大質量星の後期進化における物質混合と 中質量元素合成への影響

吉田 敬

京都大学基礎物理学研究所

第8回超新星ニュートリノ研究会 2022年1月6日 早稲田大学

Kの生成問題

大質量星でのK合成 シ 超新星爆発時の爆発的酸素燃焼 炭素燃焼, ネオン燃焼 (Woosley et al. 2002)

金属欠乏星におけるK存在度と生成問題



対流層の物質混合と大質量星の最終進化

星の対流層における物質混合

輻射層

対流層

● 物質混合 → 拡散近似 $D_{cv} = \frac{1}{3} v_{MLT} \alpha_{MLT} H_P$ α_{MLT} : mixing length parameter H_P : pressure scale height → 対流領域の境界の少し外まで混合 $D_{cv}^{ov} = D_{cv,0} \exp\left(-2\frac{\Delta r}{f_{ov}H_{P0}}\right)$

 $f_{\rm ov}$: overshoot parameter

観測を再現するようにα_{MLT}, f_{ov}を決定
…主に主系列星と赤色超巨星の性質

 $\alpha_{\text{MLT}} = 1.8, f_{\text{ov}} = 0.03/(0 \text{ or } 0.002) \text{ until/after He burning}$

→ 後期進化の燃焼まで適用可能かはわからない

吉田敬 2022年1月6日 第8回超新星ニュートリノ研究会

1r



3D流体計算の結果から適用した拡散係数

 $f_{\rm ov} = 0.03$

大質量星の後期進化でのovershoot依存性(Davis et al. 2019) template: f = 0.002, → f = 0.012, 0.022, 0.032

Core massや組成分布に影響

→ odd Z 中質量元素の合成への影響 (Ritter et al. 2018)

研究目的, モデル

大質量星の後期進化における対流層境界での物質混合に影響 するovershootの効果に対する中質量元素(K, ⁴⁰Kを含む)の生 成量の依存性を調べる

Z = 0 (初代星) 大質量星の進化
M = 8, 9, 10, 12, 15, 17, 20, 22, 25 M_☉ stars overshoot parameter: f_{ov} = 0, 0.002, 0.005, 0.010, 0.030
¹²C(α,γ)¹⁶O反応率 → Kunz et al. (2002) (Caughlan et al. 1988 の~1.5倍)

超新星モデル
球対称爆発: 熱爆発モデル

 $E_{exp} = 0.1 \ (8 \ M_{\odot}), \ 0.5 \ (9 \ M_{\odot}), \ 1 \ (10\text{-}17 \ M_{\odot}), \ 10 \ (20\text{-}25 \ M_{\odot}) \times 10^{51} \ erg$

 $M_{56\text{Ni}}/M_{\odot} = 0.01 \ (8 \ M_{\odot}), \ 0.03 \ (9 \ M_{\odot}), \ 0.07 \ (10-17 \ M_{\odot}), \ 0.12 \ (20-25 \ M_{\odot})$

mixing fallbackやmass cut付近のYeの補正を考慮しない

超新星ejectaの質量比分布: 12 Mo (Z=0)



超新星ejectaの質量比分布: 12 M_☉ (Z=0)



大きなovershootの効果
O-rich層の組成
C,Ne,Mgの減少とSi,Sなどの増加
Si層が薄くなる

後期の対流進化: 12 M_☉ (Z=0)



大きなovershootの効果
shell燃焼対流層がより外側と内側に発達
外側でより早くshell燃焼が発生
外側でより重い元素を作りやすい

K合成: 12 M⊙ (Z=0)



*f*_{ov} = 0.010 case
Kが多く合成される → O-shell燃焼によりSi-Kが合成
Ne-shell燃焼: *X*(³⁹K) ~ 10⁻⁶
O-shell燃焼: *X*(³⁹K) ≥ 10⁻⁴
*f*_{ov} 依存性

*→ f*_{ov ≥} 0.01でKが合成されやすい傾向

軽い初代星超新星でのK合成: 8M_☉ (Z=0)





*f*_{ov ≥} 0.01で金属欠乏星のK存在度を再現できる可能性

吉田敬

2022年1月6日

第8回超新星ニュートリノ研究会

超新星ejectaのKと⁴⁰Kの生成量 (Z=0)

• [K/Fe]



 $[K/Fe] = \log(N_K/N_{K,\odot}) - \log(N_{Fe}/N_{Fe,\odot})$

K合成に星の質量依存性が見られる overshoot大でK, ⁴⁰Kが作られやすい

40K存在度比

超新星ejecta組成を変える要因

●爆発的Si燃焼領域での電子モル分率 Ye

➡ 鉄属元素の生成量分布 (e.g., Umeda & Nomoto 2002, 2005)

●極超新星の非球対称性、jet

中質量元素と鉄属元素の比

●星の自転

➡ He層、H層の組成分布、特に窒素

●対流混合の多次元性

→ 混合のタイムスケールの違い、不均一性

まとめ

大質量星(Z=0)の後期進化における対流層境界での物質混合に 影響するovershootの効果に対する中質量元素(Kを含む)の生 成量の依存性を調べた

- 大きなovershoot >> O-rich層でNe, Mg減少、Siなどが増加
 - 対流層が外側と内側により発達
 - 外側でより早くshell燃焼が発生 ━━> より重い元素を作りやすい

K生成量 → 大きなovershootの場合にO-rich層でより多く生成
O shell燃焼で質量比10-4程度まで増加

● ⁴⁰K生成量 ━━> 大きなovershootの場合にO-rich層でより多く生成 (Z=0の星では作られにくい)

● 金属欠乏星の組成との比較
*f*_{ov ≥} 0.01 で金属欠乏星のK組成比を再現する可能性

fov が大きいと中質量元素が過剰になる問題