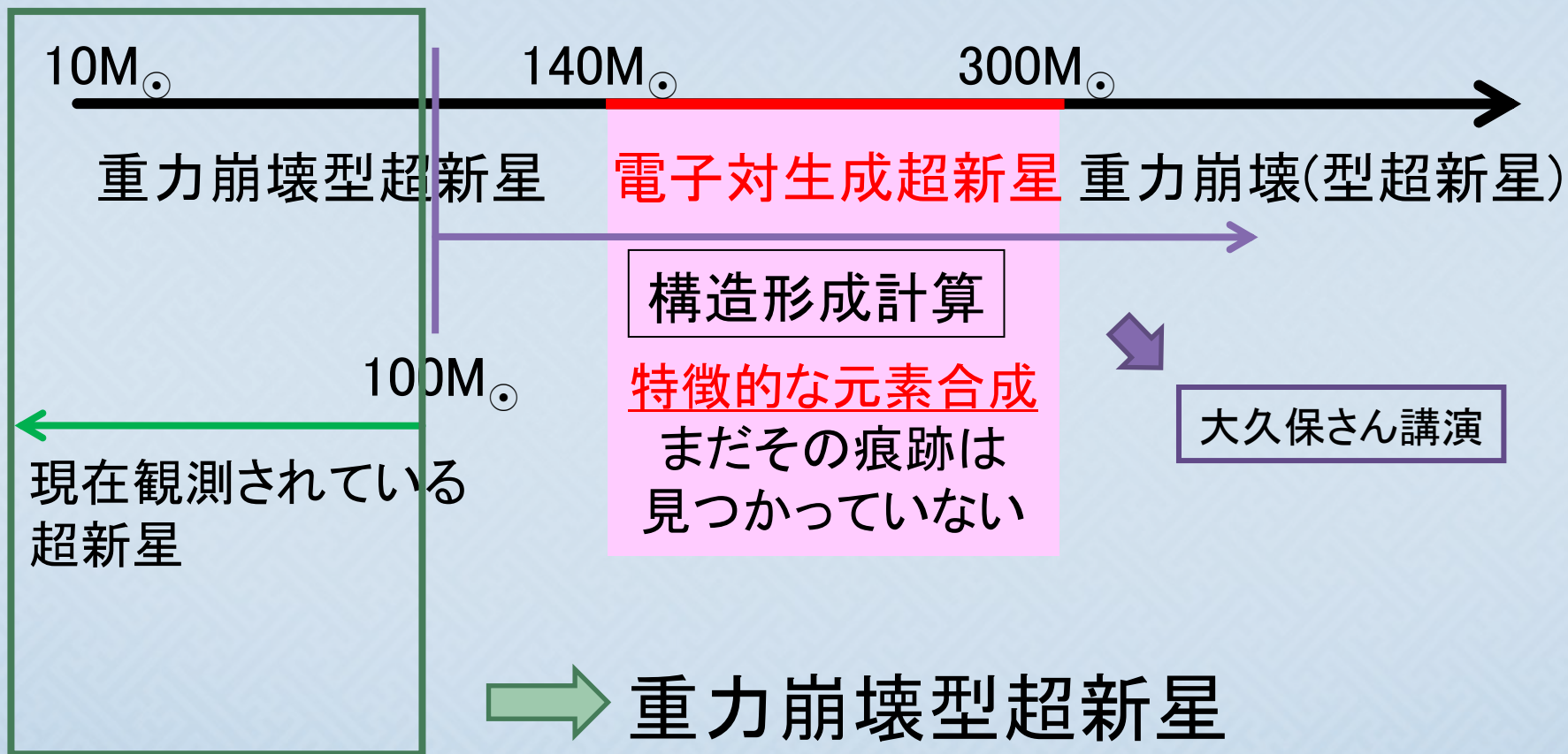


# 種族III星の超新星爆発

富永 望  
(国立天文台)

# 第一世代星

星の一生は質量によって決まる



# 重力崩壊型超新星

非常に明るい

$L \sim 10^{42} \text{erg/s} \sim 10^9 L_{\odot}$

エネルギー源  
衝撃波加熱

$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$  decay

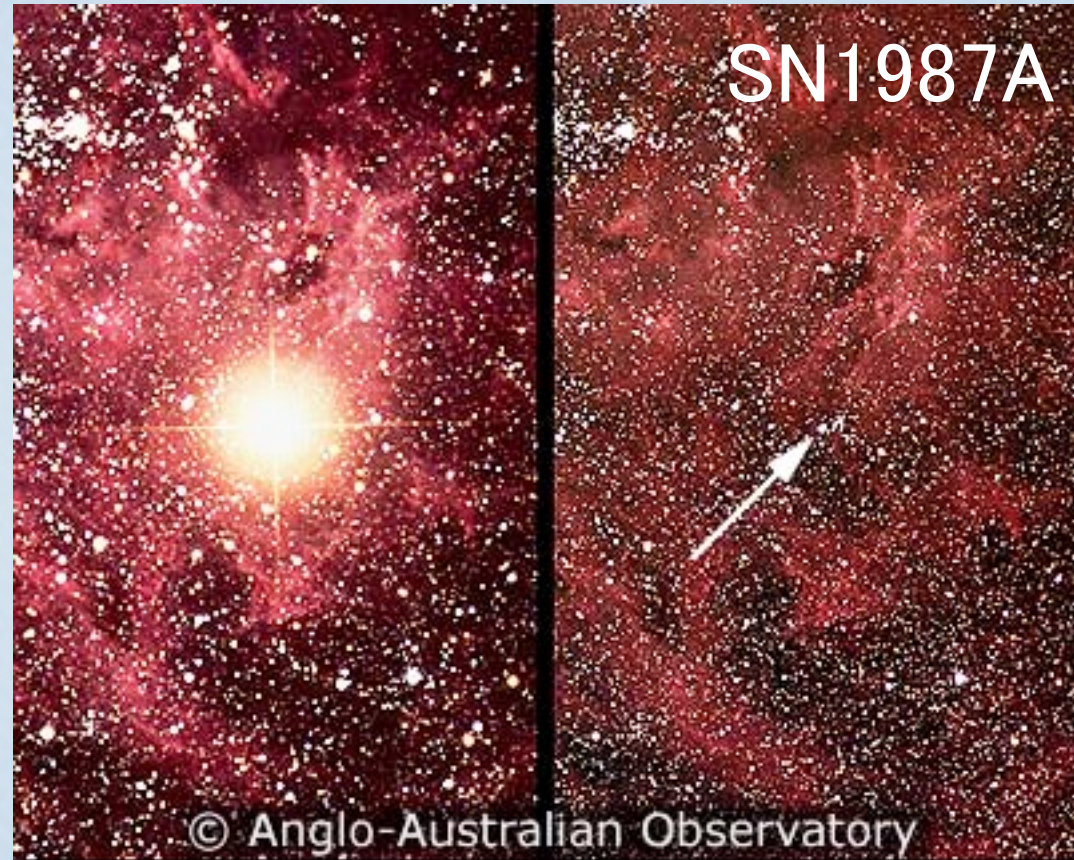
$M(^{56}\text{Ni}) \sim 0.07 M_{\odot}$

膨大なエネルギー

$E_K \sim 10^{51} \text{erg}$

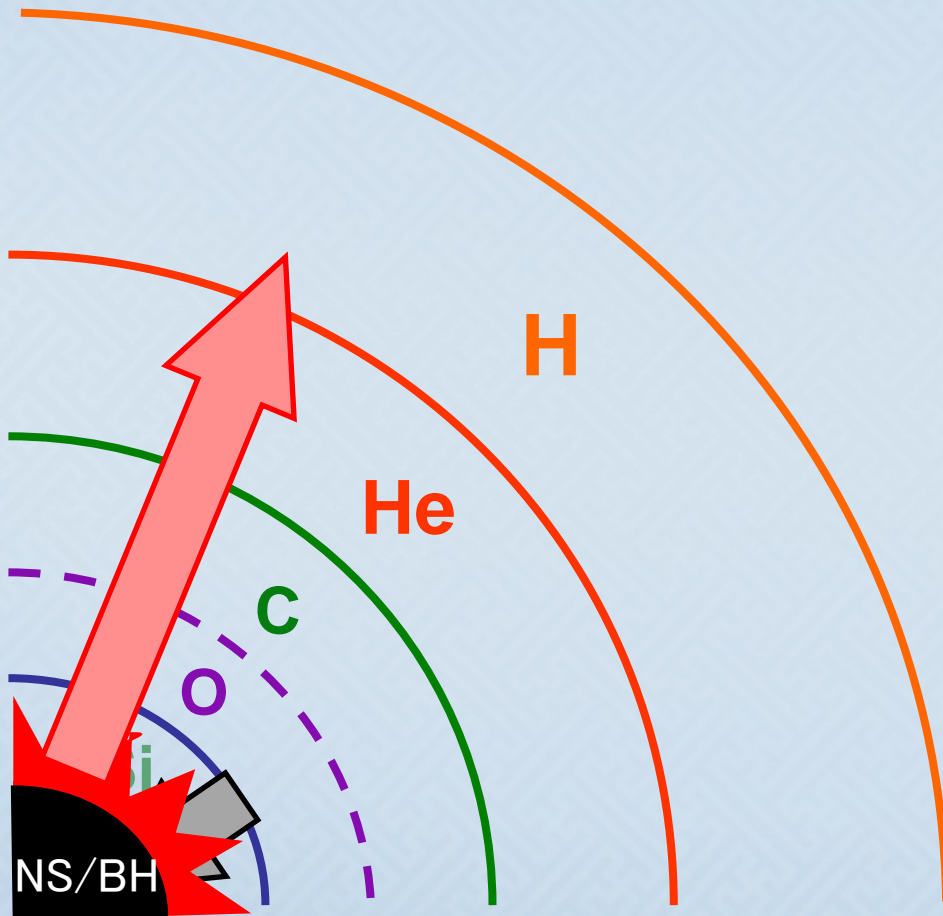
重力束縛エネルギー

$GM_{\odot}/R_{NS} \sim 10^{53} \text{erg}$



# 大質量星の進化

Massive Star ( $>10M_{\odot}$ )  
 $e^{-}$ -capture SNe ( $8-10M_{\odot}$ )



Temp [ $10^8$ K]	Burning Stage	Products
0.2	H	He
1.5	He	C, O
7	C	Ne, Mg
15	Ne	O, Mg
30	O	Si
40	Si	Cr, Mn
50	NSE	$^{56}\text{Ni}$



Core collapse driven by  
 Fe photodissociation  
 NS/BH formation  
 Energy deposition

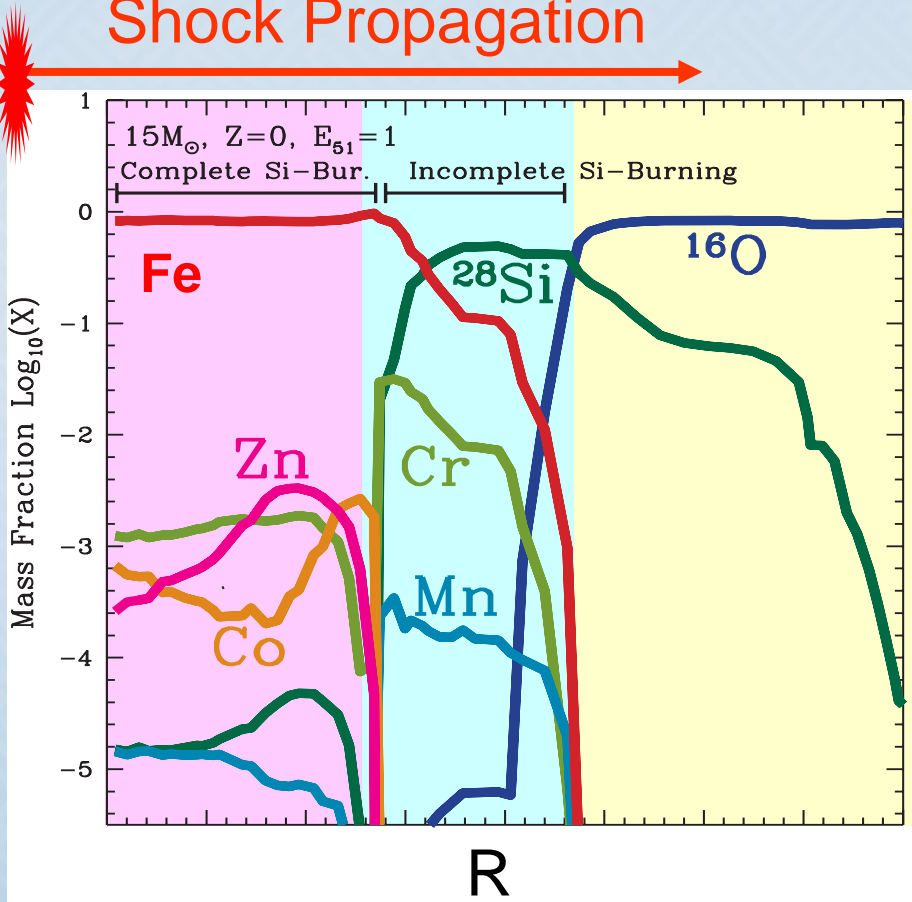
# 超新星爆発における元素合成

Post-shock Temperature

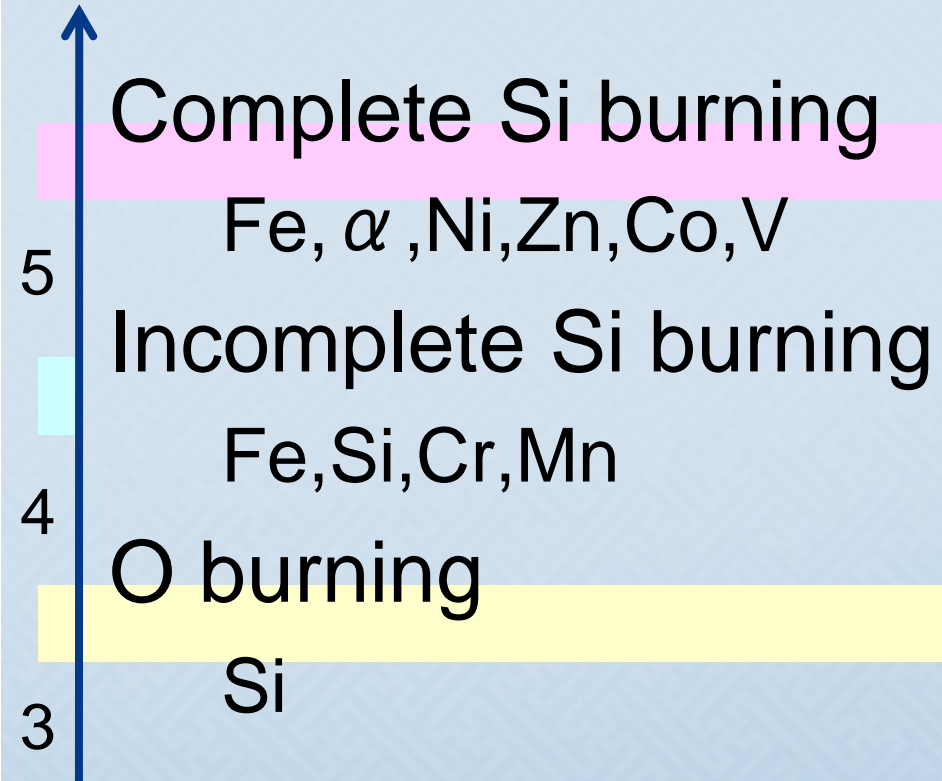
$$T \propto R^{-3/4} E^{1/4}$$

Shock Propagation

重い元素の合成  
高温 内側



温度 [10<sup>9</sup>K]



# 超新星爆発誘発星形成

(e.g., Shigeyama & Tsujimoto 1998)

超新星で放出された物質

(Fe, C, O, etc.)

と衝撃波で掃き集められた物質

(H, He)

の混合物質が衝撃波で圧縮されて  
星形成を起こす

H, He



ISM が metal-free であると、

単一のPop III SNにおける元素合成を反

映

# 次世代星の元素組成

$$[A/B] = \log \left( \frac{M_{ej}(A) + M_{sw}(A)}{M_{ej}(B) + M_{sw}(B)} \right) - \log(A/B)_{\odot}$$

$M_{ej}(X)$ : the ejected mass of an element X

$M_{sw}(X)$ : the swept-up mass of X ( $=X_{ISM}(X) \times M_{sw}$ )

In spherical symmetry (e.g., Shigeyama & Tsujimoto 98),

$$M_{sw} = 5.1 \times 10^4 M_{\odot} \left( \frac{E_0}{10^{51} \text{erg}} \right)^{0.97} n_1^{-0.062} \left( \frac{C_s}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-9/7}$$

Hence,  $M_{sw}(H, He) \gg M_{ej}(H, He)$ .

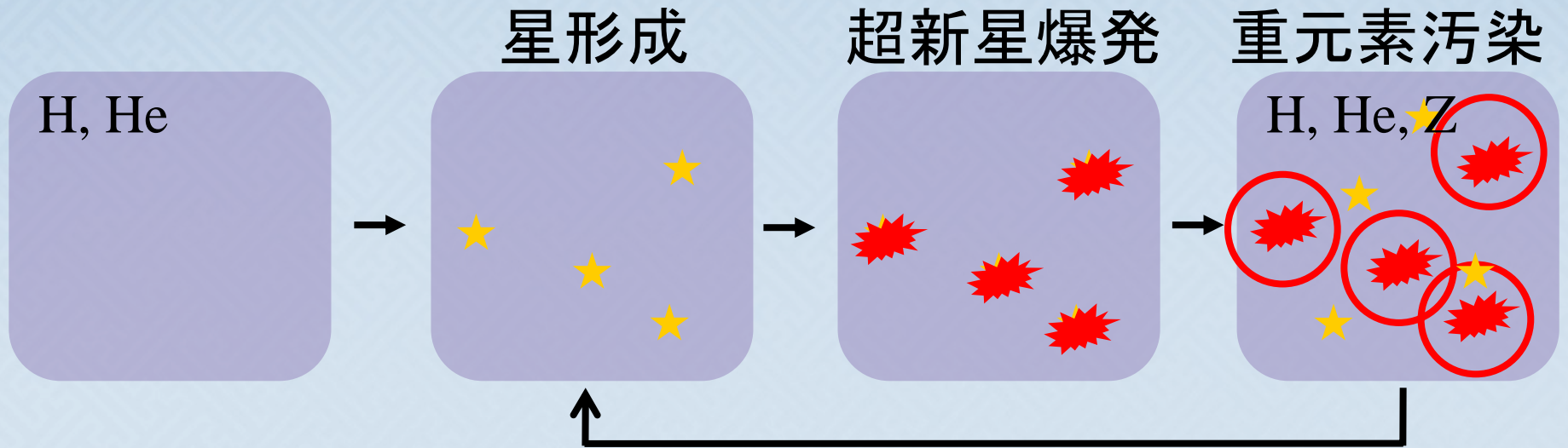
For low metallicity ( $M_{ej}(\text{metal}) \gg M_{sw}(\text{metal})$ ),

$$[A/H] \sim \log(M_{ej}(A)/M_{sw}(H)) + \text{con.}$$

$$[A/B] \sim \log(M_{ej}(A)/M_{ej}(B)) + \text{con.}$$

ISMがmetal-freeでなくても、**metal-poor環境**では  
次世代星の元素組成は一つの超新星元素合成を主に反映。

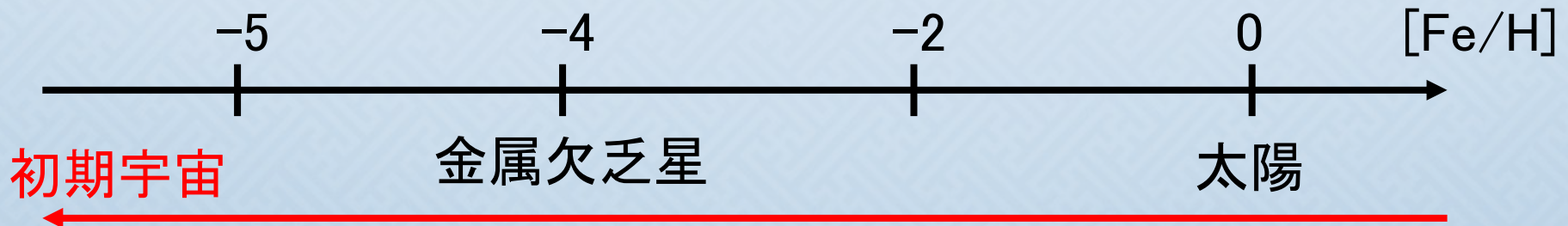
# 宇宙化学進化



時間とともに**金属量**が増える。

金属量: 時間の指標

$$[Fe/H] = \log(Fe/H) - \log(Fe/H)_{\odot}$$





# 初期宇宙の元素組成

- 最初の重元素汚染: 最初の超新星爆発
- 初期宇宙において: 単一の超新星における元素合成の影響が支配的 (Audouze & Silk 95)

## Metal-poor stars (金属欠乏星)

銀河系ハローにおいて発見  
初期宇宙の元素組成を反映

# 金属欠乏星

(e.g., Cayrel + 04; Honda + 04)

$[\text{Fe}/\text{H}] < -5$

Hyper Metal-Poor (HMP)

$[\text{Fe}/\text{H}] < -4$

Ultra Metal-Poor (UMP)

$[\text{Fe}/\text{H}] < -3$

Extremely Metal-Poor (EMP)

$[\text{Fe}/\text{H}] < -2$

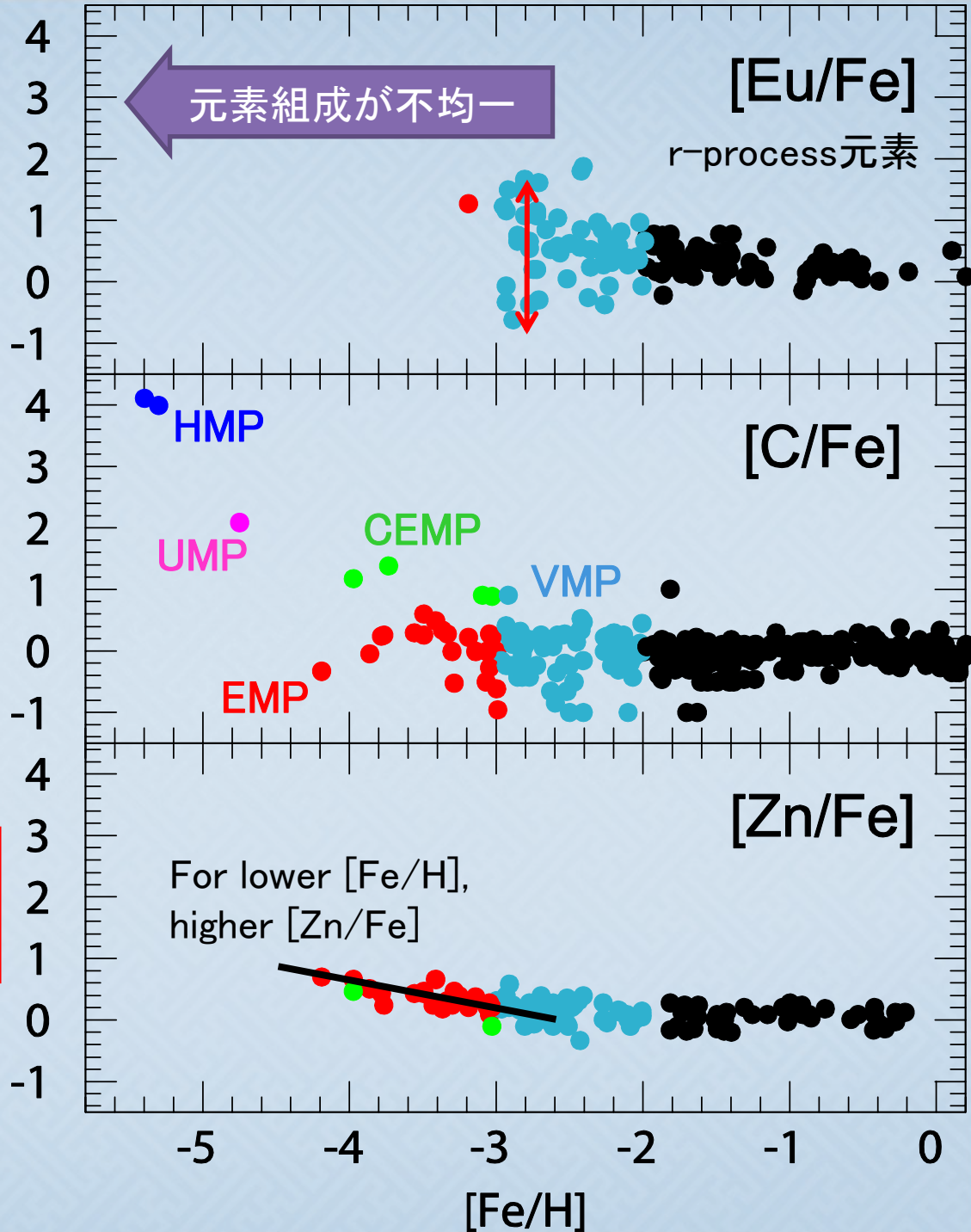
Very Metal-poor (VMP)

単一(少数)の超新星爆発  
における元素合成

$[\text{Fe}/\text{H}] > -3$ :

10個以上のSNの影響

(e.g., Tumlinson 06)



# 金属欠乏星の元素組成

(Cayrel + 04)

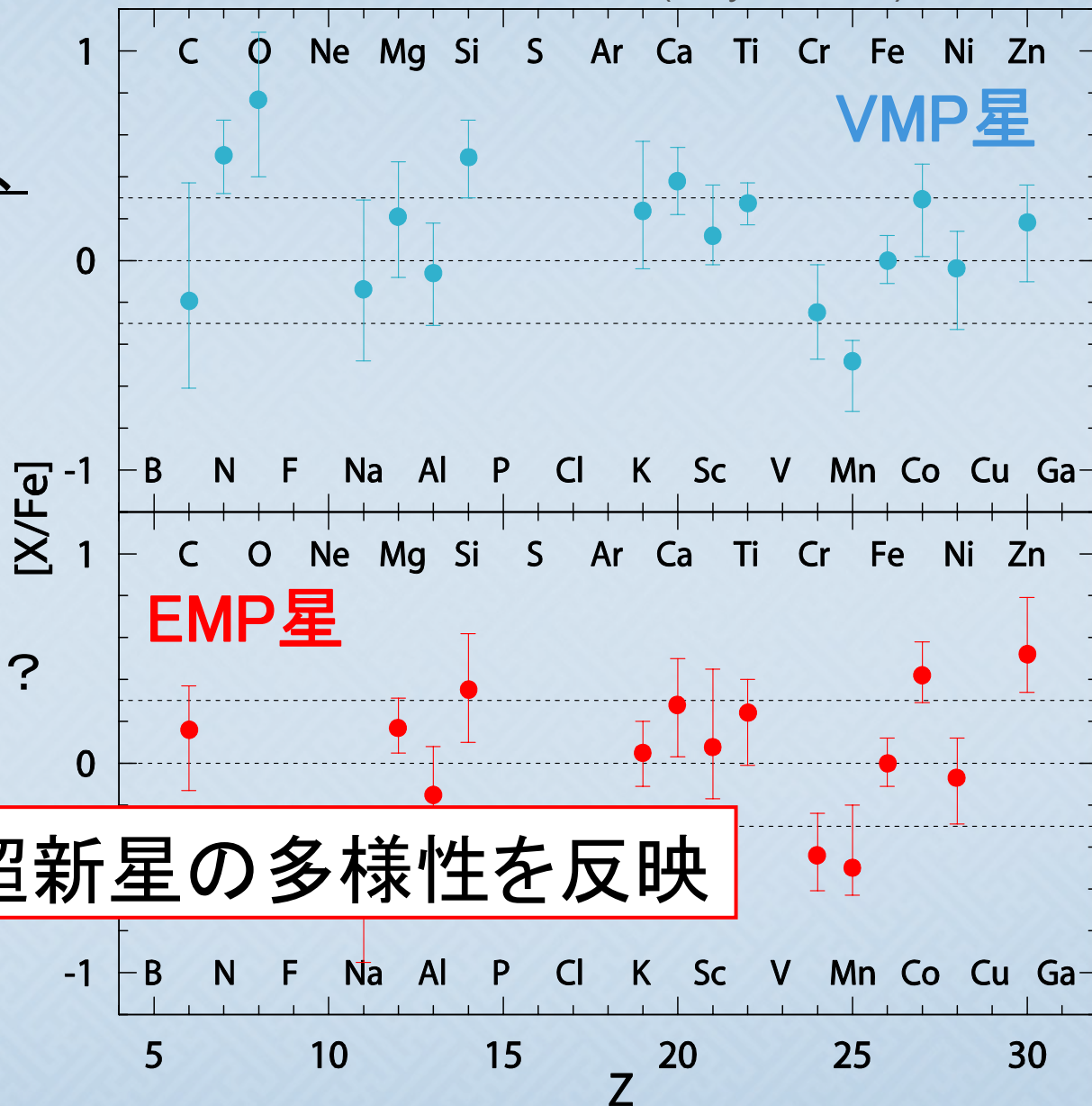
より低い金属量の星で、

[Zn/Fe] 高い

[Na/Fe] 低い



何に起因しているのか？  
金属欠乏星の起源は何か？



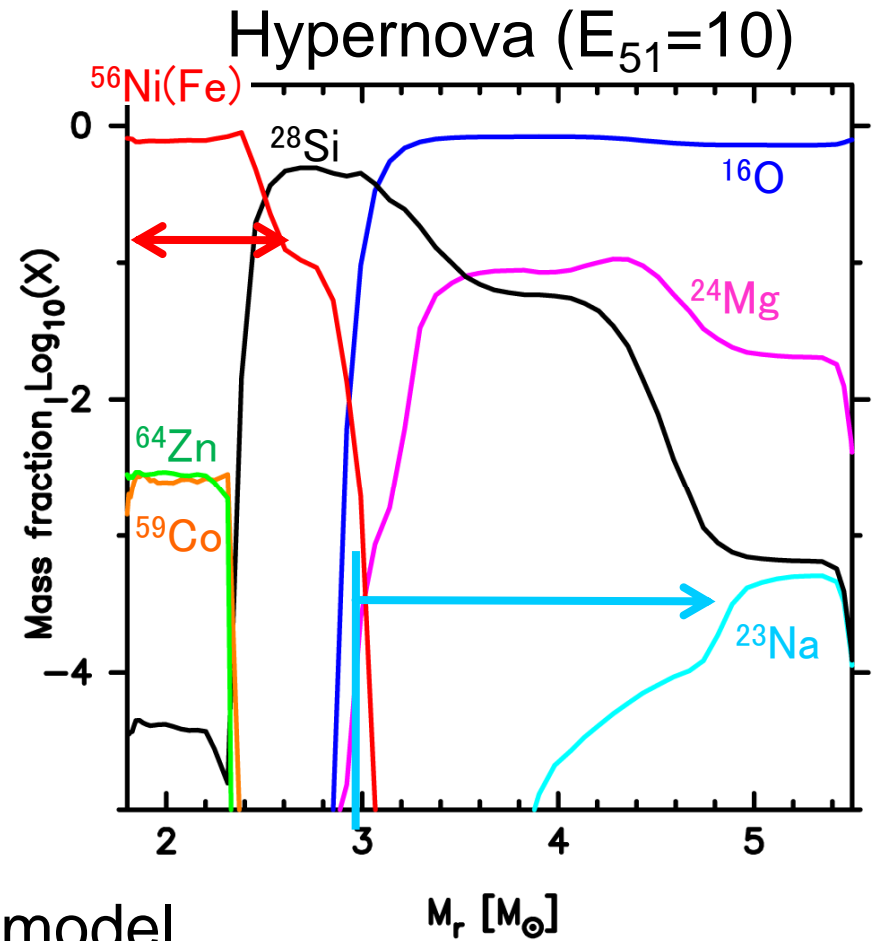
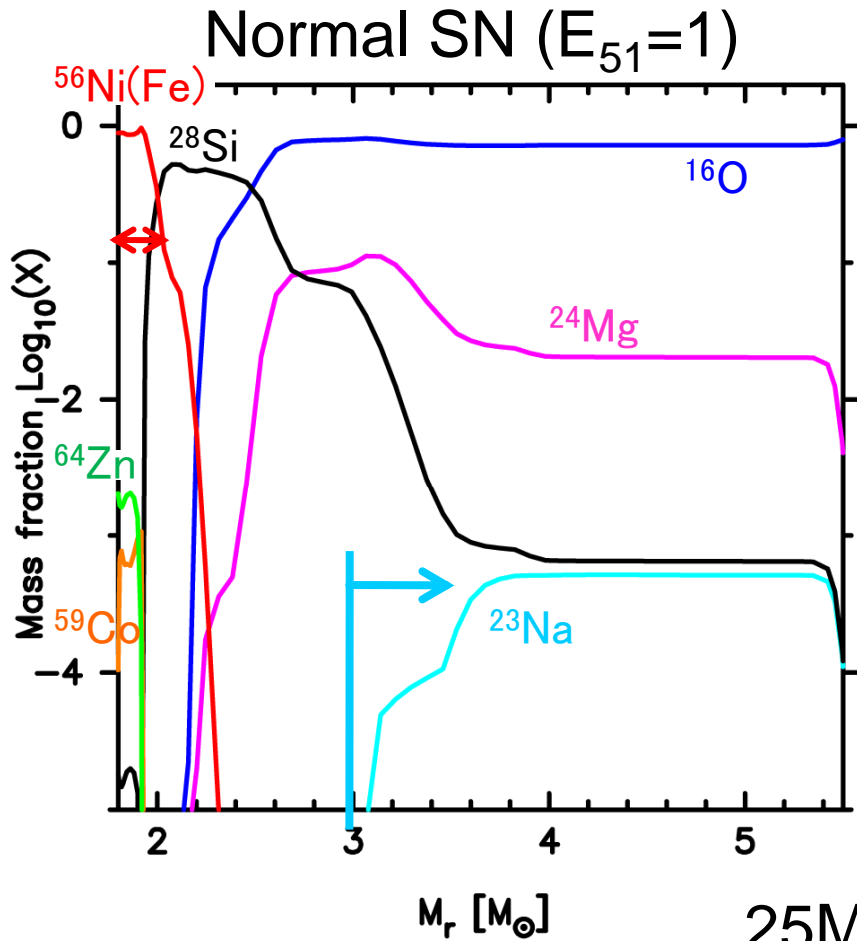
種族III超新星の多様性を反映

# High [Zn/Fe] & low [Na/Fe]の起源

-High entropy & high energy explosion-

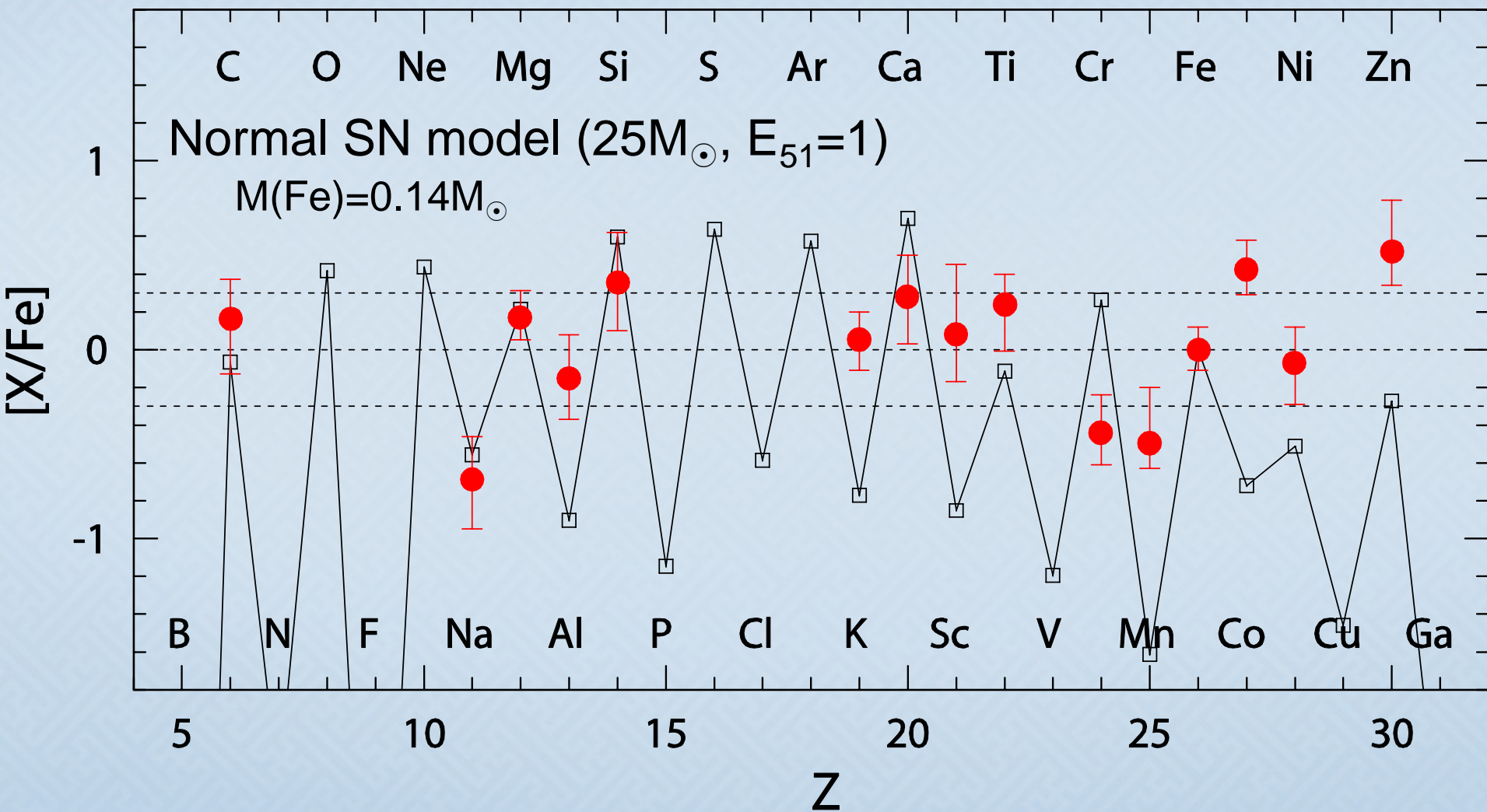
$$T \propto R^{-3/4} E^{1/4}$$

High E  $\rightarrow$  high [Zn/Fe] & low [Na/Fe]



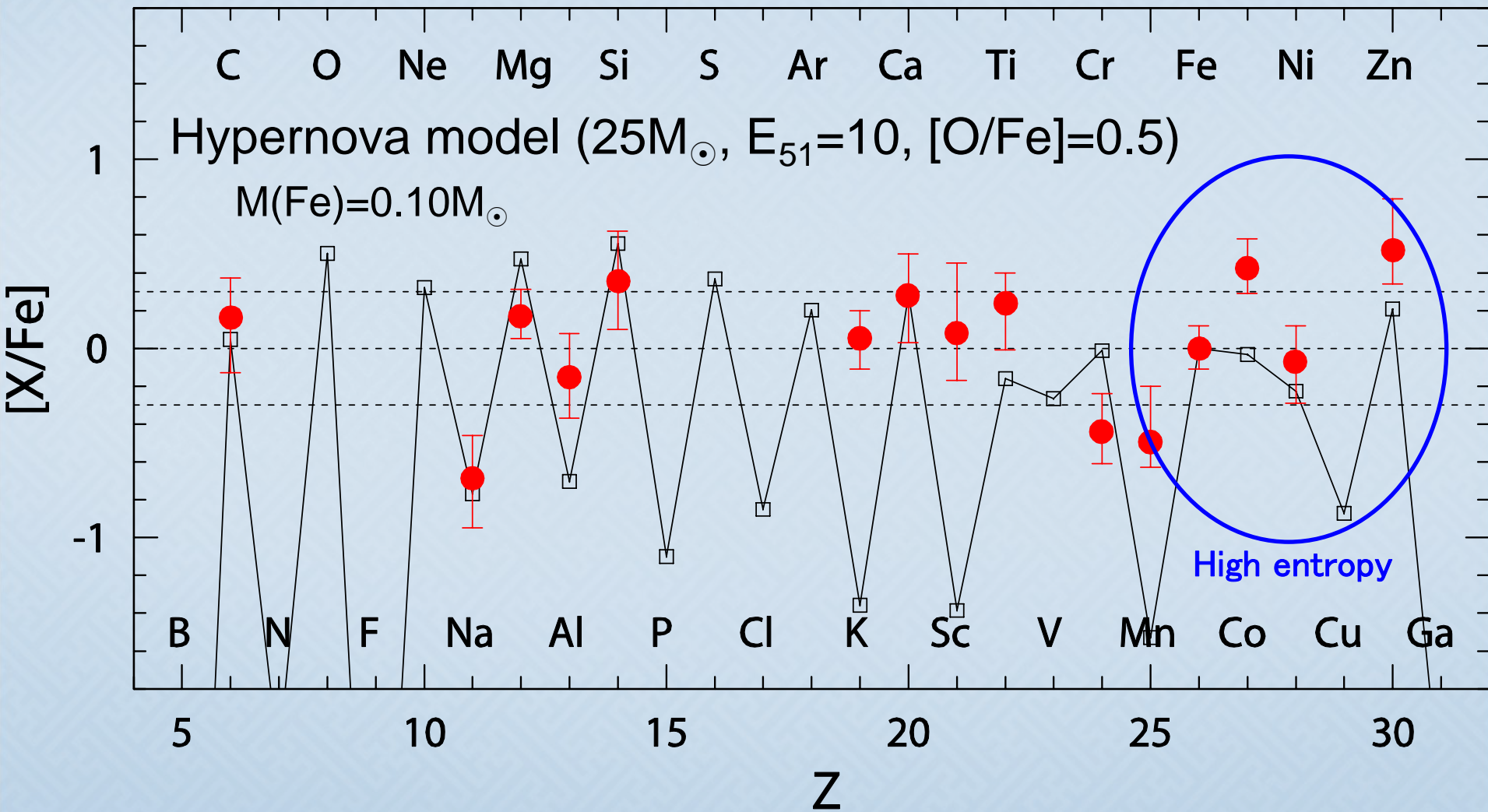
# Normal SN vs. EMP stars

EMP stars ( $-4.2 < [Fe/H] < -3.5$ )



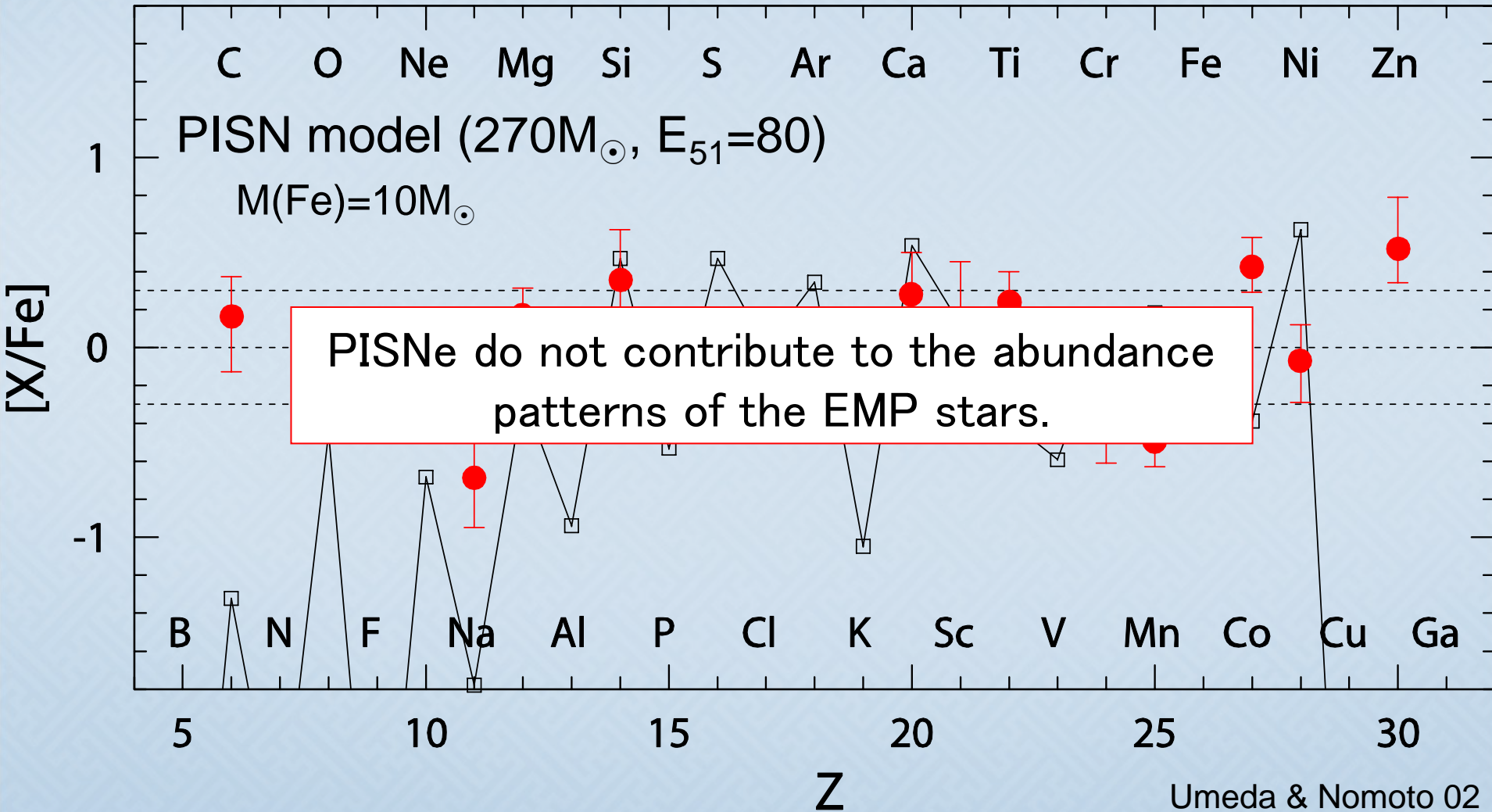
# Hypernova vs. EMP stars

EMP stars ( $-4.2 < [Fe/H] < -3.5$ )

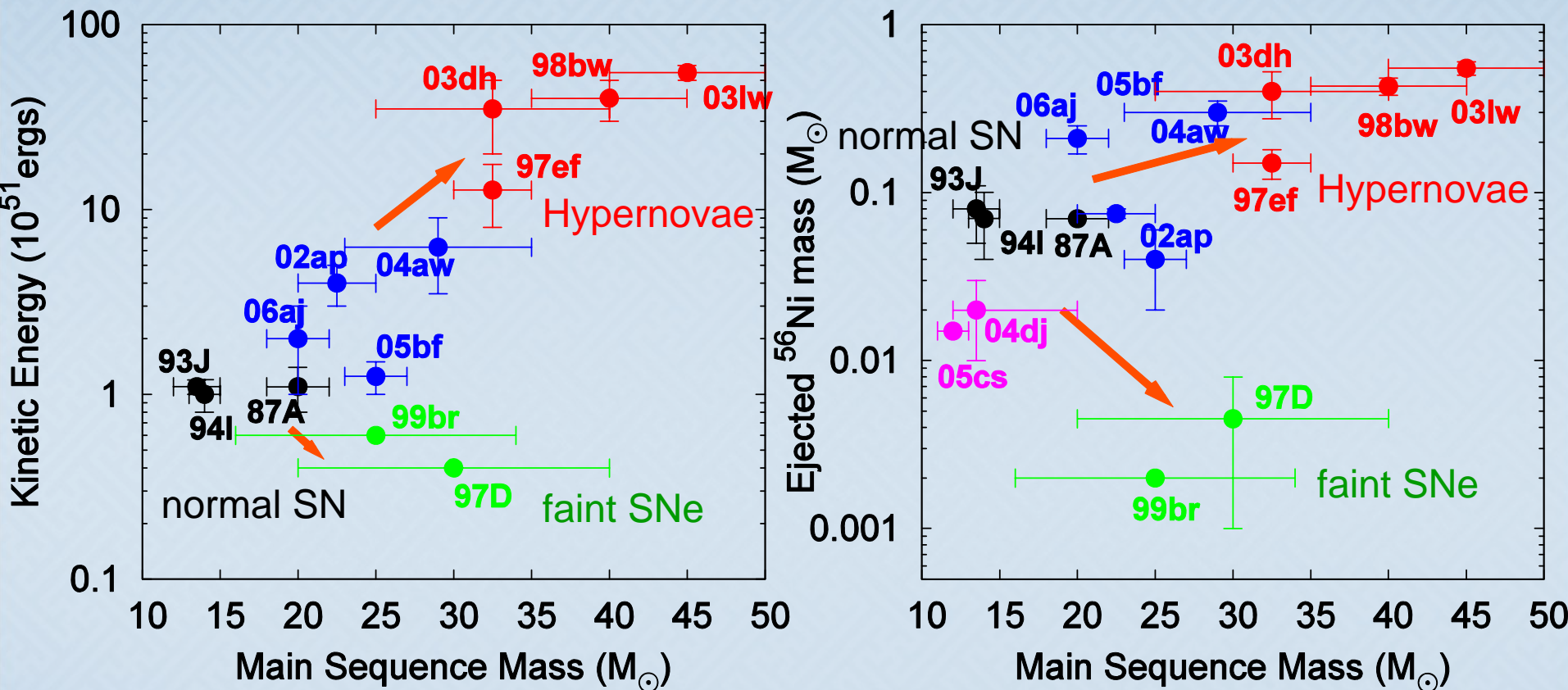


# Pair-instability SNe vs. EMP stars

EMP stars ( $-4.2 < [Fe/H] < -3.5$ )



# 重力崩壊型超新星の多様性



Hypernovae:  $M_{\text{ms}} > 25M_{\odot}$ ,  $E > 10^{52}$  ergs,  $M(^{56}\text{Ni}) \sim 0.1 - 0.6M_{\odot}$

Normal SNe:  $M_{\text{ms}} < 25M_{\odot}$ ,  $E \sim 10^{51}$  ergs,  $M(^{56}\text{Ni}) \sim 0.07M_{\odot}$

Faint SNe:  $M_{\text{ms}} > 20M_{\odot}$ ,  $E < 10^{51}$  ergs,  $M(^{56}\text{Ni}) \sim 0.001 -$

$0.01M_{\odot}$

( $\rightarrow$ CEMP星)



# 次世代星の[Fe/H]

$$M_{\text{sw}} = 5.1 \times 10^4 M_{\odot} \left( E / 10^{51} \text{ erg} \right)^{0.97} \left( n / 1 \text{ cm}^{-3} \right)^{-0.062} \left( C_s / 10 \text{ km s}^{-1} \right)^{-9/7}$$

(Shigeyama & Tsujimoto 98)

(PISNe:  $E \sim 10\text{--}80 \times 10^{51} \text{ ergs}$ ,  $M(\text{Fe}) \sim 1\text{--}30 M_{\odot}$ )

Hypernovae:  $E > 10^{52} \text{ ergs}$ ,  $M(\text{Fe}) \sim 0.1\text{--}0.6 M_{\odot}$

Normal SNe:  $E \sim 10^{51} \text{ ergs}$ ,  $M(\text{Fe}) \sim 0.07 M_{\odot}$

Faint SNe:  $E < 10^{51} \text{ ergs}$ ,  $M(\text{Fe}) \sim 0.001\text{--}0.01 M_{\odot}$

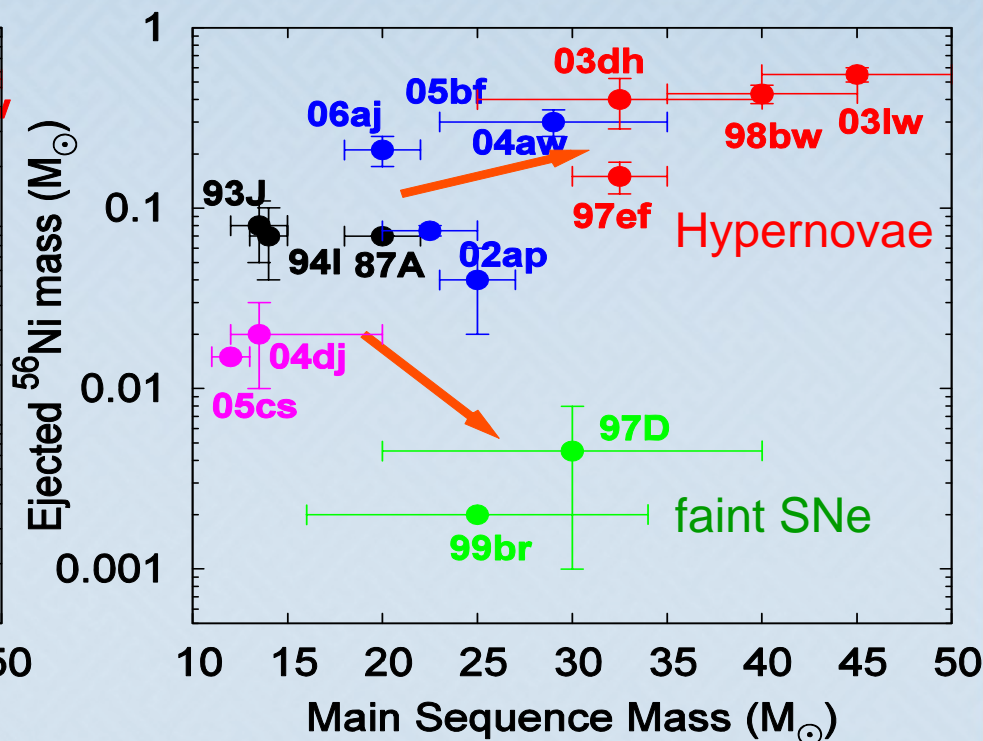
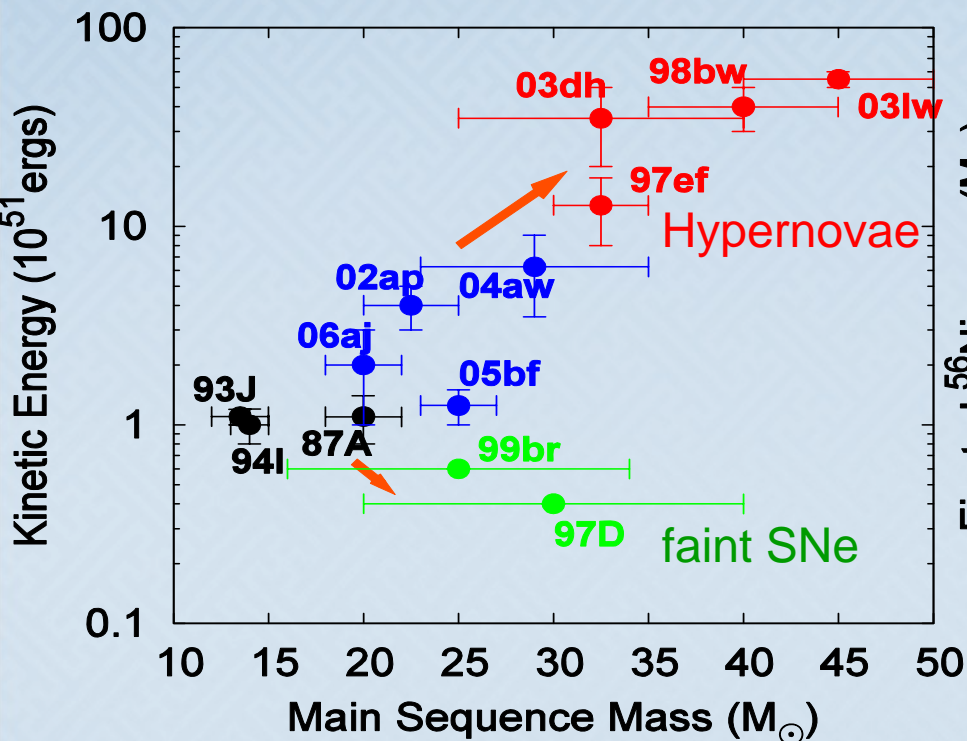
## 典型的な[Fe/H]

(PISNe)  $>$  Normal SNe  $>$  Hypernovae  $\sim$  Faint SNe  
( $\sim -1$ )                      VMP                      EMP                      CEMP

## Trends of [Zn/Fe], [Na/Fe] vs. [Fe/H]

High [Zn/Fe] かつ low [Na/Fe]であるHNは、  
[Fe/H]の低いEMP星に寄与。

# 重力崩壊型超新星の多様性



8モデル( $M_{\text{ms}}$ )で球対称流体元素合成計算

$M_{\text{ms}}/M_{\odot}$	13	15	18	20	25	30	40	50
$E/10^{51}\text{erg}$	1	1	1	10	5,10	20	30	40
$M(\text{Fe})/M_{\odot}$	0.07	0.07	0.07	0.08	0.1	0.2	0.3	0.6

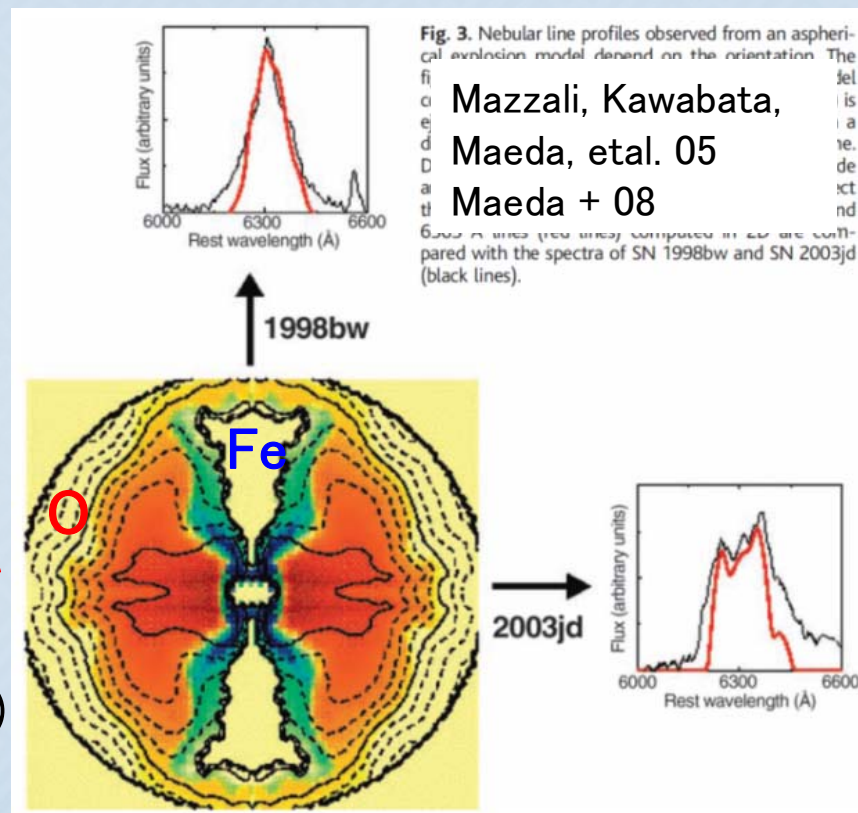
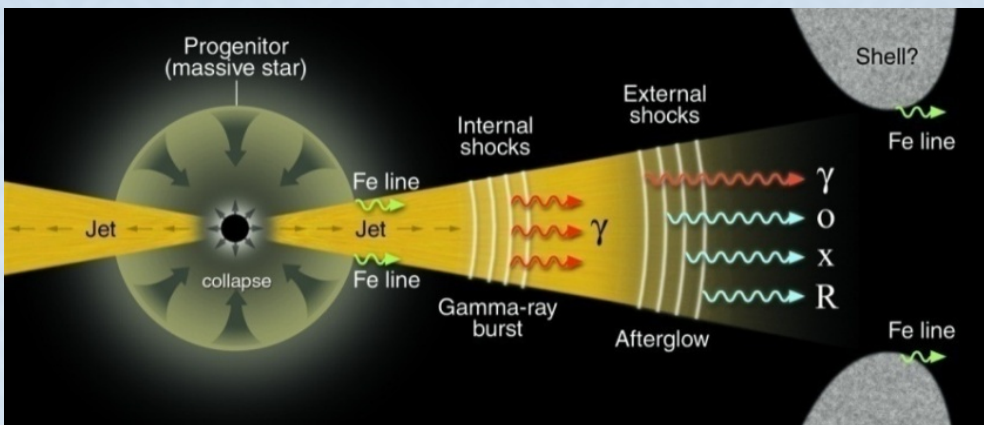
# Hypernova $\Rightarrow$ Aspherical explosion

## Gamma-ray bursts association

相対論的ジェットを伴う爆発

## Hypernovae

超新星爆発の後期観測



全ての重力崩壊型超新星が非球対称である(と考えるても矛盾がない)。

(e.g., Maeda + 08)

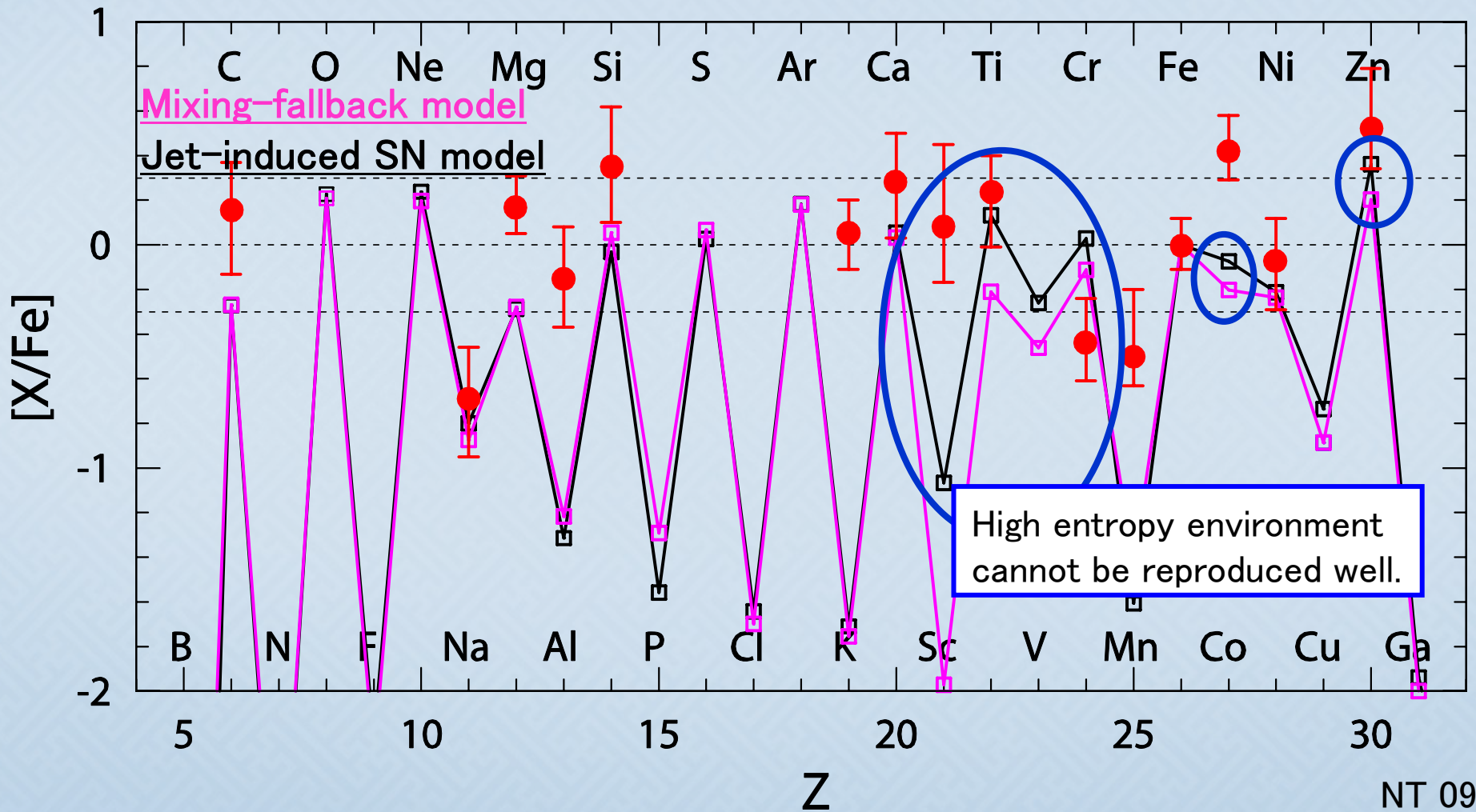
とりあえず、Hypernovaにのみ非球対称性を考慮する。

$f$  Jet

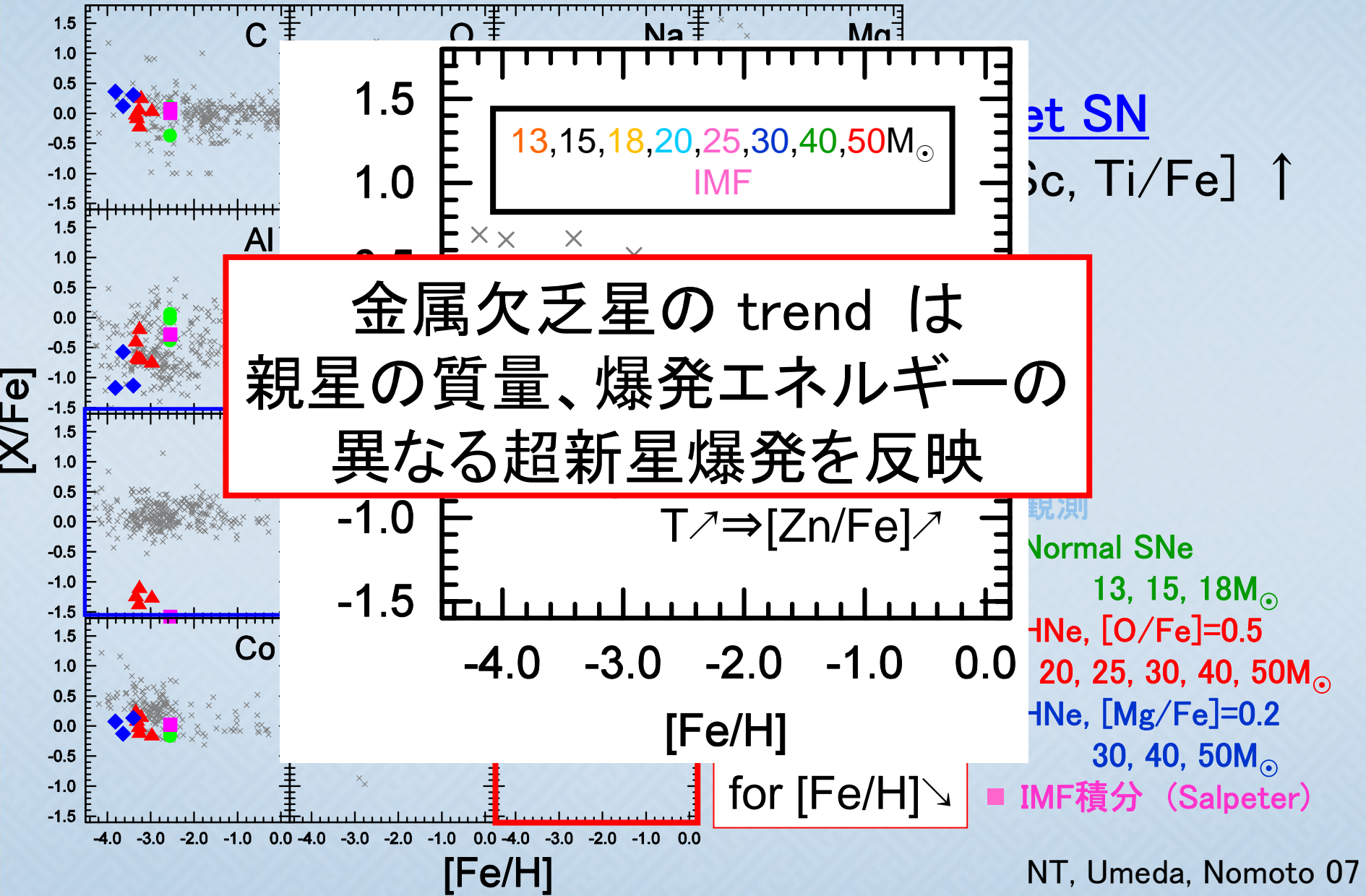
$M_{out}$



# Mixing-fallback model vs. Jet-induced SN model



# Trends of abundance ratios



# まとめ

- 種族III星の超新星爆発：重力崩壊型超新星
  - PISN：痕跡なし → 存在しなかった？見つからない？
  - PISN： $M(\text{Fe}) \sim 10M_{\odot}$ ： $M(\text{H}) \sim 10^5M_{\odot}$  で  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$
- 金属欠乏星を再現する種族III超新星
  - 現在の超新星( $M_{\text{ms}} < 100M_{\odot}$ )と矛盾しない。
    - **EMP星：Hypernova**
    - **VMP星：Normal SN or IMF-integration**
  - $300M_{\odot}$ 以上の重力崩壊型超新星の寄与についてはこれから。
- 種族III超新星の多様性 ⇔ 金属欠乏星の多様性
- 詳細は天文月報9月号EUREKAで。

EUREKA \*\*\*\*\*

超新星爆発と宇宙初期の元素組成

富 永 望

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: nozomu.tominaga@nao.ac.jp