

大質量星の最終進化と超新星前兆ニュートリノ

吉田 敬

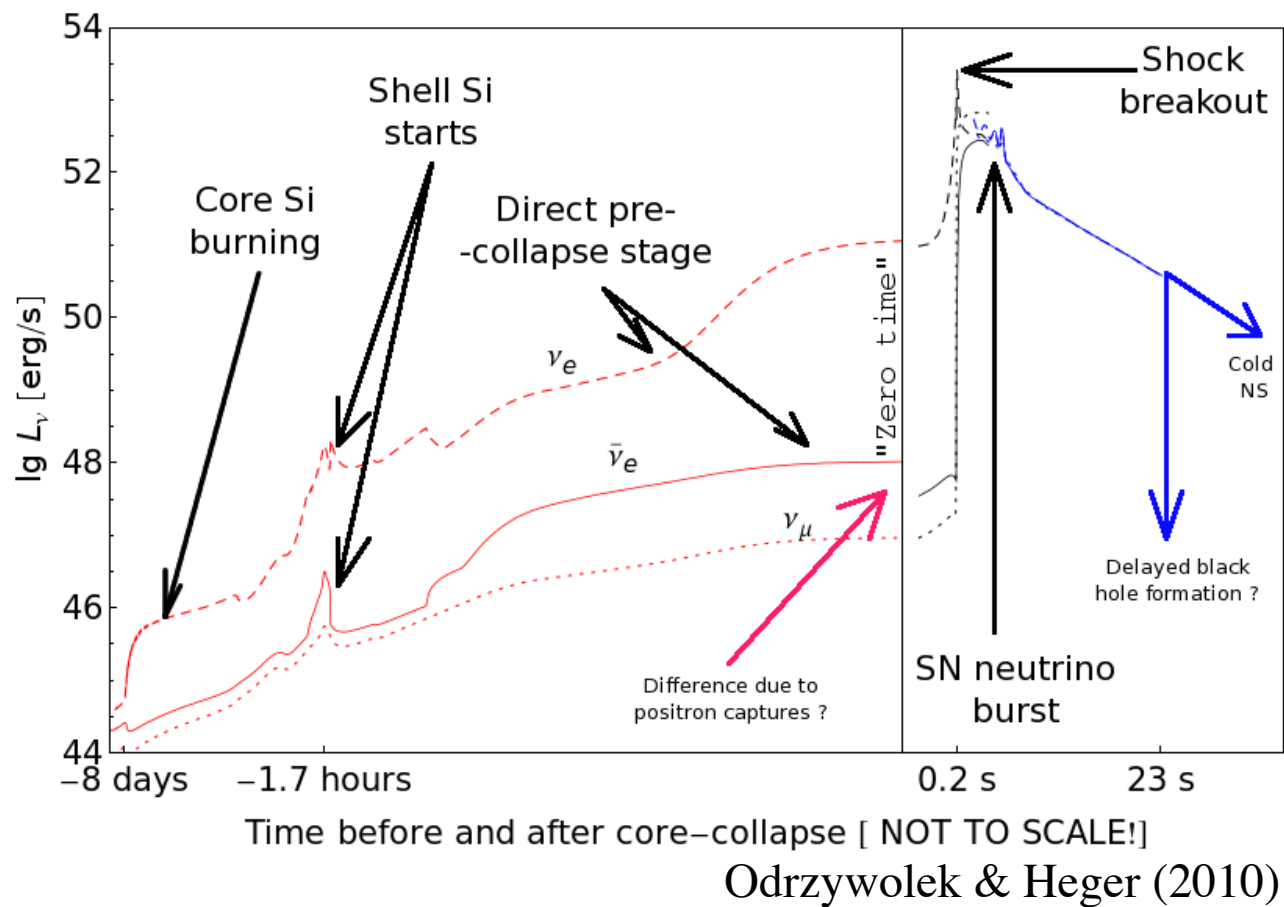
京都大学基礎物理学研究所

日本物理学会2021年秋季大会

シンポジウム「新生スーパーカミオカンデがもたらす超新星研究の新展開」

2021年9月17日

超新星前兆ニュートリノ



● 超新星爆発直前のニュートリノ

➡ $L_{\bar{\nu}_e} \lesssim 10^{48} [\text{erg s}^{-1}]$

➡ 近傍 (< 1kpc) 超新星で観測可能
超新星前兆ニュートリノ

(e.g. Odrzywolek et al. 2004; Odrzywolek & Heger 2010; Kato et al. 2015, 2017, 2019, 2020; Asakura et al. 2016, Yoshida et al. 2016; Patton et al. 2017ab; Simpson et al. 2019; Mukhopadhyay et al. 2020)

Review:

Kato, C., Ishidoshiro, K., & Yoshida, T.
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2020. 70:121-145.

● 超新星爆発の前兆現象観測

● 超新星爆発数日前からの観測可能性 ➡ 超新星のさまざまな観測に備える

● 重力崩壊直前の大質量星内部の直接観測

● 時間変化, スペクトルから大質量星最深部の変化を探る

➡ 重力崩壊型(CC)と電子捕獲型(EC)超新星の区別, 対流shell燃焼の観測

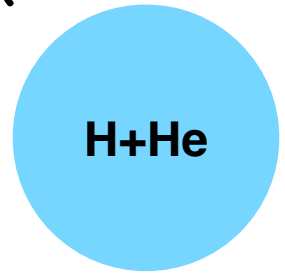
目次

- 大質量星の進化とニュートリノ放出
- 超新星前兆ニュートリノの観測予測
- 超新星ニュートリノ観測から光学観測までのtime scale
- 将来の超新星前兆ニュートリノ観測からわかること

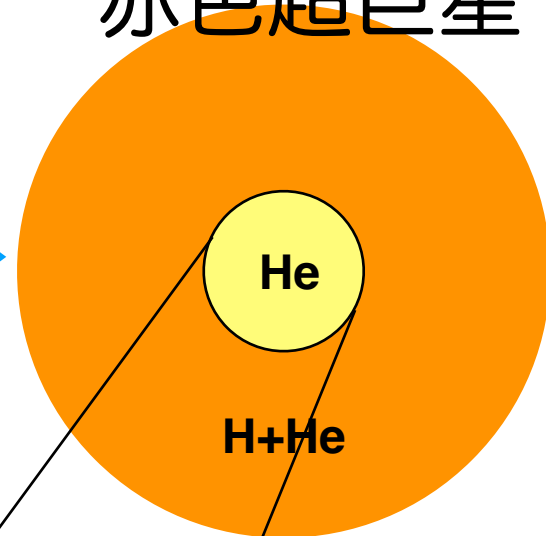
大質量星の進化

- 大質量星 $\rightarrow M_{\text{ini}} \gtrsim 8 M_{\odot}$: 重力崩壊して一生を終える

青色超巨星
(主系列星)

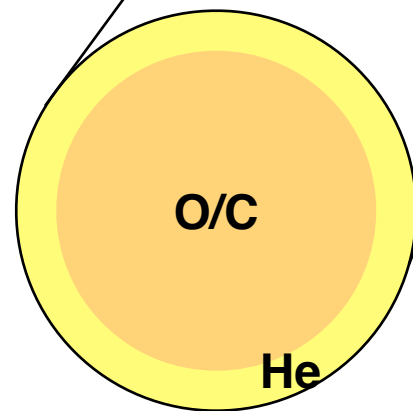
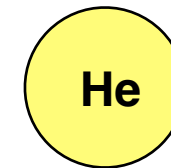
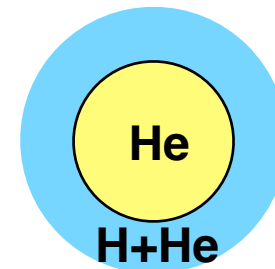


赤色超巨星

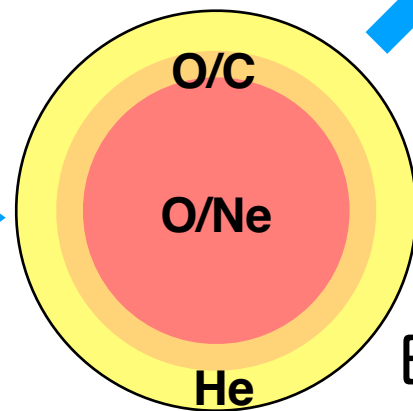


重い星, 連星系など
質量放出が激しい場合

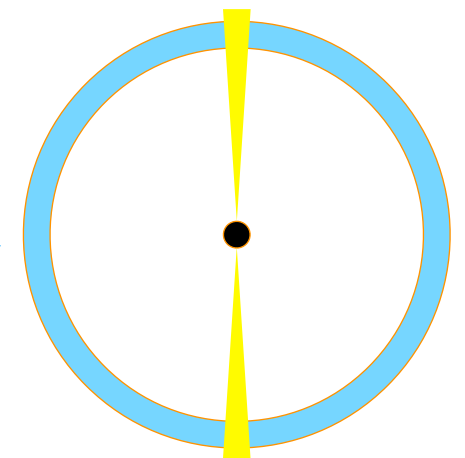
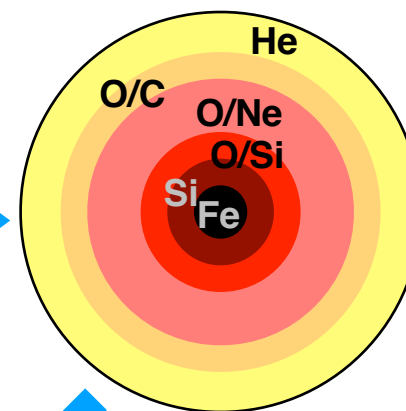
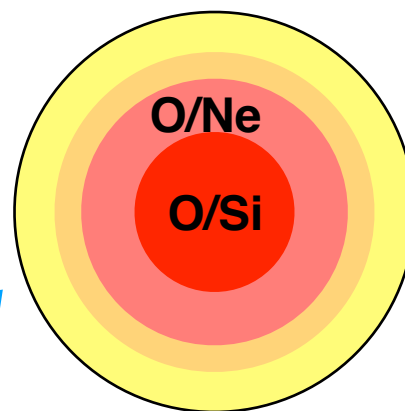
Wolf-Rayet星



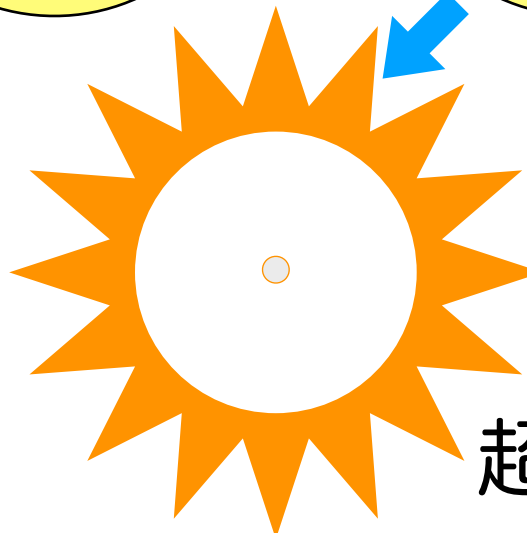
後期進化



EC SN
軽い場合



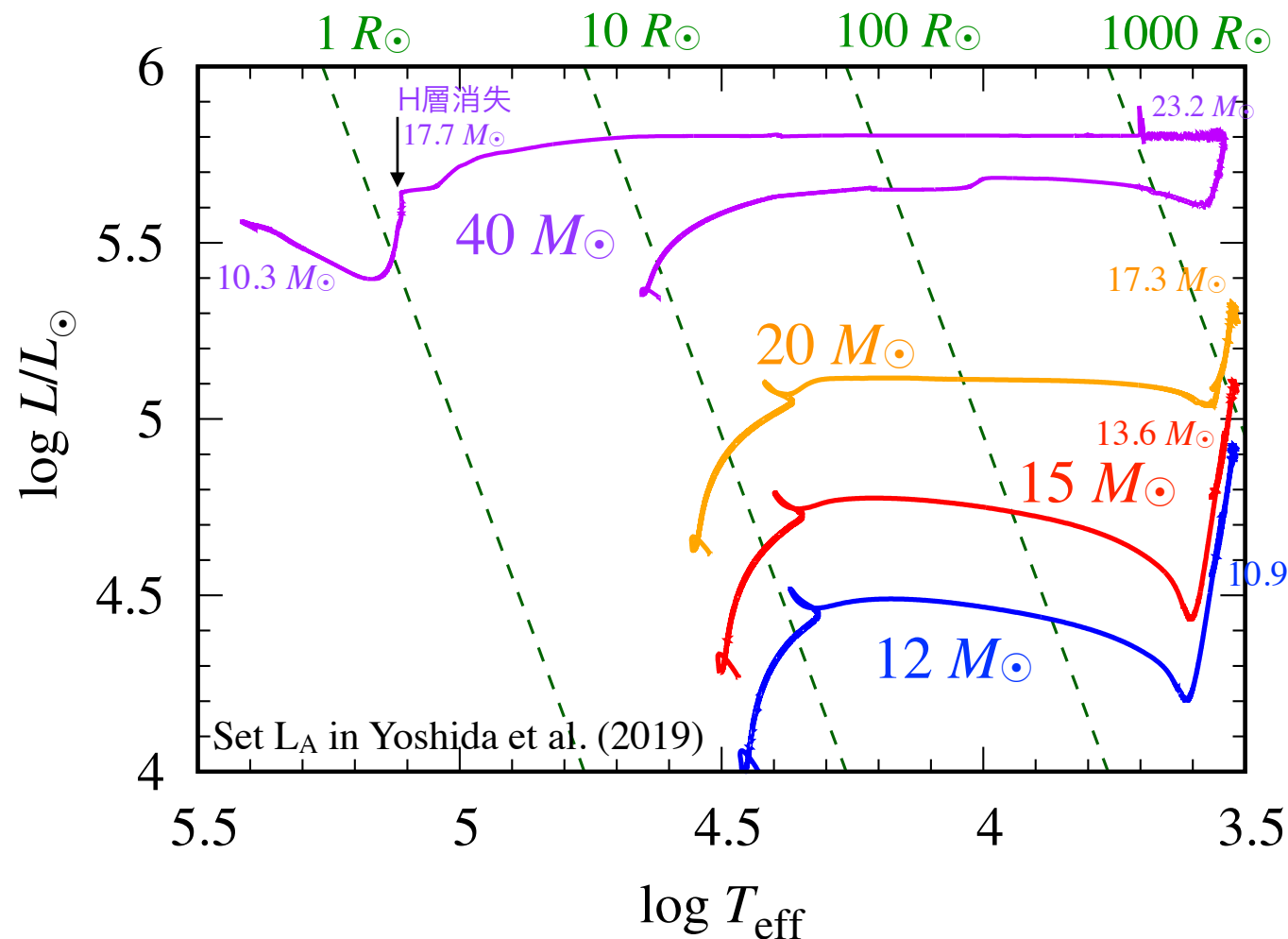
BH形成, LGRB, 極超新星



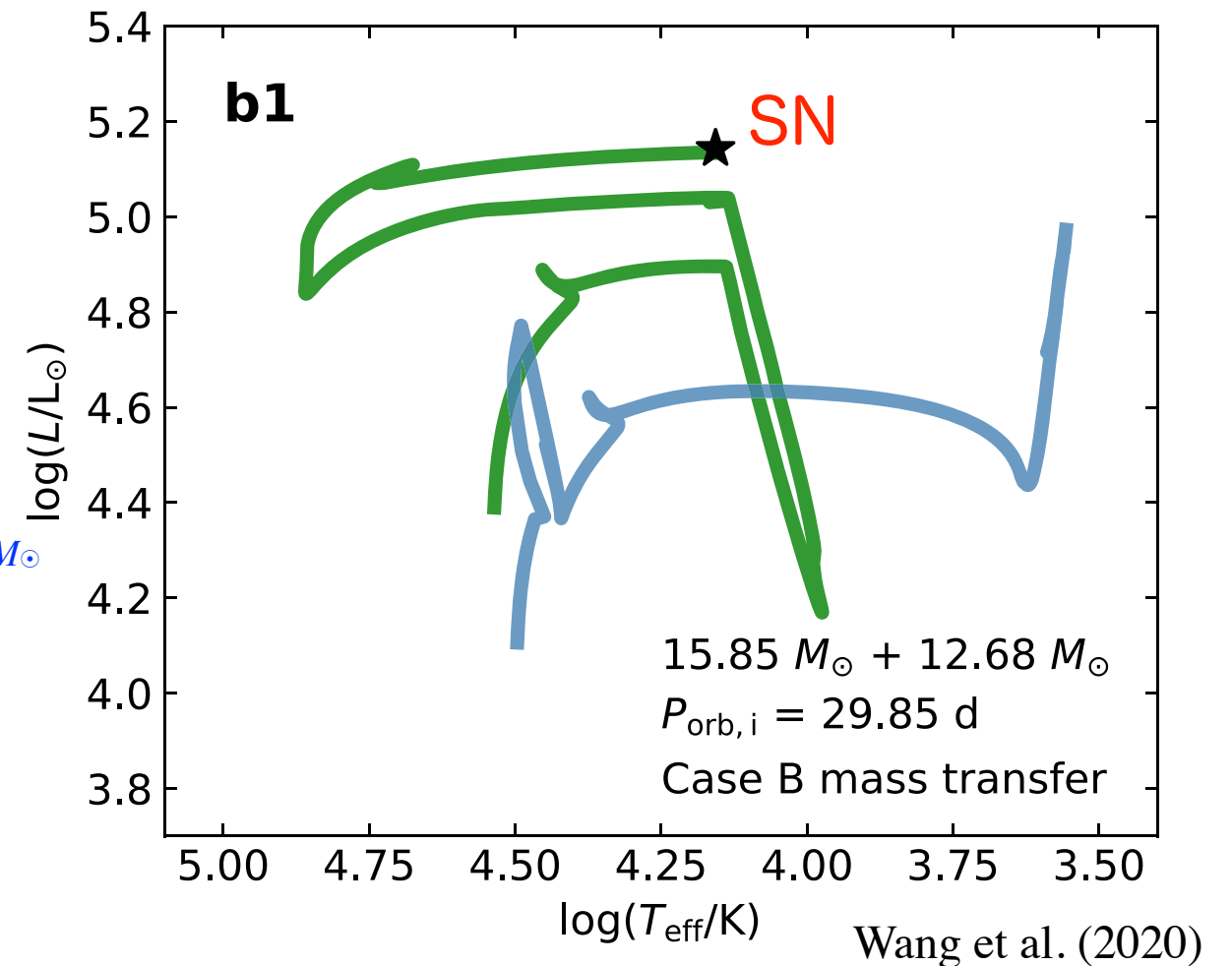
超新星爆発

大質量星の進化 (H-R diagram)

● 単独星の例 (Z_{\odot})



● 近接連星の例



● 重力崩壊直前の星の構造

単独星 → 赤色超巨星：半径大, 表面温度低
 質量放出が大きいとWolf-Rayet星など(半径小)

連星系 → 連星相互作用による質量放出に強く依存

ニュートリノ放出過程

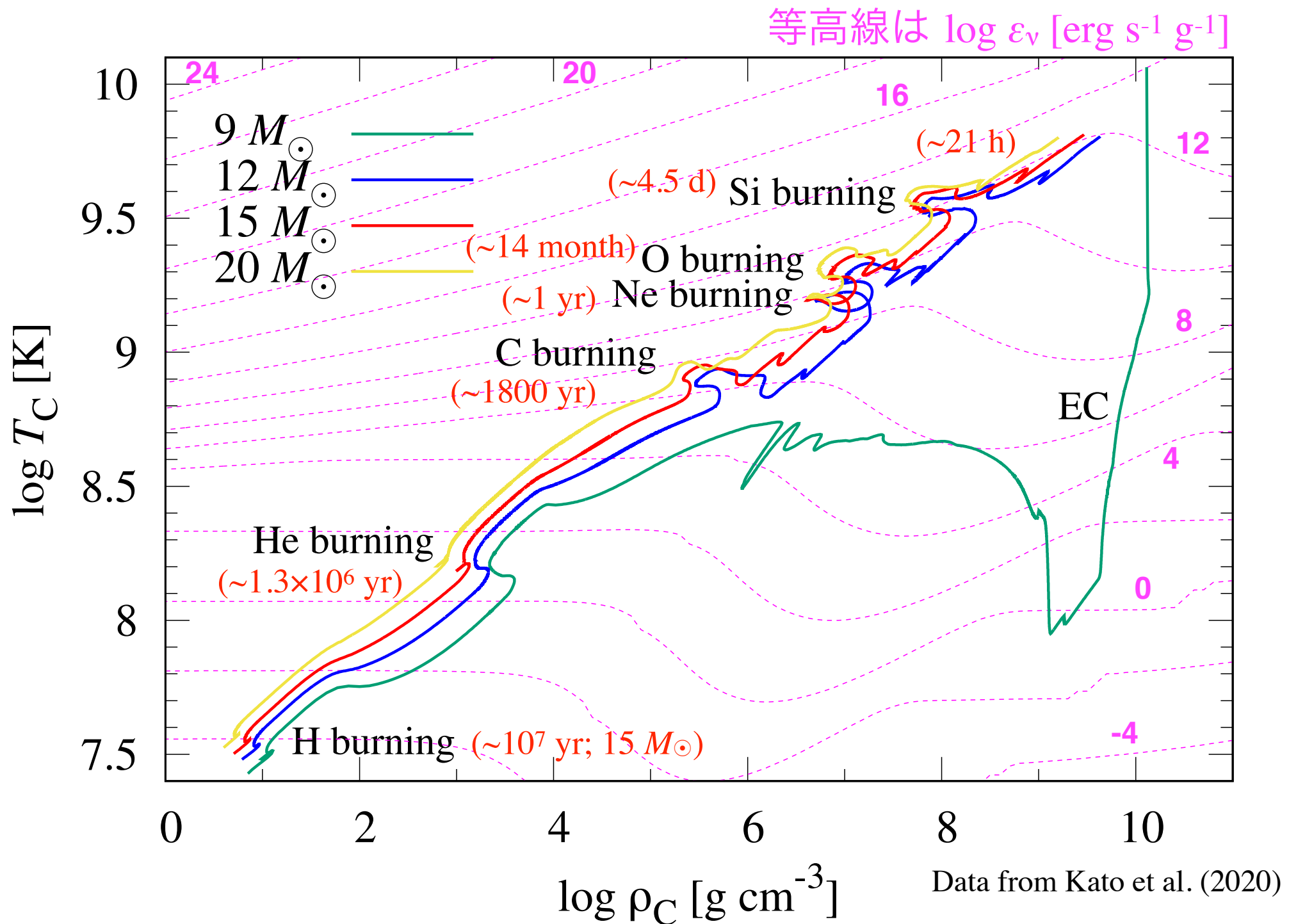
- Thermal pair emission



- Nuclear weak interactions



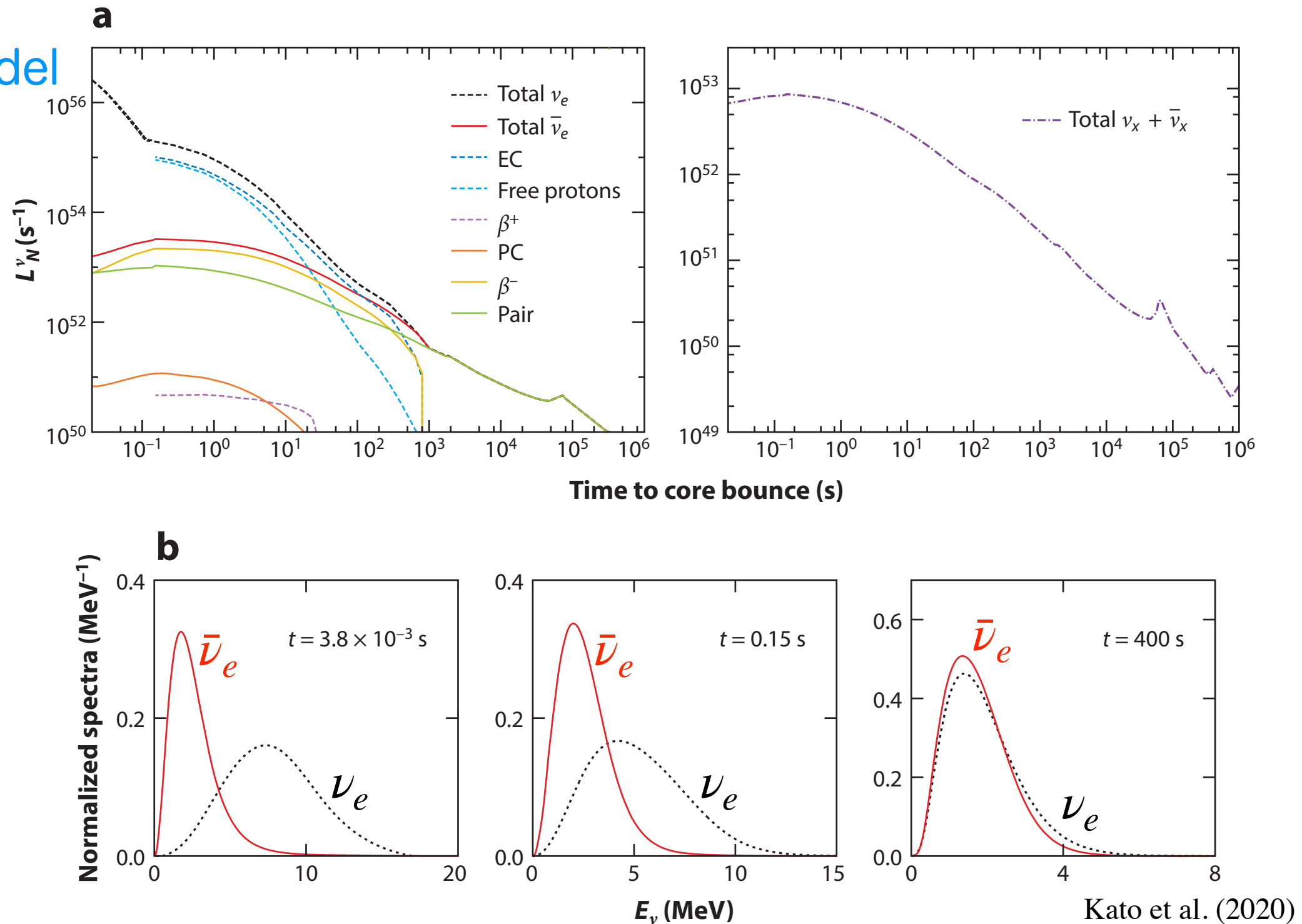
大質量星の温度、密度進化とニュートリノ放出



- 後期進化では e^-e^+ pair annihilation が優勢
- 軽い大質量星では plasmon decay がより重要

ニュートリノ放出率とスペクトル

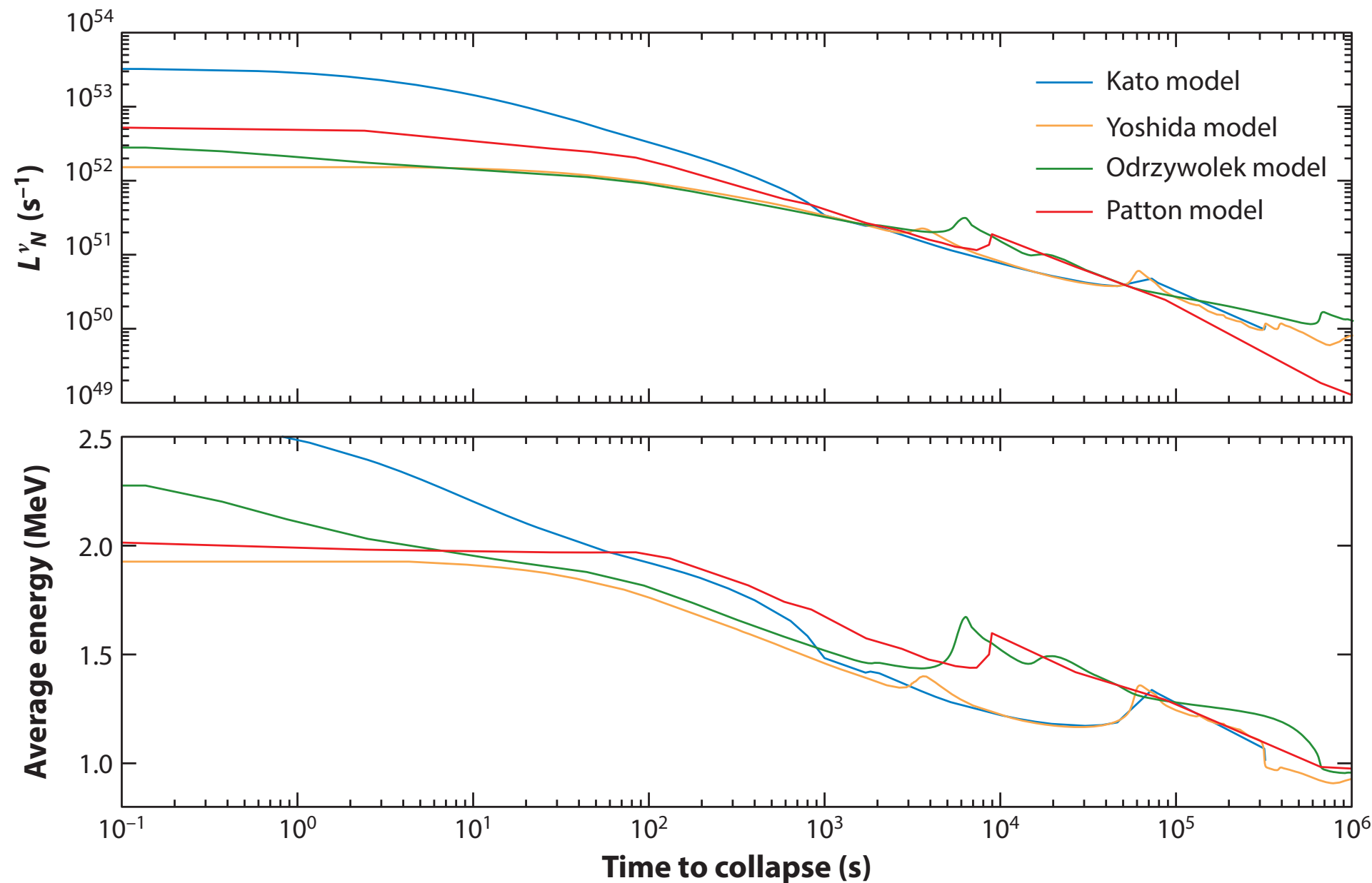
Kato model
($15 M_{\odot}$)



- pair neutrinoで縮退が効かない時は ν_e と $\bar{\nu}_e$ の違いは小さい
- $< 10^3$ s でnuclear weak interactionが卓越

大質量星進化モデルによる違い

異なる $15M_{\odot}$ modelでの $\bar{\nu}_e$ 放出率の違い



Stellar models

Hoshi: **Kato**, **Yoshida**

Kepler: **Odrzywolek**

MESA: **Patton**

Pairのみ:

Yoshida, **Odrzywolek**

Kato et al. (2020)

異なるshell燃焼の経過

いずれのモデルでも超新星ニュートリノよりも数は少ない

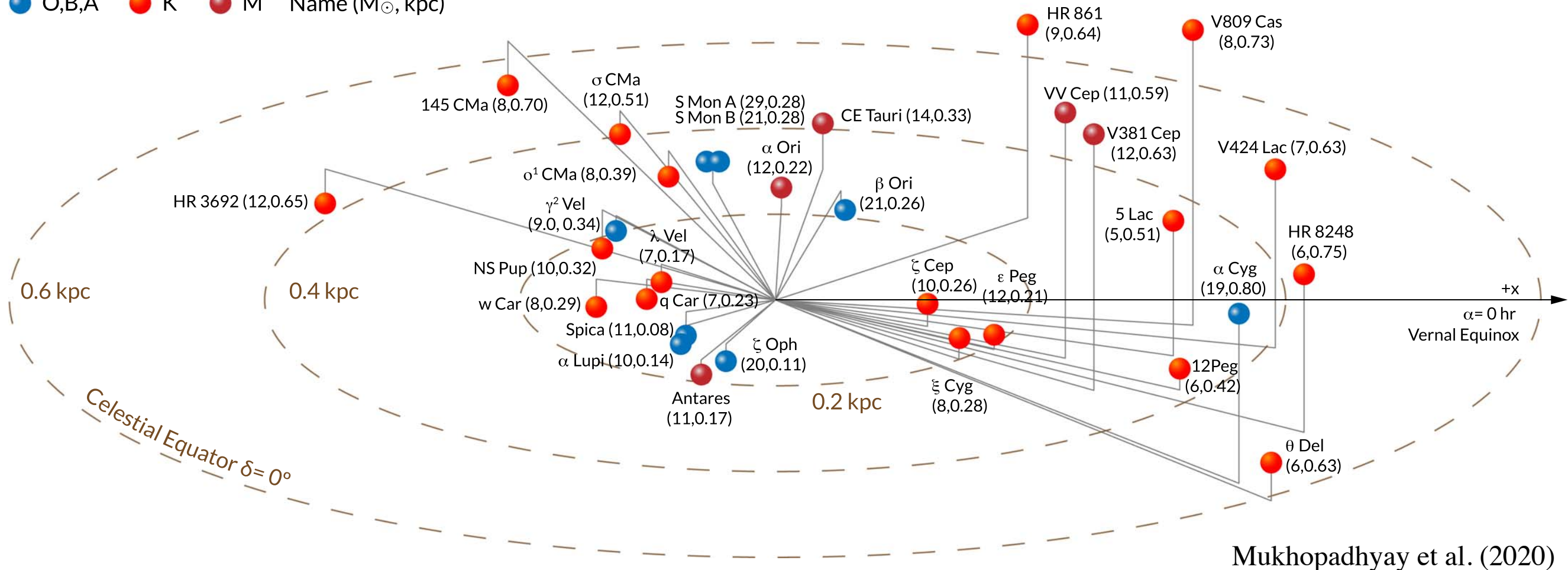
目次

- 大質量星の進化とニュートリノ放出
- 超新星前兆ニュートリノの観測予測
- 超新星ニュートリノ観測から光学観測までのtime scale
- 将来の超新星前兆ニュートリノ観測からわかること

近傍の超新星候補天体

● 推定質量がある < 1kpc の 31 超新星候補天体

● O,B,A ● K ● M Name (M_{\odot} , kpc)



● < 1kpc の 41 赤色超巨星

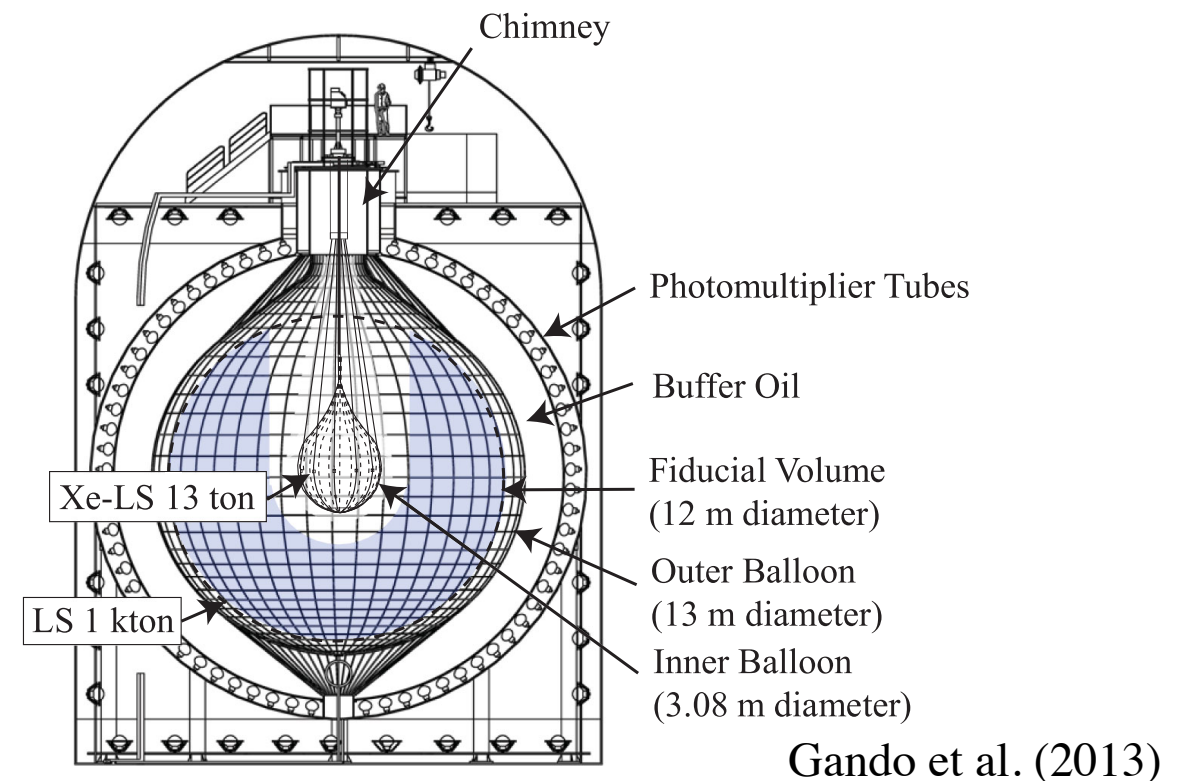
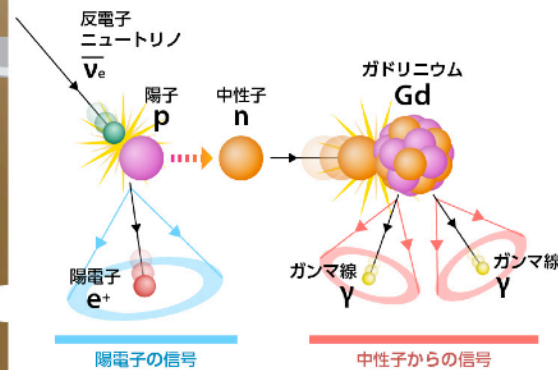
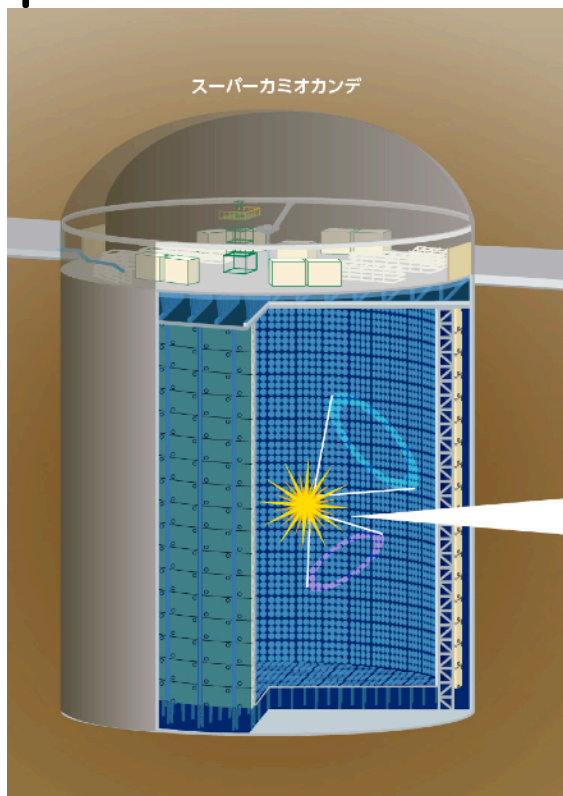
(Nakamura et al. 2016; Kato et al. 2020)

ニュートリノ観測

● Inverse beta decay (IBD)



● Super-Kamiokande with Gadolinium ● KamLAND



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/whatsnew/2020/08/sk-gd.html>

(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo

Inner detector : 32 kton

$E_{\bar{\nu}_e} > 5 \text{ MeV}$ for delayed coincidence (DC)

$E_{\bar{\nu}_e} > 1.8 \text{ MeV}$ for single neutron events
(Simpson et al. (The S-K Collaboration) 2019)

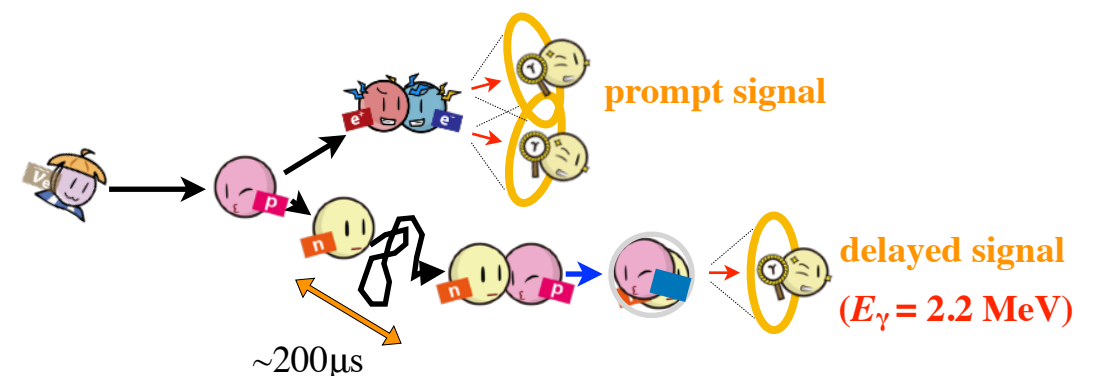
● JUNO

~20 kton 液体シンチレータ

$E_{\bar{\nu}_e} > 1.8 \text{ MeV}$

~1 kton 液体シンチレータ

$E_{\bar{\nu}_e} > 1.8 \text{ MeV}$



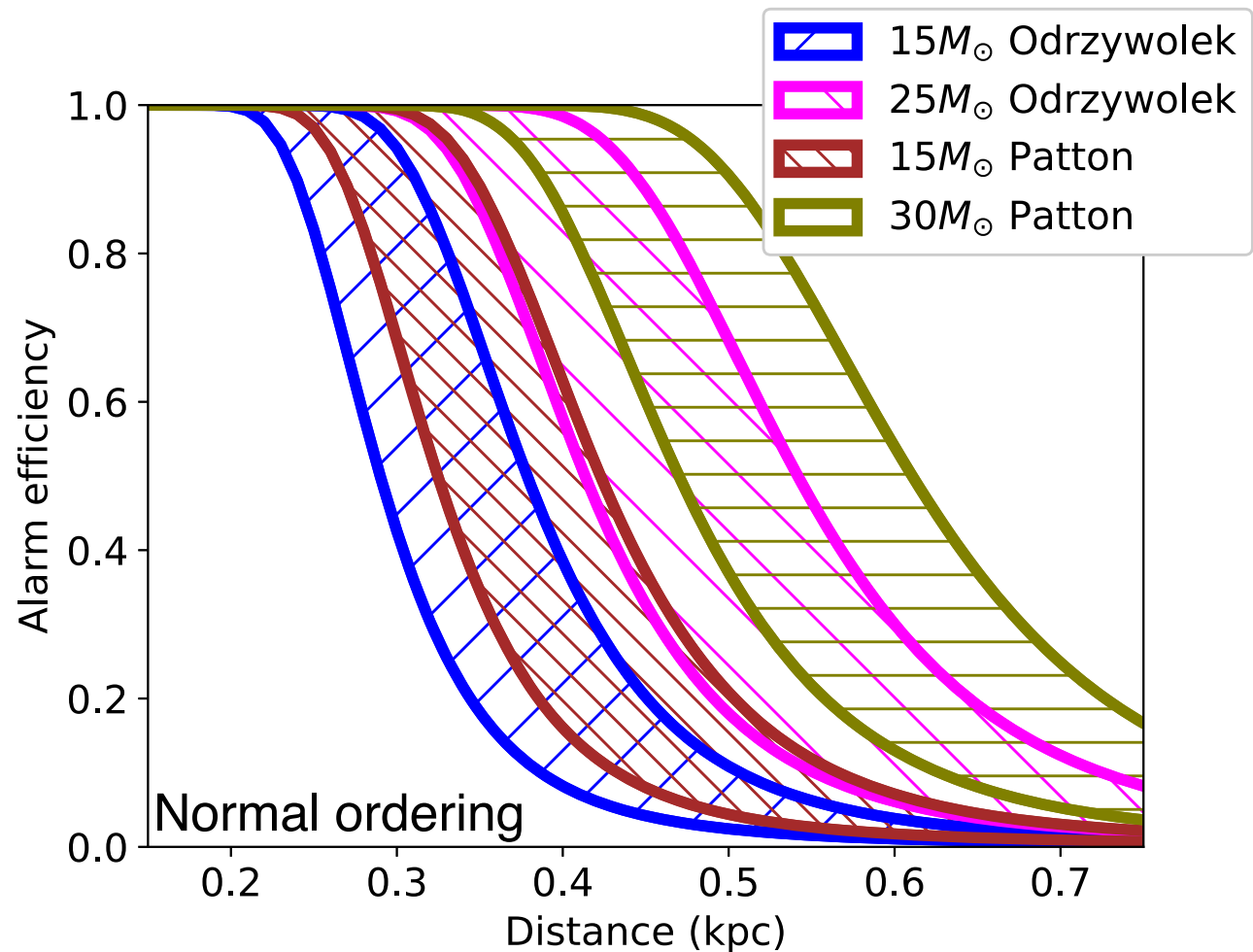
© <http://higgstan.com>

超新星前兆ニュートリノの検出

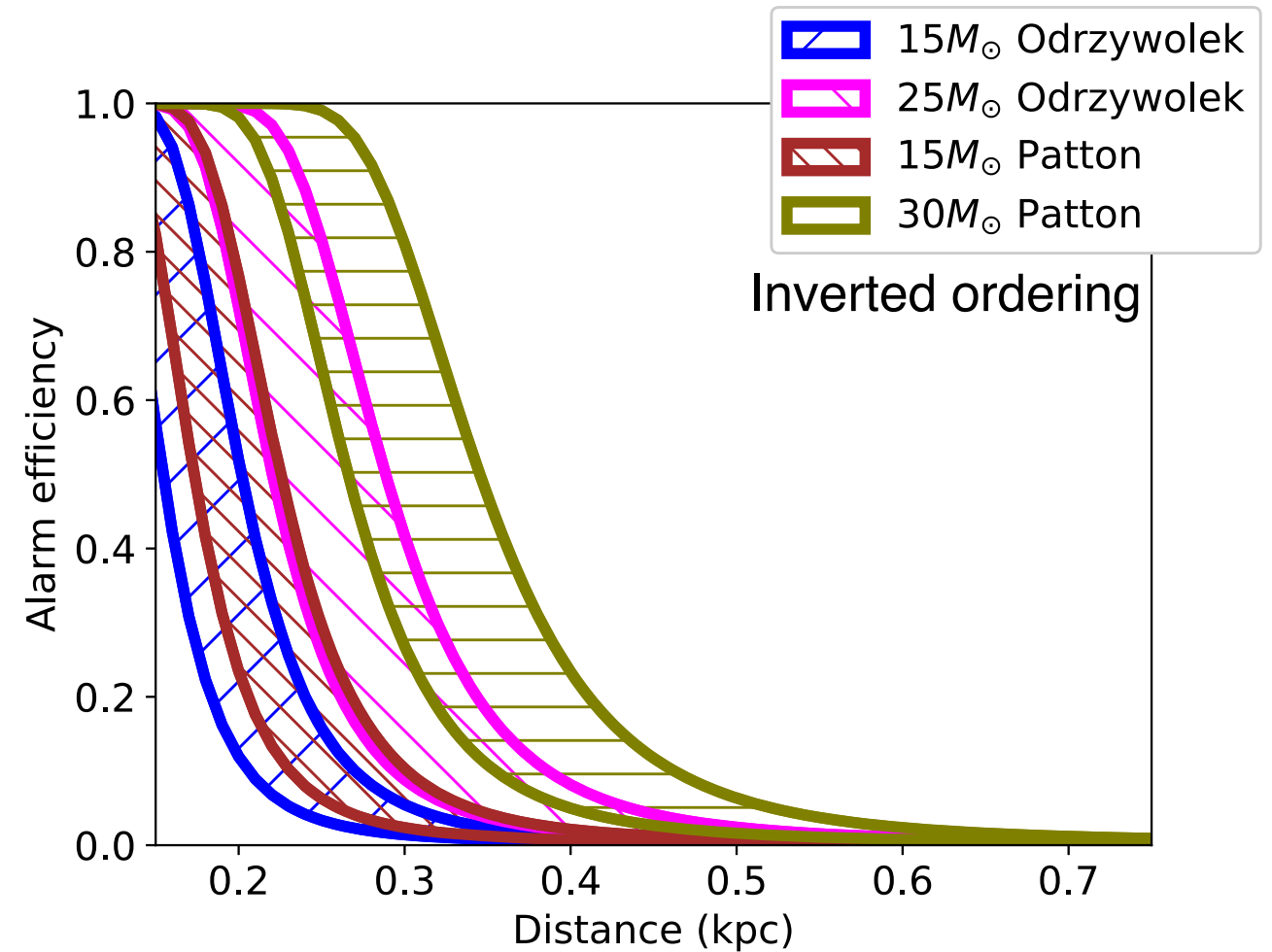
●Collapseまでの12時間に前兆ニュートリノを検出できる距離

(Simpson et al. (The S-K Collaboration) 2019)

FPR: False positive rate



(c) NO, FPR=1/year



(d) IO, FPR=1/year

超新星前兆ニュートリノのAlarm Time

● $15 M_{\odot}$ model, $d = 200$ pc

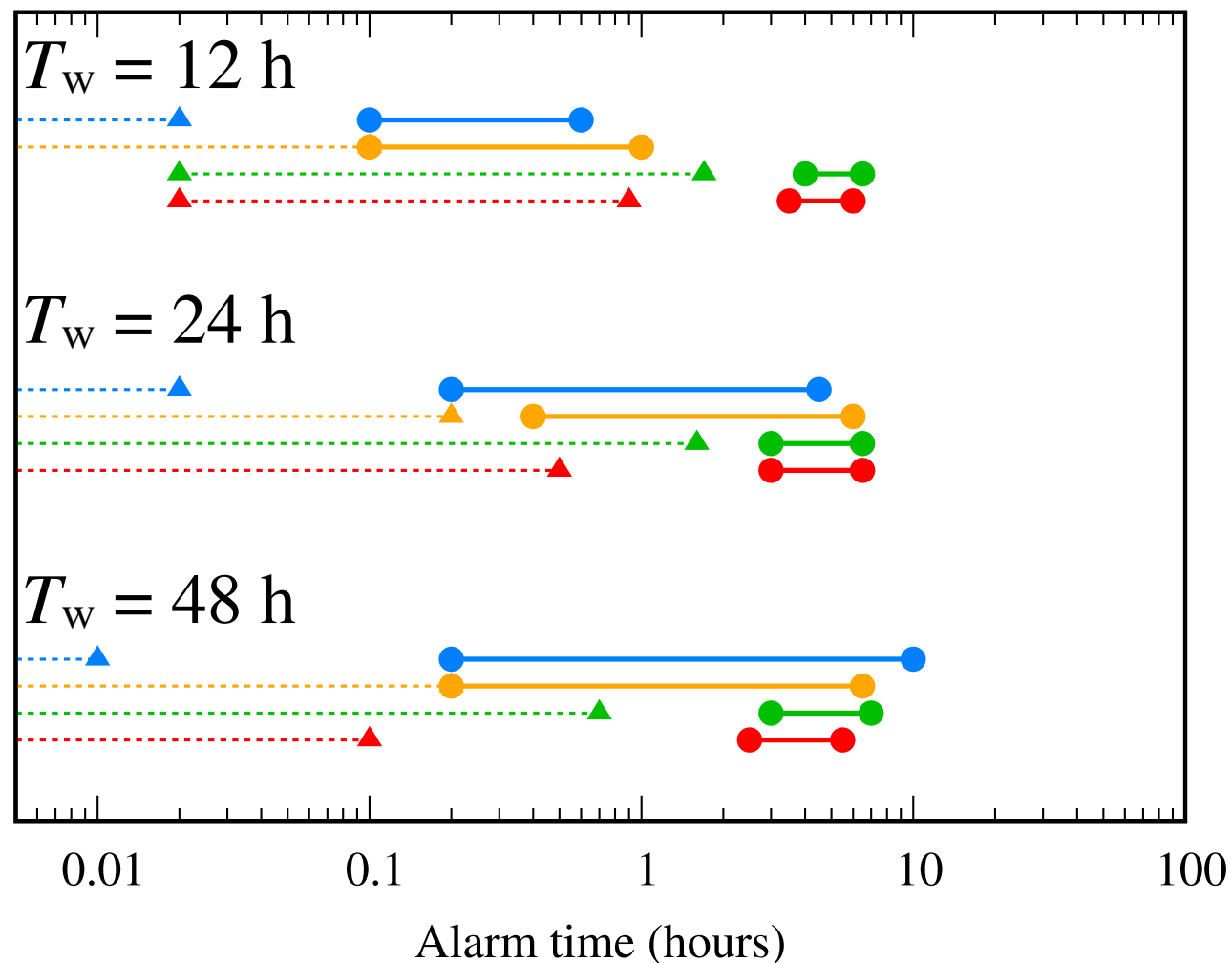
Kato, Yoshida, Odrzywolek, Patton

Data from Table 2 in Kato et al. (2020)

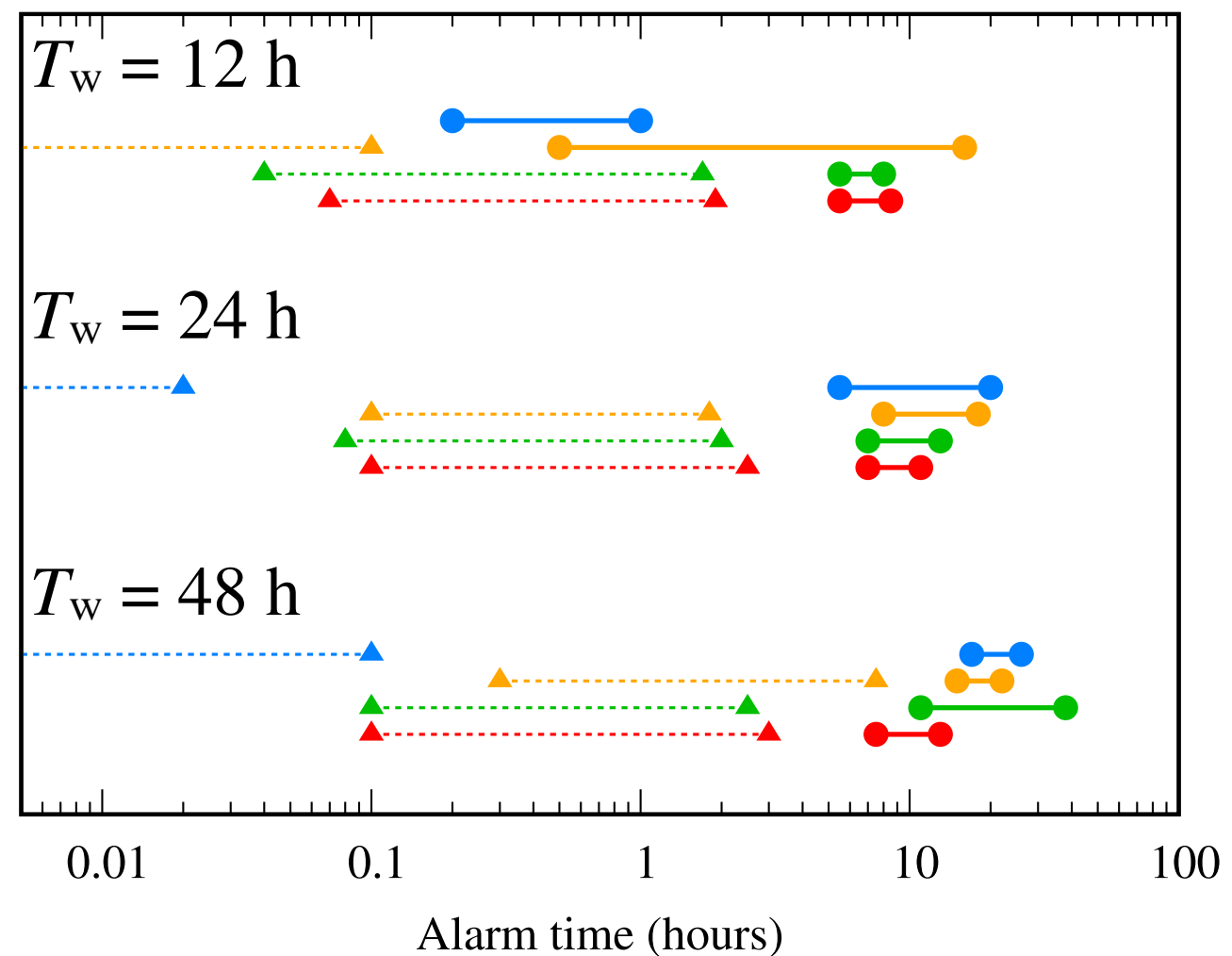
Alarm time: the false alarm rate = 1 event per year.

—●— Normal ordering
- - -▲- - - Inverted ordering

SK-Gd



KamLAND



超新星前兆ニュートリノのDC detection number

● $15 M_{\odot}$ model, $d = 200$ pc

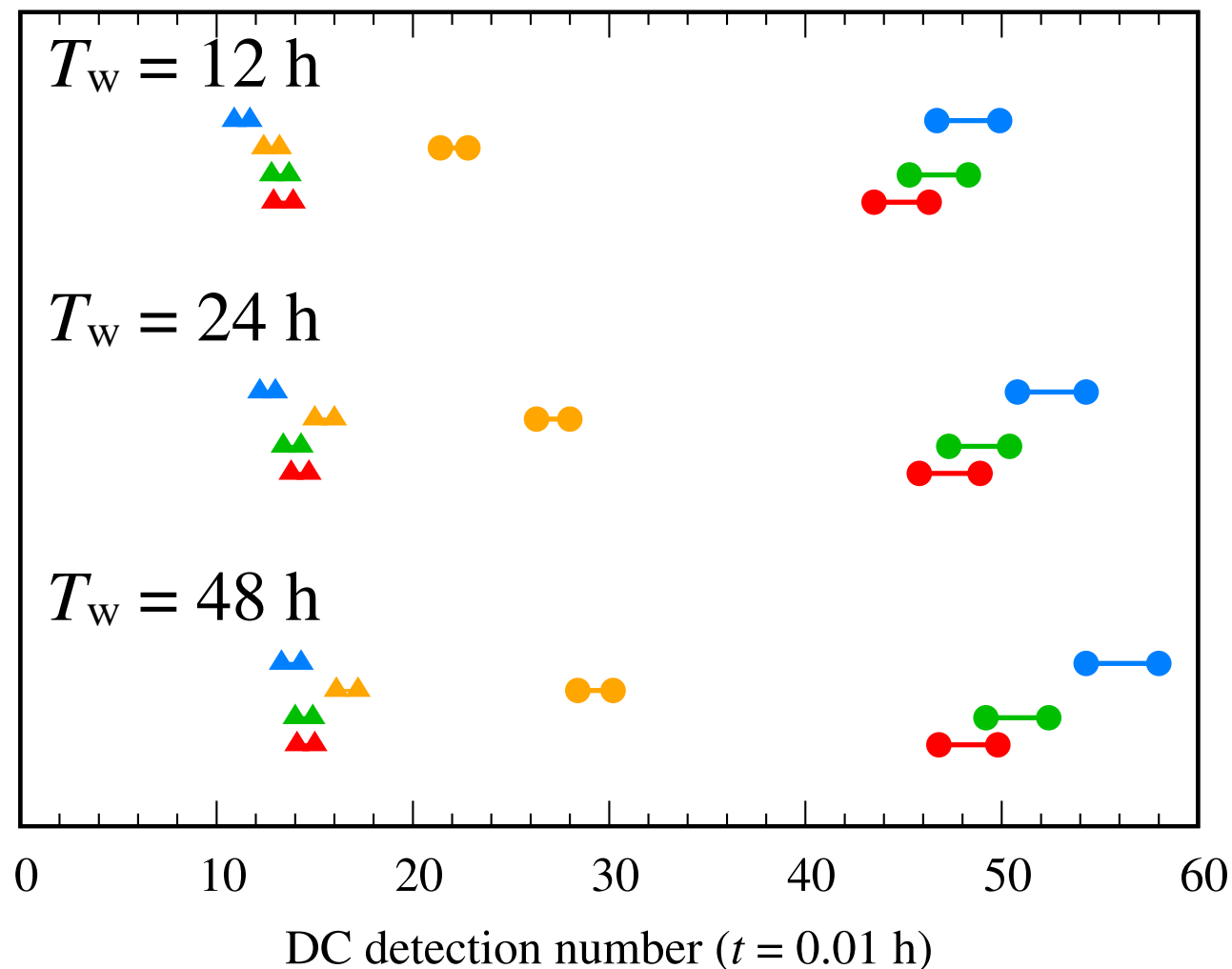
Kato, Yoshida, Odrzywolek, Patton

Data from Table 2 in Kato et al. (2020)

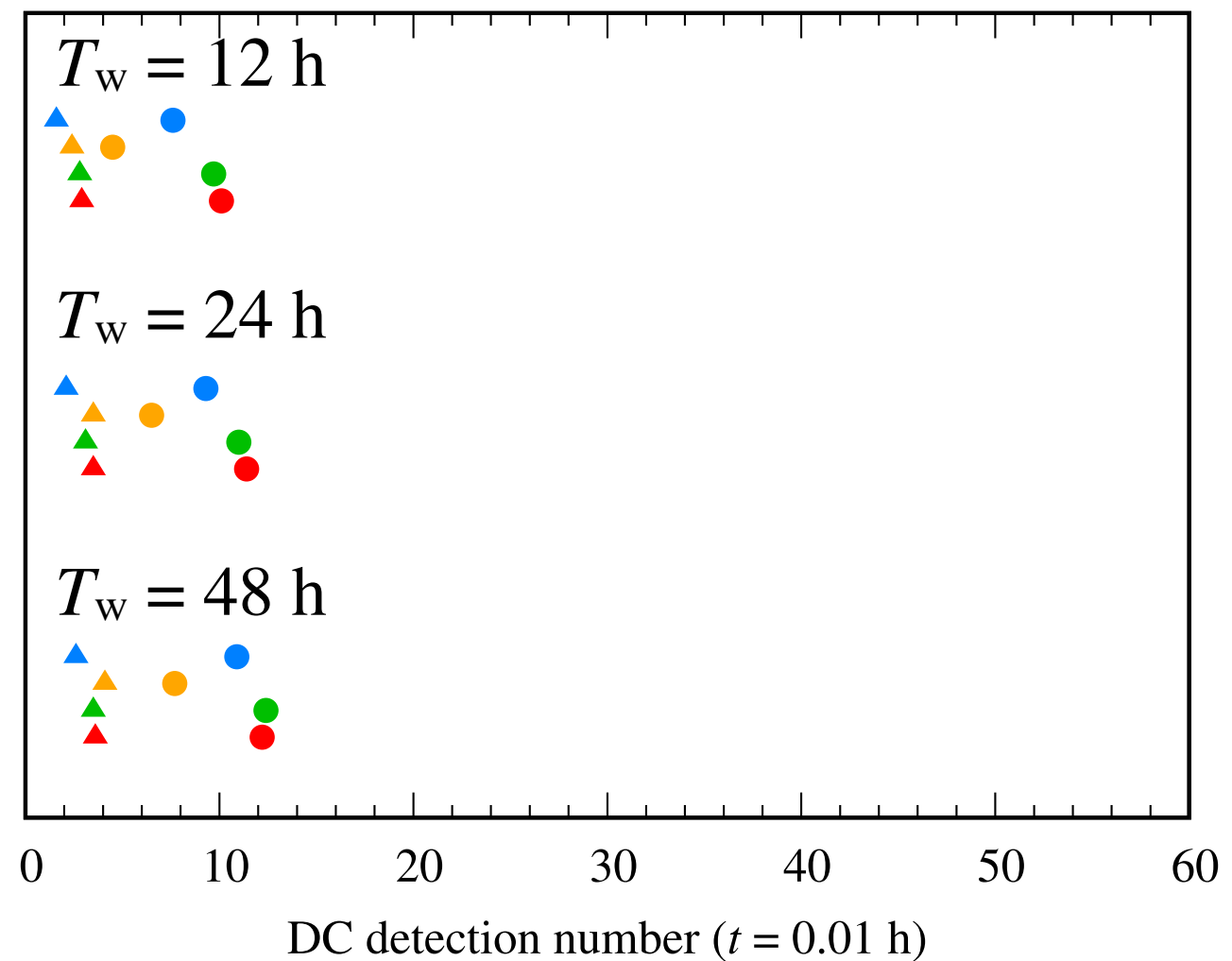
$$N_s(t, d) = N_P \int_t^{t+T_w} F_{\bar{\nu}_e}(E_{\nu}, t', d) \sigma(E_{\nu}) dE_{\nu} dt'$$

—●— Normal ordering
▲..... Inverted ordering

SK-Gd

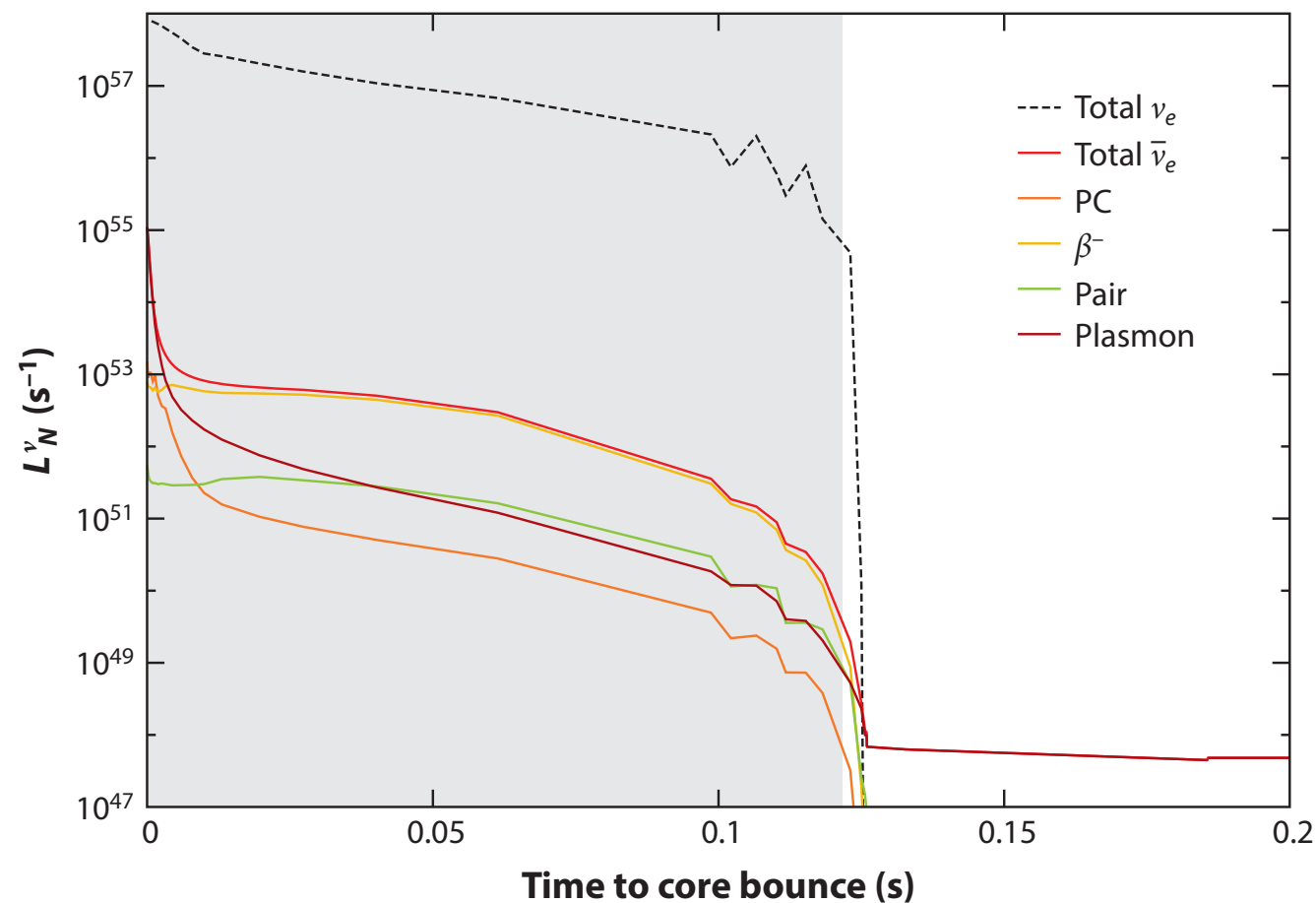


KamLAND



電子捕獲型超新星からの前兆ニュートリノ

- $9 M_{\odot}$ の星(ECSN親星)からのニュートリノ
 - ➡ ごく短い時間(~ 0.1 s)のみニュートリノを観測可能
大量の ν_e が放出
 - ➡ SKやKamLANDでの $\bar{\nu}_e$ イベント数は少ない



Kato et al. (2020)

イベント数@200 pc

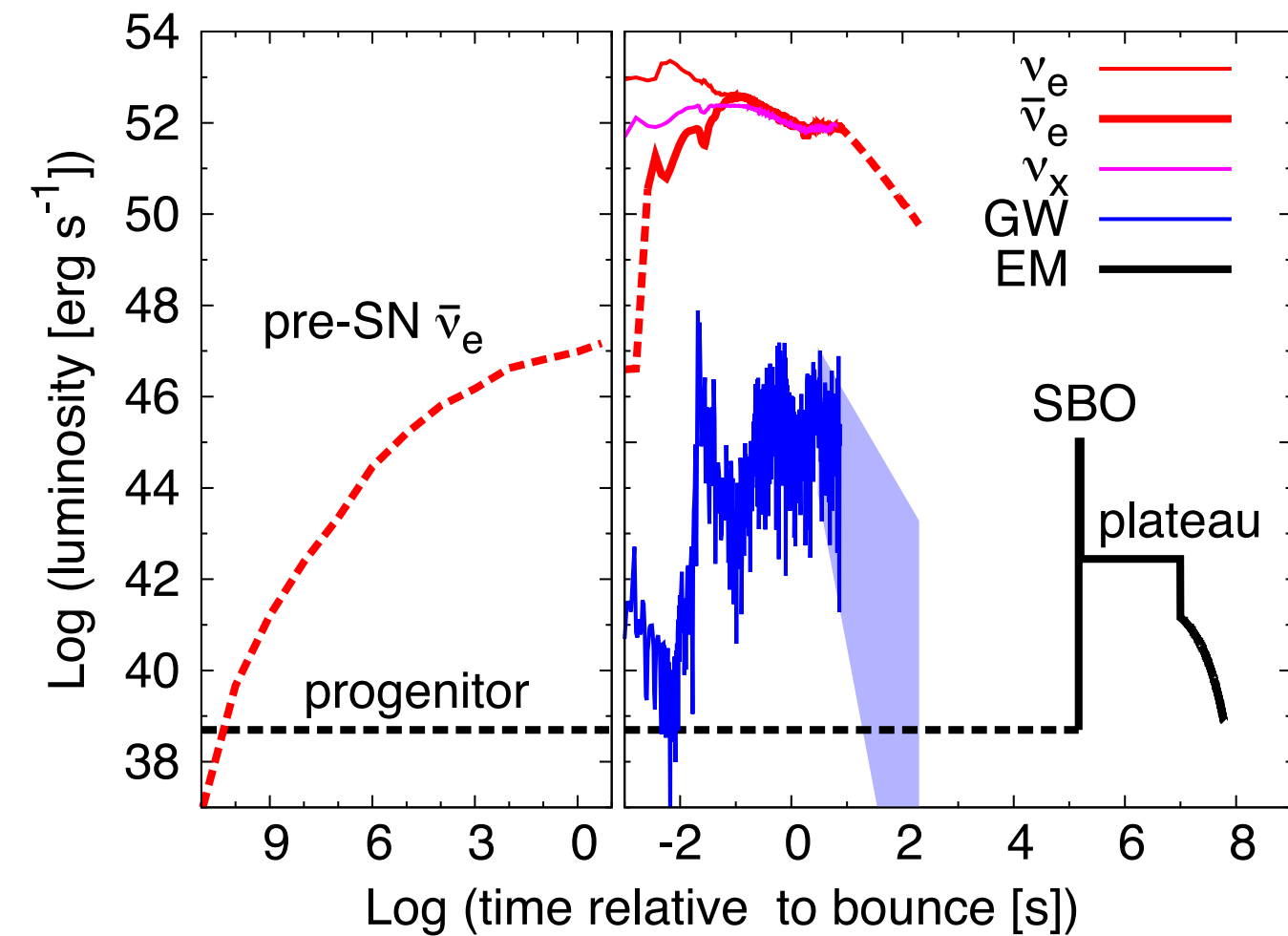
	$9 M_{\odot}$		$15 M_{\odot}$	
	Normal	Inverted	Normal	Inverted
SK	0.93	0.03	89.9	20.3
KamLAND	0.05	0.002	44.3	10.1
HK	11.6	0.42	363	37.7
JUNO	0.98	0.04	894	204
DUNE (5 MeV)	1765	22685	169	2142
DUNE (10.8 MeV)	1238	15910	69.3	895

Data from Kato et al. (2017)

目次

- 大質量星の進化とニュートリノ放出
- 超新星前兆ニュートリノの観測予測
- 超新星ニュートリノ観測から光学観測までのtime scale
- 将来の超新星前兆ニュートリノ観測からわかること

超新星ニュートリノ観測から光学観測へ

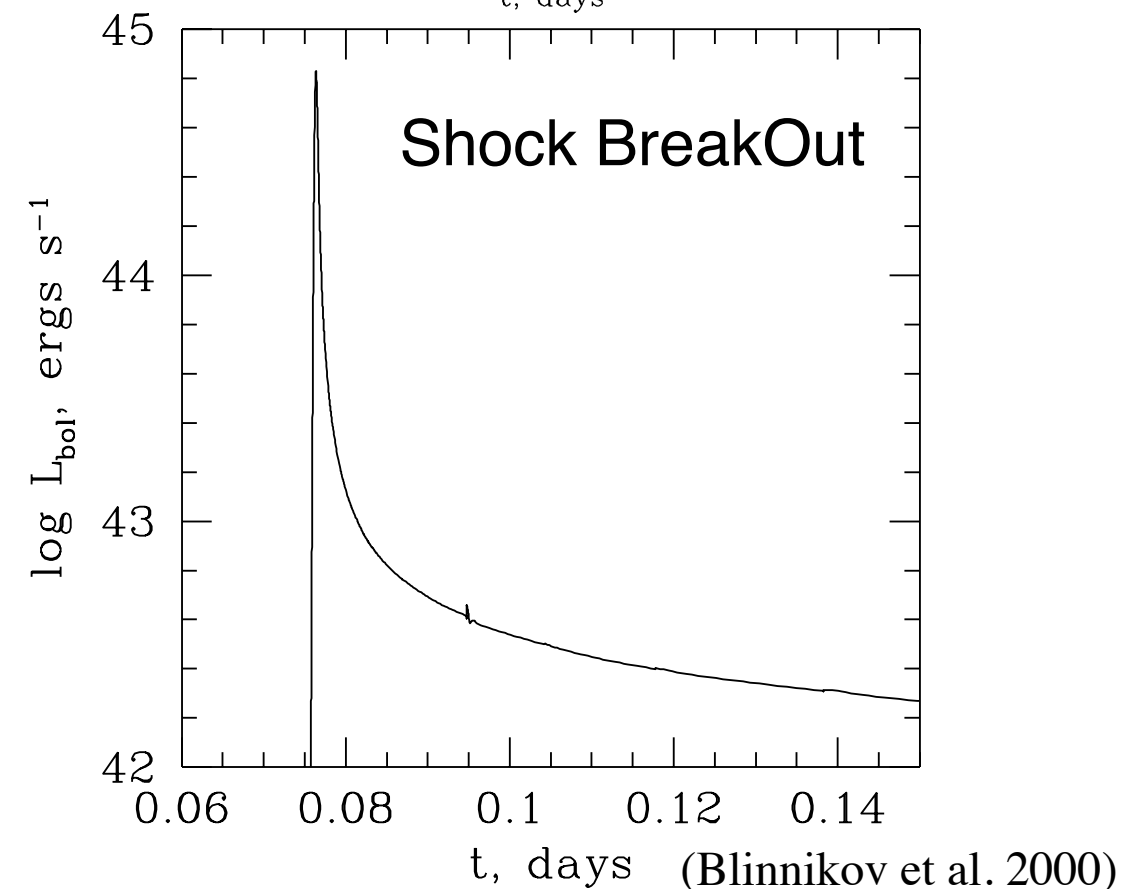
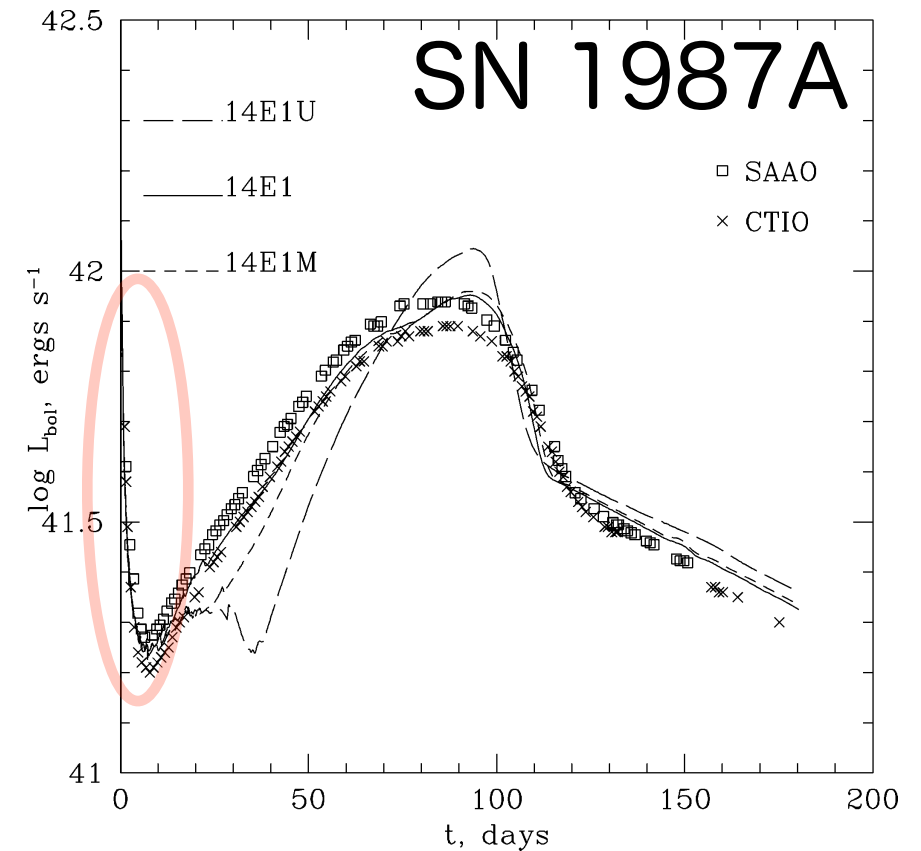


(Nakamura et al. 2016)

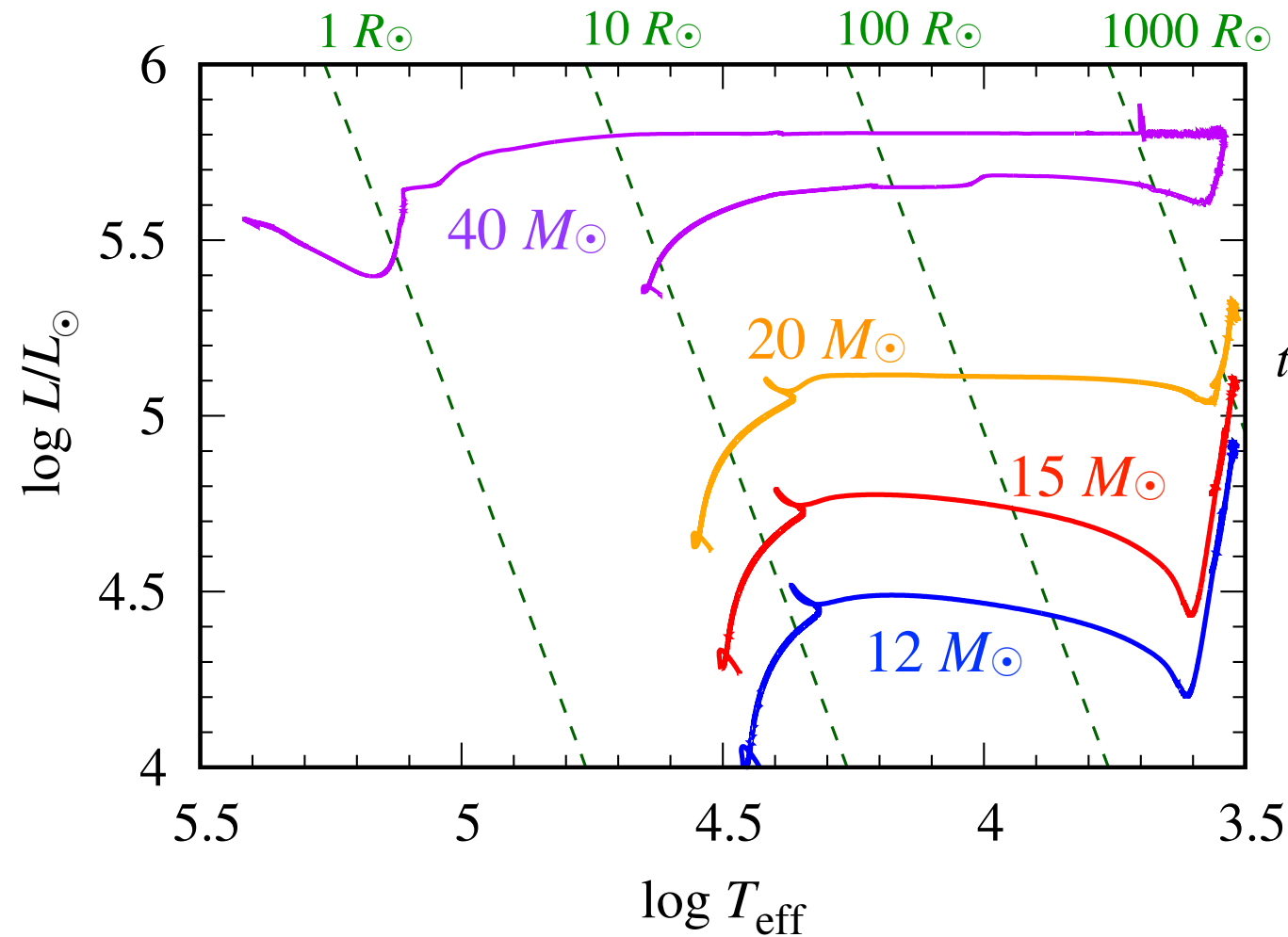
● 光学観測までの時間

➡ 衝撃波面が星の表面に達する時間
親星と爆発の性質に依存

$$t_{\text{SBO}} \sim R_* \left(\frac{M_{ej}}{E} \right)^{1/2}$$



超新星親星とSBO time



$$t_{\text{SBO}} \sim 1.3\text{d} \left(\frac{R_*}{1000 R_\odot} \right) \left[\left(\frac{M_{\text{ej}}}{10 M_\odot} \right) \left(\frac{E}{1 \times 10^{51} \text{erg}} \right)^{-1} \right]^{1/2}$$

(Blinnikov et al. 2000 より)

- 光学観測(SBO)までの時間 ($M_{\text{ej}} = 10 M_\odot, E = 10^{51} \text{ erg}$)

赤色超巨星 (type II) ($R_* = 1000 R_\odot$) → ~ 1.3 day

青色超巨星 (SN 1987A) ($R_* = 50 R_\odot$) → ~ 1.6 hours

Wolf-Rayet星 (type Ibc) ($R_* = 1 R_\odot$) → ~ 2 minutes

詳細なSBOの計算については、例えばSuzuki et al. (2016, ApJ 825, 92)

目次

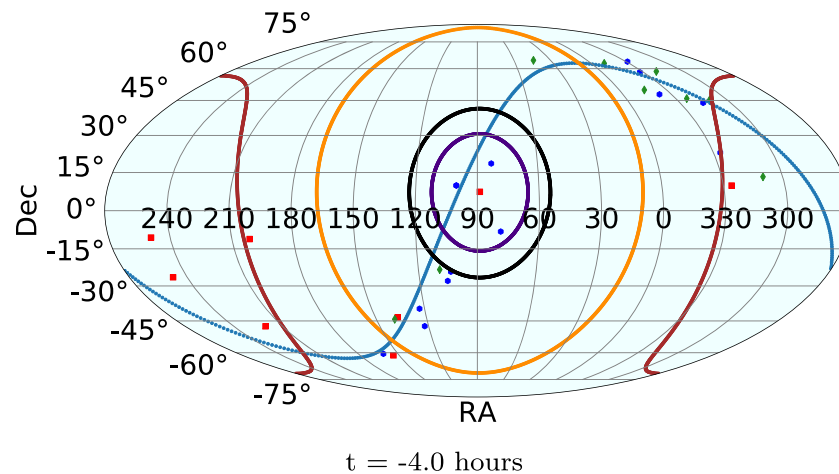
- 大質量星の進化とニュートリノ放出
- 超新星前兆ニュートリノの観測予測
- 超新星ニュートリノ観測から光学観測までのtime scale
- 将来の超新星前兆ニュートリノ観測からわかること

超新星前兆ニュートリノによる親星位置の特定

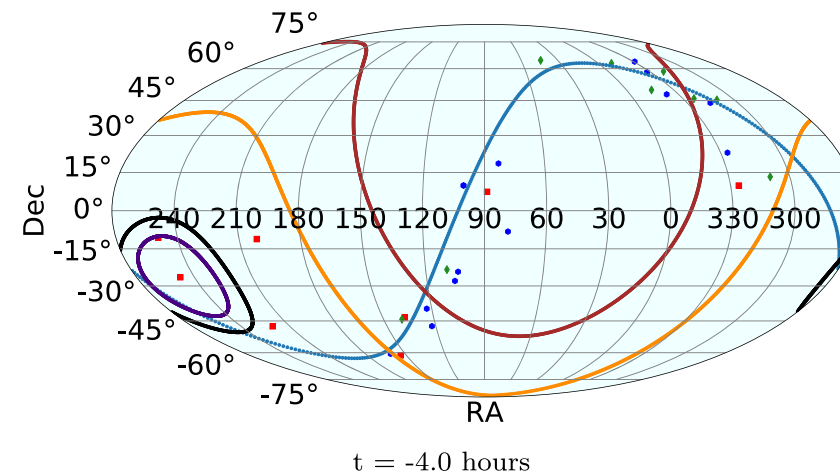
- JUNOの液体シンチレータ(LS, LS-Li)によるニュートリノ観測を用いた親星位置の特定 $15M_{\odot}$ modelを仮定

(Mukhopadhyay et al. 2020)

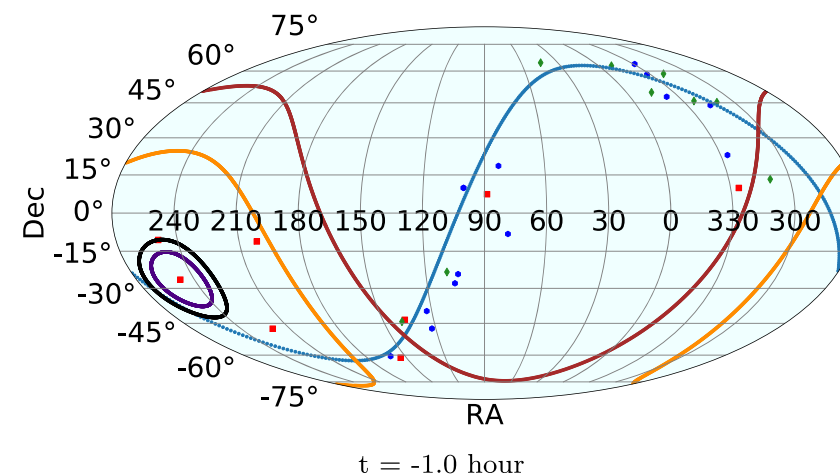
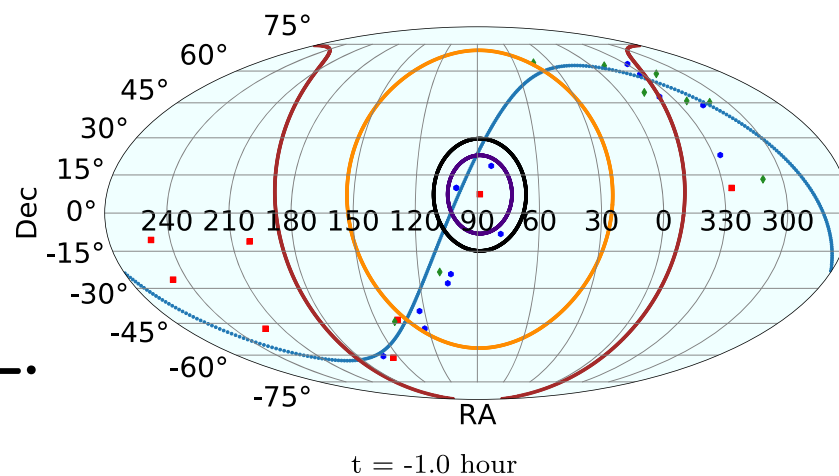
Betelgeuse
(222 pc)



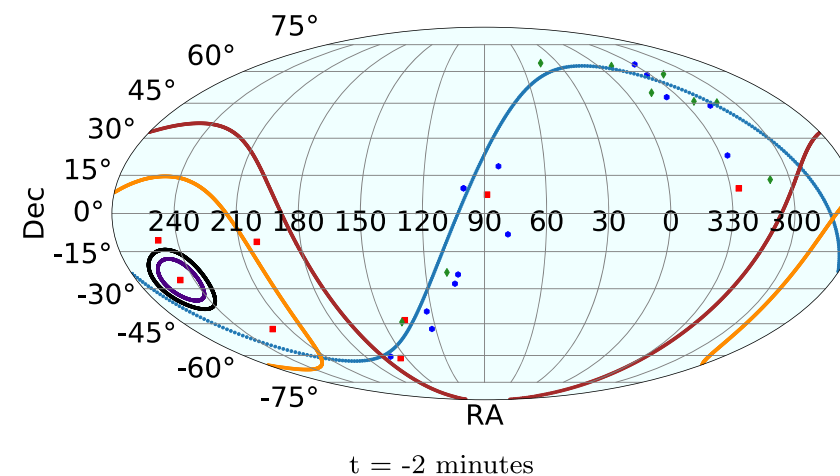
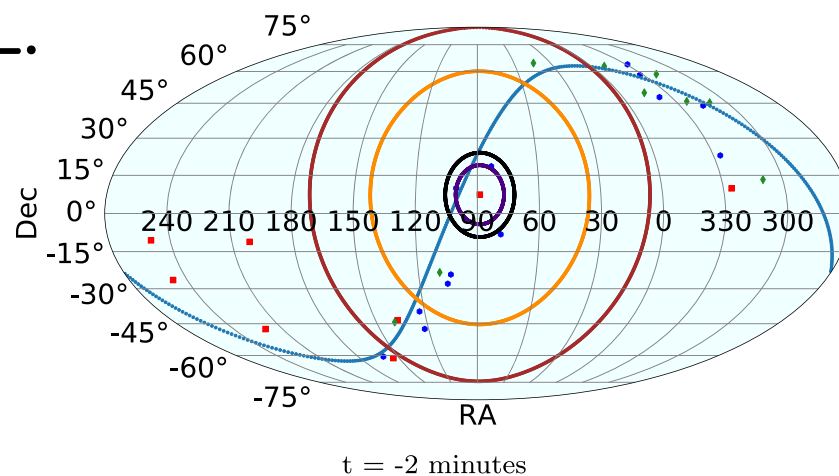
Antares
(169 pc)



LS:
68%, 90% C.L.



LS-Li:
68%, 90% C.L.



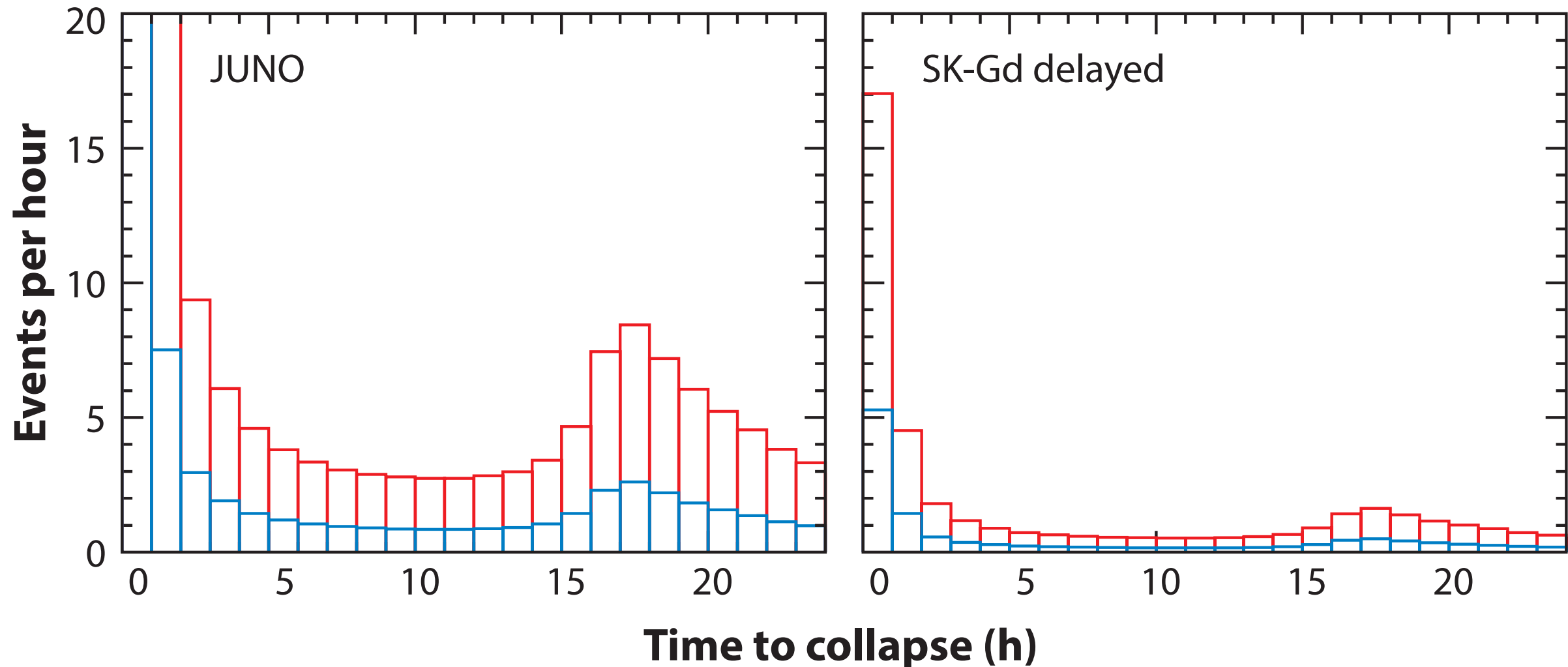
■ $D \leq 0.25$ kpc
● $0.25 < D \leq 0.6$ kpc
◆ $0.6 < D \leq 1.0$ kpc

超新星前兆ニュートリノを通したshell燃烧の観測

● JUNOとSK-Gd (single n)のEvent rateの時間変化

15 M_{\odot} model (Yoshida model), $d = 200$ pc

(Kato et al. 2020)



● ~ 17 h 前のpeak → O shell燃烧による星の膨張

観測数が上がればshell燃烧の効果を直接観測できる可能性

まとめ

- 大質量星の進化とニュートリノ放出
 - ケイ素燃焼以降のニュートリノ $\rightarrow L_{\bar{\nu}_e} \lesssim 10^{48} [\text{erg s}^{-1}]$
 - \rightarrow 近傍 (< 1 kpc) 大質量星で観測可能: 超新星前兆ニュートリノ
 - e^-e^+ pair annihilation, nuclear weak interaction
- 超新星前兆ニュートリノの観測予測
 - SK-Gdでのcollapseまでの12時間での観測距離
 - \rightarrow < 650 pc (NO), < 400 pc (IO)
 - $15 M_{\odot}$ model@200 pc とした時のalarm time
 - \rightarrow SK-Gdで < 10 h (NO), < 1 h (IO)
 - KamLANDで < 40 h (NO), < 8 h (IO)
 - EC SN \rightarrow SK-GdやKamLANDで観測されないことで区別可能
- 超新星ニュートリノ観測から光学観測までのtime scale
 - SBOまでの時間は親星の半径に依存
 - \rightarrow 赤色超巨星 ~ 1 d, 青色超巨星 ~ 2 h, Wolf-Rayet星 ~ 2 min