

# SN 2007biの親星 ~大質量星の進化の視点から

Yoshida, T. & Umeda, H., *MNRAS* **412**, L78-L82 (2011)

吉田 敬

(東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)

CPSセミナー

2011年6月1日神戸大学惑星科学研究所センター

# SN 2007bi

- SN 2007bi

(Gal-Yam et al. 2009)

2007年4月6.5日

- Type Ic

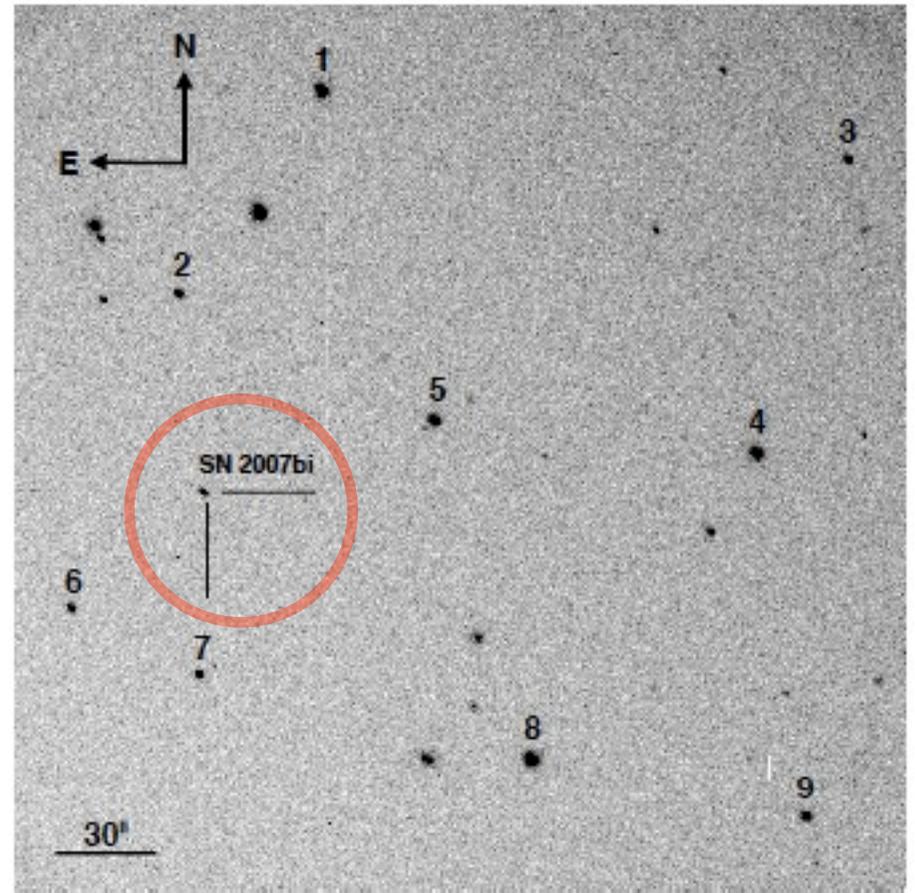
- 非常に明るい超新星

母銀河は

**subluminous dwarf galaxy**

$Z \sim (0.2 - 0.4) Z_{\odot}$

(Young et al. 2010)

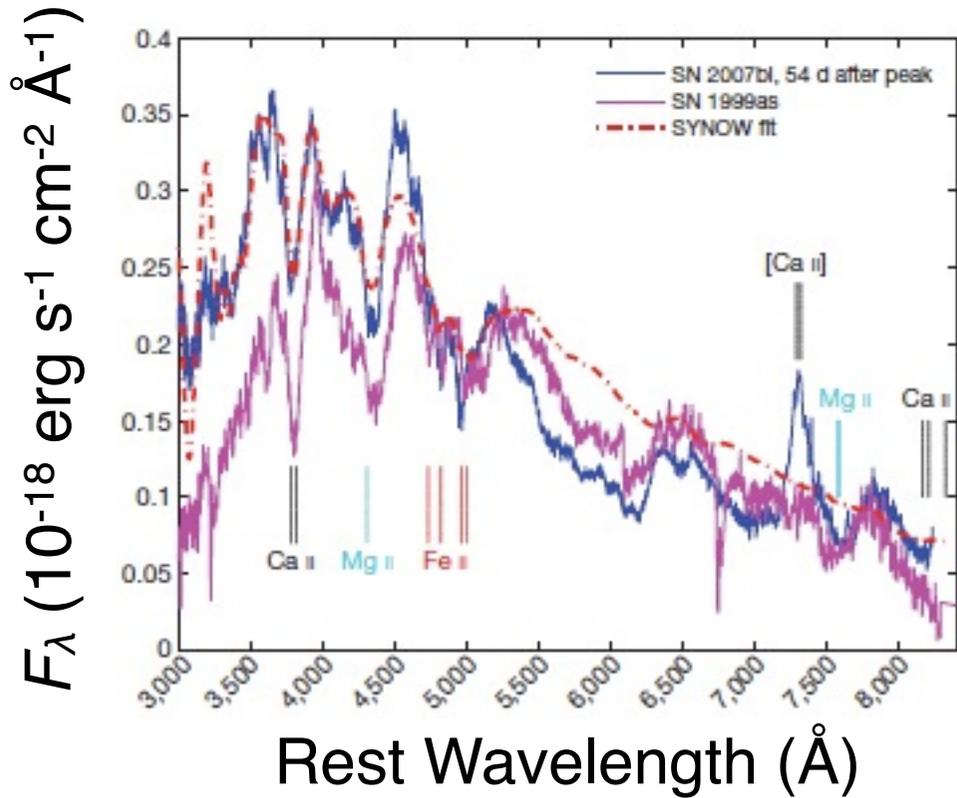


爆発36日後の画像

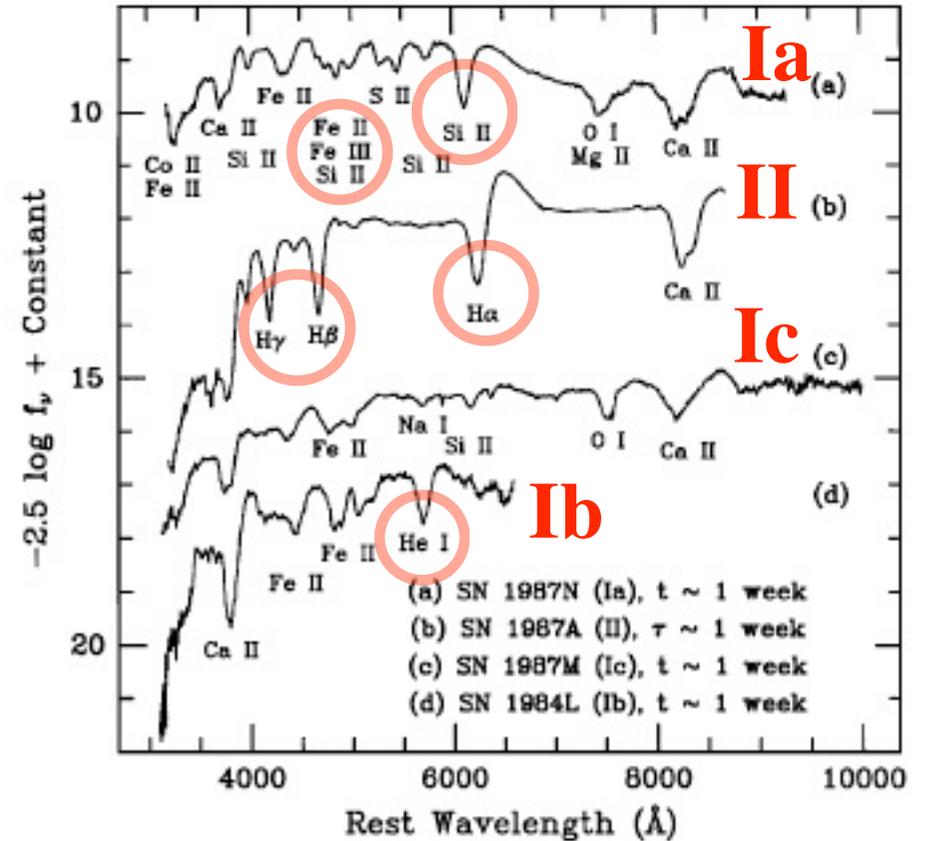
(Young et al. 2010)

# SN2007biのスペクトル

## ● SN2007biの前期スペクトル



(Gal-Yam et al. 2009)



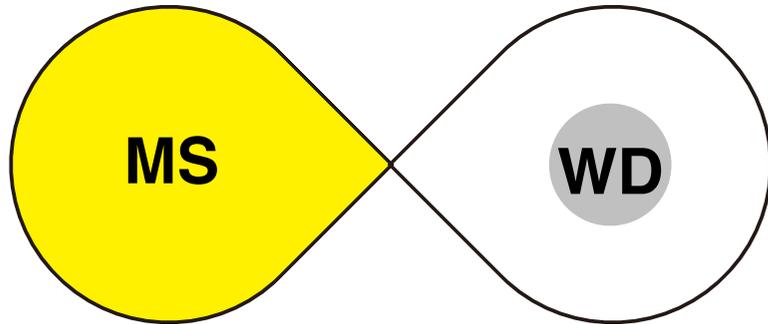
(Filippenko 1997)

## ● SN 2007bi → Type Ic

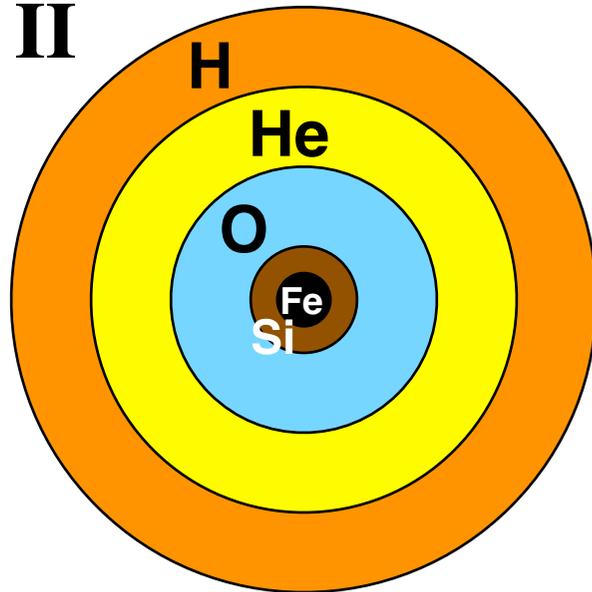
親星はCO星(H,He層がない)

# 超新星typeと爆発機構

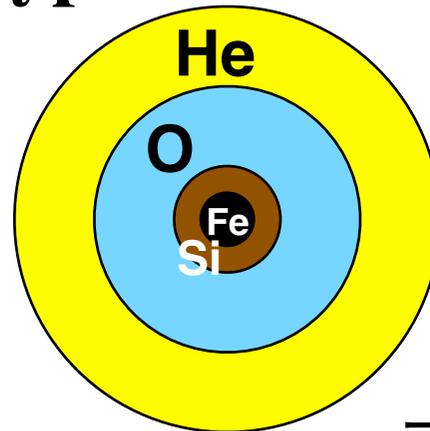
- 核燃焼型
- Type Ia



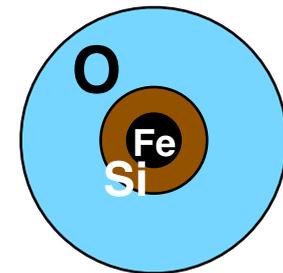
- 重力崩壊型
- Type II



- Type Ib



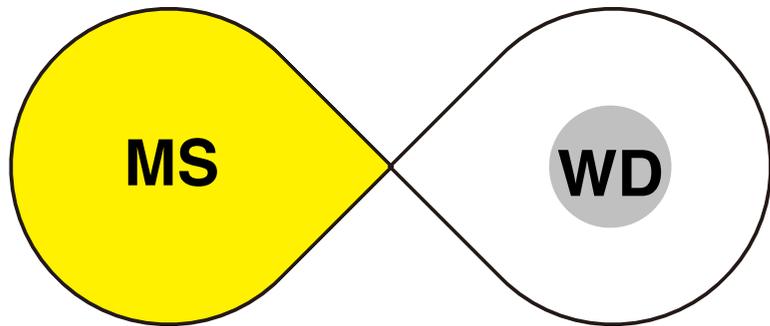
- Type Ic



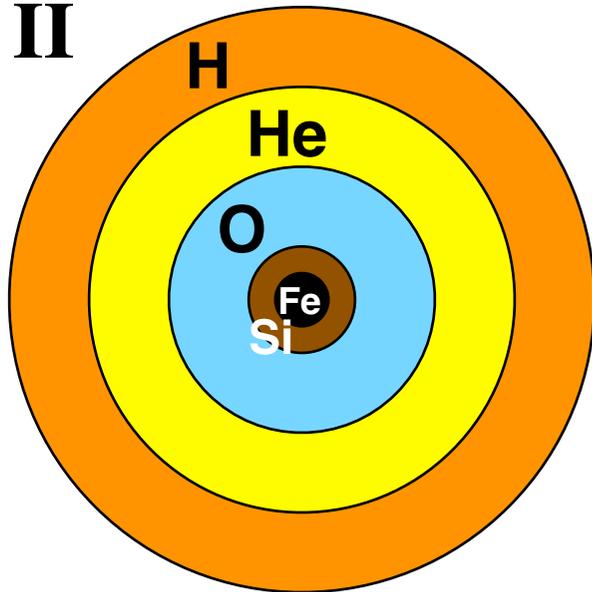
大質量 or binary

# 超新星typeと爆発機構

- 核燃焼型
- Type Ia

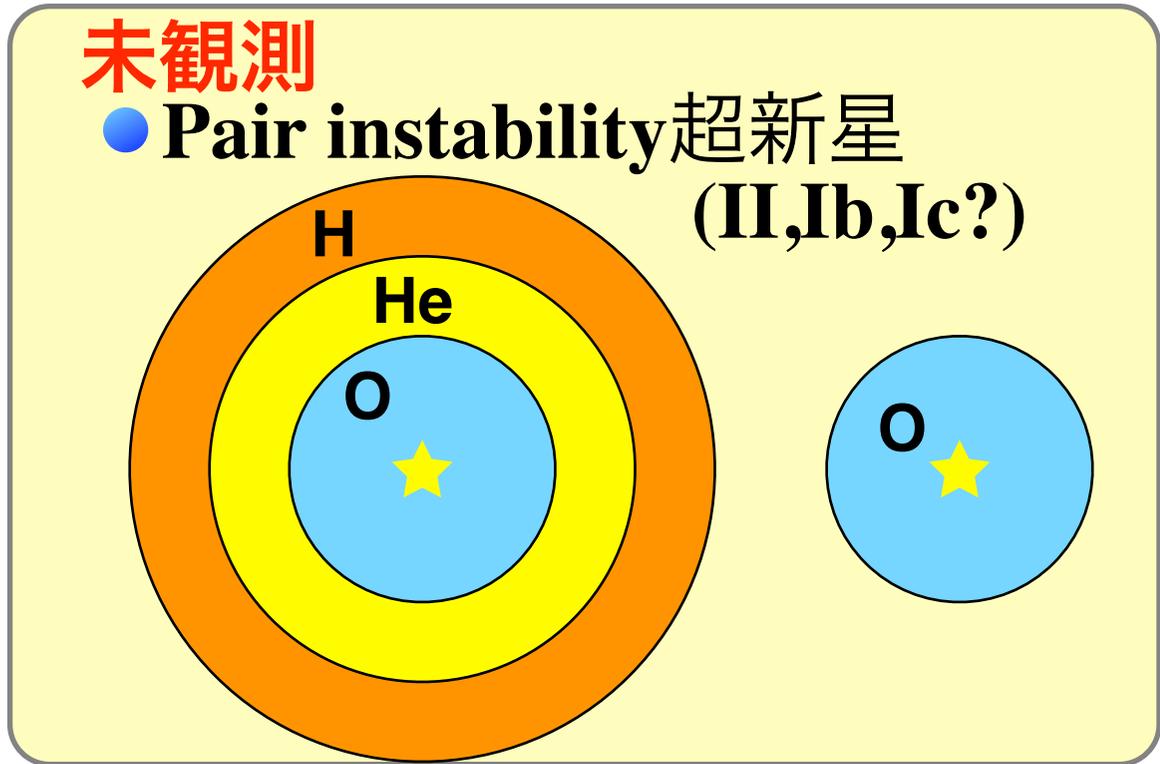


- 重力崩壊型
- Type II

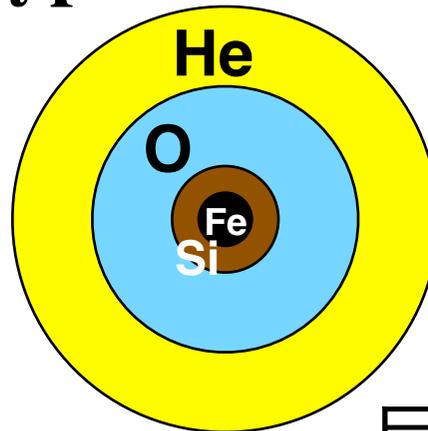


未観測

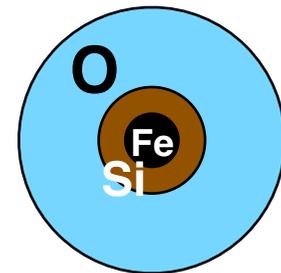
- Pair instability超新星 (II,Ib,Ic?)



- Type Ib



- Type Ic



巨大質量 or binary

# SN 2007biの光度曲線

## ● SN 2007bi

(Gal-Yam et al. 2009)

2007年4月6.5日

- 非常に明るい

$$M_{R,\max} = -21.3 \text{ mag}$$

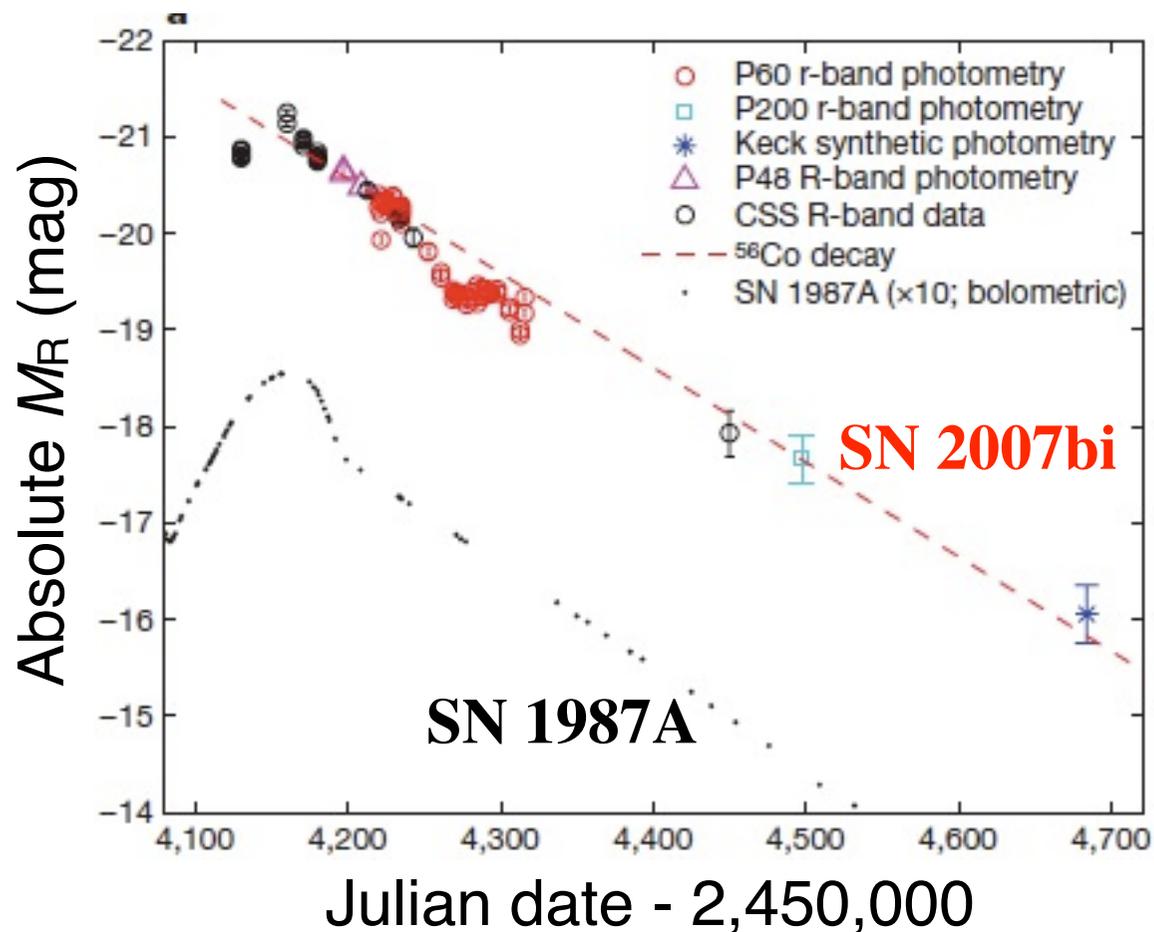


大量の $^{56}\text{Ni}$ を放出

$$M(^{56}\text{Ni}) \sim 3 - 10 M_{\odot}$$

$$\text{c.f. } M(^{56}\text{Ni}) = 0.07 M_{\odot}$$

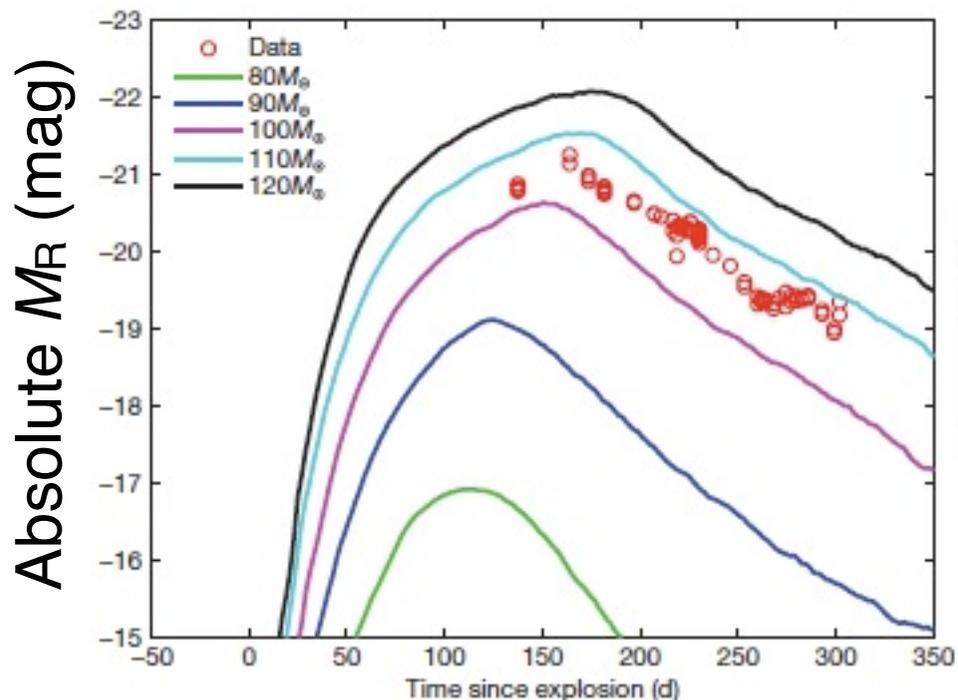
(SN 1987A)



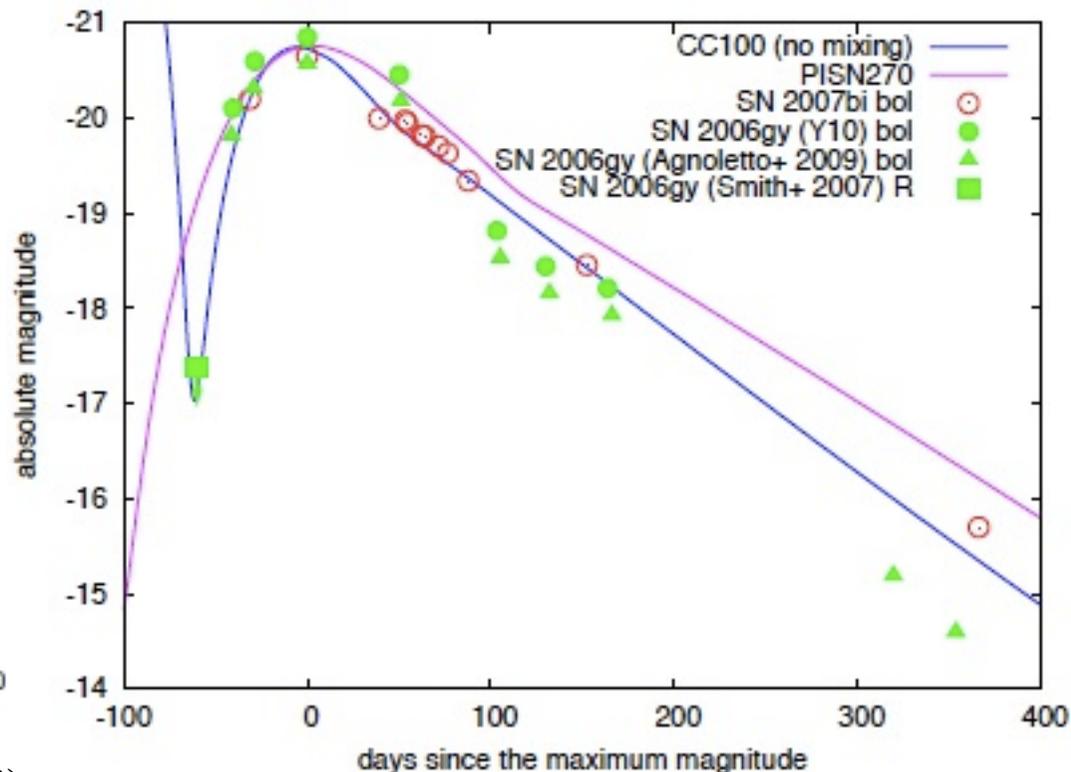
(Gal-Yam et al. 2009)

# SN 2007biの光度曲線と爆発モデル

## ● 光度曲線を再現する超新星モデル



(Gal-Yam et al. 2009)



(Moriya et al. 2010)

## ● Pair-instability SN (PISN)

## ● Core collapse SN (CCSN)

➡  $M_f \sim 95 - 105 M_\odot$

➡  $M_f \sim 43 M_\odot$

● 作られるNiの量は同程度  $M(^{56}\text{Ni}) \sim 3 - 10 M_\odot$

➡ どちらの親星がより現実的か？

# Pair-Instability or Core Collapse?

- SN 2007bi → Type Icの非常に明るい超新星
  - $M(^{56}\text{Ni}) \sim 3 - 10 M_{\odot}$ .
  - He層は存在しないか,ごく少量
- ふたつの爆発機構の可能性
  - Pair-instability超新星 (PISN)  
 $M_f \sim 95 - 105 M_{\odot}$ .
  - 重力崩壊型超新星 (CCSN)  
 $M_f \sim 43 M_{\odot}$ .

# 研究目的

---

[本研究] 巨大質量星の進化からSN 2007biの親星を議論

●  $100 M_{\odot} \leq M_{\text{MS}} \leq 500 M_{\odot}$ ,  $Z_0 = 0.2 Z_{\odot}$ . 巨大質量星の進化

➡ 星の初期質量  $M_{\text{MS}}$  と  
最終質量  $M_{\text{f}}$ , CO core質量  $M_{\text{CO}}$  の関係

➡ 星表面に残るHe量  $M(\text{He})$

SN 2007biがPISN, CCSNの場合における  
親星の初期質量範囲

➡ どちらの親星がより現実的か？

# $M_{\text{MS}} > 100 M_{\odot}$ の星の進化計算

- 恒星進化モデル(Saio, Nomoto, and Kato 1988を拡張)

$$\frac{\partial P}{\partial M_r} = - \frac{GM_r}{4\pi r^4}$$

$$\frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

$$\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} = \min(\nabla_{\text{ad}}, \nabla_{\text{rad}})$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \epsilon_{\text{nucl}} - \epsilon_{\text{v}} + \epsilon_{\text{grav}}$$

$100 M_{\odot} \leq M_{\text{MS}} \leq 500 M_{\odot}$ ,  $Z_0 = 0.2 Z_{\odot}$  巨大質量星の進化

➡ 水素燃焼から炭素燃焼までを計算

- 組成分布の進化, エネルギー生成

➡  $n$ , H~Br(282核種)の核反応ネットワーク

- Opacity ➡ OPAL 1995, etc.

# $M_{\text{MS}} > 100 M_{\odot}$ の星の進化計算

---

- 巨大質量星の質量放出率

➡ よくわかっていない

…大質量星の質量放出率を外挿

- OB星 ➡ Vink et al. (2001);  $\propto Z^{0.64 - 0.69}$

Radiation-driven windのモデル計算

- 赤色巨星 ➡ de Jager et al. (1988)

質量放出率の観測から導出

本研究では $\propto Z^{0.64}$ を仮定

- Wolf-Rayet (WR)星 ➡ Nugis and Lamers (2000; **NL00**)

windのモデル計算と観測

不定性を考慮して3通りの計算

# $M_{\text{MS}} > 100 M_{\odot}$ の星の進化計算

---

## ● 巨大質量星の質量放出率

不定性を考慮して3通りの計算

**Case A** → 大質量星の質量放出率を使用

**Case B** → 主系列星と赤色巨星  
→ 大質量星の質量放出率を使用  
**WR星…約1.5倍**

観測からの不定性 (Crowther et al. 2007)

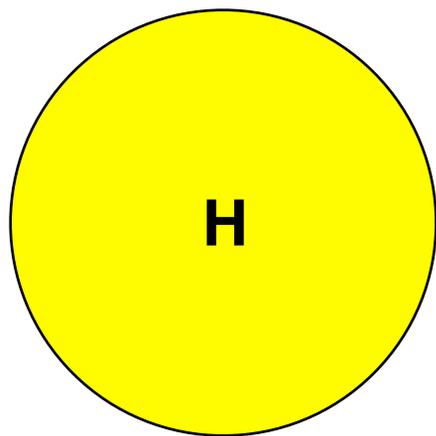
**Case C** → 大質量星の質量放出率の1/2

非等方的な質量放出の効果 (Vink et al. 2001; Pulse et al. 2008)

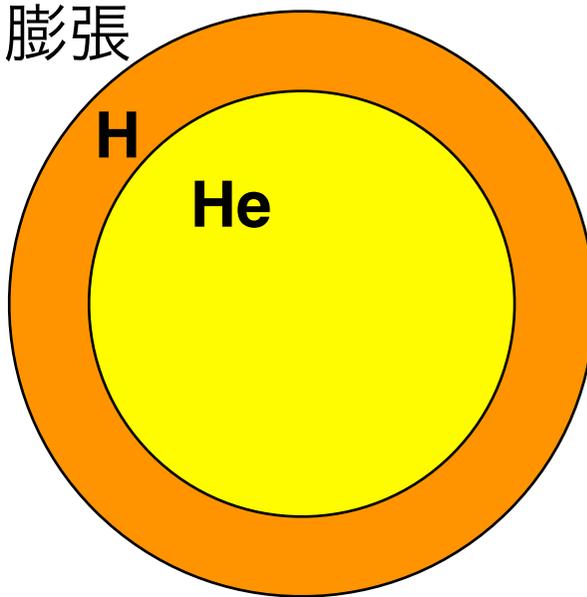
理論からの制限 (Hirschi 2008)

# $M_{\text{MS}} > 100 M_{\odot}$ の星の進化

主系列星

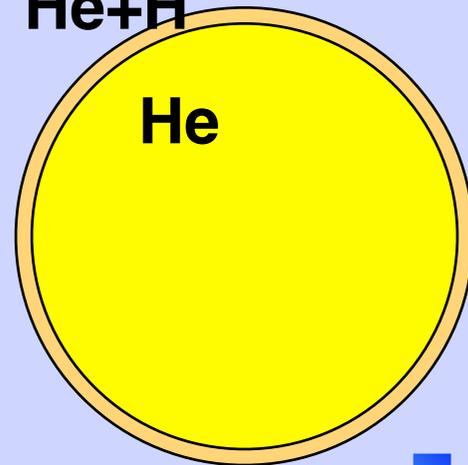


外層の膨張



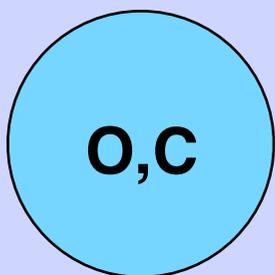
WNL星 ( $X_s(\text{H}) < 0.4$ )

He+H

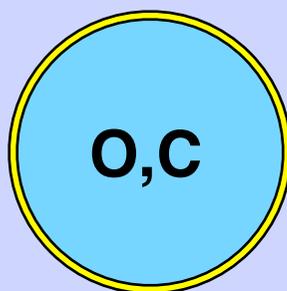


Wolf-Rayet星

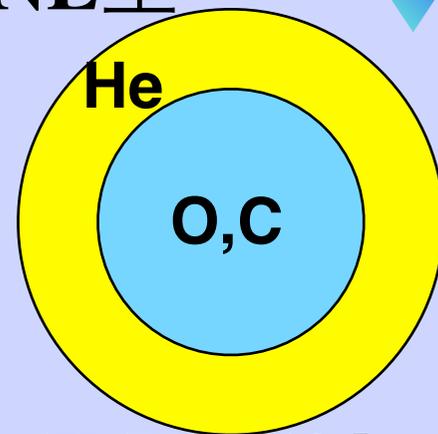
WO星



WC星



WNE星



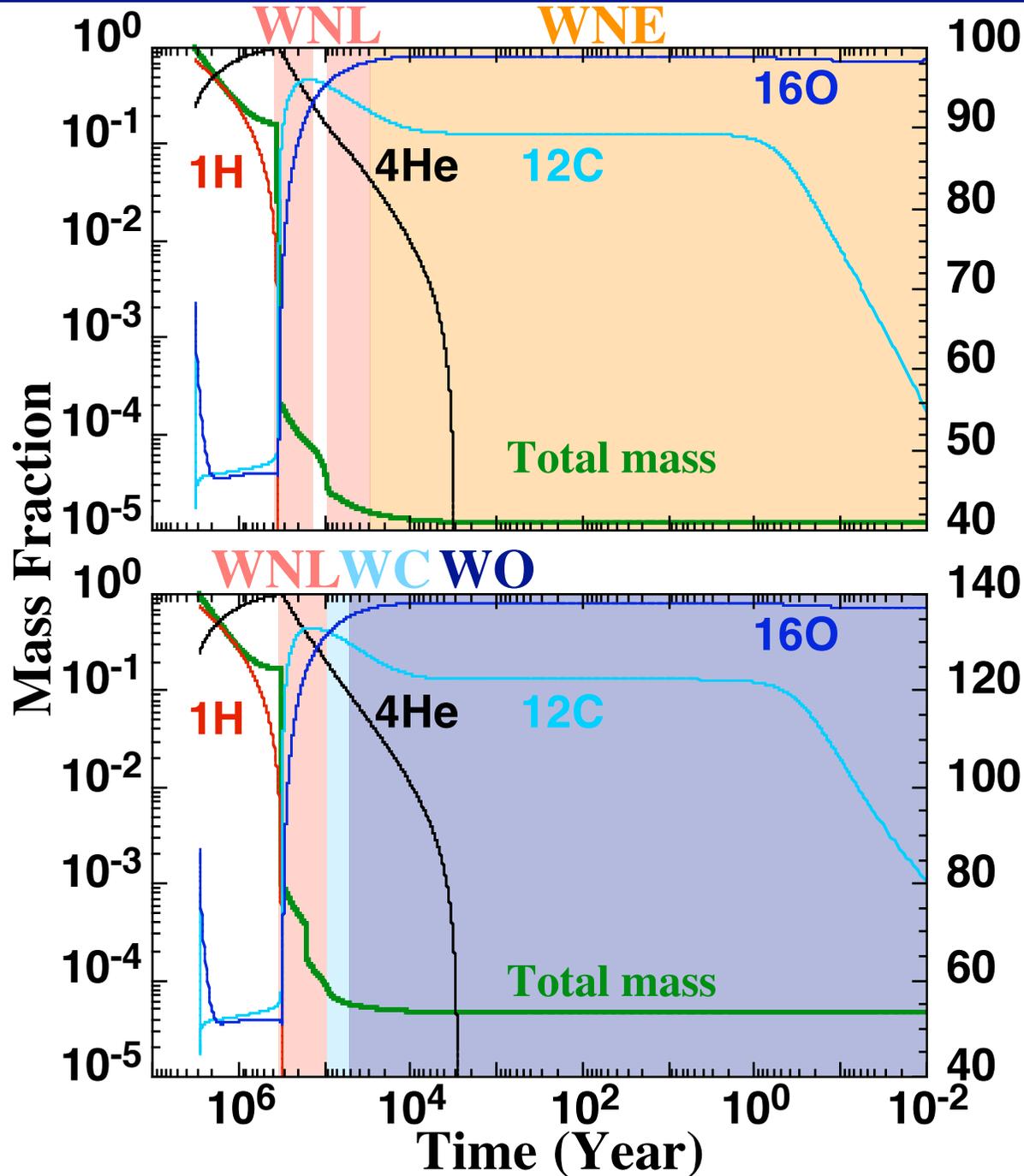
$(N_s(\text{He}) < N_s(\text{C}+\text{O}))$

$(N_s(\text{N}) < N_s(\text{C}),$   
 $N_s(\text{He}) > N_s(\text{C}+\text{O}))$

$(X_s(\text{H}) < 10^{-5},$   
 $N_s(\text{N}) > N_s(\text{C}))$

星の質量や質量放出率に強く依存

# 星の質量と組成の時間進化



**Case A**

WNL

WNE

WC

WO

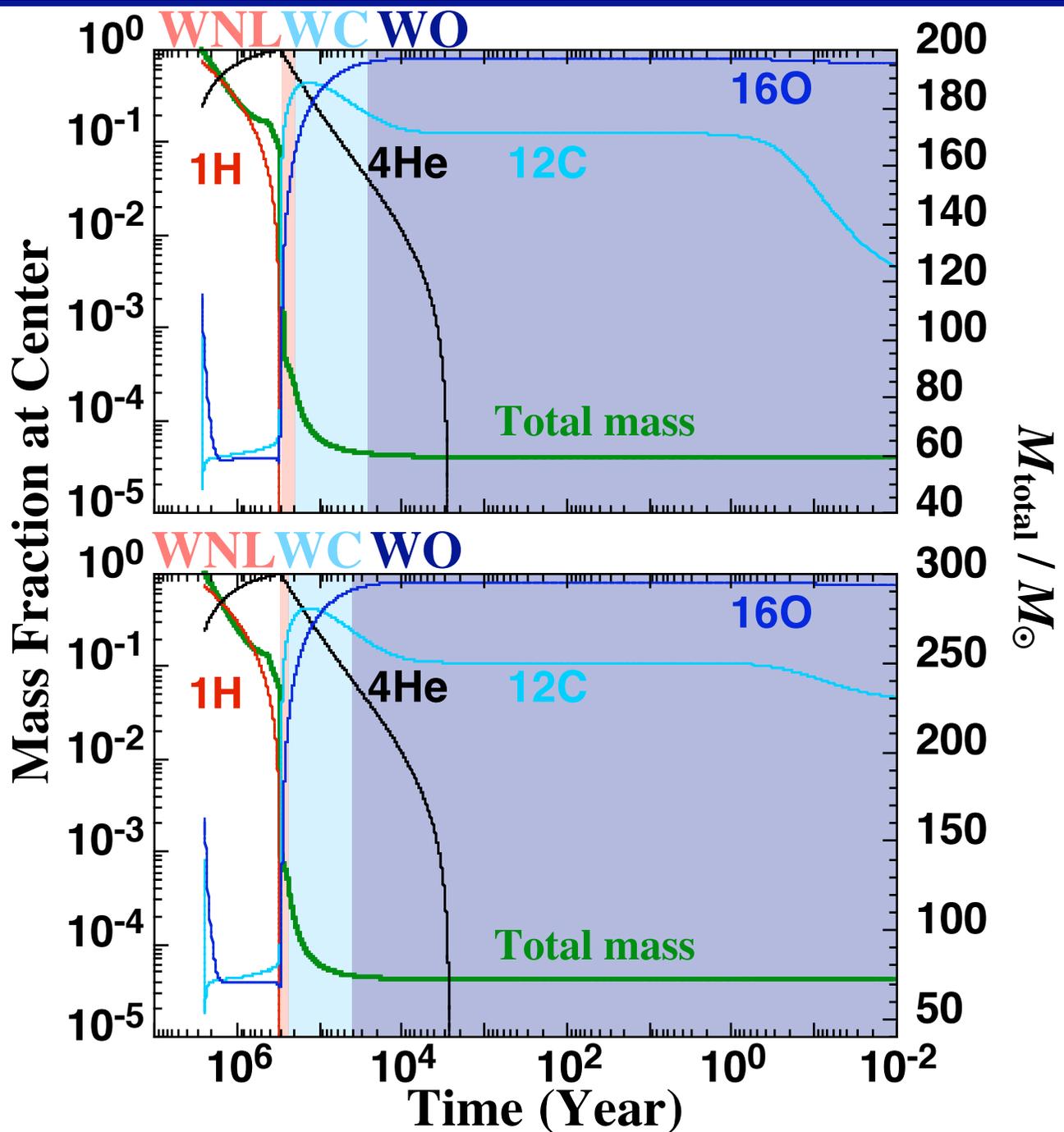
$$M_{\text{MS}} = 100 M_{\odot}$$

$$t_{\text{MS-C}} = 3.19 \text{ Myr}$$

$$M_{\text{MS}} = 140 M_{\odot}$$

$$t_{\text{MS-C}} = 2.86 \text{ Myr}$$

# 星の質量と組成の時間進化



**Case A**

WNL  
WNE  
WC  
WO

$$M_{\text{MS}} = 200 M_{\odot}$$

$$t_{\text{MS-C}} = 2.61 \text{ Myr}$$

$$M_{\text{MS}} = 300 M_{\odot}$$

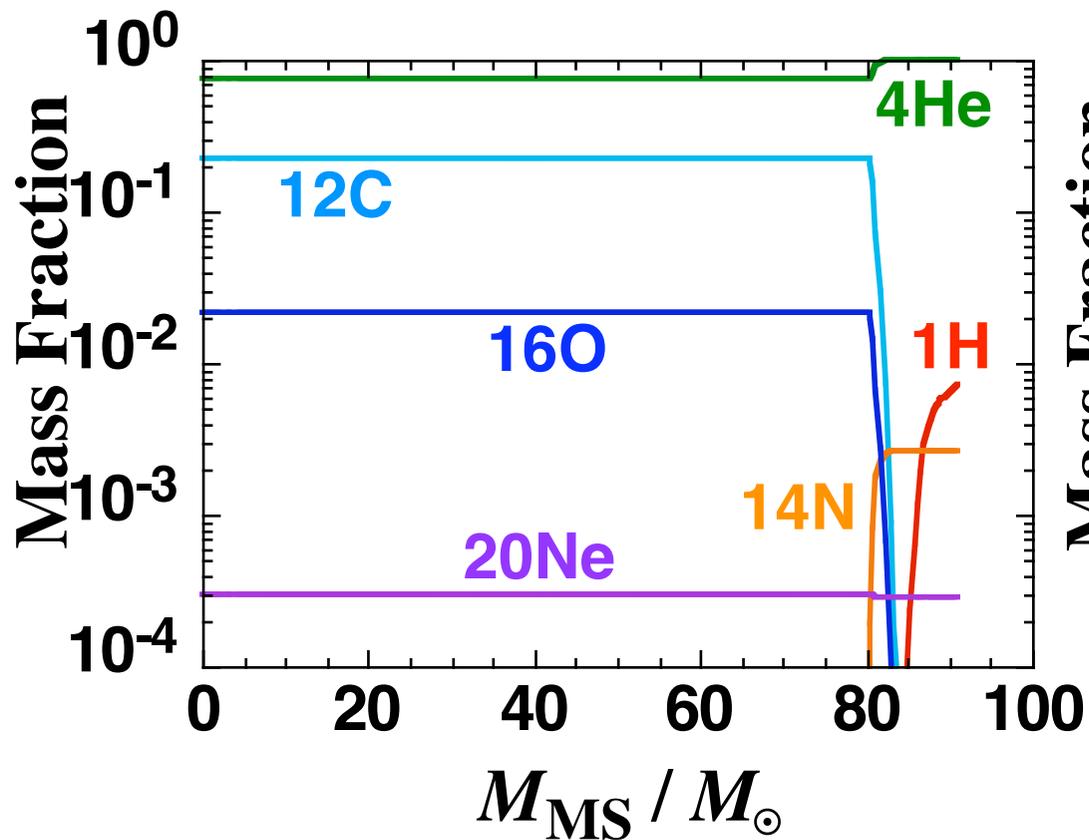
$$t_{\text{MS-C}} = 2.51 \text{ Myr}$$

# 巨大質量星の質量比分布

## ● He燃焼時の質量比分布

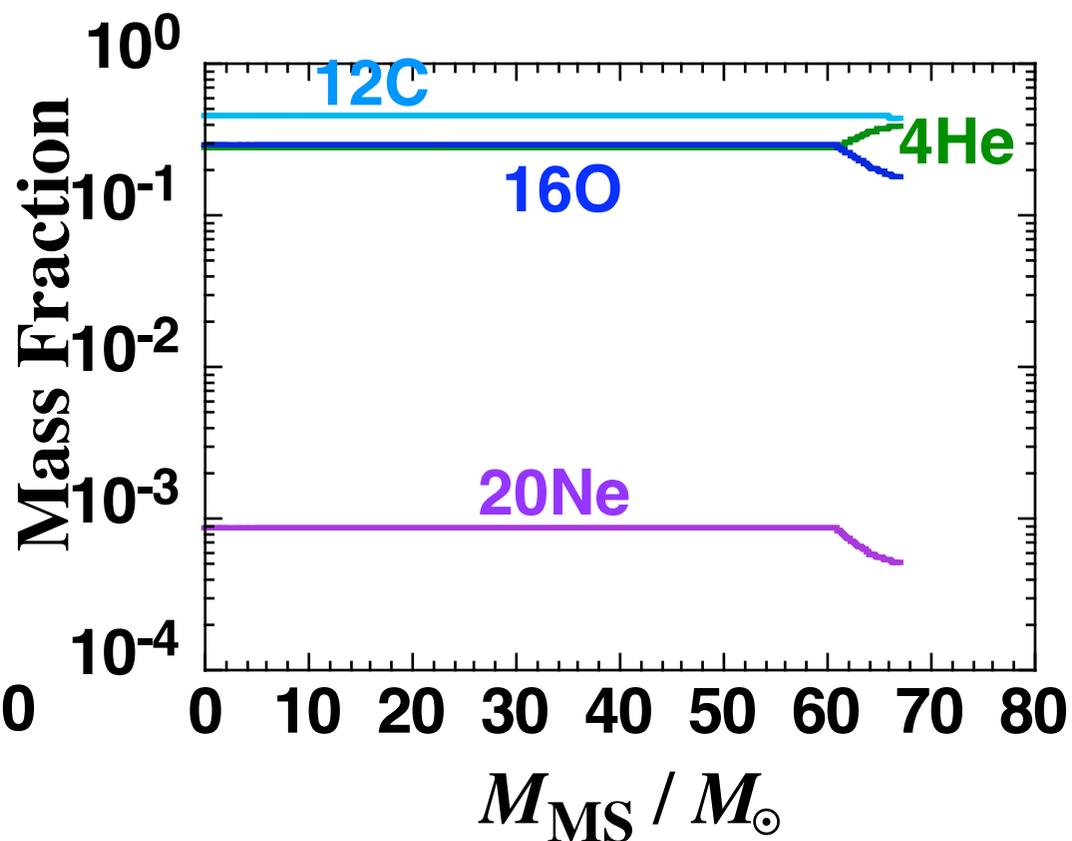
$M_{\text{MS}} = 200 M_{\odot}$

$M = 91.9 M_{\odot}$  WNL星



$M_{\text{MS}} = 200 M_{\odot}$

$M = 67.8 M_{\odot}$  WO星

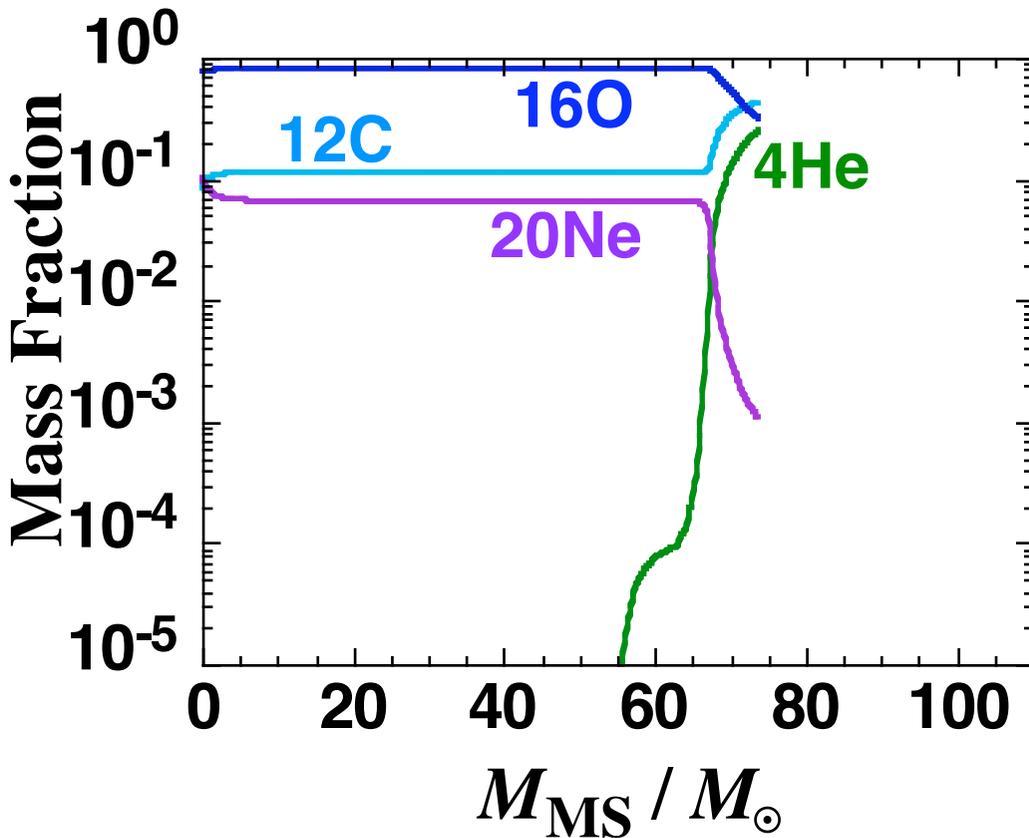


# 巨大質量星の質量比分布

## ● 炭素燃焼時の質量比分布

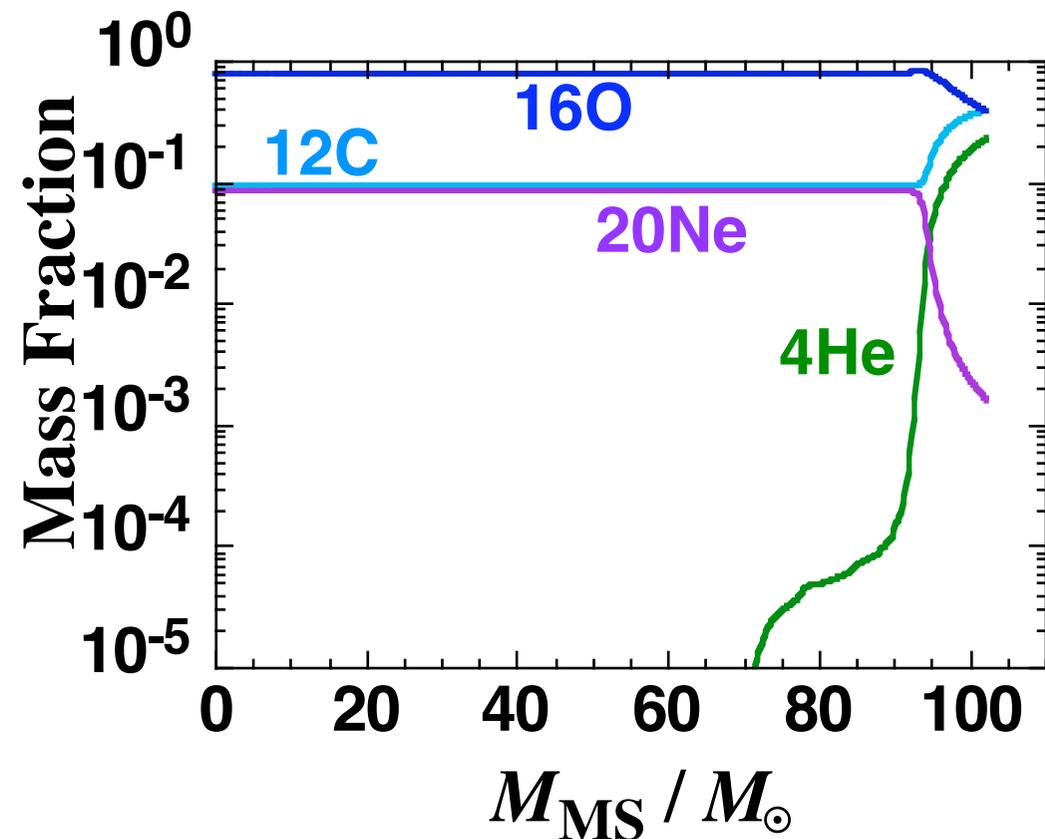
$$M_{\text{MS}} = 200 M_{\odot}$$

$$M_{\text{f}} = 59.0 M_{\odot} \text{ WO星}$$



$$M_{\text{MS}} = 300 M_{\odot}$$

$$M_{\text{f}} = 71.6 M_{\odot} \text{ WO星}$$



# 巨大質量星の質量比分布

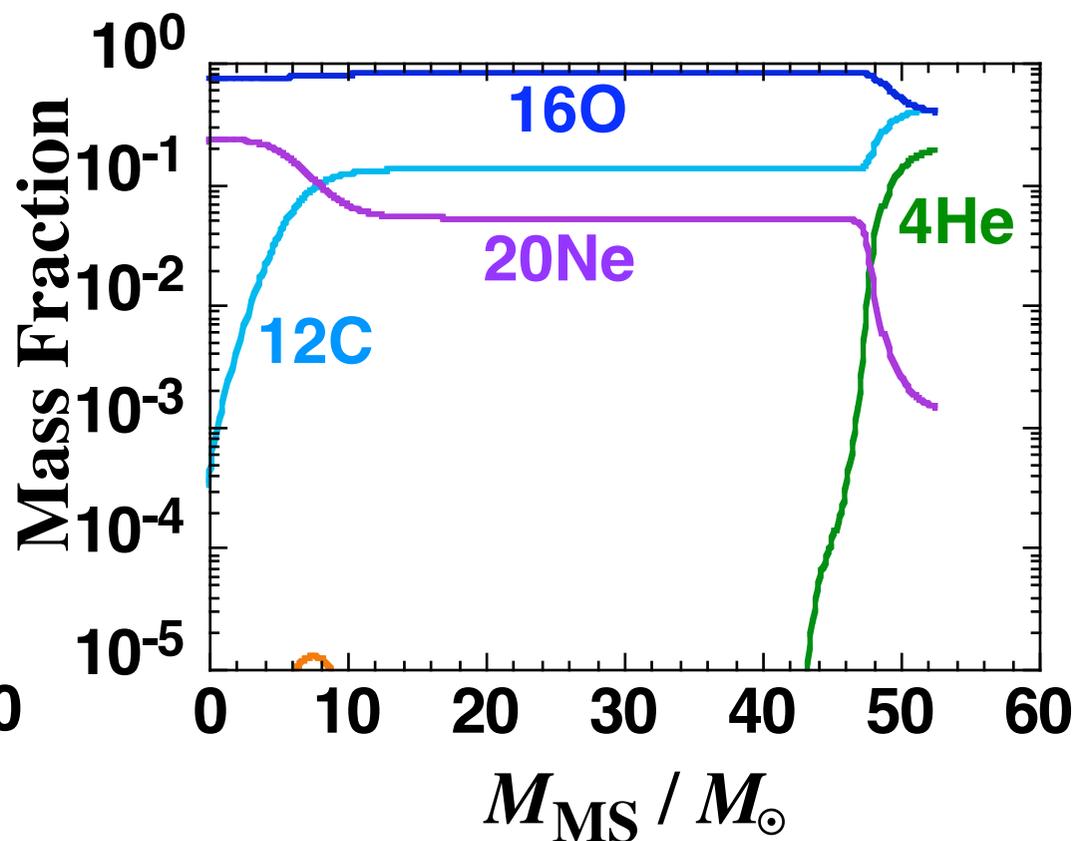
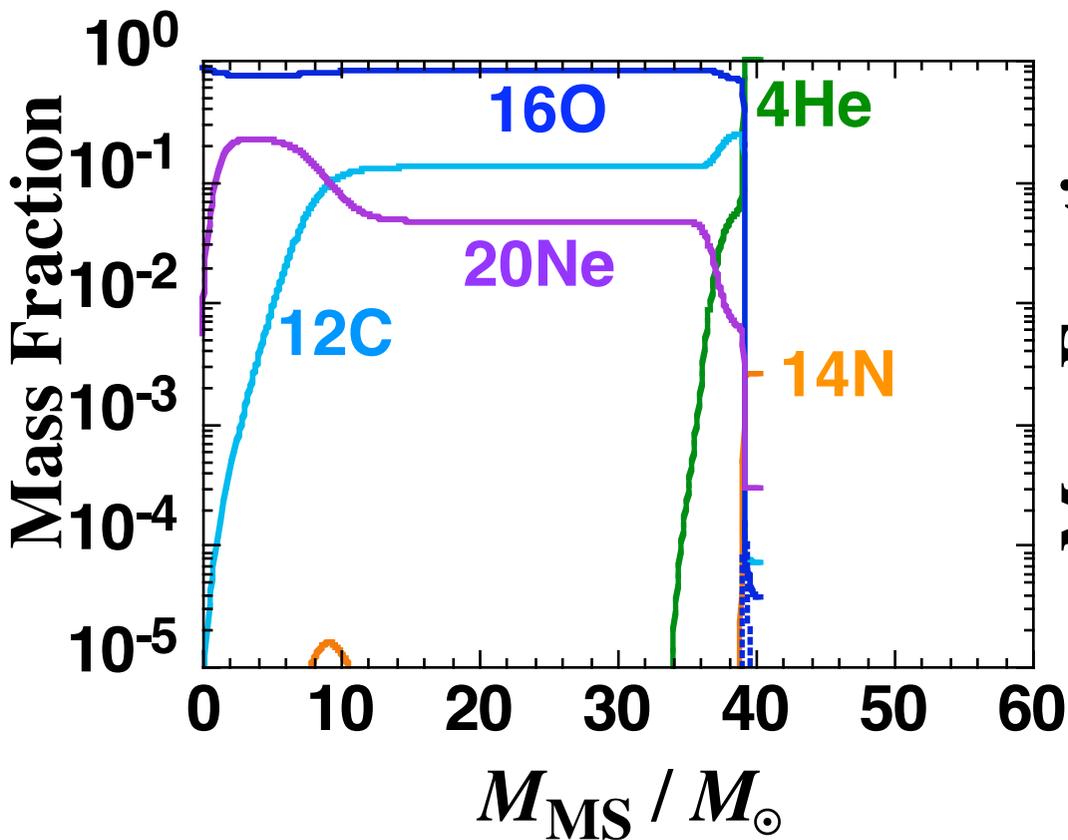
## ● 炭素燃焼時の質量比分布

$$M_{\text{MS}} = 100 M_{\odot}$$

$$M_{\text{f}} = 40.8 M_{\odot} \text{ WNE星}$$

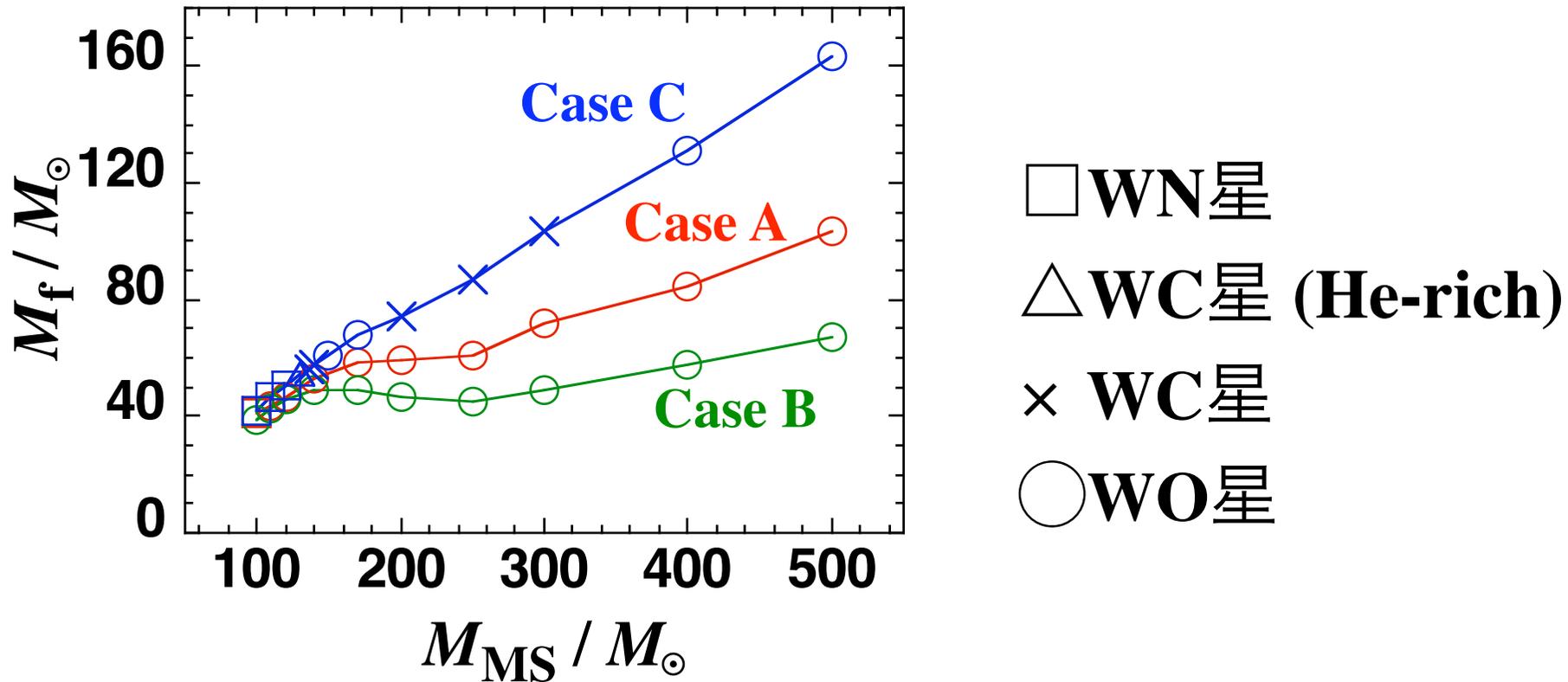
$$M_{\text{MS}} = 140 M_{\odot}$$

$$M_{\text{f}} = 53.1 M_{\odot} \text{ WO星}$$



# 巨大質量星の最終質量

- 星の初期質量  $M_{MS}$  と最終質量  $M_f$  の関係



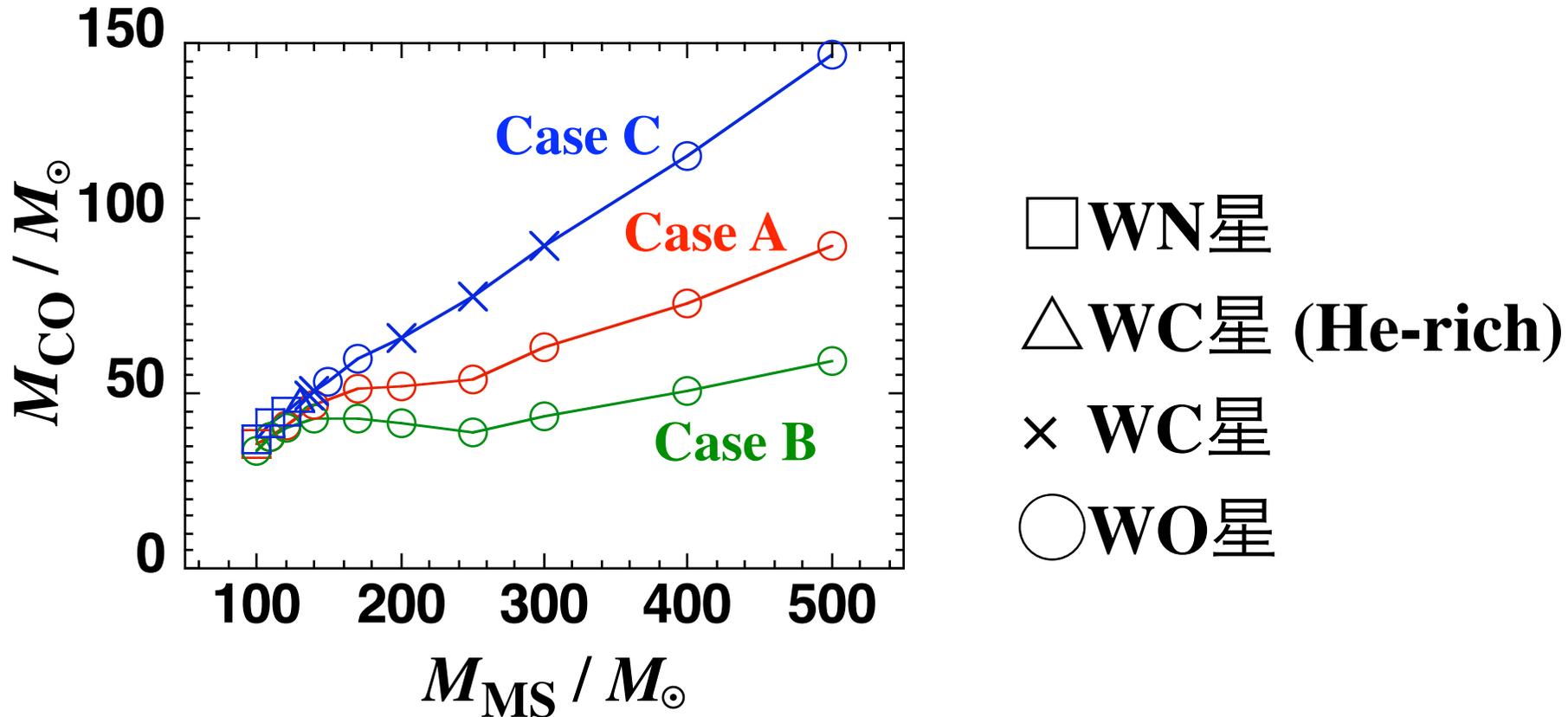
- **Case A** →  $M_f \sim 41 - 103 M_{\odot}$ : 主にWO星になる

- 質量放出率の不定性

→ 大きな  $M_{MS}$  の星で  $M_f$  の不定性が大きい

# 巨大質量星のCO core質量

- 星の初期質量  $M_{\text{MS}}$  とCO core質量  $M_{\text{CO}}$  の関係



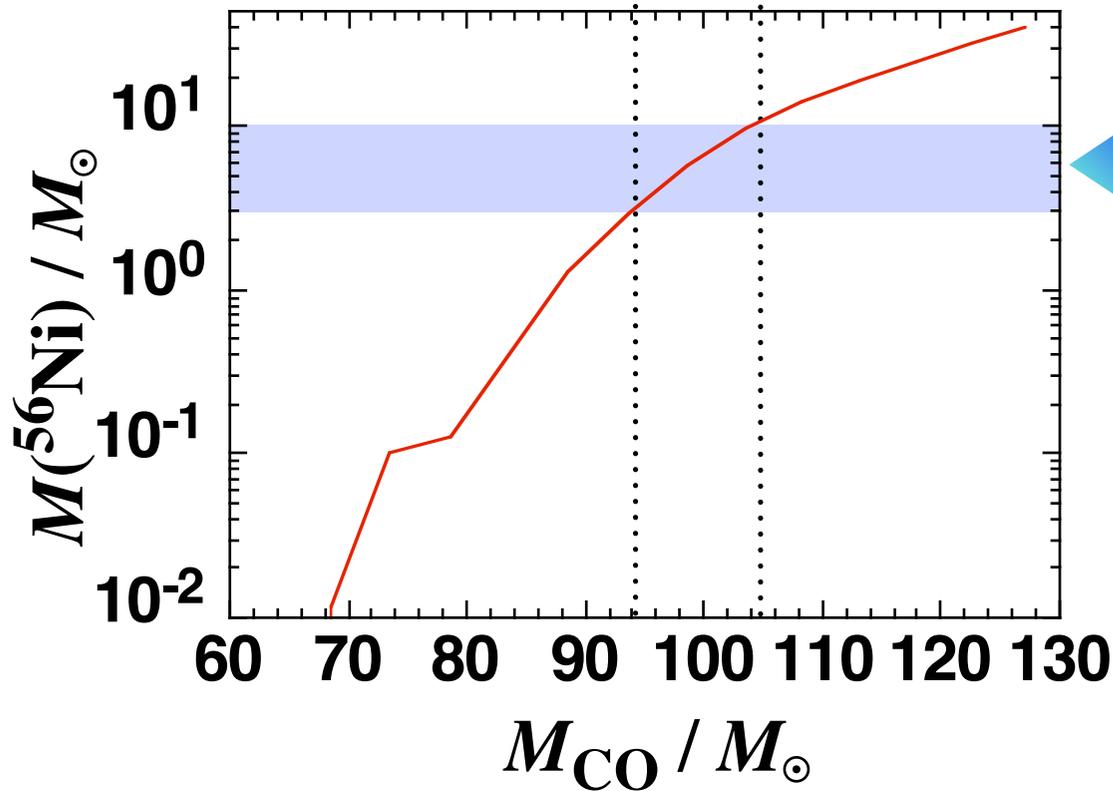
- 傾向は最終質量とあまり変わらない

➡ SN 2007biの爆発機構の可能性を議論

# Pair-Instability超新星の $^{56}\text{Ni}$ 生成量

- Pair-Instability超新星モデル (Heger & Woosley 2002)

- 種族III He星モデル ( $Z_0=0$ を想定)



← SN 2007biの観測から  
推定される $^{56}\text{Ni}$ 生成量  
(Gal-Yam et al. 2009)

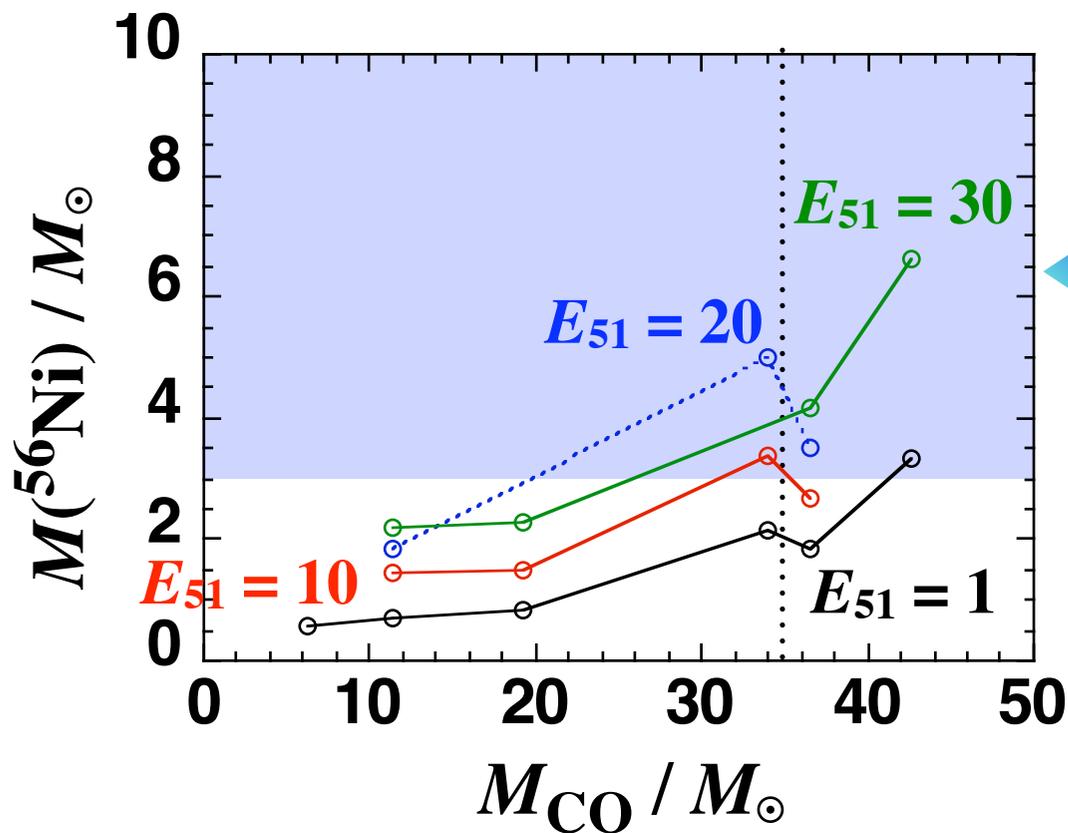
- PISN →  $M_{\text{CO}} \sim 95 - 105 M_{\odot}$

Umeda & Nomoto (2002)でも同様の傾向

# 重力崩壊型超新星の $^{56}\text{Ni}$ 生成量

- 種族III星重力崩壊型超新星モデル (Umeda & Nomoto 2008)

$^{56}\text{Ni}$ 生成量の星の質量, 爆発エネルギーに対する依存性



$$E_{51} = E_{\text{exp}} / (10^{51} \text{ ergs})$$

← SN 2007biの観測から推定される $^{56}\text{Ni}$ 生成量 (Gal-Yam et al. 2009)

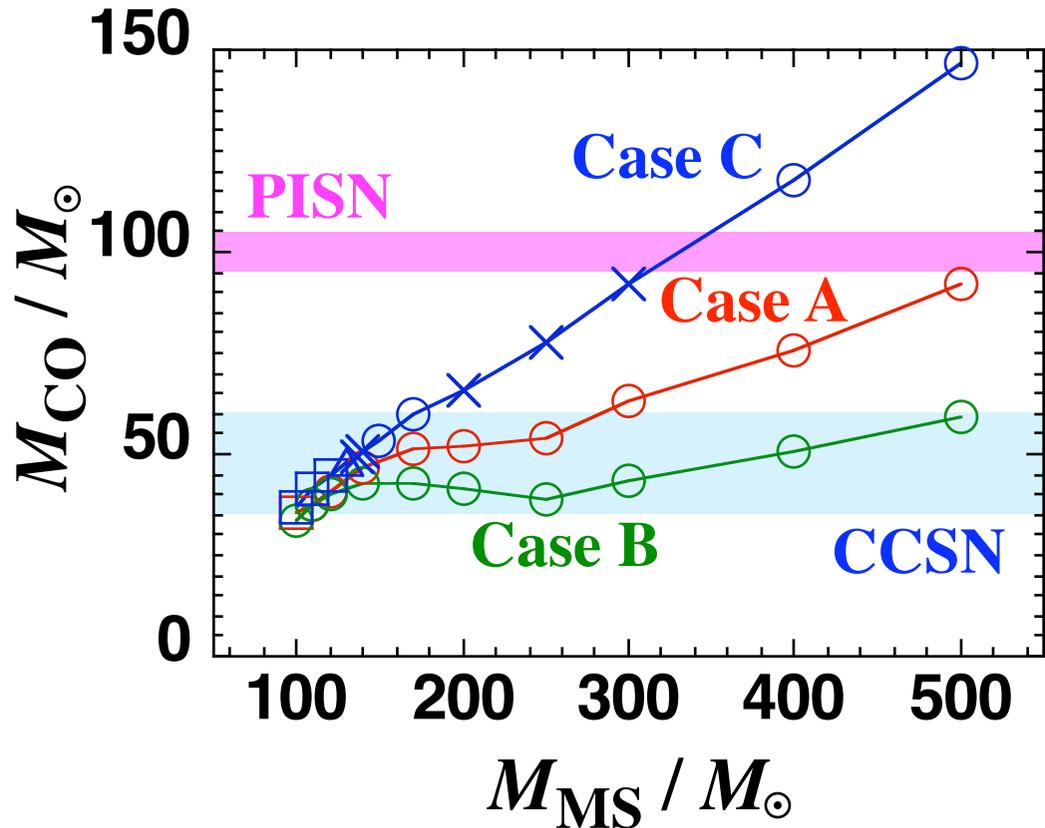
→  $M_{\text{CO}} \gtrsim 35 M_{\odot}$

- $M_{\text{CO}} > 60 M_{\odot}$ の星はPISNとして爆発 (Heger & Woosley 2002)

→ CCSN:  $M_{\text{CO}} \sim 35 - 60 M_{\odot}$

# 巨大質量星のCO core質量

- 星の初期質量  $M_{\text{MS}}$  とCO core質量  $M_{\text{CO}}$  の関係



$$M(^{56}\text{Ni}) = 3 - 10 M_{\odot}$$

(Gal-Yam et al. 2009)

● PISN  $\rightarrow M_{\text{CO}} \sim 95 - 105 M_{\odot}$

● CCSN  $\rightarrow M_{\text{CO}} \sim 35 - 60 M_{\odot}$

(Umeda & Nomoto 2002, 2008;  
Heger & Woosley 2002)

● PISN  $\rightarrow M_{\text{MS}} \sim 515 - 575 M_{\odot}$   
( $M_{\text{MS}} \sim 310 - 350 M_{\odot}$  for Case C)

● CCSN  $\rightarrow M_{\text{MS}} \sim 100 - 280 M_{\odot}$   
( $M_{\text{MS}} \sim 110 - 500 M_{\odot}$  for Case B)  
( $M_{\text{MS}} \sim 100 - 170 M_{\odot}$  for Case C)

# 星表面に残るHe量

---

- **Type Ic**超新星 → He線が見えない  
→ 表面にHeがない？

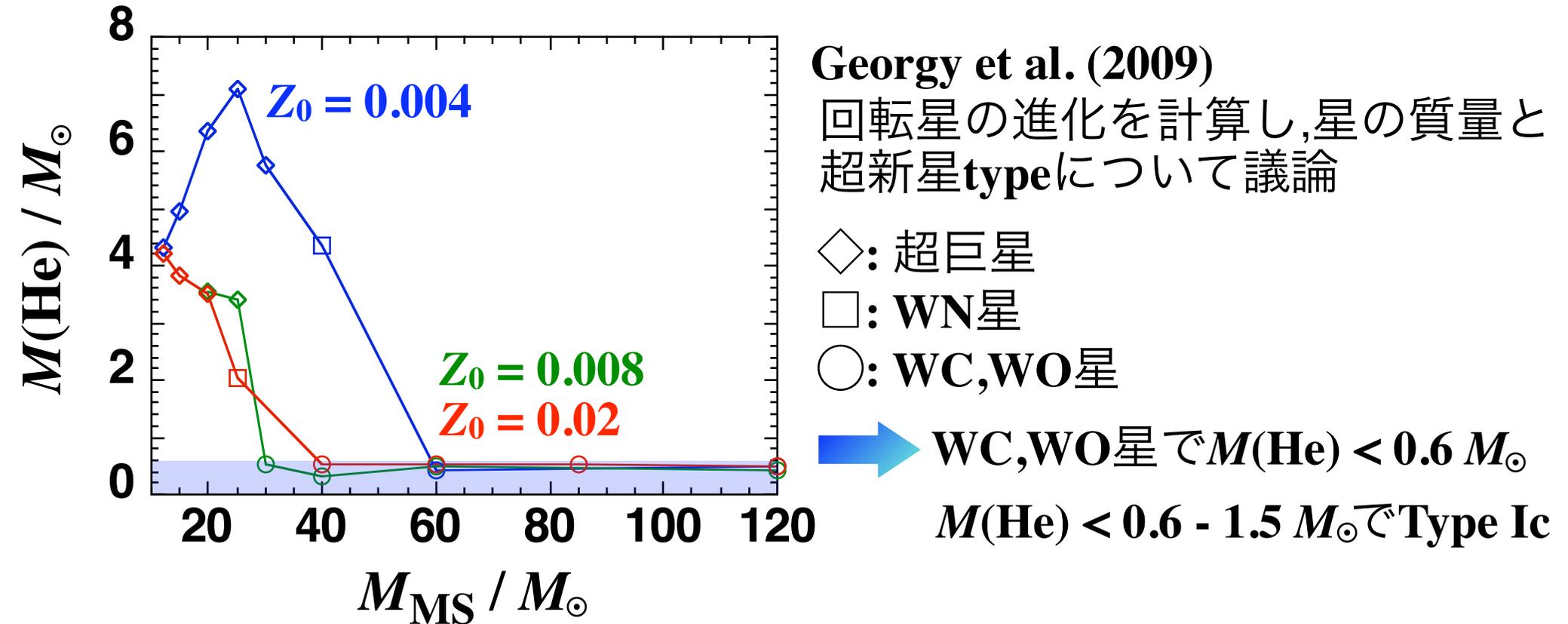
# 星表面に残るHe量

---

- **Type Ic超新星** → **He線が見えない**  
→ **表面にHeがない？**
- **He線** →  **$^{56}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{Co}$ が出す $\gamma$ 線**  
→ 電子を加速  
→ **He I line (5876Åなど)を励起** (Lucy 1991)  
→ **He線強度は $^{56}\text{Ni}$ 量, 中間層の大きさ, 混合に依存**  
(e.g. Woosley & Eastman 1997)  
→ **Type IcになるHe量の上限はわかっていない**

# 星表面に残るHe量

- 恒星進化モデル → WN星とWC星でHe量に大きな違い



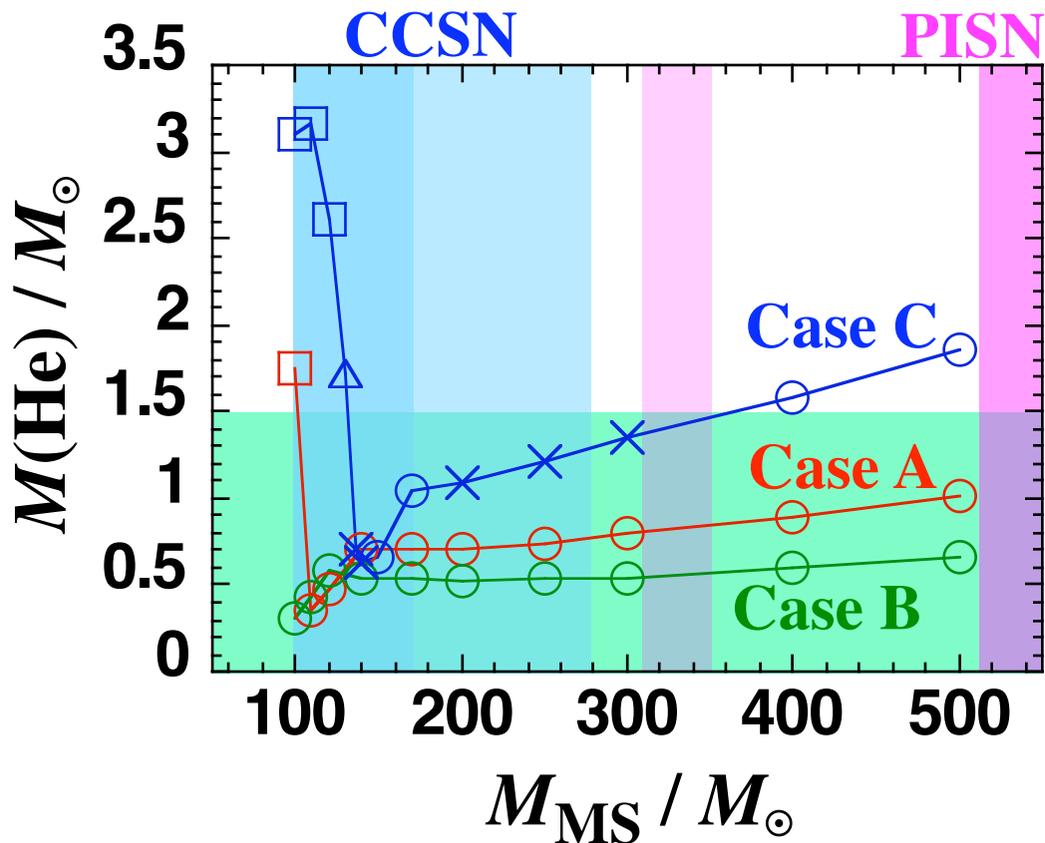
- Wellstein & Langer (1999); Yoon et al. (2010)

→ binary進化によるType Ib, Ic超新星の親星形成  
 $M(\text{He}) < 0.5 M_{\odot}$ でType Ic ( $> 0.98 M_{\odot}$ でIb)

→  $M(\text{He}) < 0.5 - 1.5 M_{\odot}$ でType Icとする

# 星表面に残るHe量

## ● He存在量からのSN 2007bi親星の制限



●  $M(\text{He}) < 0.5 - 1.5 M_{\odot}$

➡ Ic型超新星として爆発

●  $M(\text{He}) < 0.5 M_{\odot}$

➡ SN 2007biは重力崩壊型

●  $M(\text{He}) < 1.5 M_{\odot}$

➡ CO coreの制限を満たすSN 2007bi親星

➡ WC, WO星は Ic 型超新星として爆発

# 爆発機構の実現可能性

- $r_{\text{PI/CC}}$  : SN 2007biが量PISN, CCSNとして爆発する可能性の比  
**Salpeter IMF ( $\propto M_{\text{MS}}^{-2.35}$ )を仮定**

Case	PISN ( $M_{\odot}$ )	CCSN ( $M_{\odot}$ )	$r_{\text{PI/CC}}$
<b>A</b>	<b>515 - 575</b>	<b>110 - 280</b>	<b>0.024</b>
<b>B</b>	-	<b>110 - 500</b>	<b>0</b>
<b>C</b>	<b>310 - 350</b>	<b>135 - 170</b>	<b>0.19</b>

$M(\text{He}) < 1.5 M_{\odot}$  または  $X_{\text{S}}(\text{He}) < 0.5$  の場合

\* $M(\text{He}) < 0.5 M_{\odot}$  の場合にはPISNにはならない

- IMFから考えるとSN2007biは重力崩壊型超新星として爆発した可能性が高い

# まとめ

$100 M_{\odot} \leq M_{\text{MS}} \leq 500 M_{\odot}$ ,  $Z_0 = 0.2 Z$  巨大質量星の進化

➡ PISN, CCSNについてType Ic SN 2007biの親星の初期質量範囲  $M_{\text{MS}}$  を推定

Case	PISN ( $M_{\odot}$ )	CCSN ( $M_{\odot}$ )	$r_{\text{PI/CC}}$
<b>A</b>	(-) <b>515 - 575</b>	(110 - 120) <b>110 - 280</b>	<b>0.024</b>
<b>B</b>	(-) -	(110 - 115) <b>110 - 500</b>	<b>0</b>
<b>C</b>	(-) <b>310 - 350</b>	(-) <b>135 - 170</b>	<b>0.19</b>

上段:  $M(\text{He}) < 0.5 M_{\odot}$  の場合

下段:  $M(\text{He}) < 1.5 M_{\odot}$  または  $X_{\text{S}}(\text{He}) < 0.5$  の場合

- SN2007biは重力崩壊型超新星(CCSN)として爆発した可能性が高い