

# $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 反応率不定性が対不安定型 超新星の元素合成に与える影響

中性子捕獲反応で迫る宇宙の元素合成  
@東大本郷 2023/02/10

川下大響

東京大学大学院総合文化研究科（東大駒場） M1

Co-authors

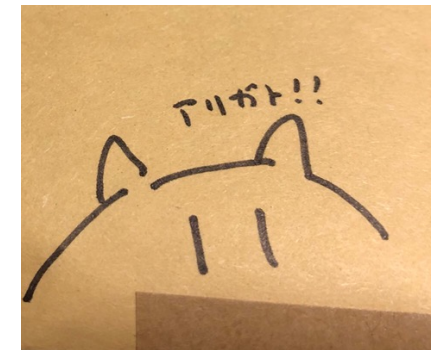
澤田涼(東大駒場)

諏訪雄大(東大駒場・京大基研)

谷川衝(東大駒場)

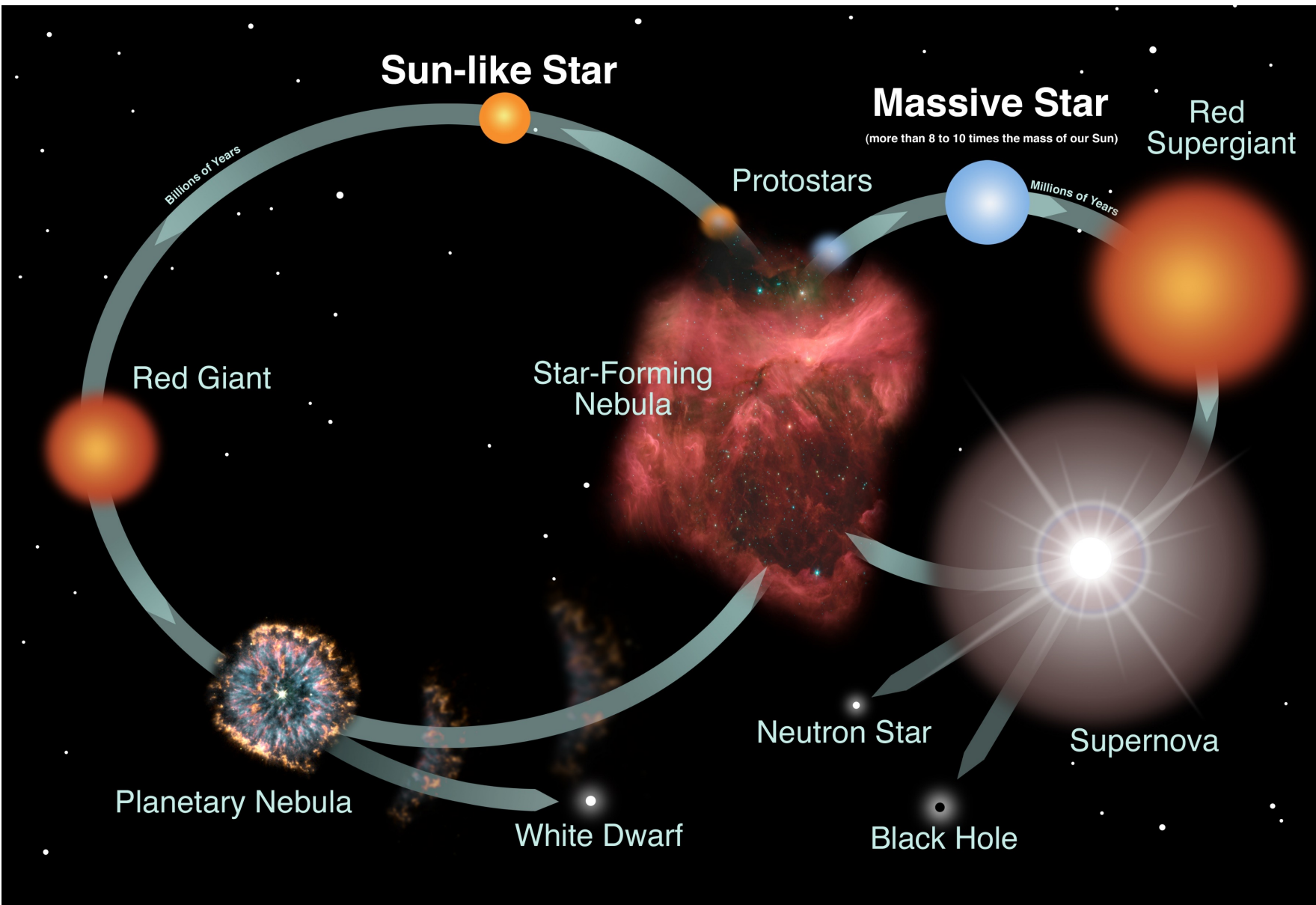
守屋堯(国立天文台・Monash Univ.)

富永望(国立天文台・甲南大・Kavli IPMU)



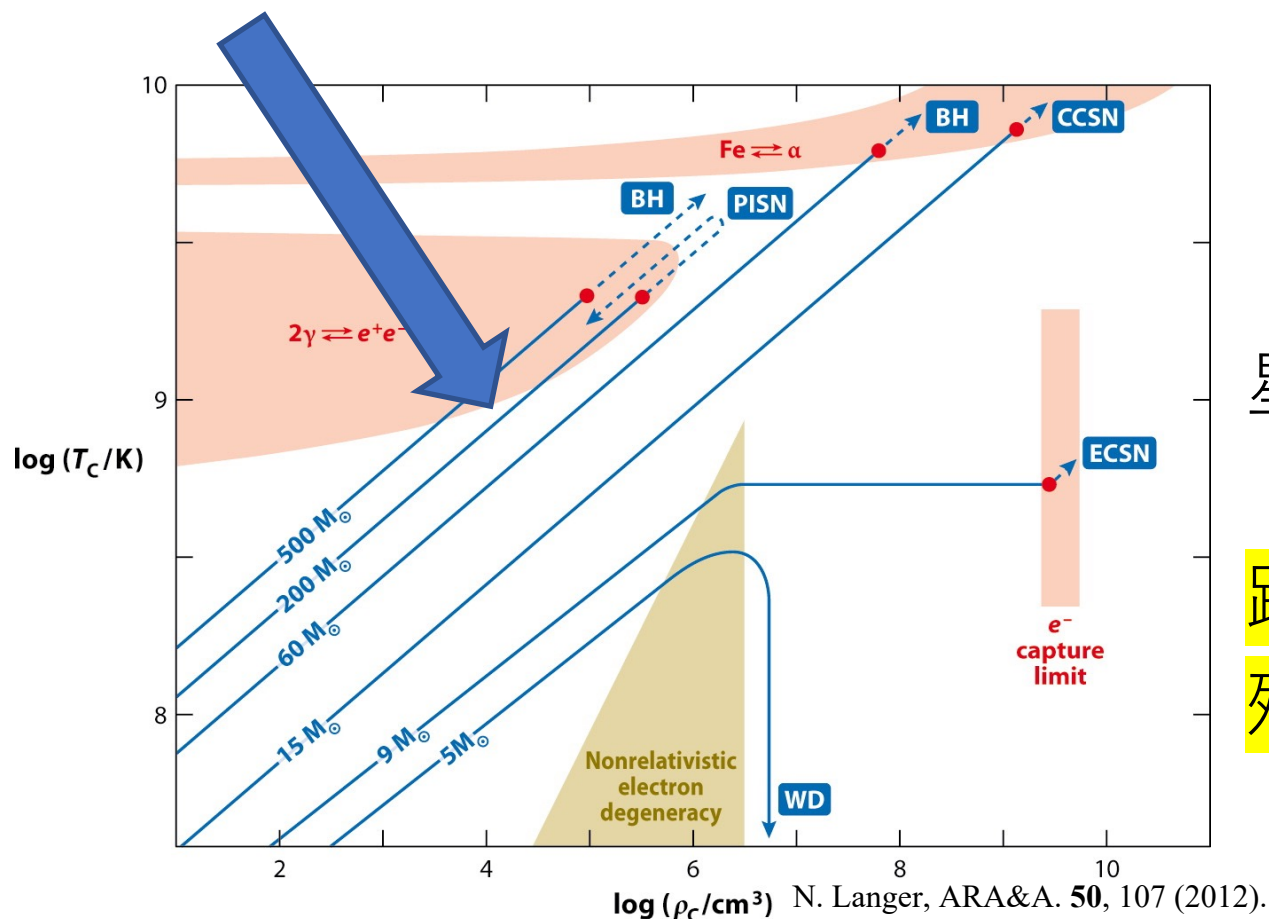
# Introduction

## Final fates of stars



# Introduction Pair-Instability Supernova

ZAMS 140-260  $M_{\odot}$  (Zero metal) のとても重い星  
→PISN (Pair-Instability Supernova)

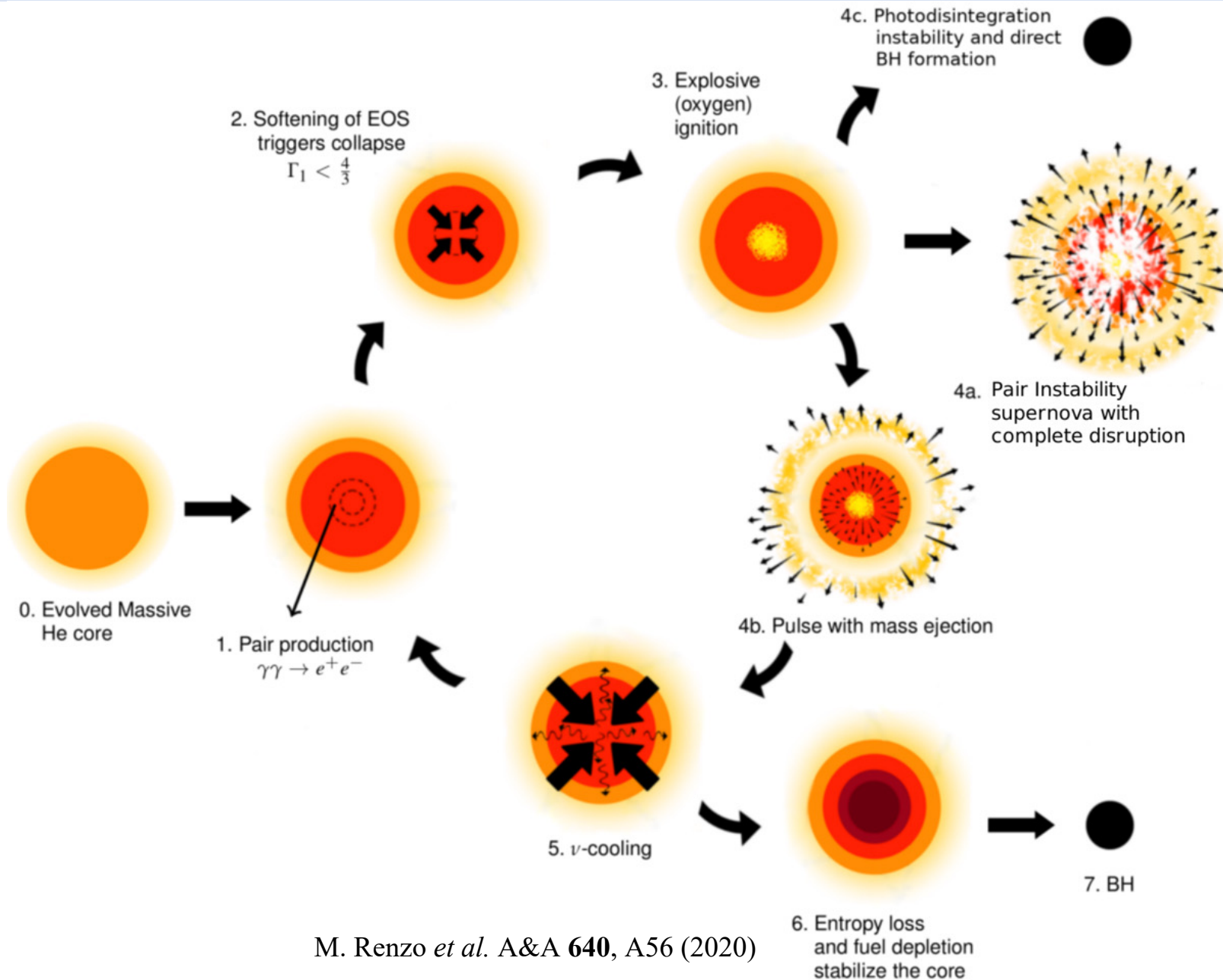


星を完全に破壊



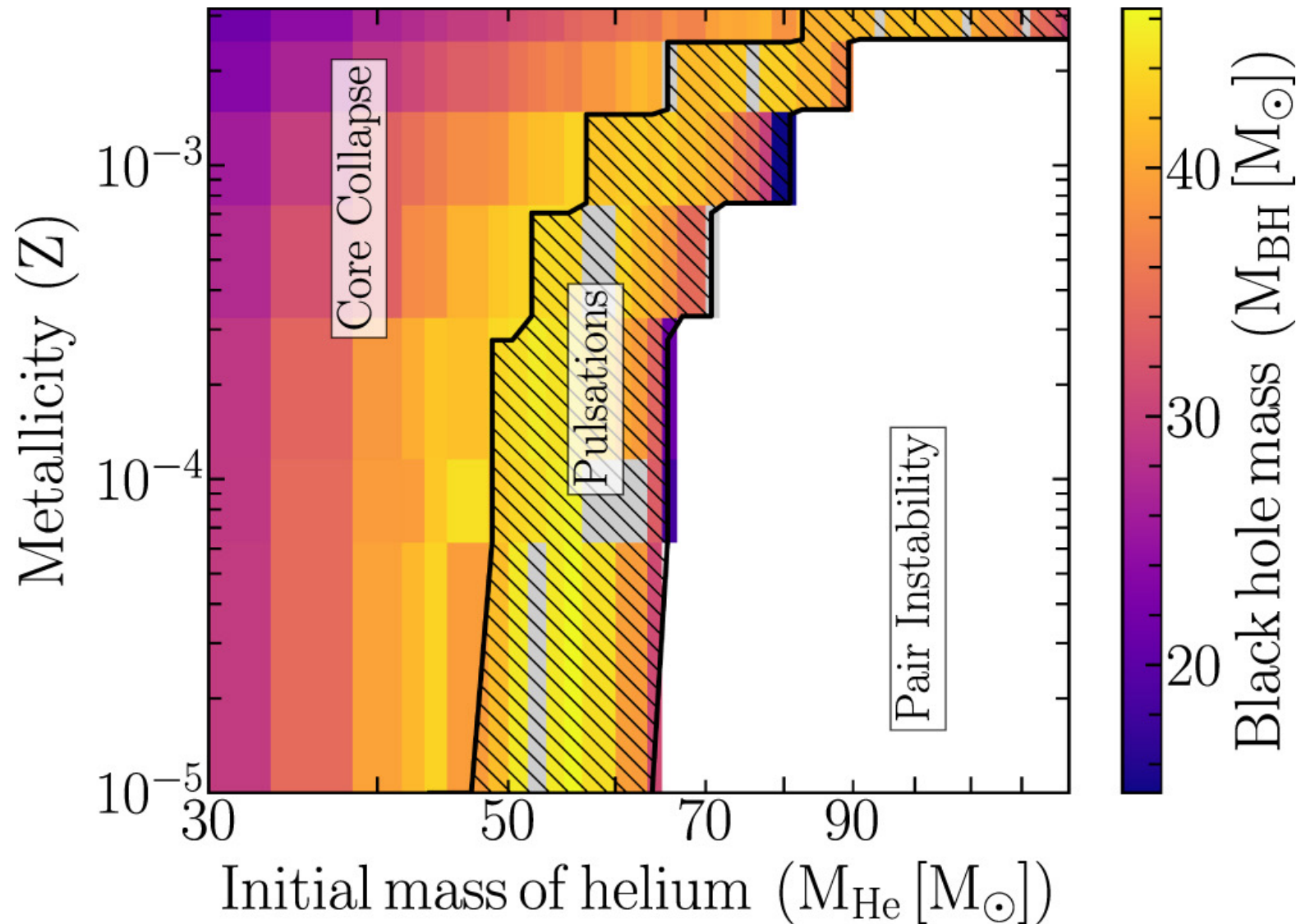
跡にコンパクト天体を  
残さない

# Introduction Pair-Instability Supernova



# Introduction

## Pair-Instability Supernova



# Introduction PI mass gap

コンパクト天体の質量と  
親星の質量は対応

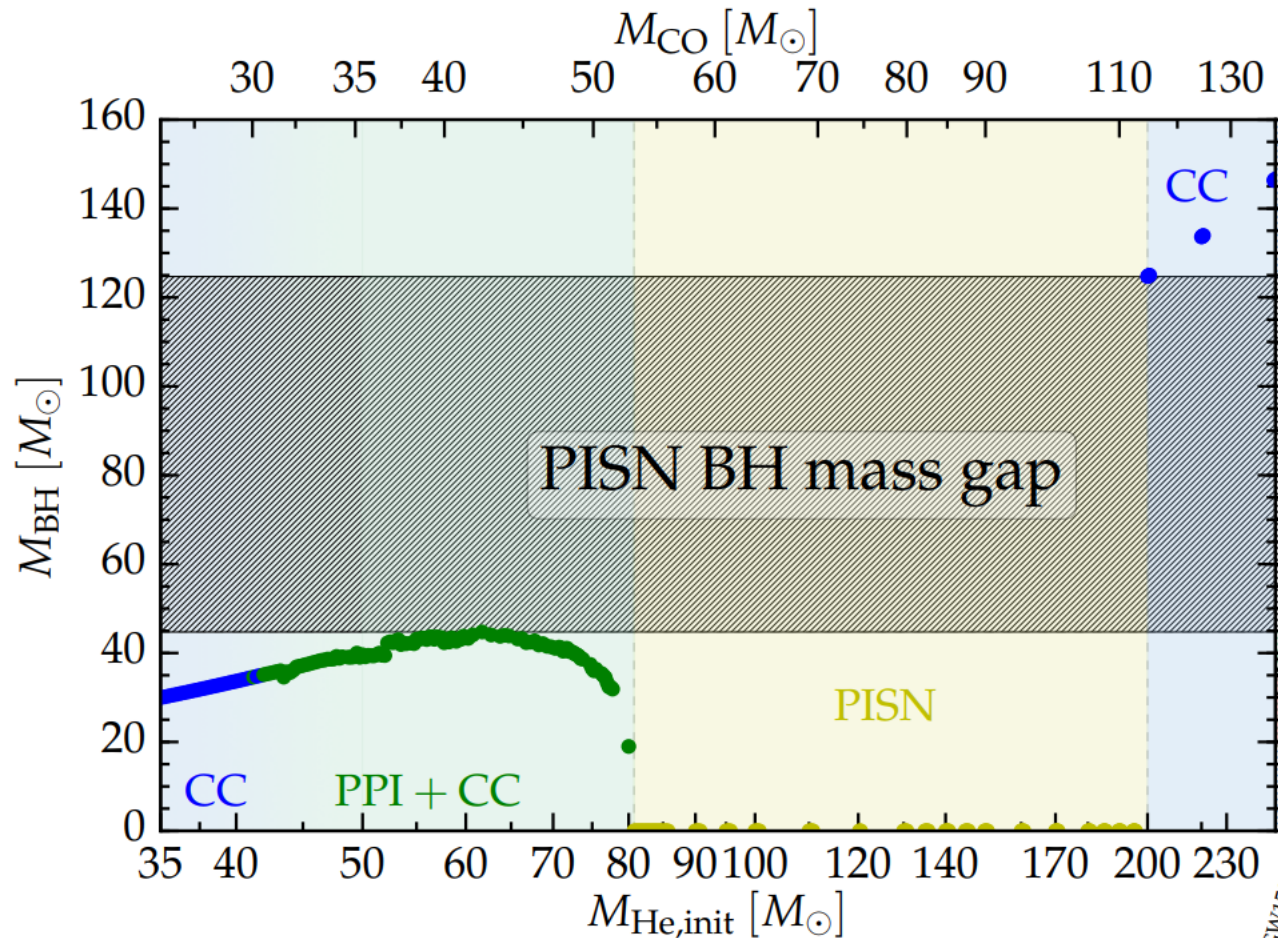


PISNが起きる質量領域  
(140-260  $M_{\odot}$ )に対応する  
BHは存在しないはず



BH質量分布に空白地帯  
があるはず!

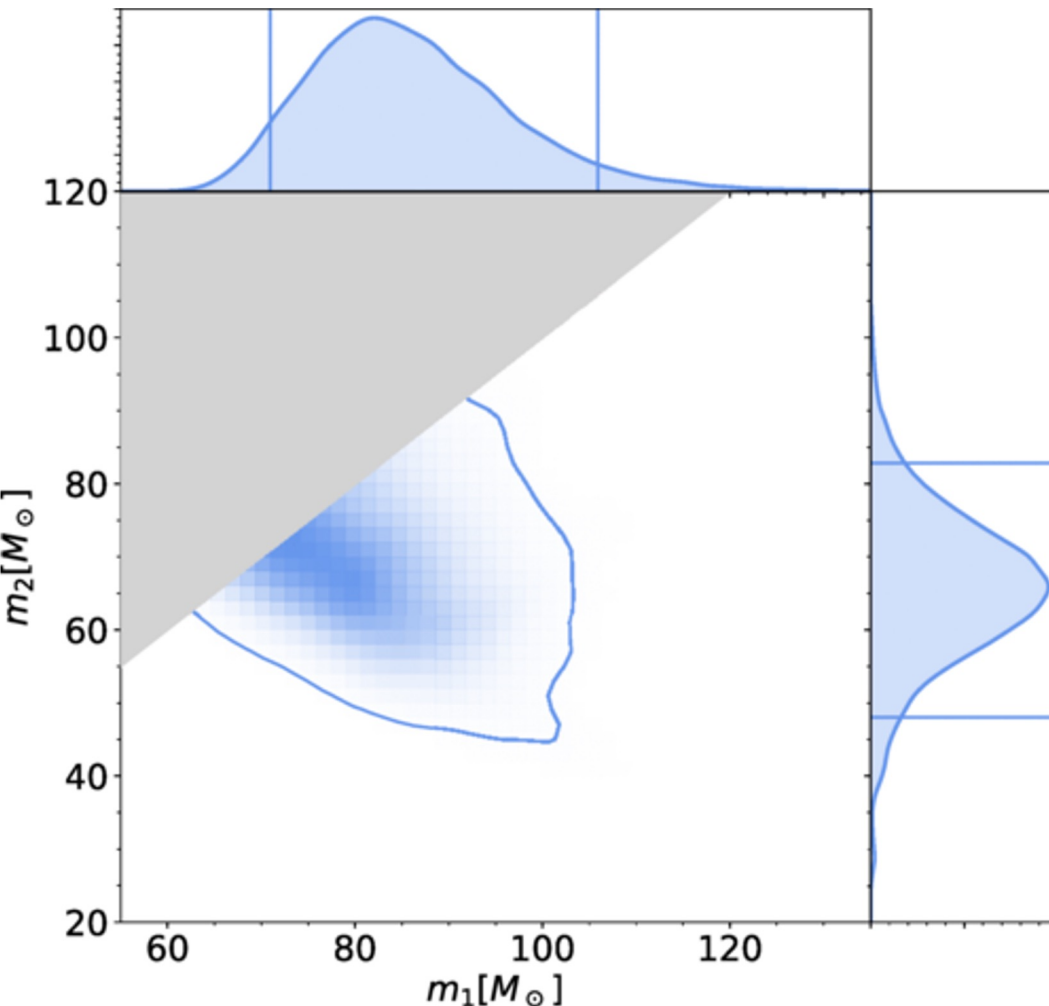
PI mass gap: 50-130  $M_{\odot}$   
程度



M. Renzo *et al.* A&A **640**, A56 (2020)

(図は横軸をHe massやCO core massでとっていることに注意)

# Introduction GW190521



R. Abbott *et al.* Phys. Rev. Lett. **125**, 101102 (2020).

重力波イベントGW190521  
(BH合体)

71-106  $M_{\odot}$ のBH  
48-83  $M_{\odot}$ のBH

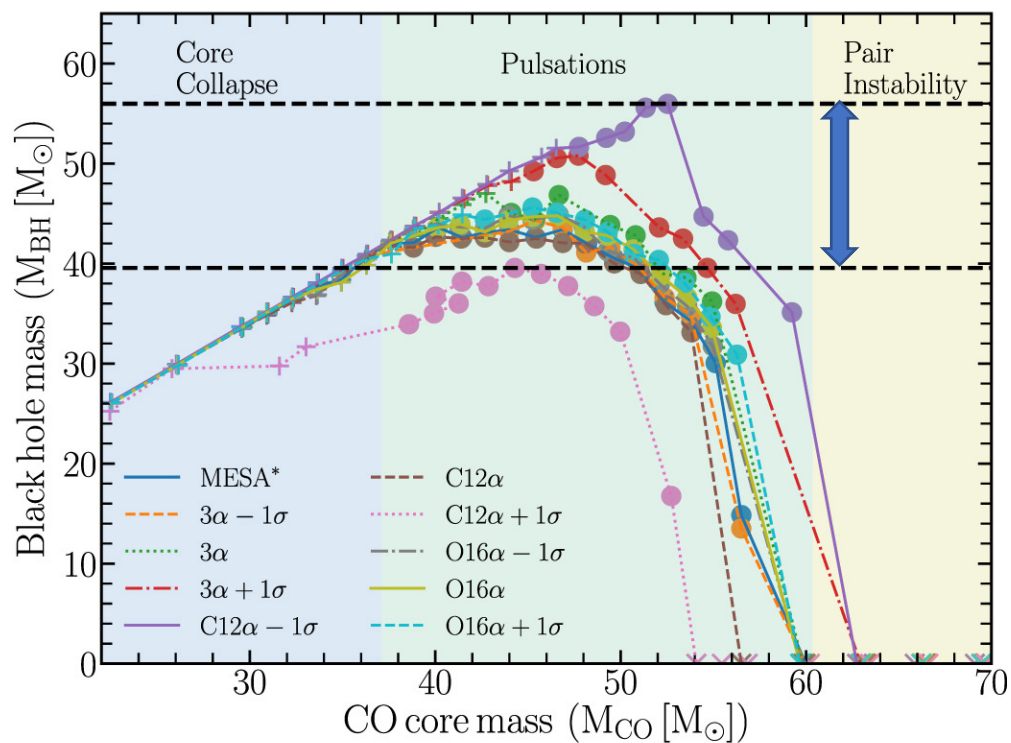
→ PI mass gap (と考えられてきた質量領域) の中にBH!

(PI mass gap : 50-130  $M_{\odot}$ )

物理量の不定性で説明できないか??

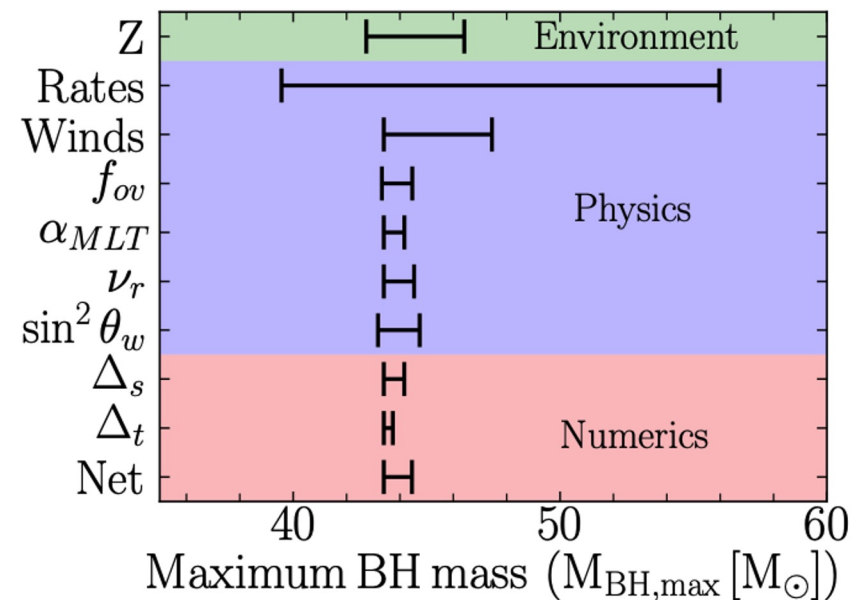
# Introduction

## PI mass gap と様々な不定性



(d) Nuclear reaction rates

R. Farmer *et al.* ApJ. **887**, 53 (2019).



R. Farmer *et al.* ApJ. **887**, 53 (2019).

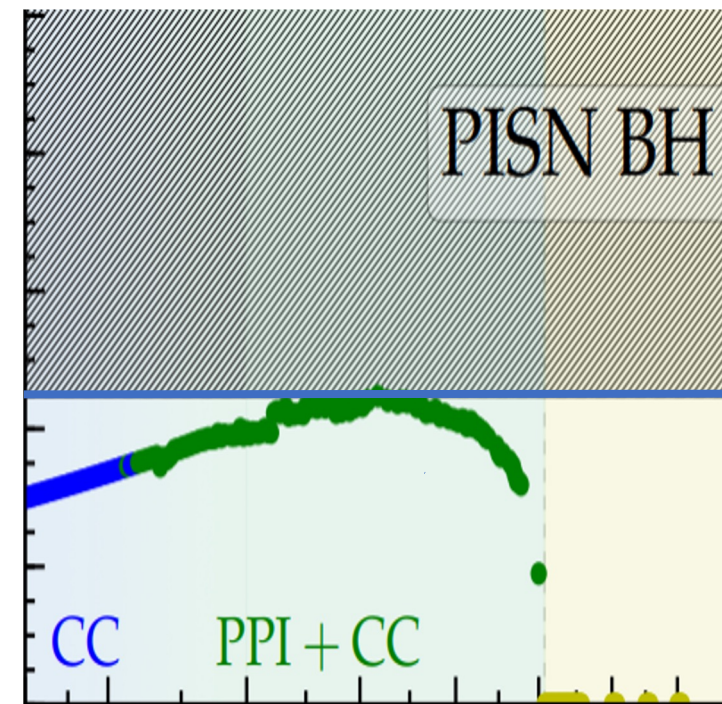
PI mass gapの下限にはNuclear reaction  
(特に $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ ) の影響が強く現れる！



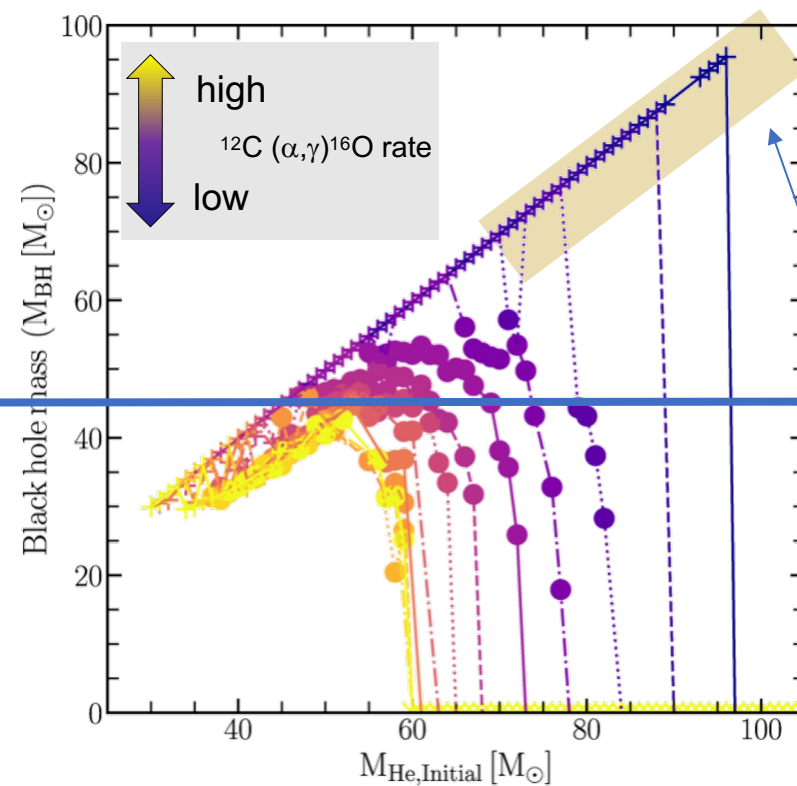
# Introduction

## PI mass gap と $^{12}\text{C} (\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ rate

M. Renzo *et al.* A&A **640**, A56 (2020)



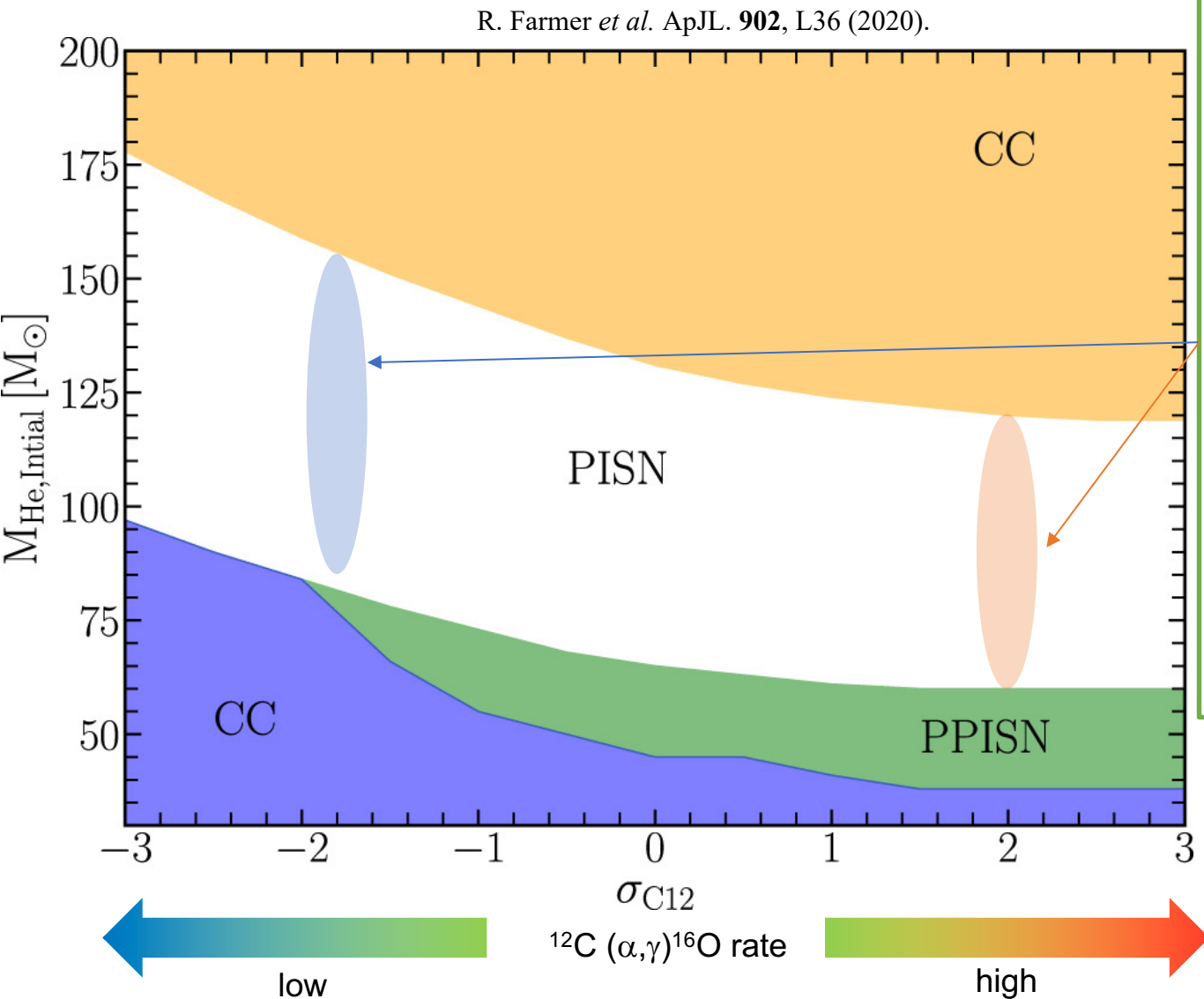
R. Farmer *et al.* ApJL. **902**, L36 (2020).



(GW190521くらい)  
重いBH形成の可能性！

# Motivation

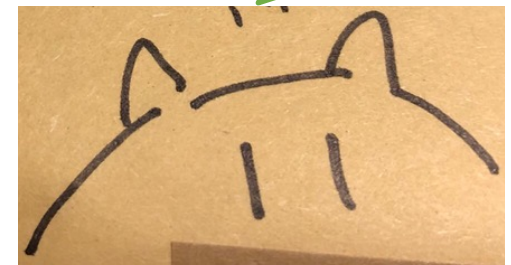
## PISN details with rate



爆発する質量範囲は検討されたが、爆発の詳細については未知！

- $^{56}\text{Ni}$ 合成
  - 爆発エネルギー (c.f. Takahashi 2018)
- について、左図白塗領域でどんな振る舞いをしているのか？

例えば、褐塗領域と青塗領域でどう違うのか？



# In this work...

GW190521 : PI mass gap範囲が現在の認識と違うことを示唆

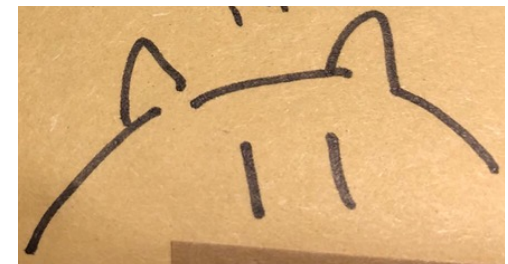
Farmer+ 2019 : GW190521は原子核反応率不定性で説明できる可能性

重要な原子核反応率不定性を加味したとき、、、

爆発エネルギーはどう変化するか？

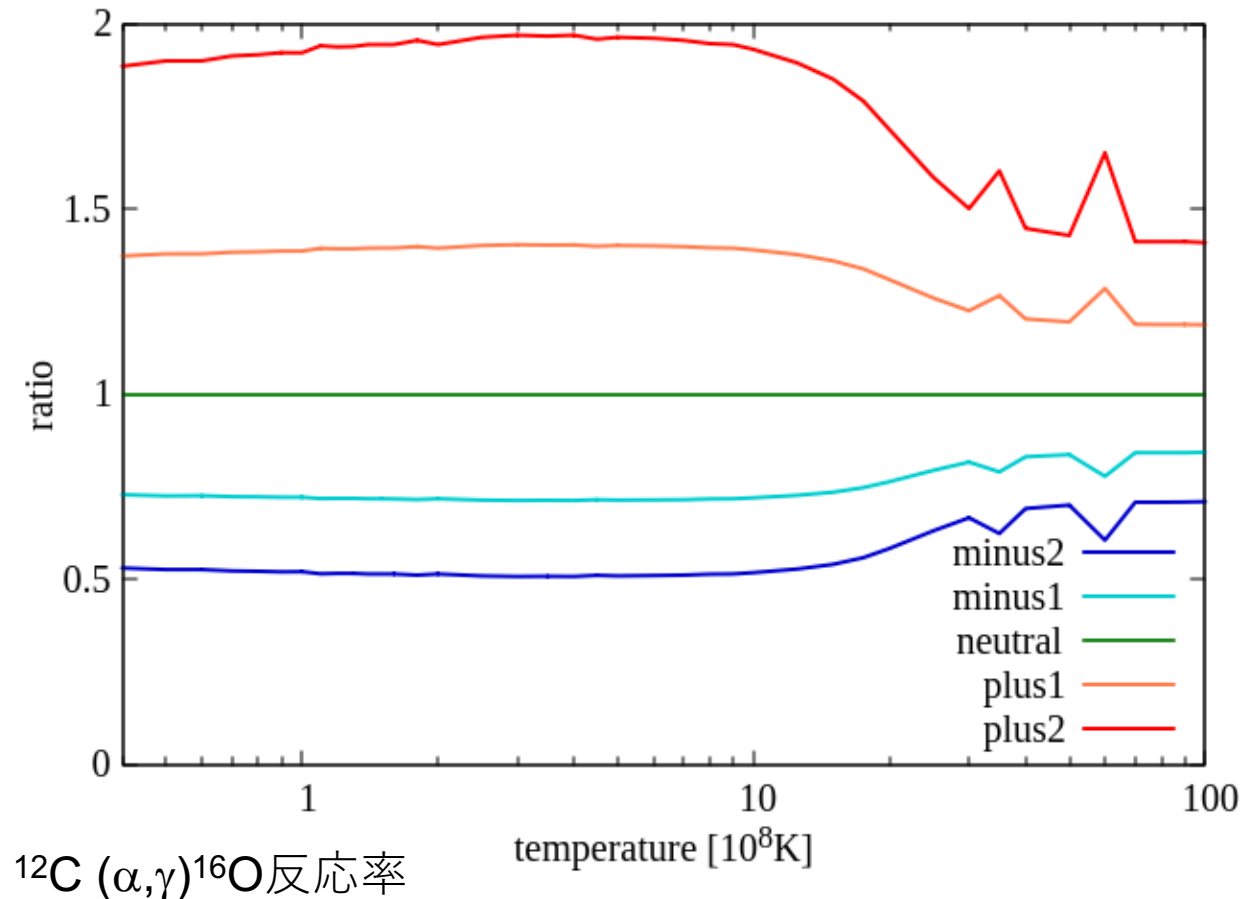
peak-luminosityを支配する $^{56}\text{Ni}$ の生成量はどう変化するか？

$^{12}\text{C} (\alpha, \gamma) ^{16}\text{O}$ について  
異なる原子核反応率のもと、  
爆発エネルギー・ $^{56}\text{Ni}$ 生成量について、  
恒星進化計算を行いました



# Methods Setup

- Software: MESA r15140 (Paxton+ 2011, 2013, 2015, 2018, 2019)
- Setup: Marchant+ 2019 (主系列を終え、水素外層が剥げた星)
- Metallicity:  $Z=10^{-5}$
- Total 1341 models



# Results

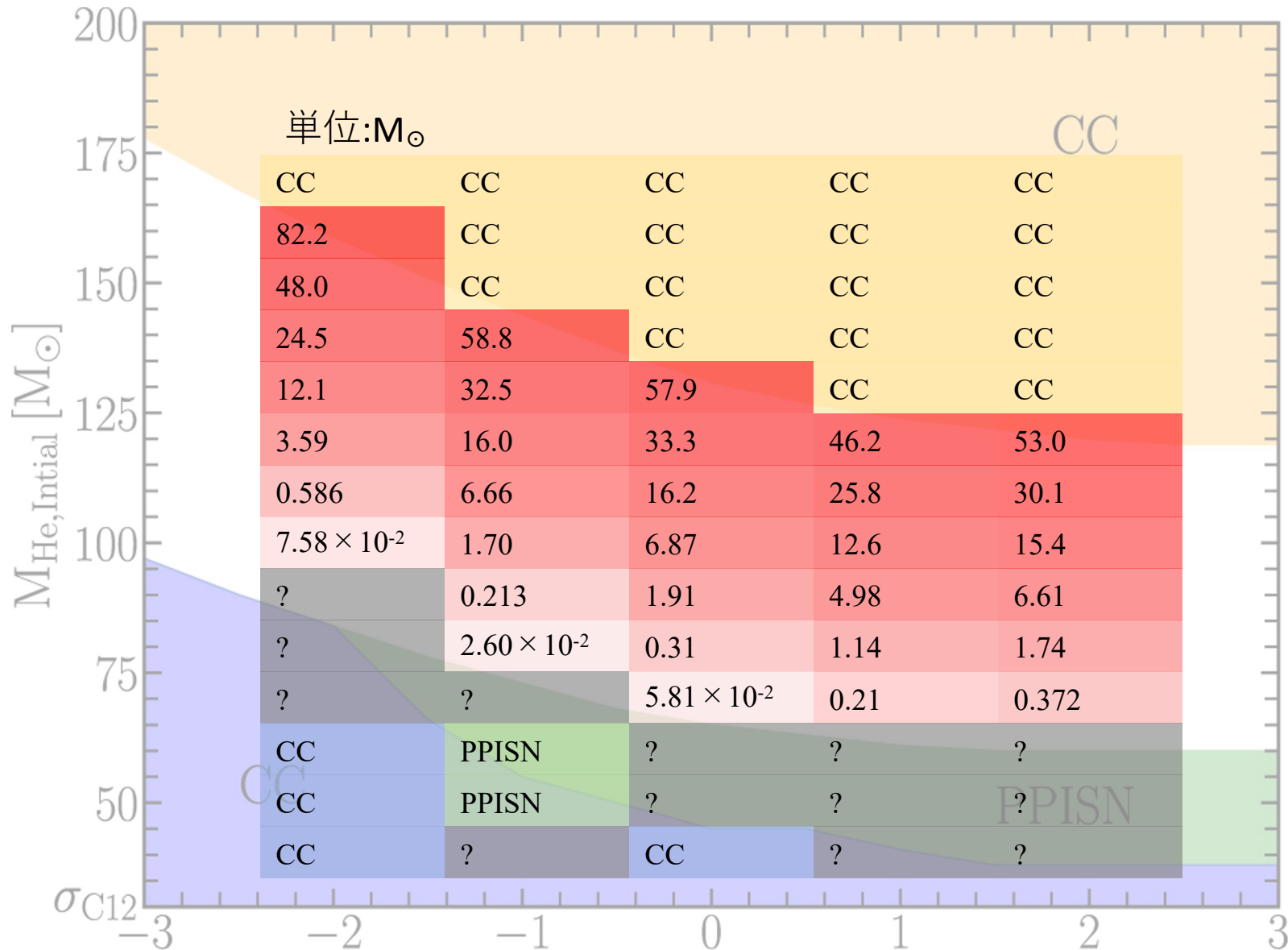
## Final fate ▪ $^{56}\text{Ni}$ rough results

$M_{\text{initial,He}}$	$-2\sigma$	$-1\sigma$	neutral	$+1\sigma$	$+2\sigma$
170	CC	CC	CC	CC	CC
160	82.2	CC	CC	CC	CC
150	48.0	CC	CC	CC	CC
140	24.5	58.8	CC	CC	CC
130	12.1	32.5	57.9	CC	CC
120	3.59	16.0	33.3	46.2	53.0
110	0.586	6.66	16.2	25.8	30.1
100	$7.58 \times 10^{-2}$	1.70	6.87	12.6	15.4
90	?	0.213	1.91	4.98	6.61
80	?	$2.60 \times 10^{-2}$	0.31	1.14	1.74
70	?	?	$5.81 \times 10^{-2}$	0.21	0.372
60	CC	PPISN	?	?	?
50	CC	PPISN	?	?	?
40	CC	?	CC	?	?

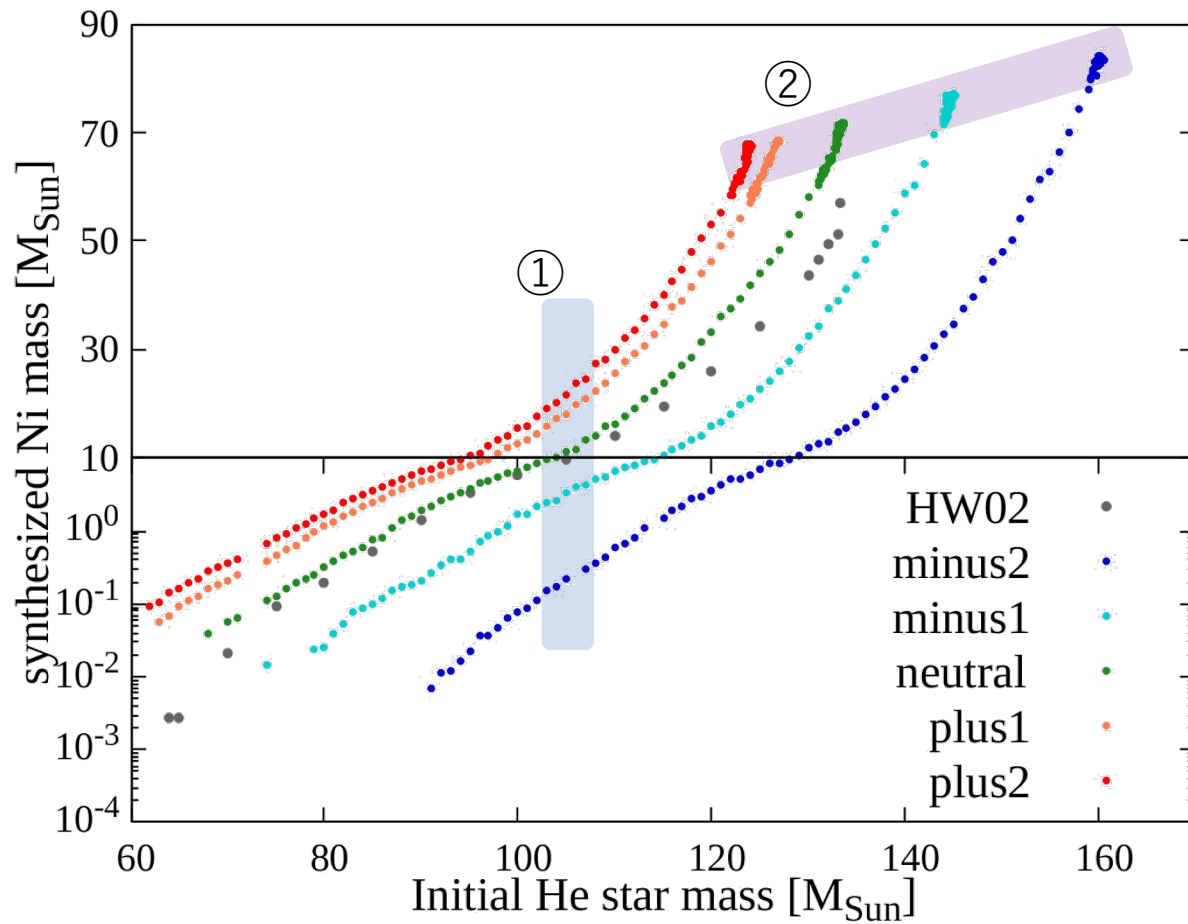
単位: $M_{\odot}$

# Results

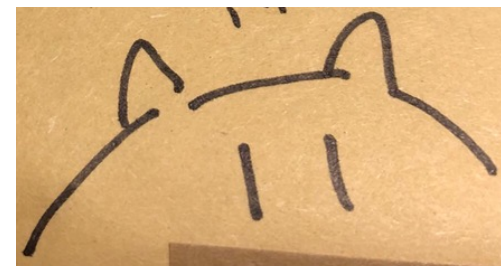
# Final fate · rough results



# Results $^{56}\text{Ni}$ synthesis

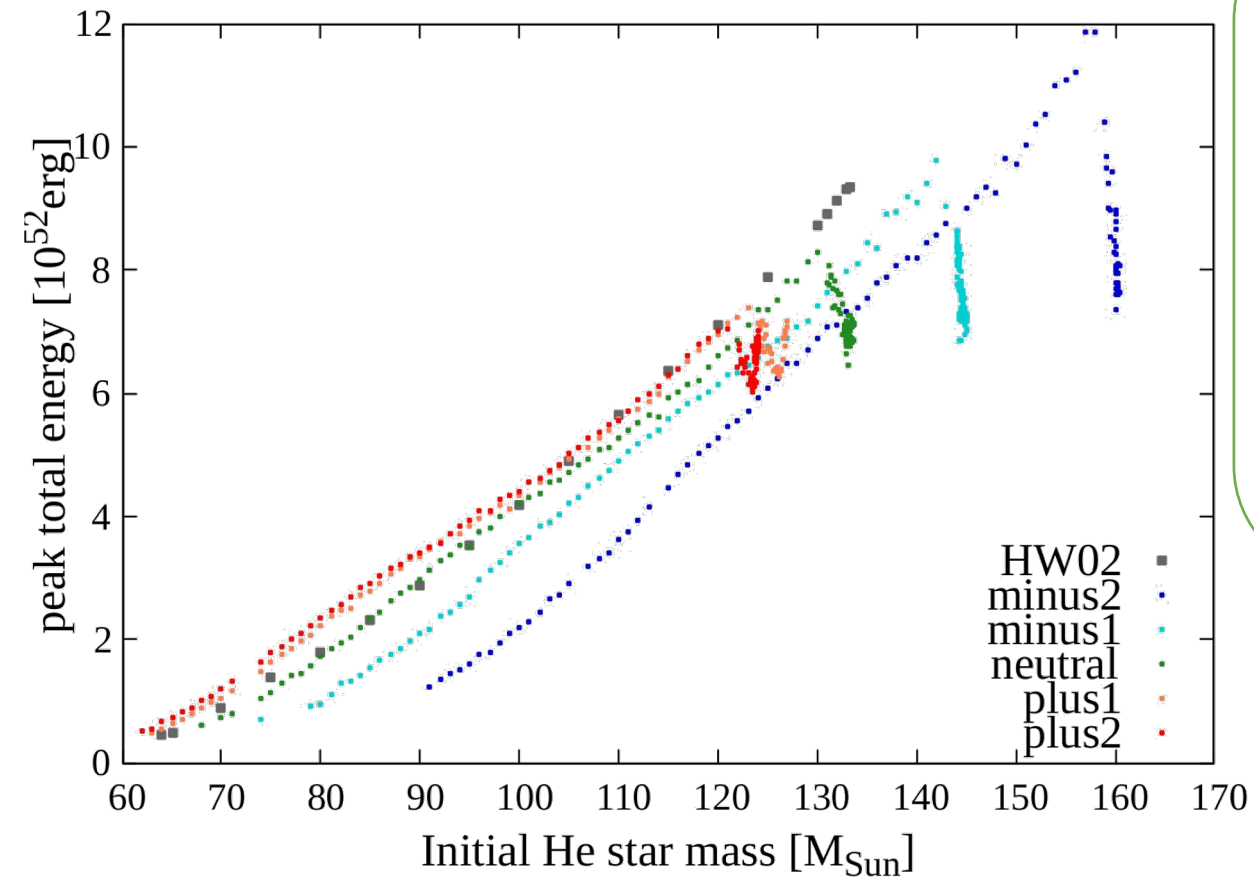


- ① High reaction rate  $\rightarrow$  more Ni
- ② Maximum amount is larger for lower rates  
(Max  $84.0M_{\odot}$  for the  $-2\sigma$  group!)

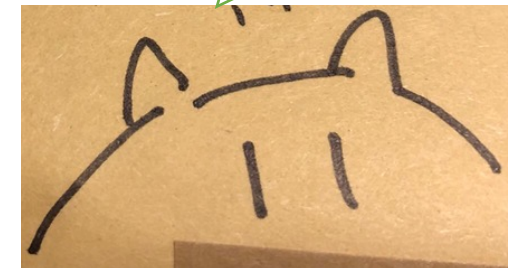


# Results

## Gaining explosion energy



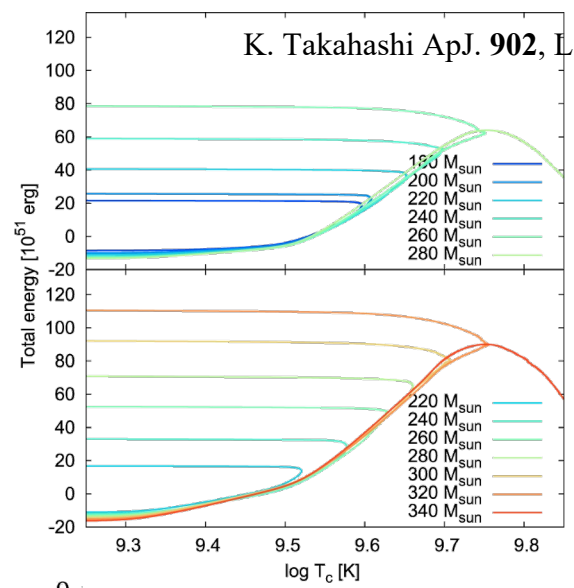
- ① Expl. energy  $\propto$  Progenitor mass
- ② High reaction rate  $\rightarrow$  High expl. energy





# Discussion

## $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ からみる炭素燃焼の「余熱」

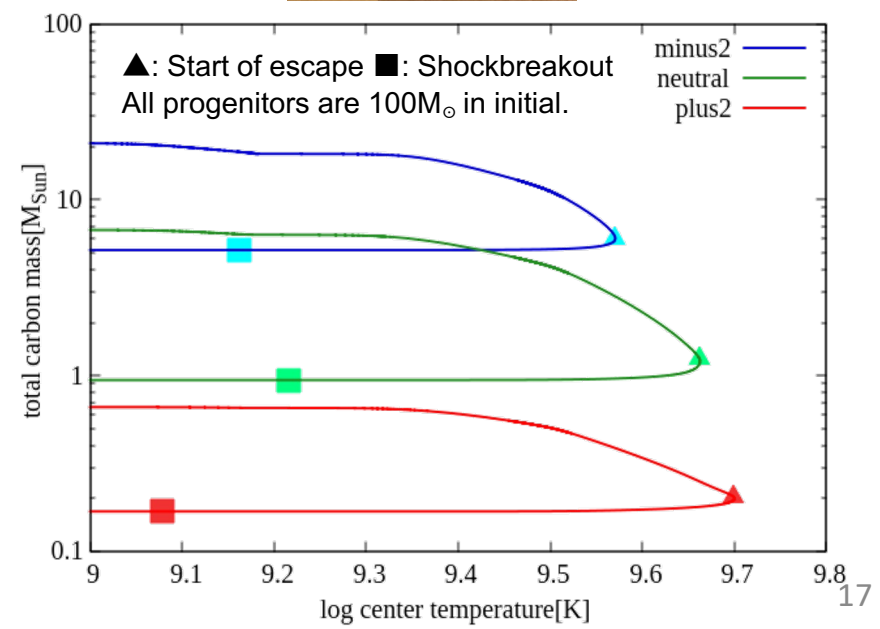
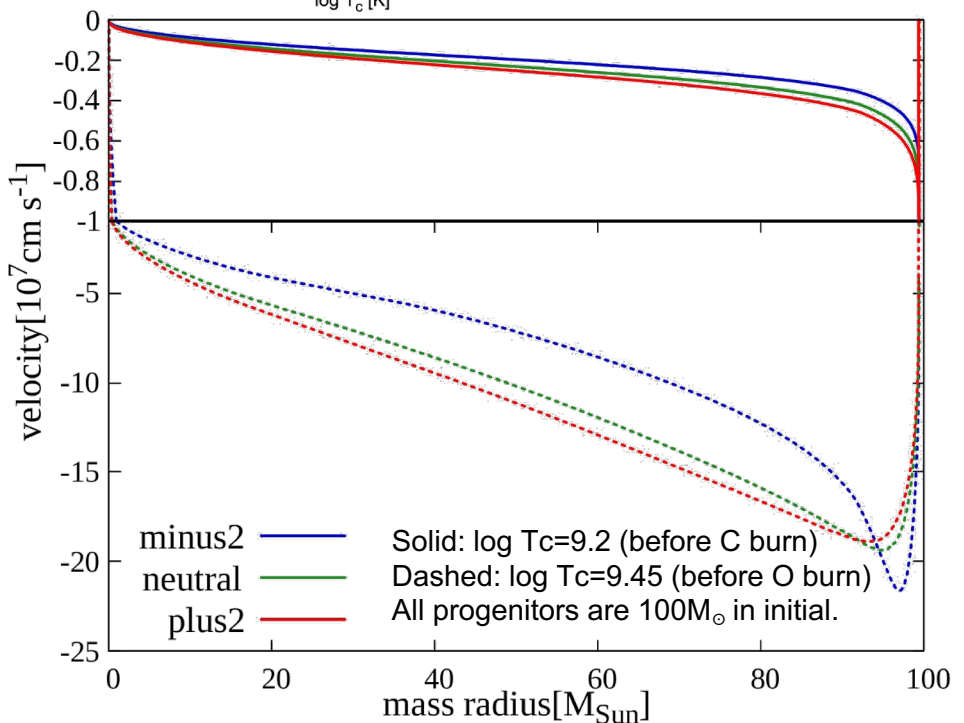
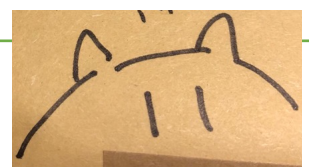


K. Takahashi ApJ. **902**, L36 (2018).

Takahashi 2018

$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ レートが低いと、炭素燃焼時点でたくさん炭素が残っていることが影響している？

実際に、反応率によって炭素燃焼の量は桁で違う（下右図）。それによって星内部の速度構造に影響（下左図）→不定性の影響を受けているのは、「余熱」の影響？



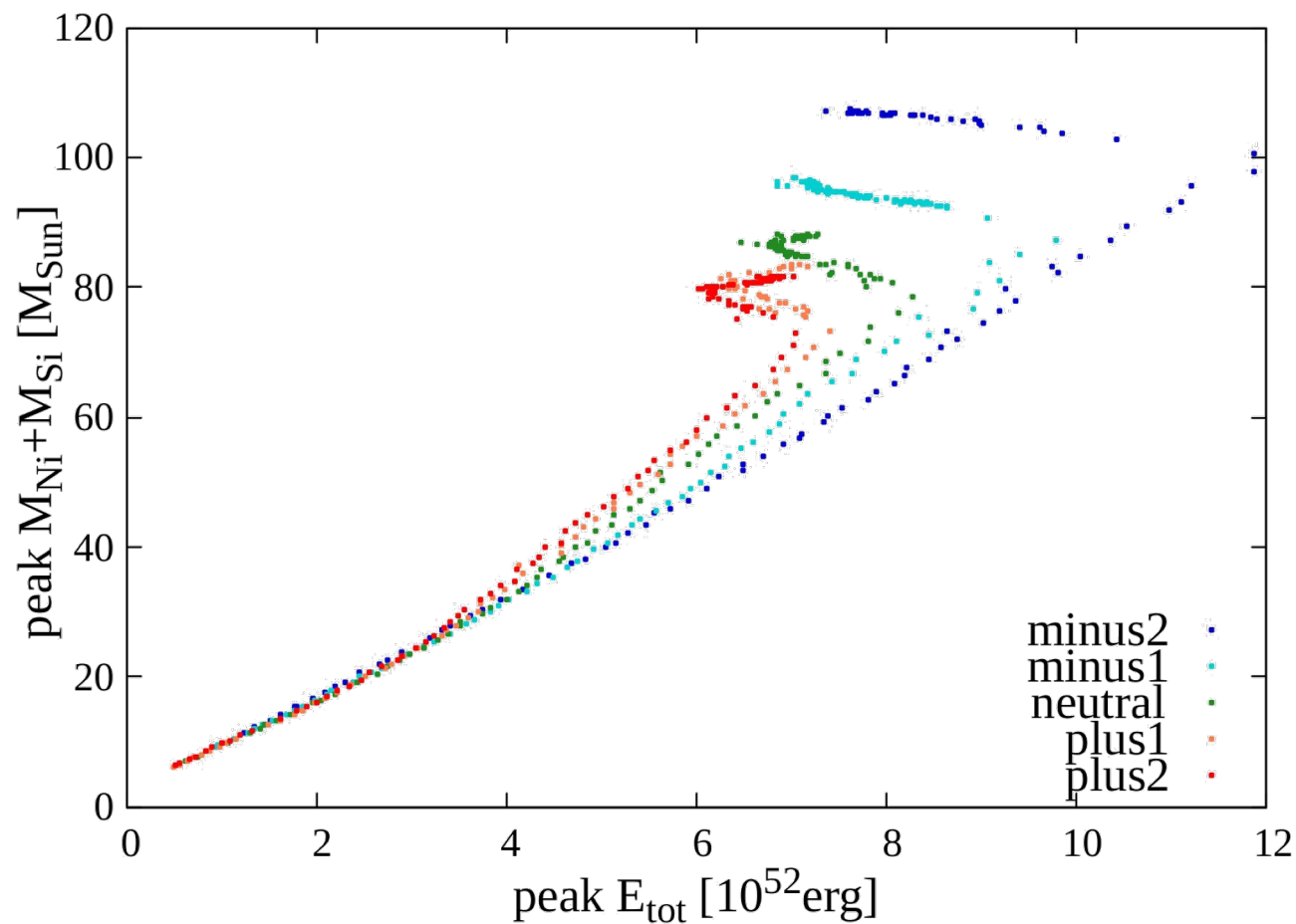
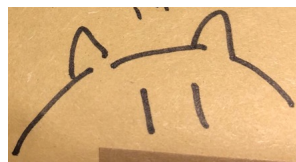
# Discussion

## Energy source

O 燃烧生成物である Si と Si 燃烧生成物である Ni を足して O 燃烧の量を見積もると、ほとんどエネルギーに対して線形

特に、低いエネルギー周辺では原点に交わるような傾き

→ PISN の主要エネルギー源は O 燃烧のまま！



# Summary

## Introduction

- GW190521 → BHs in mass gap
- 核反応率不定性がgap範囲に影響

## In our work...

- $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ について爆発現象の詳細 (energy,  $^{56}\text{Ni}$ )
- MESA stellar evo. code

## Result

- 高反応率でNi多・energy大
- $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ が低いほうが、重い親星を爆発させられる

## Discussion

- 炭素の「余熱」効果によって、星内部の速度構造が影響を受けるので、explodabilityに影響？
- PISNのエネルギーのメインソースは元素合成(特に酸素燃焼)とされているが、それは原子核反応そのものに手を加えた本研究においても変わらなかった

