

Section 13.

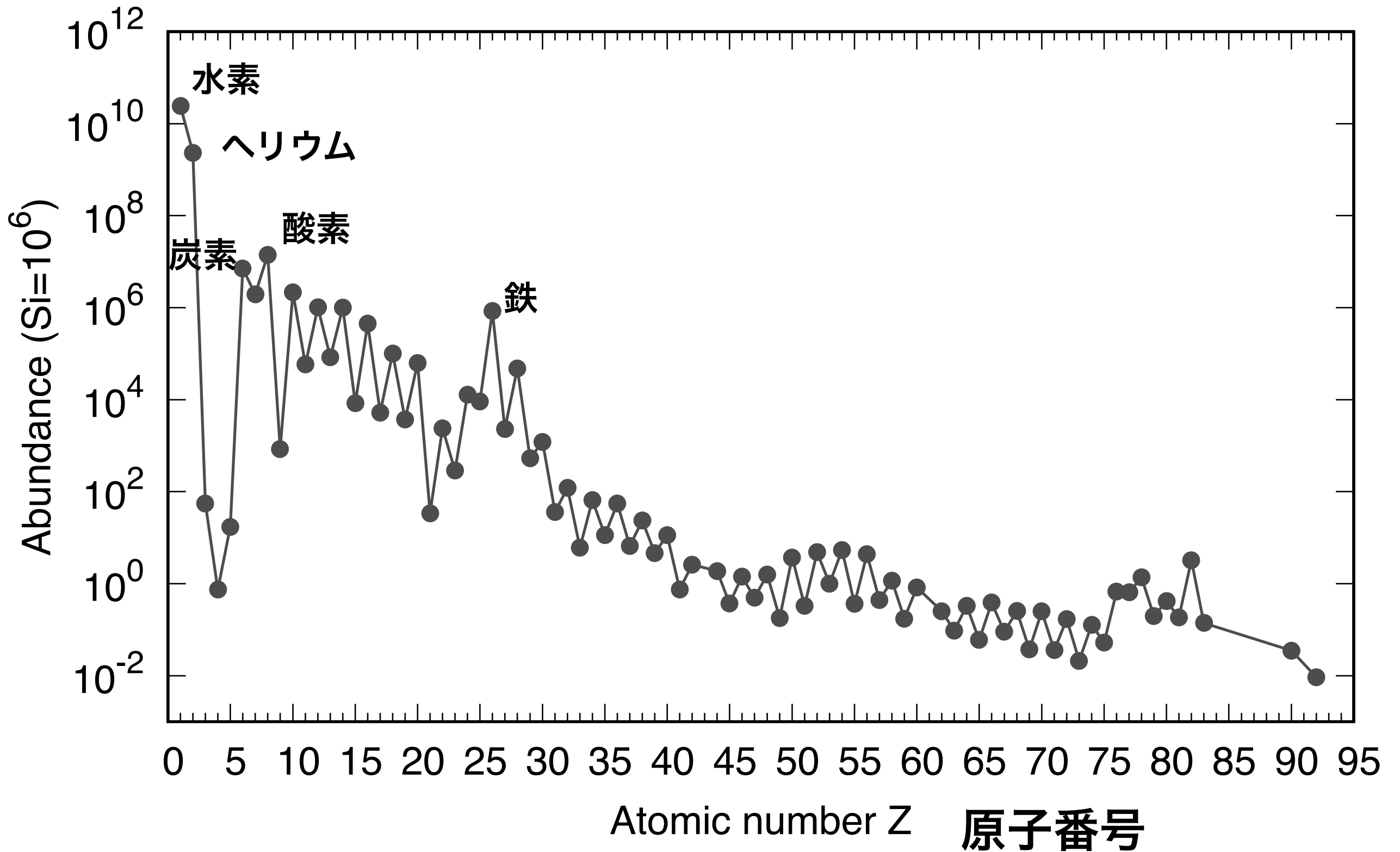
宇宙における元素の起源

13.1 軽元素の起源

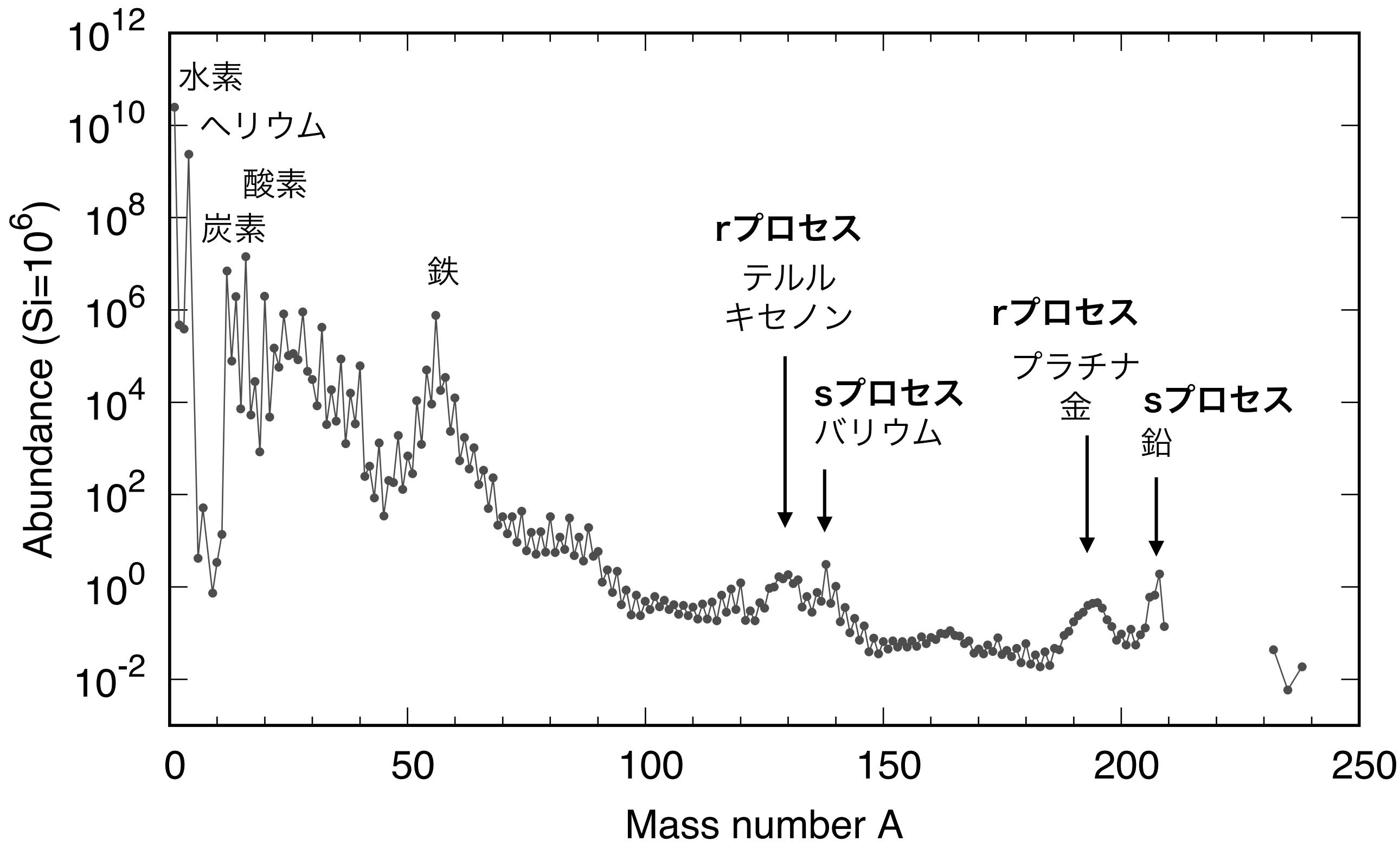
13.2 重元素の起源

13.3 宇宙の化学進化

宇宙に存在する元素の割合



宇宙の元素組成 (質量数)



元素の周期表

ビッグバン

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57~71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89~103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

恒星の内部

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Section 13.

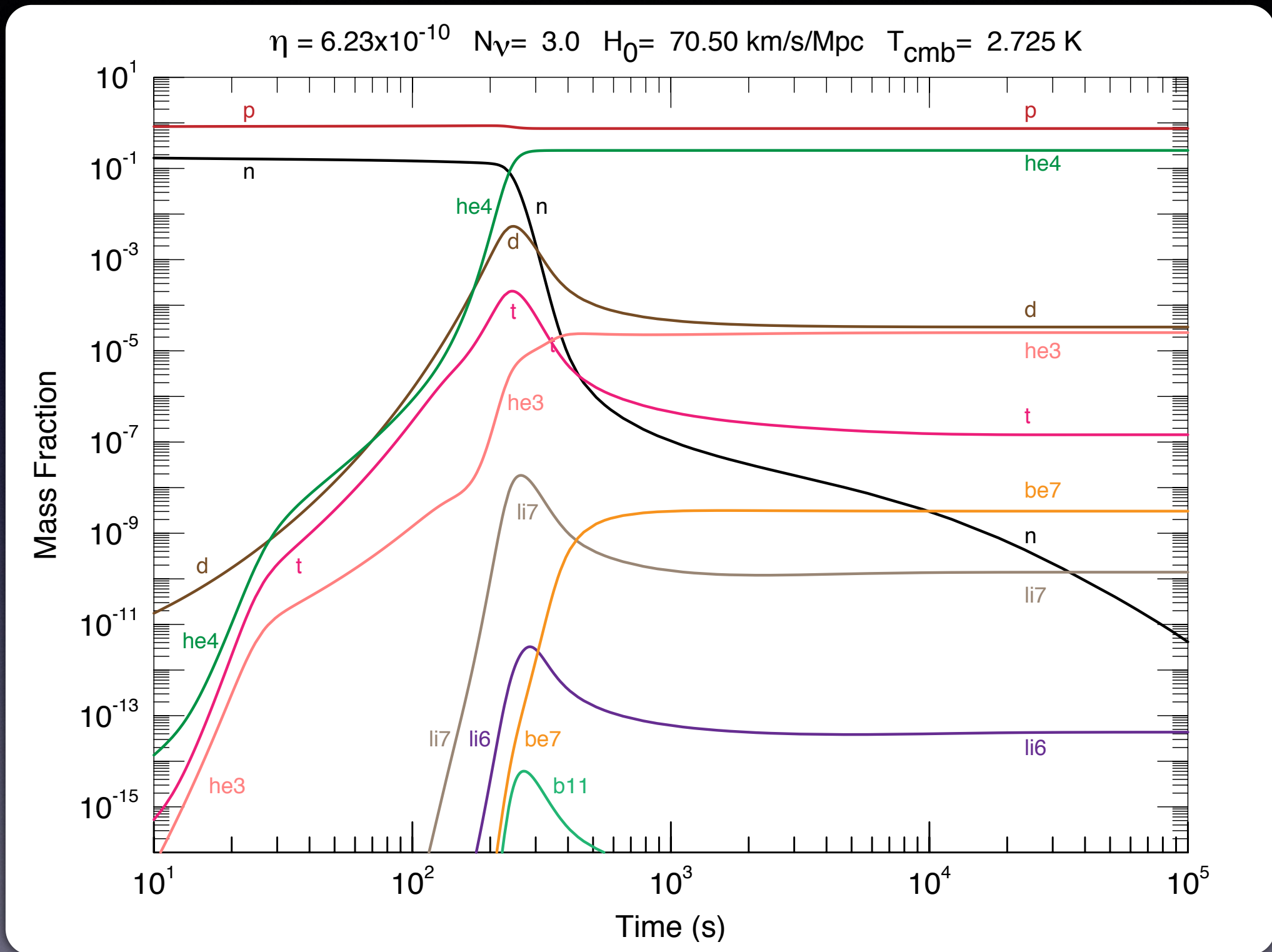
宇宙における元素の起源

13.1 軽元素の起源

13.2 重元素の起源

13.3 宇宙の化学進化

ビッグバン元素合成



時間

~ 2 sec

~200 sec

~ 300 sec

~ 900 sec



n/p ~ 1/6

n/p ~ 1/7
(少し崩壊)

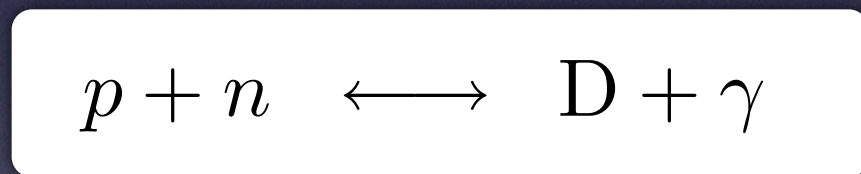
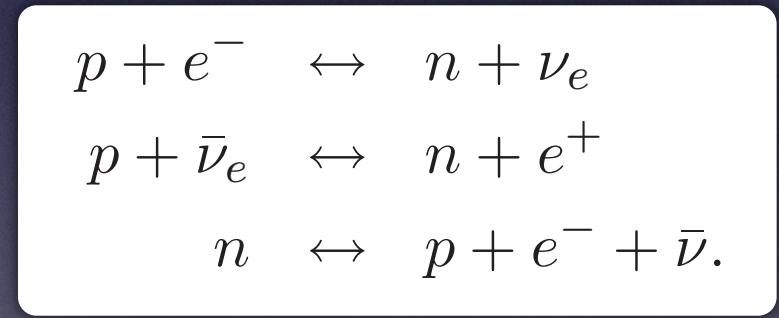
元素合成

中性子の寿命

$n/p = \exp(-\Delta m/T)$

平衡が切れる
(T ~ 0.7 MeV)

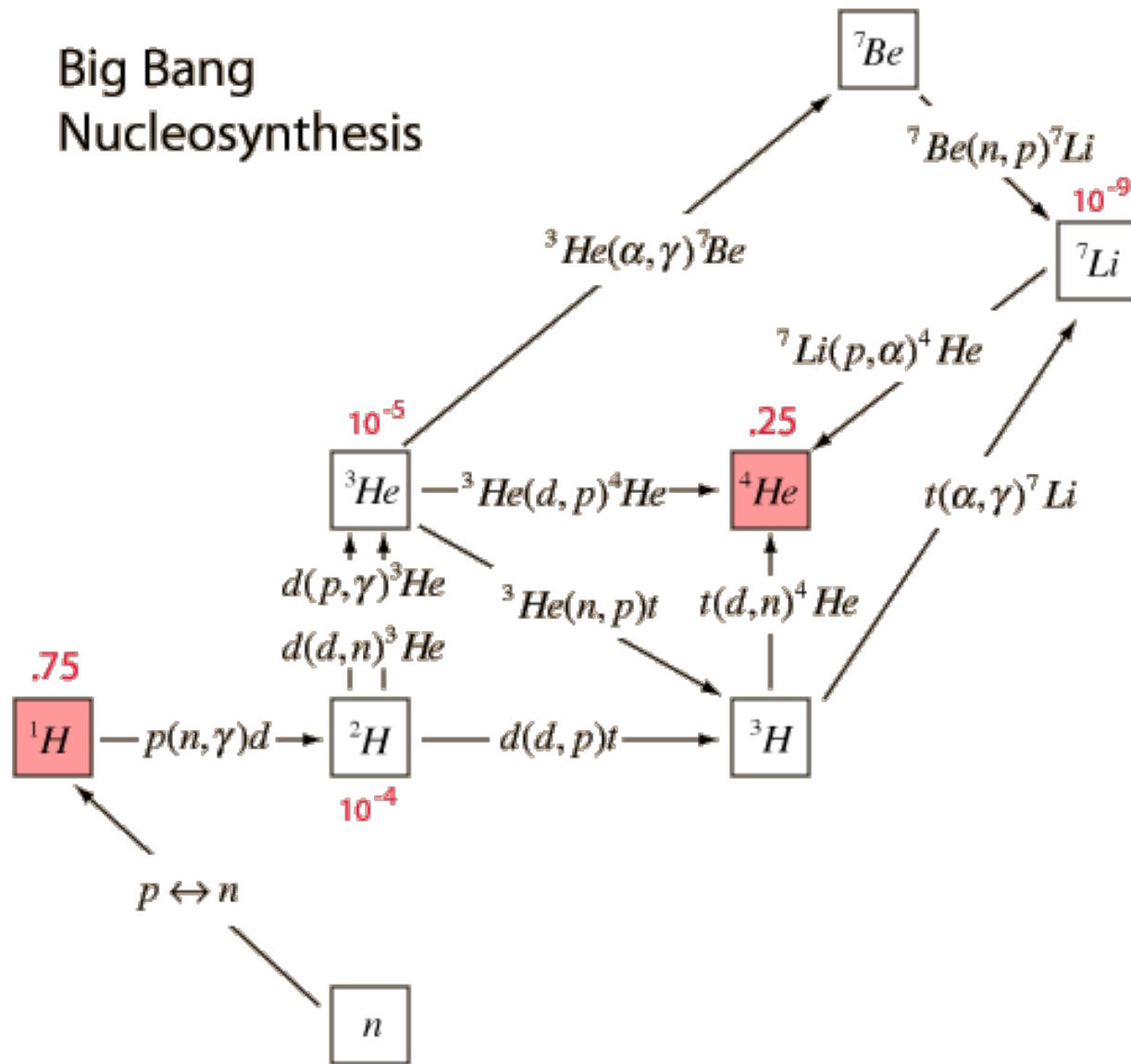
最初の反応



- 光子のエネルギーが下がった後 (T ~ 0.1 MeV)
- 中性子が崩壊する前

* Dの束縛エネルギー ~ 2 MeV
(photon/proton ~ 10¹⁰)

Big Bang Nucleosynthesis



中性子は全てヘリウムへ
($n/p \sim 1/7$)

$$Y = \frac{(n_n/2)(2m_p + 2m_n)}{n_p m_p + n_n m_n} \sim 0.25$$

⇒ 宇宙の組成と一致

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/bbnuc.html>

質量数5,8の安定な原子核は存在しない

⇒ 次に重い元素ができるのは $4\text{He} \times 3$ が起きる星の中
(ビッグバンでは密度が低くて起きない)

Section 13.

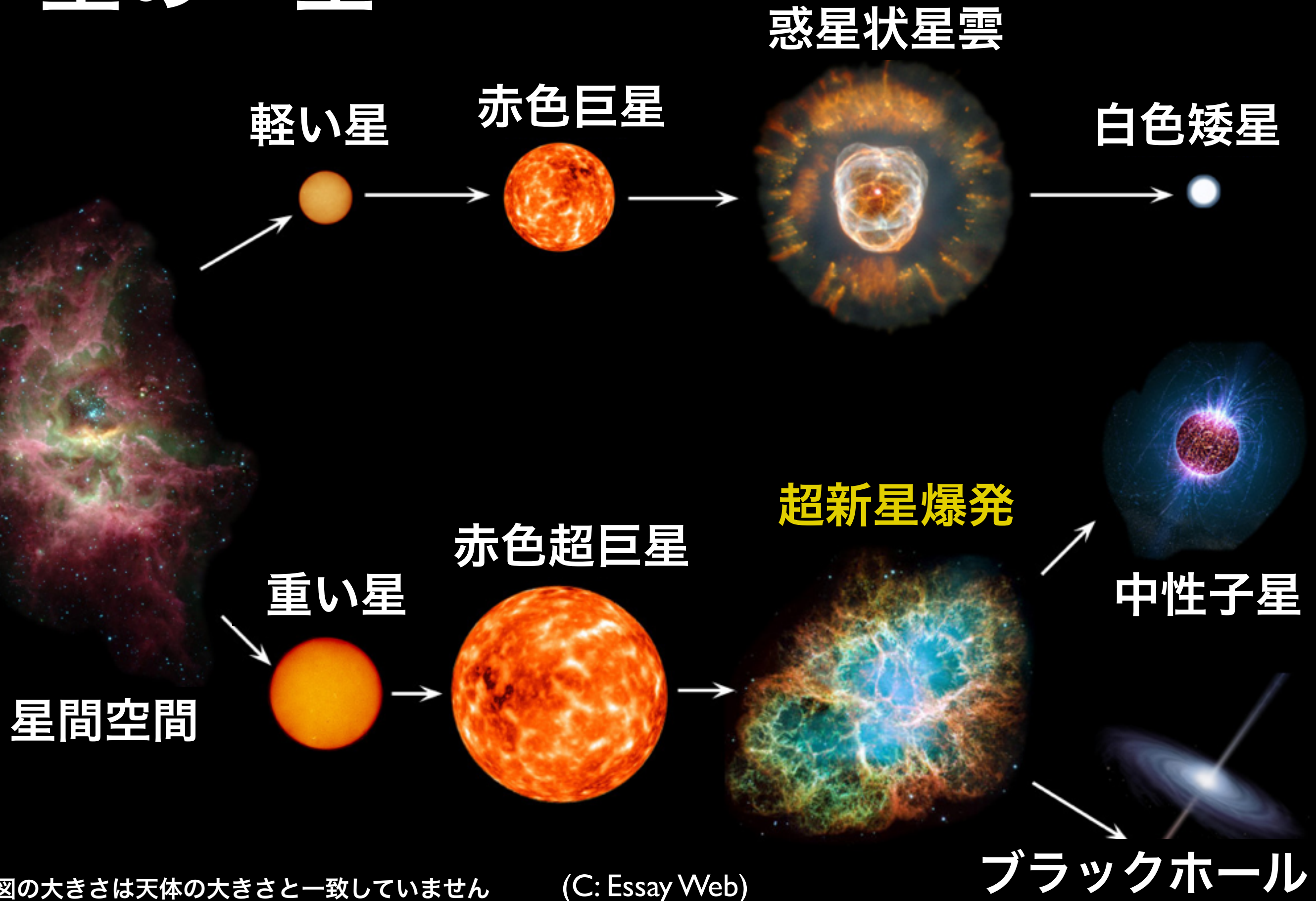
宇宙における元素の起源

13.1 軽元素の起源

13.2 重元素の起源

13.3 宇宙の化学進化

星の一生



図の大きさは天体の大きさと一致していません

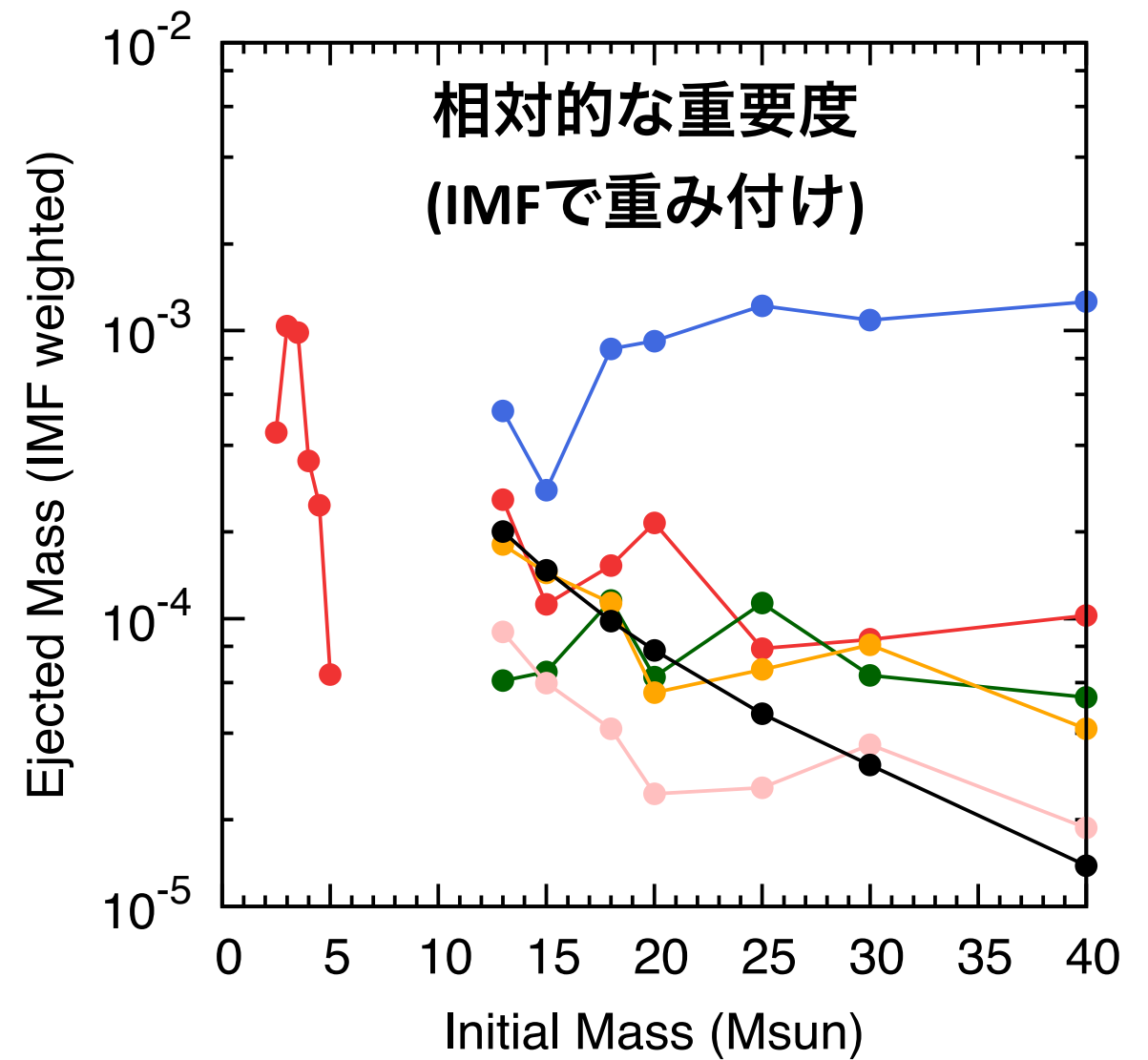
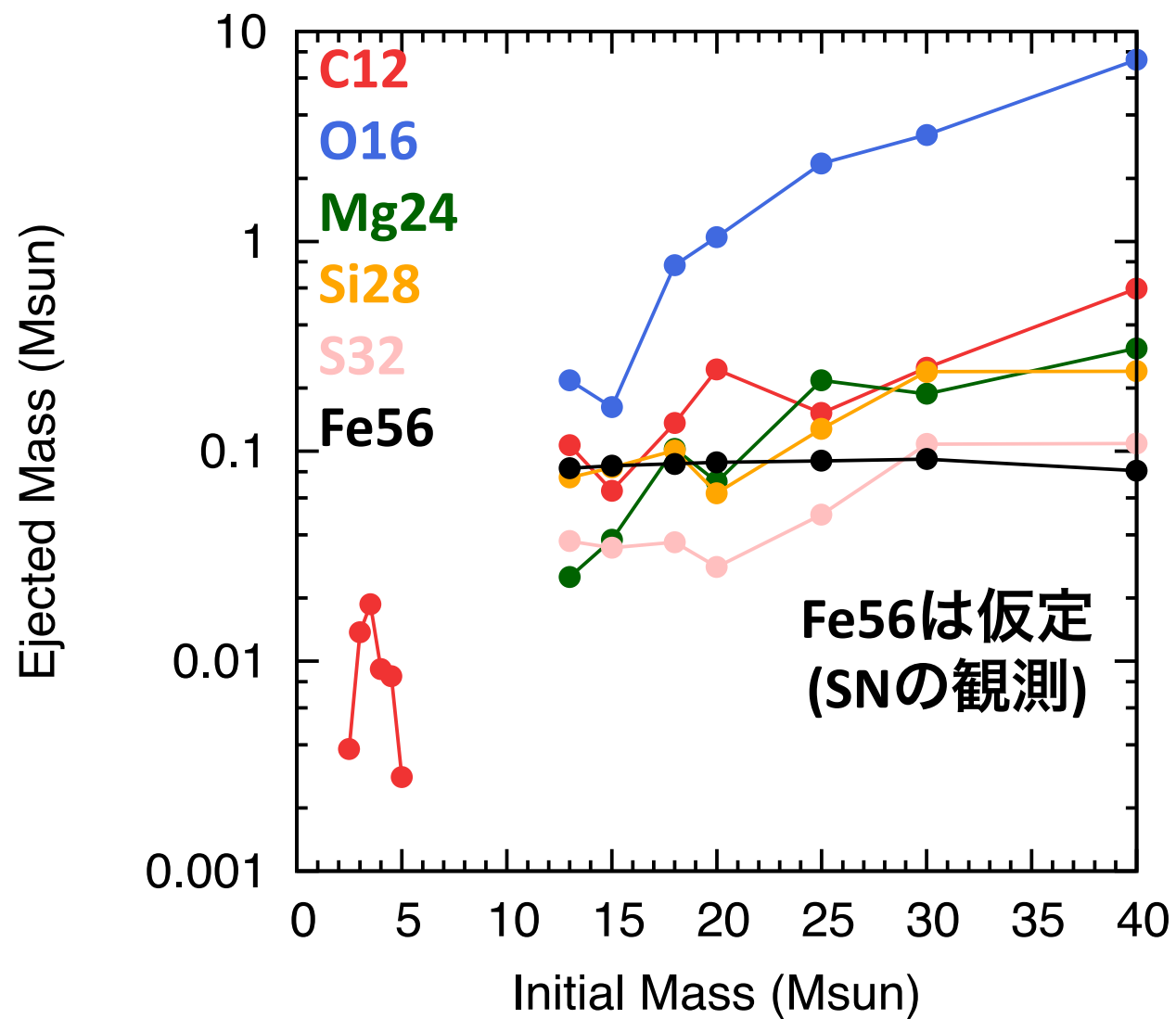
(C: Essay Web)

燃焼段階	おもな反応	おもな生成物	温度 (10^8 K)
H	pp チェイン CNO サイクル	^4He ^{14}N	0.15-0.2
He	$3^4\text{He} \longrightarrow ^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \longrightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$	^{12}C ^{16}O	1.5
C	$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \longrightarrow \begin{cases} ^{23}\text{Na} + \text{p} \\ ^{20}\text{Ne} + \alpha \end{cases}$	Ne, Na Mg, Al	7
Ne	$^{20}\text{Ne} + \gamma \longrightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$ $^{20}\text{Ne} + \alpha \longrightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$	O Mg	15
O	$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \longrightarrow \begin{cases} ^{28}\text{Si} + \alpha \\ ^{31}\text{P} + \text{p} \end{cases}$	Si, P, S, Cl, Ar, Ca	30
Si	$^{28}\text{Si} + \gamma \longrightarrow ^{24}\text{Mg} + \alpha$ $^{24}\text{Mg} + \gamma \longrightarrow \begin{cases} ^{23}\text{Na} + \text{p} \\ ^{20}\text{Ne} + \alpha \end{cases}$ 多くの反応 \longrightarrow 統計平衡	Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu	40

恒星からの質量放出

1-6 Msun: AGB段階などでの質量放出 (Karakas 2010, MNRAS, 403, 1413)

> 10 Msun: 超新星爆発 (Kobayashi et al. 2006, ApJ, 653, 1145)



元素の周期表

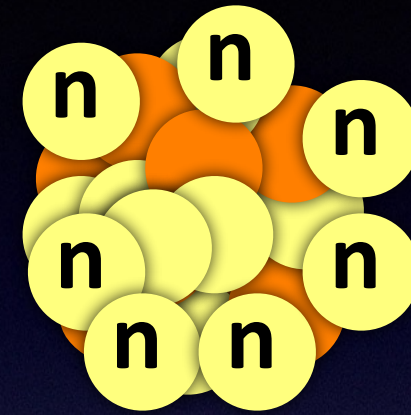
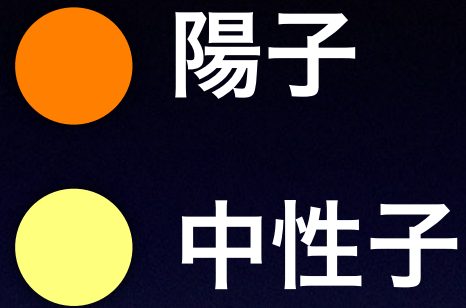
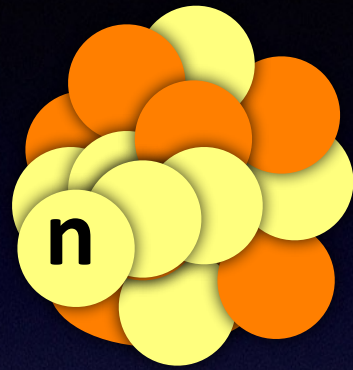
1 H	ビッグバン															2 He	
3 Li	4 Be	「重力崩壊型」超新星										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	「核爆発型」超新星										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57~71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89~103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

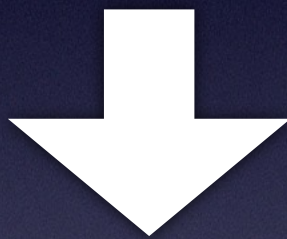
鉄より重い元素 = 中性子捕獲反応

s (slow) プロセス

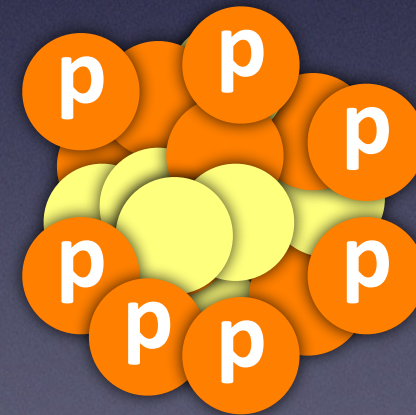
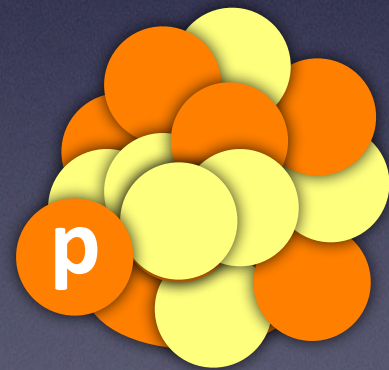
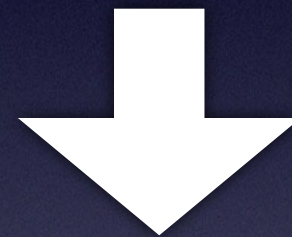
r (rapid) プロセス



崩壊



崩壊



Ba, Pb, ...

Au, Pt, U, ...

AGB星

超新星?? 中性子星合体?

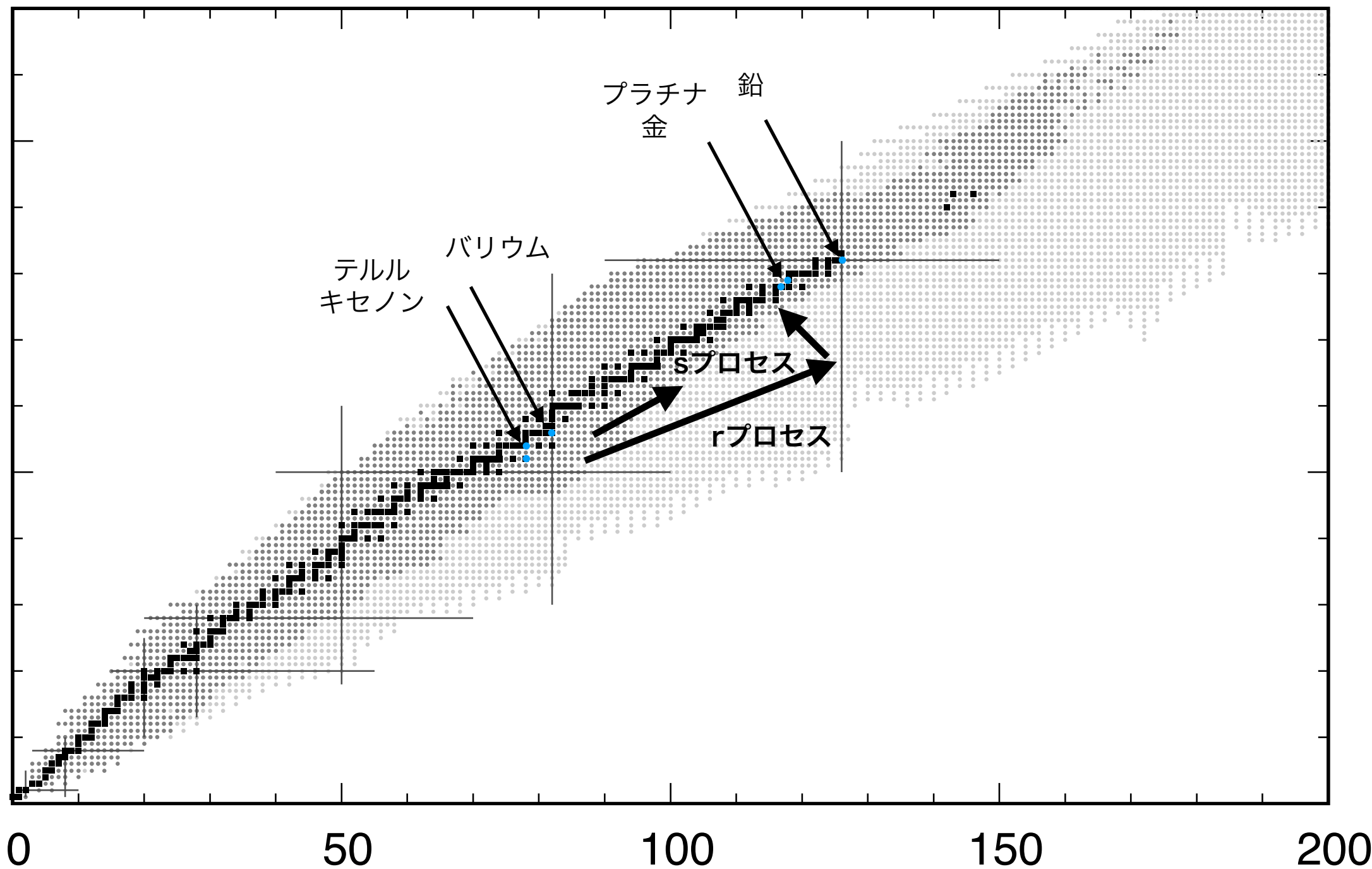
核図表

Proton number 陽子数

100

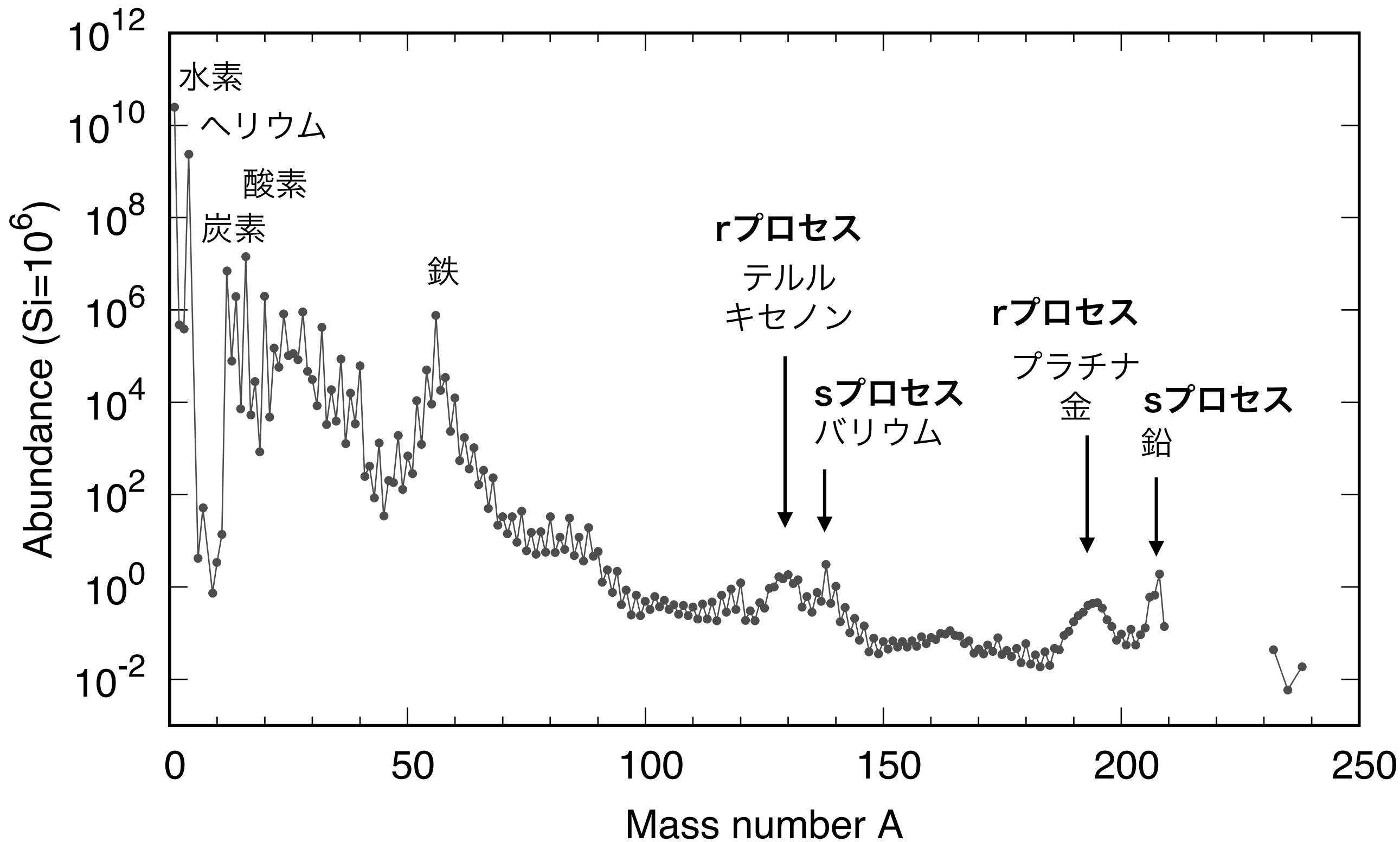
50

0



Neutron number 中性子数

宇宙の元素組成 (質量数)

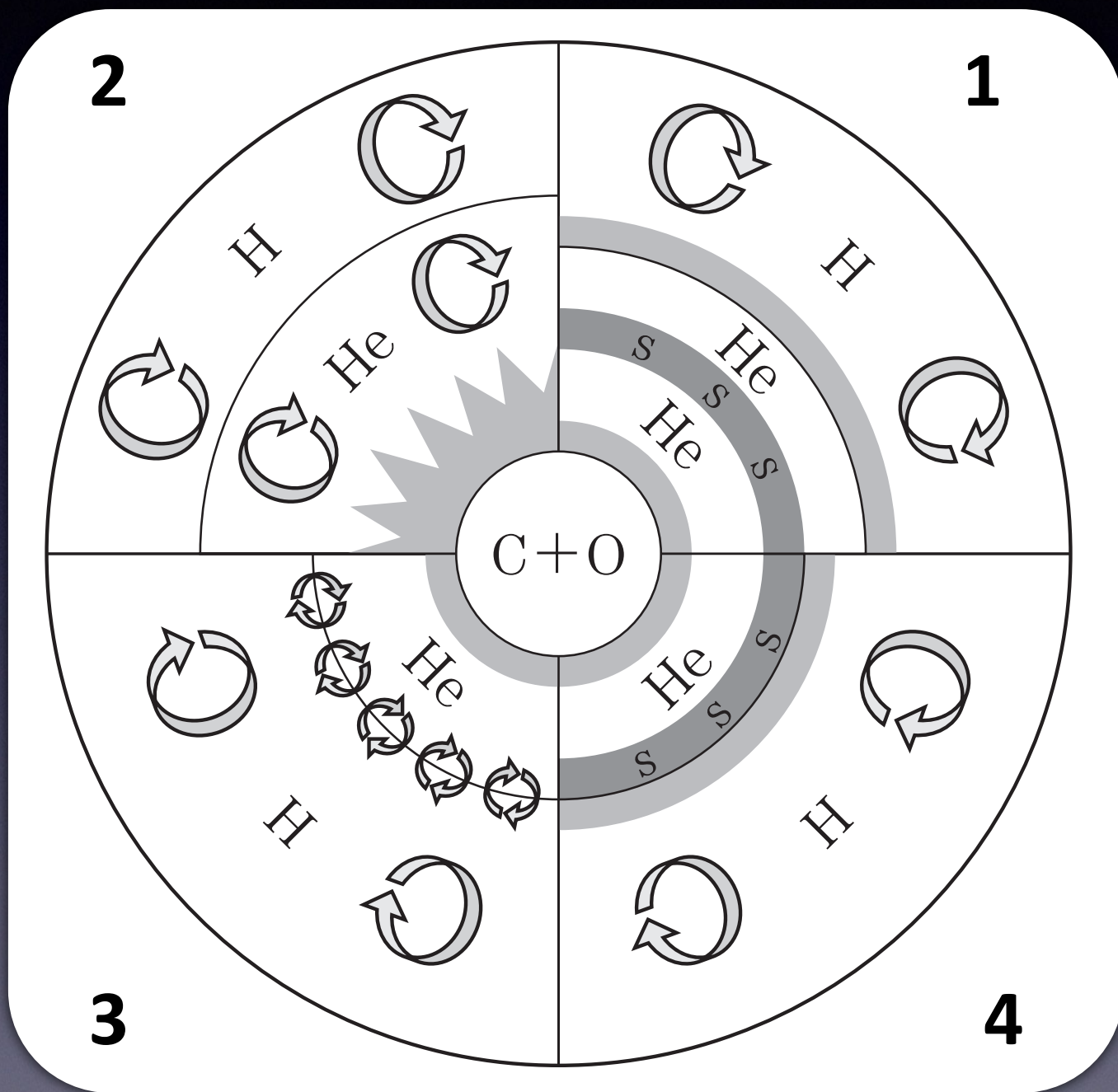


低質量星におけるs-process

中性子を作る主なプロセス



$T > 8 \times 10^7 \text{ K}$



1 He層とH層の底で殻燃焼

2 Heが多くなる

=> 暴走的反応 (フラッシュ)

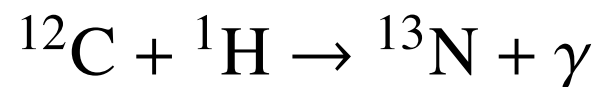
3 対流が発達 => 外層が混ざる

+ ヘリウム層に水素を供給

4 ヘリウム層で以下の反応

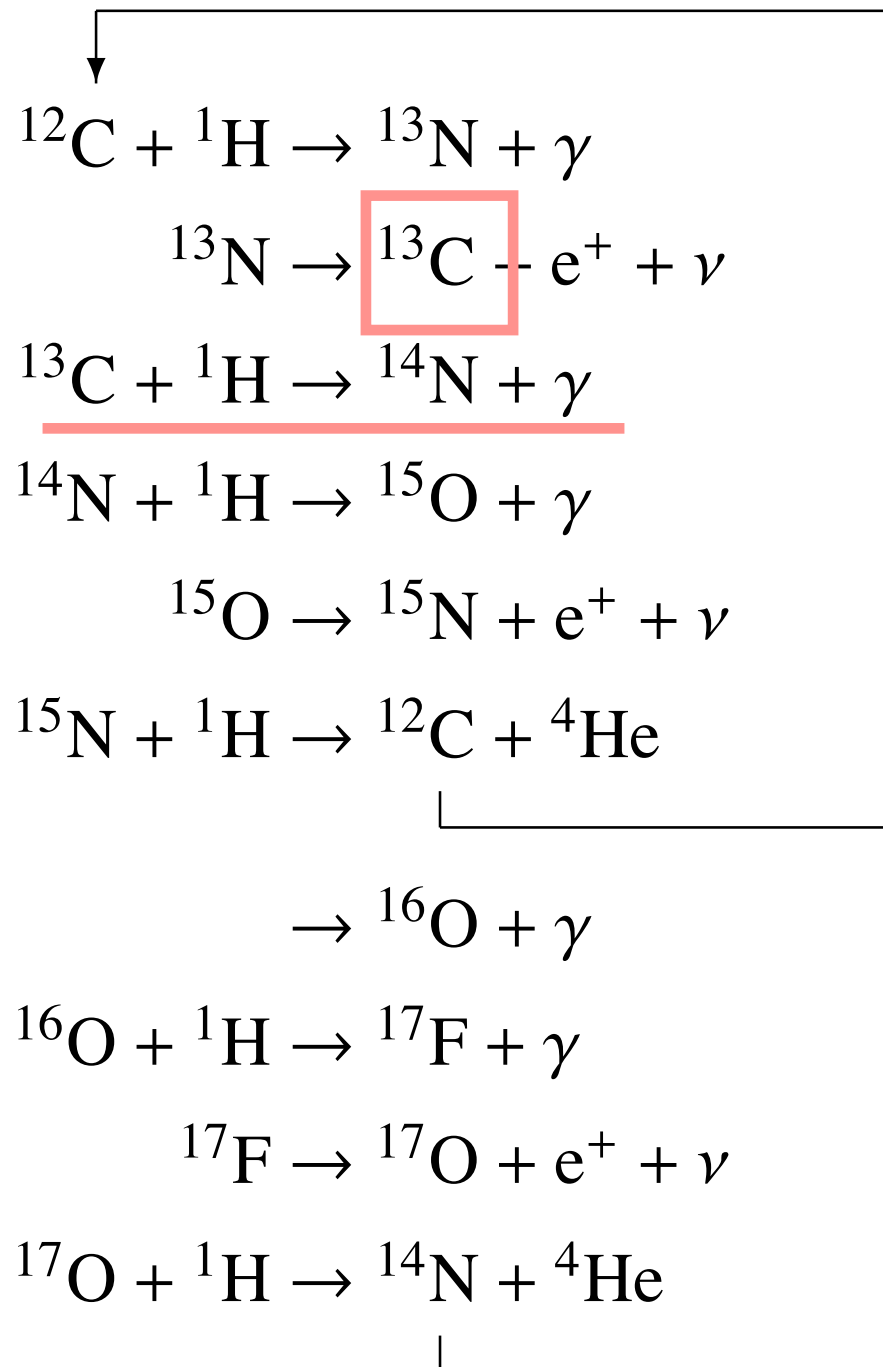
^{13}C ができる => 4He と反応

=> 中性子 (s-process)



元素はいかにつくられたか (岩波書店)

CNO cycle



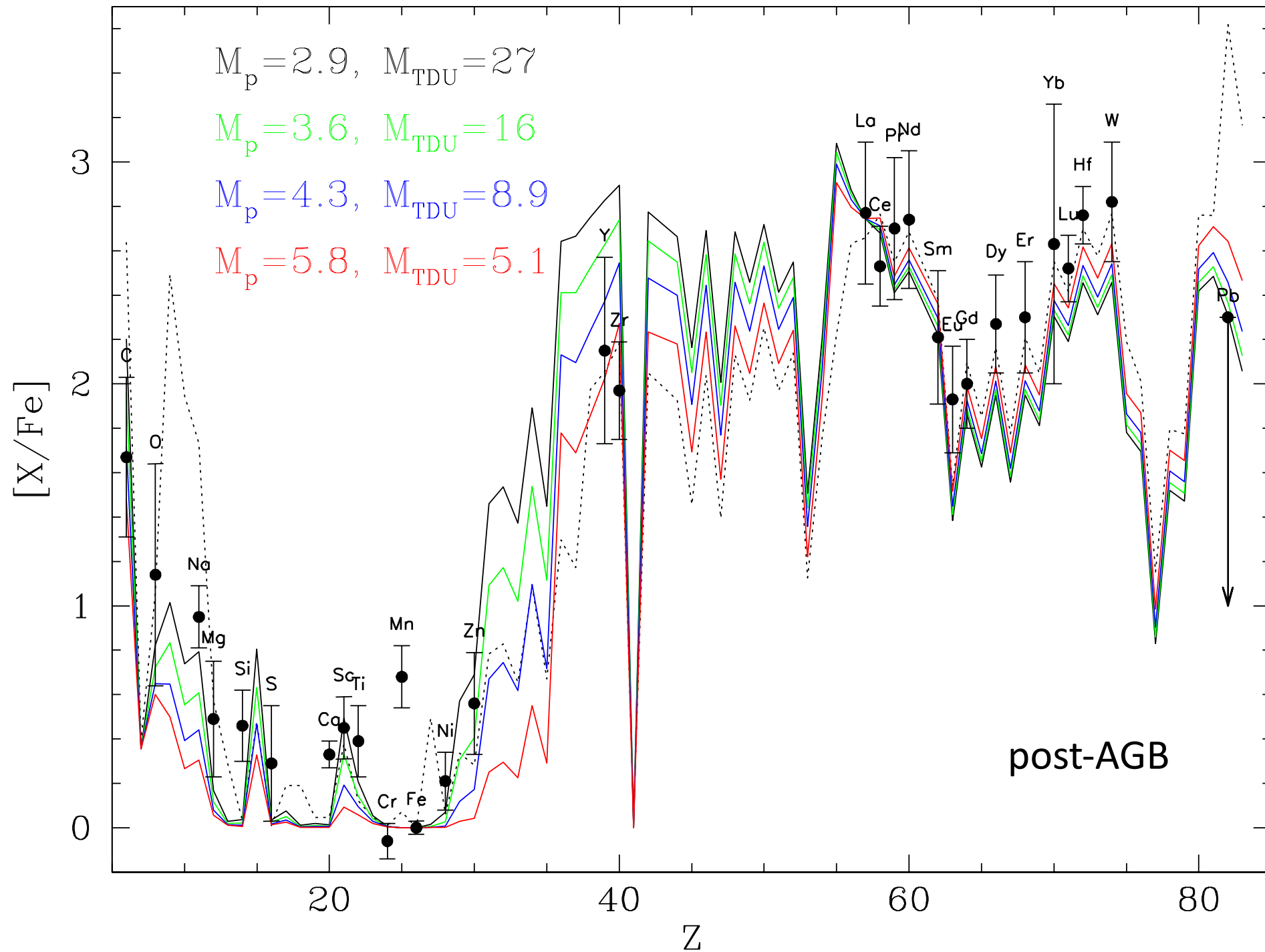
水素が少ない状況で起きると
13Cが残りやすい

核融合しているヘリウム層に
新しく水素が供給されることが重要
(AGB星のユニークな点)

観測からの制限

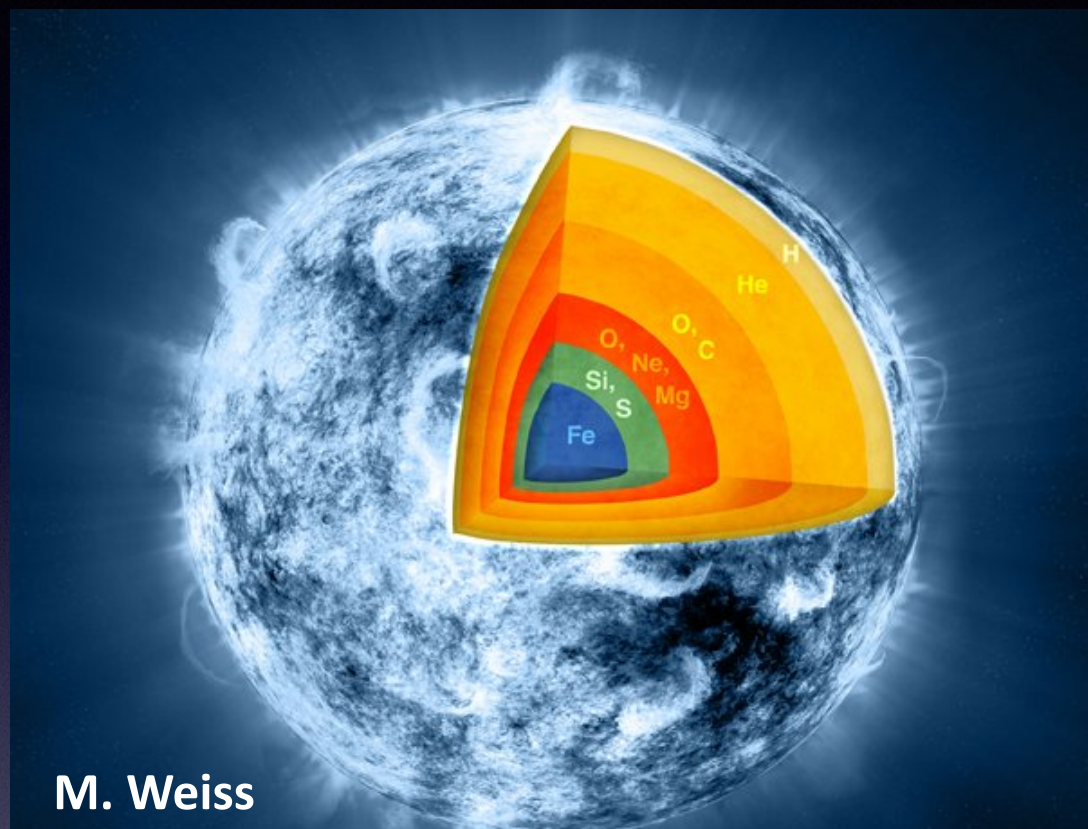
最初の証拠

Tc (Z = 43, 安定核種がない元素)
(Merrill 1952)

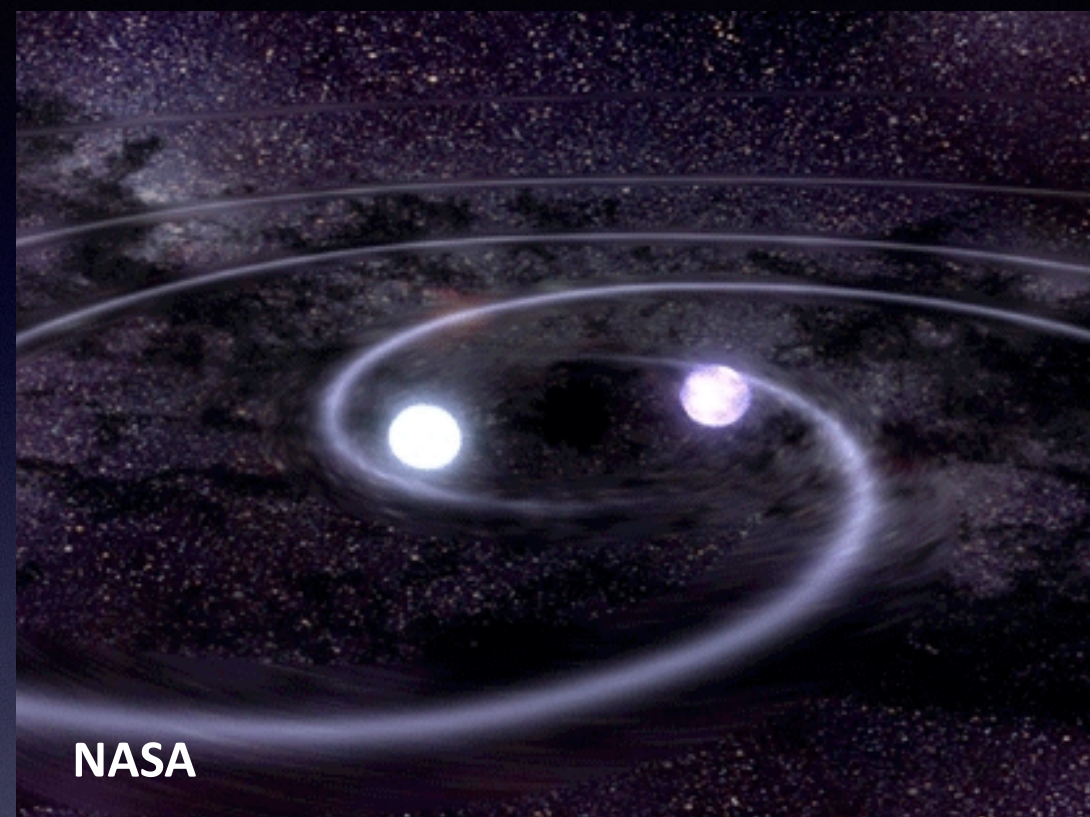


rプロセス元素の起源天体

超新星



中性子星合体



宇宙で起きていることは確実
(1つの銀河で100年に1回)



rプロセスを起こすの
は難しいか？

rプロセスは起きる
宇宙でどれくらい起きている？
一回でどれくらい元素を作る？
(重力波+電磁波で測られ始めた)

元素の周期表

1 H	ビッグバン															2 He	
3 Li	4 Be	「重力崩壊型」超新星										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	「核爆発型」超新星										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57~71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89~103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

小中質量星

大質量星 (weak s)

s-process
r-process

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Section 13.

宇宙における元素の起源

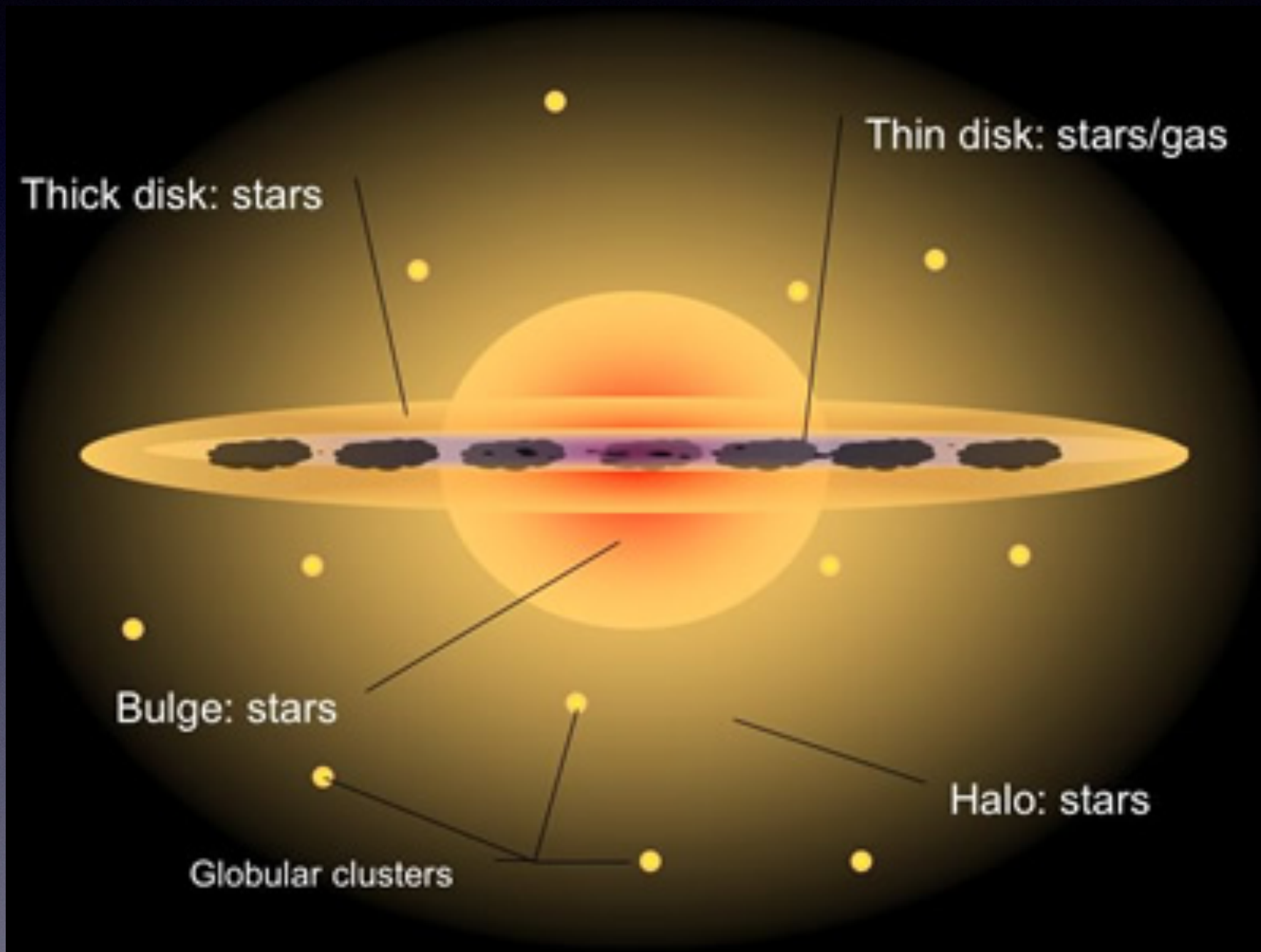
13.1 軽元素の起源

13.2 重元素の起源

13.3 宇宙の化学進化

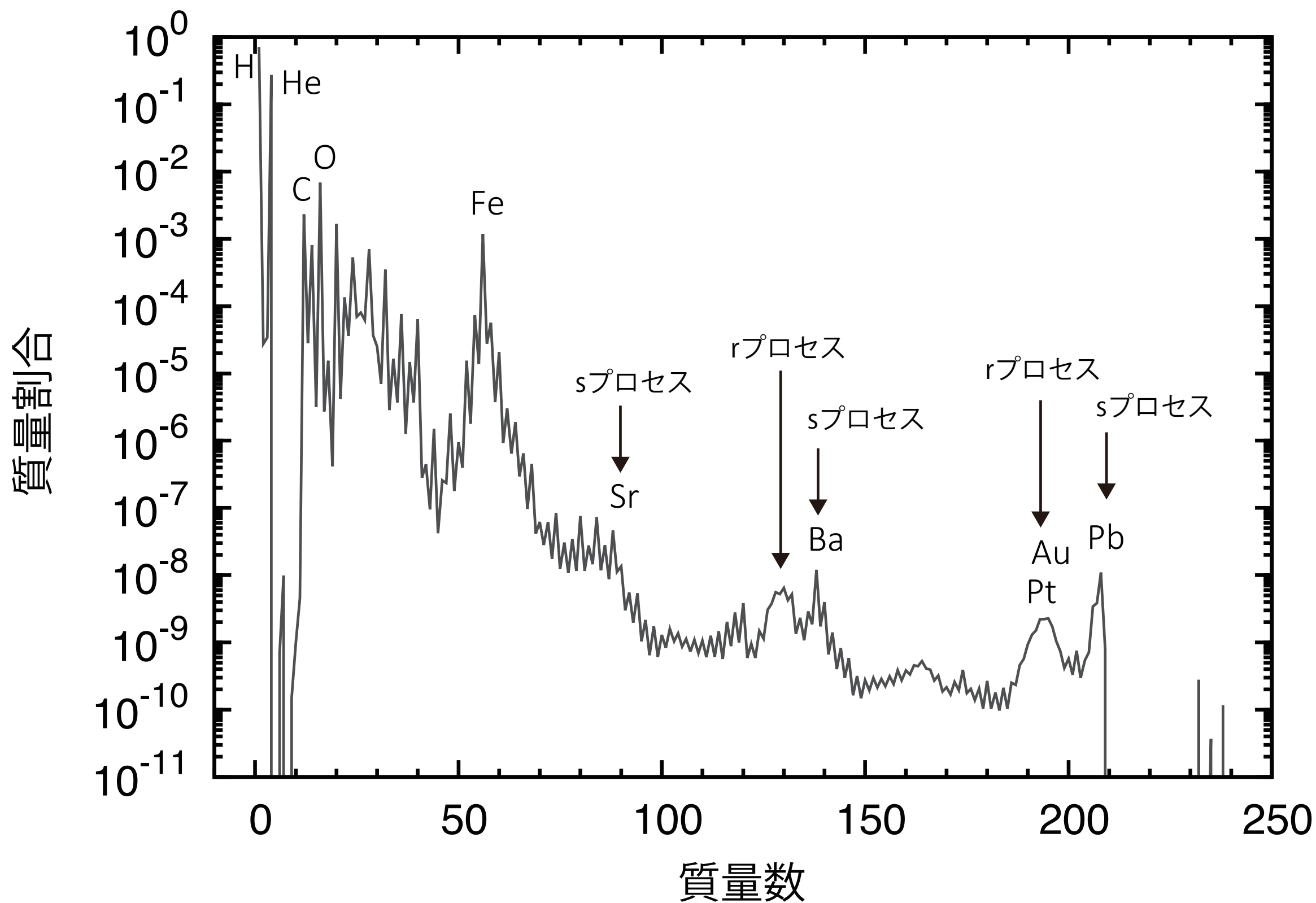
銀河系

過去の元素合成・放出の
歴史を反映している
「銀河考古学」



宇宙の元素組成 (質量数)

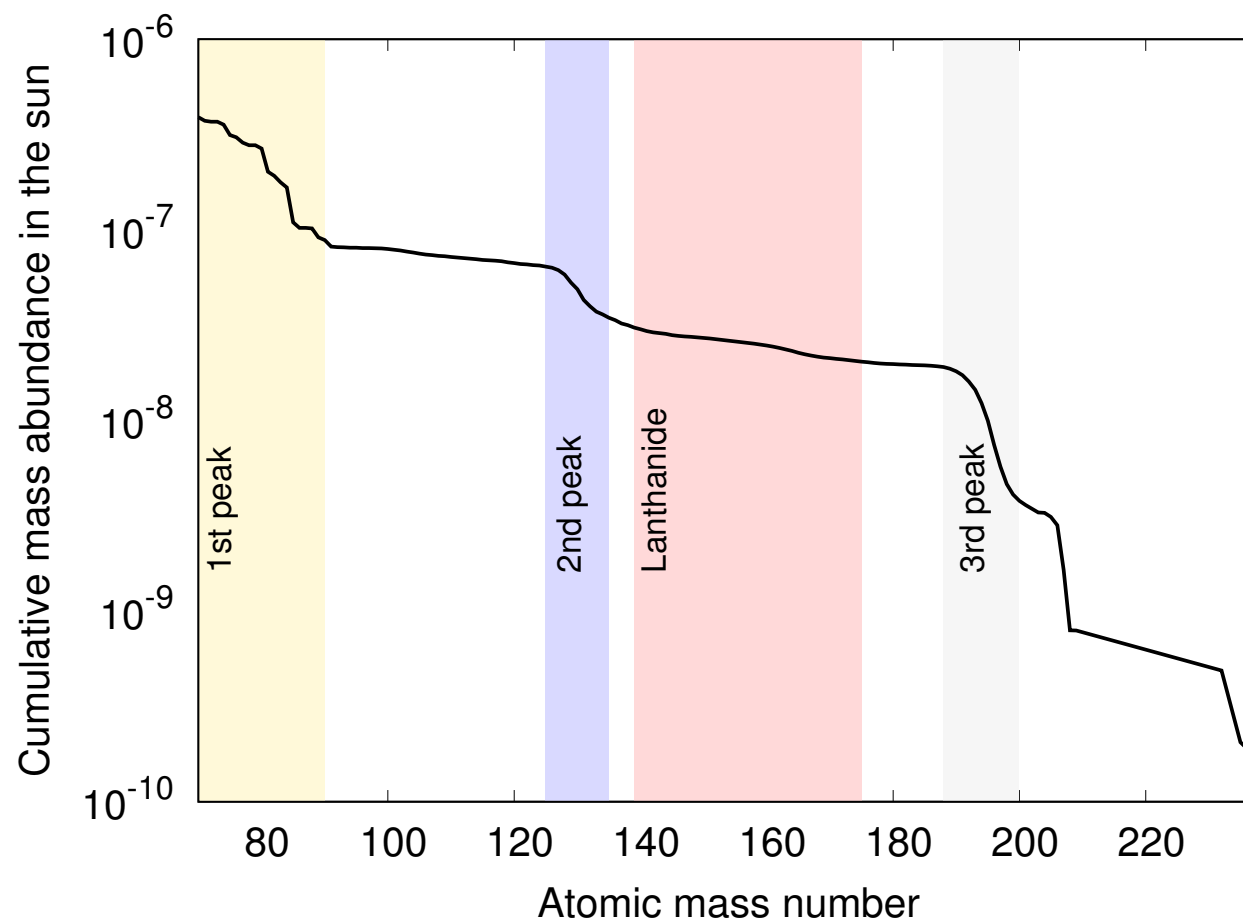
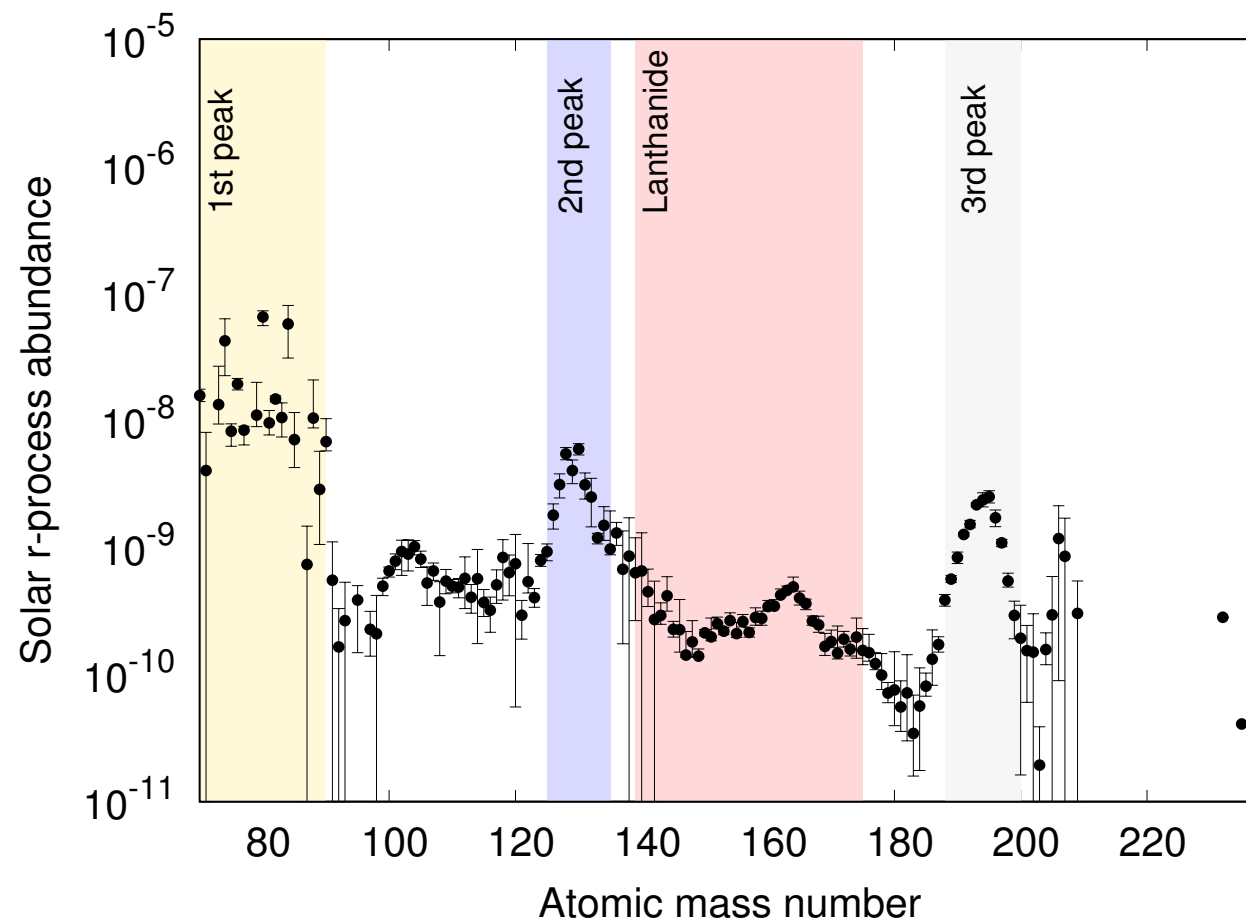
$X(\text{Fe}) \sim 10^{-3}$



r-process元素

$$X(r) \sim 10^{-7} \\ (A > 90)$$

Cumulative
(重い方から)



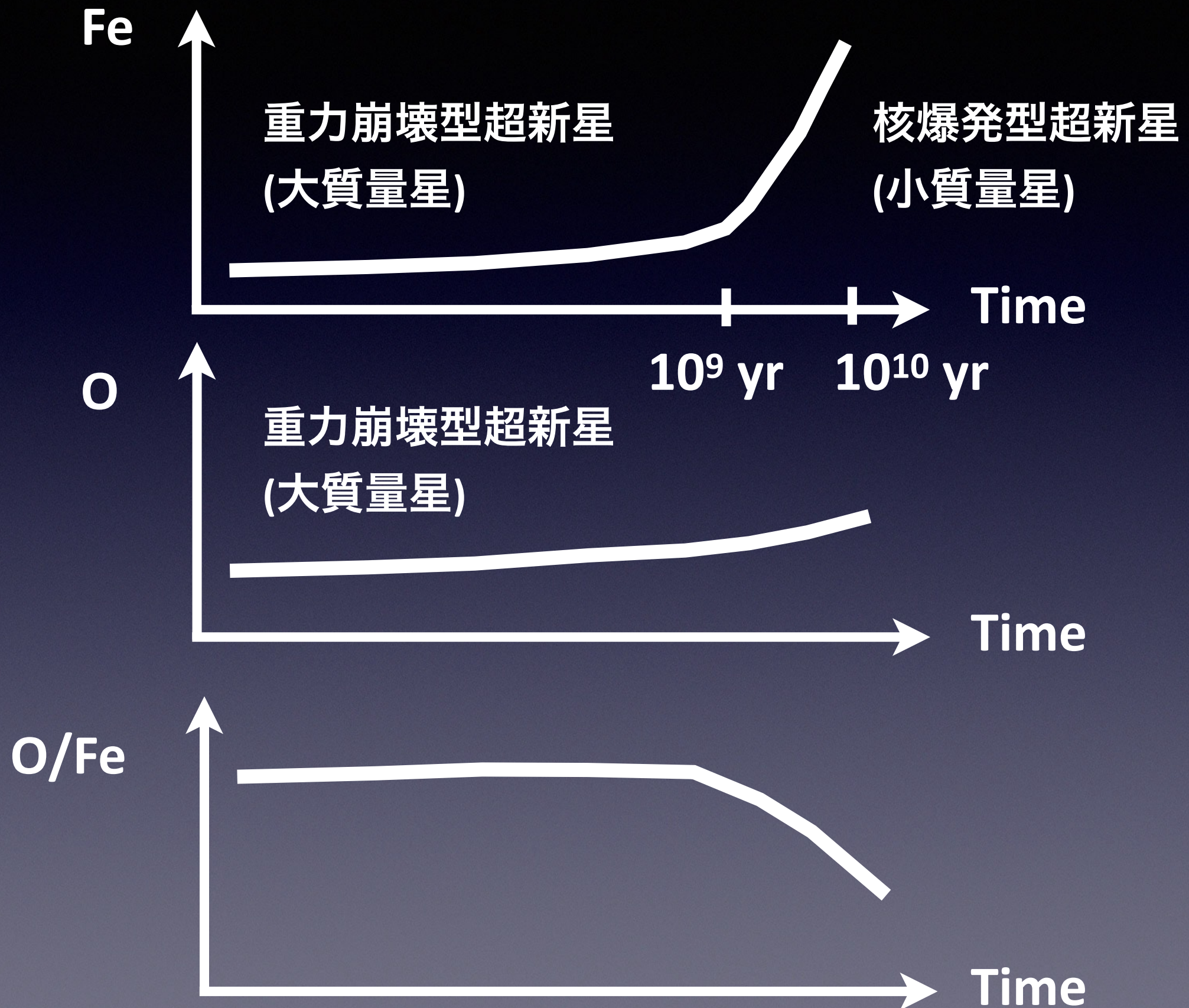


恒星、爆発天体による元素合成の理解は
あっているか？

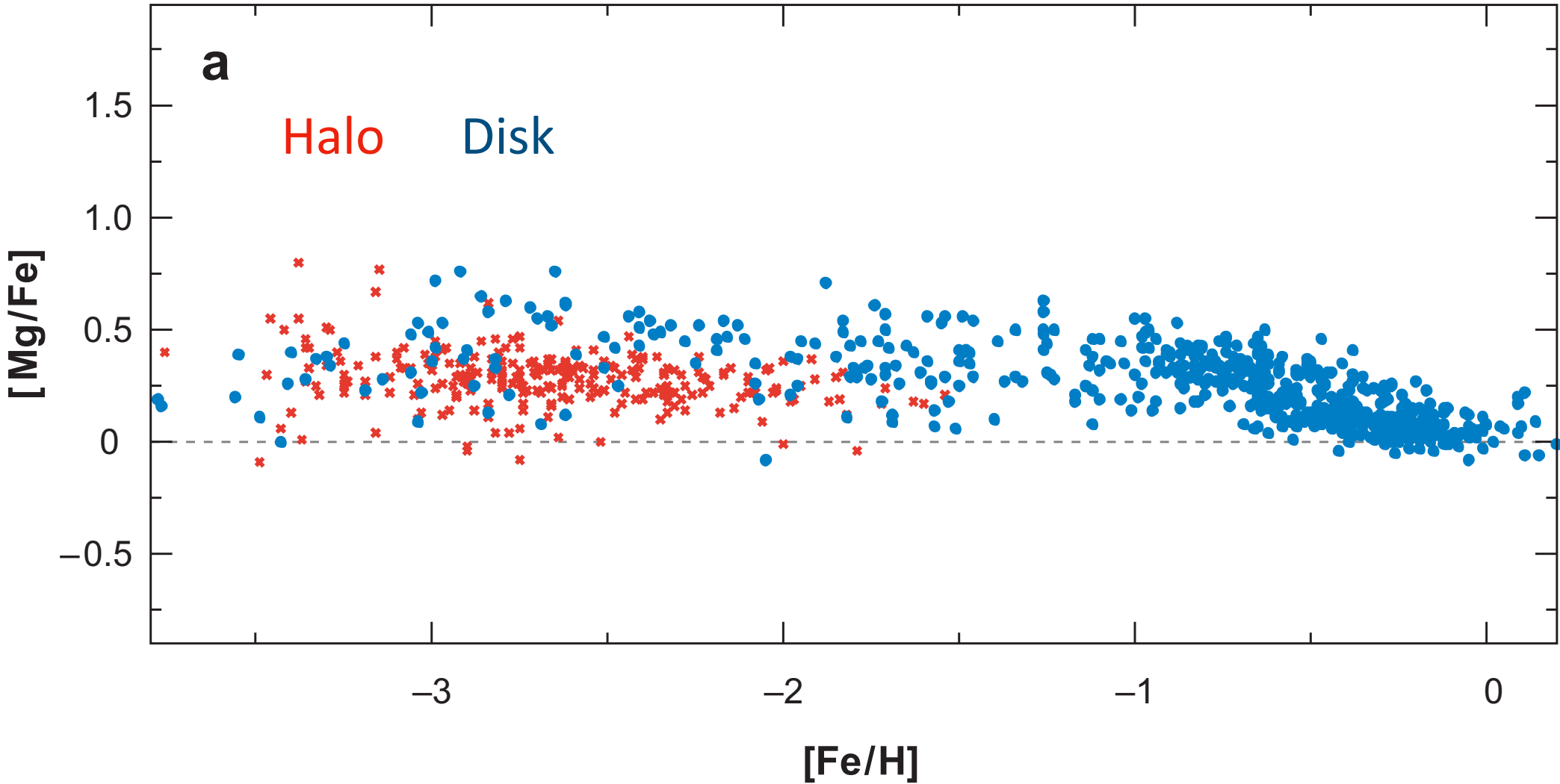
(A) 総量

(B) タイムスケール

宇宙における元素量の進化 (理論)



銀河系の星の組成比 (Mg/Fe)



Sneden+08

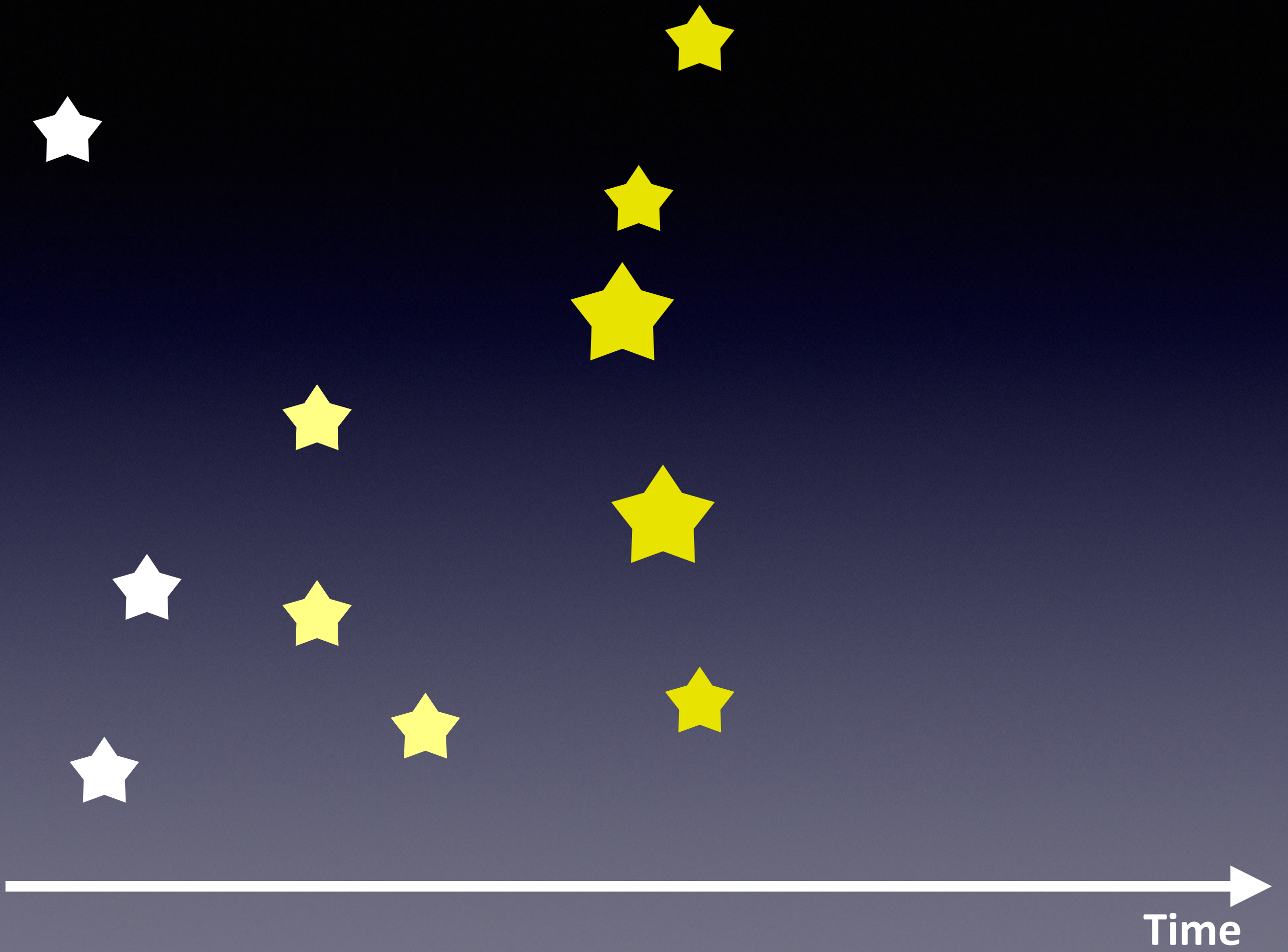


Ia型超新星の方がdelay timeが長い

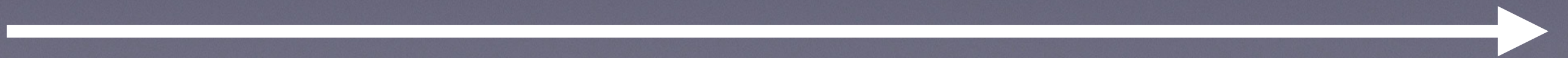


Time









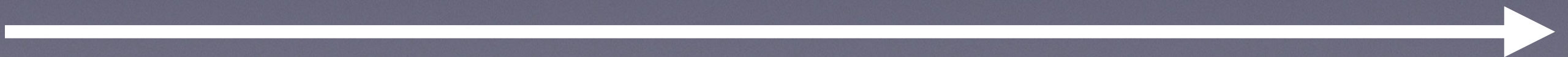
Time







[Fe/H]

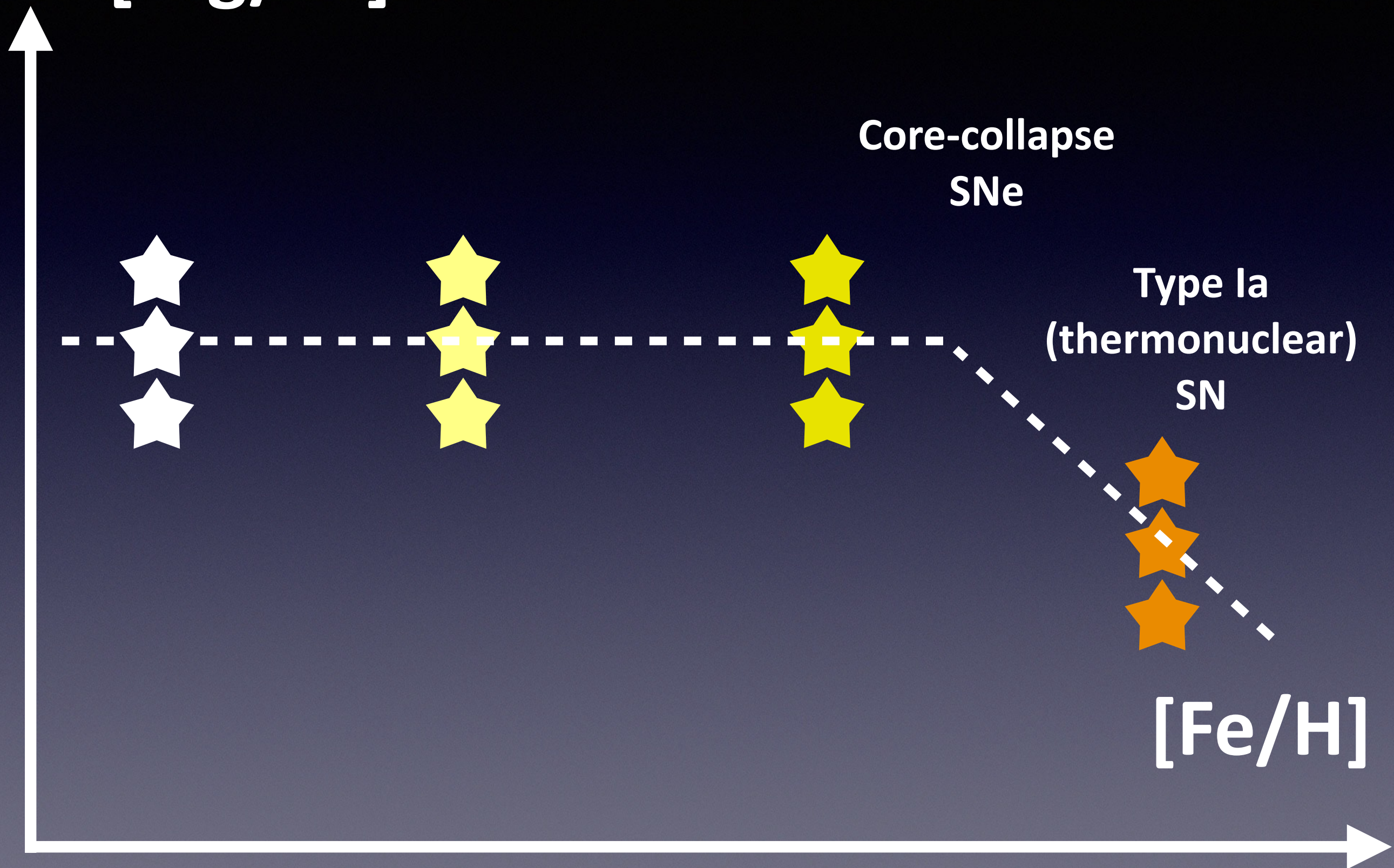


[Mg/Fe]

Core-collapse
SNe

Type Ia
(thermonuclear)
SN

[Fe/H]

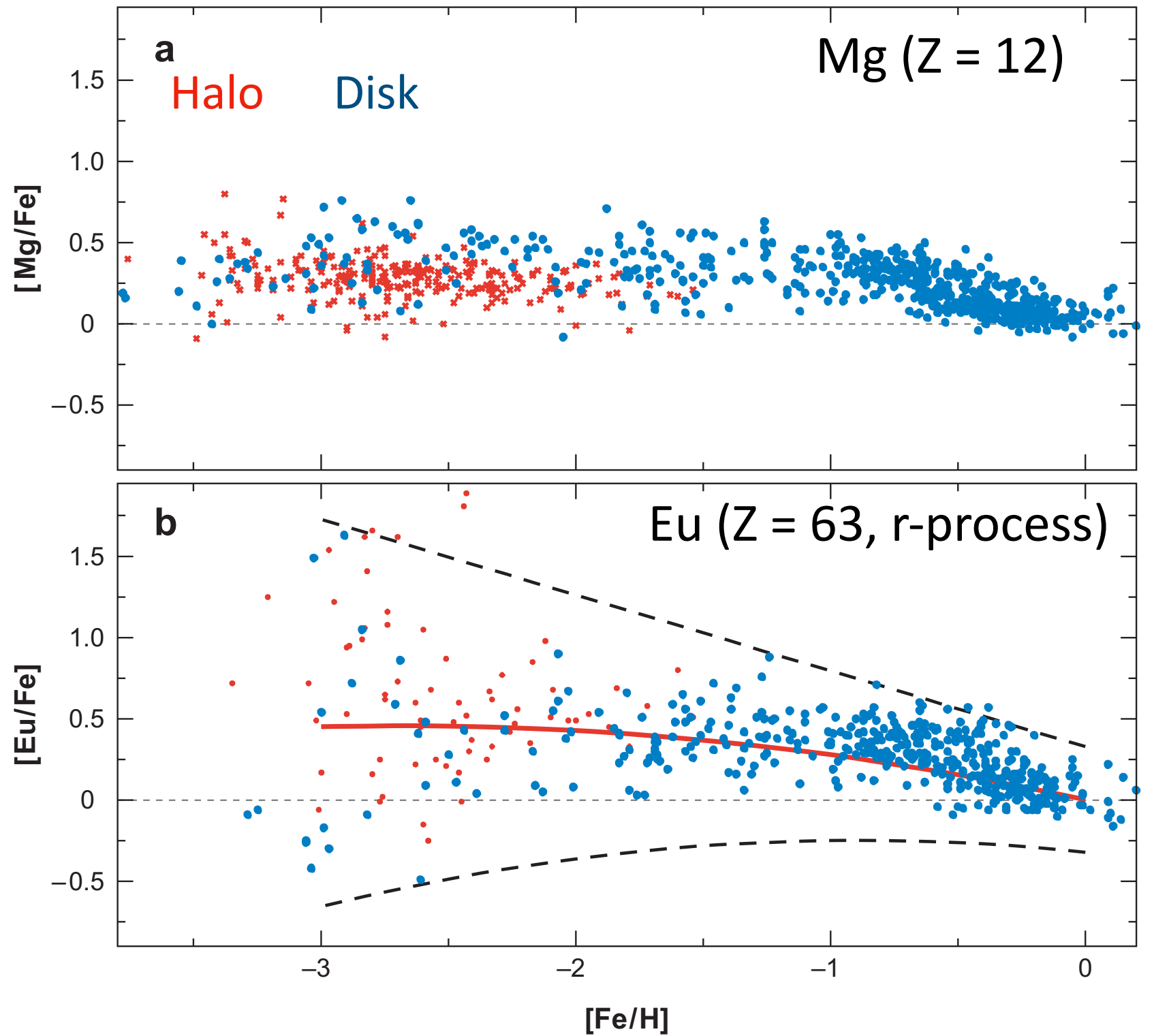


銀河系の星の組成比 (r-process)

r-process元素

- Mgよりもばらつき大
- => 重力崩壊型超新星
- よりもレアな天体

Snedden+08



元素の起源と宇宙の化学進化：まとめ

- 元素の起源
 - ビッグバン元素合成: H, He, Li
 - 宇宙線による破砕反応: Li, Be, B
 - 恒星内部: C-Fe
(AGB星、重力崩壊型超新星、核爆発型超新星)
 - 中性子捕獲: $> \text{Fe}$
 - s-process: 低・中質量星 (AGB星)
 - r-process: 中性子星合体 or 超新星
- 銀河系の星の観測による検証

Appendix

リチウム問題 (${}^7\text{Li}$)

$$[A/B] = \log(N_A/N_B) - \log(N_A/N_B)_\odot$$

$$A(\text{Li}) = \log(\text{Li}/\text{H}) + 12$$

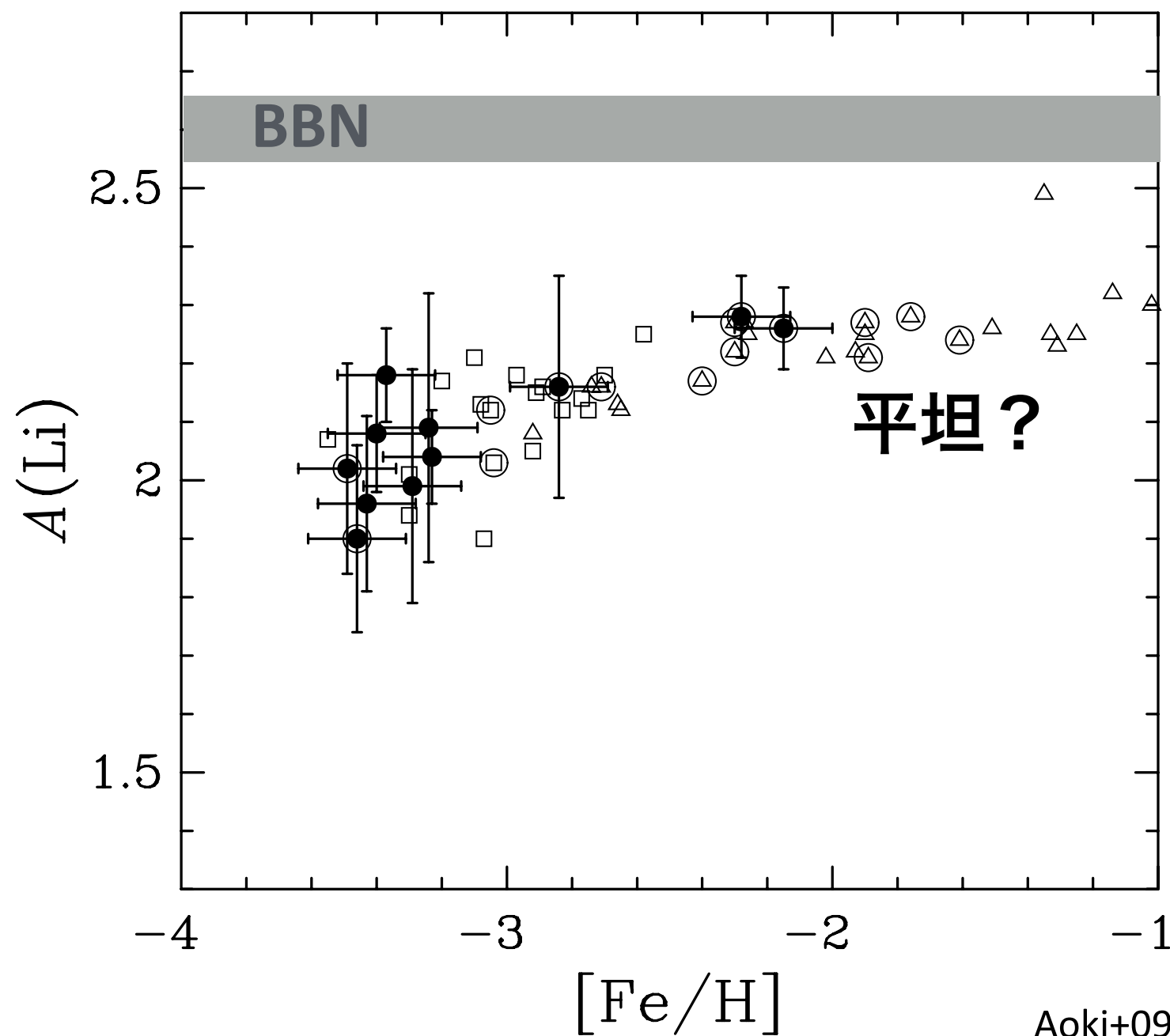
リチウム量

星の中での破壊

+

宇宙線破砕反応に

よる合成



金属量

宇宙線による破砕反応 (Li, Be, B)

宇宙線(p, alpha)

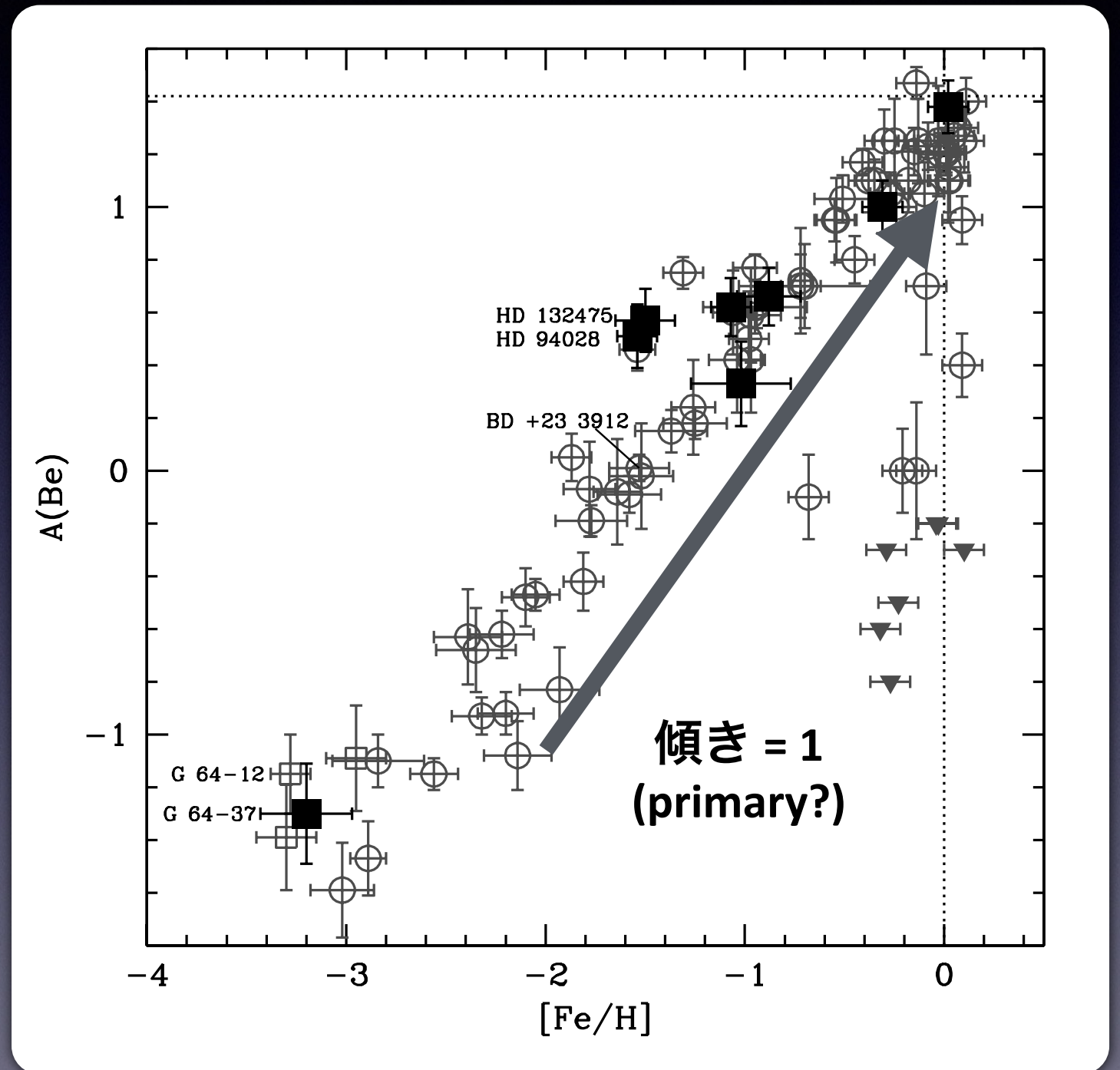
+ 標的 (C, N, O)

=> Li, Be, B

宇宙線の量 (<= 超新星)

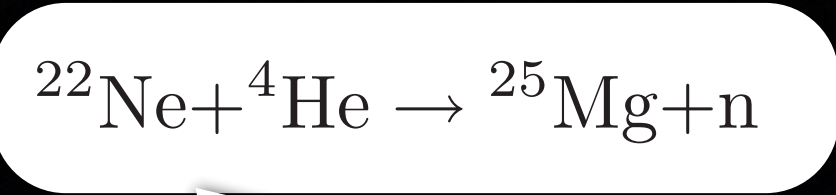
C, N, Oの量 (<= 過去の元素合成)

=> secondary process (傾き = 2)



大質量星におけるs-process (weak s-process)

中性子を作る主なプロセス



$T > 2.5 \times 10^8 \text{ K}$

ヘリウム燃焼コア
(元からあった ^{14}N と反応)

