大質量星における40Kと中質量元素の元素合成 ~後期進化の対流混合による影響

吉田敬

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

新学術「地下宇宙」領域研究会 2020年6月2日 オンライン研究会@ZOOM

40Kおよび中質量元素

⁴⁰K → Kの中の長寿命不安定核種 (*t*_{1/2}=1.248×10⁹ yr) 地球内部の放射化熱の主要な熱源のひとつ

		Sc- 37 p 2.8E-20s	Sc- 38 p 4.3E-13s	Sc- 39 121ms	Sc- 40 182.3ms	Sc- 41 596.3ms	Sc- 42 *62.0s	Sc- 43 3.891h	Sc- 44 *2.44d	Sc- 45 100	S c -
Ca- 34	Ca- 35	Co. 26	Ca- 37	Ca- 38	Ca- 39	Co. 40	680.8ms	Co. 42	3.97h	*318ms	*18
2p 800ps	25.7ms	Ca- 36 101.2ms	181.1ms	443.8ms	860.6ms	Ca- 40 96.941	Ca- 41 1.02E5y	Ca- 42 0.647	Ca- 43 0.135	Ca- 44 2.086	162
K - 33 p 2.1E-20s	K - 34 p 720ps	K - 35 178ms	K - 36 341ms	K - 37 1.225s	K - 38 7.636m *924.0ms	K - 39 93.2581	K - 40 0.0117 1.248E9y	K - 41 6.7302	K - 42 12.360h	K - 43 22.3h	K - 22.
Ar- 32 98ms	Ar- 33 173.0ms	Ar- 34 843.8ms	Ar- 35 1.7756s	Ar- 36 0.3336	Ar- 37 35.011d	Ar- 38 0.0629	Ar- 39 269y	Ar- 40 99.6035	Ar- 41 1.8268h	Ar- 42 32.9y	Ar- 5.3
CI- 31 190ms	CI- 32 298ms	CI- 33 2.511s	CI- 34 *31.99m 1.5266s	Cl- 35 75.76	CI- 36 3.013E5y	CI- 37 24.24	CI- 38 37.24m *715ms	CI- 39 56.2m	CI- 40 1.35m	CI- 41 38.4s	CI-
S - 30 1.1763s	S - 31 2.5534s	S - 32 94.99	S - 33 0.75	5 - 34 4.25	S - 35 87.37d	S - 36 0.01	S - 37 5.05m	S - 38 2.838h	S - 39 11.5s	S - 40 8.8s	S - 1.
P - 29 4.142s	P - 30 2.498m	P - 31 100	P - 32 14.268d	P - 33 25.35d	P - 34 12.43s	P - 35 47.3s	P - 36 5.6s	P - 37 231s	P - 38 640ms	P - 39 280ms	P - 15
Si- 28 92.223	Si- 29 4.685	Si- 30 3.092	Si- 31 2.6227h	Si- 32 153y	Si- 33 6.11s	Si- 34 2.27s	Si- 35 780ms	Si- 36 450ms	Si- 37 90ms	Si- 38 102ms	Si-

@核図表

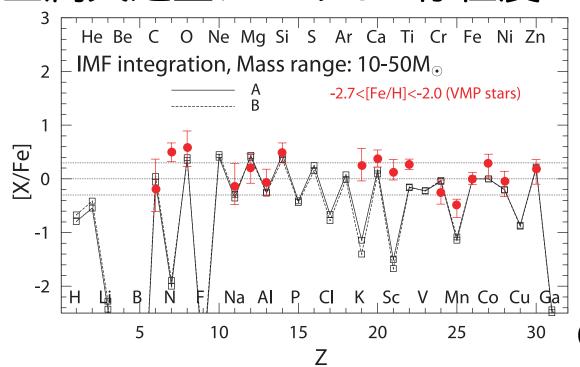
大質量星 → 他の中質量核種(Si-Ca)とともに生成

Kの生成問題

大質量星でのK合成

→ 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



$$[X/Fe] = \log(N_X/N_{Fe}) - \log(N_X/N_{Fe})_{\odot}$$

A: [O/Fe] = 0.5 for HN models

B: [Mg/Fe] = 0.2 for $>30 M_{\odot}$ HN models

● Very Metal-Poor Stars の平均存在度 -2.7 < [Fe/H] < -2.0

(Tominaga et al. 2007)

── 爆発モデルを工夫してもK存在度を再現するのが困難

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

△r ♦ 対流層

●物質混合 → 拡散近似

$$D_{\rm cv} = \frac{1}{3} v_{\rm MLT} \alpha_{\rm MLT} H_P$$

 $\alpha_{\rm MLT}$: mixing length parameter

- overshoot
 - 対流領域の境界の少し外まで混合

$$D_{\text{cv}}^{\text{ov}} = D_{\text{cv},0} \exp\left(-2\frac{\Delta r}{f_{\text{ov}}H_{P0}}\right)$$

 f_{ov} : overshoot parameter

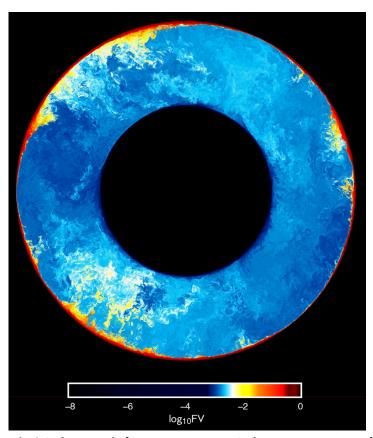
観測を再現するようにα_{MLT}, f_{ov}を決定・・・・主に主系列星と赤色超巨星の性質

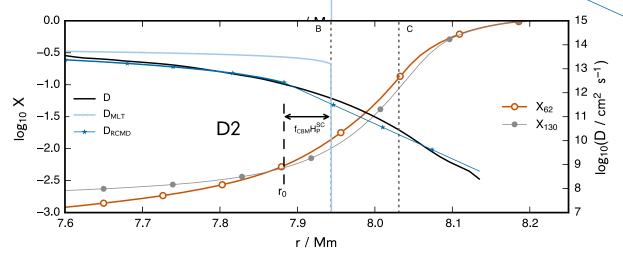
 $\alpha_{\text{MLT}} = 1.8, f_{\text{ov}} = 0.03/0.002$ until/after He burning

→ 後期進化の燃焼まで適用可能かはわからない

多次元進化における対流混合

酸素shell燃焼層を想定した3D流体計算 (Jones et al. 2017)

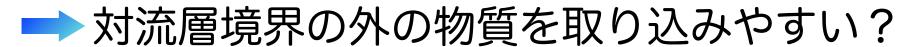




3D流体計算の結果から適用した拡散係数

$$f_{\rm ov} = 0.03$$

対流層境界から流入した物質の比体積



研究目的

- →大質量星の進化と超新星で生成される⁴0Kを含めたKおよび 中質量元素の生成過程と生成量を調べる
- 対流層境界での物質混合に影響するovershootの効果に 対する中質量元素の生成量の依存性を調べる
 - → 金属欠乏星の組成との比較し、overshootパラメータ の制限をする
 - → ⁴⁰Kの生成量, 初代星での中質量元素の生成, 銀河化学進化に応用する

大質量星の進化モデル

HOngo Stellar Hydrodynamics Investigator (HOSHI) CODE

(Takahashi et al. 2016, 2018, 2019, Yoshida et al. 2019)

$$\frac{\partial P}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} - \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} \qquad \qquad \frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

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

$$\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} = \min(\nabla_{\text{ad}}, \nabla_{\text{rad}})$$
 対流, 輻射
$$\frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \epsilon_{\text{nucl}} - \epsilon_{\nu} + \epsilon_{\text{grav}}$$

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

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial M_r} \left[(4\pi r^2 \rho)^2 D \left(\frac{\partial X_i}{\partial M_r} \right) \right] + \left(\frac{\partial X_i}{\partial t} \right)_{\text{nucl}}$$

組成変化 対流混合 元素合成

元素合成(ここでは~Brまでの300核種)

$$\left(\frac{\partial X_i}{\partial t}\right)_{\text{nucl}} = -\lambda_i X_i + \Sigma_j \lambda_j X_j - \rho \Sigma_j \langle \sigma v \rangle_{i,j} X_i X_j + \rho \Sigma_{j,k} \langle \sigma v \rangle_{j,k} X_j X_k + \dots$$

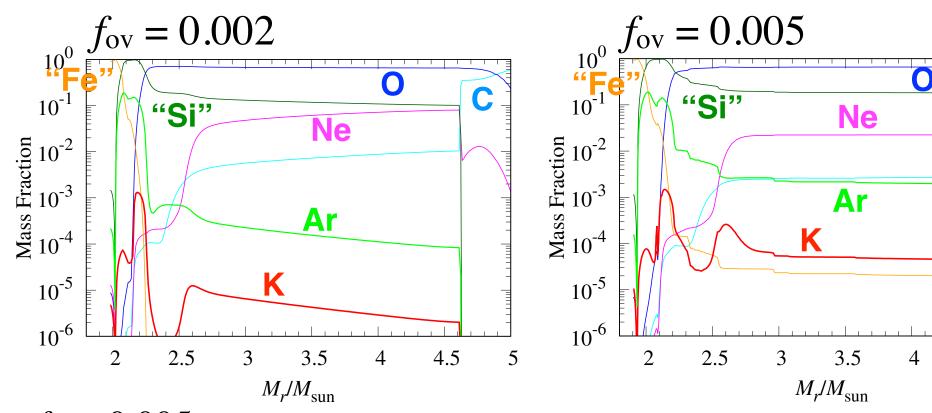
 $\dot{M}(T_{\rm eff}, L, [X_{\rm H}, X_{\rm He}, Z])$ 質量放出率

●自転を考慮した星の計算も可能

テスト計算例

大質量星の進化と超新星における元素合成

 $18M_{\odot}, Z = 0, E_{\text{exp}} = 1 \times 10^{51} \text{ erg}, M(^{56}\text{Ni}) = 0.07 M_{\odot}$



 $f_{\rm ov} = 0.005$

進化の最終段階で効率的にKが生成 星の質量,金属量にも複雑に依存 4.5

研究計画

1年目

太陽金属量の大質量星について中質量元素の生成量の overshoot依存性について調べる

```
M = 10, 15, 20, 25 M_{\odot} \text{ stars}
f_{\text{ov}} = 0, 0.005, 0.010, 0.030
```

→ K, 40Kの生成量と生成過程を調べる

2年目

- 初代星金属量の星についてKを含めた中質量元素の 生成量のovershoot依存性について調べる
 - →金属欠乏星の組成との比較
 - → overshootパラメータへの制限
 - → 銀河化学進化への応用

まとめ

- K (40K)を含めた中質量元素
 - → 大質量星の進化や超新星での元素合成で生成
 - ●金属欠乏星の組成 → K生成問題
 - ●進化過程での対流混合の影響がある
- →大質量星モデルにおける対流混合
 - ➡ mixing length theoryと拡散近似, overshoot
 - → 後期進化において多次元の対流効果を十分再現できているとまでは言えない
- ●40K, Kを含めた中質量元素の合成のovershoot依存性
 - → ⁴⁰Kを含めたKの生成過程の解明
 - → 初代星や銀河化学進化での中質量元素の進化