

# 星の進化での元素合成

Koh Takahashi/高橋 亘  
東北大学



# アウトライン

- 自己紹介
- **銀河化学進化への恒星の役割** …どうして恒星を研究するか
- **恒星モデルの基礎事項** …どのように恒星を研究するか
- 核反応の役割と不定性
- エネルギー源としての核反応
- 化学進化に重要な核反応
- まとめ

# 自己紹介

- なまえ： 高橋亘 たかはし こう
- 研究テーマ

恒星進化の理論モデリング

磁場と自転の効果のモデル化と検証

超新星親星のモデリング

初期宇宙での特異な恒星進化と**元素合成**



- 略歴

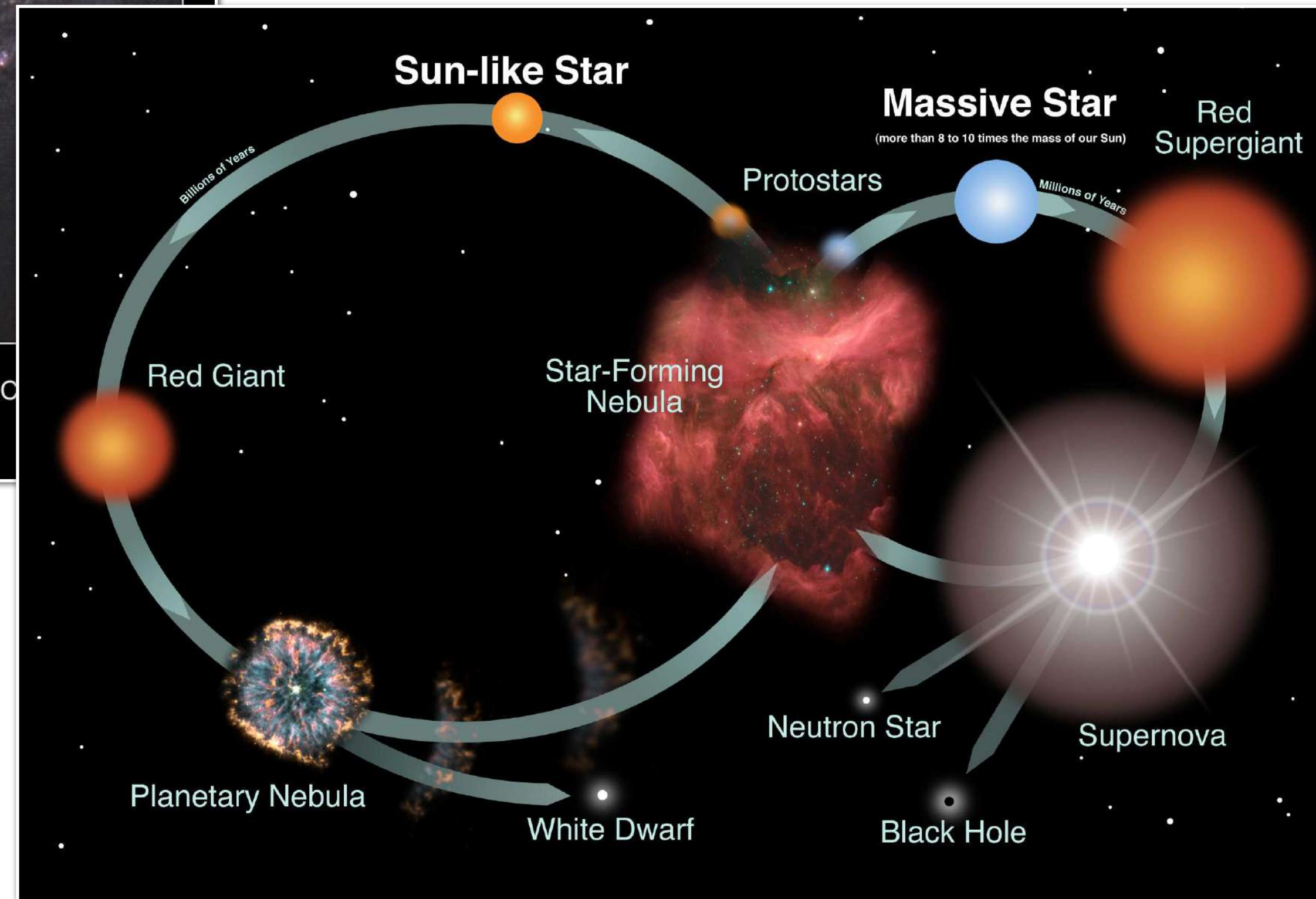
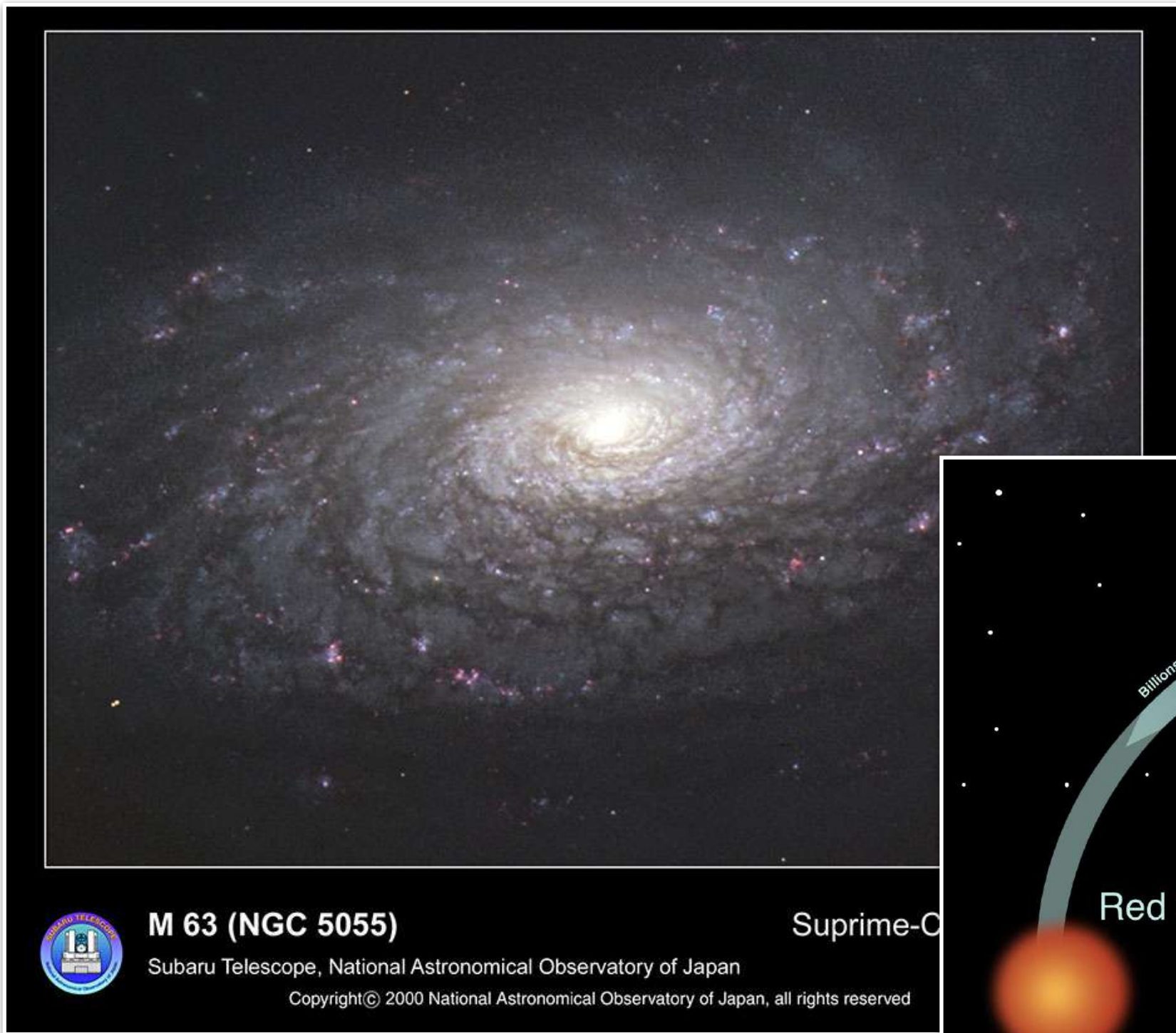
東京大学天文学教室 2017年学位取得（指導：梅田秀之）

ドイツ（ボン、ポツダム）でポスドク

→ 2022年 4月から東北大学 特任助教

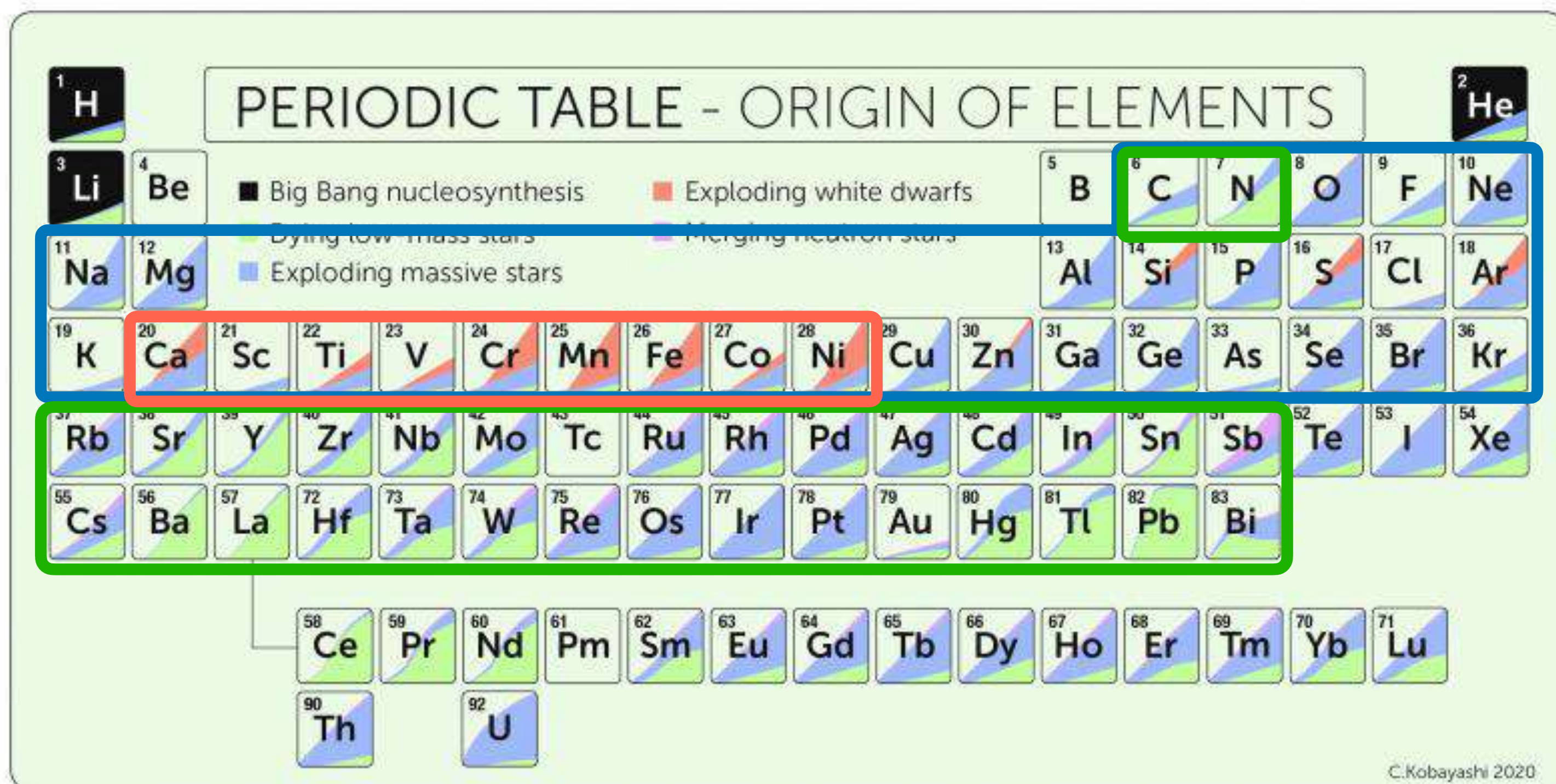
# 銀河化学進化への恒星の役割 1/2

銀河のいたるところで 恒星が生まれ死んでいく。  
恒星の“lifecycle”の結果、宇宙には**金属**が満ちていく。



Credit: NASA and the Night Sky Network

# 銀河化学進化への恒星の役割 2/2



Credit: C. Kobayashi 2020, Kavli IPMU

元素の起源：ほとんど恒星

青色：大質量星

緑色：中質量星

赤色：Ia型超新星（中質量星連星）

+中性子連星も重要な起源天体

今日のトピック

- ・ 恒星による元素合成はどのように計算されるか？
- ・ 核反応率の正確な見積りはどのような場合に重要か？

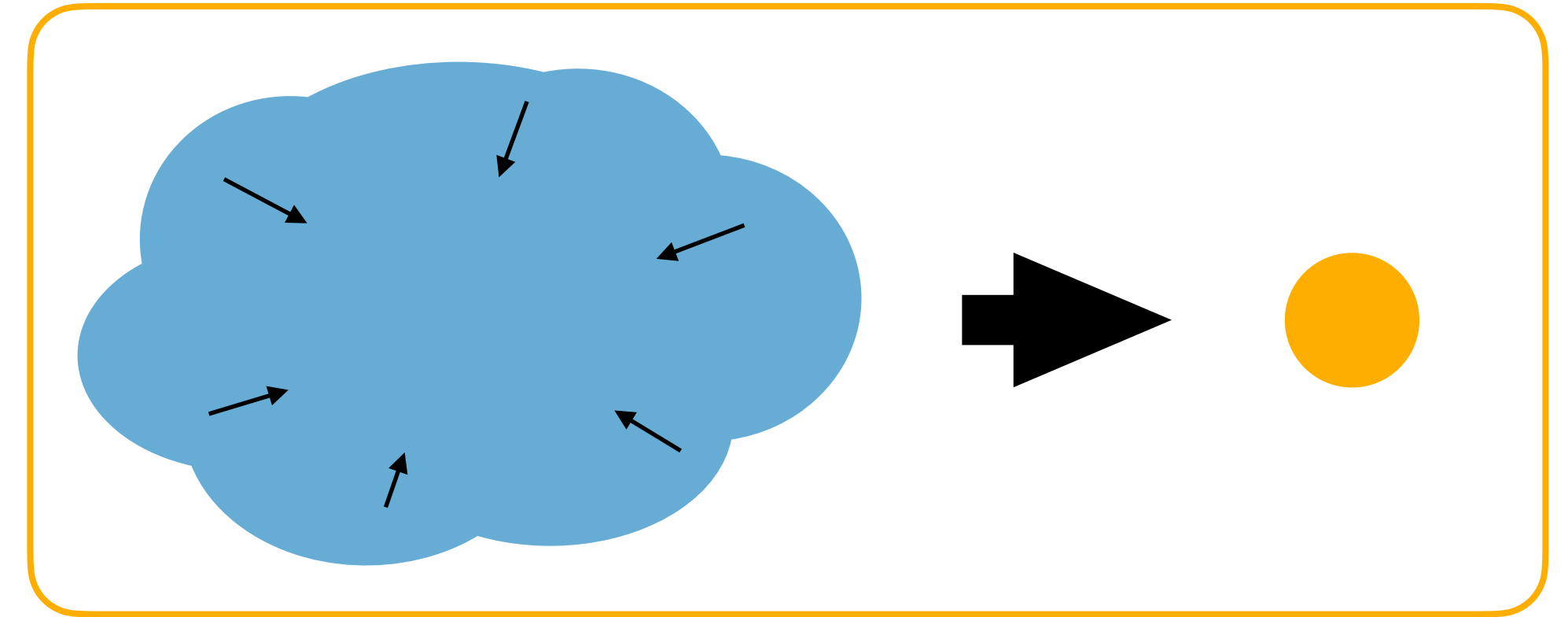
# 恒星モデルの基礎事項

- ・ 恒星とは？
- ・ 恒星の「進化」
- ・ 恒星の熱源
- ・ 電子の縮退圧：なぜ **星質量** が重要か
- ・ シミュレーションの例

# 恒星モデルの基礎事項 1/5

重力的に不安定な星間分子雲が収縮し、恒星は生まれる。

- ・ 自分の重力でまとまっている (自己重力系)
- ・ 圧力で重力に対抗する



恒星の力学的構造 (静水圧構造) :

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{GM\rho}{r^2}, \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho, \quad \text{relation between } P \text{ and } \rho$$

↑  
温度 & 組成により決定

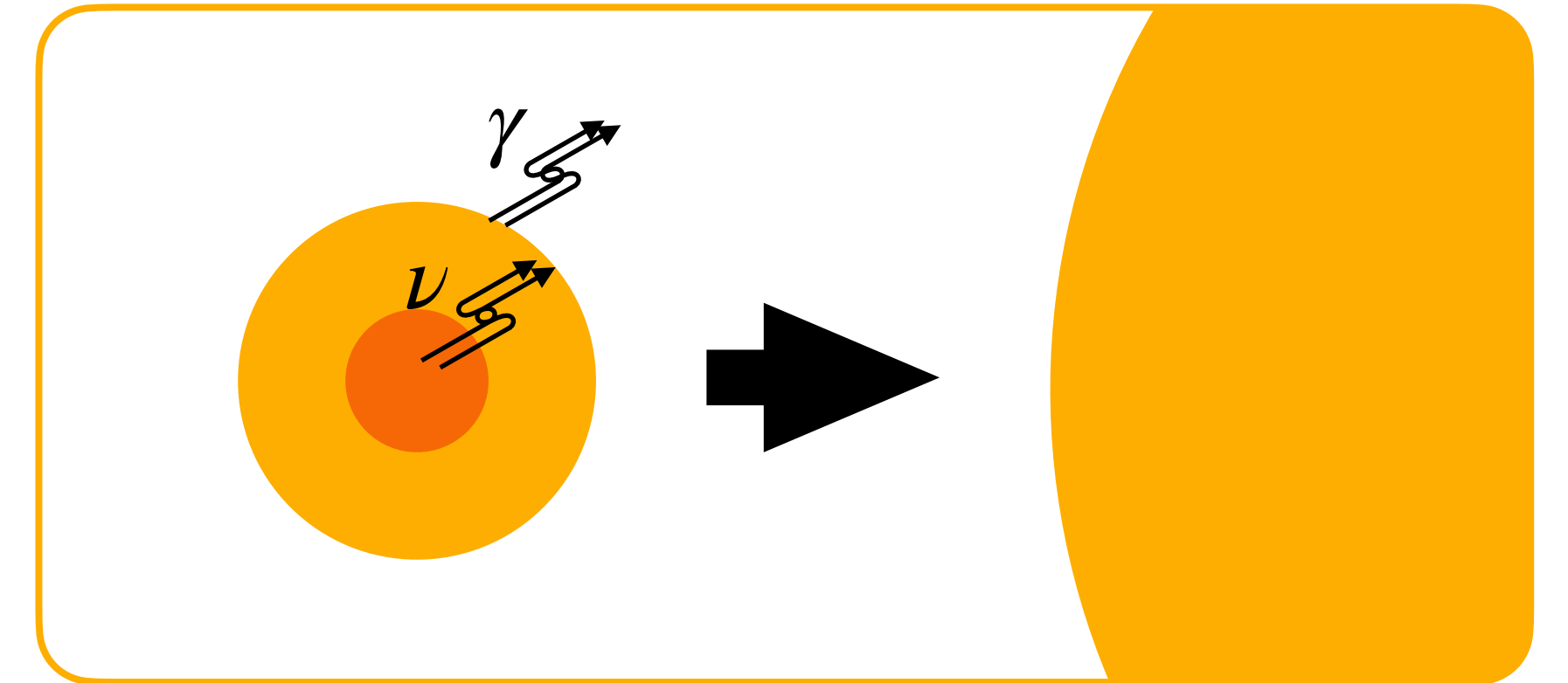
# 恒星モデルの基礎事項 2/5

恒星は宇宙空間より高温なので **冷えている** 最中。

- ・ 前期段階なら表面から光子を放射
- ・ 後期段階なら内部でニュートリノを放射

→ 恒星は冷えることで構造を変化させる：

**「恒星進化」**



式であらわすと…

$$\frac{\partial e_{\text{thm}}}{\partial t} = -p \frac{\partial(1/\rho)}{\partial t} + \epsilon - \epsilon_{\nu} - \frac{\partial L}{\partial r}, \quad L = L(r, M, T, \rho, X, \dots)$$

(核反応による) 発熱とニュートリノ放射による冷却

→ 圧力密度関係 が定まり恒星の構造が決定。



# 恒星モデルの基礎事項 3/5

恒星は内部に熱源をもつはず

- 太陽光度  $\sim 4e33 \text{ erg s}^{-1}$
  - 太陽の全エネルギー  $\sim GM^2/R \sim 4e48 \text{ erg}$
- 熱源がない場合  $10^{15} \text{ s} \sim 30 \text{ Myr}$  ( $\ll T_{\text{earth}}$ ) で冷えてしまう。

核反応が熱源：「核燃焼」

- $P_{\text{center}} \sim GM\rho/R \sim nkT_{\text{center}}$
  - $(k/m_p)T_{\text{center}} \sim GM/R \sim 2e15 \text{ erg g}^{-1}$
- **$T_{\text{center}} \sim 2 \times 10^7 \text{ K}$**  : 核反応に十分  
冷えてつぶれるほど内部は高温になる

# 恒星モデルの基礎事項 4/5

- つぶれるほど高温  
→ 後期段階ほど重たい核種の反応
- 温度のピークは  
電子の縮退圧が優勢になるとき

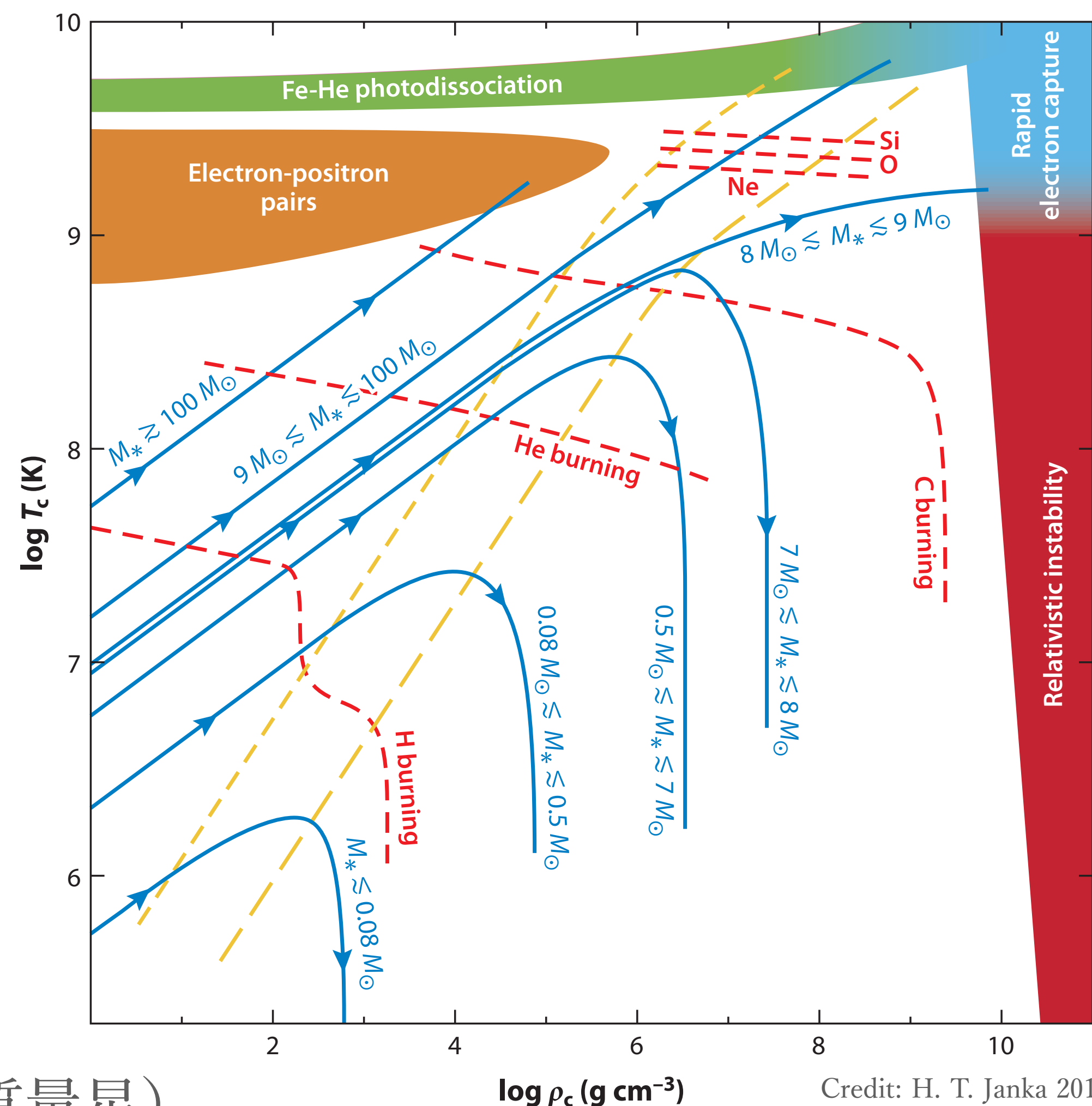
…ぎゅうぎゅうすぎてフェルミエネルギーが温度を超えると圧力が密度だけで決まるようになり、温度を下げられるようになる。

「縮退圧がいつ効き始めるか＝進化がいつ止まるか」  
は**星の質量**によって決まる。

→ **星質量**は**恒星の運命**を決める  
最重要パラメータ

$M_* \lesssim 8 M_\odot$  : 進化は停止し白色矮星を残す (中小質量星)

$\gtrsim 8 M_\odot$  : 鉄のコアの崩壊まで進化が進む (大質量星)



# 恒星モデルの基礎事項 5/5

## 現実的なシミュレーション

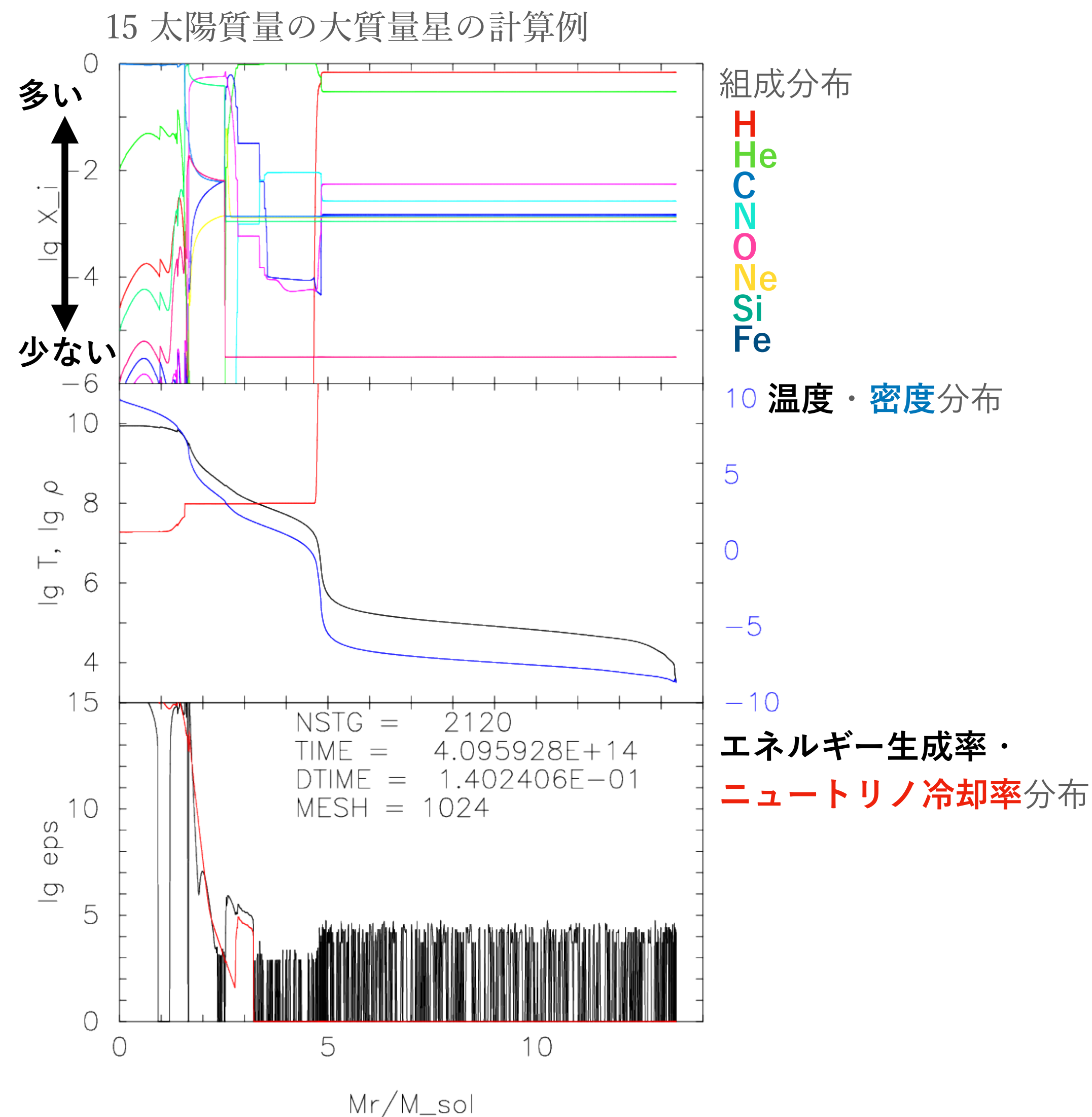
星構造の時間発展モデルは次式に基づいている：

**力学的構造**  $\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{GM\rho}{r^2}, \frac{\partial M}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho$

**熱的構造**  $\frac{\partial e_{\text{thm}}}{\partial t} = -p \frac{\partial(1/\rho)}{\partial t} + \epsilon - \epsilon_\nu - \frac{\partial L}{\partial r}, L(r, M, T, \rho, X, \dots)$

**組成構造**  $\frac{\partial X_i}{\partial t} = f(T, \rho, X, \dots)$

+ 恒星風、超新星爆発による物質放出  
→ 恒星由来の放出物質が  
どのような元素組成を持つかをモデル化している

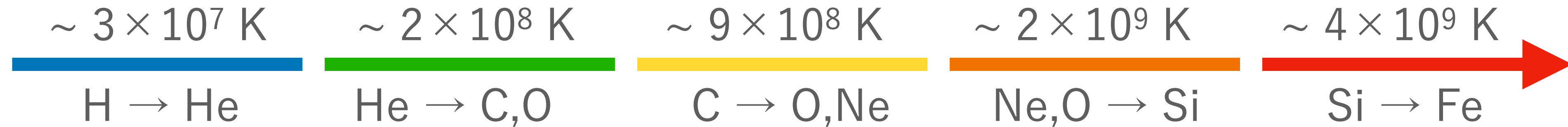


# アウトライン

- ・ 自己紹介
- ・ 銀河化学進化への恒星の役割
- ・ 恒星モデルの基礎事項
- ・ 核反応の役割と不定性
- ・ エネルギー源としての核反応
- ・ 化学進化に重要な核反応
- ・ まとめ

# 核反応の役割と不定性 1/2

## 熱源として重要



- 星の構造を決定する
- 星の主要な成分が燃料になる
- 「灰」が次のステージでの燃料になる

## 銀河化学進化に影響

- 構造には影響しないが、放出物質として重要
- 今日の例： s-process

## 核反応率は恒星モデルの大きな不定性の源

- 恒星内部の“低温”環境は実験室での再現がむずかしい

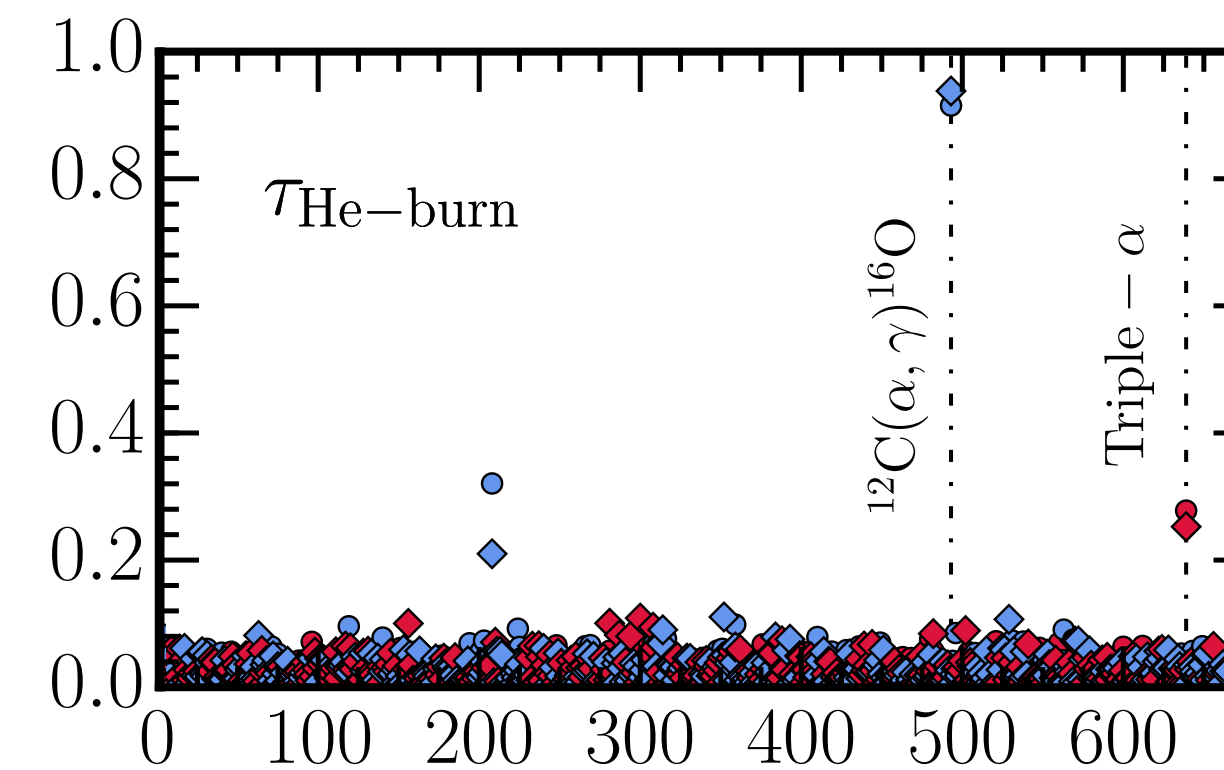
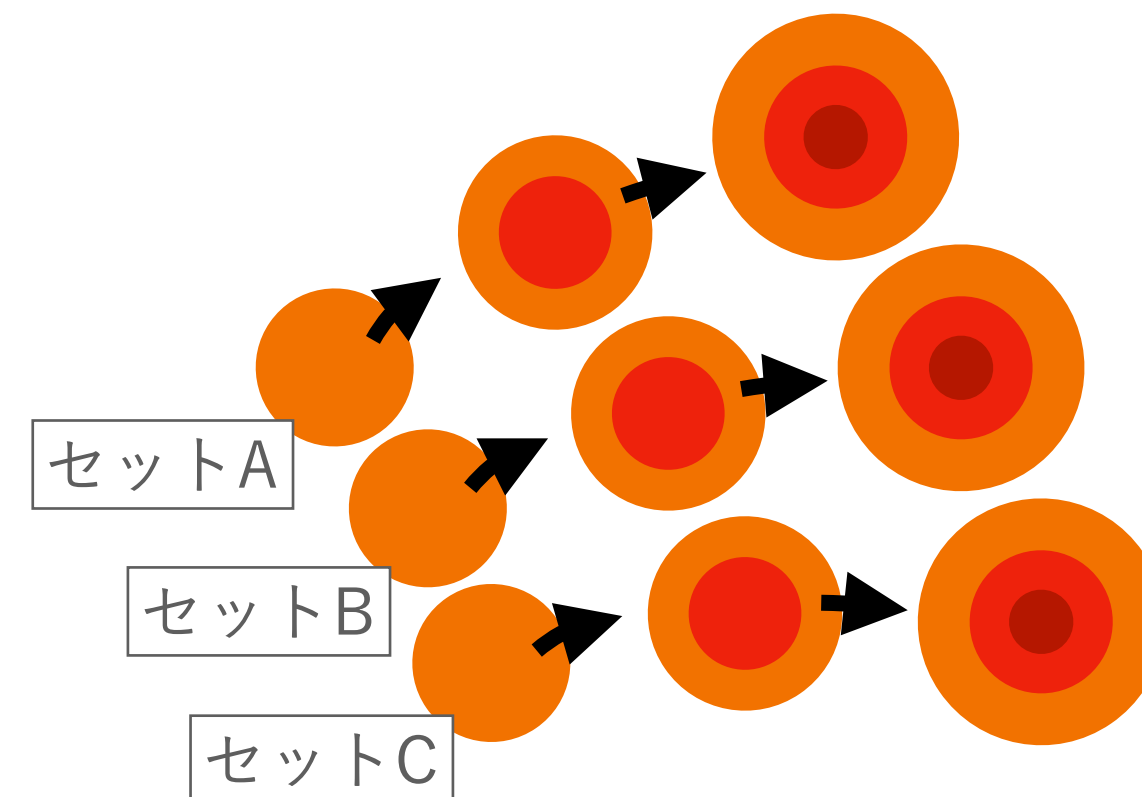
# 核反応の役割と不定性 2/2

「重要かつ不定」な反応率が恒星進化シミュレーションから探られている

Longland-Rauscher の方法 (Longland et al. 2010, Rauscher et al. 2016)

1. 不定性のずれを反映した反応率表を確率的に多数作成 (モンテカルロ法)
2. 反応率セットの分だけ組成進化シミュレーションを遂行
3. 進化計算の結果の諸量 (e.g. 年齢) と反応率との相関を測る

	セットA	セットB	...
反応1	$\lambda_{A1}$	$\lambda_{B1}$	
反応2	$\lambda_{A2}$	$\lambda_{B2}$	
...	...	...	



Rate Identifier Credit: C. E. Fields et al. 2018

大質量星の進化過程に注目 : Farmer et al. 2016, Fields et al. 2018

s-process に注目 : Nishimura et al. 2017, Cescutti et al. 2018

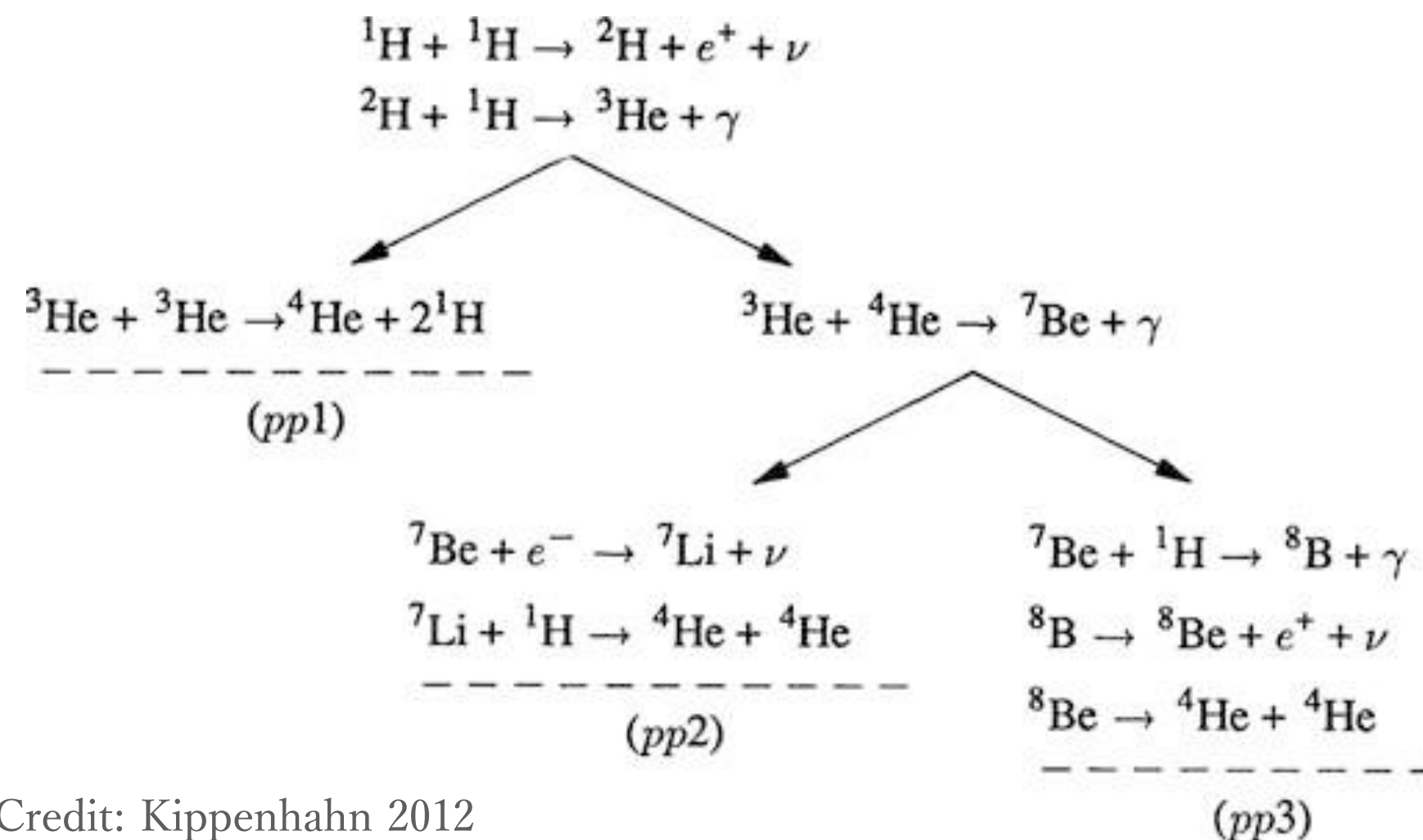
# 熱源としての核反応 1/7

## 水素燃焼

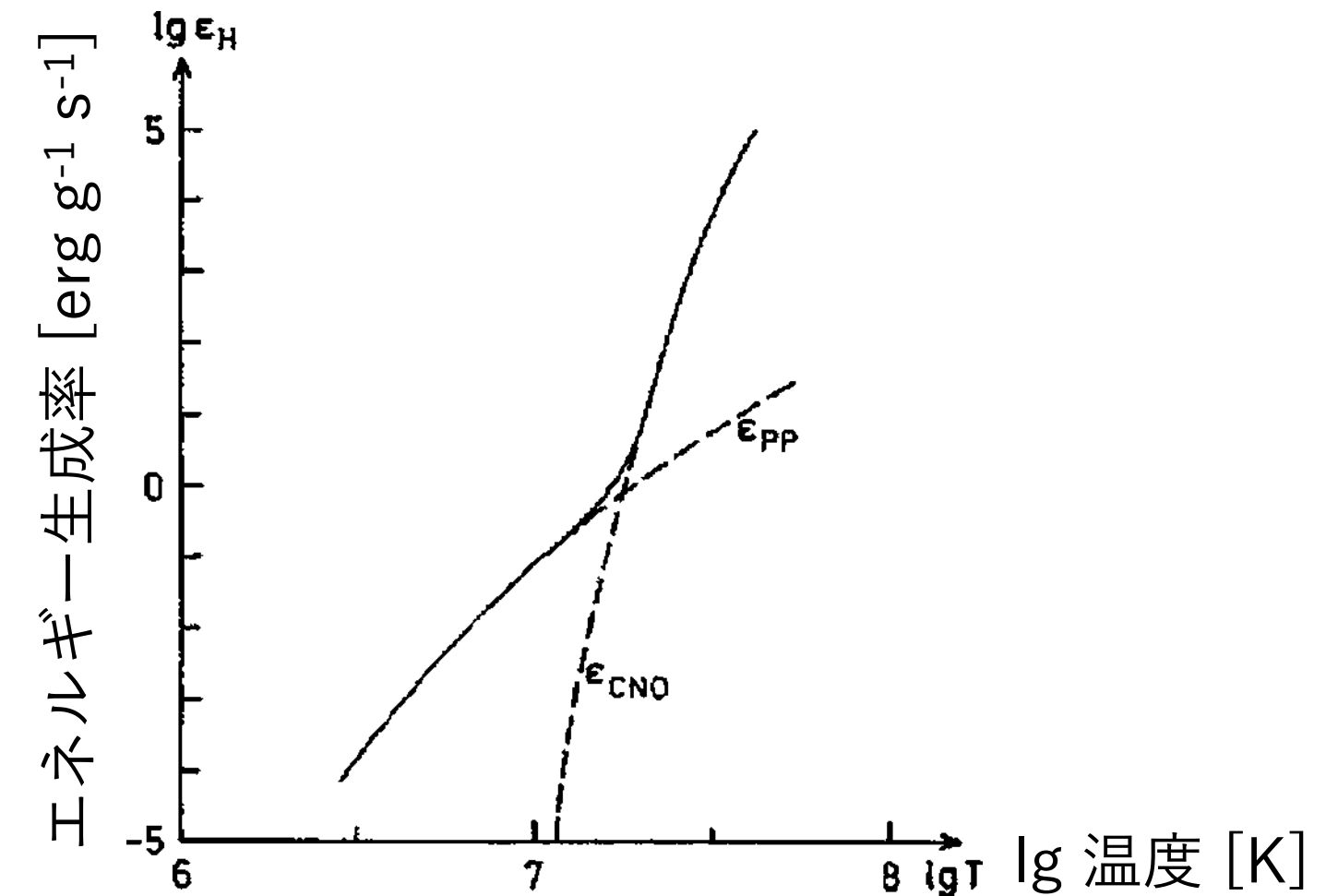
- ・ 質量・エネルギー変換が最も効率的
- ・ 長寿命
- ・ 恒星の ~90% は水素燃焼期の星

## pp-chain

- ・ 小質量の恒星の主要な経路



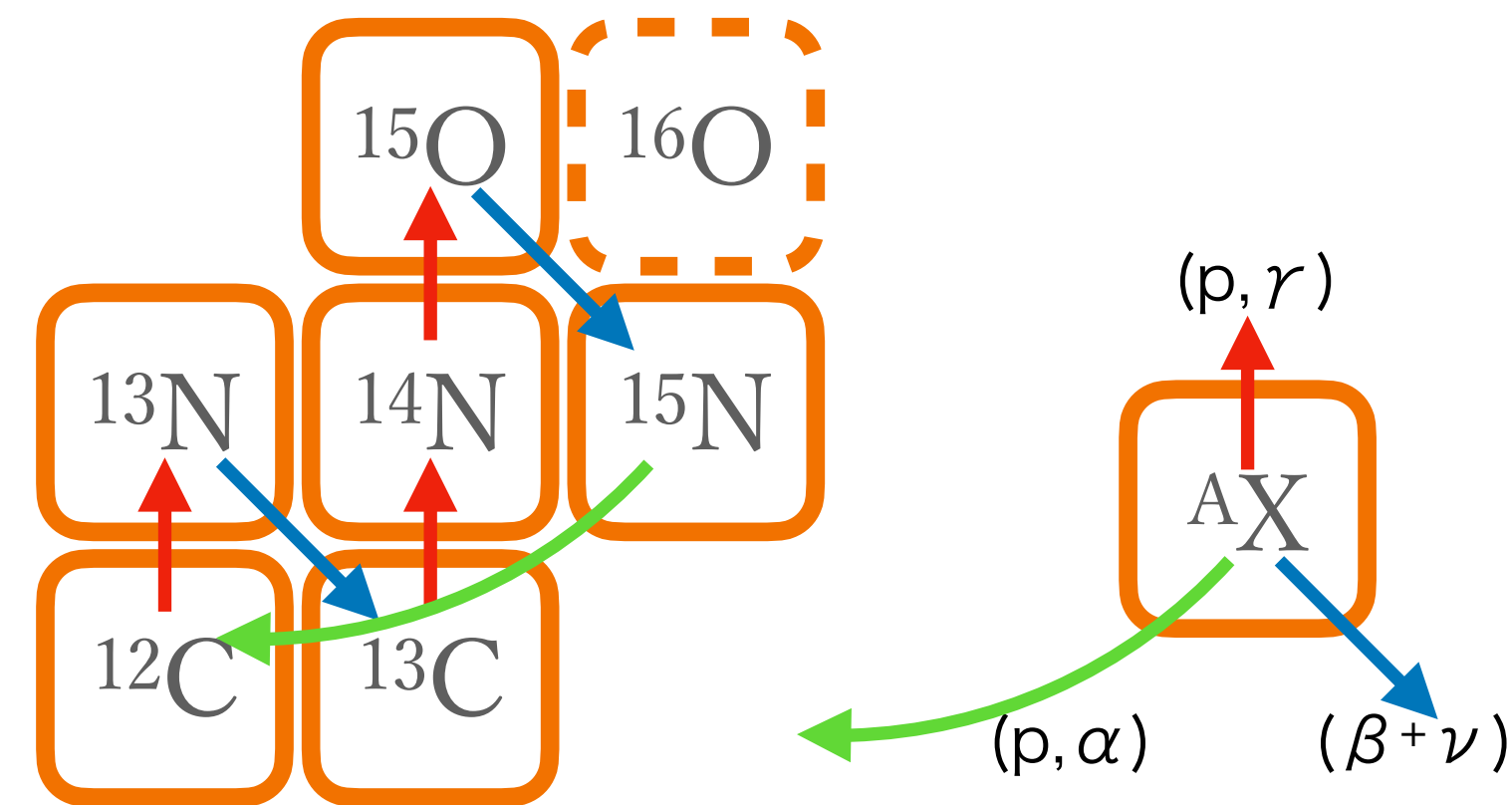
Credit: Kippenhahn 2012



Credit: Kippenhahn 2012

## CNO cycle

- ・ 中質量以上の恒星の主要な経路
- ・ 触媒として 誕生時から存在する C, N, O を用いる

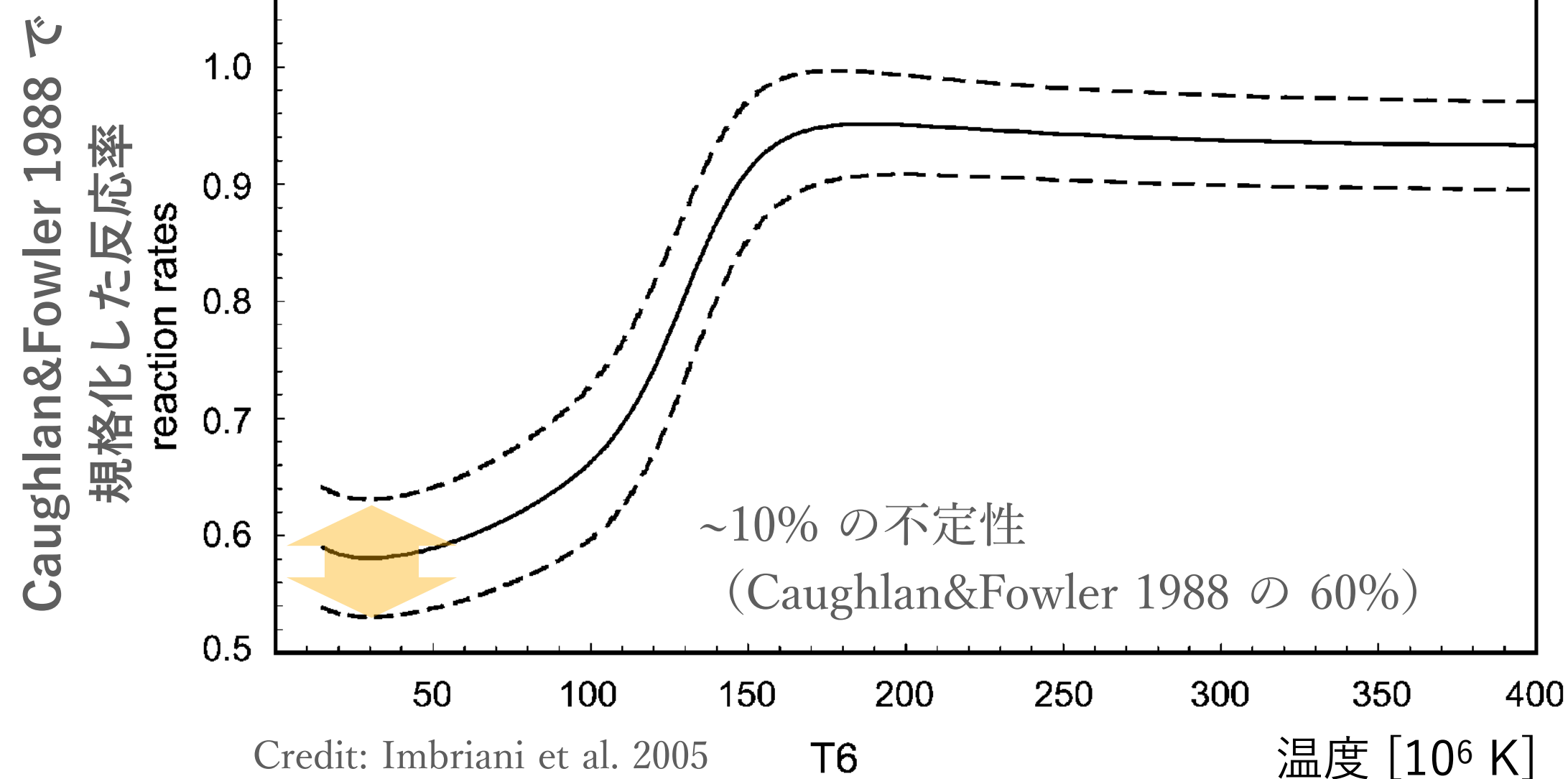


# 熱源としての核反応 2/7

不定性の大きい重要な反応 (CNO cycle)

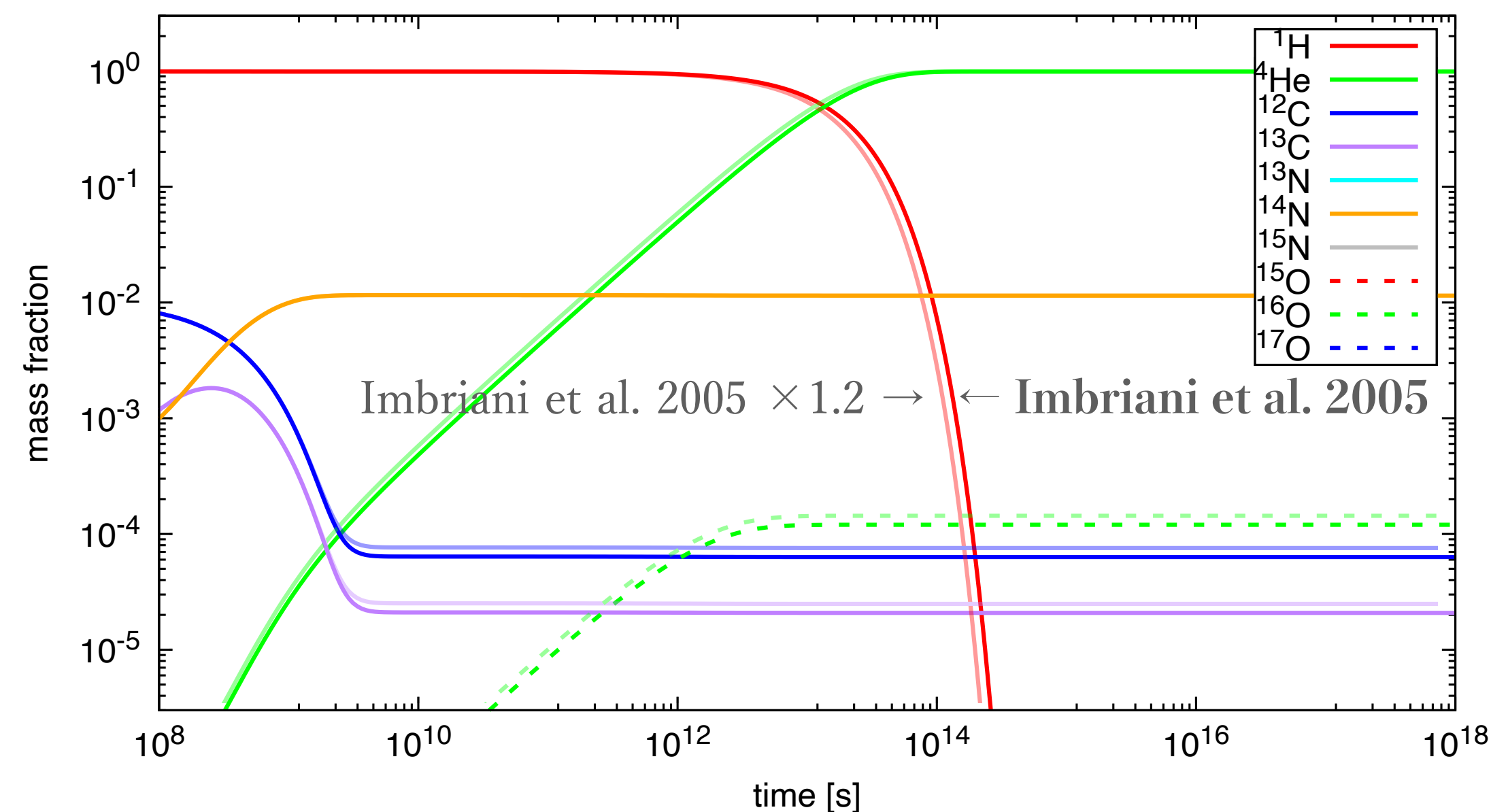
$^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  の反応率不定性が卓越

- 最も遅い律速反応
- 水素燃焼の期間を決定
- 準平衡状態のCNO量を決定



とはいえ...

$T=3 \times 10^7 \text{ K}$ ,  $\rho=1 \times 10^2 \text{ g cm}^{-3}$



- 詳しい進化計算の結果も ~1% の幅におさまる (Fields et al. 2018)

→ CNO cycle に関わる反応率は比較的 精度良く求まっている

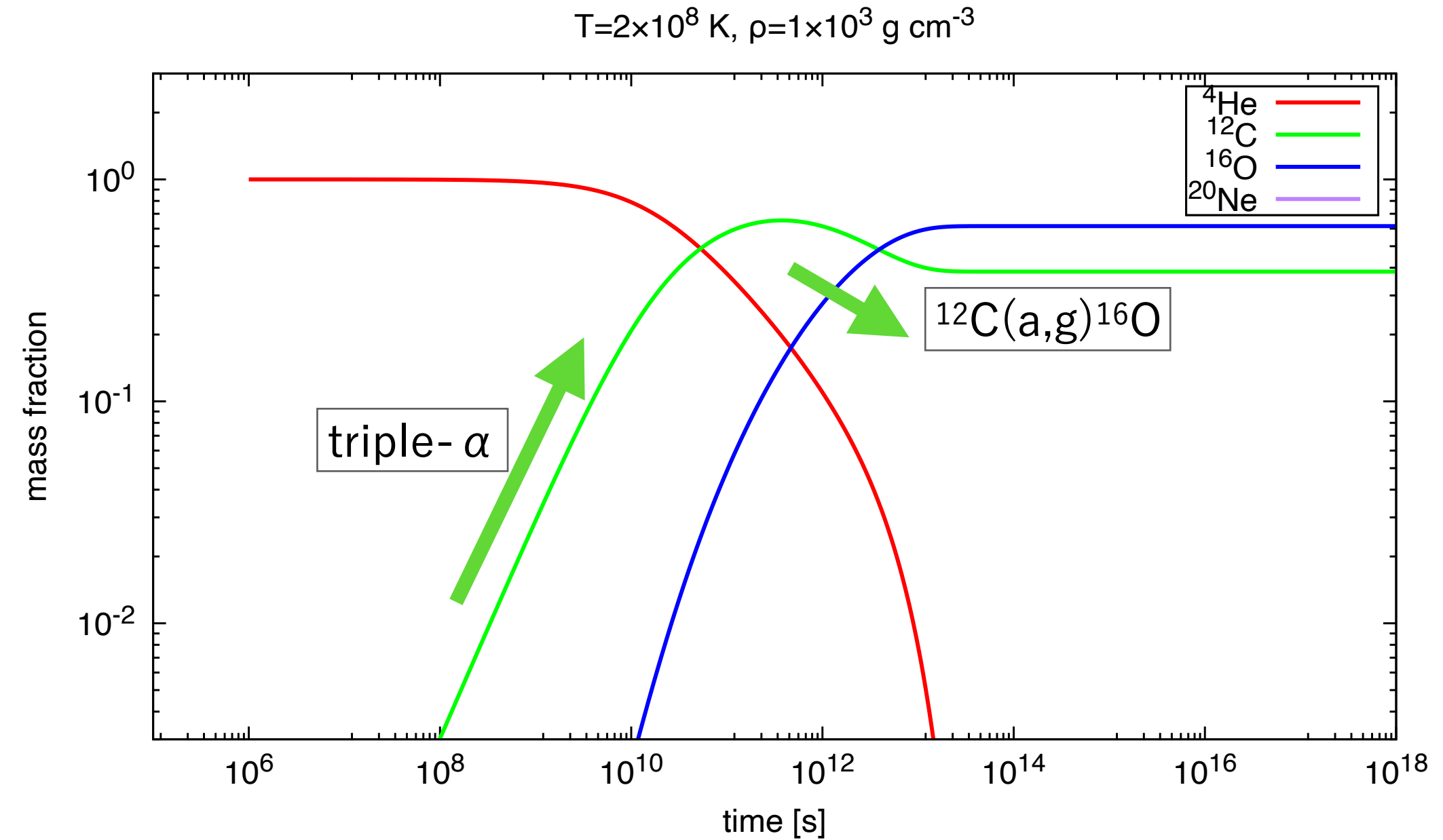
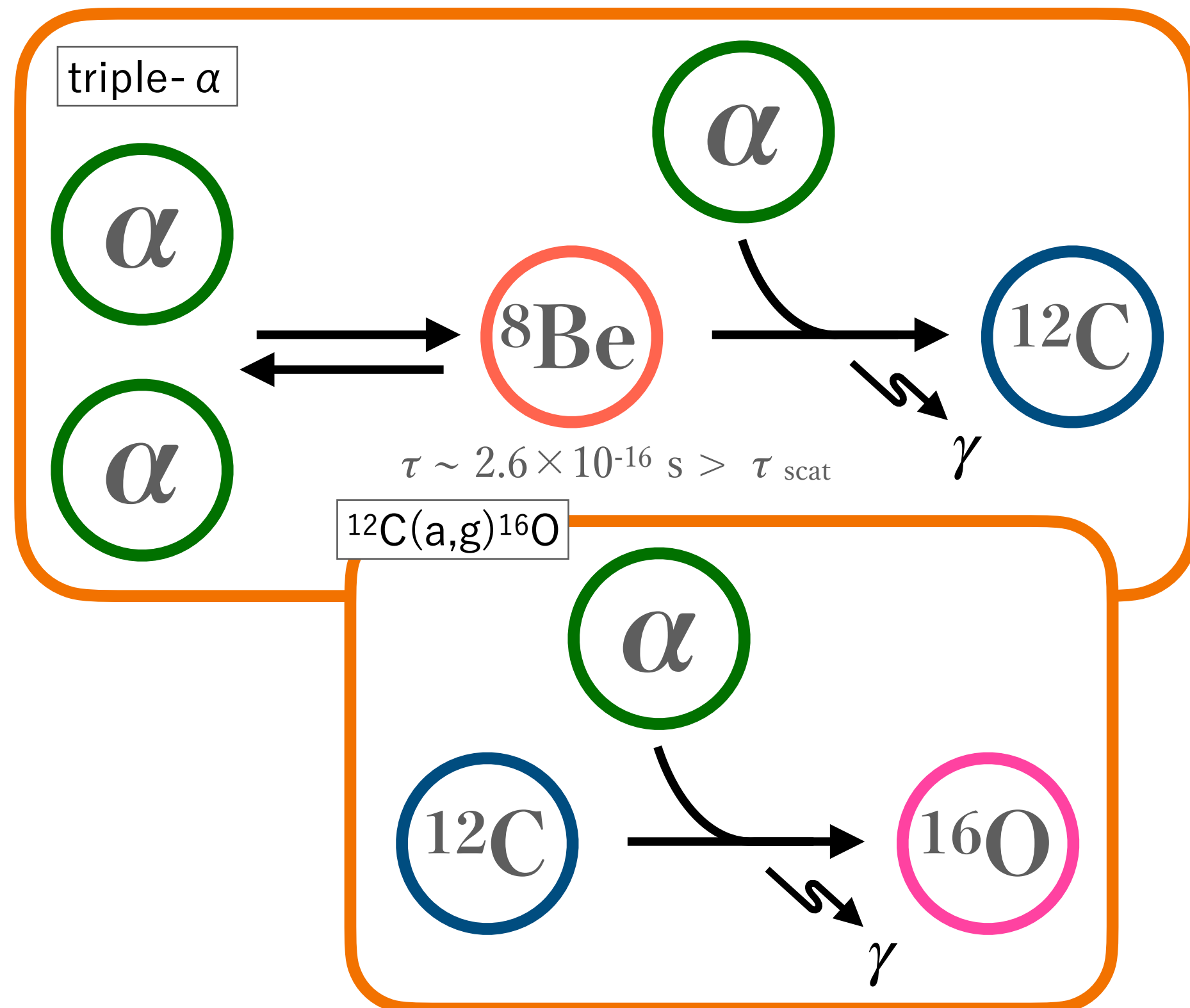


# 熱源としての核反応 3/7

## ヘリウム燃焼

- それなりの変換効率・寿命
- 恒星の ~10% はヘリウム燃焼期の星

triple- $\alpha$  と  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$



- 初期は triple- $\alpha$
- 後期は  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$

**CとOの比**はその後のコア構造に大きく影響する

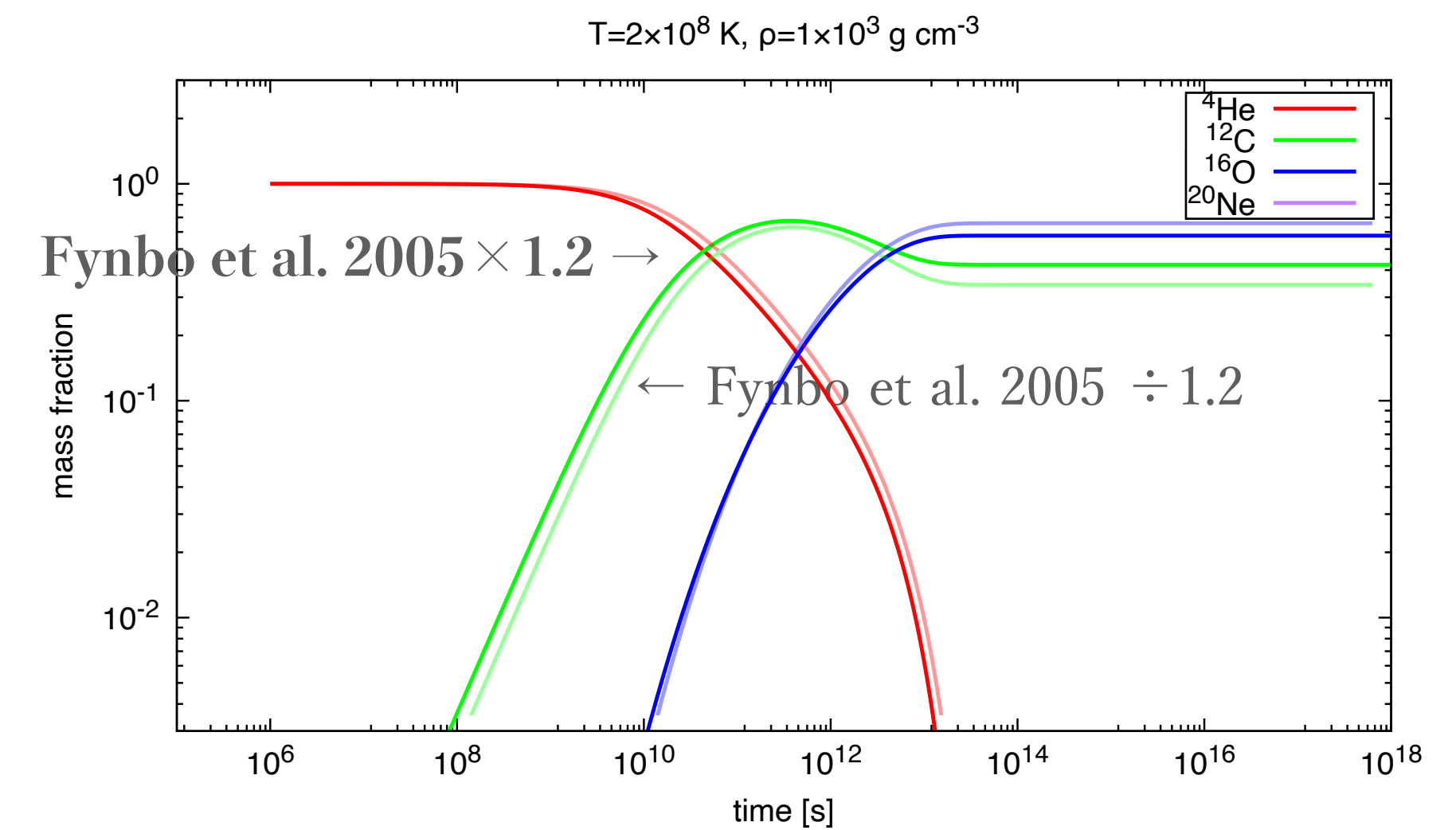
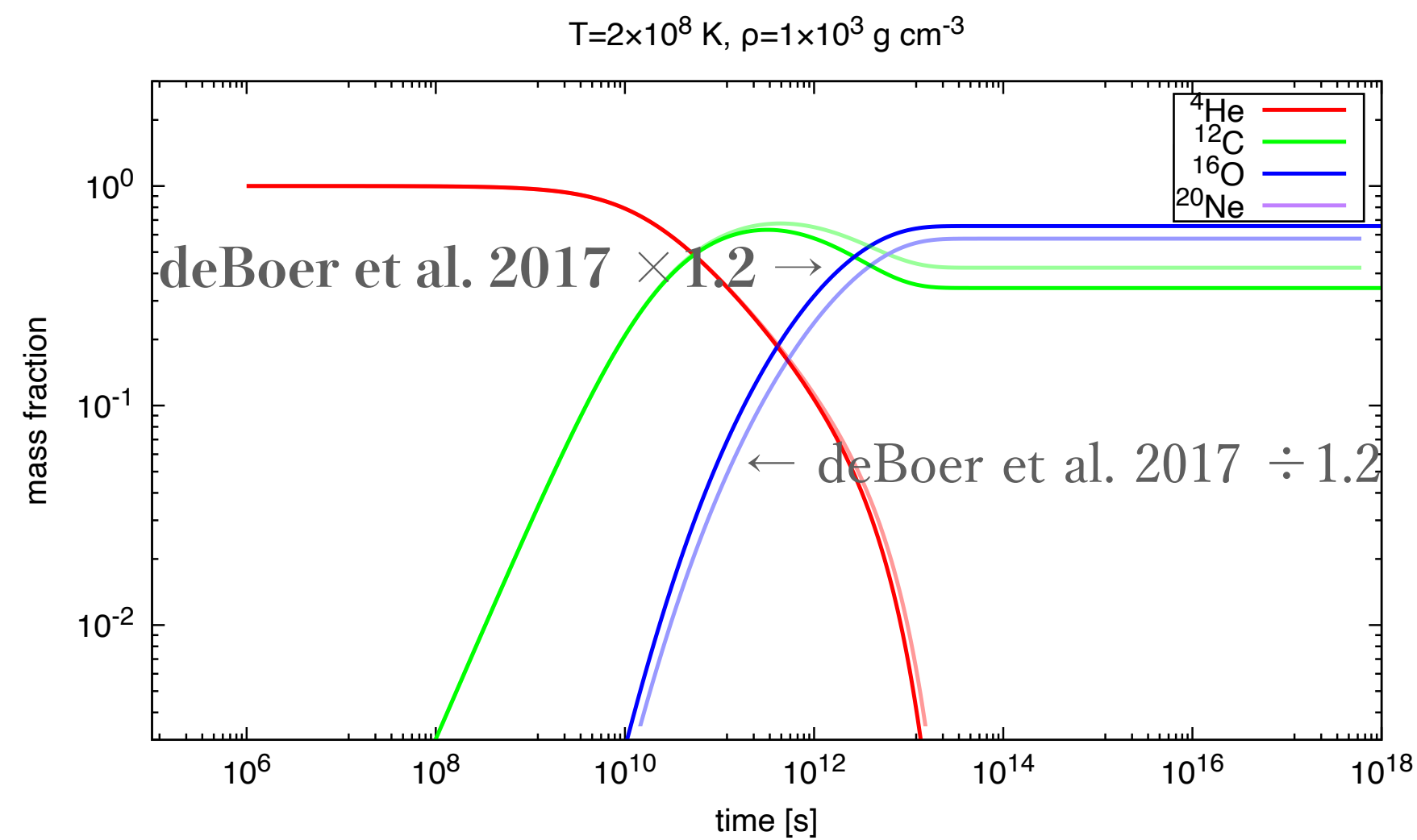
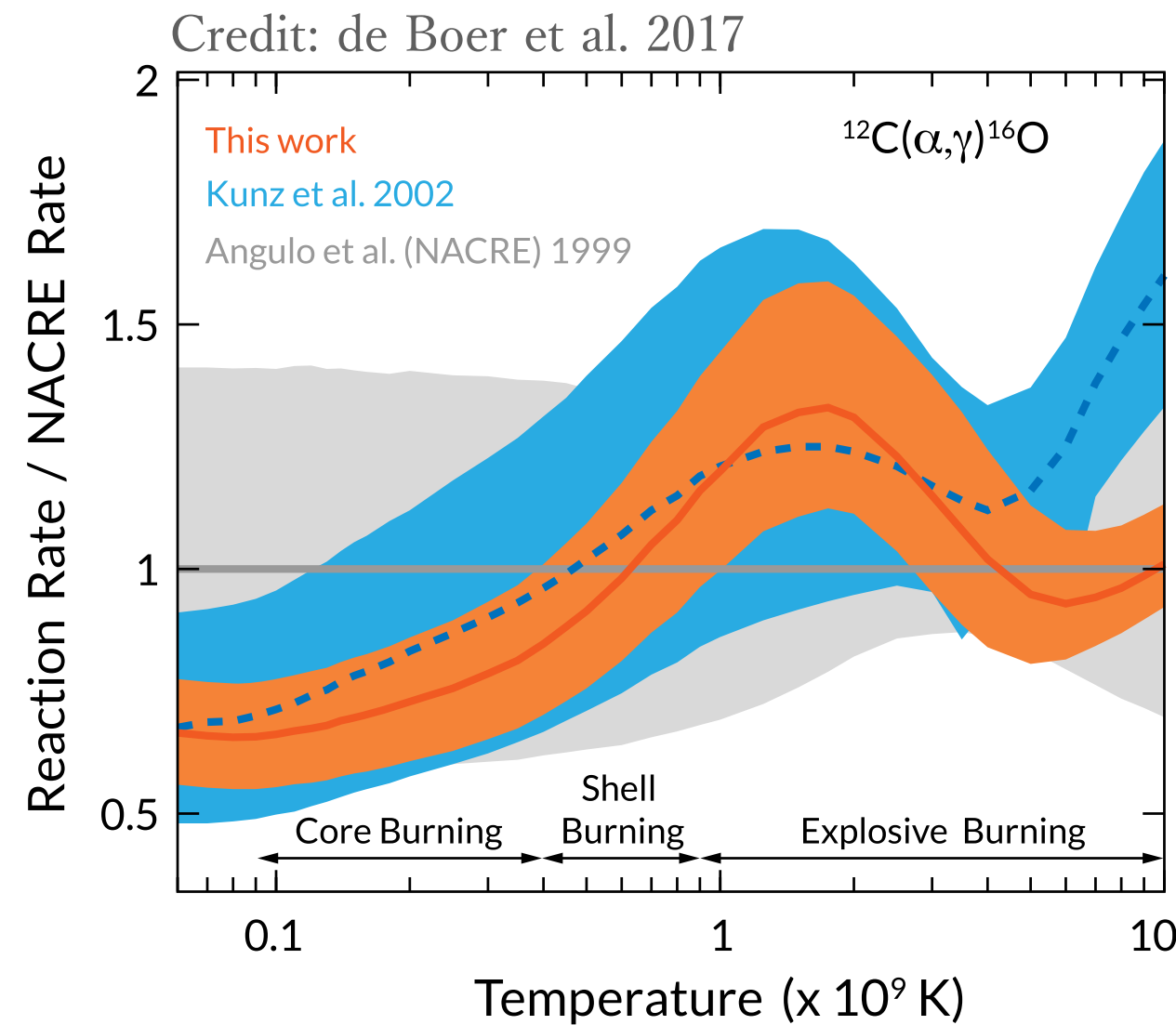
- 超新星爆発の質量域 (Sukhbold et al. 2020)
  - ペア不安定型超新星の質量域 (Takahashi 2018)
- など非常に広範な影響

# 熱源としての核反応 4/7

不定性の大きい重要な反応

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  は恒星物理で最重要の不定な核反応率 (たぶん)

triple- $\alpha$  も同じくらい重要



→ 炭素量は 反応率の変化だけでも  $\sim 10\%$

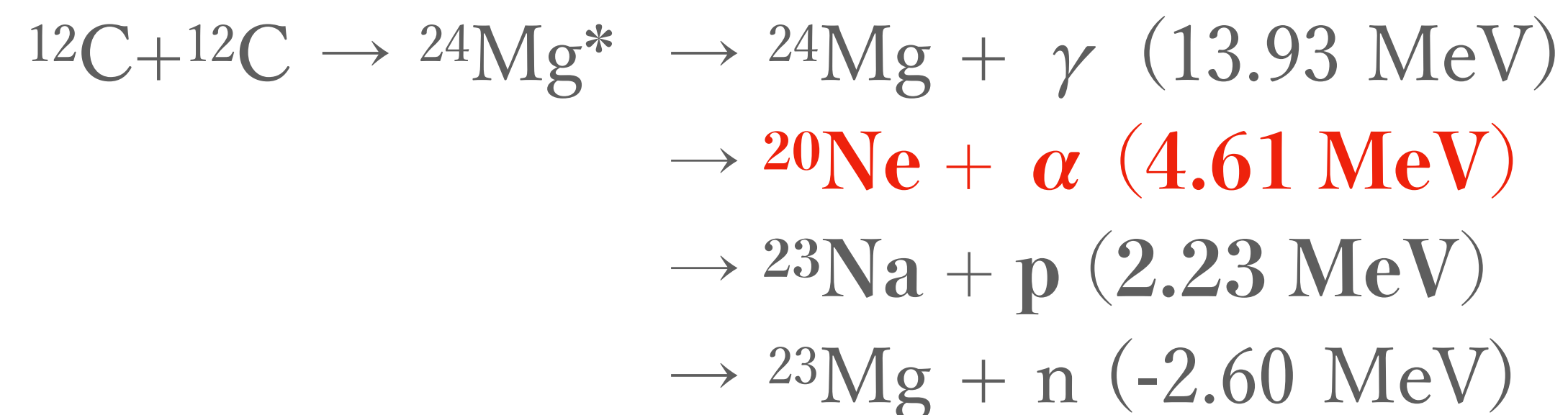
構造変化を介した **間接的影響** も含むと  $> 50\%$  も変わる (Fields et al. 2018)

# 熱源としての核反応 5/7

## 炭素燃焼

- ・ 高温のためニュートリノ冷却と共存
- ・ 炭素燃焼期の対流進化は星の構造決定に非常に重要

## Branching

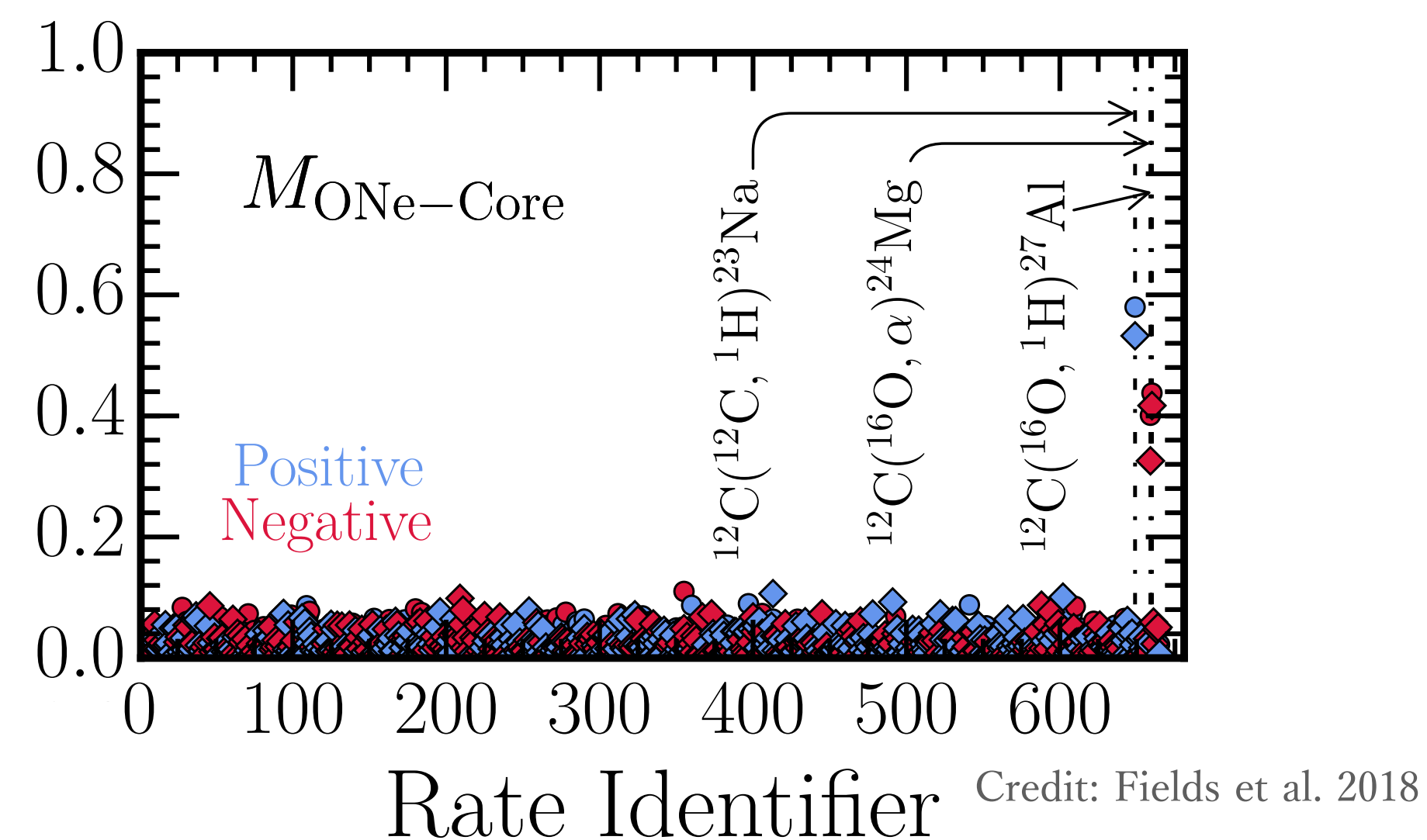
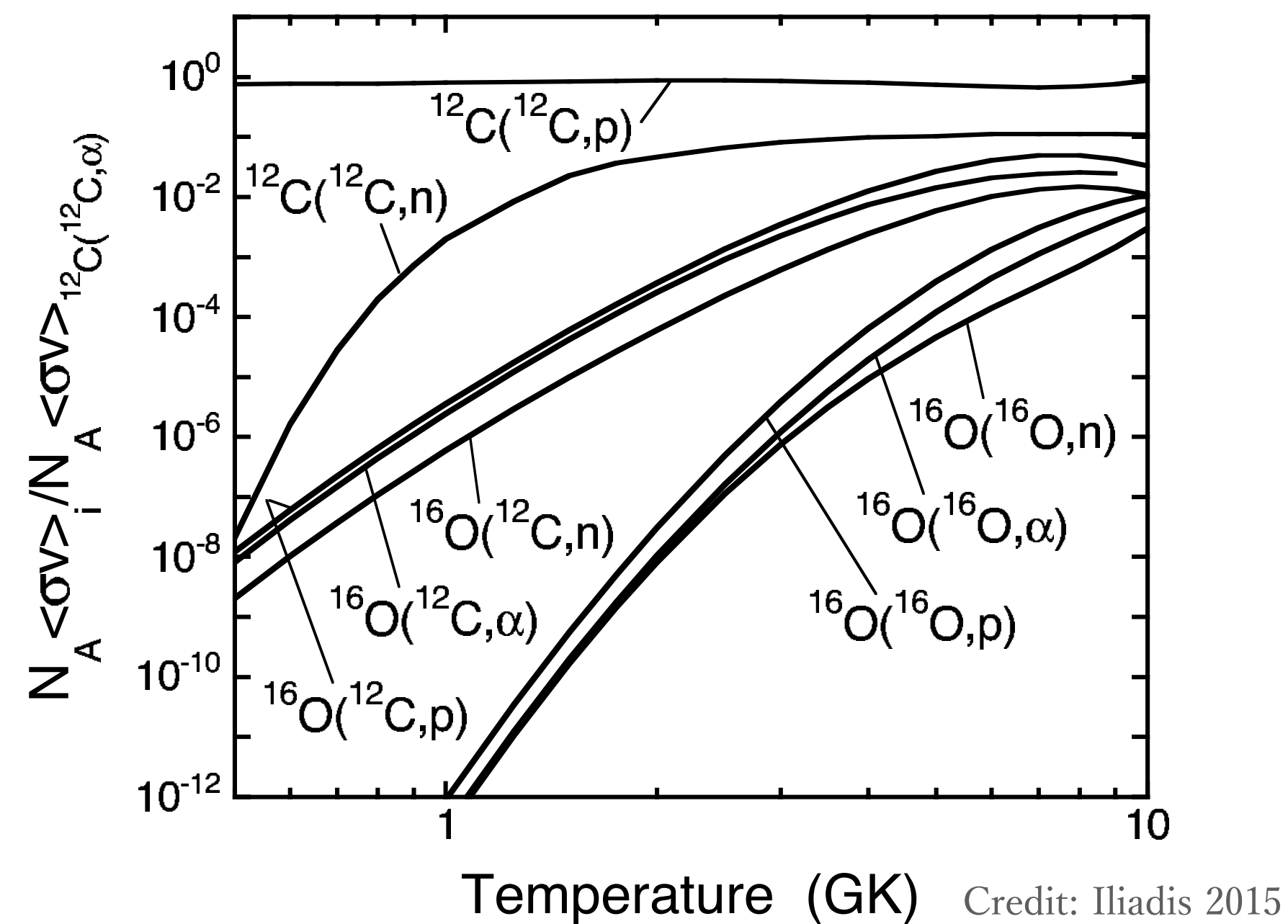


不定性の大きい重要な反応 (Fields et al. 2018)



…ONeコア質量、中心温度等に影響

※影響するメカニズムの詳細は不明

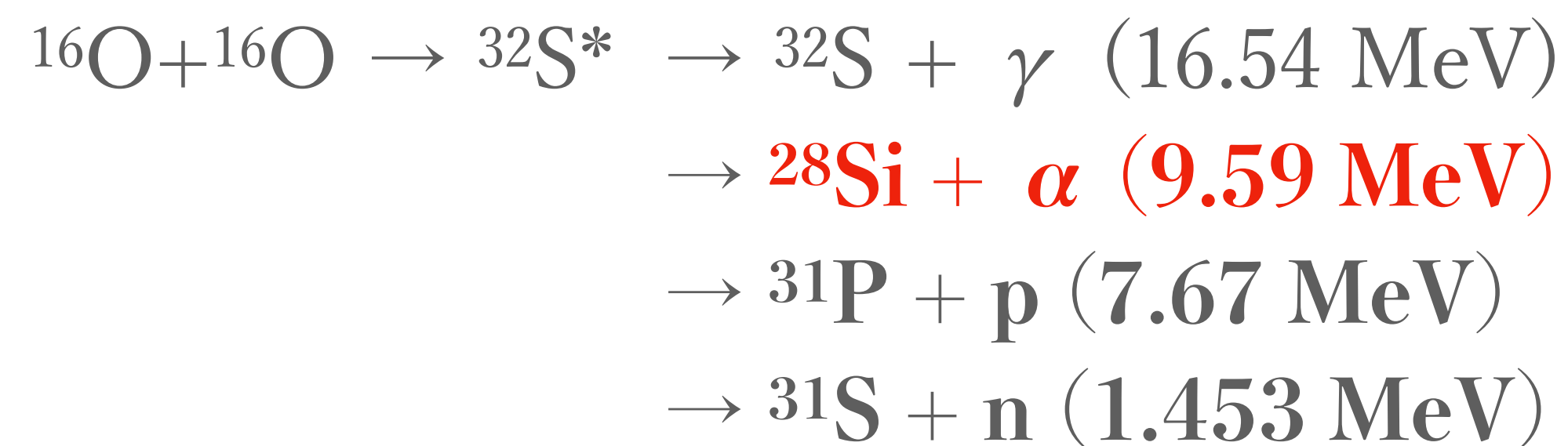


# 熱源としての核反応 6/7

## 酸素燃焼

- 短命 (<~1 yr)
- 質量当たりの発熱量が大きい

## Branching

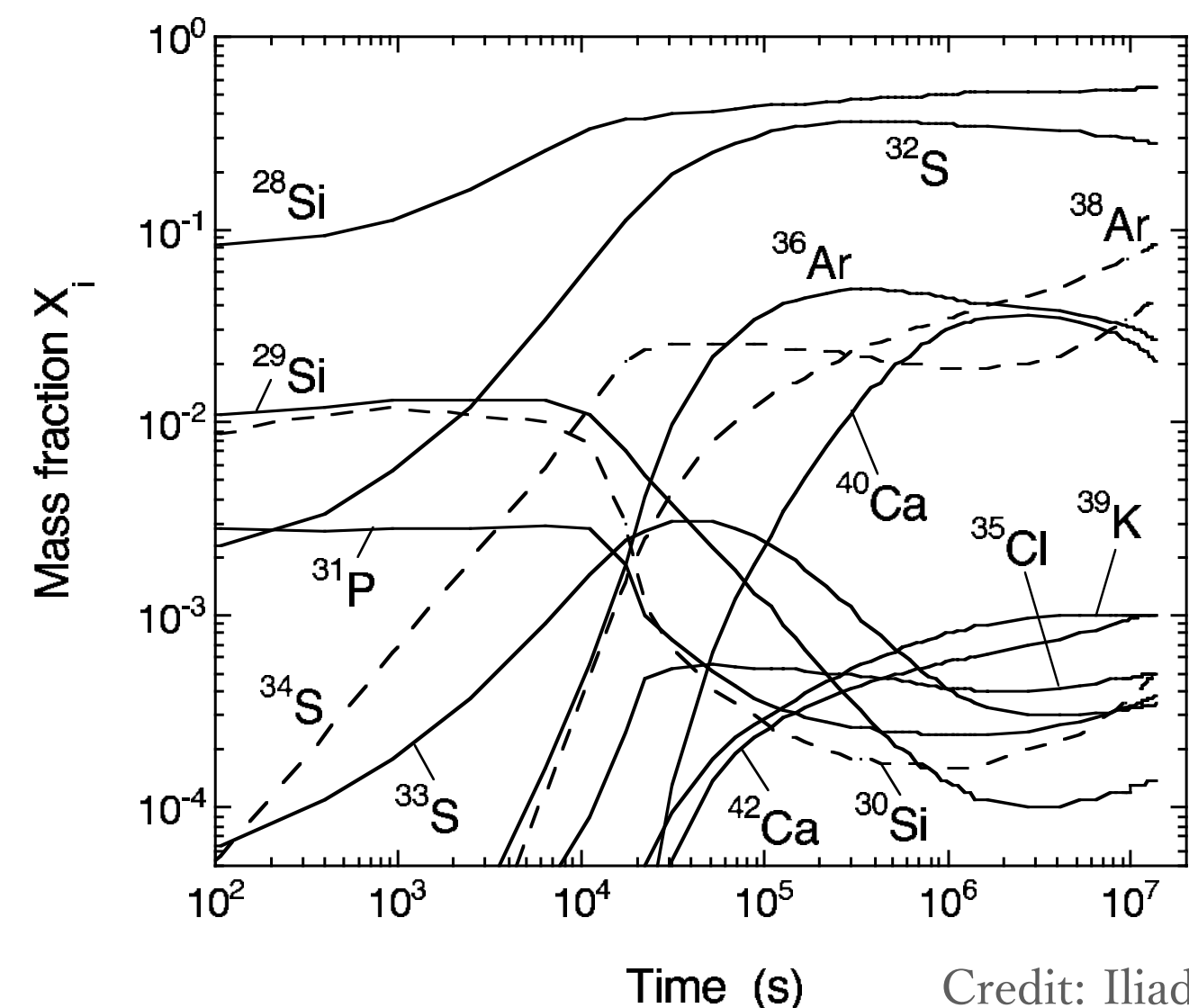


## 不定性の大きい重要な反応 (Fields et al. 2018)



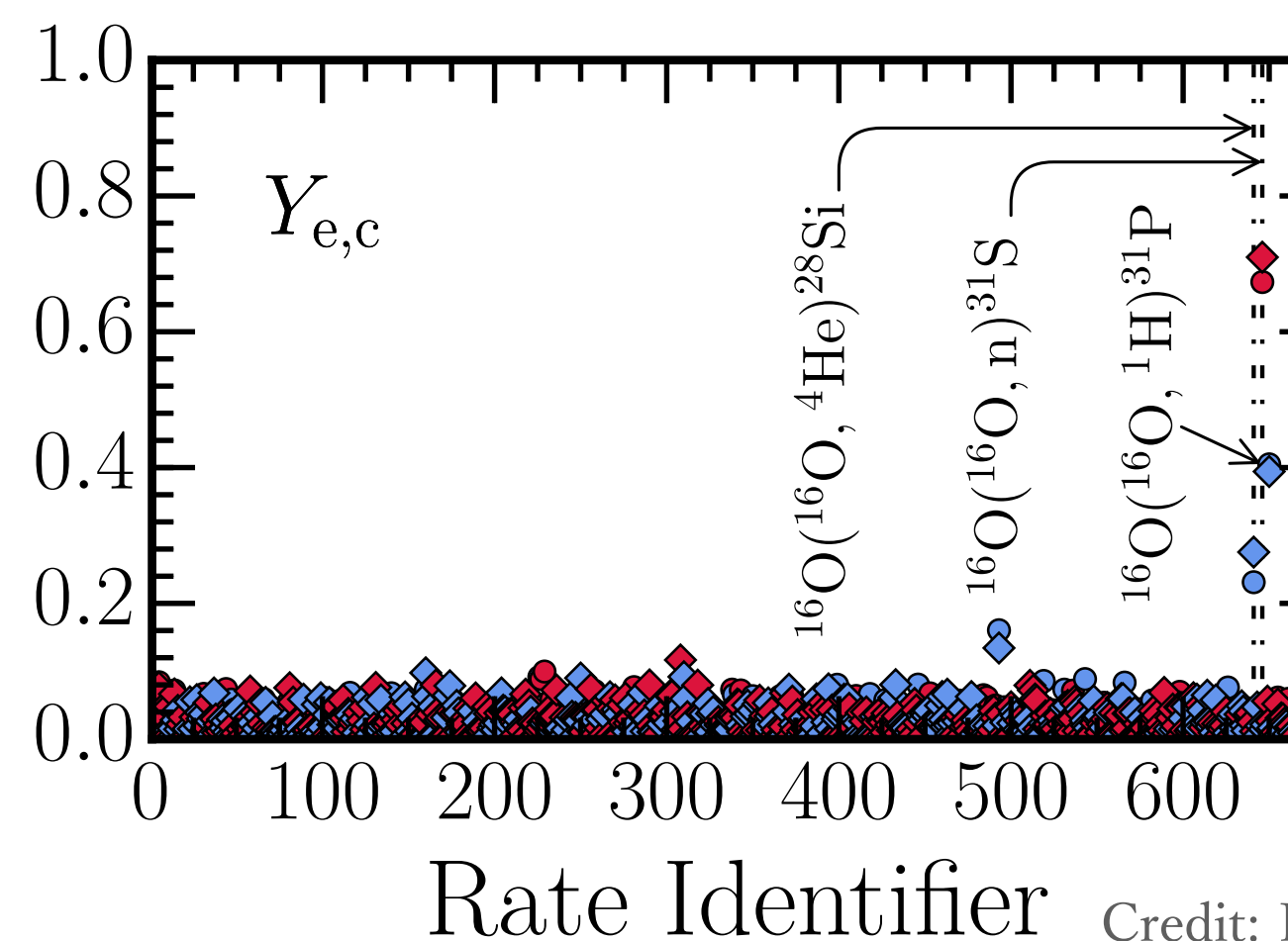
…Siコア質量、中心 $Y_e$  など諸量に影響

※影響するメカニズムの詳細は不明



Credit: Iliadis 2015

- 関わる反応、核種が多すぎる
- 構造変化、対流混合との切り分けが困難



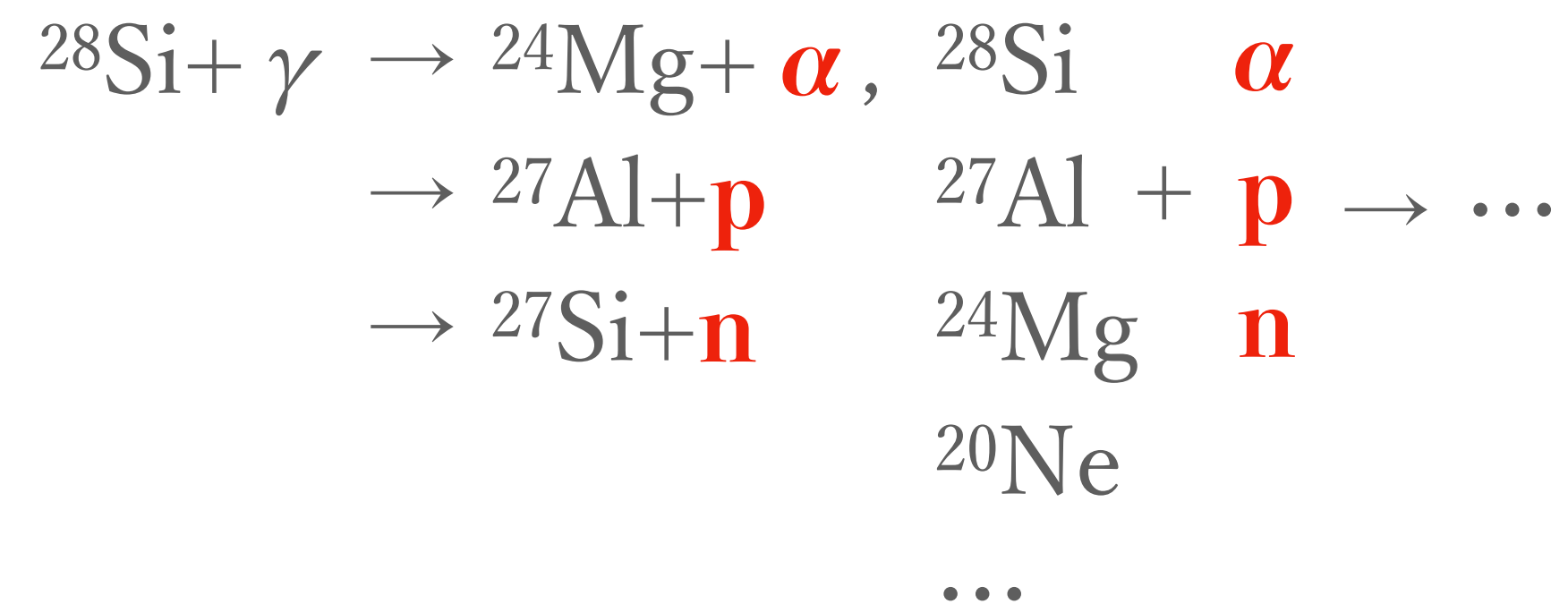
Credit: Fields et al. 2018

# 熱源としての核反応 7/7

## ネオン燃焼・シリコン燃焼

- ・ 光分解がトリガー (**吸熱**)
- ・ 放出された粒子が捕獲されると、正味で**発熱**
- ・ 反応率不定性は炭素燃焼と比べ大きくない (Fields et al. 2018)

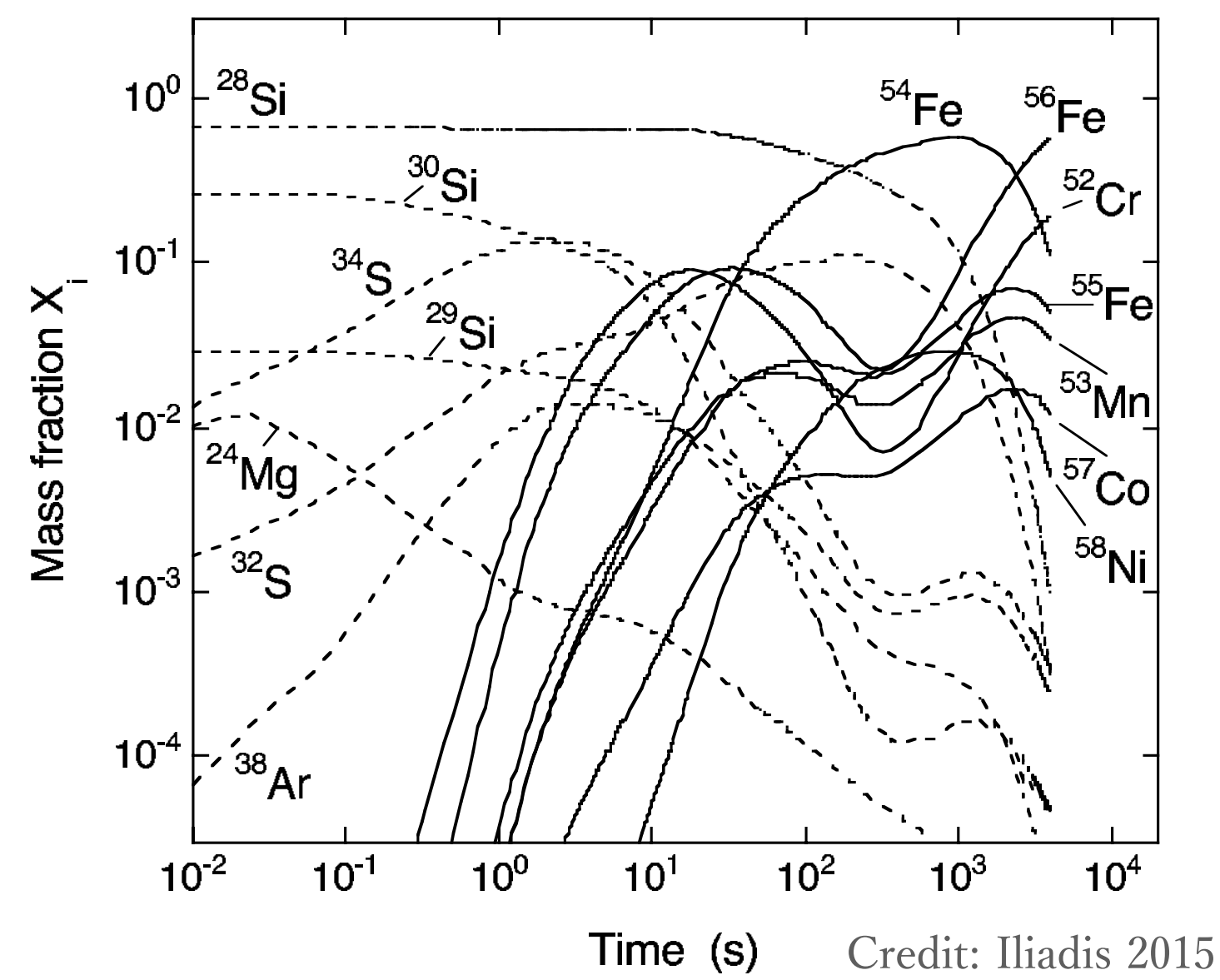
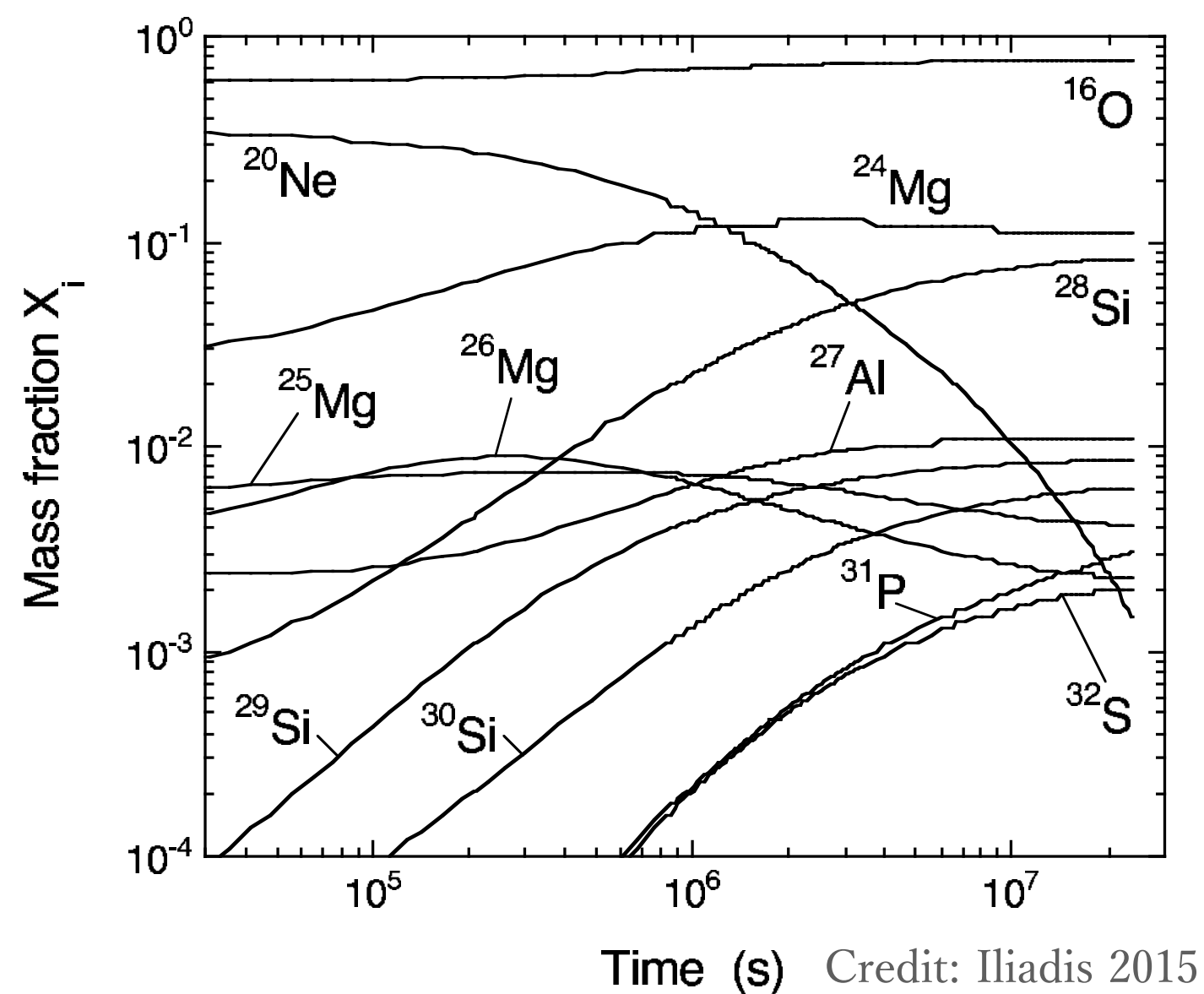
## Si burning



## Ne burning



↑ 高温なので準統計平衡のクラスターを形成  
 個別の反応率にはあまりよらない (Ekström 2021)

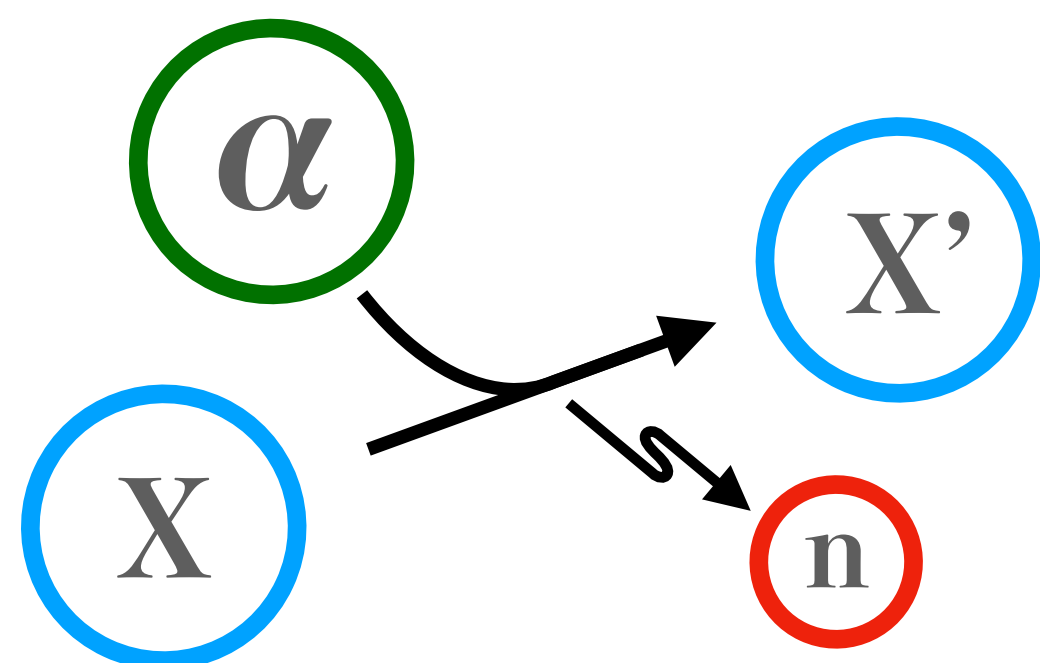


# 化学進化に重要な核反応 1/3

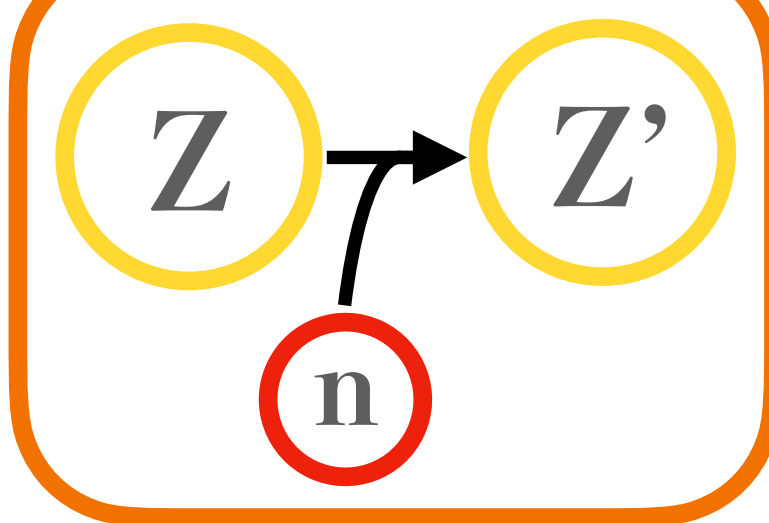
## slow n-capture process (s-process)

- 星の構造には影響しない
- 鉄より重い元素 ( $A > \sim 60$ ) の合成プロセスとして重要
- $\beta$ -decay より遅い中性子捕獲反応の連続

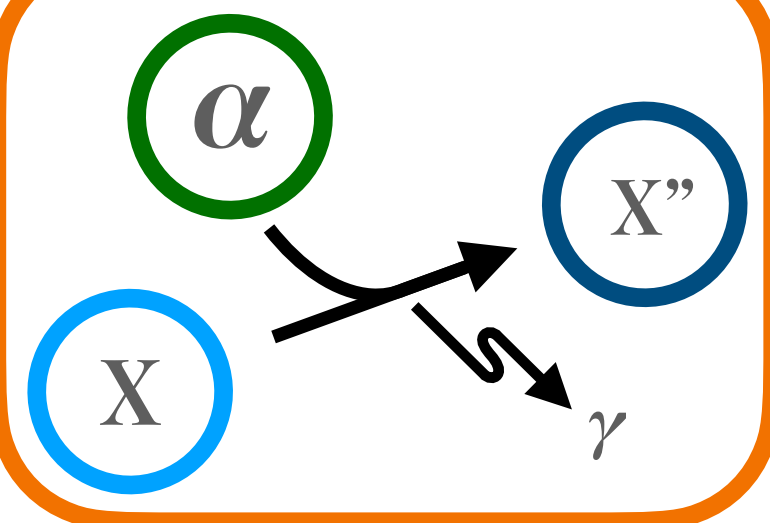
neutron source



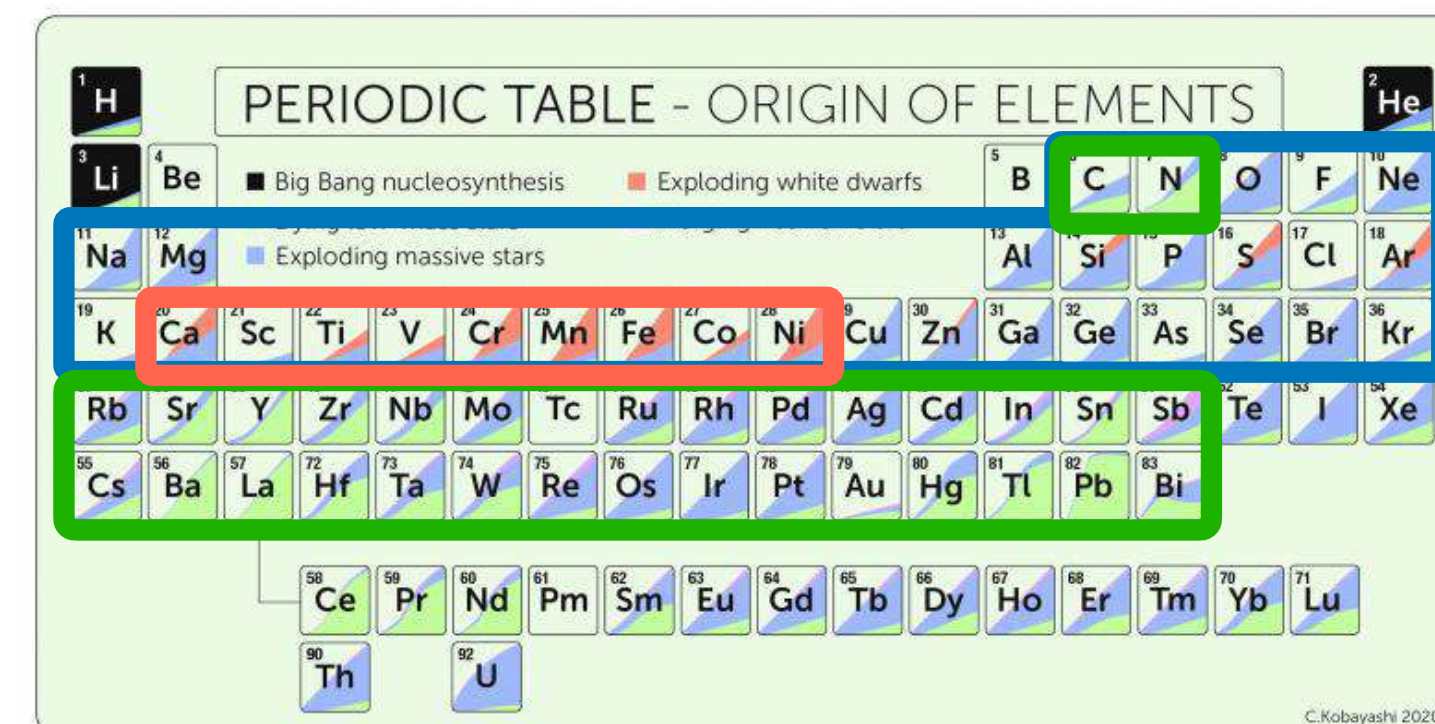
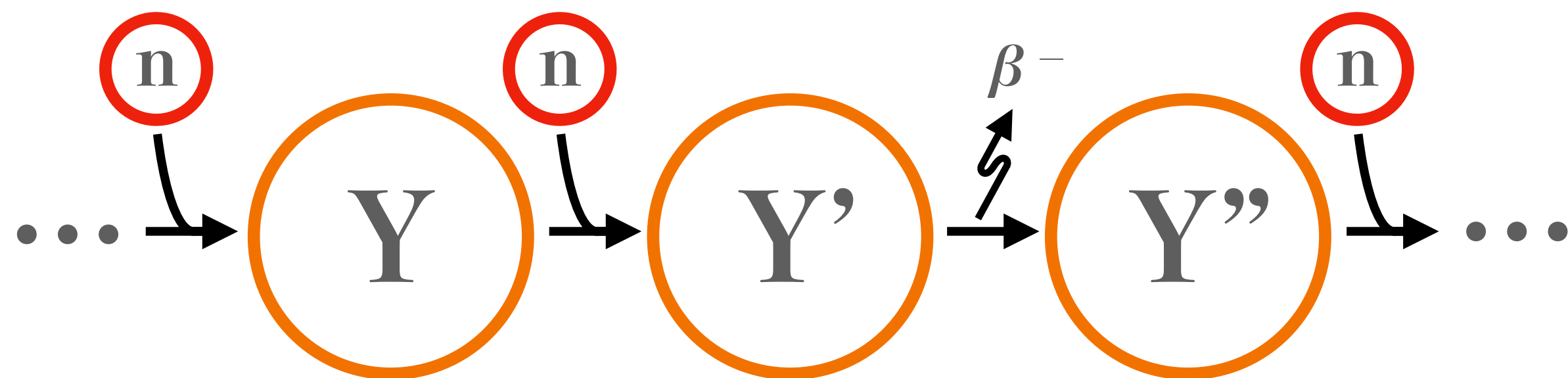
neutron poison



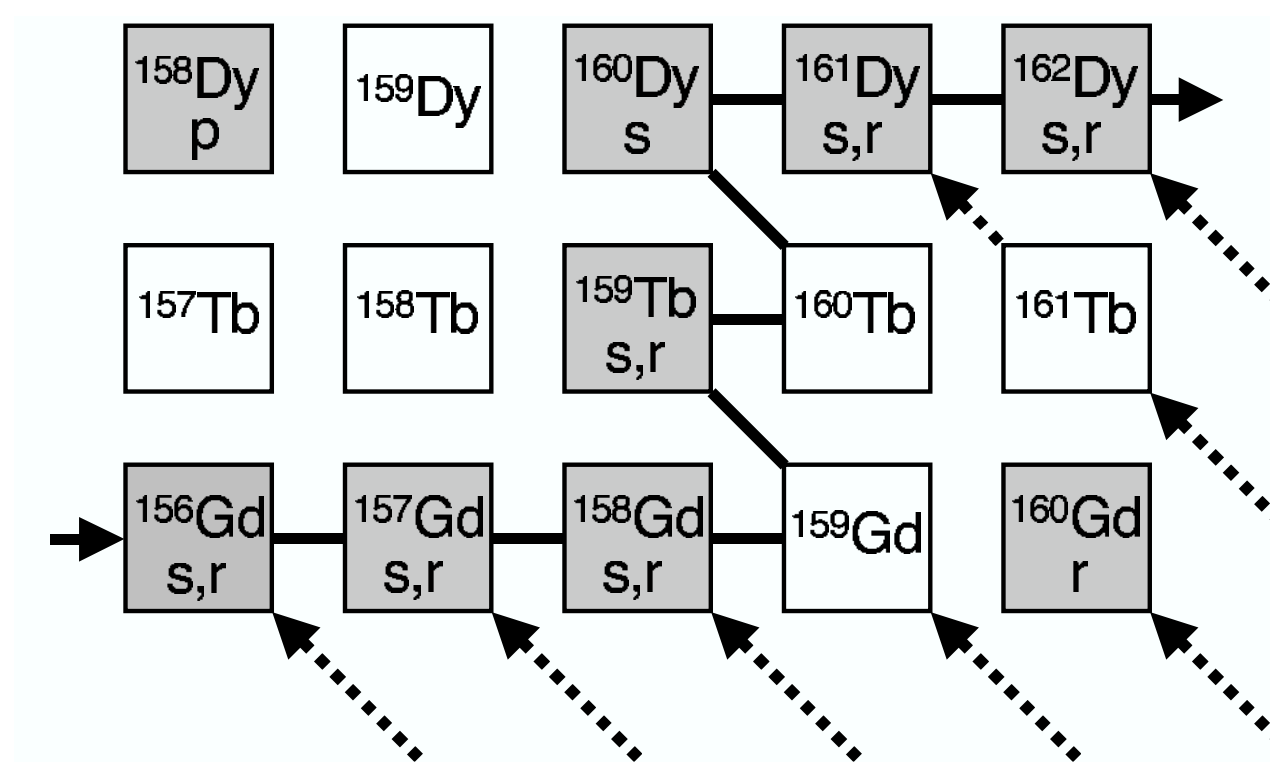
source hindrance



sequence of n-capture & beta-decay



Credit: C. Kobayashi 2020. Kavli IPMU



→ s-process path

⋯→ r-process induced

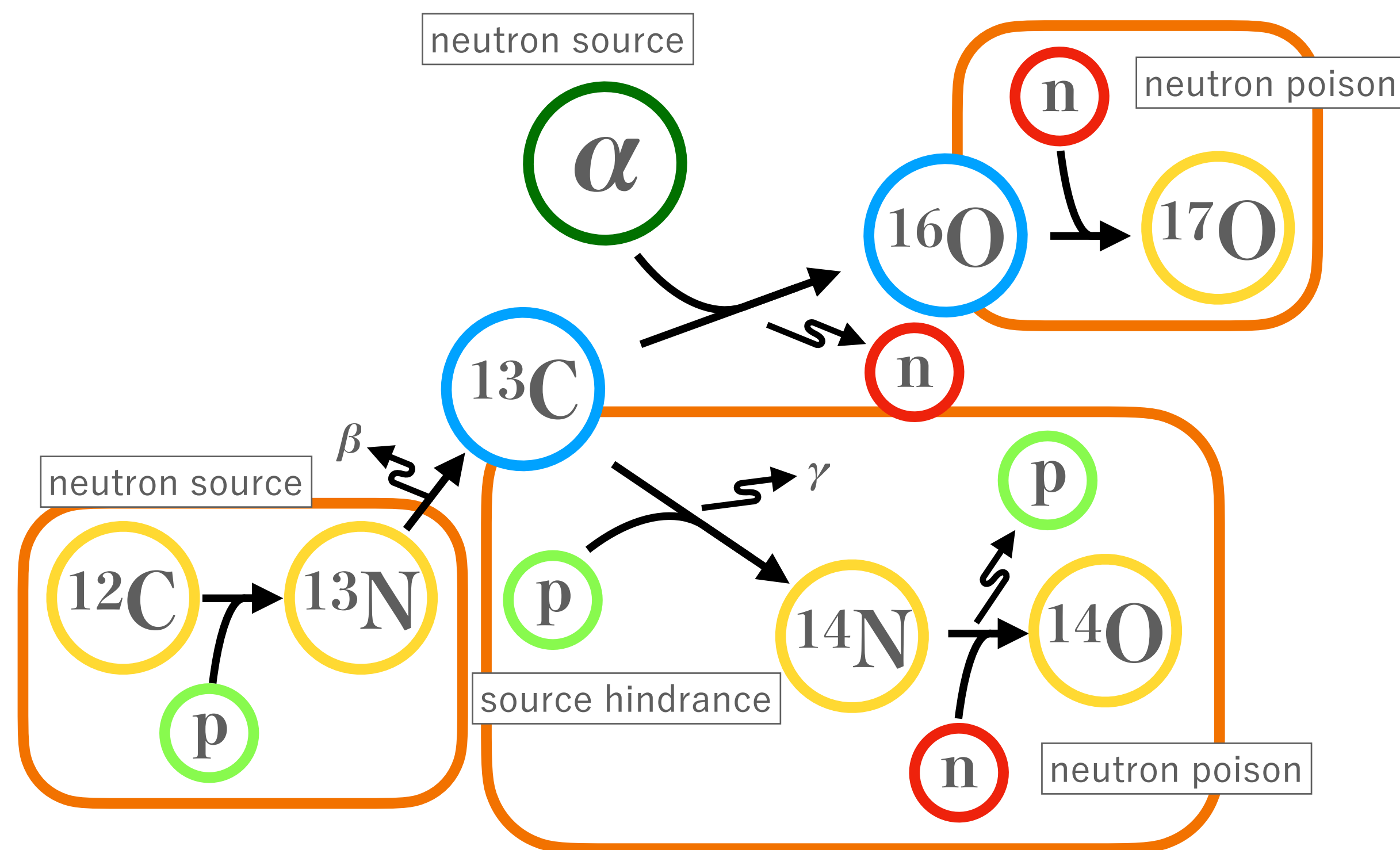
Credit: Iliadis 2015

# 化学進化に重要な核反応 2/3

## main s-process

- $^{209}\text{Bi}$  までの元素を合成
- 中質量星 (AGB星) のコア表面で生じる
- 中性子源:  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$

## 不定性の大きい重要な反応



## • Koloczek et al. 2016 の重要な反応のリスト

Reaction	Type of effect	Affected isotopes
$^{56}\text{Fe}(n, \gamma)$	Competing capture	196
$^{64}\text{Ni}(n, \gamma)$	Competing capture	183
$^{14}\text{N}(n, p)$	Neutron poison	175
$^{12}\text{C}(p, \gamma)$	Neutron donator	158
$^{13}\text{C}(p, \gamma)$	Neutron poison	150
$^{16}\text{O}(n, \gamma)$	Neutron poison	145
$^{22}\text{Ne}(n, \gamma)$	Neutron poison	144
$^{88}\text{Sr}(n, \gamma)$	Competing capture	131
$^{13}\text{C}(\alpha, n)$	Neutron donator	114
$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)$	Competing capture	112
$^{14}\text{C}(\alpha, \gamma)$	Neutron poison	102
$^{14}\text{C}(\beta^-)$	Neutron poison	95
$^{138}\text{Ba}(n, \gamma)$	Competing capture	95
$^{140}\text{Ce}(n, \gamma)$	Competing capture	93
$^{139}\text{La}(n, \gamma)$	Competing capture	92
$^{142}\text{Nd}(n, \gamma)$	Competing capture	87

Credit: Koloczek et al. 2016

ほかに sequence 中の重要な反応率:

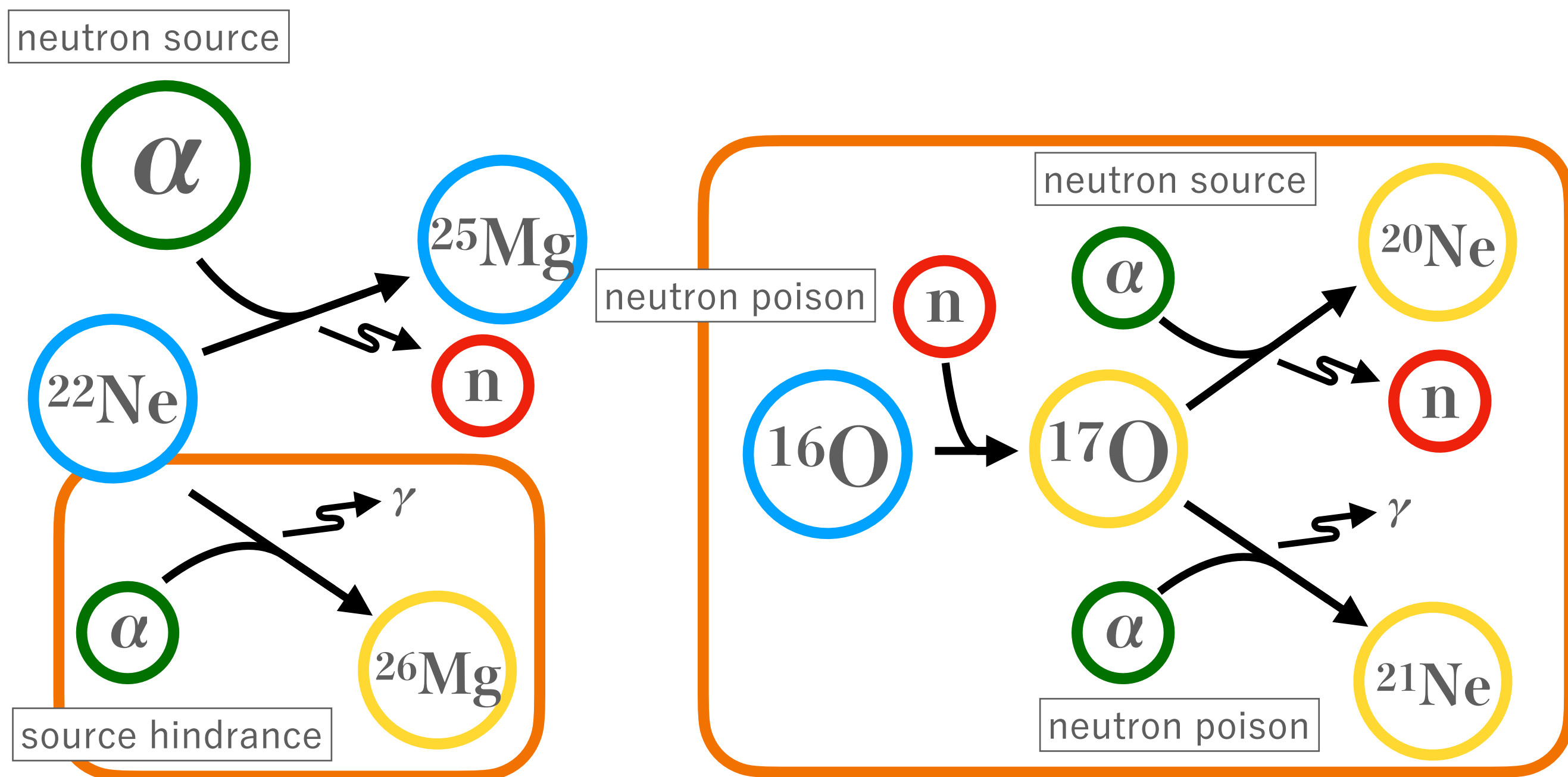
$^{56}\text{Fe}(n, \gamma)$ ,  $^{64}\text{Ni}(n, \gamma)$ ,  $^{138}\text{Ba}(n, \gamma)$ , etc.

# 化学進化に重要な核反応 3/3

## weak s-process

- A~90 ( $^{90}\text{Th}$ ) までの元素を合成
- 大質量星のCOコア内で生じる
- 中性子源： $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$

## 不定性の大きい重要な反応



• Nishimura et al. 2017 の重要な反応のリスト

Nuclide	$r_{\text{cor}, 0}$	$r_{\text{cor}, 1}$	$r_{\text{cor}, 2}$	Key rate Level 1
$^{64}\text{Zn}$	<u>0.76</u>			$^{64}\text{Cu}(\beta^-)^{64}\text{Zn}$
	-0.46	<u>-0.73</u>		
$^{67}\text{Zn}$	<u>-0.67</u>			$^{67}\text{Zn}(n, \gamma)^{68}\text{Zn}$
$^{72}\text{Ge}$	<u>-0.85</u>			$^{72}\text{Ge}(n, \gamma)^{73}\text{Ge}$
$^{73}\text{Ge}$	<u>-0.84</u>			$^{73}\text{Ge}(n, \gamma)^{74}\text{Ge}$
$^{74}\text{Ge}$	-0.44	-0.54	<u>-0.67</u>	
$^{75}\text{As}$	-0.50	-0.59	<u>-0.70</u>	
$^{77}\text{Se}$	<u>-0.86</u>			$^{77}\text{Se}(n, \gamma)^{78}\text{Se}$
$^{78}\text{Se}$	<u>-0.71</u>			$^{78}\text{Se}(n, \gamma)^{79}\text{Se}$
	0.38	<u>0.68</u>		
$^{80}\text{Se}$	<u>-0.76</u>			$^{80}\text{Br}(\beta^-)^{80}\text{Kr}$
	0.27	<u>0.73</u>		
	0.16	<u>0.44</u>	<u>0.88</u>	
$^{79}\text{Br}$	-0.64	<u>-0.73</u>		
$^{81}\text{Br}$	<u>-0.80</u>			$^{81}\text{Kr}(n, \gamma)^{82}\text{Kr}$
$^{83}\text{Kr}$	<u>-0.76</u>			$^{83}\text{Kr}(n, \gamma)^{84}\text{Kr}$
$^{84}\text{Kr}$	-0.49	-0.65	<u>-0.76</u>	
$^{86}\text{Kr}$	<u>0.84</u>			$^{85}\text{Kr}(n, \gamma)^{86}\text{Kr}$
	-0.30	<u>-0.70</u>		
	-0.34	<u>-0.62</u>	<u>-0.90</u>	
$^{87}\text{Rb}$	-0.56	-0.65	<u>-0.95</u>	

Credit: Nishimura et al. 2017

ほかに sequence 中の重要な反応率：  
 $^{72}\text{Ge}(n, \gamma)$ ,  $^{73}\text{Ge}(n, \gamma)$ ,  $^{85}\text{Kr}(n, \gamma)$ , etc.



# まとめ

## 恒星モデル

- ・星は冷えるので進化する
- ・つぶれるほど高温になる、縮退圧が効かなければ。

## 熱源としての反応

- ・ヘリウム、炭素、酸素燃焼期 が反応率不定性の大きな時期
- ・天体物理的不定性との切り分け??

## 化学進化に重要な反応

- ・今日は s-process についての反応率不定性
- ・ほかにも 超新星元素合成、nup-process、r-process、etc.

核反応率は「**どんな世代・質量の恒星**」にも分け隔てなく影響する。

→ 反応率セットごとの「宇宙」モデルを準備することが重要？