

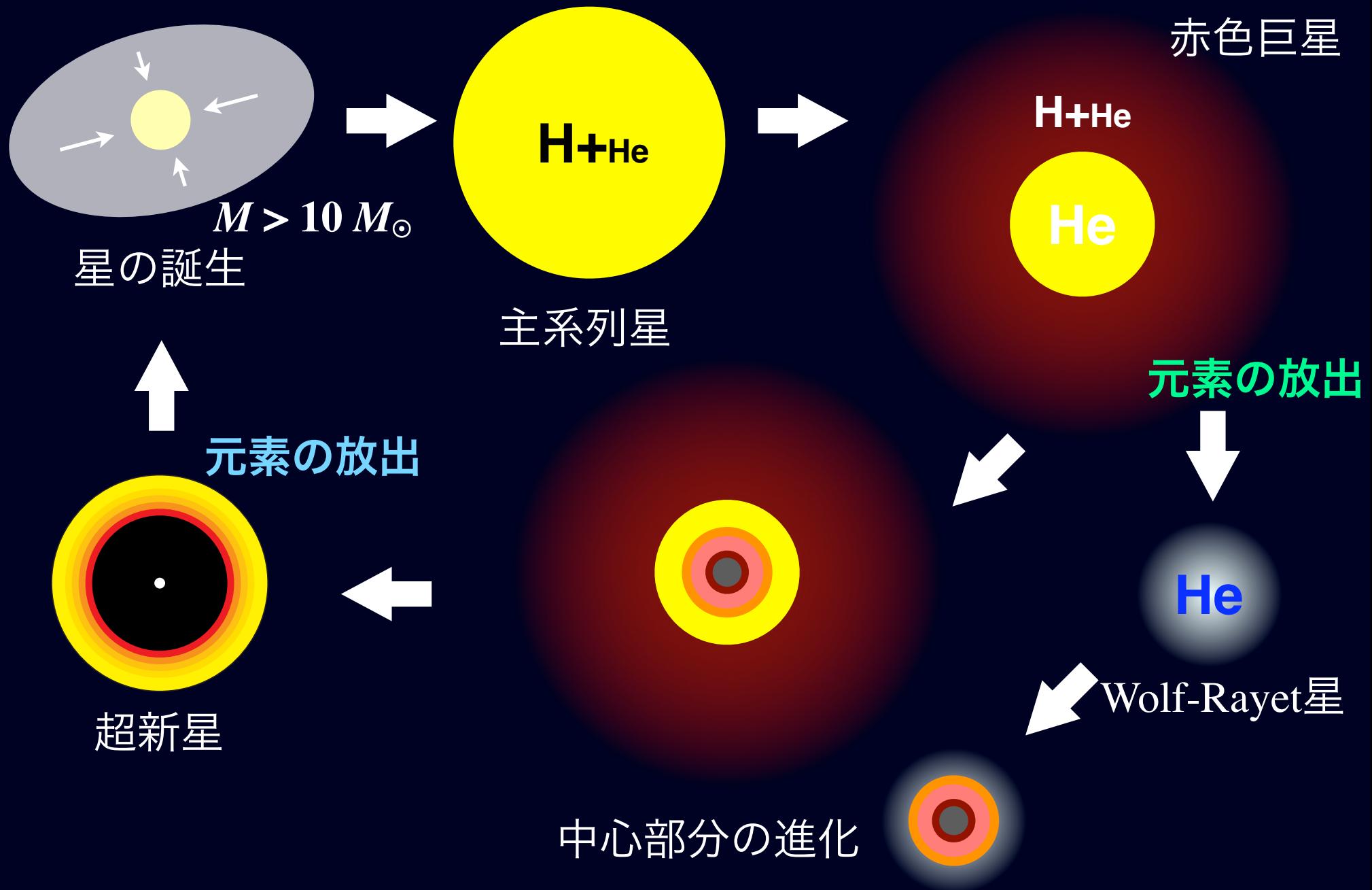
大質量星の進化と元素合成

吉田 敬

(東京大学天文学専攻梅田研究室)

第2回「クォーク力学・原子核構造に基づく爆発的天体現象と元素合成」研究会
2009年6月1日東京大学理学部天文学教室

大質量星の進化と元素合成



今日の発表内容

- 炭素燃焼までの大質量星進化の計算
 - $M_{\text{init}} = 13 \sim 100 M_{\odot}$, $Z_{\text{init}} = 0.0001 \sim 0.02$
 - ➡ 最終的な星の質量, 星の種類
 - ➡ 恒星進化中に放出された物質の**CNO**組成
 - SN 2007bi (Type Ic)のprogenitor
 - $M_{\text{init}} > 100 M_{\odot}$, $Z_{\text{init}} = 0.004$ の星の進化計算
 - ➡ 最終的な星の質量, 星の種類, **WO star**?
 - 今後の展望
 - **Core collapse**までの進化計算
 - **Rotating star model**の作成
-

大質量星の進化の計算

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

水素燃焼から炭素燃焼終了まで

質量 ➡ 13, 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 70, 100 $M_{\odot}$

金属量 ➡ 10^{-4} , 0.001, 0.004, 0.01, 0.02

- n , H~Brの282核種からなる核反応ネットワーク
エネルギー生成にもネットワークを利用

- reaclib 2009 (Basel)

- β -decay rates ➡ LM02, FFN, JAEA核図表2000など

- Opacity ➡ OPAL 1995, etc.
-

大質量星の進化の計算

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

水素燃焼から炭素燃焼終了まで

質量 $\rightarrow$ 13, 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 70, 100 $M_{\odot}$

金属量 $\rightarrow$ 10^{-4} , 0.001, 0.004, 0.01, 0.02

- Mass loss rate

OB stars

$\rightarrow$ Vink et al. (2001)
 $\propto Z^{0.85}$

Red giant branch $\rightarrow$ de Jager et al. (1988)

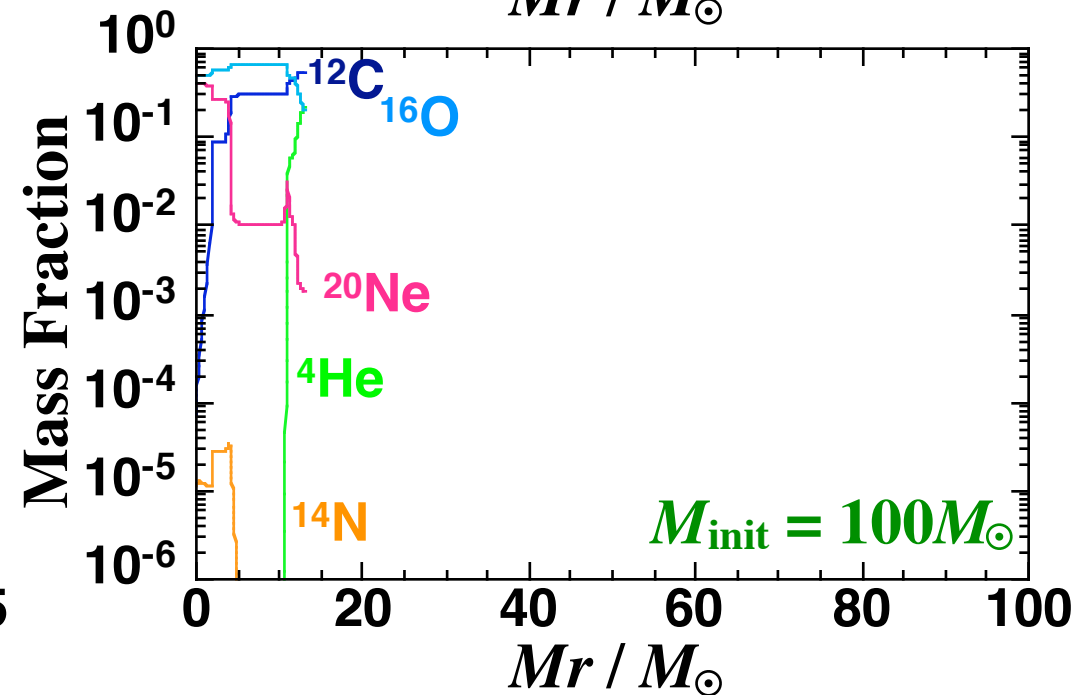
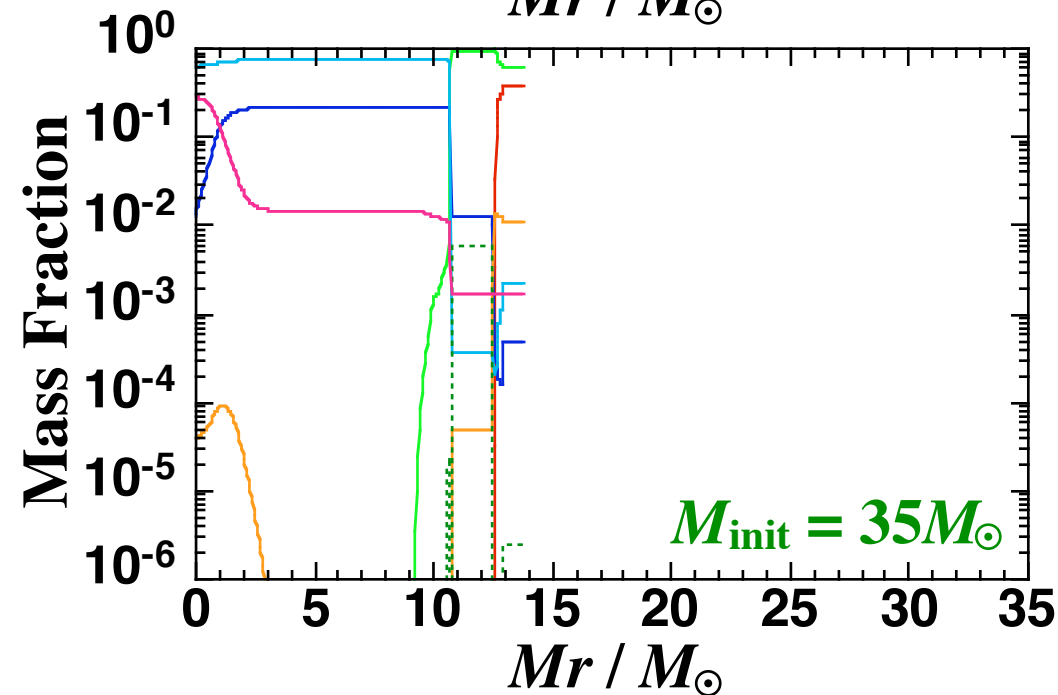
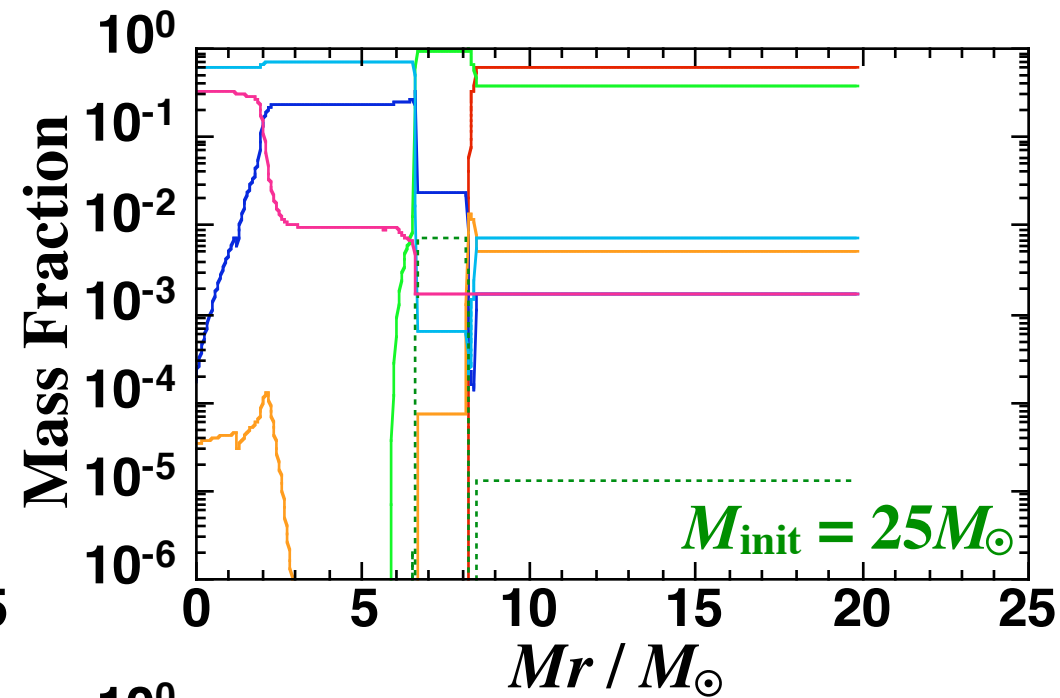
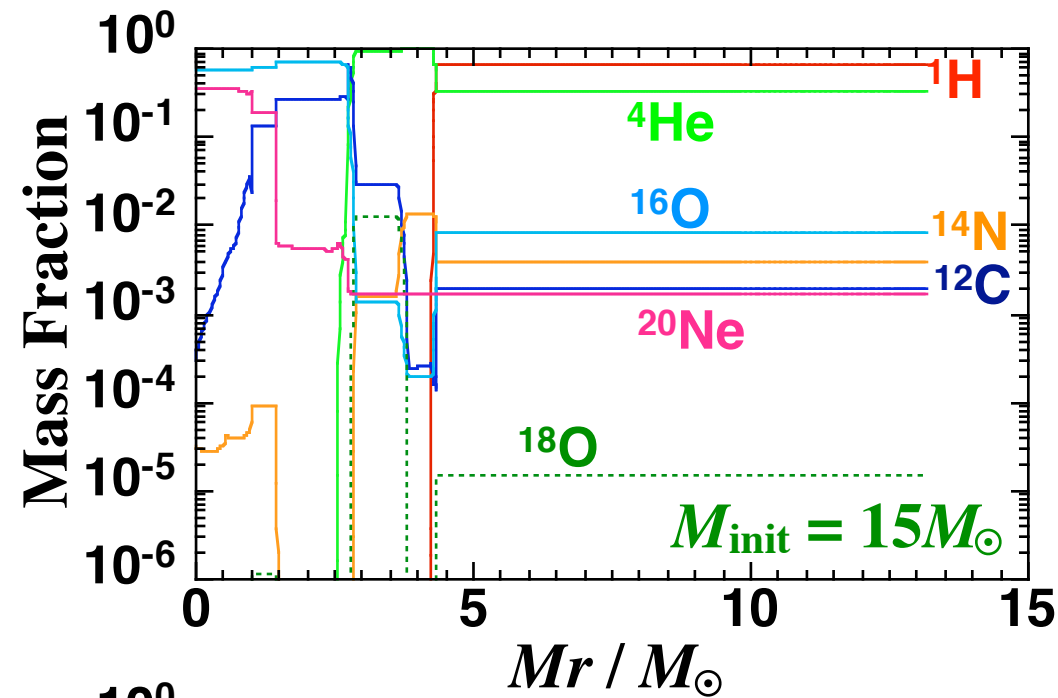
$\propto Z^{0.5}$ 依存性を追加
(e.g. Kudritzki and Puls 2000)

Wolf-Rayet stars $\rightarrow$ Nugis & Lamers (2000)

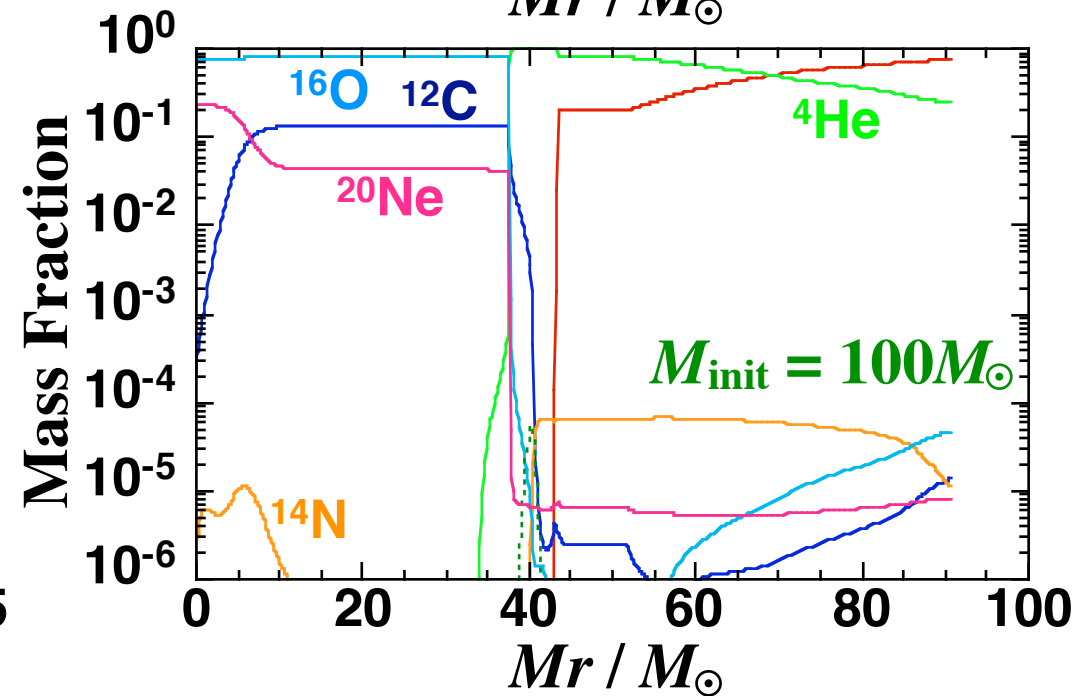
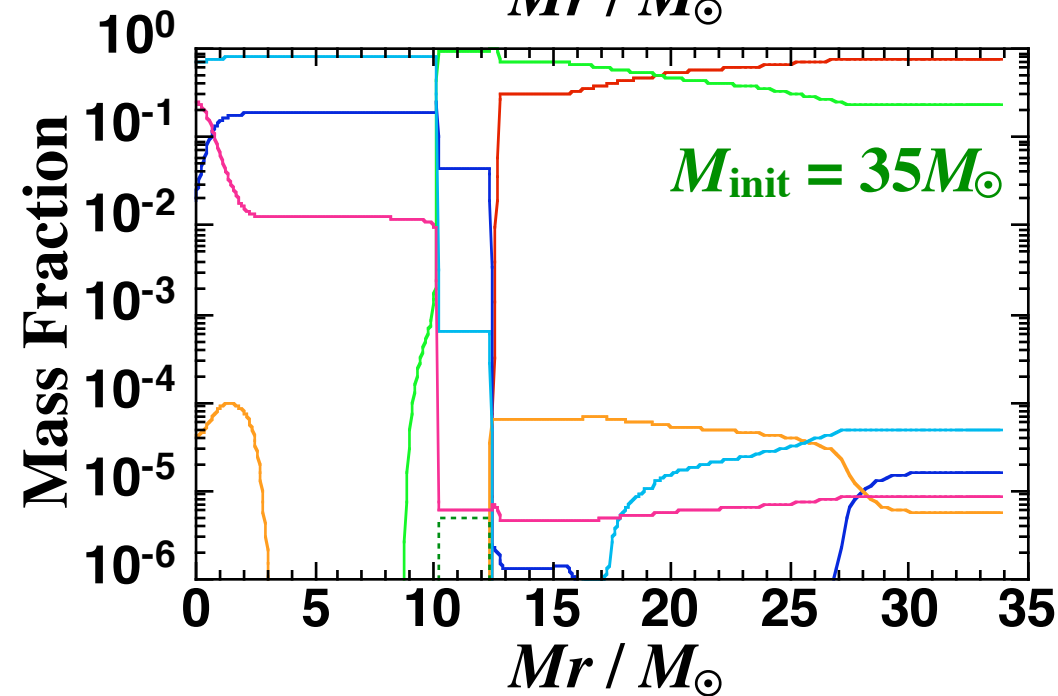
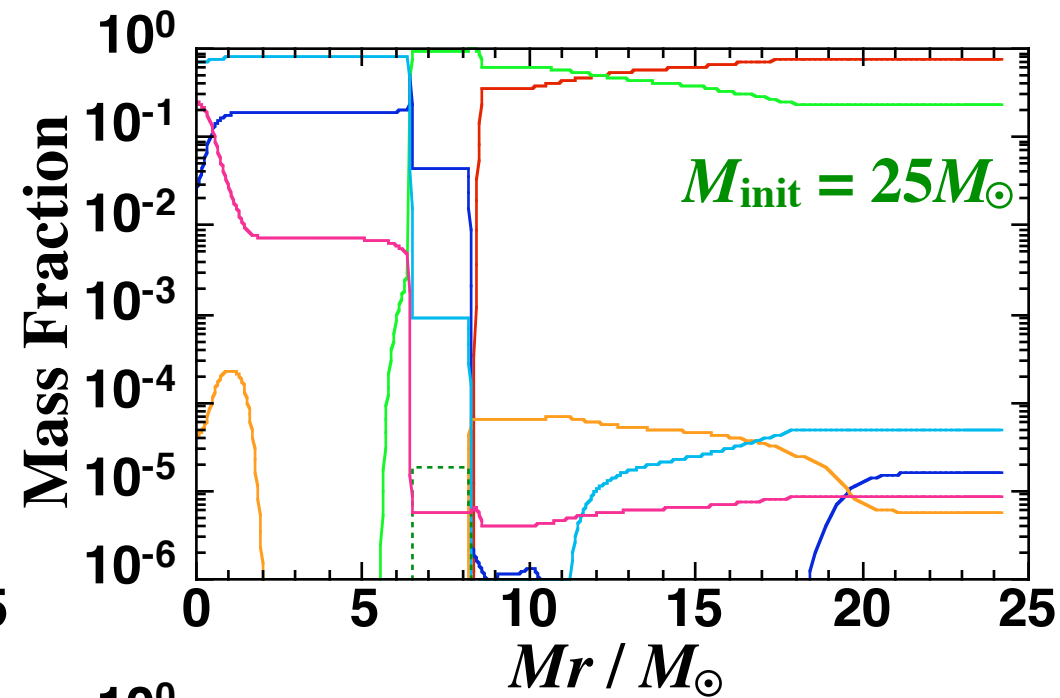
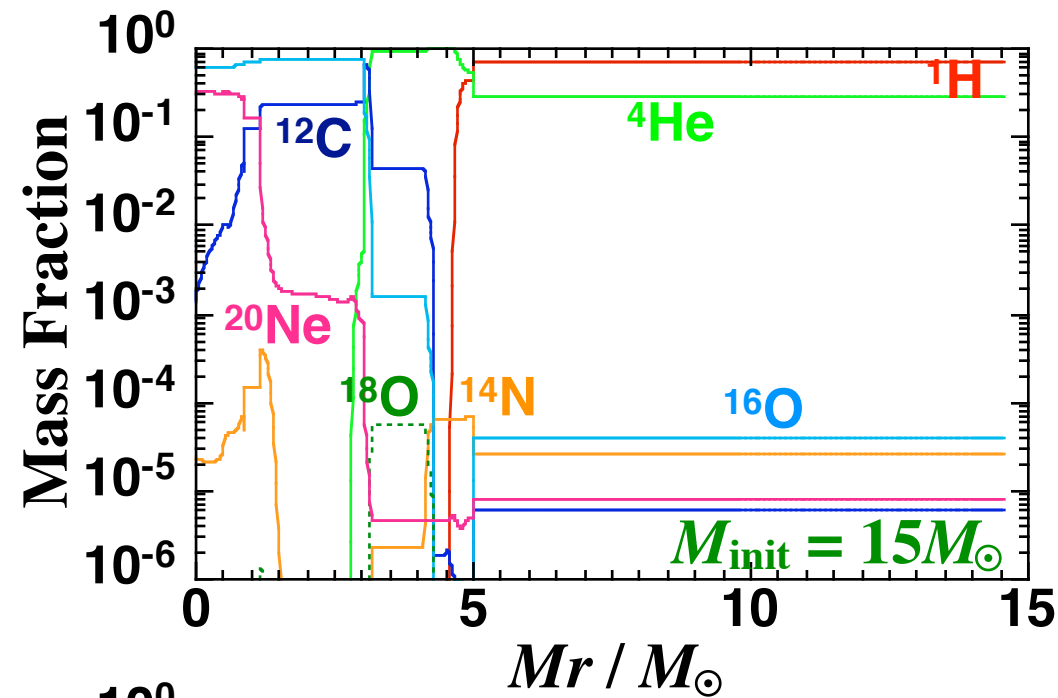
$\propto Z^{0.47}$

不定性については SN 2007bi progenitor で議論

Z=0.02モデルでの組成分布



$Z=0.0001$ モデルでの組成分布



星の進化の質量, 金属量依存性

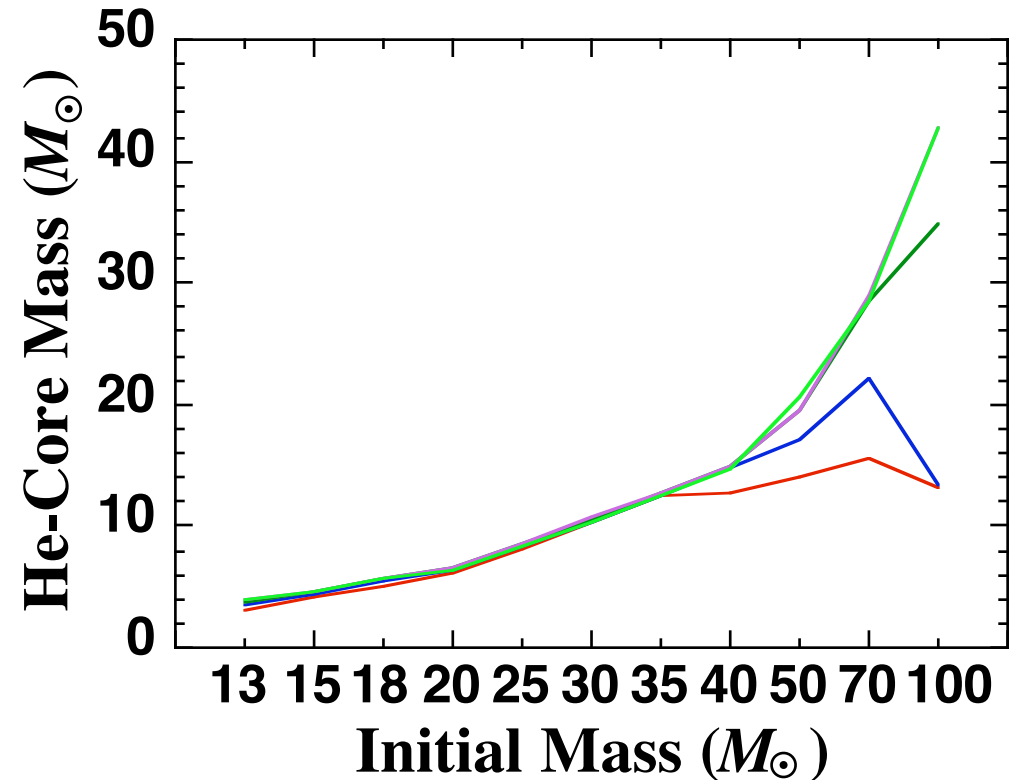
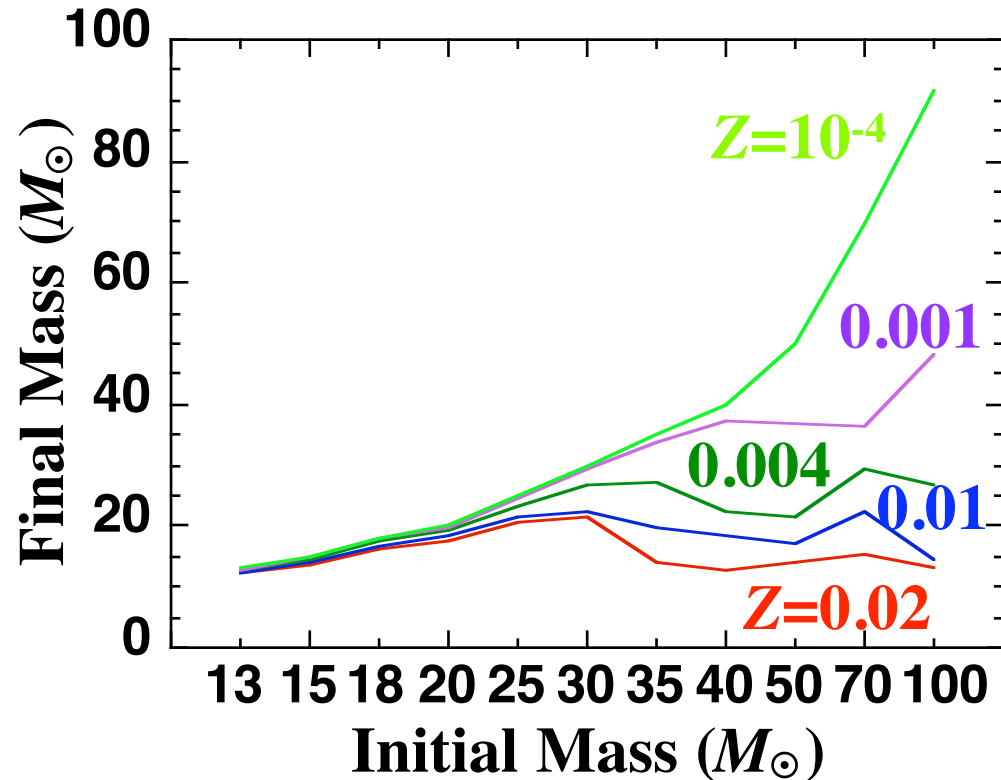
● 炭素燃焼終了時における恒星の種類

$Z \backslash M$	$\sim 35M_{\odot}$	$40M_{\odot}$	$50M_{\odot}$	$70M_{\odot}$	$100M_{\odot}$
0.02	RG	WO	WO	WO	WO
0.01	RG	RG	WO	WO	WO
0.004	RG	RG	RG	RG	WO
0.001	RG	RG	RG	RG	RG
10^{-4}	RG	RG	RG	RG	RG

小質量, metal poor → Red giantへ進化

大質量, metal rich → Wolf-Rayet星へ進化

炭素燃焼終了時の恒星質量



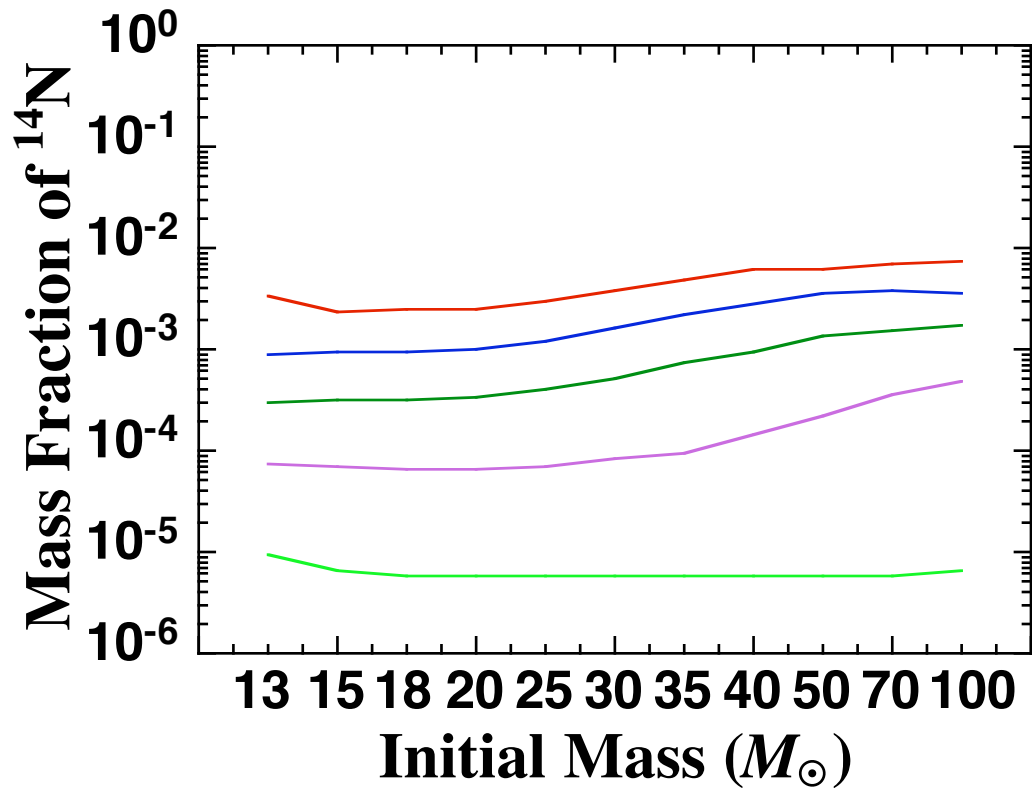
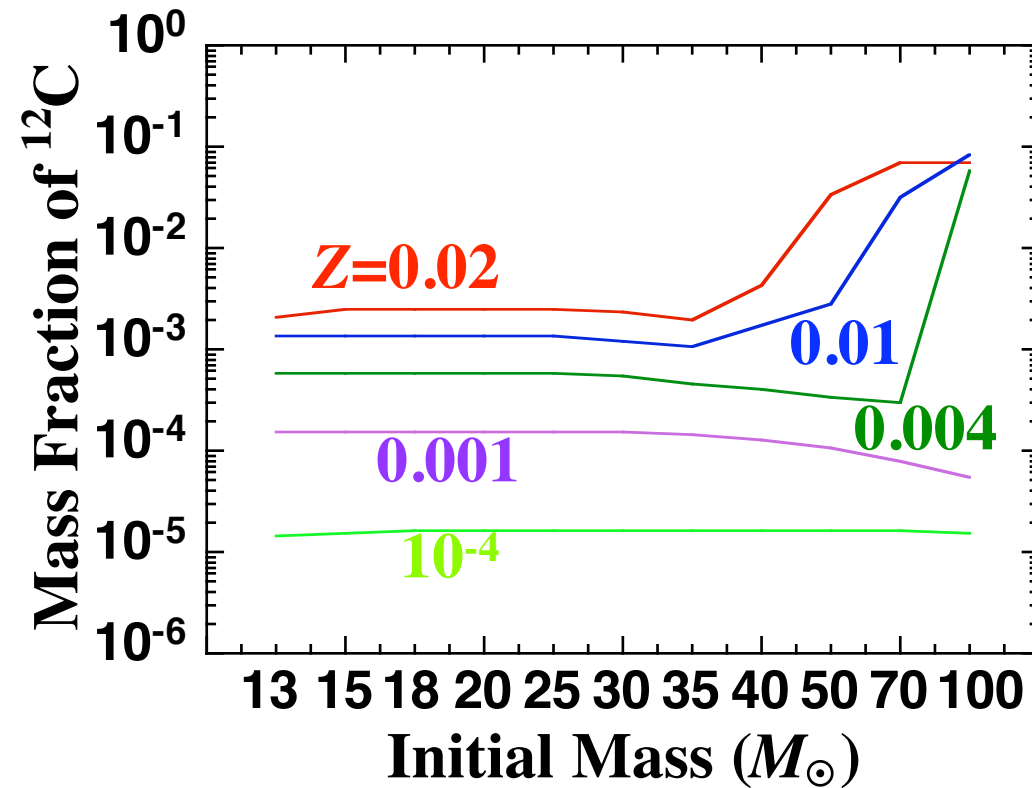
● 恒星質量, mass lossによる放出質量

$Z \sim 0.01-0.02 \rightarrow$ 大きな初期質量で大量のmass loss
 $M_{\text{wind}} < 89 M_{\odot}$

● He core $\rightarrow$ metal poor, 大質量の星で大きい

Wind組成

● ^{12}C , ^{14}N

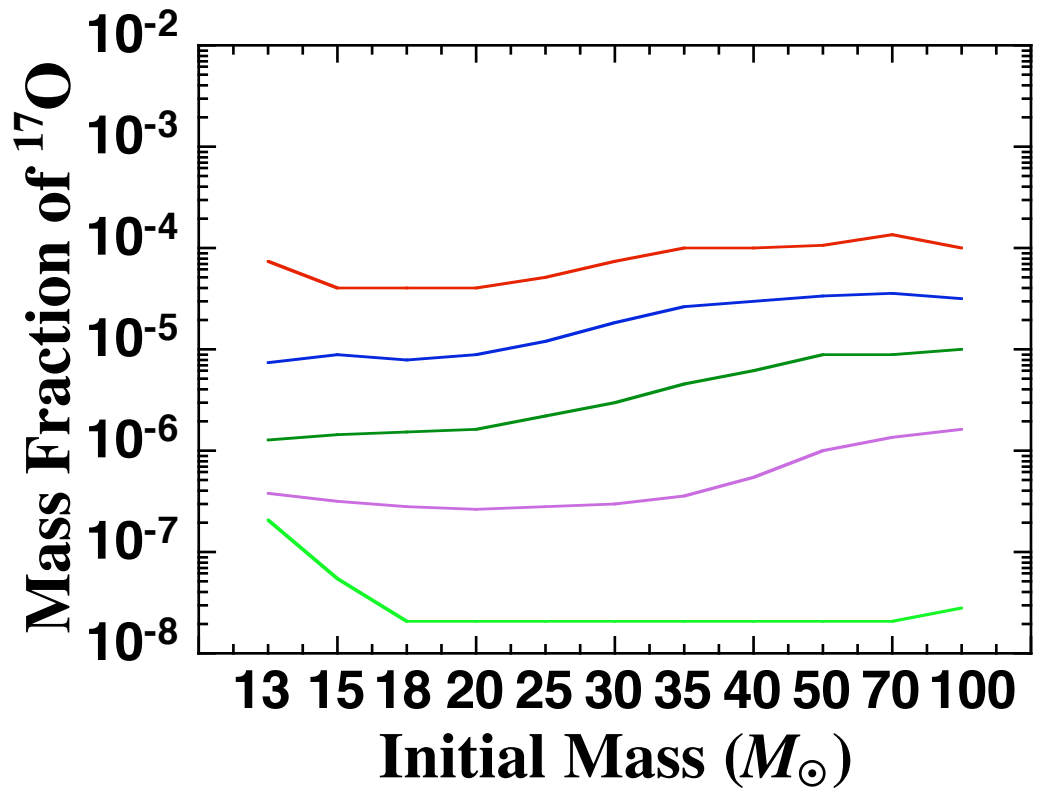
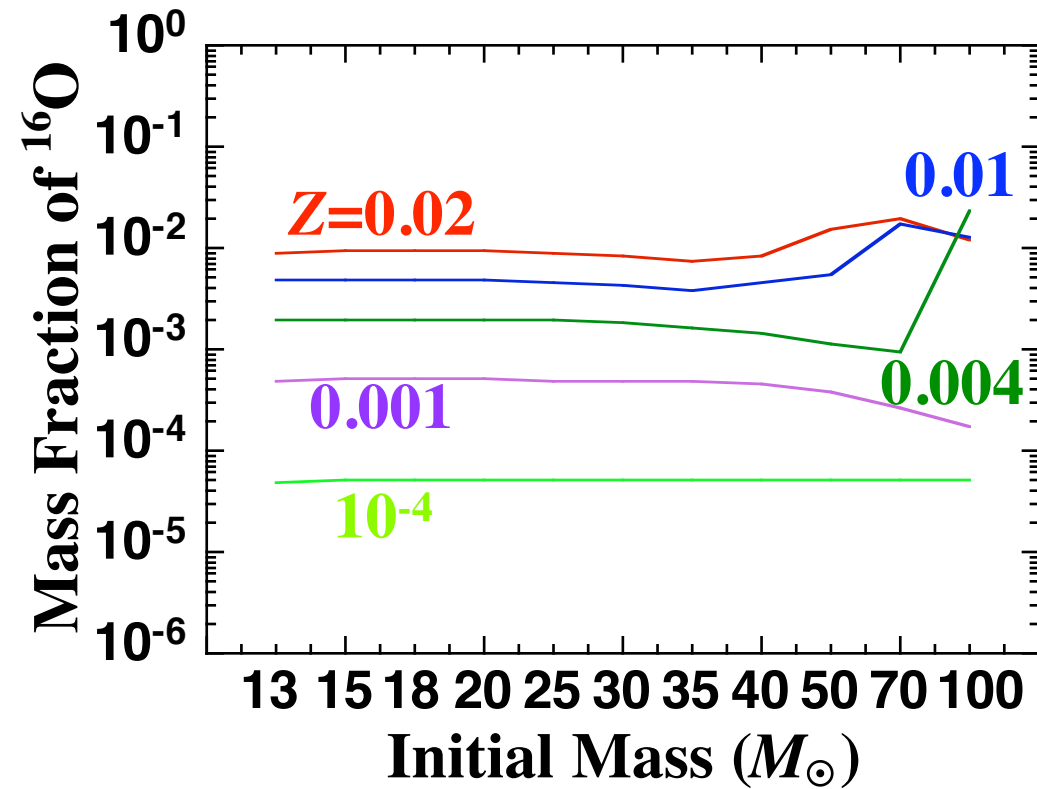


● ^{12}C ➡ $M > 40 \sim 70 M_{\odot}$, $Z > 0.004$ でwindでの質量比の増加
He coreからの質量放出

● ^{14}N ➡ $M > 30 \sim 50 M_{\odot}$ でwindでの質量比の増加

Wind組成

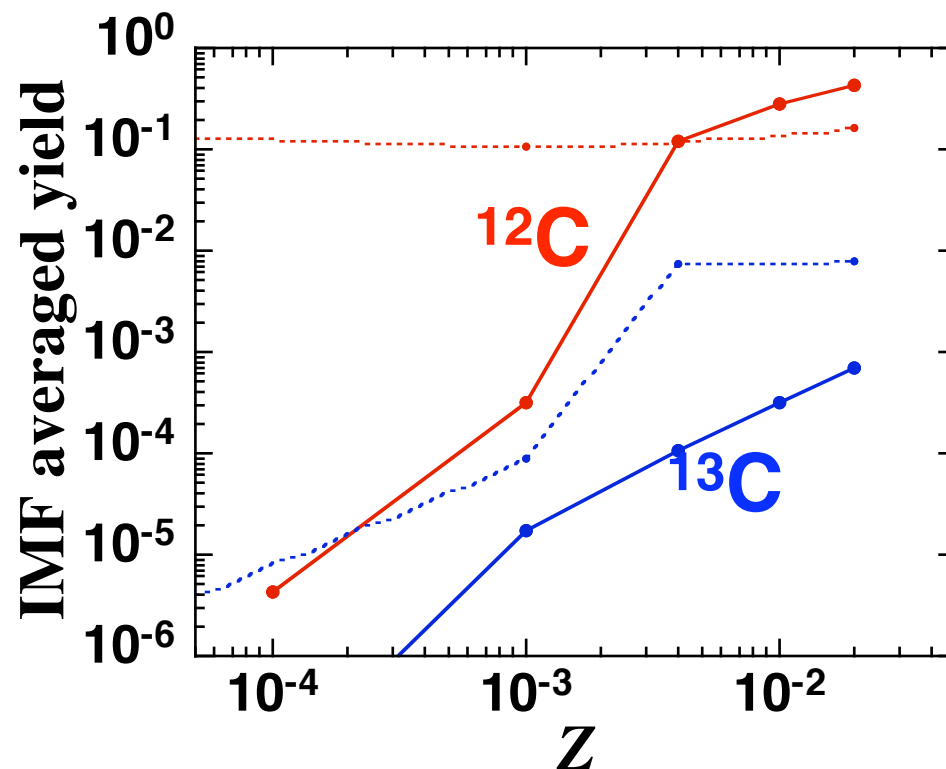
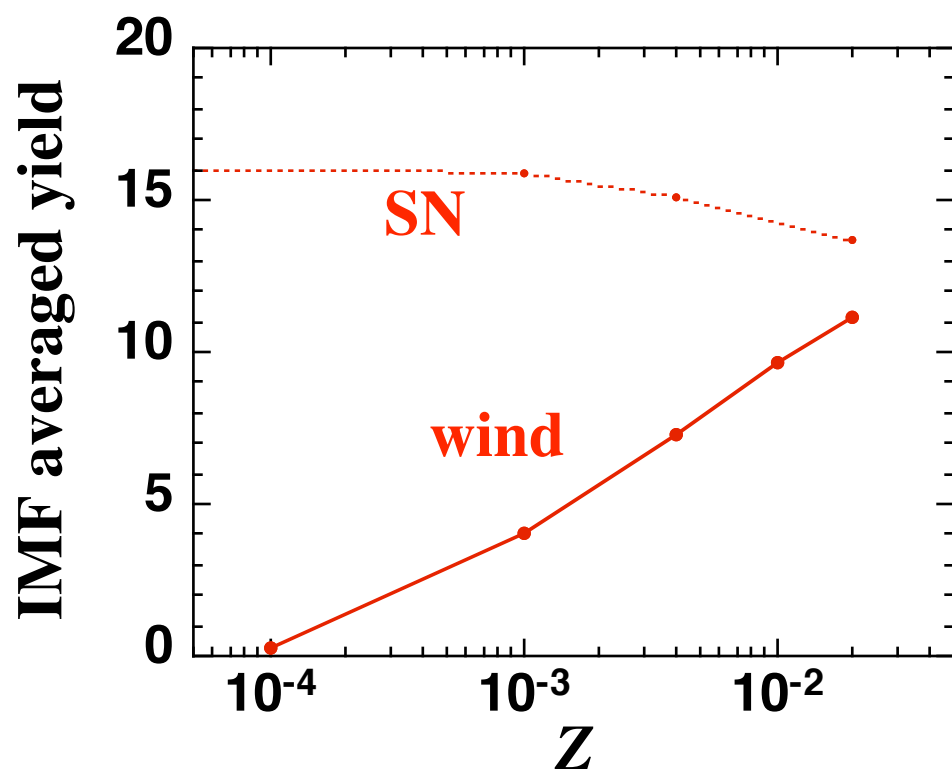
● ^{16}O , ^{17}O



- ^{16}O → $M > 50 \sim 70 M_{\odot}$, $Z > 0.004$ でwindでの質量比の増加
- ^{17}O → $M > 20 \sim 50 M_{\odot}$ でwindでの質量比の増加

IMF平均したWind放出量

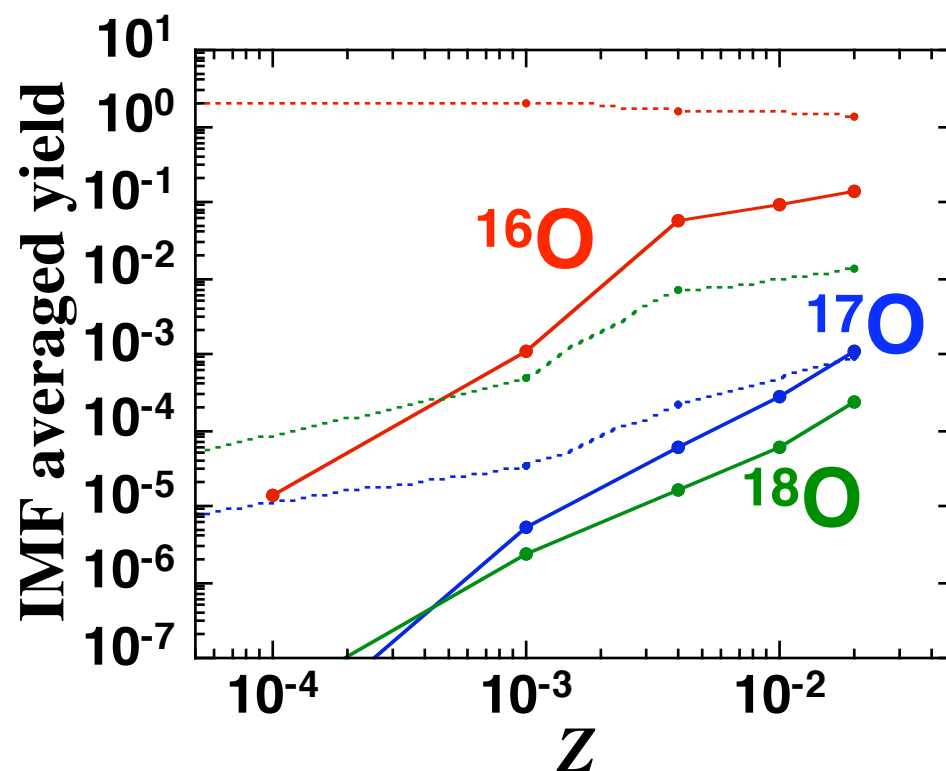
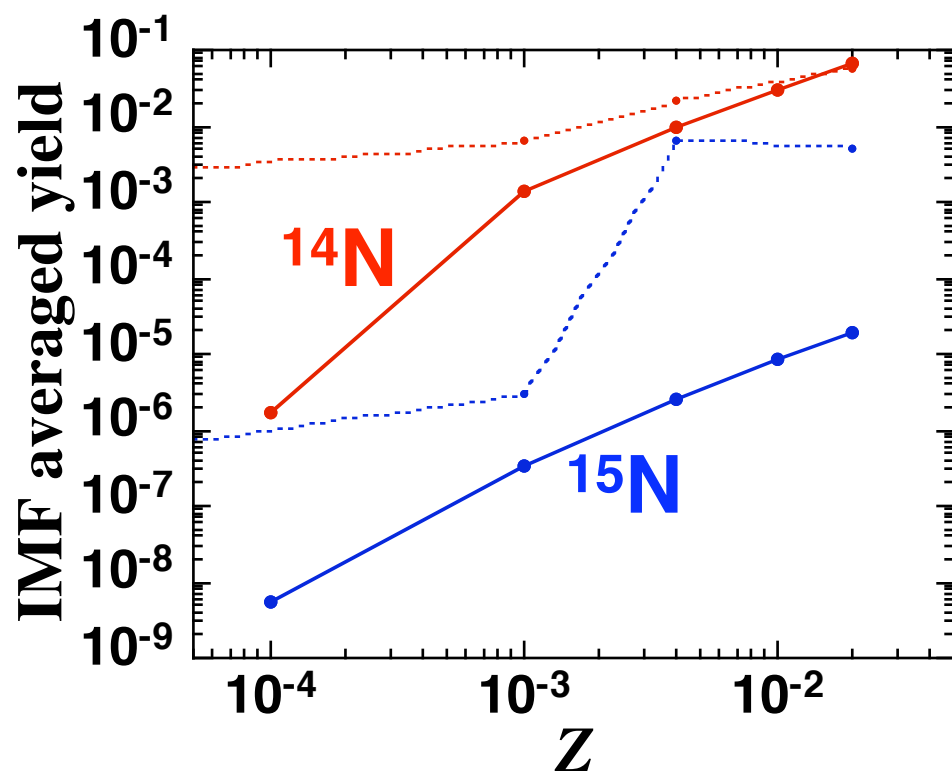
- Initial mass function ($N(M) \propto M^{-2.35}$)で平均 (実線)
 - ➡ $M_{\text{init}} = 13 \sim 100 M_{\odot}$
- SN yield from Kobayashi et al. (2006) (点線)



- ^{12}C ➡ $Z > 0.01$ でwindの寄与大

IMF平均したWind放出量

- Initial mass function ($N(M) \propto M^{-2.35}$)で平均 (実線)
 - ➡ $M = 13 \sim 100 M_{\odot}$
- SN yield from Kobayashi et al. (2006) (点線)



- ^{14}N ➡ $Z \sim 0.02$ でwindの寄与大
- ^{17}O ➡ $Z \sim 0.02$ でwindの寄与大

まとめ(1)

大質量星の進化を広い初期質量, 金属量範囲で求める

$$M_{\text{init}} = 13 \sim 100 M_{\odot}, Z_{\text{init}} = 0.0001 \sim 0.02$$

- 炭素燃焼終了時の星の種類

$M_{\text{init}}, Z_{\text{init}}$ 大の星 → **Wolf-Rayet stars**

$M_{\text{init}}, Z_{\text{init}}$ 小の星 → **Red giant branch**

- **Mass loss**による放出質量

→ $M_{\text{init}}, Z_{\text{init}}$ 大の星で大量の**mass loss**

最大 $M_{\text{wind}} \sim 89 M_{\odot}$ ($M_{\text{ini}} = 100 M_{\odot}, Z = 0.02$)

- **Initial mass function**で平均化した**wind**組成

^{12}C , ^{14}N , ^{17}O 放出量

→ $Z > 0.01$ で超新星の寄与より大きい可能性

SN 2007bi

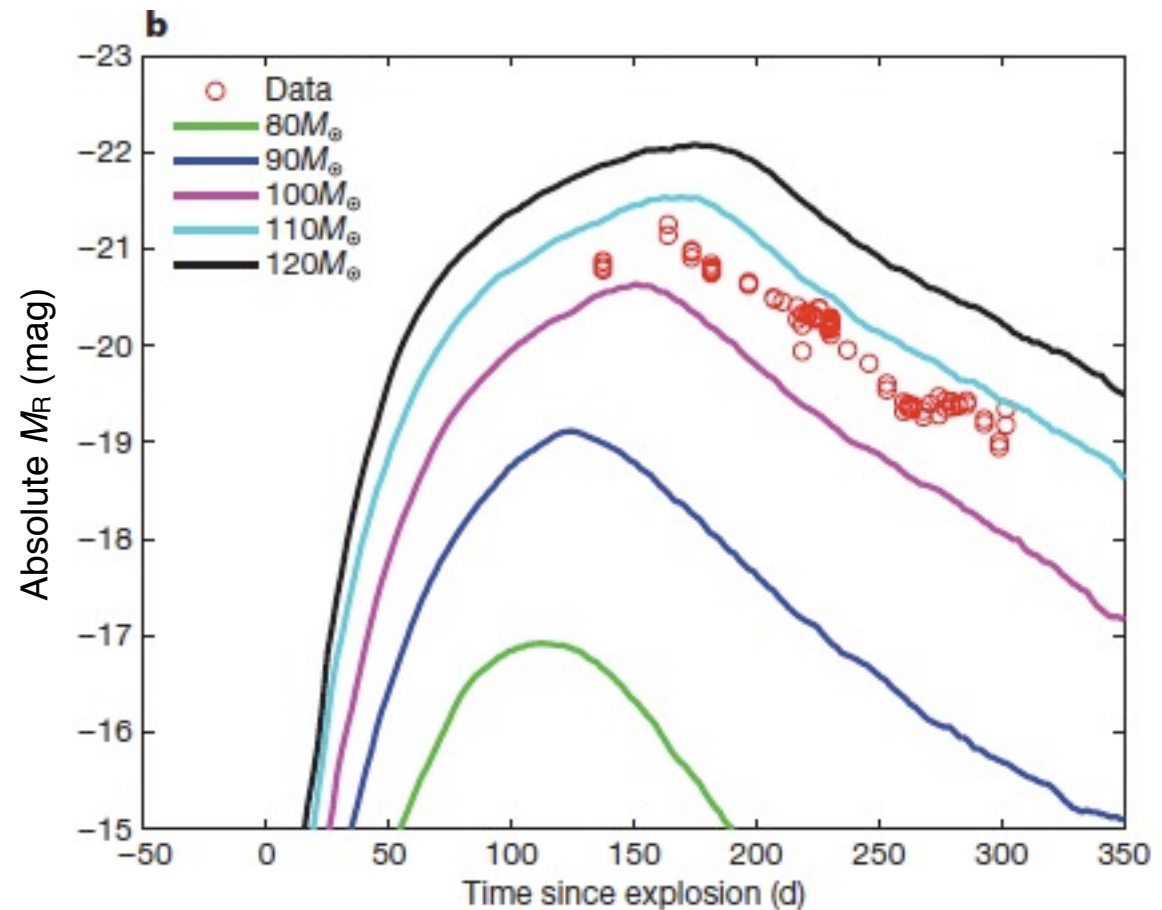
- SN 2007bi (Type Ic)
(Gal-Yam et al. 2009)

2007 April 6.5に発見

$$M(^{56}\text{Ni}) > 3 M_{\odot}$$

Na, Mg, Ca, Fe spectra

➡ $M_{\text{core}} \sim 100 M_{\odot}$



Pair-instability supernova modelで再現

SN 2007biのprogenitor

- host galaxyのmetallicity

➡ $12+\log(\text{O}/\text{H})=8.15\pm0.15$

(Young et al. 2010)

$Z \sim 0.31 Z_{\odot}$

- Progenitor

CO core (H, He層なし)

(Moriya et al. 2010)

Pair-instability

➡ $M_{\text{ej}} \sim 120 M_{\odot}$

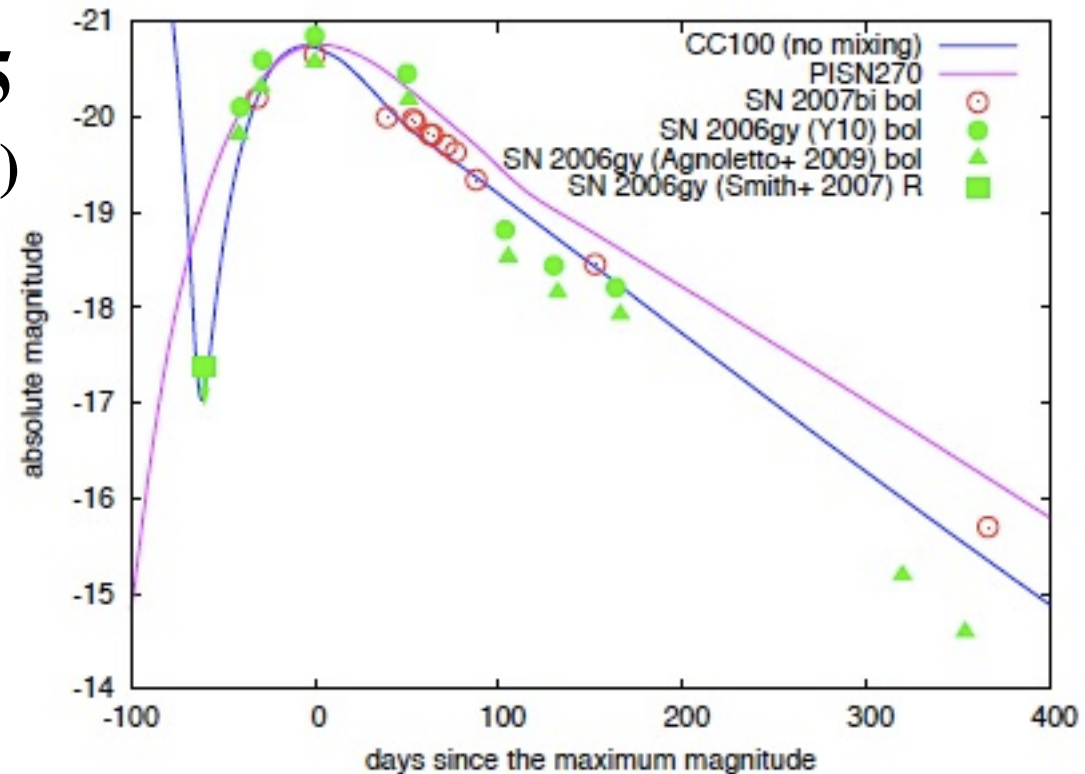
$E_{\text{kin}} \sim 7 \times 10^{52} \text{ ergs}$ $M(^{56}\text{Ni}) = 9.8 M_{\odot}$

Core collapse

➡ $M \sim 43 M_{\odot}$

$E_{\text{kin}} \sim 3.6 \times 10^{52} \text{ ergs}$ $M(^{56}\text{Ni}) = 6.1 M_{\odot}$

非常に大きな質量のProgenitorを作れるか？



$M > 100 M_{\odot}$ の星の進化計算

- $Z = 0.004$, $M > 100 M_{\odot}$ massive starの進化
 - Wolf-Rayet starでのmass loss rate
 - ➡ 不定性(metallicity依存性含む)大きい
 - Nugis and Lamers (2000)
 - ➡ $\propto Z^{0.47}$ (WN, WC: 星表面でのC存在度含む)
 - Vink and Koter (2005)
 - ➡ $\propto Z_{\text{init}}^{0.86}$ (WN)
 $\propto Z_{\text{init}}^{0.35 - 0.66}$ (WC)
- Red giantでのmass loss rate
 - ➡ metallicity依存性はよくわからない

Progenitor質量の星の初期質量とmass loss rateに対する依存性を調べる

$M > 100 M_{\odot}$ の星の進化計算

- 星の初期質量

➡ $M_{\text{init}} = 100, 140, 200 M_{\odot}$

- Mass loss rate

- OB stars ➡ Vink et al. (2001)

$\propto$ (A) $Z^{0.85}$ or (B) $Z^{0.64 - 0.69}$

- Red giant branch ➡ de Jager et al. (1988)

$\propto$ (A) $Z^{0.85}$ or (B) $Z^{0.64}$ or (C) $Z^{0.5}$

- Wolf-Rayet stars ➡ Nugis and Lamers (2000)

$\propto$ (A) $Z_{\text{init}}^{0.86}, Z_{\text{init}}^{0.35 - 0.66}$ or (B) $Z^{0.47}$

(OB, RGB, WR) = (B, B, A) for Case 1

= (B, B, B) for Case 2

= (A, A, A) for Case 3

= (A, C, B) for Case 4

Wolf-Rayet星の分類

● Wolf-Rayet星 $\rightarrow \log_{10}T_{\text{eff}} > 4.05$ かつ $X_s < 0.4$

WNL $\rightarrow X_s > 10^{-5}$

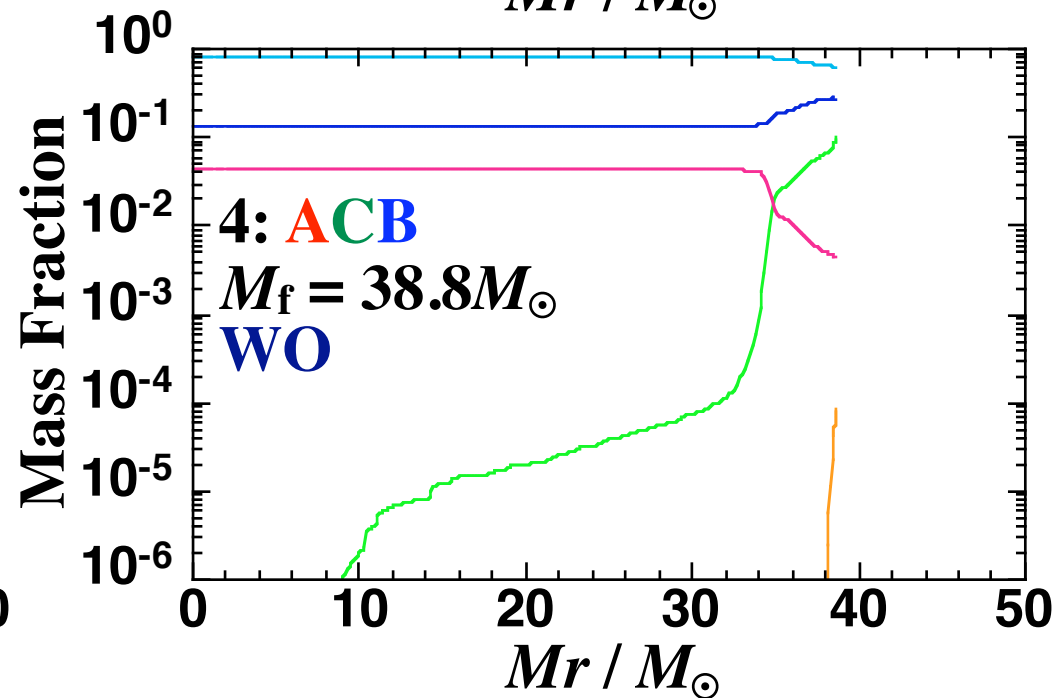
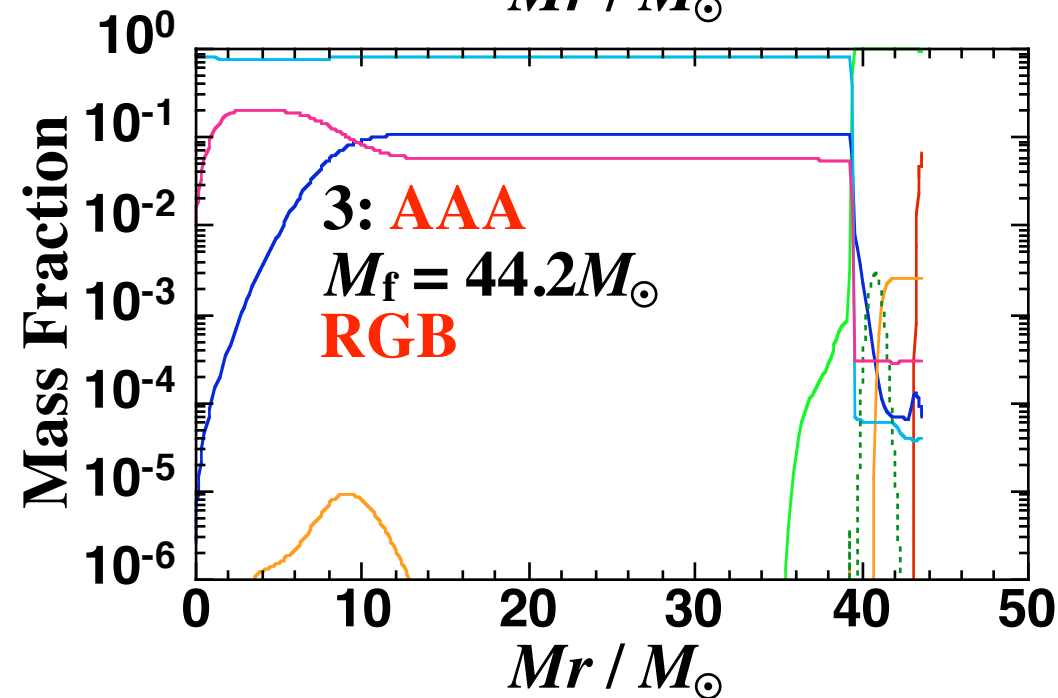
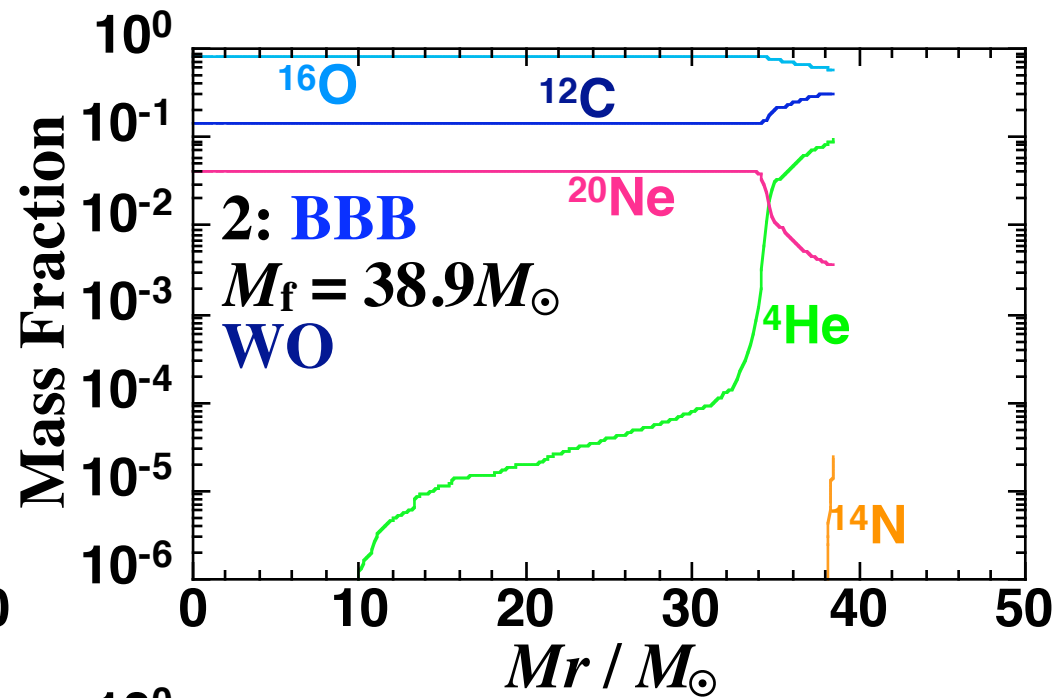
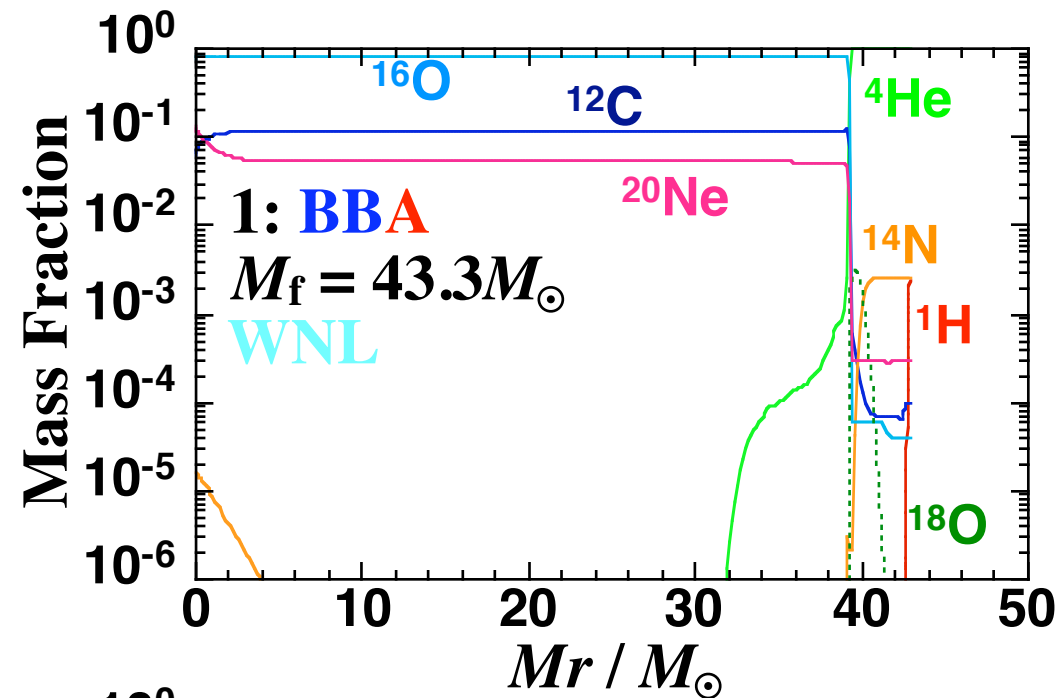
WNE $\rightarrow X_s < 10^{-5}, N_s(\text{N}) > N_s(\text{C})$

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

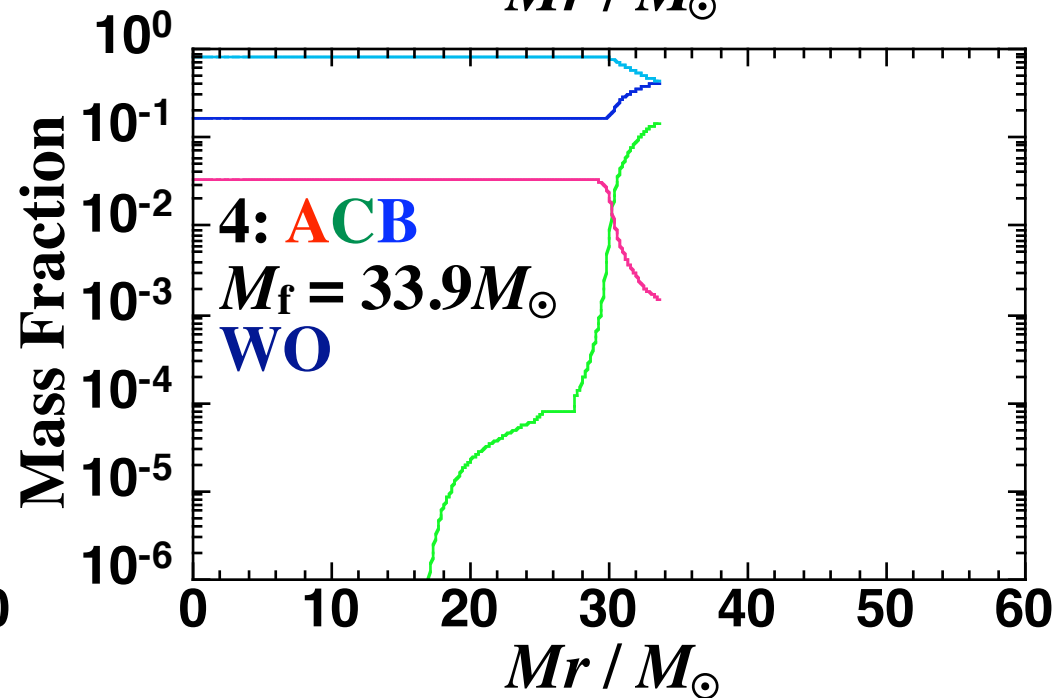
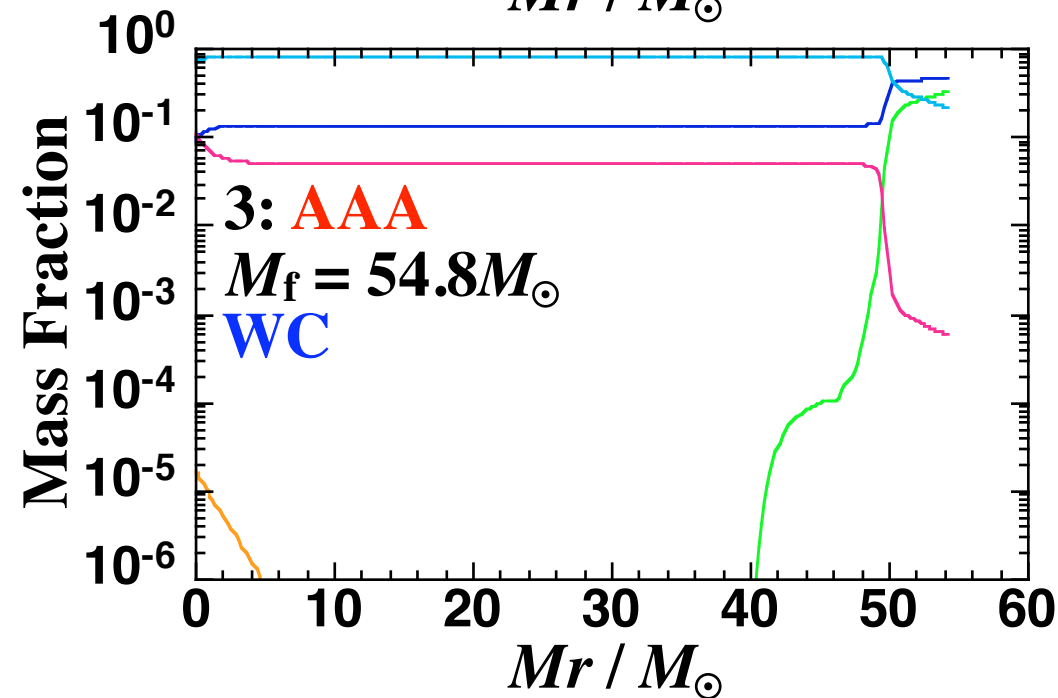
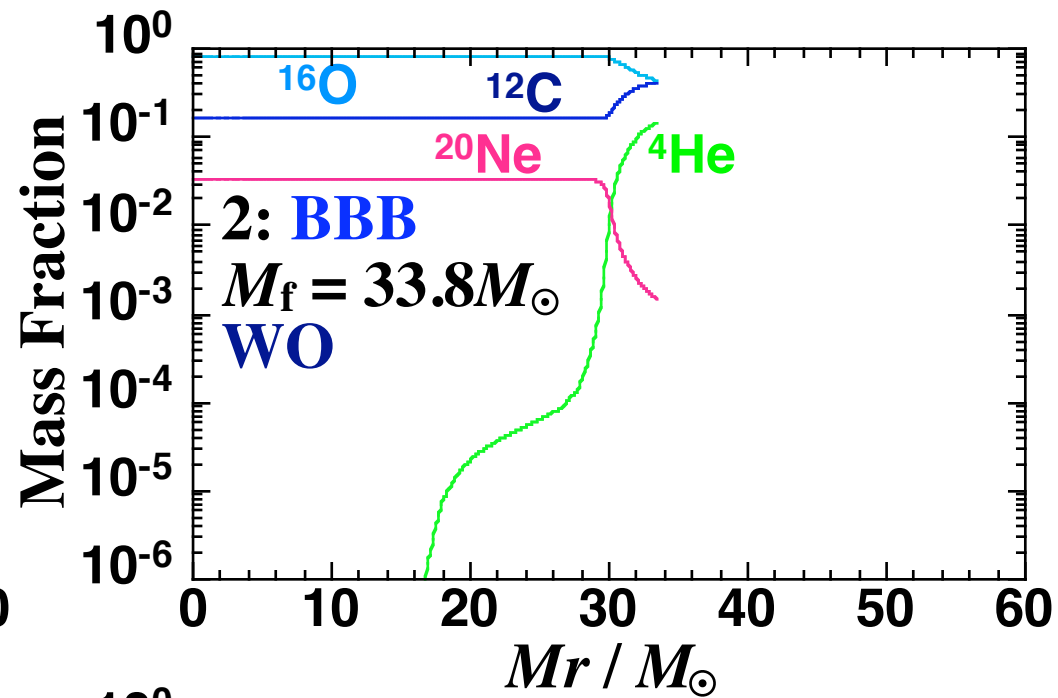
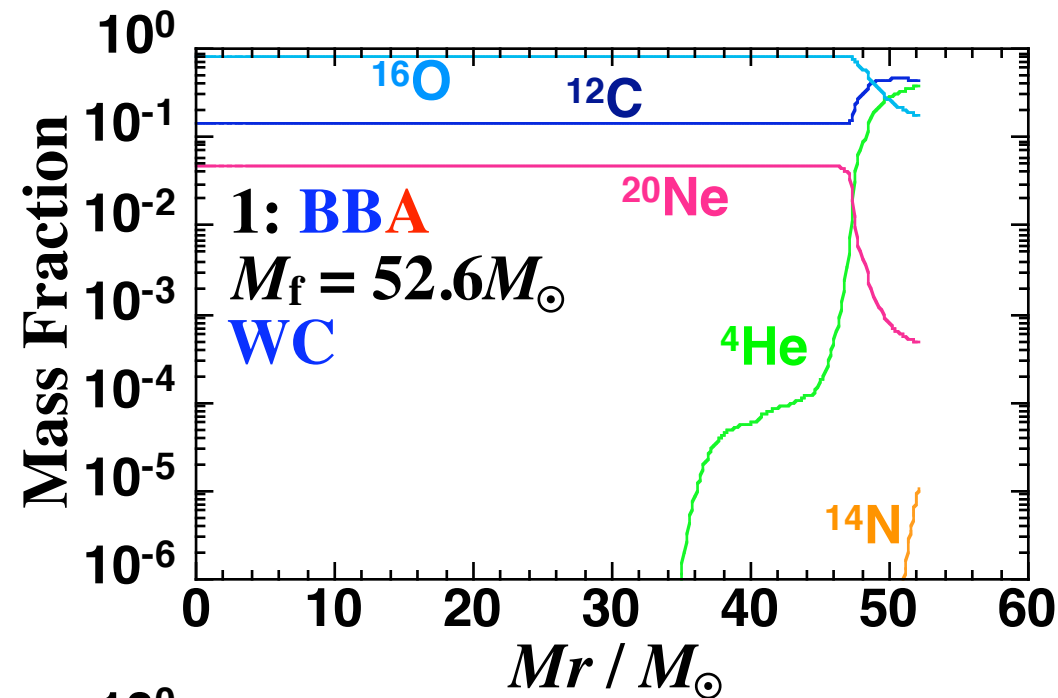
WO $\rightarrow N_s(\text{C+O}) > N_s(\text{He})$

from Meynet et al. (2009)

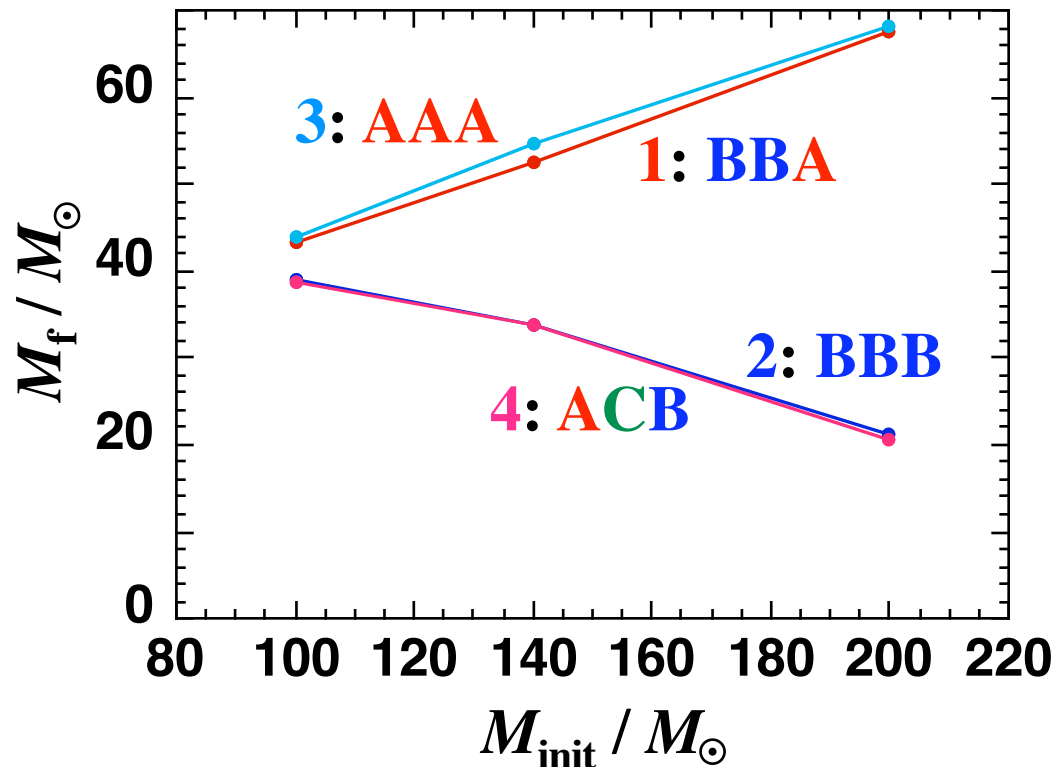
$M = 100 M_{\odot}$ 星の質量比分布



$M = 140 M_{\odot}$ 星の質量比分布



$M > 100 M_{\odot}$ の星の最終質量



$M_{\text{CO core}} \sim 39, 54, 78 M_{\odot}$
for $M_{\text{init}} = 100, 140, 200 M_{\odot}$

- Wolf-Rayet starのmass loss rateに強く依存
 - ➡ Nugis and Lamers (2000)
 $\propto (\text{B}) Z^{0.47}$ でWO starへ進化 ➡ SN Ic progenitor
- SN 2007bi progenitorの初期質量
 - ➡ $100 M_{\odot} < M_{\text{init}} < 140 M_{\odot}$

まとめ(2)

SN 2007bi (Type Ic)のprogenitor

➡ $Z_{\text{init}} = 0.004$, $M_{\text{init}} > 100 M_{\odot}$ の星の進化を調べる

Mass loss rateの不定性を考慮

● 星の最終質量と種類

➡ Wolf-Rayet星でのmass loss rateに強く依存

Mass loss rate大 ➡ $M_{\text{f}} \lesssim 40 M_{\odot}$, WO stars

Mass loss rate大 ➡ $M_{\text{f}} \gtrsim 40 M_{\odot}$, RGB, WNL, WC

● SN 2007biのprogenitor

➡ $100 M_{\odot} < M_{\text{init}} < 140 M_{\odot}$ の可能性

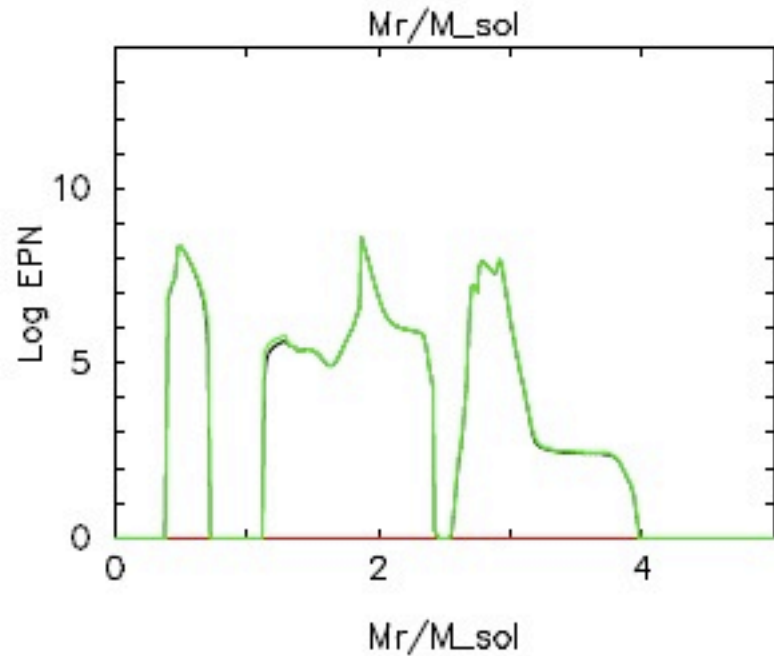
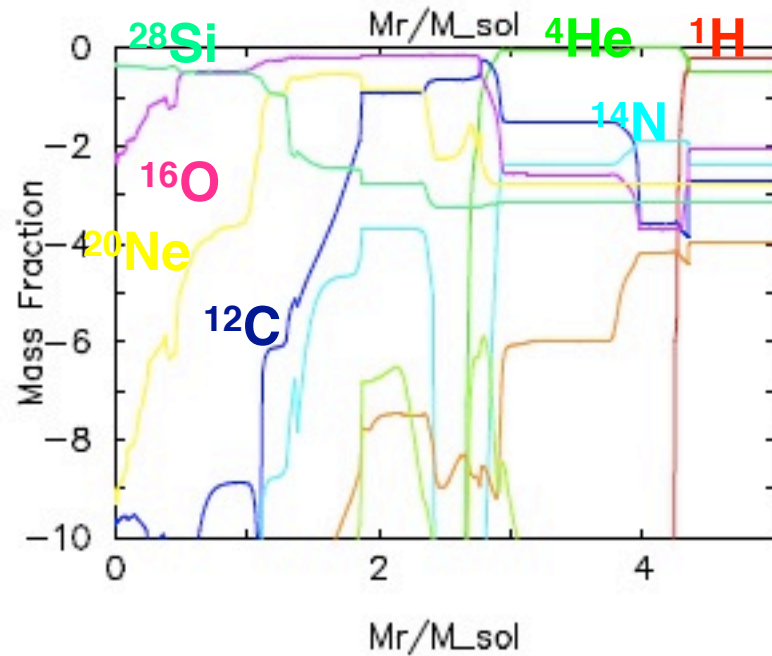
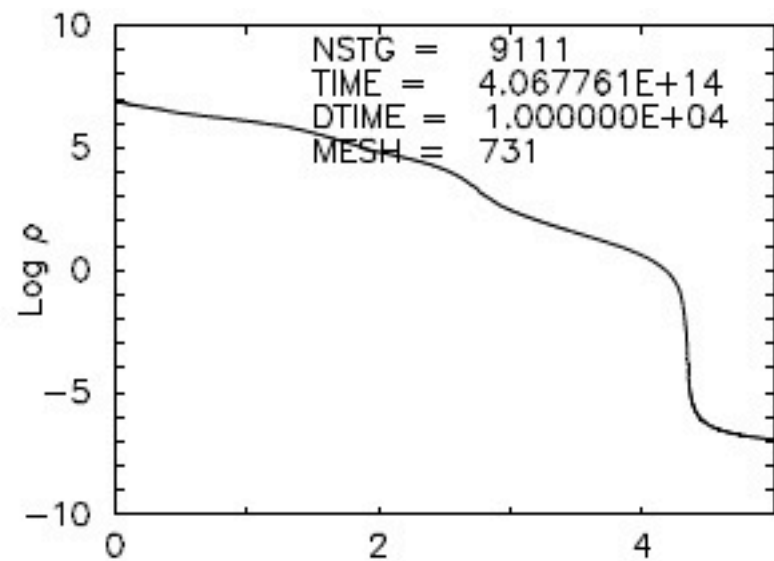
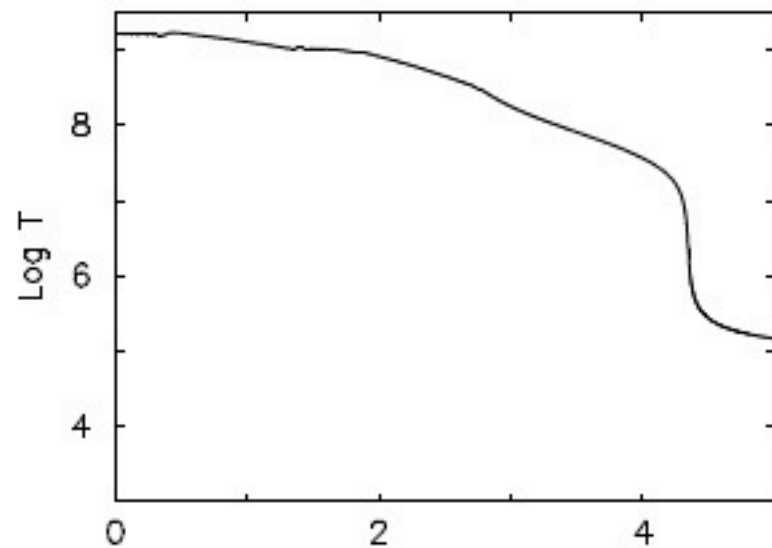
Core collapse explosion

今後の展望

Core collapseまでの進化計算

- 現状 ➡ 酸素燃焼までは追えるかも...
- Si燃焼以降 ➡ 加速度項の追加
核反応ネットワークの工夫
Implicit化が必要？

今後の展望



$$M_{\text{init}} = 15 M_{\odot}, Z_{\text{init}} = 0.02$$

今後の展望

Rotating star modelの作成

- 等圧面で質量座標をはる $M_r \rightarrow M_P$

基礎方程式

$$\frac{\partial P}{\partial M_P} = - \frac{GM_P}{4\pi r_P^4} f_P$$

$$\frac{\partial r_P}{\partial M_P} = \frac{1}{4\pi r_P^2 \bar{\rho}}$$

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

$$\frac{\partial L_P}{\partial M_P} = \epsilon_{\text{nucl}} - \epsilon_v + \epsilon_{\text{grav}}$$

等圧面体積から求まる半径

$$r_P = \left(\frac{3}{4\pi} V_P \right)^{1/3}$$

$$f_P = \frac{4\pi r_P^4}{GM_P S_P} \frac{1}{\langle g^{-1} \rangle}$$

$$f_T = \left(\frac{4\pi r_P^2}{S_P} \right)^2 \frac{1}{\langle g^{-1} \rangle \langle g \rangle}$$

$\langle g \rangle$: 等圧面での有効重力の角度平均

今後の展望

Rotating star modelの作成

- 重力ポテンシャル

$$\psi = \frac{GM_P}{r} - \frac{4\pi}{3r^3} P_2(\cos\theta) \int_0^{r_0} \frac{\rho r_0'^6}{M_P} \Omega^2 \frac{5+\eta_2(r_0')}{2+\eta_2(r_0')} dr_0' + \frac{1}{2} \Omega^2 r^2 \sin^2\theta$$

$$r(r_0, \theta) = r_0(1 - AP_2(\cos\theta))$$

$$A = \frac{\Omega^2 r_0^3}{3GM_P} \frac{5}{2+\eta_2(r_0)} \quad \eta_2(r_0): \text{星の密度構造から決まる量}$$

$$V_P = \frac{4\pi}{3} r_0^3 \left(1 + \frac{3}{5} A^2 - \frac{2}{35} A^3\right)$$

$$S_P = 4\pi r_0^2 \left(1 + \frac{2}{5} A^2\right)$$

$$r_P = \left(\frac{3}{4\pi} V_P\right)^{1/3} \quad \longrightarrow \quad r_0 \text{ と } A \text{ を求める}$$

今後の展望

Rotating star modelの作成

物質混合

$$\frac{\partial X_n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial M_P} \left\{ (4\pi r_P^2 \bar{\rho})^2 D \frac{\partial X_n}{\partial M_P} \right\} + \left(\frac{\partial X_n}{\partial t} \right)_{\text{nucl}}$$

D : 物質混合の拡散係数

角運動量輸送

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = \frac{1}{i} \frac{\partial}{\partial M_P} \left\{ (4\pi r_P^2 \bar{\rho})^2 \nu \frac{\partial \Omega}{\partial M_P} \right\} - \frac{2\Omega}{r_P} \left(\frac{\partial r}{\partial t} \right)_{M_P} \frac{1}{2} \frac{\partial \ln i}{\partial \ln r_P}$$

i : specific angular moment, ν : turbulent viscosity

D, ν は回転による不安定性を考慮して見積もる

差分化はこれから
