

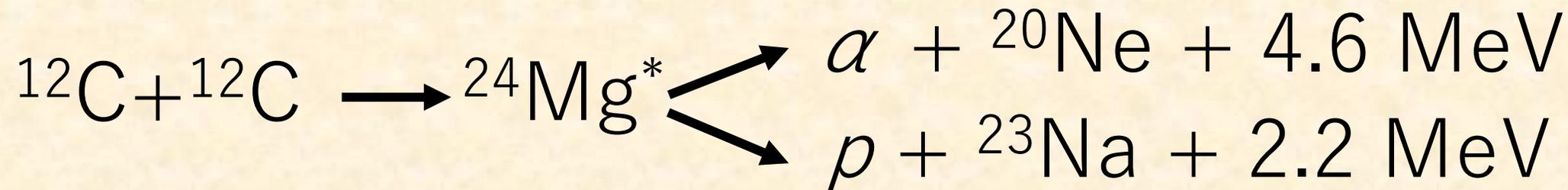
# $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ Reaction *and* Type Ia Supernovae

森 寛治

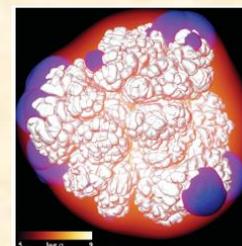
福岡大学爆発天体研究所

Mori, Famiano, Kajino, Kusakabe, and Tang, MNRAS 482 (2019) L70

# $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 反応



SN Ia



Seitenzahl et al. MNRAS 429 (2013) 1156.

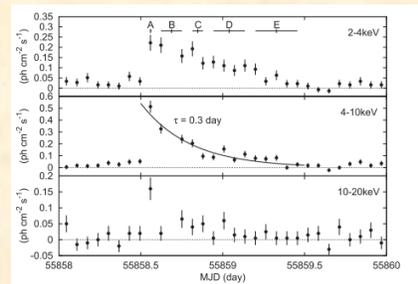
Astrophysical site:

✓ Type Ia supernova (SN Ia)

✓ Stellar evolution

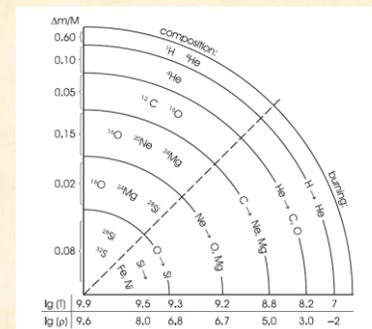
✓ X-ray superburst

X-ray superburst



Serino et al. PASJ 64 (2012) 91.

Stellar evolution

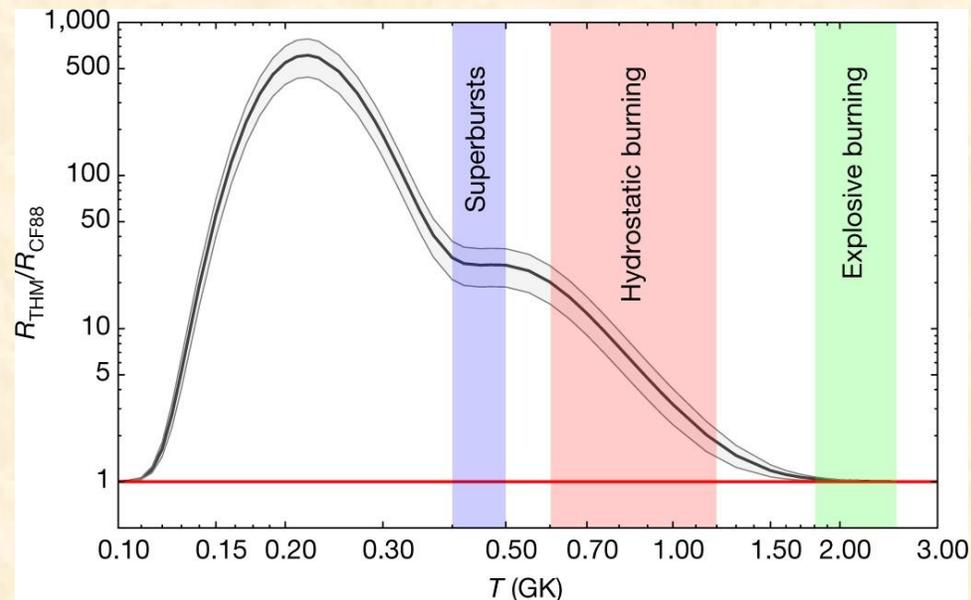


Kippenhahn, Weigert & Weiss, Stellar Structure and Evolution (2012)

# THMによる $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応断面積測定

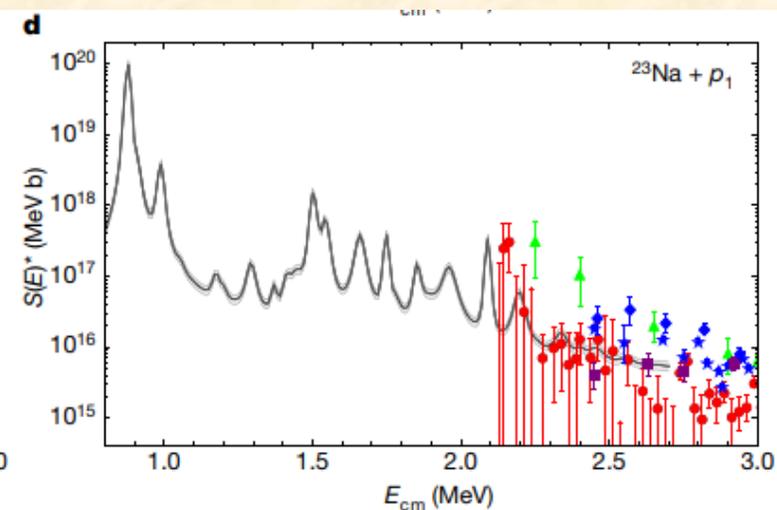
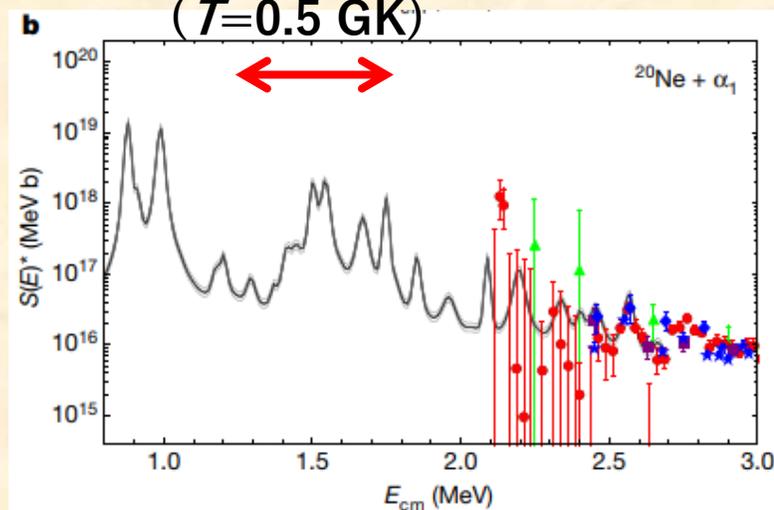
[Tumino et al., Nature 557 (2018) 687]

- 間接測定法(Trojan Horse Method; THM)による成果
- 代理反応として $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, \alpha)^{20}\text{Ne}^2\text{H}$ と $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, p)^{23}\text{Na}^2\text{H}$ を用いる



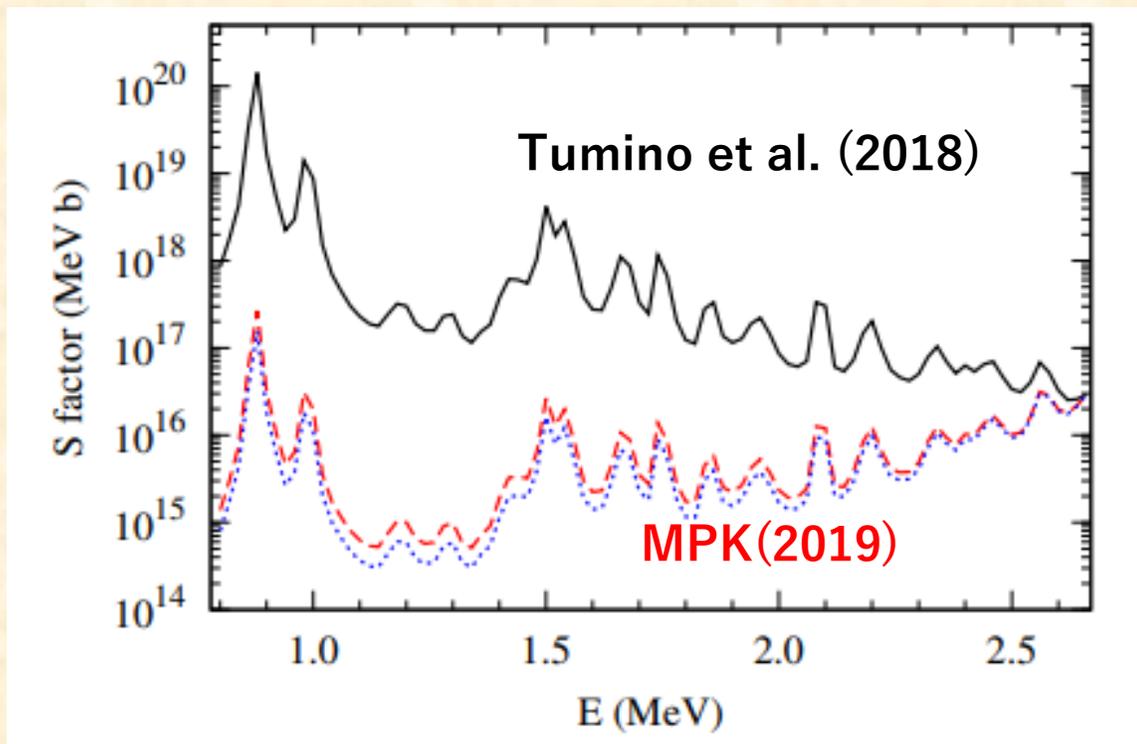
- 低エネルギー共鳴により**反応率が~10倍大きくなる!**

Gamow energy  
( $T=0.5\text{ GK}$ )



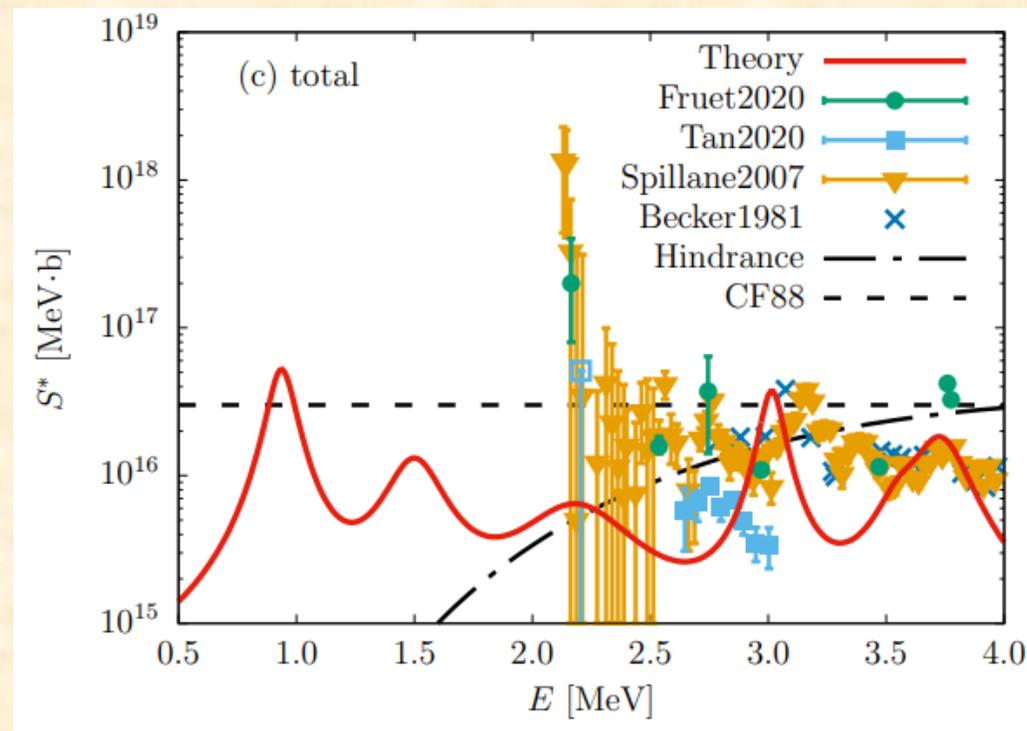
# $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応断面積: 最近の進展

## THMの再解析



Mukhamedzhanov, Pang & Kadyrov, PRC 99 (2019) 064618

## 反対称化分子動力学法による理論計算



Taniguchi & Kimura PLB 823 (2021) 136790

**低エネルギー断面積は従来の値より大きいわけではない?**

→谷口さん講演

# $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 低エネルギー共鳴の宇宙物理的応用

\*This is not a complete list.

## • Ia型超新星

➤ Accreting WD ----- Bravo et al., A&A 535 (2011) A114

➤ 白色矮星連星合体 ----- Mori et al, MNRAS 482 (2019) L70

## • 大質量星の進化 →高橋さん講演

➤ 元素合成 ----- Bennett et al., MNRAS 420 (2012) 3047;  
Pignatari et al., ApJ 762 (2013) 31

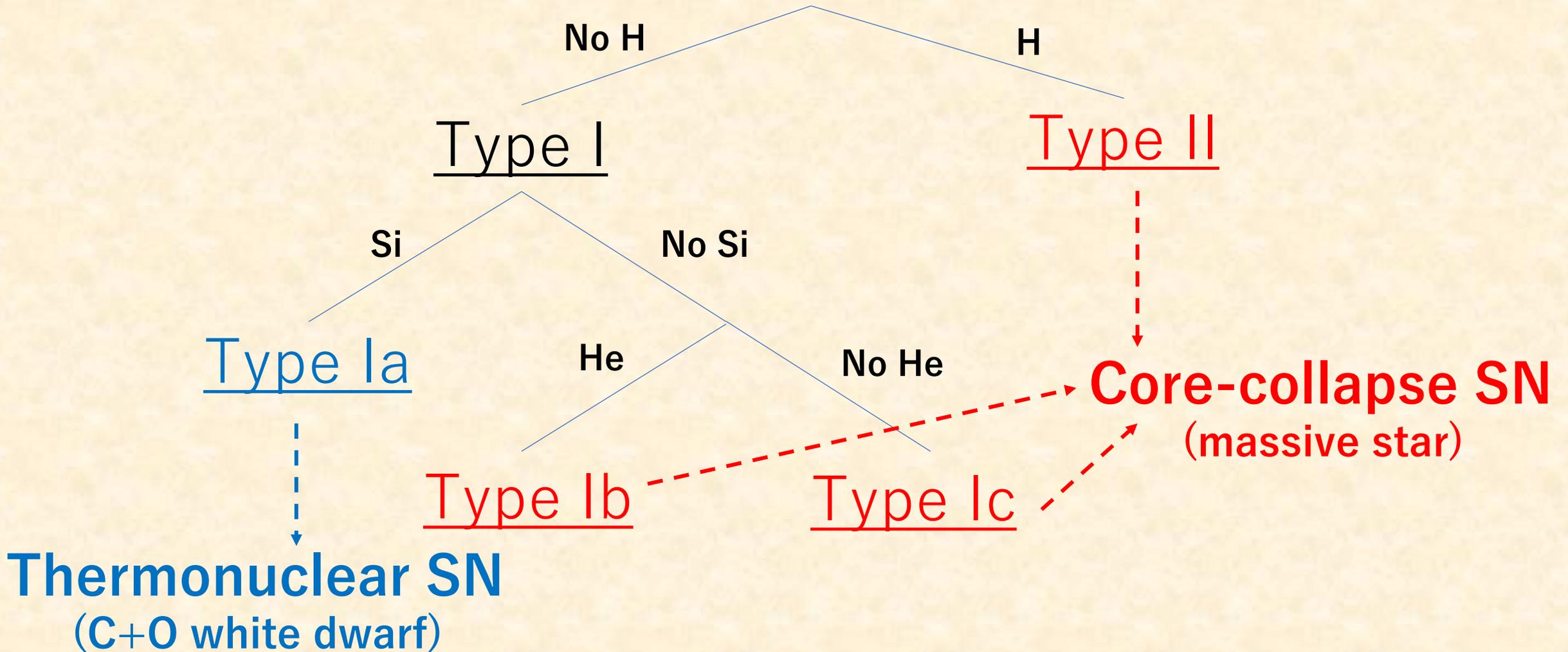
➤ Compactness parameter ---- Chieffi et al., ApJ 916 (2021) 79

## • X線スーパーバースト ----- Cooper, Steiner & Brown, ApJ 702 (2009) 660; Dohi et al., ApJ 937 (2022) 124

→土肥さん講演

# 超新星爆発の分類

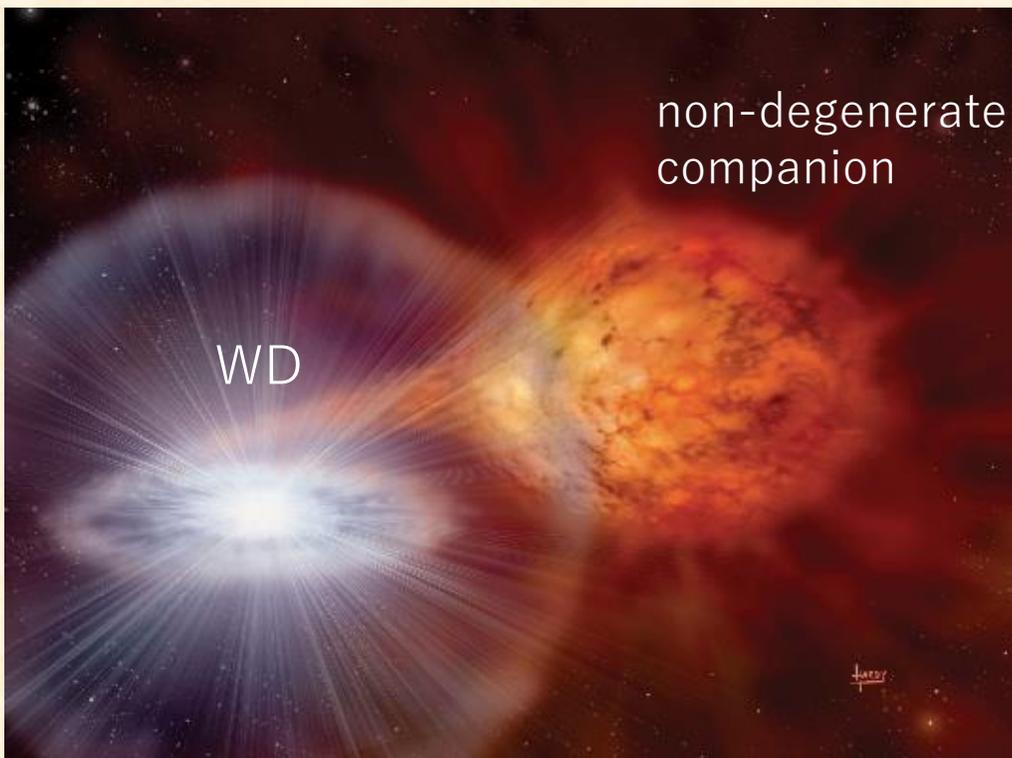
## Supernova (SN)



# Ia型超新星の親星問題

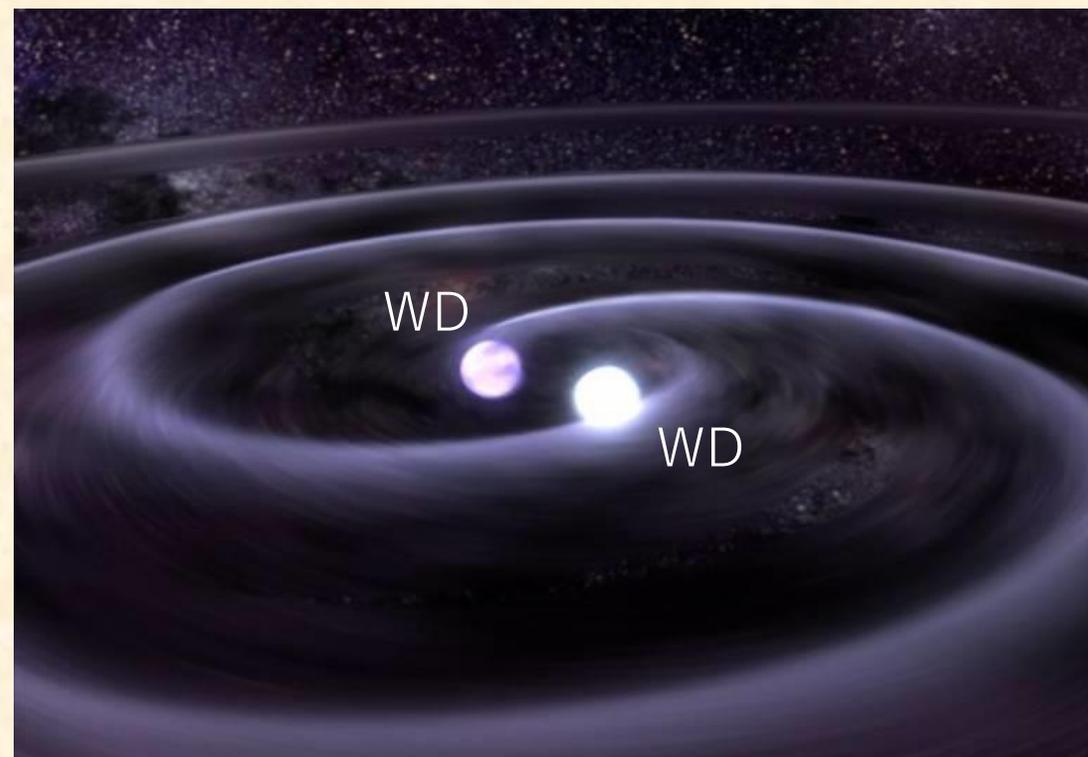
Ia型超新星: C+O白色矮星の熱核爆発

single degenerate scenario



©David Hardy

double degenerate scenario

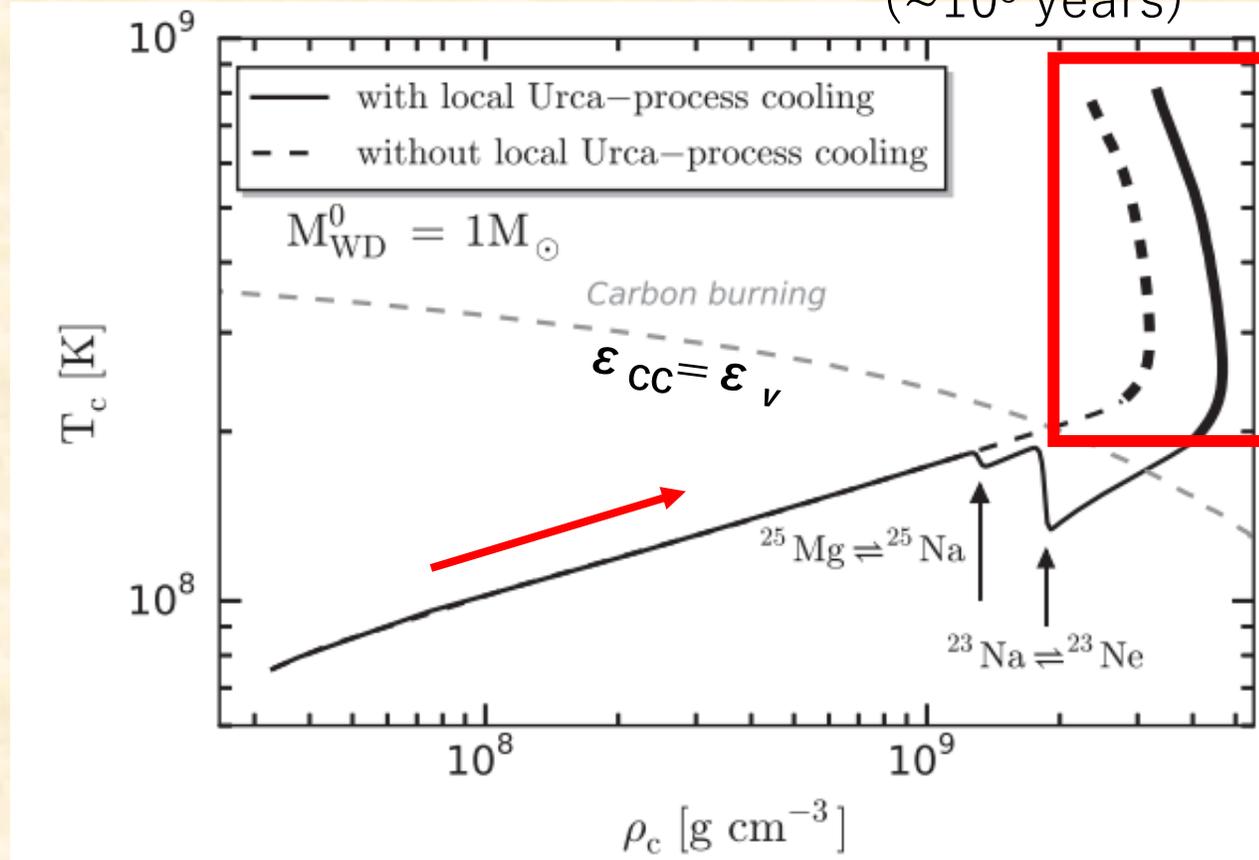


©GSFC / D. Berry

いずれにしても、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応が点火を担う

# Near- $M_{\text{ch}}$ 白色矮星への降着

Carbon simmering 段階  
( $\sim 10^3$  years)



C+C核融合による加熱が  
ニュートリノ冷却より速  
くなる

→ 温度の急激な上昇

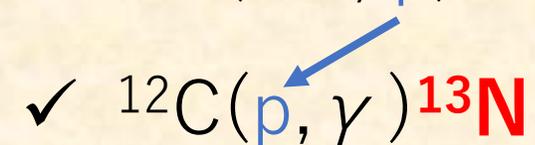
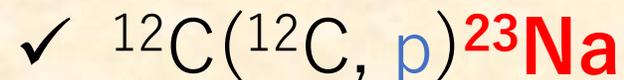
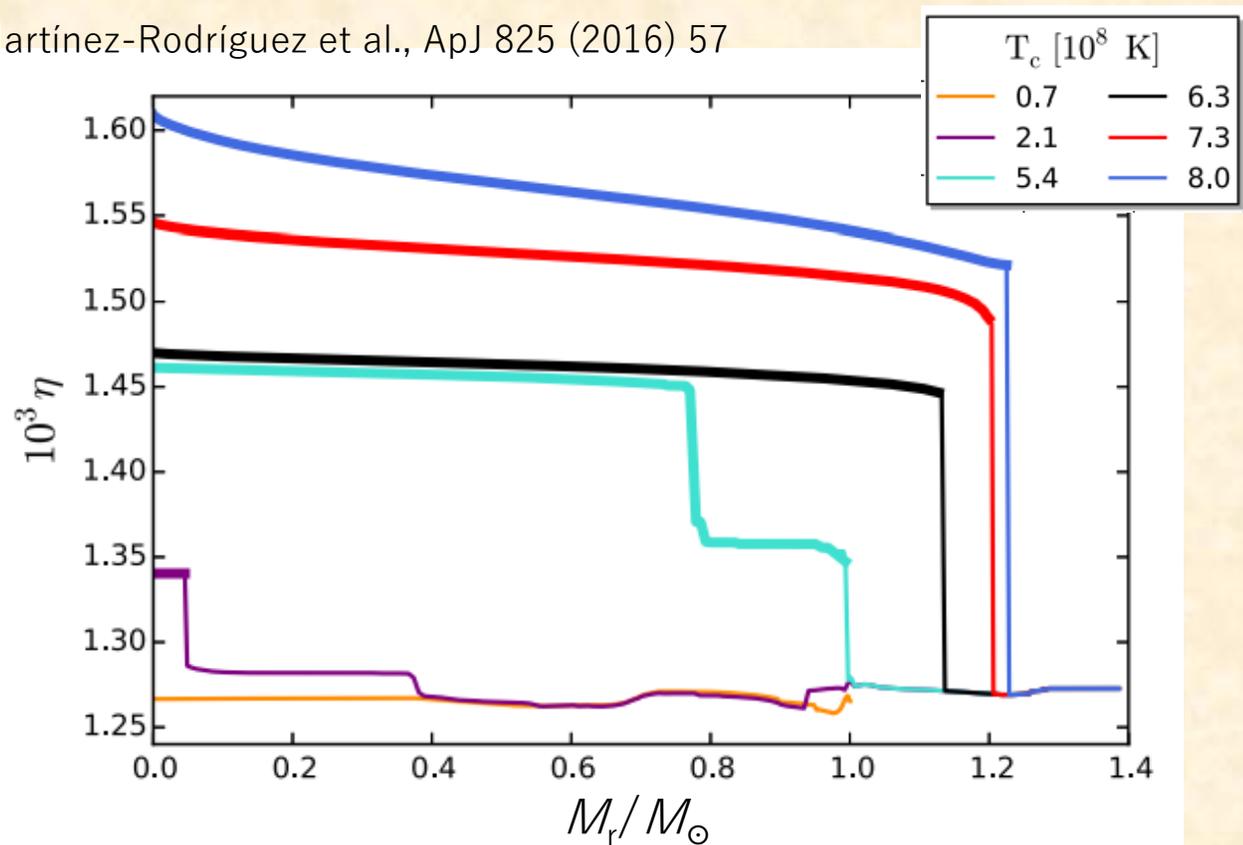
→  $T_c \sim 8 \times 10^8$  Kに至ると

超新星爆発へ

# C simmering 段階における中性子化

Neutron excess:  $\eta = 1 - 2 Y_e$

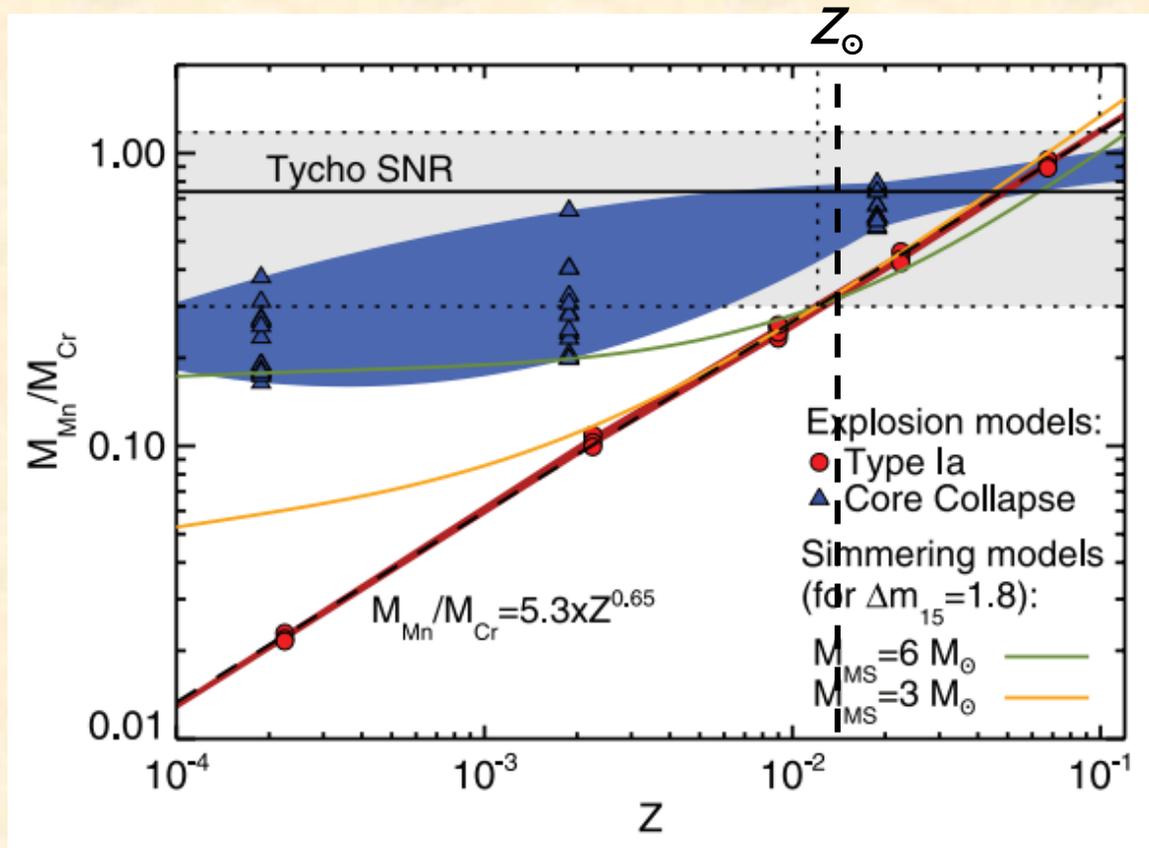
Martínez-Rodríguez et al., ApJ 825 (2016) 57



$^{13}\text{N}$ ,  $^{23}\text{Na}$ に対する電子捕獲  
により、**中性子化が進む**

→超新星爆発の初期条件が  
変化

# 超新星残骸観測への示唆



Badenes, Bravo & Hughes ApJ 680 (2008) L33

✓ C simmeringによりMn/Cr比の観測値に基づく親星の金属量の推定値が変化する

✓ いろいろな物理に依存する

*e.g.*)

Chamulak et al., ApJ 677 (2008) 160;

Piro & Bildsten, ApJ 673 (2008) 1009;

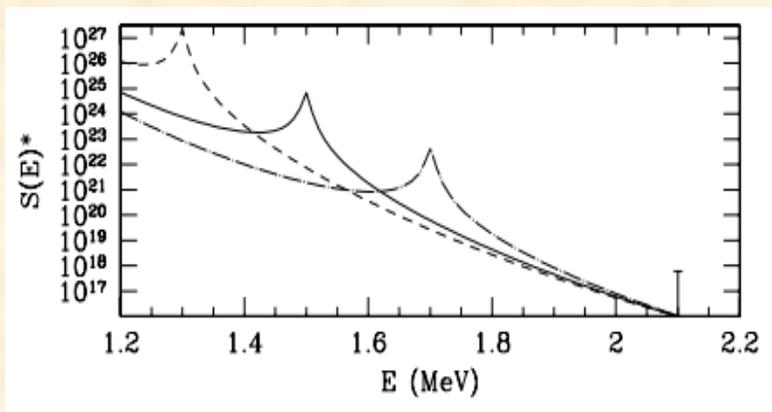
Martínez-Rodríguez et al., ApJ 825 (2016) 57;

Schwab et al., ApJ 851 (2017) 105;

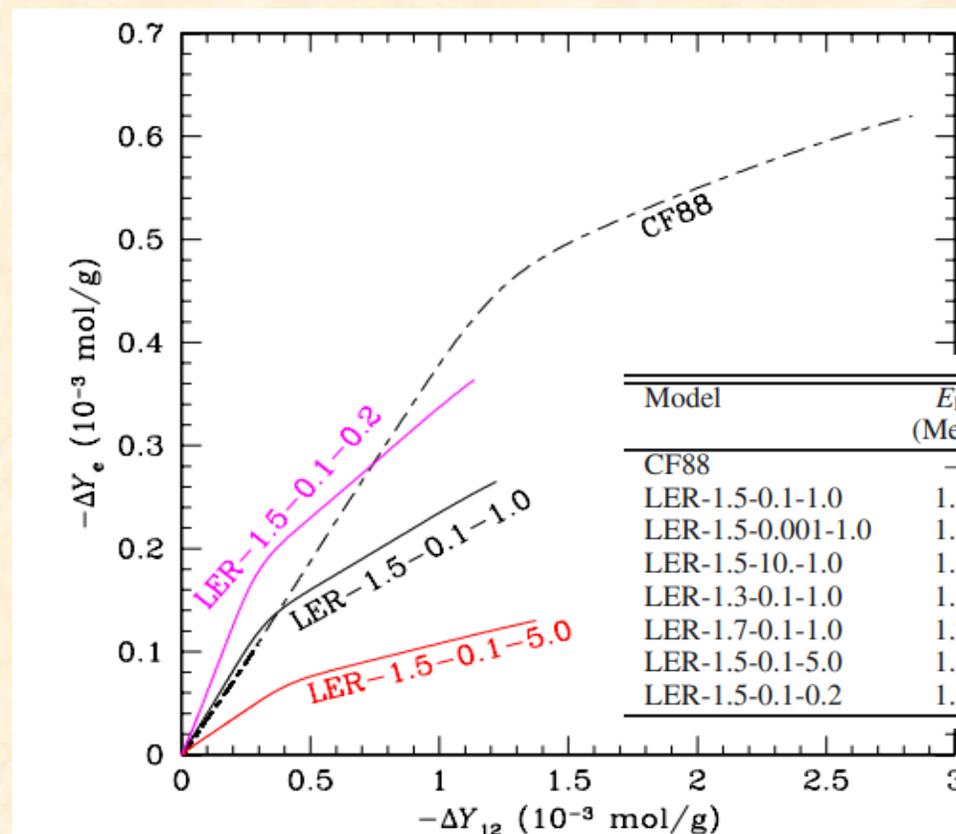
Piersanti et al., ApJ 926 (2022) 103

# C+Cの低エネルギー共鳴の影響

[Bravo et al., A&A 535 (2011) A114]



- C+C反応率が大きい場合、中性子化が抑制される
- 分岐比にも依存する

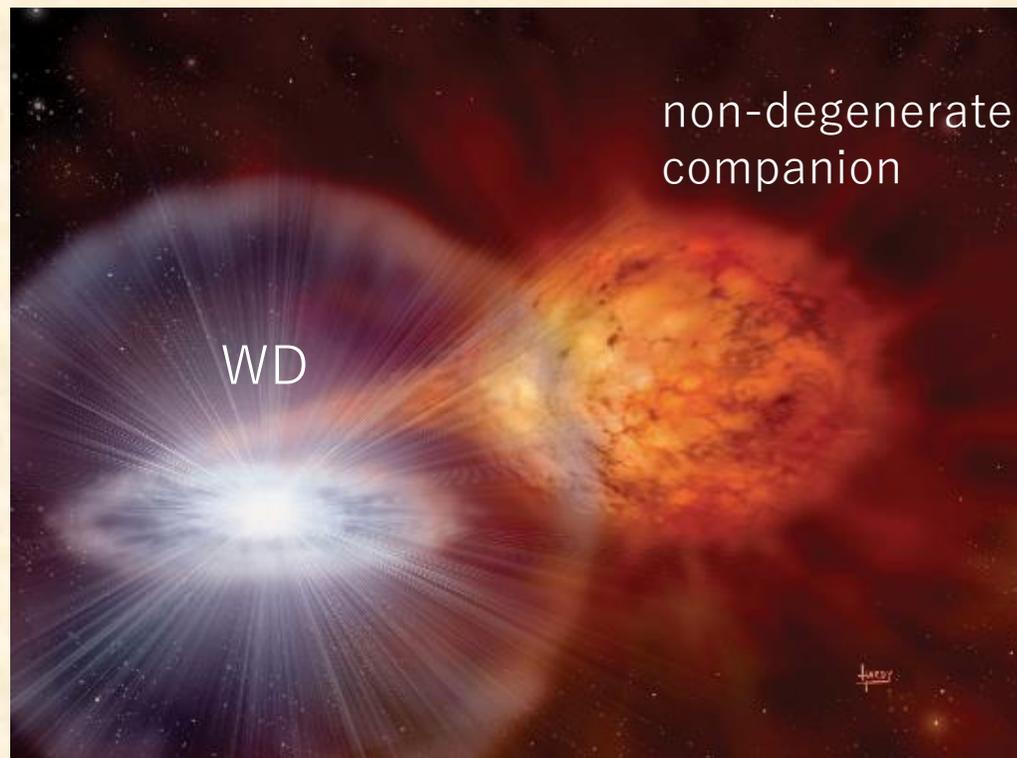


“時間”

# Ia型超新星の親星問題

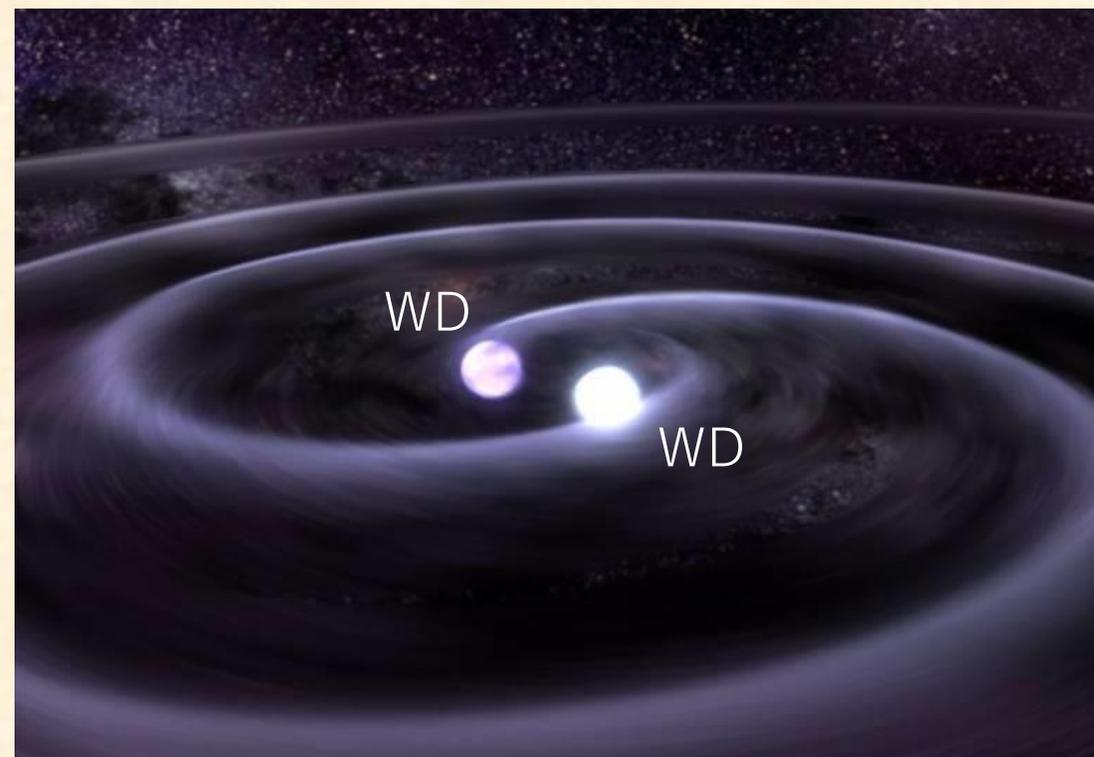
Ia型超新星: C+O白色矮星の熱核爆発

single degenerate scenario



©David Hardy

double degenerate scenario

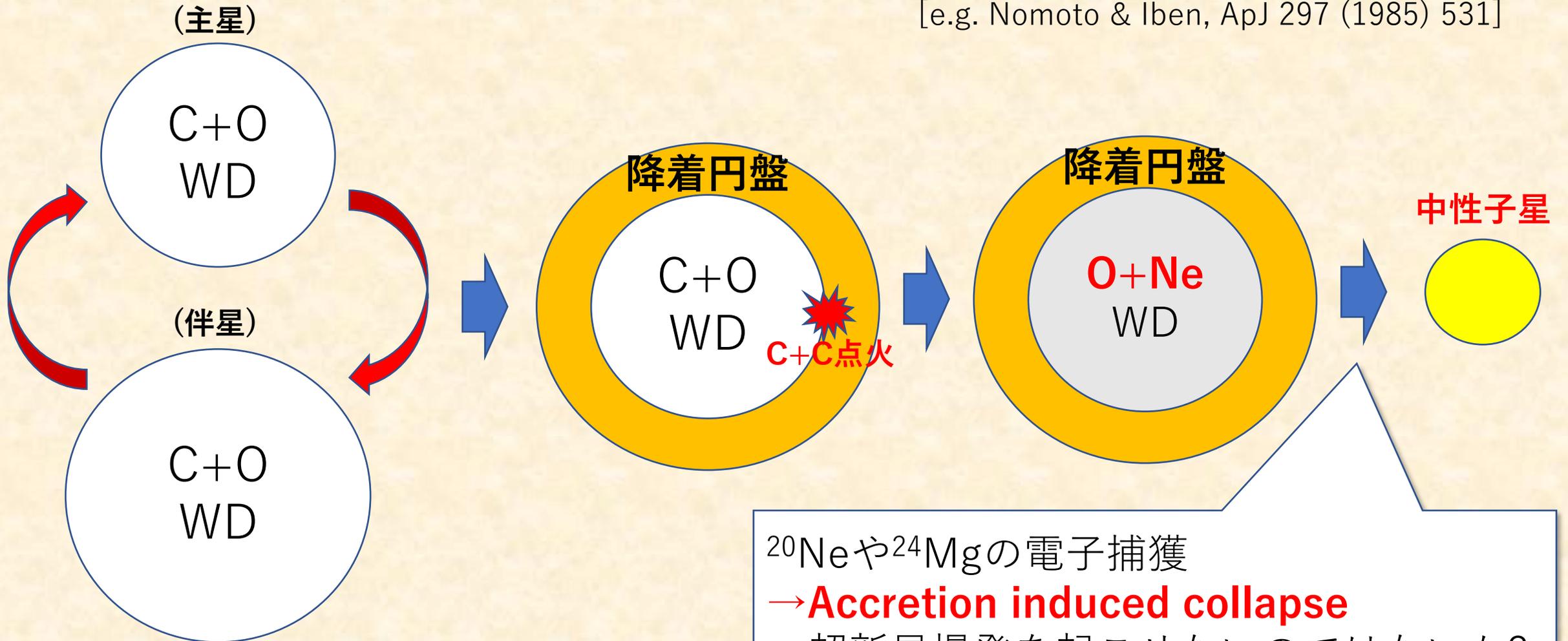


©GSFC / D. Berry

いずれにしても、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応が点火を担う

# 白色矮星連星合体は超新星爆発を起こすか？

[e.g. Nomoto & Iben, ApJ 297 (1985) 531]



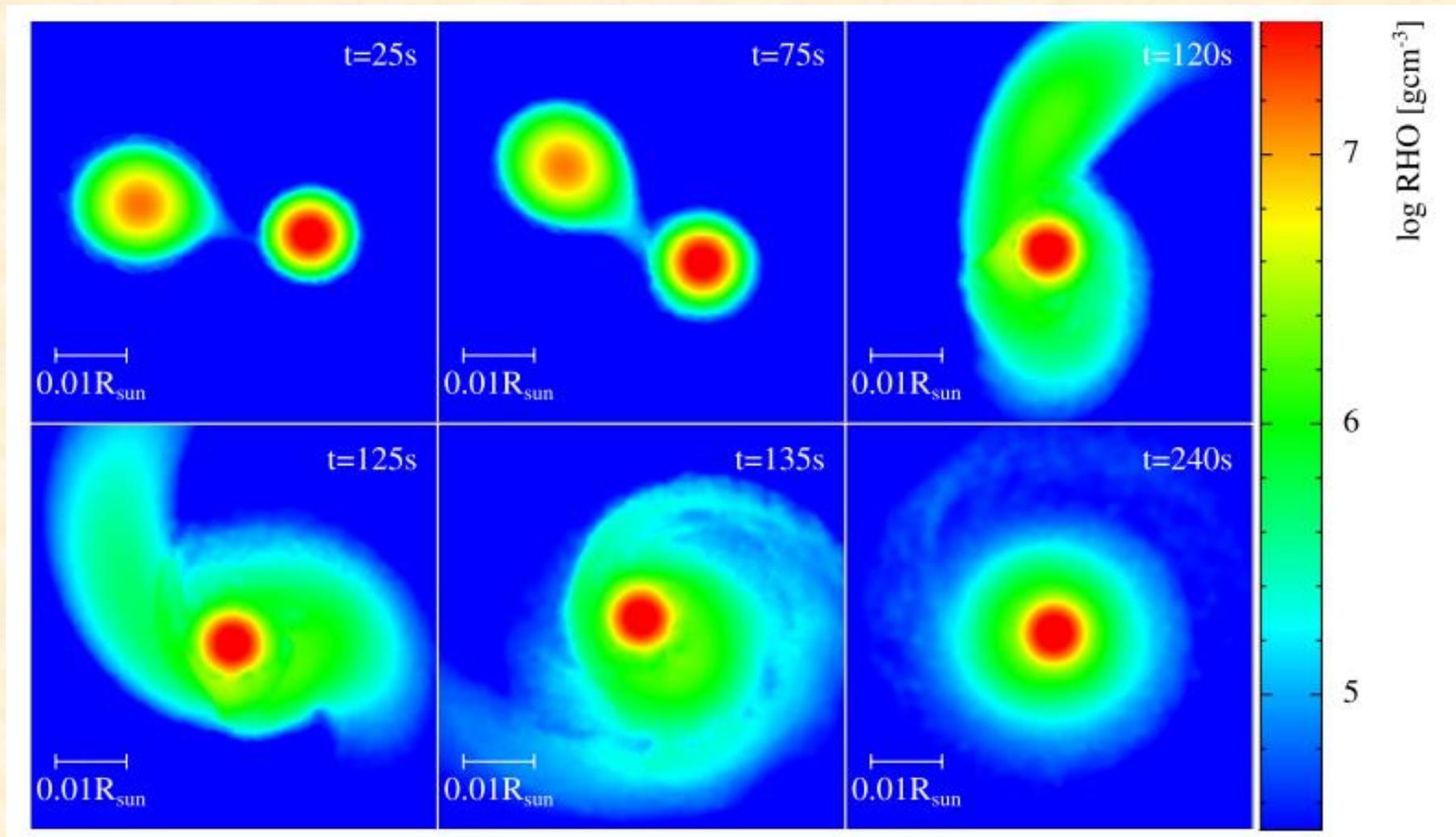
$^{20}\text{Ne}$ や $^{24}\text{Mg}$ の電子捕獲

→ **Accretion induced collapse**

→ 超新星爆発を起こせないのではないか？

# 白色矮星連星合体シミュレーション

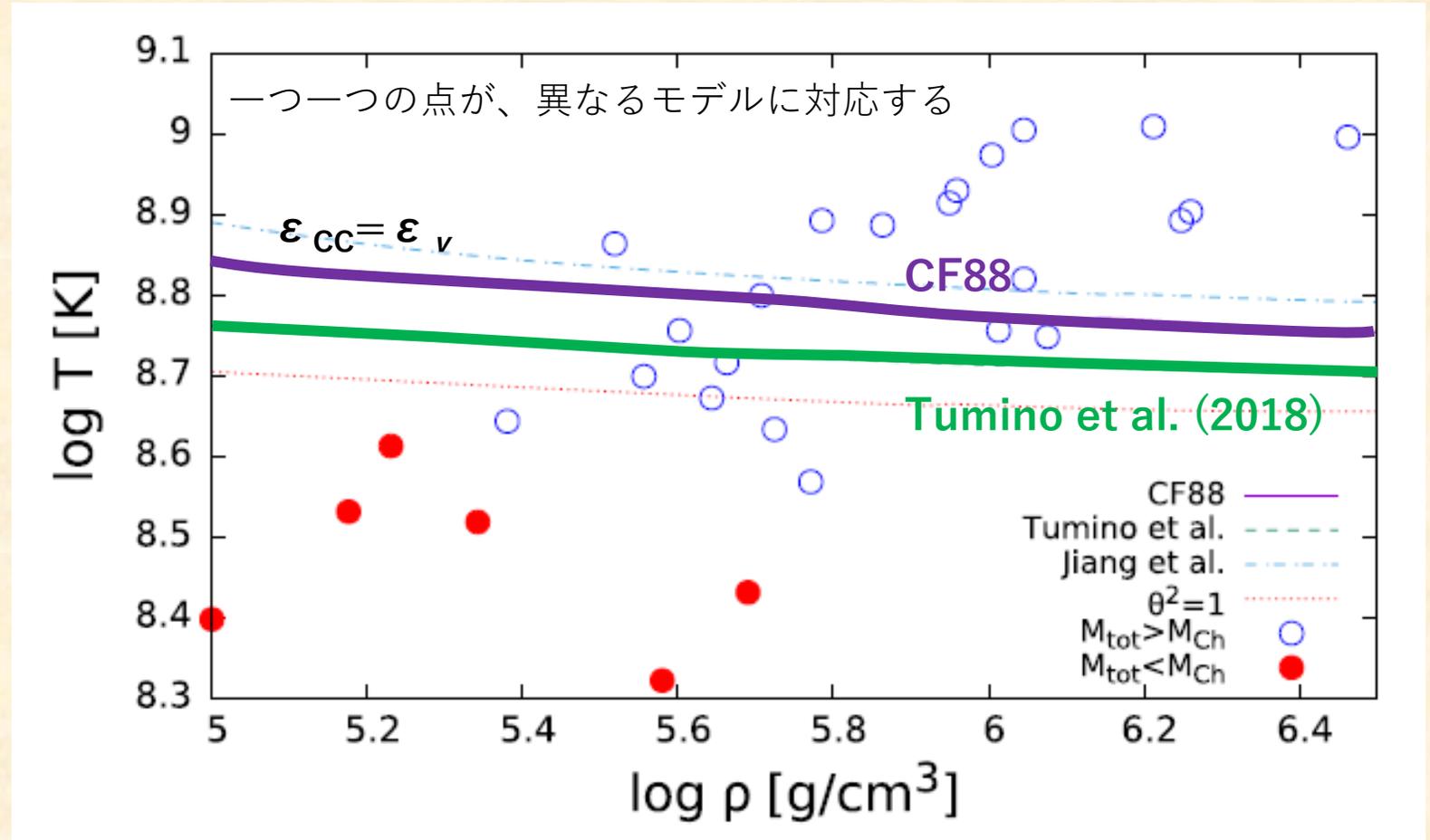
[3D SPH simulations in Sato et al. ApJ 807 (2015) 105]



# 白色矮星連星合体モデルと 炭素点火温度の比較

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応率が大きい  
場合、炭素の点火温  
度が下がる

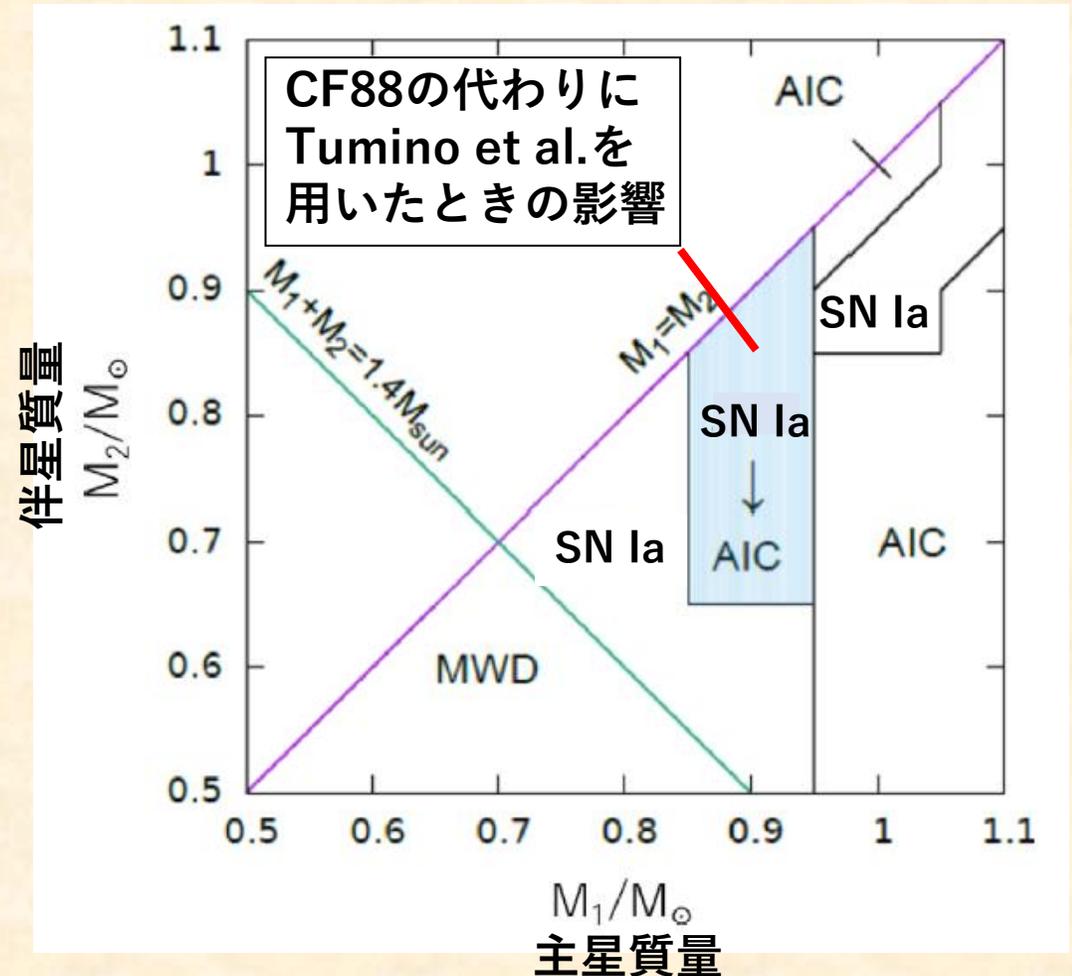
→ **より中性子星に崩壊  
しやすくなる**



# 白色矮星連星合体の運命

Mori, Famiano, Kajino, Kusakabe & Tang,  
MNRAS 482 (2019) L70

- $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応率に依存してWD-WD合体の運命が変わる
- 反応率が大きい場合、accretion induced collapse (AIC)がより起こりやすくなる



# まとめ

- $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応は宇宙物理的に重要
- 低エネルギー共鳴により反応率が增大する場合がよく調べられてきた
- **la型超新星爆発の直前の白色矮星の組成**に影響がありうる
- **白色矮星連星合体の進化**にも影響がありうる