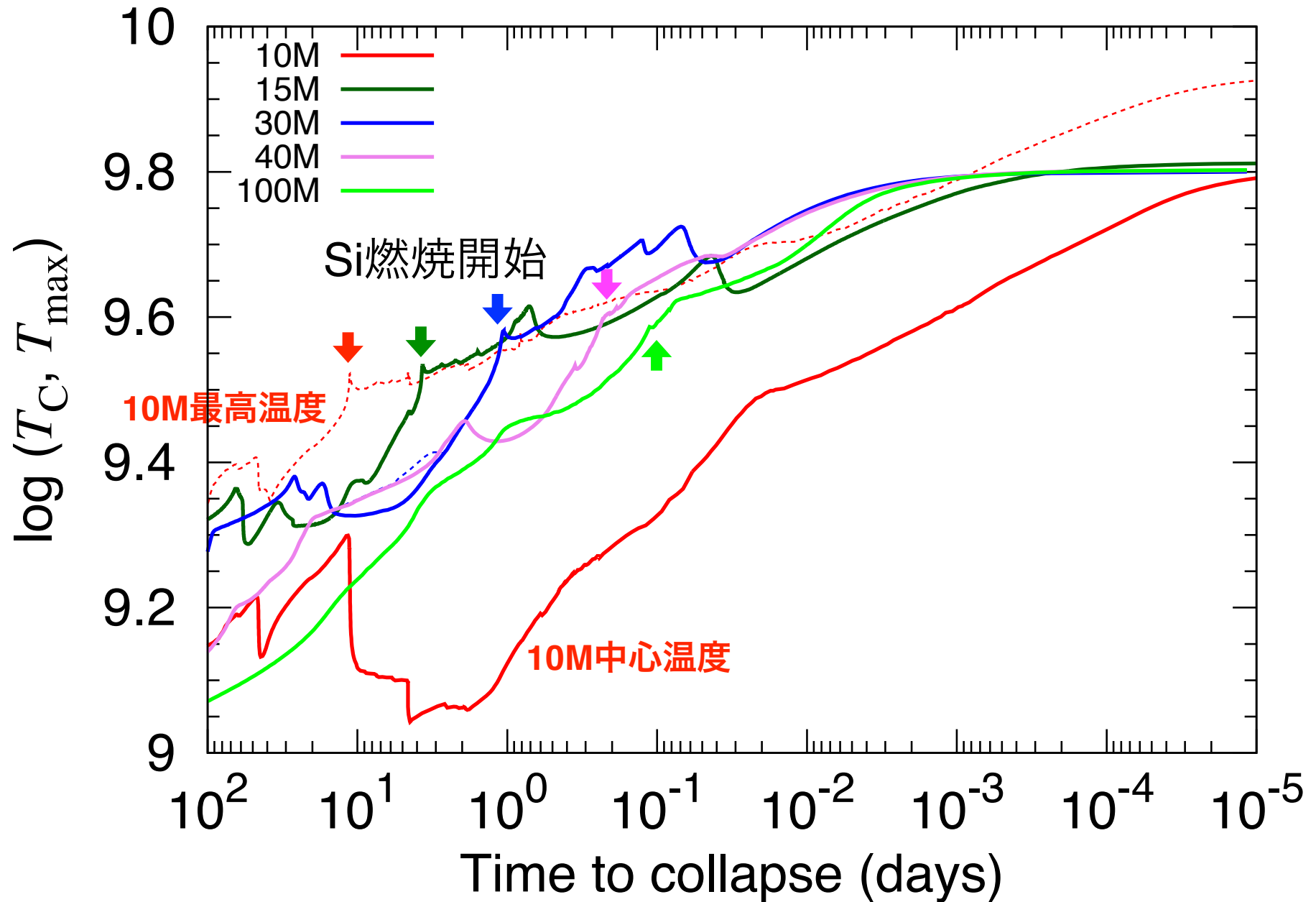


● 初期質量 $\sim 30M_{\odot}$ までの星が近傍に存在

大質量星の質量による進化の違い



大質量星の質量による進化の違い



● Si 燃焼の時間が星の質量に依存 ➡ 超新星前兆ニュートリノに影響

研究経過

- 広い初期質量範囲($9.8 - 100M_{\odot}$)の星から放出される超新星前兆ニュートリノについて調べる

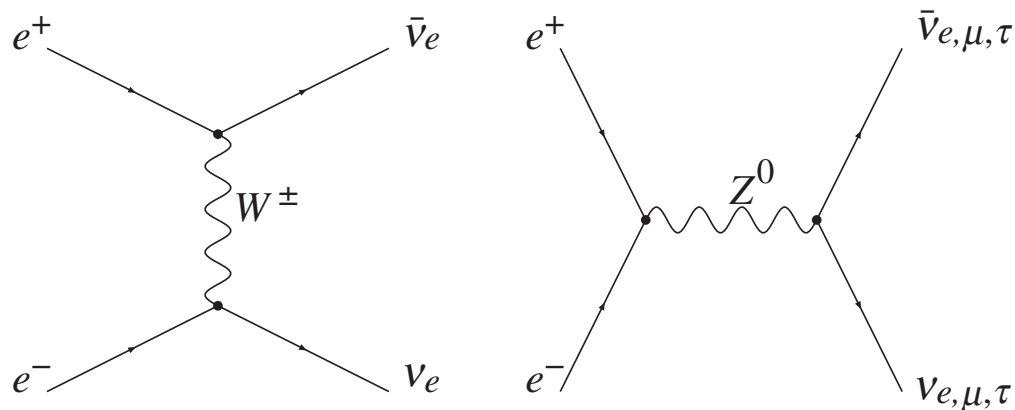
- $9.8 - 11 M_{\odot}$ → off centerでのNe/O/Si燃焼

- $12 - 20 M_{\odot}$ → 標準的な超新星

- $> 25 M_{\odot}$ → 短時間でのSi燃焼 (1日未満)

$> 40 M_{\odot}$ の星はWolf-Rayet星へ進化

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



(Misiaszek et al. 2006)

大質量星進化の計算

- 9.5 - 100 M_{\odot} の大質量星の進化を計算

9.5, 9.8, 10, 11, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 M_{\odot}

- Yoshida et al. (2016)からの変更点

- RSGでの質量放出率

- 対流(overshoot)の扱い

- $M \geq 12 M_{\odot}$ のモデルについては48核種の核反応ネットワーク
(他のモデルは300核種)

- 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

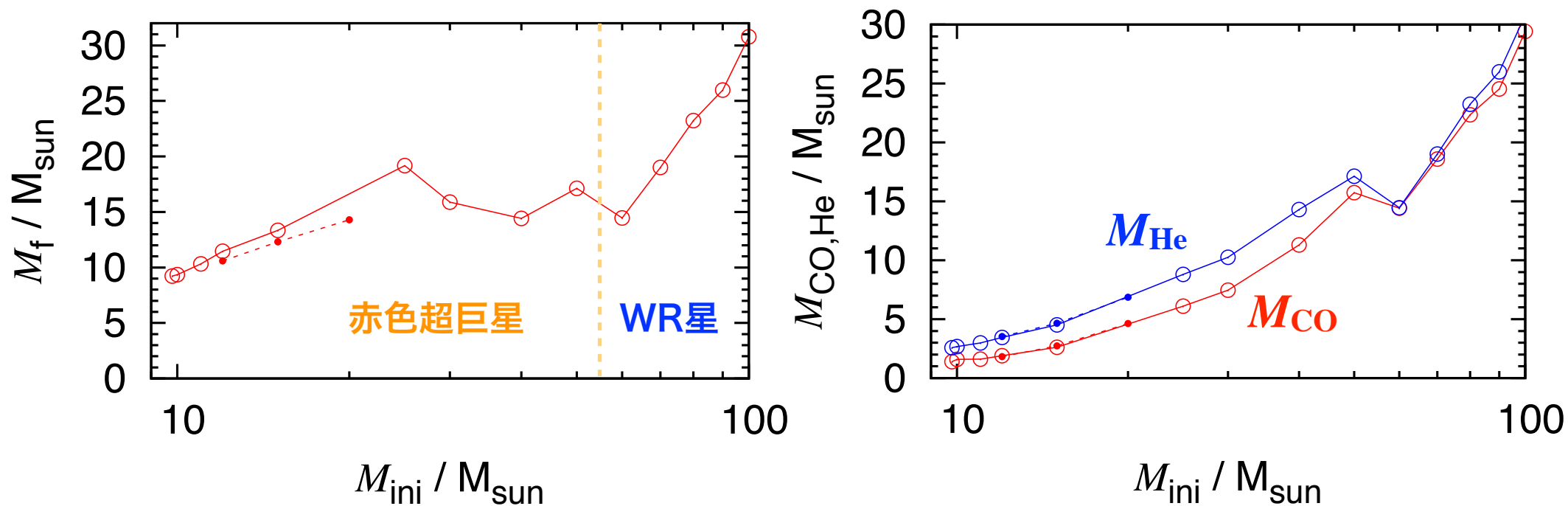
- pair neutrino過程によるニュートリノ生成

➡ 10, 15, 30, 40, 100 M_{\odot} モデルについての現状報告

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

9.8, 10, 11, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 M_{\odot}

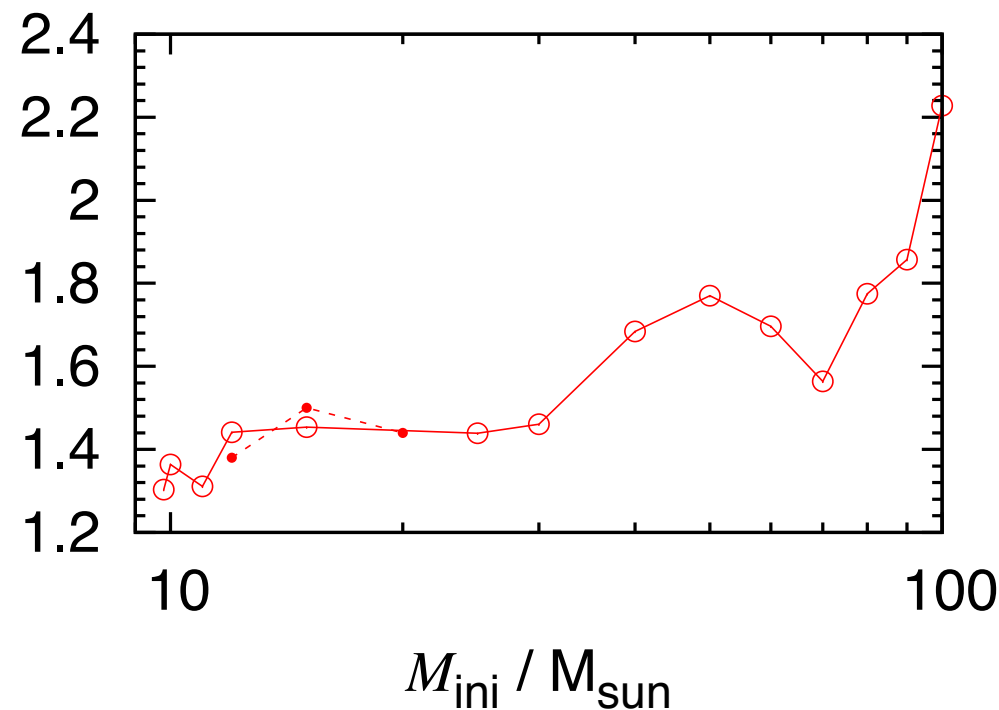
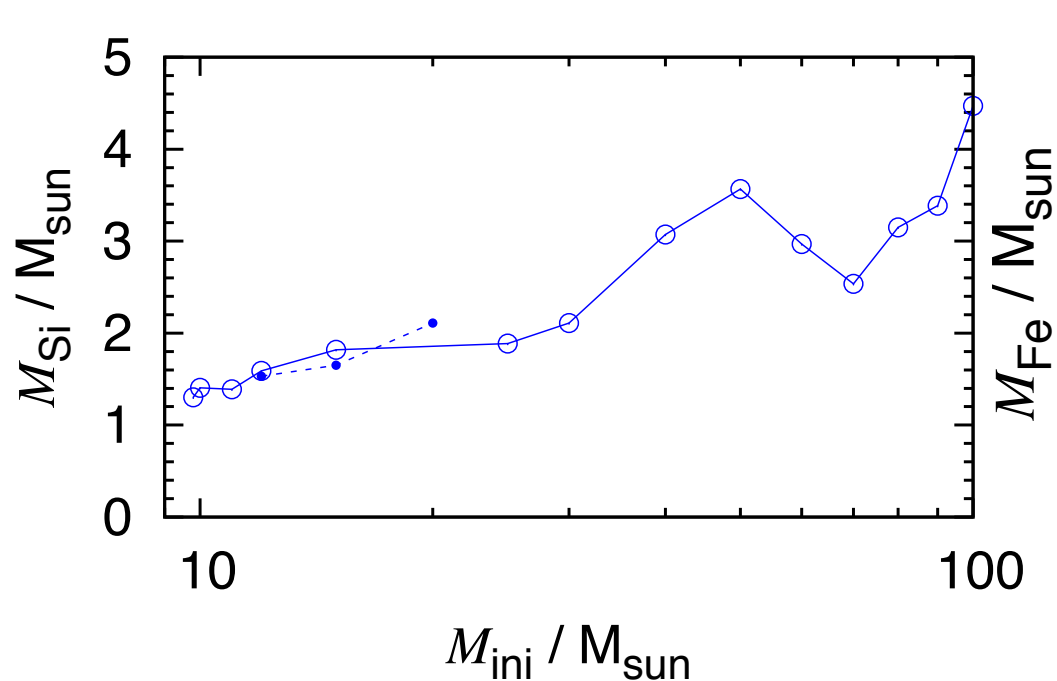


点線は Yoshida et al. (2016) のモデル

超新星爆発直前の星の性質

- 爆発直前の星のSi, Feコア質量

9.8, 10, 11, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 M_{\odot}

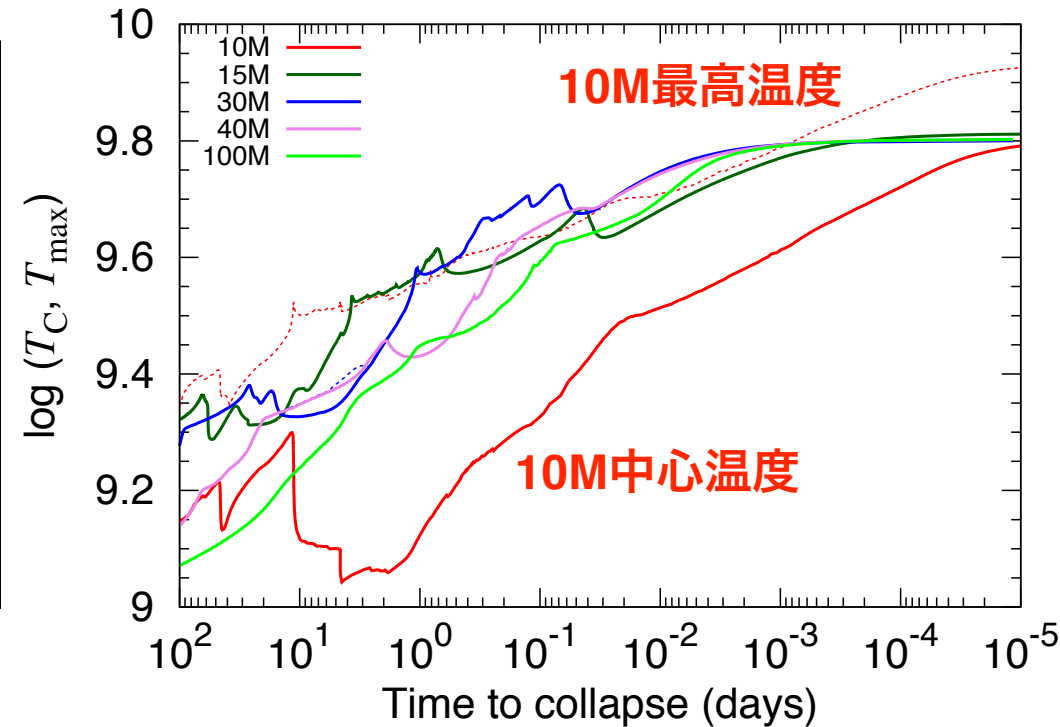
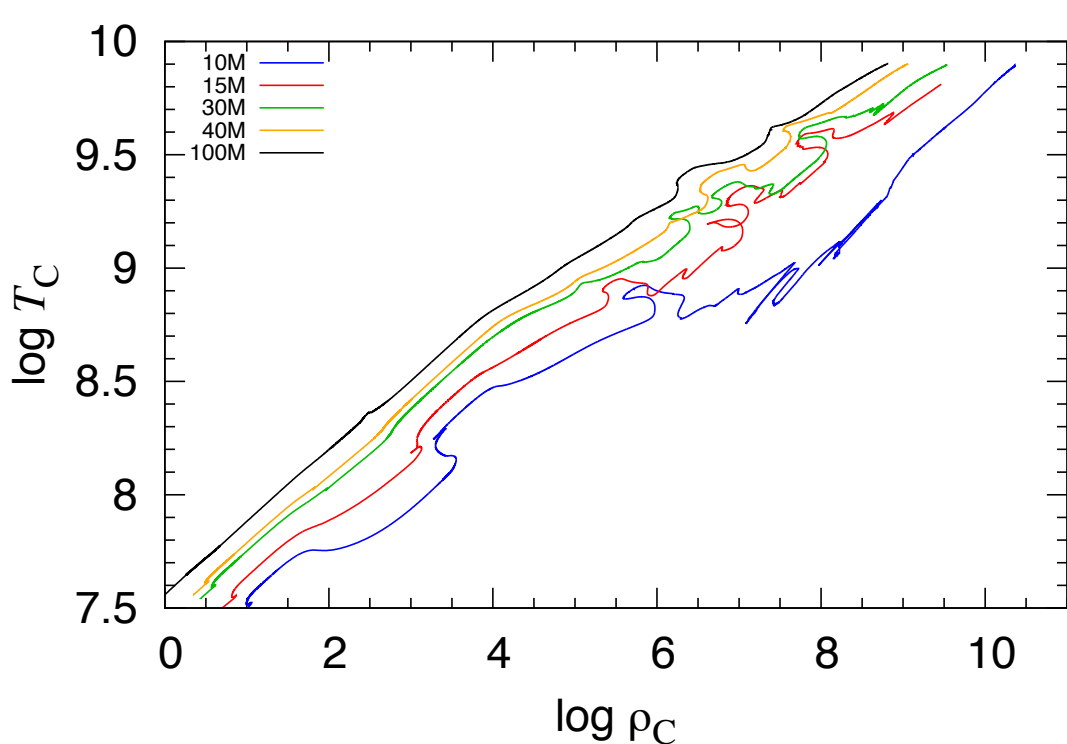


点線は Yoshida et al. (2016) のモデル

ニュートリノ放出について調べるモデル

● 10, 15, 30, 40, 100 M_{\odot} モデル

15 M_{\odot} モデルは Yoshida et al. (2016) から採用

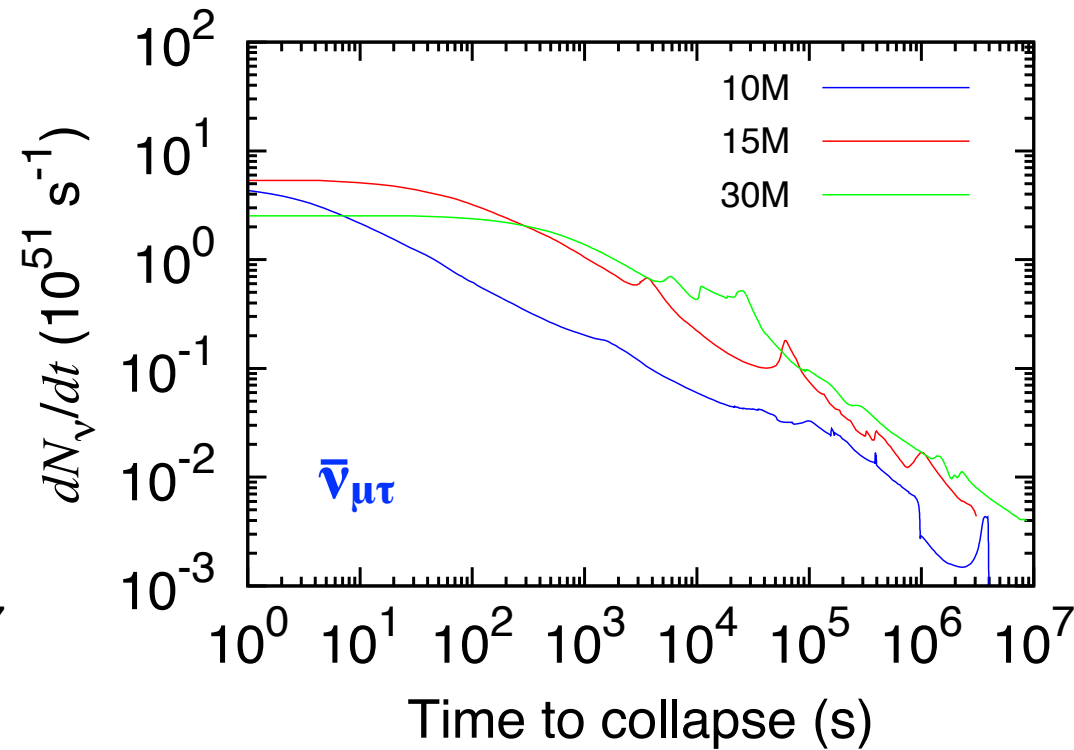
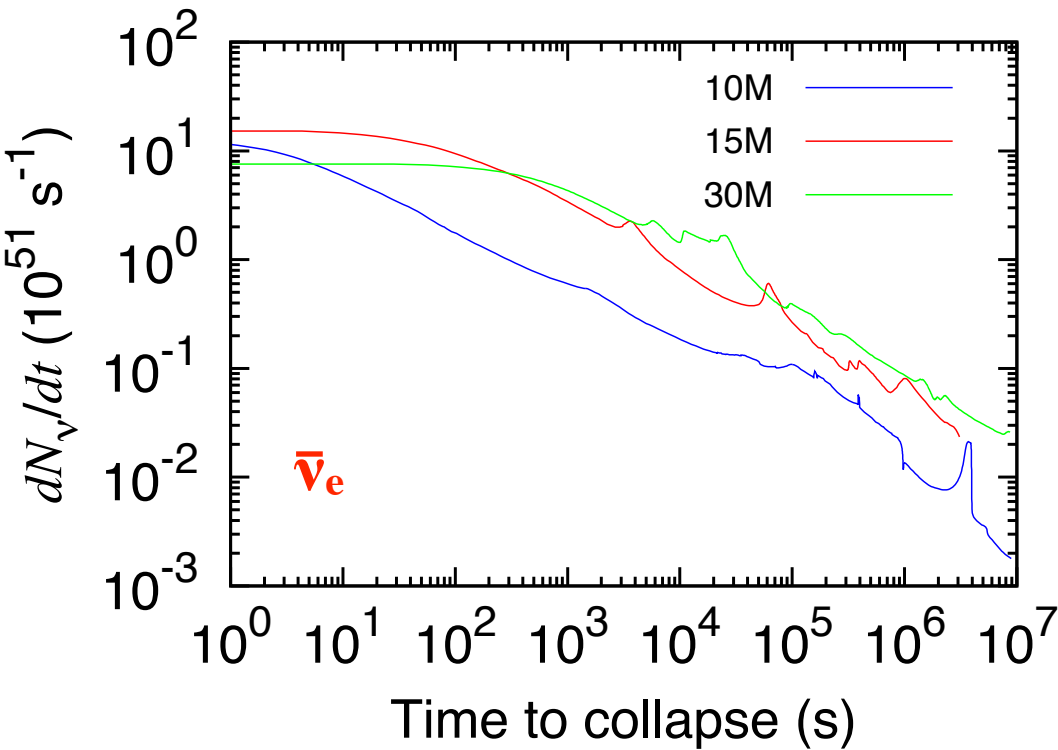


10 M_{\odot} : off center Ne/O/Si 燃烧

40, 100 M_{\odot} : Wolf-Rayet 星

ニュートリノ放出率

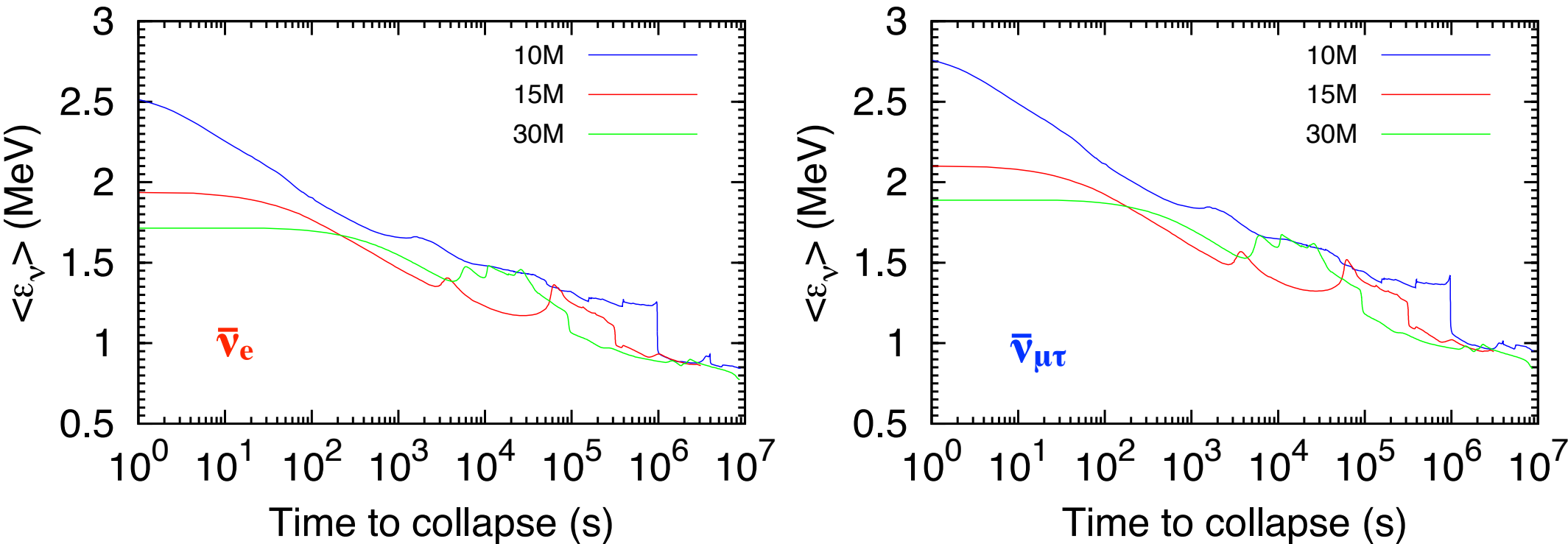
- 10, 30 M_{\odot} の星からの超新星前兆ニュートリノの放出率 (15 M_{\odot} モデルはYoshida et al. 2016から)



- 10 M_{\odot} モデルからの放出率は小さい
- 30 M_{\odot} モデルではSi燃焼まで放出率は相対的に大きい

ニュートリノ平均エネルギー

- 10, 30 M_{\odot} の星からの超新星前兆ニュートリノの平均エネルギー (15 M_{\odot} モデルはYoshida et al. 2016から)

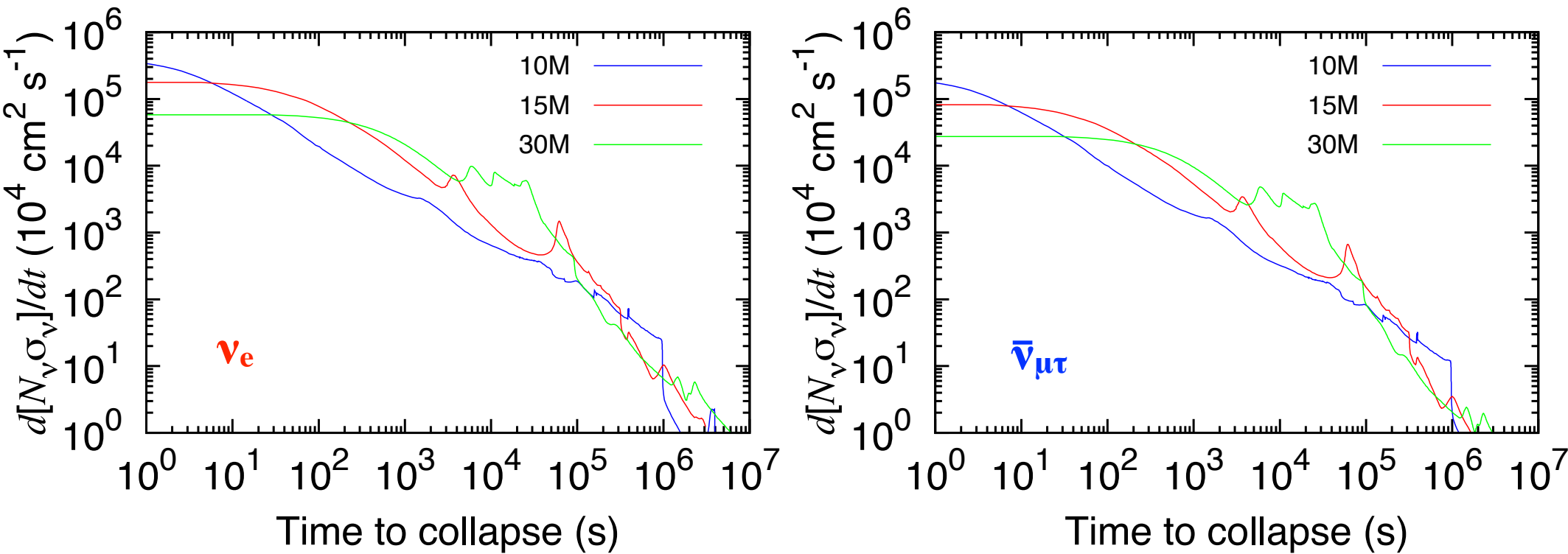


- 10 M_{\odot} モデルの平均エネルギーは他のモデルよりも高め
- $\bar{\nu}_{\mu\tau}$ の方が $\bar{\nu}_e$ よりも平均エネルギーがやや高め

ニュートリノ検出指標

- 10, 30 M_{\odot} の星からの超新星前兆ニュートリノの放出率 (15 M_{\odot} モデルはYoshida et al. 2016から)
- 反応断面積で重みづけをした放出率

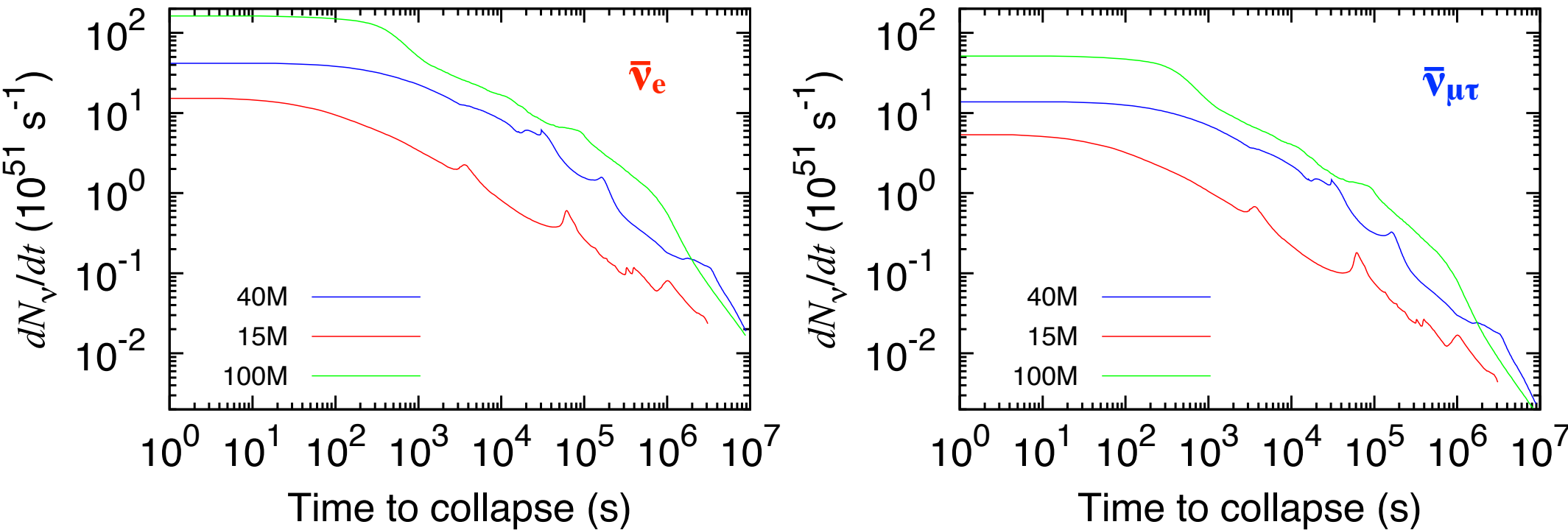
$$\int \phi_{\bar{\nu}}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r \quad \sigma(p+\bar{\nu}_e \rightarrow n+e^+): \text{Strumia \& Vissani (2003)}$$



- 10 M_{\odot} モデルは他のモデルよりも単調に放出率が増加
- 30 M_{\odot} モデルではSi燃焼まで放出率は相対的に大きい

ニュートリノ放出率

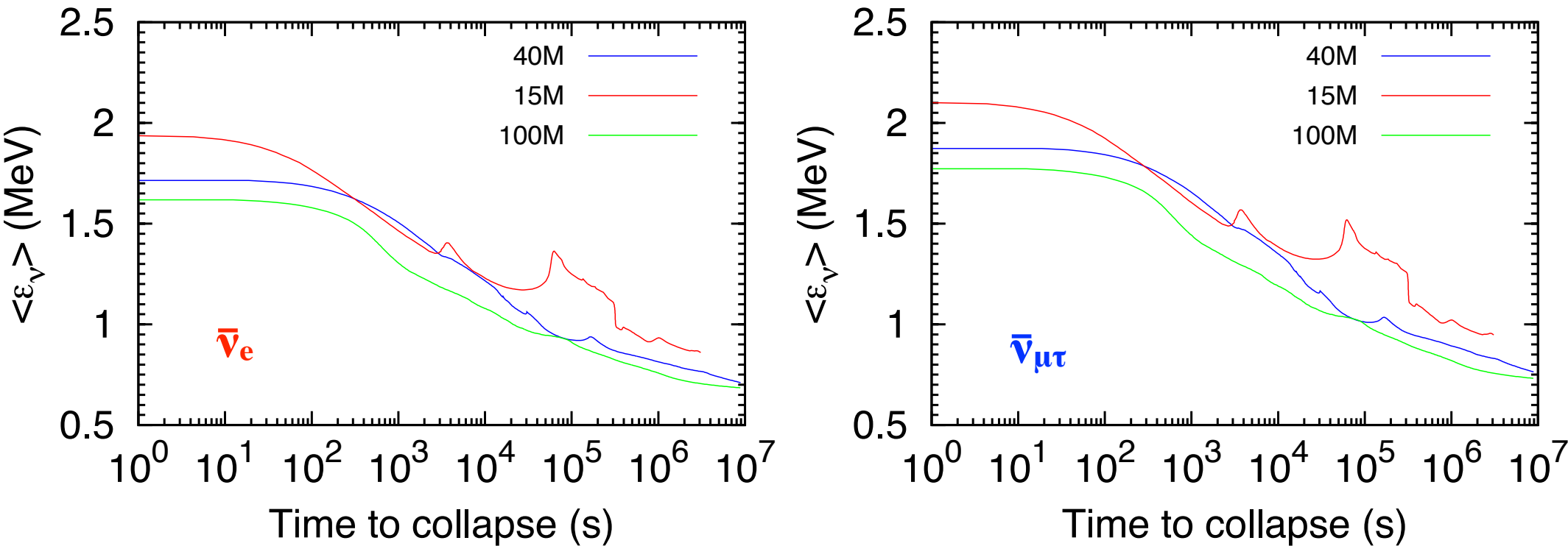
- 40, 100 M_{\odot} の星からの超新星前兆ニュートリノの放出率 (15 M_{\odot} モデルはYoshida et al. 2016から)



- 40, 100 M_{\odot} モデルともに15 M_{\odot} モデルよりも放出率が大い
- 100 M_{\odot} モデルでは燃焼による放出率の変動が目立たない

ニュートリノ平均エネルギー

- 40, 100 M_{\odot} の星からの超新星前兆ニュートリノの平均エネルギー (15 M_{\odot} モデルはYoshida et al. 2016から)

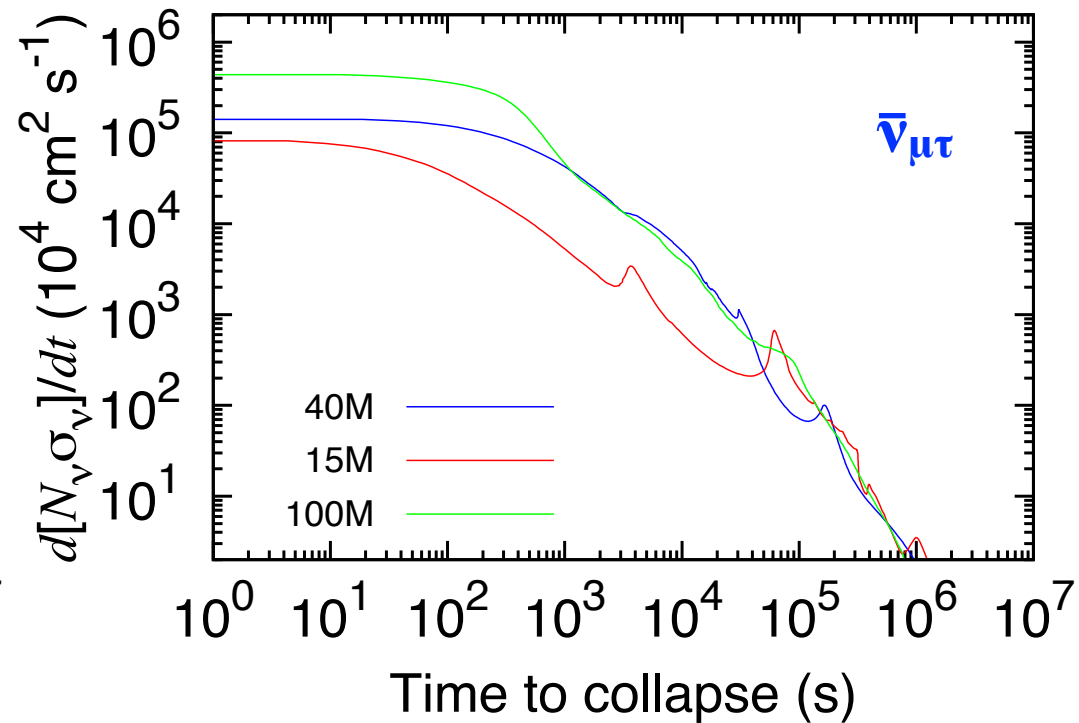
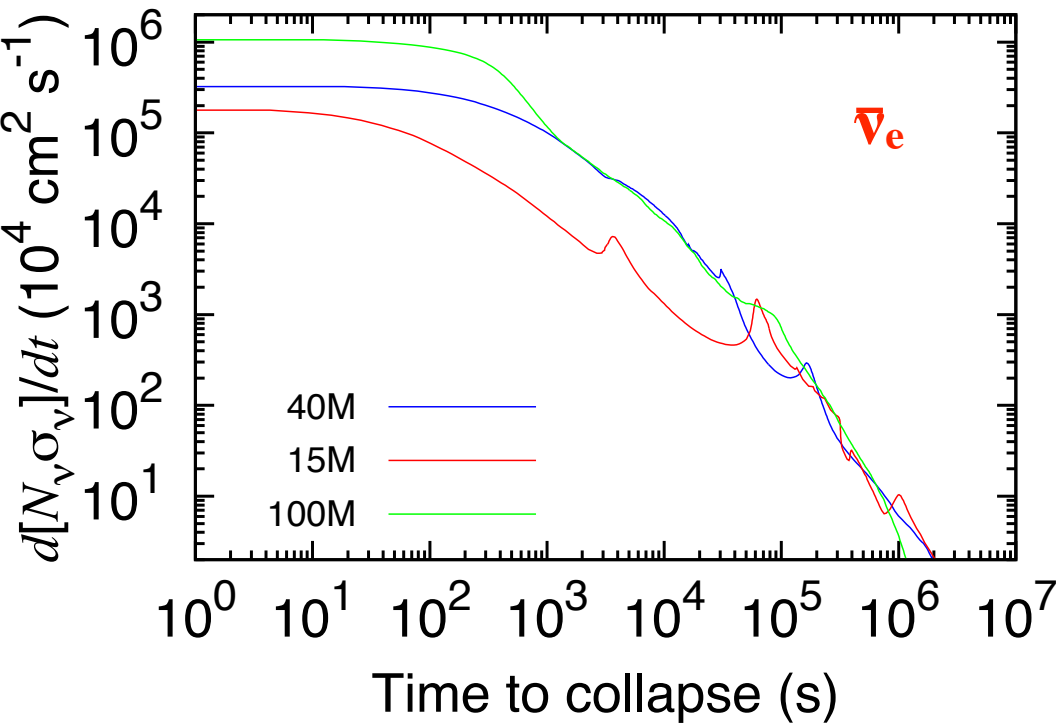


- 同じ燃焼過程では大質量の星の方が低い平均エネルギーとなる

ニュートリノ検出指標

- 40, 100 M_{\odot} の星からの超新星前兆ニュートリノの放出率
(15 M_{\odot} モデルはYoshida et al. 2016から)
- 反応断面積で重みづけをした放出率

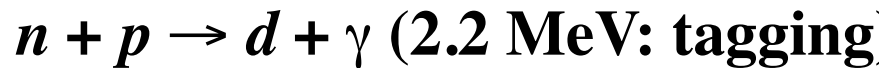
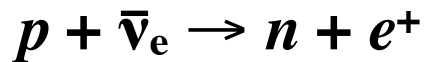
$$\int \phi_{\bar{\nu}}(E_{\nu}, M_r) \sigma_{\bar{\nu}e}(E_{\nu}) dE_{\nu} dM_r \quad \sigma(p+\bar{\nu}_e \rightarrow n+e^+): \text{Strumia \& Vissani (2003)}$$



- 爆発1日前くらいで放出率が相対的に大きくなる
- 100 M_{\odot} モデルでは燃焼による放出率の変動が目立たない

超新星前兆ニュートリノ観測の予測

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



- 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

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

(Strumia & Vissani 2003)

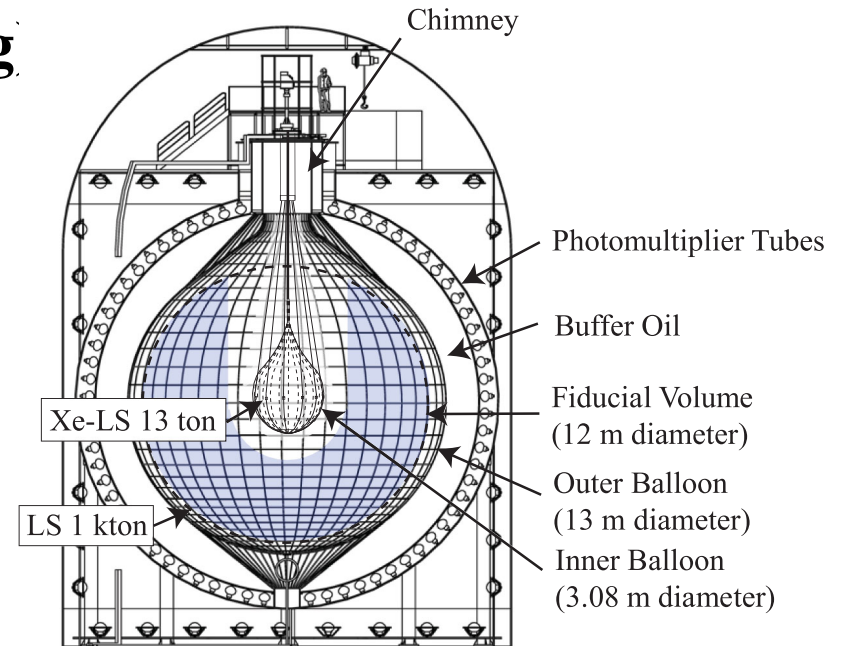
- KamLAND

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

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

- SuperKamiokande

$$M_{\text{fiducial}} = 22.5 \text{ kton}, E_{\nu, \text{th}} = 4.79 \text{ MeV}$$

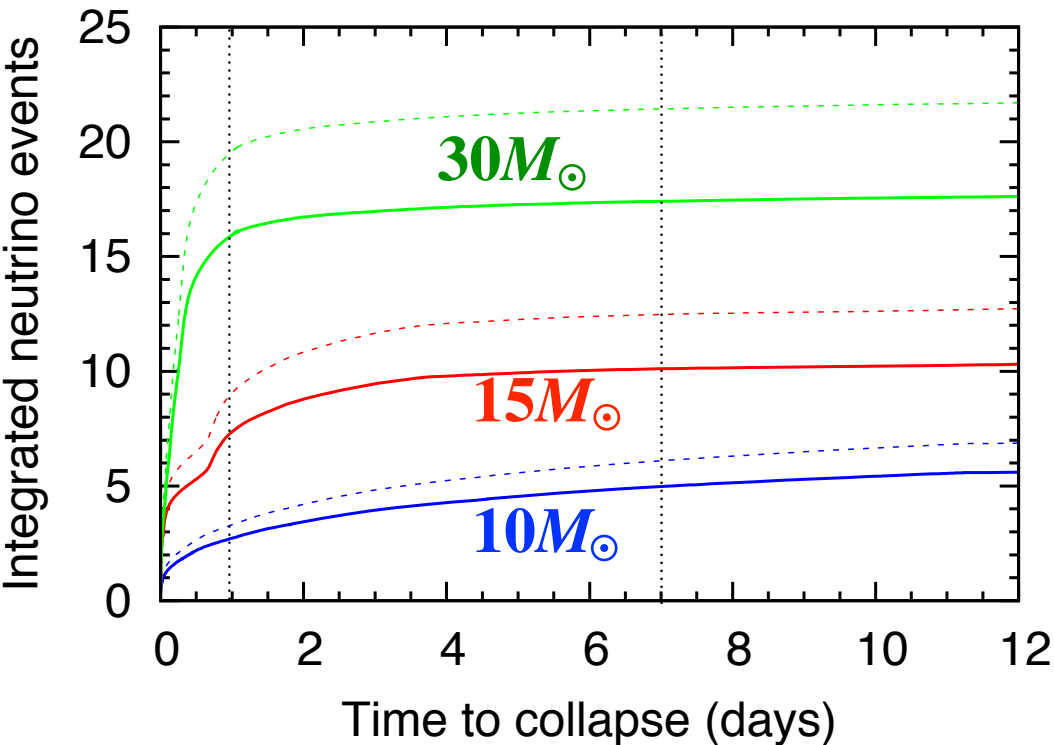


(Gando et al. 2013)

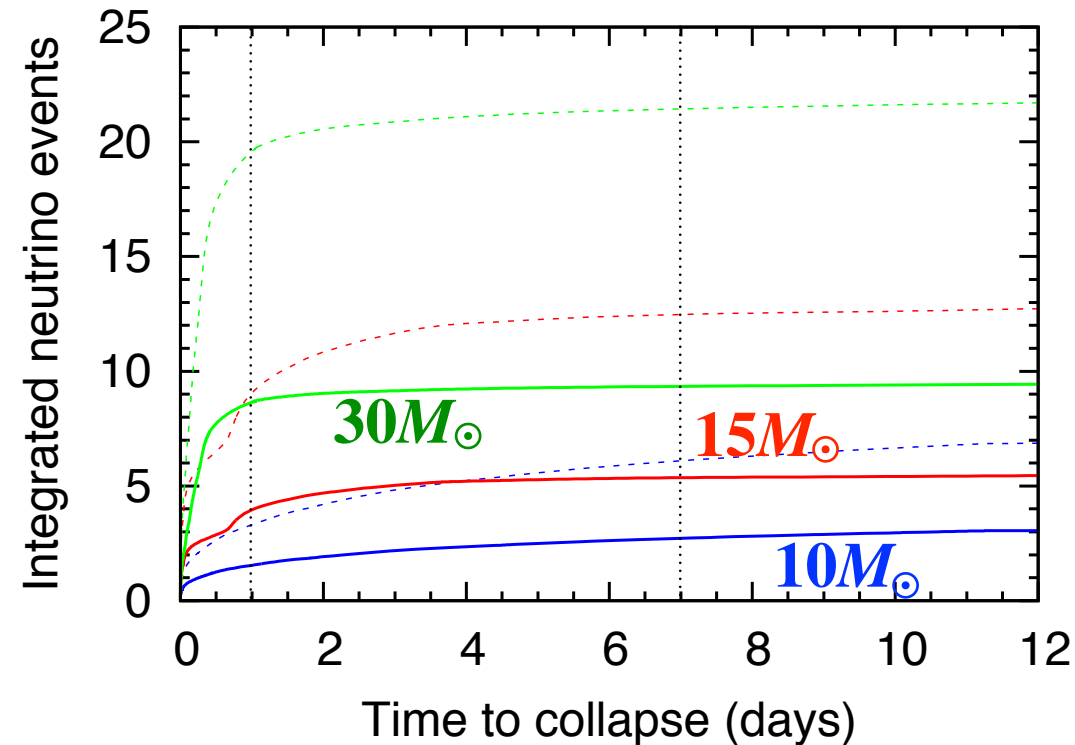
KamLAND イベント数の予測

- $10, 30 M_{\odot}$ モデル @ $d = 200\text{pc}$ (ベテルギウスの距離)

Normal mass hierarchy



Inverted mass hierarchy



点線はニュートリノ振動なしの場合

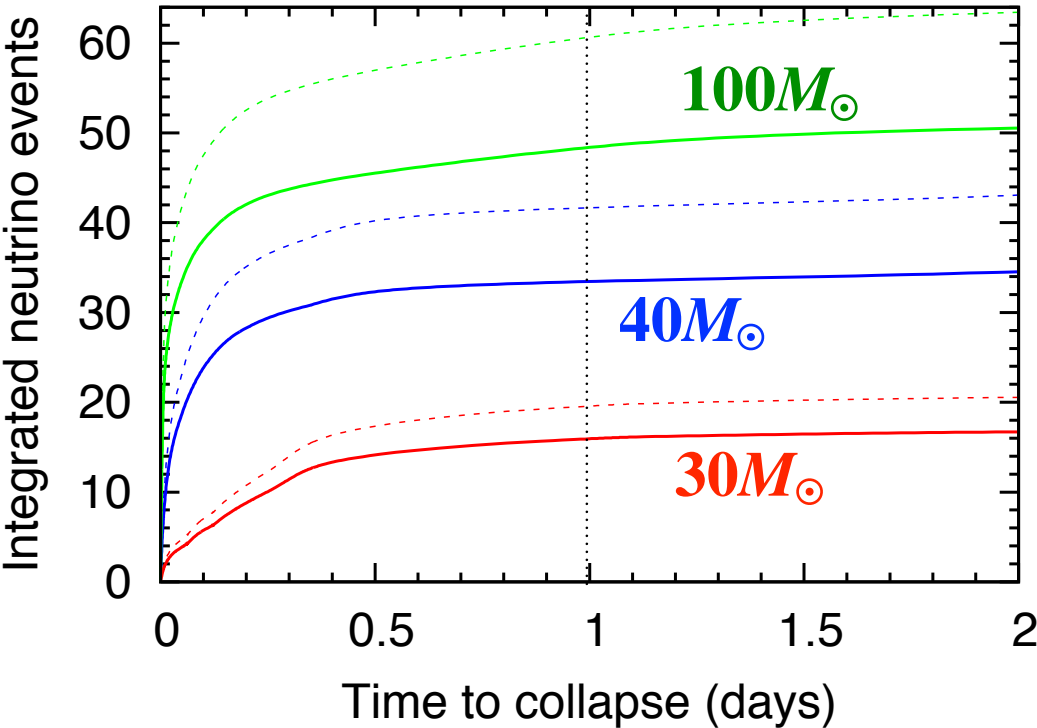
- $10, 15, 30 M_{\odot}$ モデルでの一週間でのニュートリノイベント数

➡ $\sim 5, 10, 17$ (normal), $\sim 3, 5, 9$ (inverted)

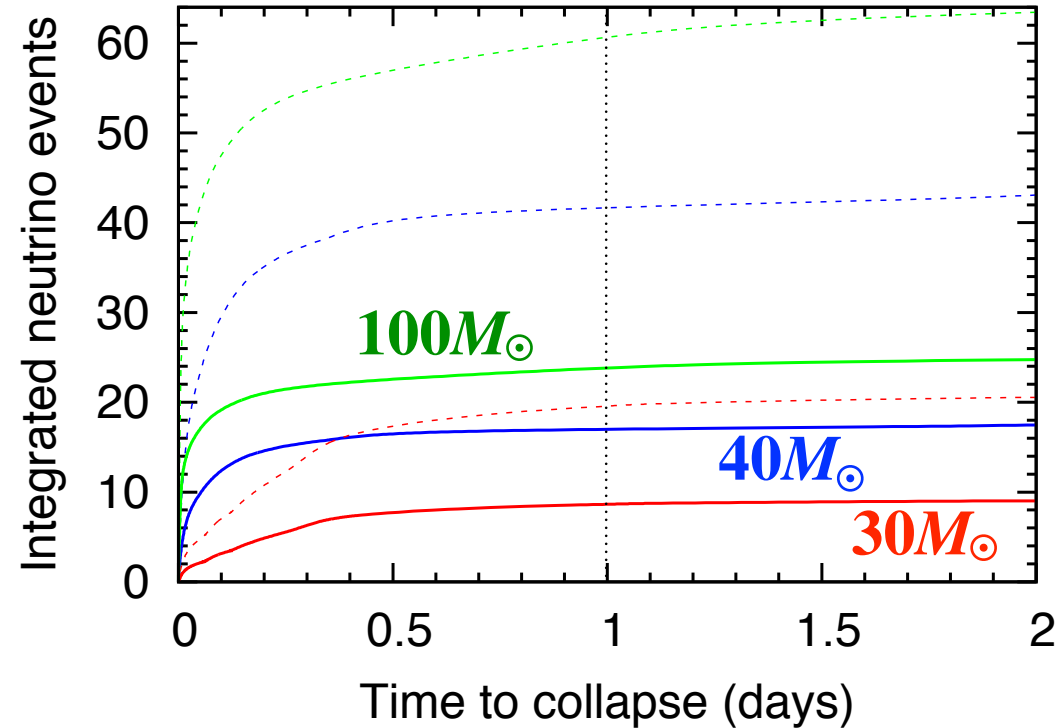
KamLAND イベント数の予測

- 30, 40, 100 M_{\odot} モデル @ $d = 200\text{pc}$ (ベテルギウスの距離)

Normal mass hierarchy



Inverted mass hierarchy



点線はニュートリノ振動なしの場合

- 30, 40, 100 M_{\odot} モデルでの爆発前 1 日でのニュートリノイベント数

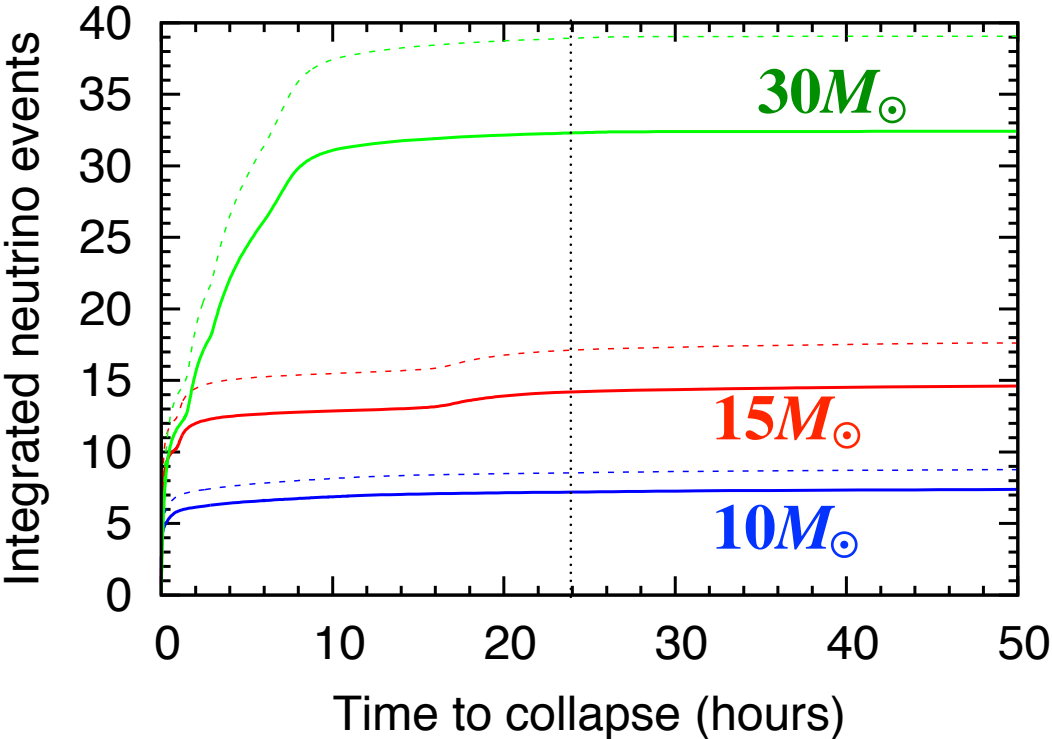
➡ ~ 16, 33, 48 (normal), ~ 9, 17, 24 (inverted)

SKイベント数の予測

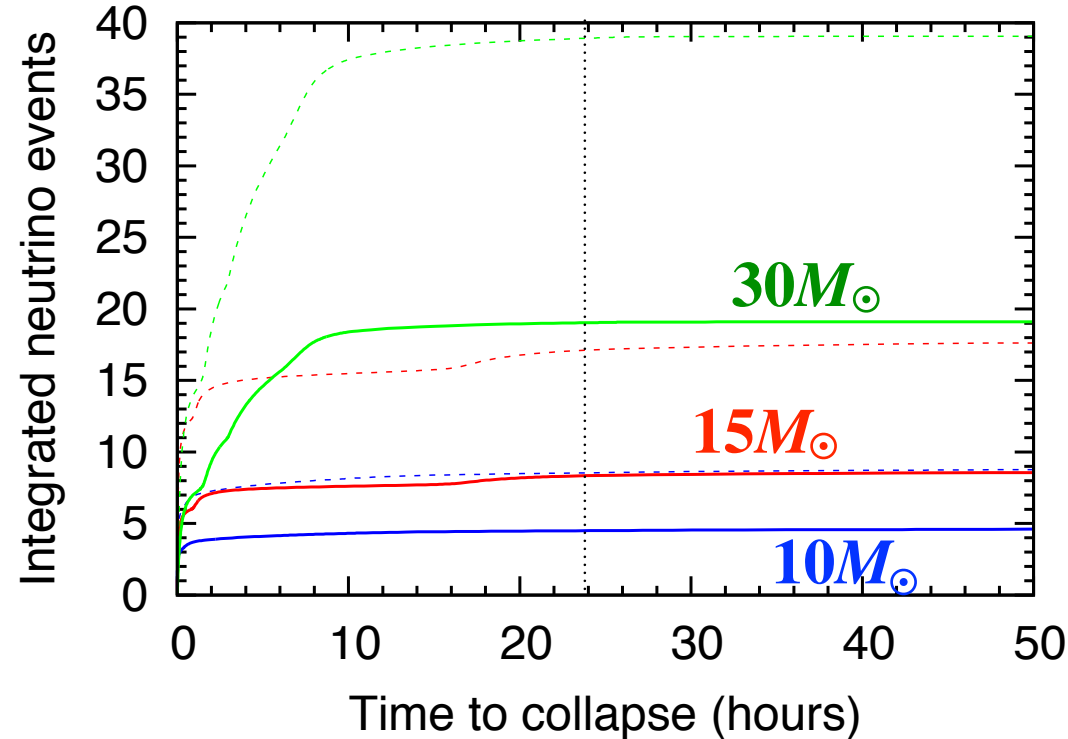
- 10, 30 M_{\odot} モデル @ $d = 200\text{pc}$ (ベテルギウスの距離)

$M_{\text{fiducial}} = 22.5 \text{ kton}, E_{\text{th}} = 4.79 \text{ MeV}$

Normal mass hierarchy



Inverted mass hierarchy



点線はニュートリノ振動なしの場合

- 10, 15, 30 M_{\odot} モデルでの爆発前1日でのニュートリノイベント数

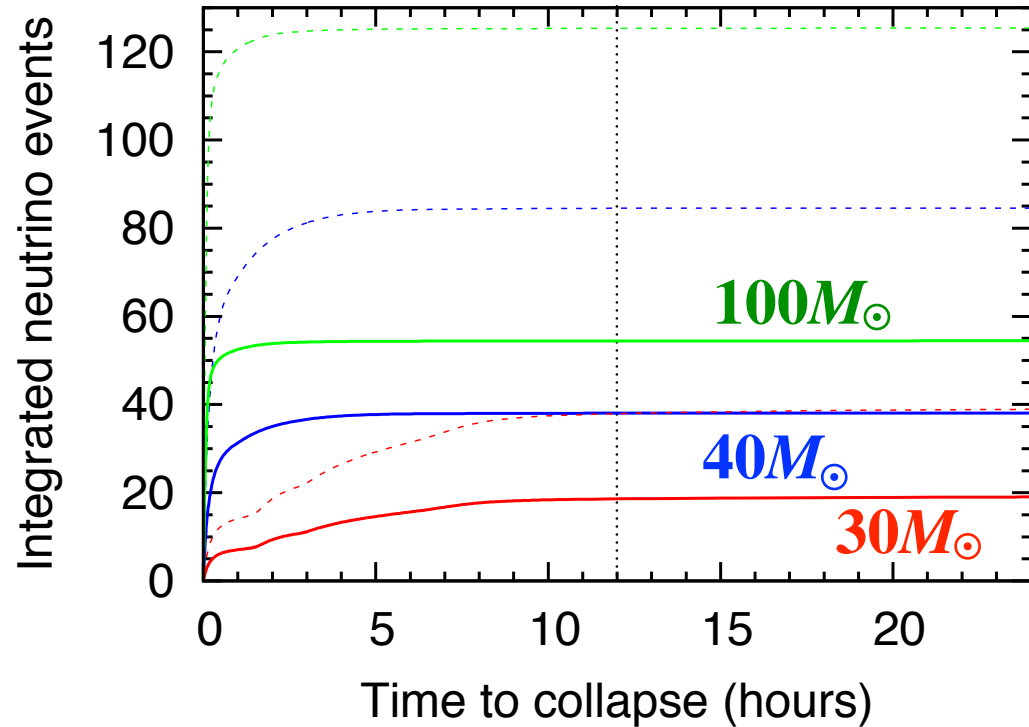
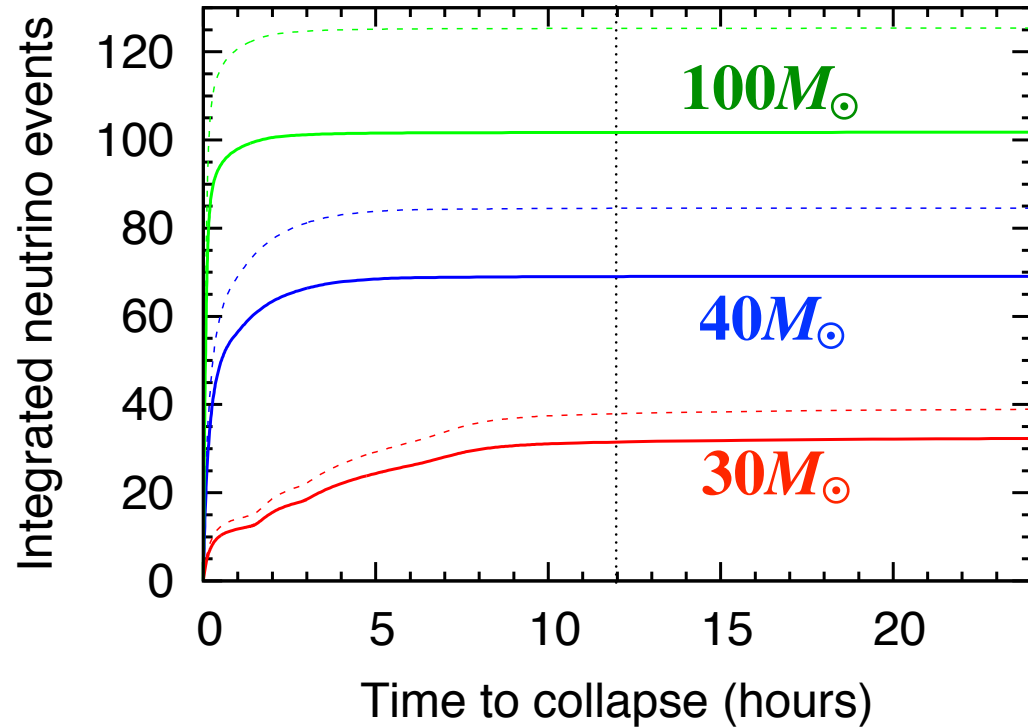
➡ $\sim 7, 14, 32$ (normal), $\sim 5, 8, 19$ (inverted)

SKイベント数の予測

- 30, 40, 100 M_{\odot} モデル @ $d = 200\text{pc}$ (ベテルギウスの距離)
 $M_{\text{fiducial}} = 22.5 \text{ kton}, E_{\text{th}} = 4.79 \text{ MeV}$

Normal mass hierarchy

Inverted mass hierarchy



点線はニュートリノ振動なしの場合

- 30, 40, 100 M_{\odot} モデルでの爆発前12時間でのニュートリノイベント数
➡ $\sim 32, 69, 102$ (normal), $\sim 19, 38, 54$ (inverted)

まとめ

- 広い初期質量範囲の星から放出される超新星前兆ニュートリノ
9.8 - 100 M_{\odot} , $Z=0.014$ (solar metallicity)
 - $M \leq 11 M_{\odot}$ → off centerでのNe/O/Si燃焼
 - $M \geq 40 M_{\odot}$ → Wolf-Rayet星へ進化
 - 大質量の星ほど進化のタイムスケールが短い
 - 超新星前兆ニュートリノの星の質量に対する依存性
 - 大質量の星ほど高いニュートリノ放出率, 低エネルギー
 - 前兆ニュートリノのイベント数 ($d = 200\text{pc}$)
 - 大質量の星ほど爆発前の短期間に多いイベント数
- KamLAND**
- $10 M_{\odot}$ → 爆発前1週間で 3 - 5 イベント
 - $30 - 100 M_{\odot}$ → 爆発前1日で9 - 48イベント
- SuperKamiokande**
- 爆発前1日で数 ~100イベント

今後の方針

- 観測結果と大質量星の内部進化との対応に関する考察
 - より詳細な星の質量に関する依存性
 - ニュートリノ検出率の時間変化と燃焼過程との関係
 - ニュートリノ振動の地球効果

- 星の内部構造の不定性に対する超新星前兆ニュートリノの依存性
 - 対流の扱い (対流条件, overshoot)
 - 星の自転の効果