

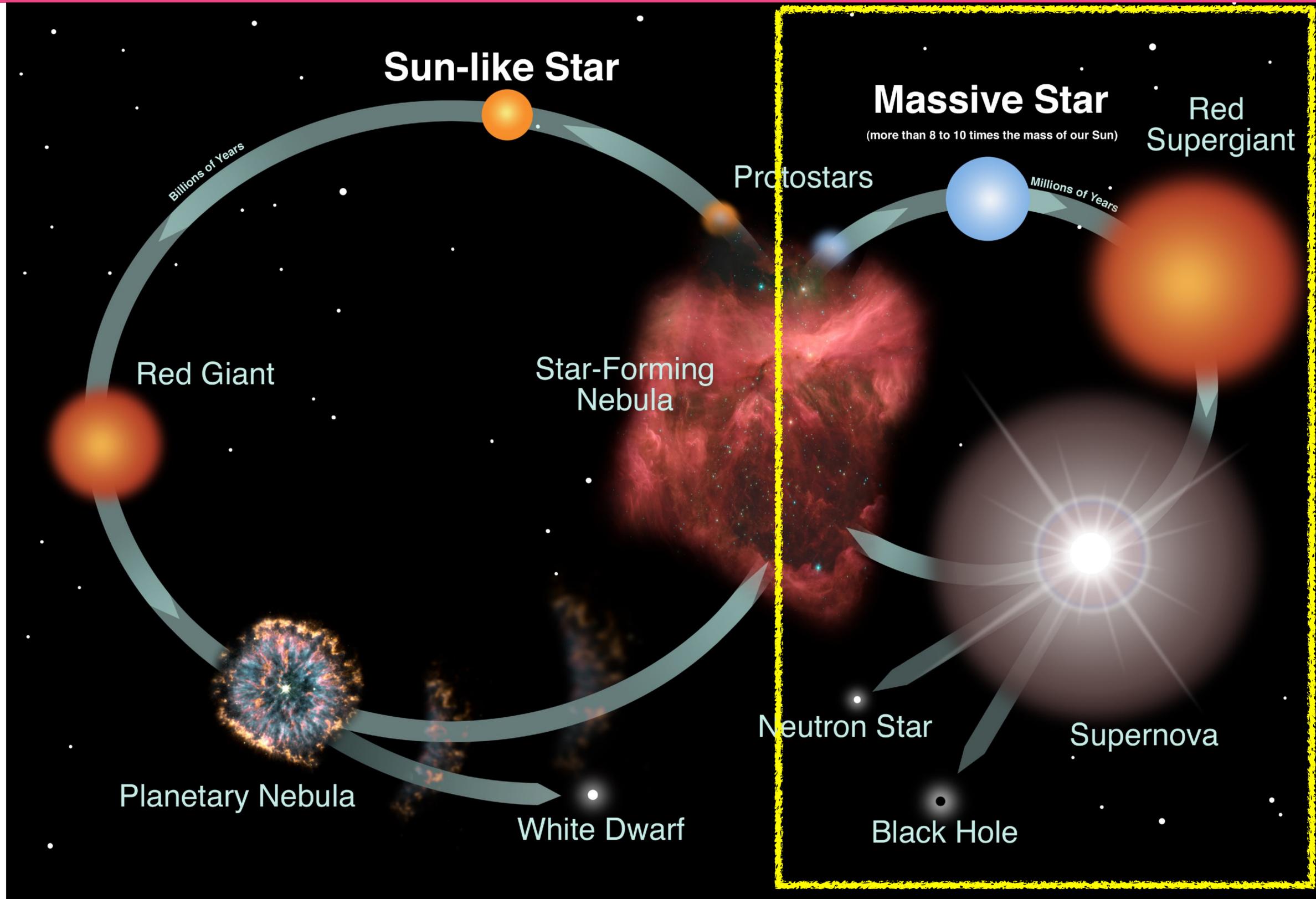
重力崩壊型超新星爆発への C-O shell merger の影響

2026/3/9: 第12回 超新星ニュートリノ研究会 @沼津

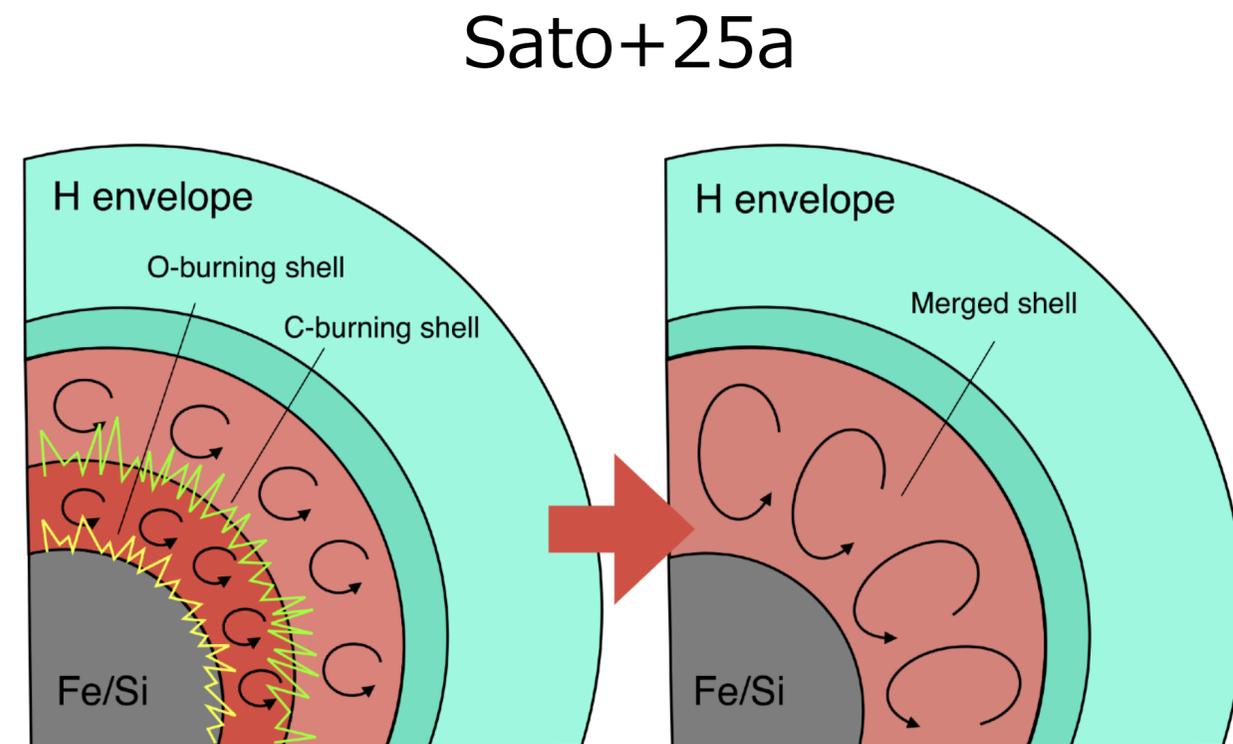
播田實 りょう太 (総研大/国立天文台)

ryota.hatami@grad.nao.ac.jp

共同研究者: 富永 望, 滝脇知也, 高橋 亘 (国立天文台)



- 大質量星が重力崩壊の数日-時間前に起こす **O** 燃焼殻と **C** 燃焼殻の対流的な混合合体現象
- C-O shell merger の結果
 1. Si/O層境界に密度ジャンプ (Bruenn+23)
→ 衝撃波が伝播しやすい
 2. Odd-Z元素(P, Cl, K, Sc)とO燃焼生成物(Si, S)がenhanceされる (Ritter+18, Roberti+25)
→ odd-Z足りない問題の鍵？



- 大質量星が重力崩壊の数日-時間前に起こす
O燃焼殻と **C**燃焼殻の対流的な混合合体現象

- C-O shell merger の結果

1. Si/O層境界に密度ジャンプ (Bruenn+23)

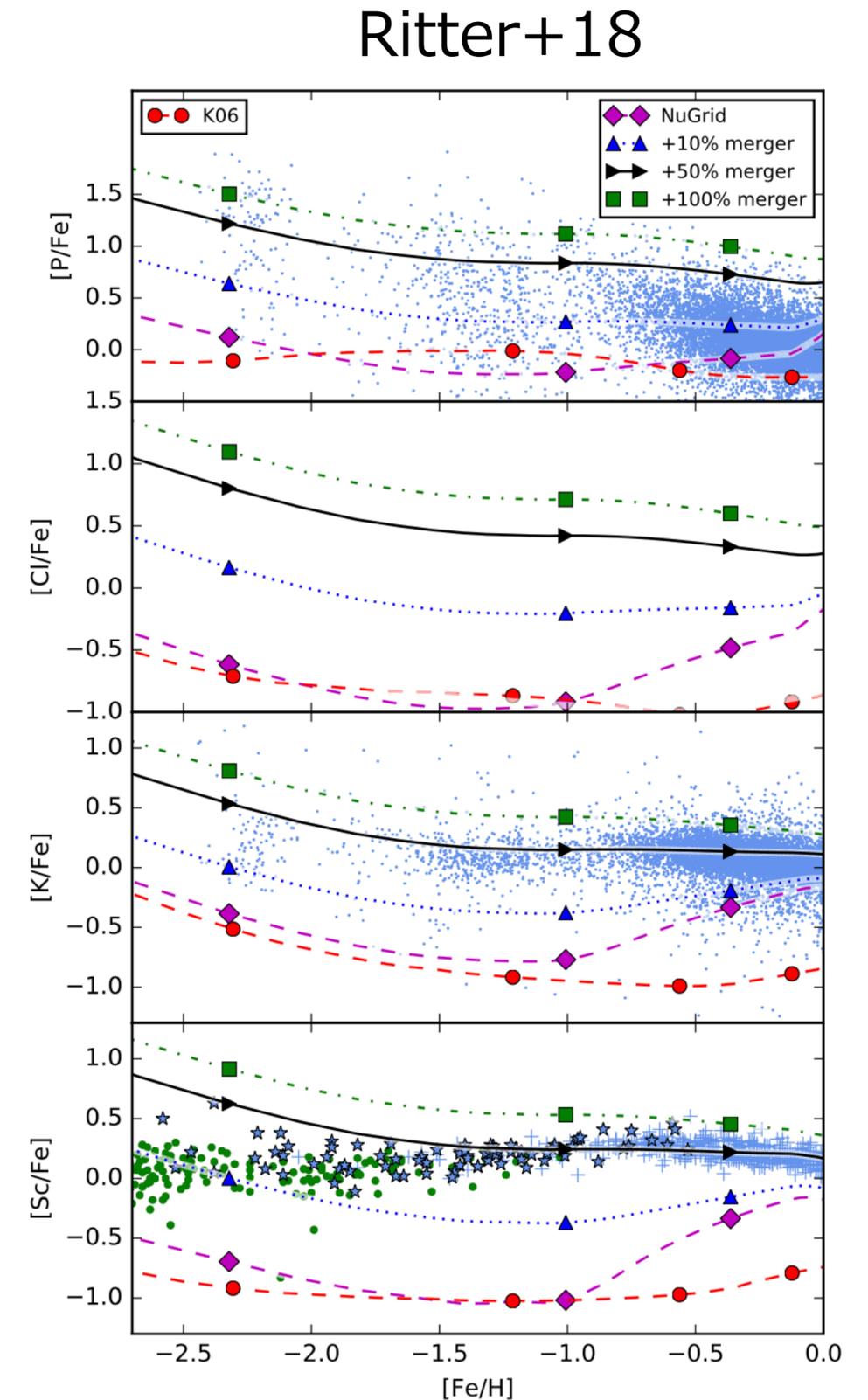
→ 衝撃波が伝播しやすい

2. Odd-Z元素(P, Cl, K, Sc)とO燃焼生成物(Si, S)

がenhanceされる (Ritter+18, Roberti+25)

→ odd-Z足りない問題の鍵？

C-O shell mergerは星の組成/化学進化の理解に重要



目標:C-O Shell Mergerを起こす星の爆発/元素合成を理解する

やったこと1: 恒星進化計算

質量や金属量、回転などを変えて恒星進化計算を行い、C-O shell merger が起こるモデルと起こらないモデルを含むモデルを作成

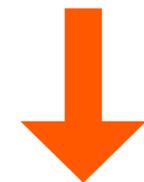
やったこと2: 真面目に2D爆発計算と元素合成計算

C-O shell mergerが起こる/起こらないモデルを2次元のニュートリノ輻射輸送計算で爆発計算、ポストプロセスで元素合成も計算

恒星進化計算



爆発計算



元素合成計算

Models and Parameters

恒星進化:HOSHI

(Takahashi+18; 300核種 (p - ^{79}Br))

爆発計算:3DnSNe (Takiwaki+16)

元素合成:Hatami+26 と同じコード
(809核種)

HOSHI で作った2つのモデルを
3DnSNe でおおよそ1秒の計算

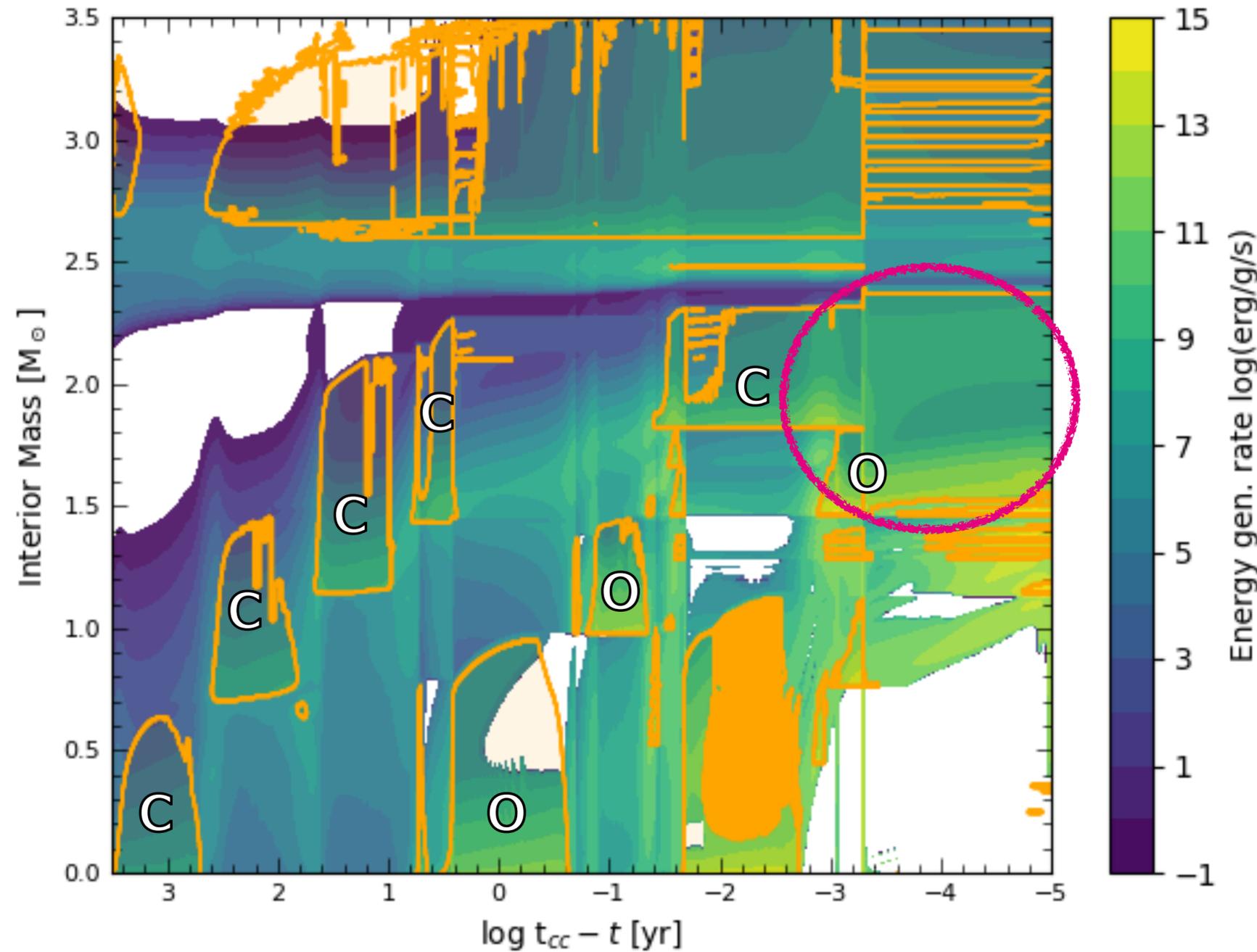
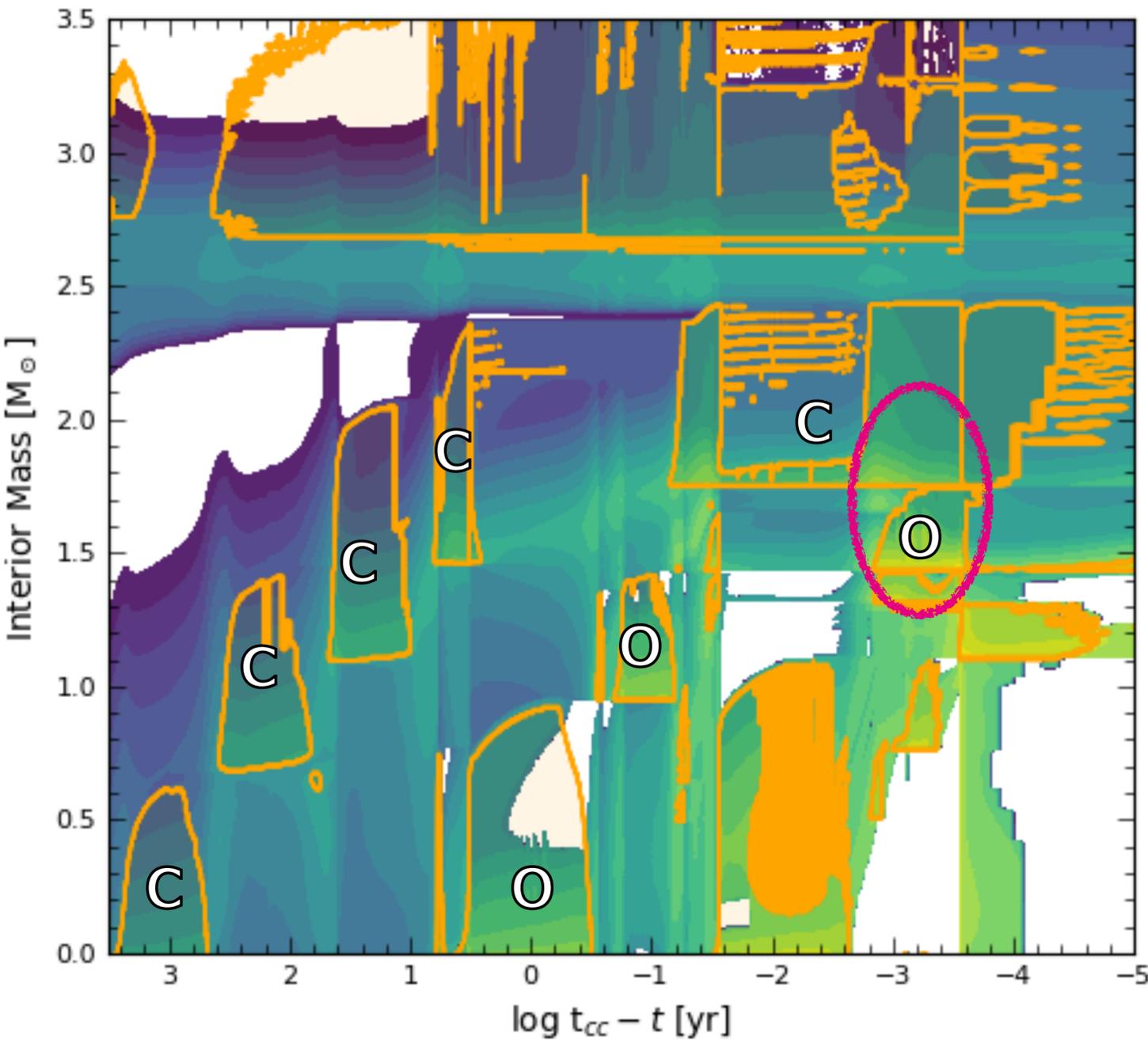
→ 元素合成まで計算

	No merger	Merger
質量 (M_{\odot})	15	15
金属量 (Z_{\odot})	10^{-1}	10^{-1}
回転 ($\Omega/\Omega_{\text{Kepler}}$)	0	0.2

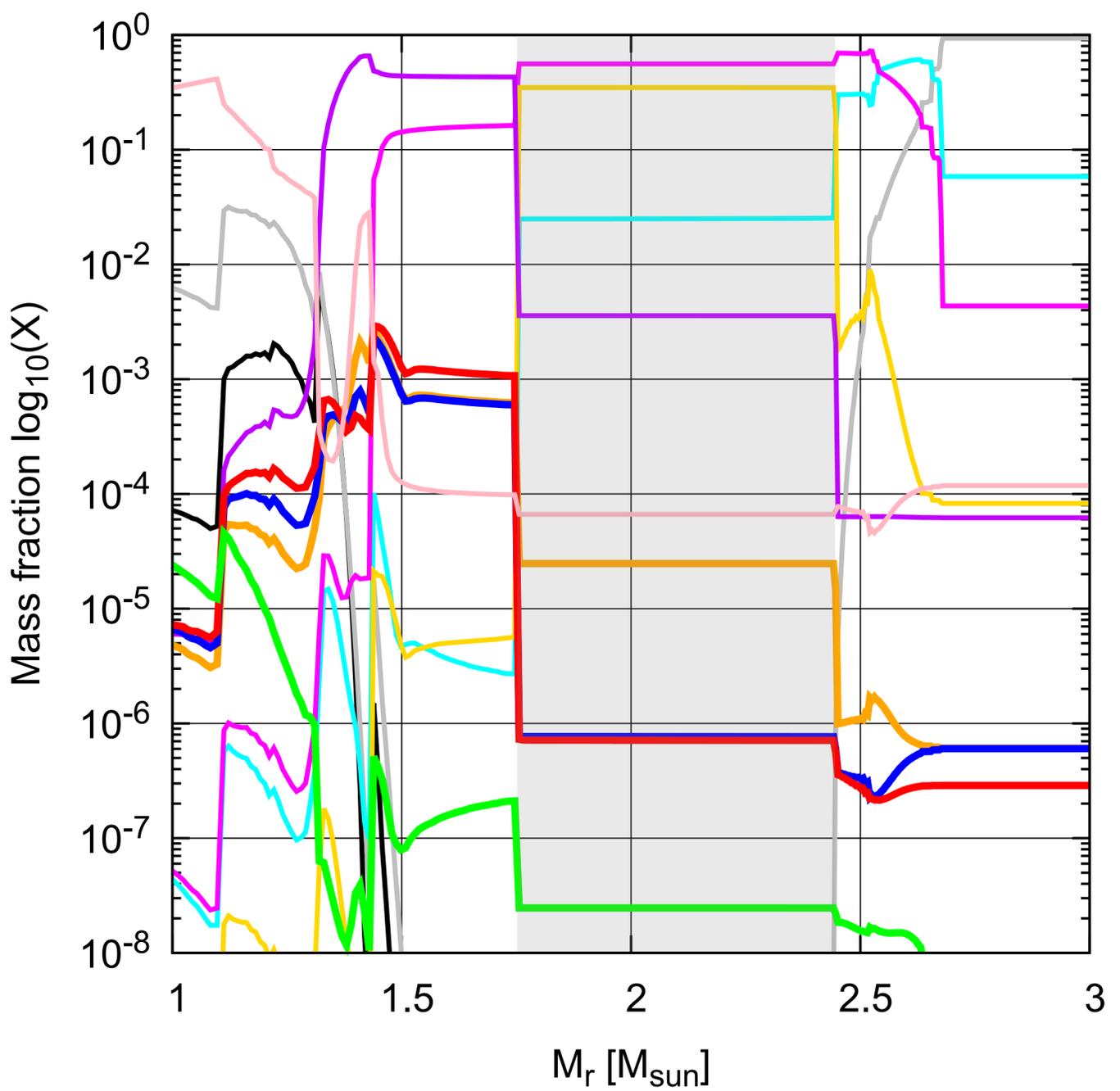
混ざる/混ざらないモデル

No merger

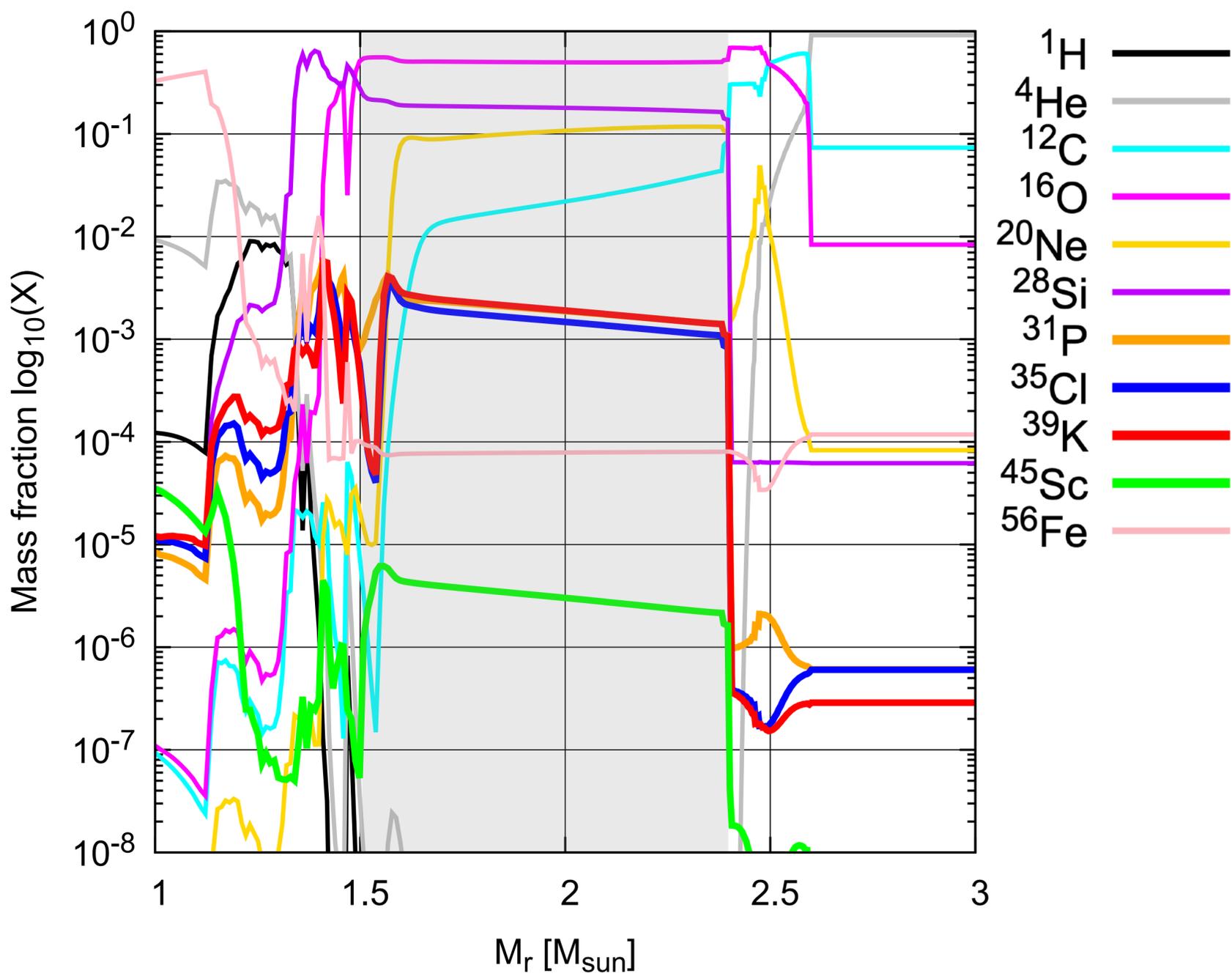
Merger



No merger

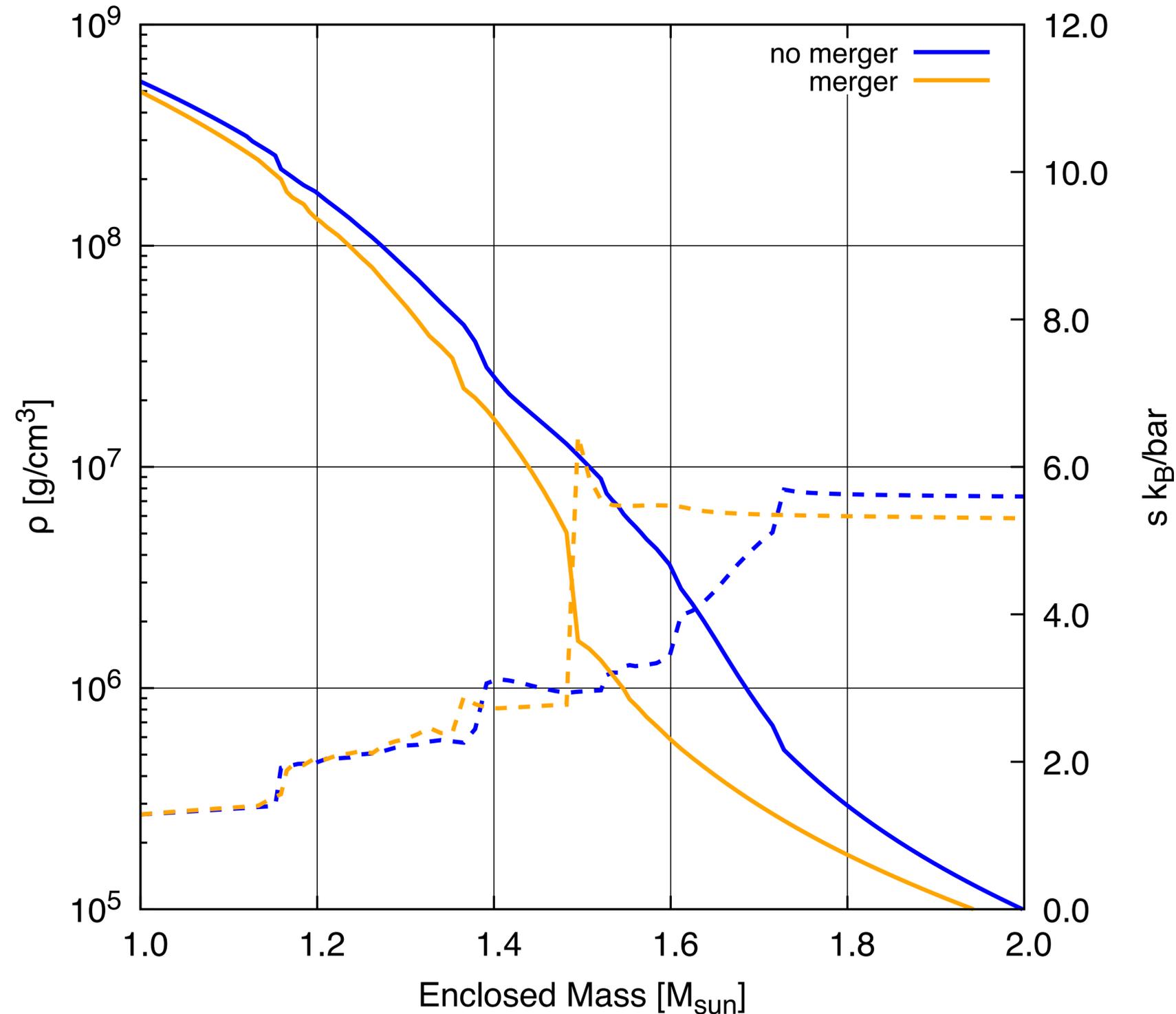


Merger



- ^1H — black line
- ^4He — grey line
- ^{12}C — cyan line
- ^{16}O — magenta line
- ^{20}Ne — yellow line
- ^{28}Si — purple line
- ^{31}P — orange line
- ^{35}Cl — blue line
- ^{39}K — red line
- ^{45}Sc — green line
- ^{56}Fe — pink line

- 中心の密度が $\rho = 10^{10}$ g/cc に達した時点で進化計算終了
- Shell merger の有無で密度構造に違い
- Shell merger を経験するモデルは $M_r \simeq 1.5M_{\odot}$ 付近に密度ジャンプ
→ このあたりが降着するあたりで爆発の様子が変わりそう



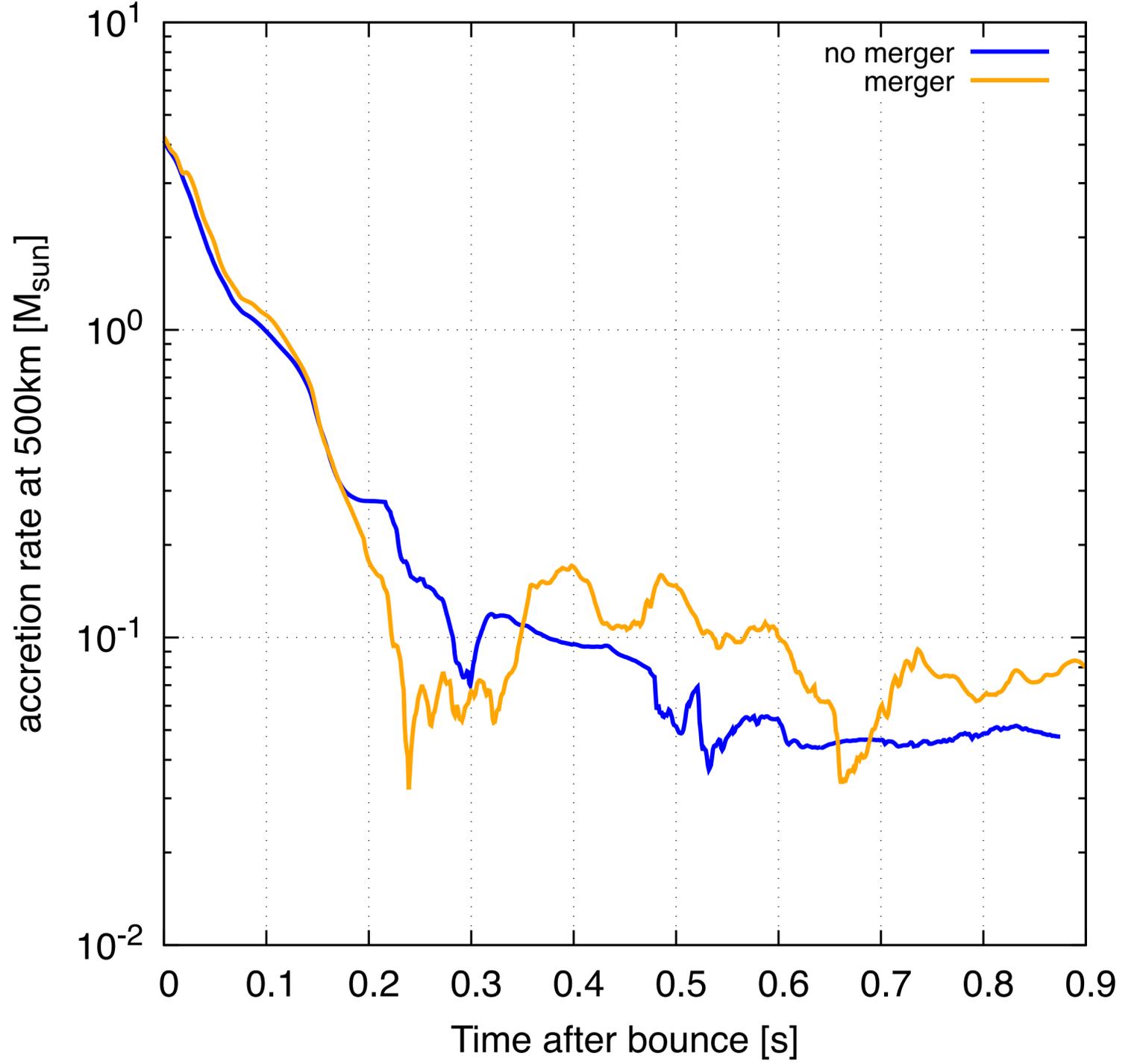
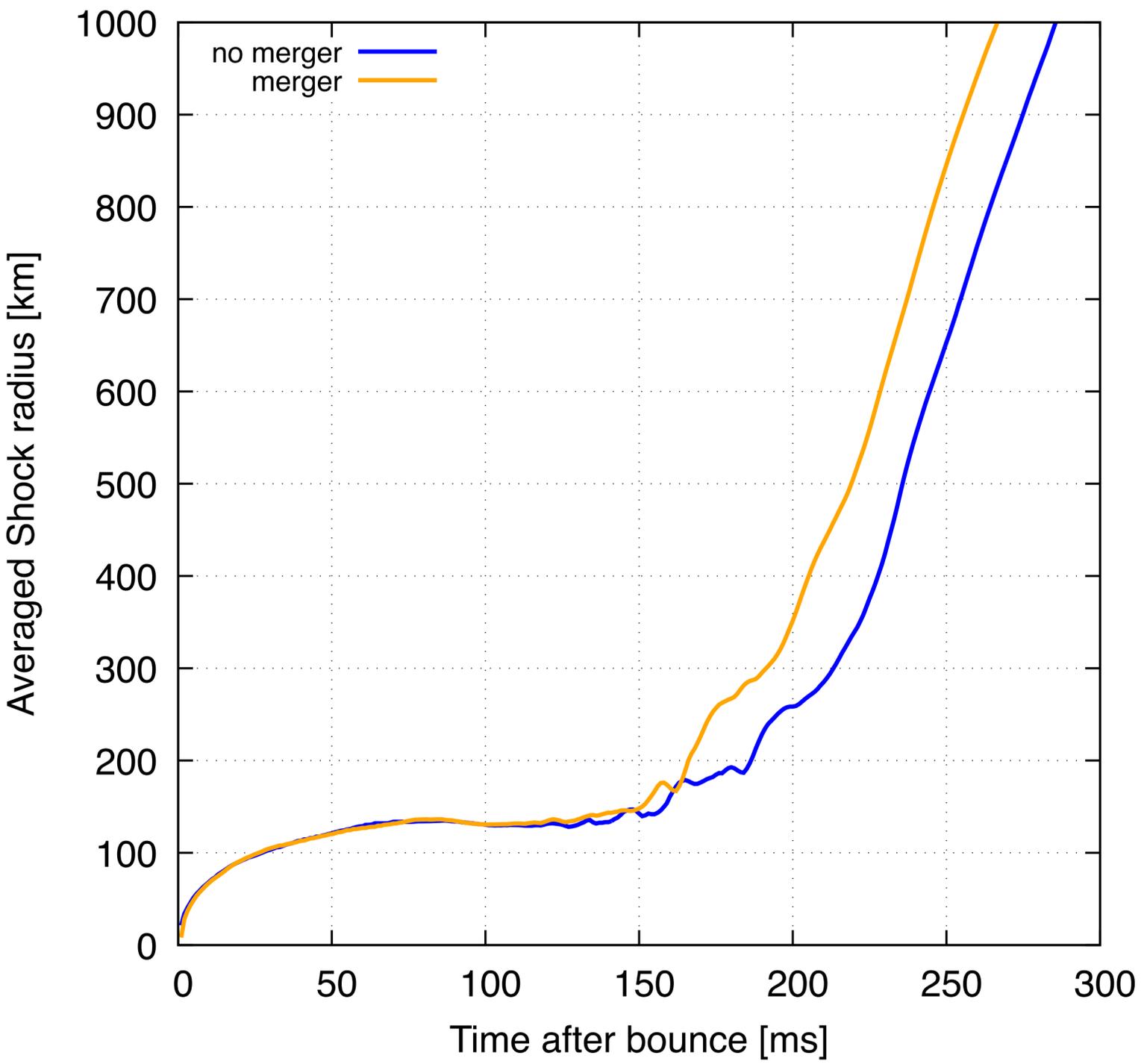
爆発計算: 3DnSNe (Takiwaki+16)

No merger/Merger モデルを用いて
2次元の爆発計算

解像度の違いは計算機の都合

コンパクトネスは進化計算終了時

	No merger	Merger
計算領域 (10^9 cm)	2.5	2.5
解像度 ($r*\theta$)	600*200	896*256
t_{bounce} (ms)	138	131
t_{ran} (s)	1.012	1.393
$\xi_{1.75}$	0.381	0.263



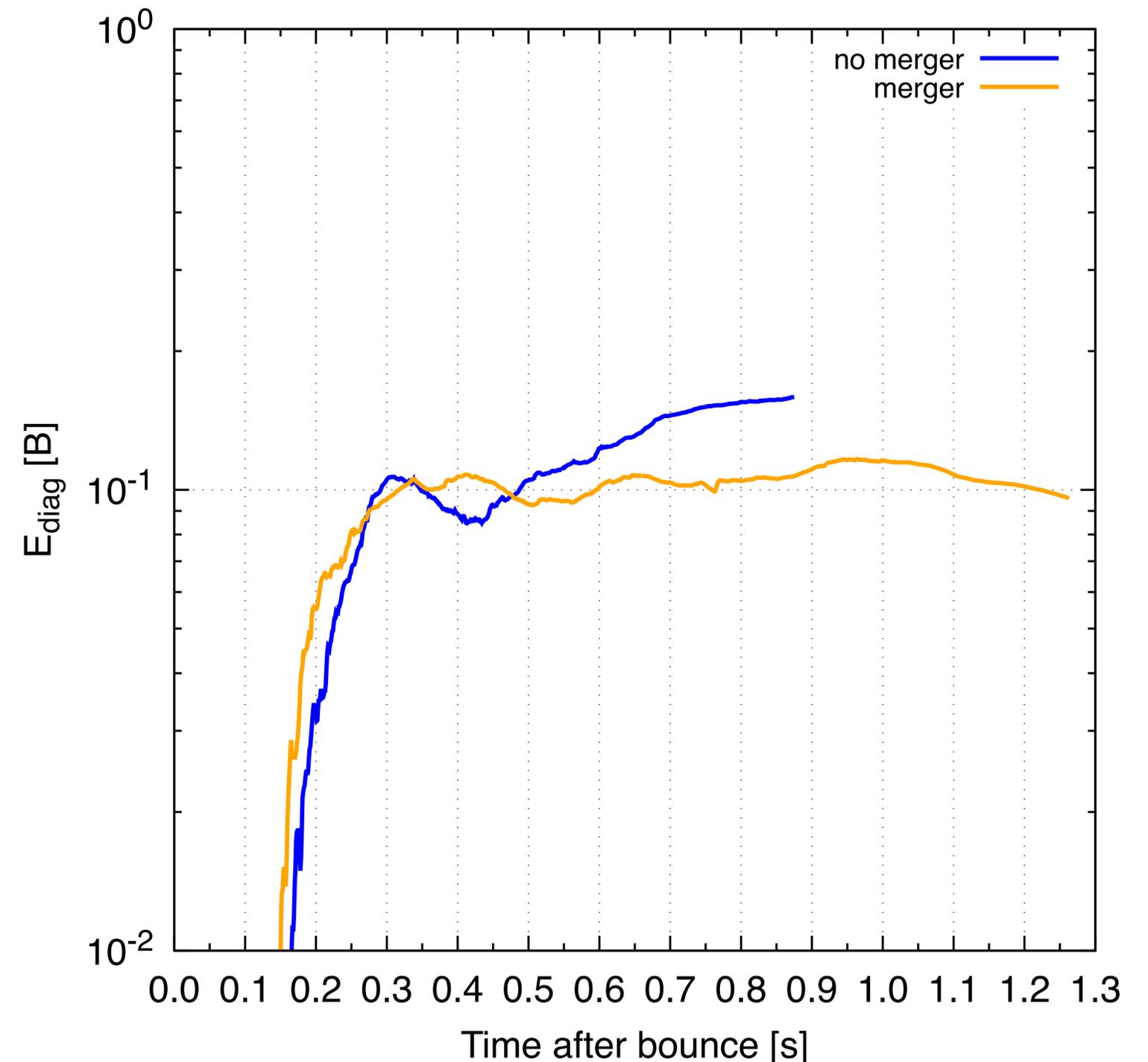
- 爆発エネルギー

$$E_{\text{diag}} := \int_D dV \rho (v^2 + e + \Phi)$$

- 爆発エネルギーの違いは倍程度

- No merger はもう少し育ちそう

- Merger で最後減りつつある
→ 計算領域から出ていく分？



- ポストプロセスで粒子の thermal history を追跡
1. 簡単のため各メッシュに1つずつ粒子をおく
 2. 時間正方向に積分
 3. 温度が 1GK を下回るまで外挿 (e.g., Wang+24)

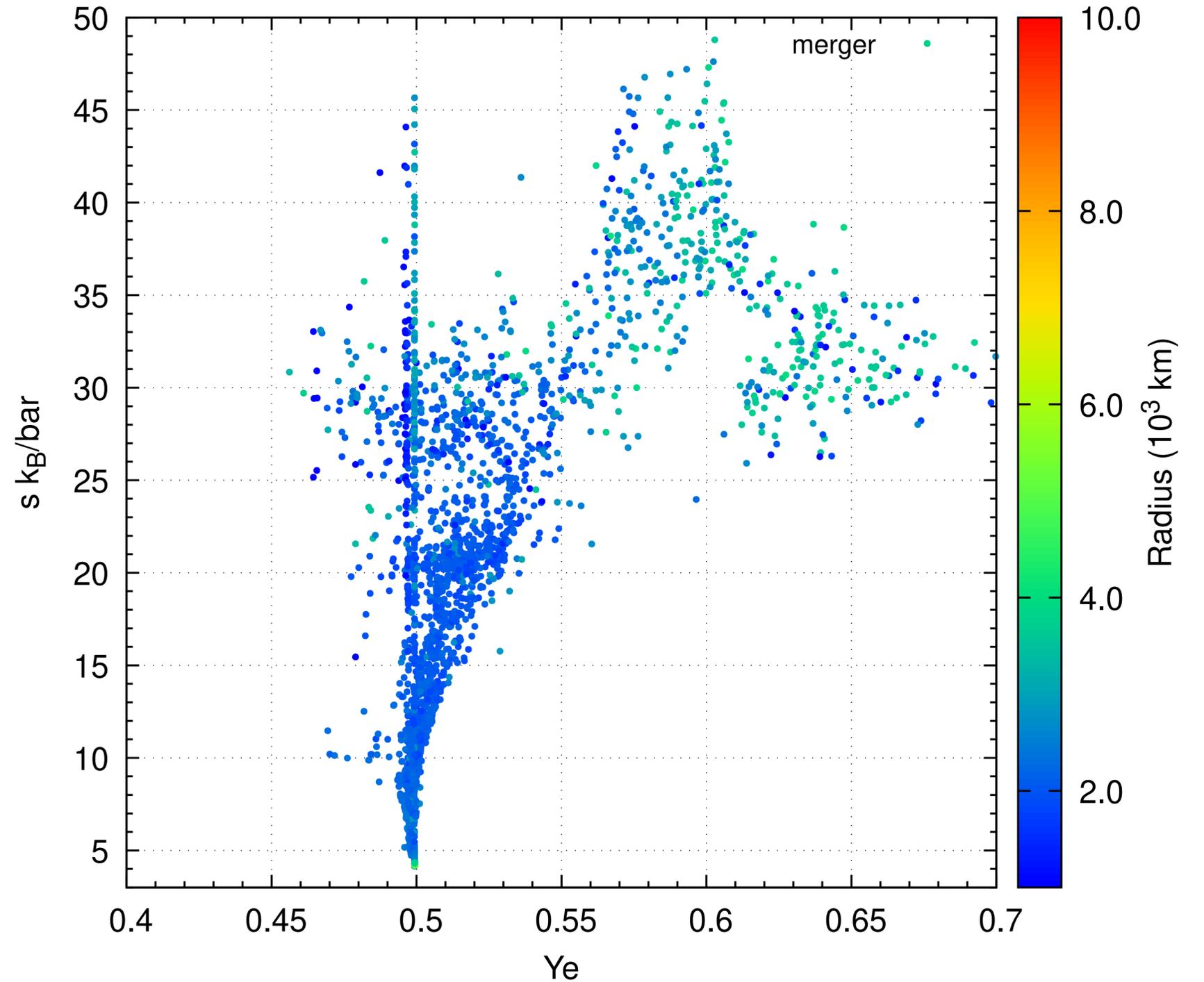
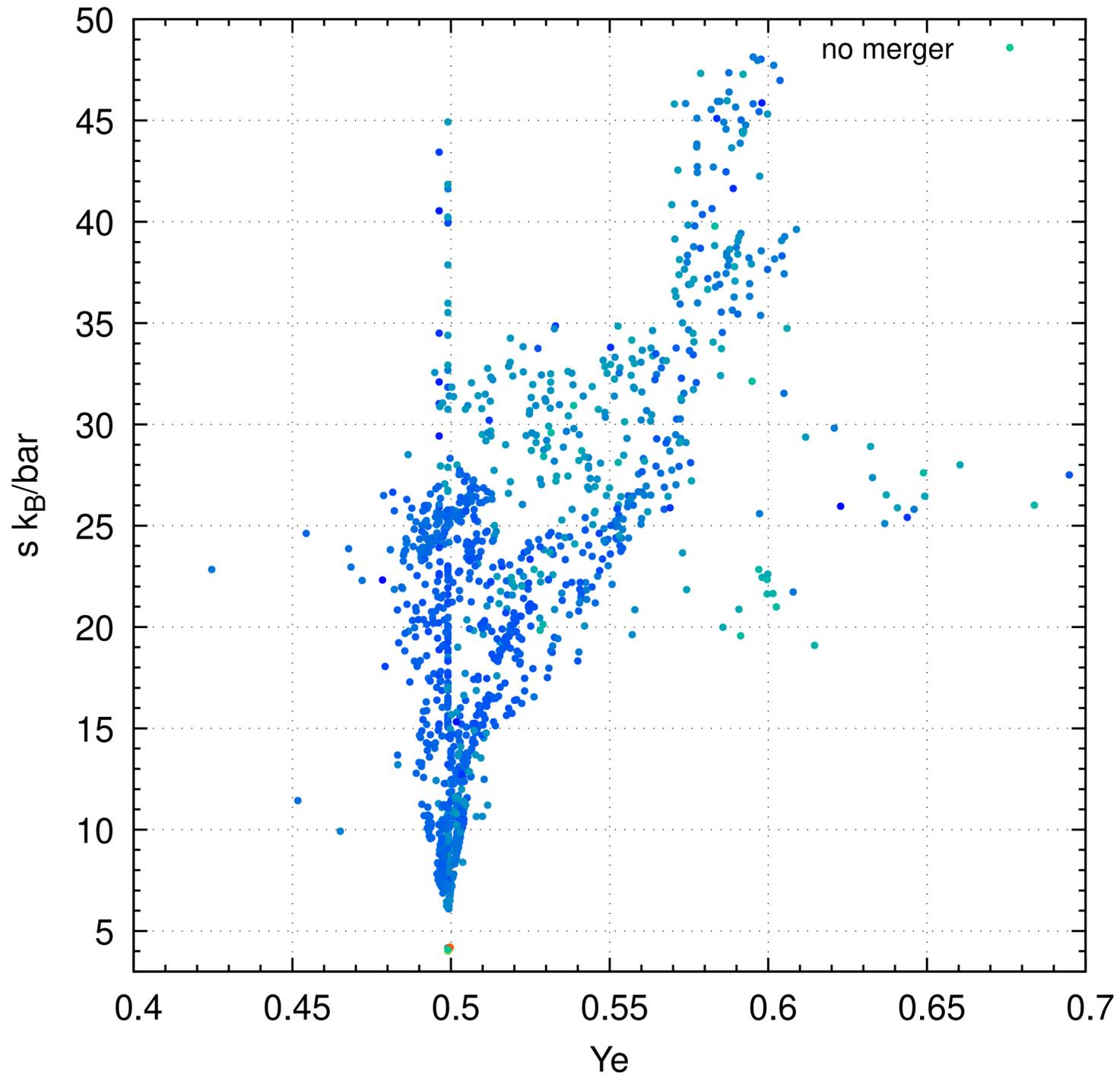
$$T(t) = T(t_{\text{ran}}) \left(1 + (t - t_{\text{ran}})/\tau\right)^{-2/3}$$

$$\rho(t) = \rho(t_{\text{ran}}) \left(1 + (t - t_{\text{ran}})/\tau\right)^{-2}$$

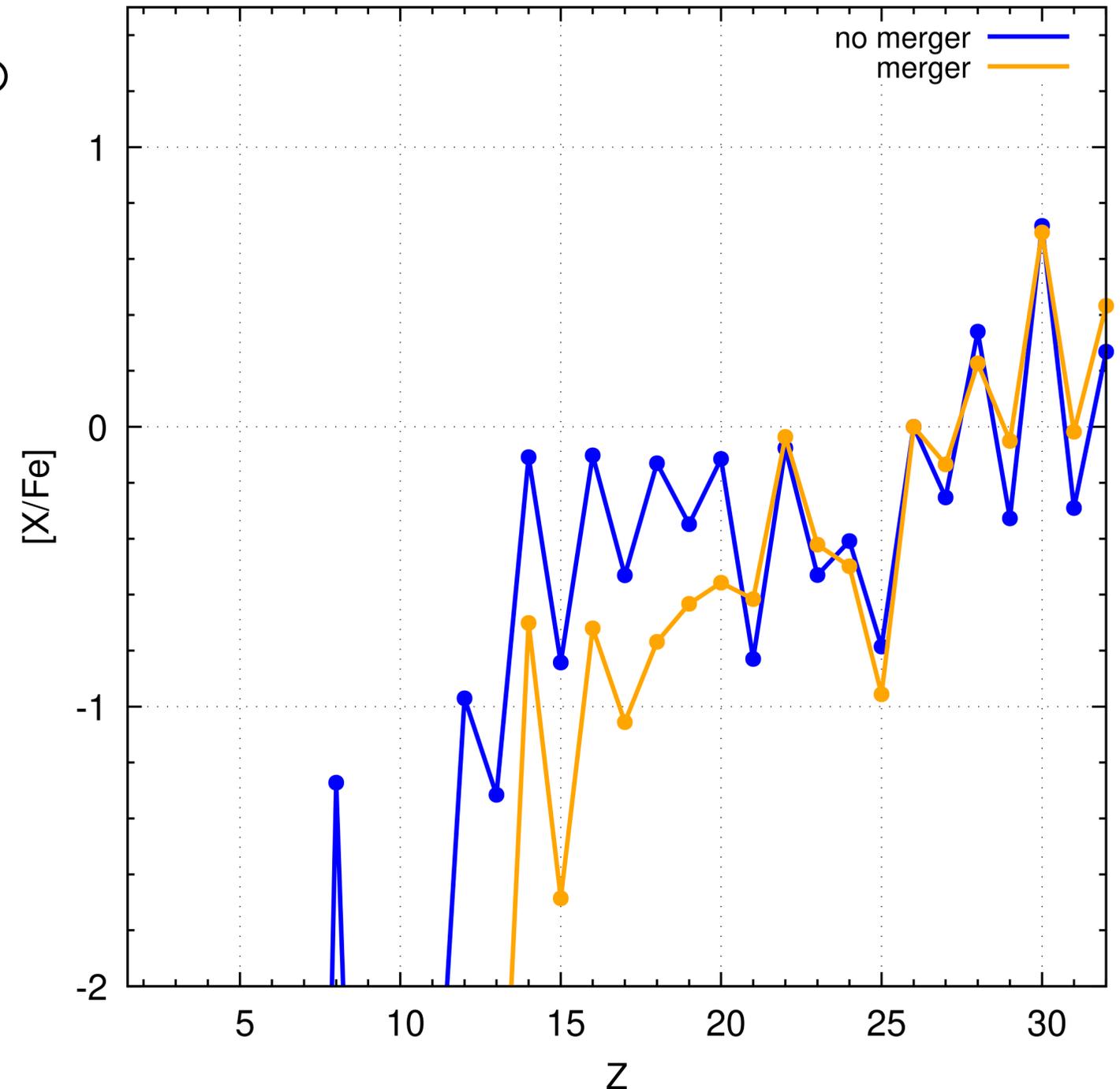
τ : 膨張タイムスケール

	No merger	Merger
t_{pb} (s)	0.874	1.262
Ejecta mass ($10^{-2}M_{\odot}$)	3.80	3.31
Particle mass ($10^{-2}M_{\odot}$)	2.97	2.07

元素合成: particle の s- Y_e 分布 (と初期位置)



- ejecta particle massはどちらも $\sim 0.02M_{\odot}$
- $M(\text{Fe}) \simeq 0.01M_{\odot}$
→ やはり鉄(^{56}Ni)が合成される領域しか追えていない……
- Znがenhance?
→ $^{64,66}\text{Ge}$ として合成
or $^{64,66}\text{Zn}$ で直接合成
- 計算時間を延ばすか tracer method の見直しが必要そう



目的

C-O shell merger を経験する/しない星の進化・爆発・元素合成の違いを理解する

結果

- Shell mergerによる**密度構造やコンパクトネスの変化が shock 進化を早めたり爆発エネルギーに影響したりする**
- ほぼ Si layer (= ^{56}Ni を合成する)領域しか追えず…
- 内側の元素合成はほぼ変わらない

展望

- Tracer method を修正したり時間を伸ばしたりしてもともと親星の O layer にあった物質の元素合成を調べる
- C-O shell mergerの影響からメカニズムへの手がかりを得られないか？