

---

# 超金属欠乏星と 初代星・銀河形成

小宮 悠(東北大)

須田拓馬、羽部朝男、藤本正行(北大)

# 超金属欠乏星

---

## ✦ EMP(Extremely Metal-Poor) stars

- $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -2.5$
- 銀河系ハローで観測される
  - ◆ HK survey, HES survey, SEGUE,...

(球状星団、矮小銀河は $[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -2.5$ )

### ◆ ...と初代星

- 初代星のyield
- 初代星の生き残りがいるか？(HMP star)

### ◆ ...と銀河形成

- 原始銀河の化学進化、星形成史



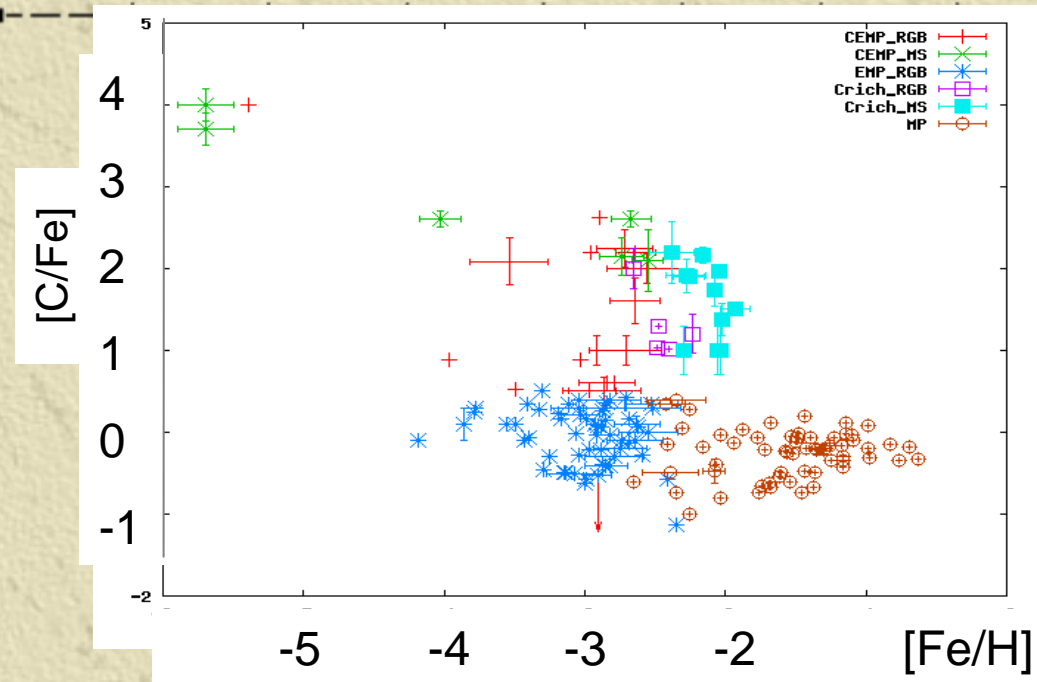
# CEMP star

(Carbon Enhanced Metal-Poor star)

EMP star の~20%が  
炭素過剰な  
CEMP star  
(Pop.II starでは~1%)

CEMP starのうち  
~3/4 はs-process rich  
: **CEMP-s**

~1/4 はs-process  
: CEMP-nos

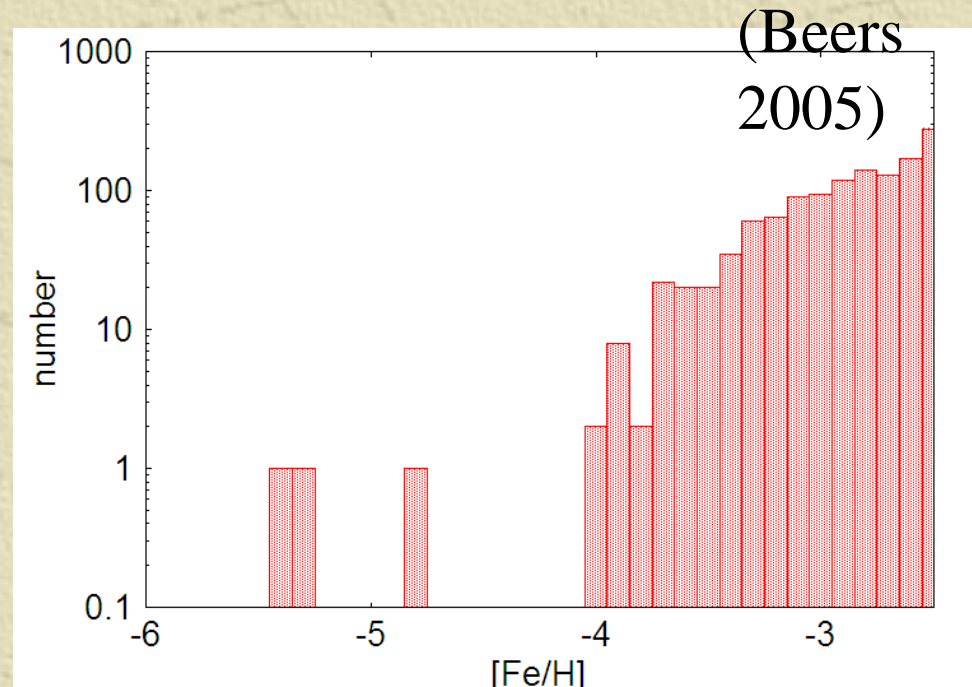


# Metallicity Distribution Function

[Fe/H]  $\geq$  -4 では  
滑らかに分布

[Fe/H] < -4 は少数  
(metallicity desert ?)

[Fe/H] < -4.5 の星 3 個





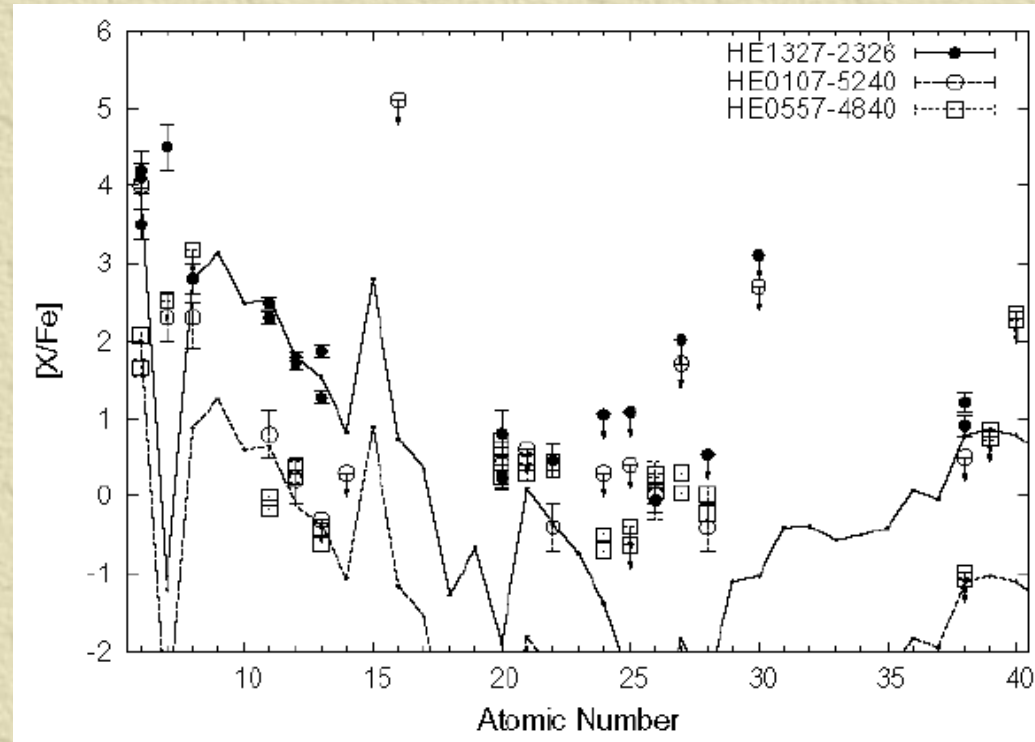
# HMP (Hyper metal-poor) star

Nishimura+

[Fe/H] < -4.5 の星

3天体

- HE0107-5240,  
[Fe/H] = -5.3 (Christlieb+  
2002)
- HE1327-2326,  
[Fe/H] = -5.4 (Frebel+ 2005)
- HE0557-4840,  
[Fe/H] = -4.8 (Norris+ 2007)



# 超金属欠乏星組成の理論

---

## ☀ 恒星進化

- ◆ He-flash driven deep mixing (Suda+ 2004)
- ◆ Rotation induced mixing (e.g. Maynet+ 2006)

## ☀ 連星の影響

- ◆ CEMP stars ← AGBになった伴星からの質量輸送
- ◆ 超新星との連星 → r-process 組成に影響

## ☀ 星形成、IMFの違い

- ◆ High-mass IMF
- ◆ 超新星による星形成 (Thujimoto+1999, Machida+2005)  
(Thujimoto+1999, Machida+2005)

## 様性

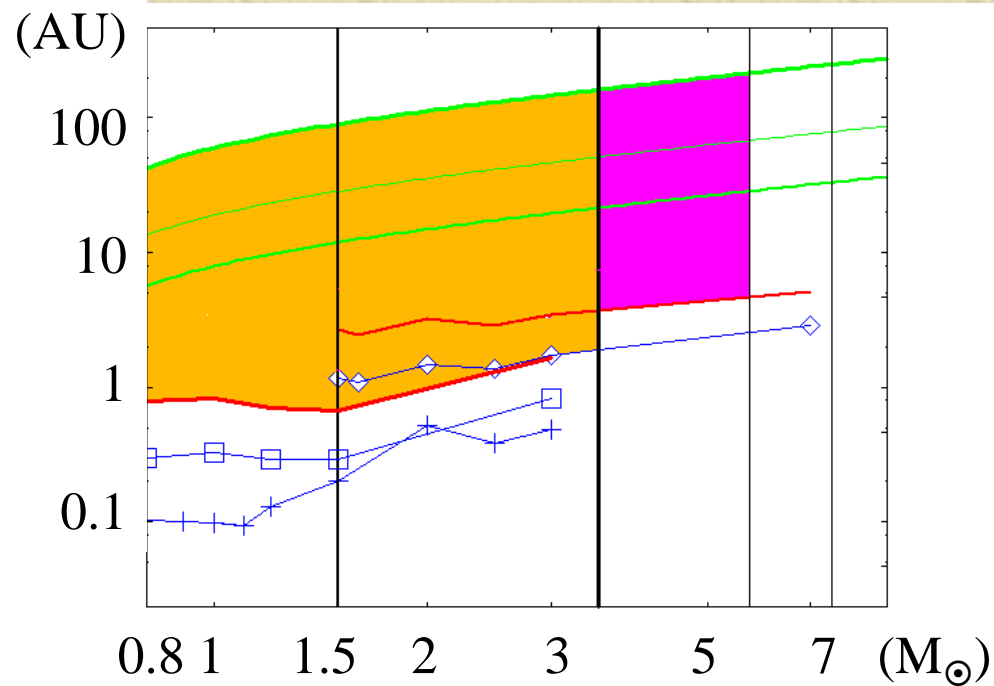
々の超新星の組成が現れる(Argast+ 2000, Oey 2000)  
, Oey 2000)



# 連星の影響

~ CEMP star ~

初期軌道半径(AU)



主星の初期質量

中質量星との連星で、  
軌道半径<100AUの星  
はstellar windによる  
mass transferで  
CEMP starになる。

恒星進化理論から  
主星<3 $M_{\odot}$ だと炭素合成と  
同時にs-processもおきる  
⇒主星質量によって  
s-process組成に違い

# IMFの違い

Komiya+(2007)

観測の統計から

1. EMP starの20~25% CEMP.  $\leftarrow$   $0.8\sim 6M_{\odot}$ の星との連星  
(Population II では1%)

2. CEMPの1/3~1/4 CEMP-nos.  $\leftarrow$   $3.5\sim 6M_{\odot}$ の星との連星



中質量星が多かった

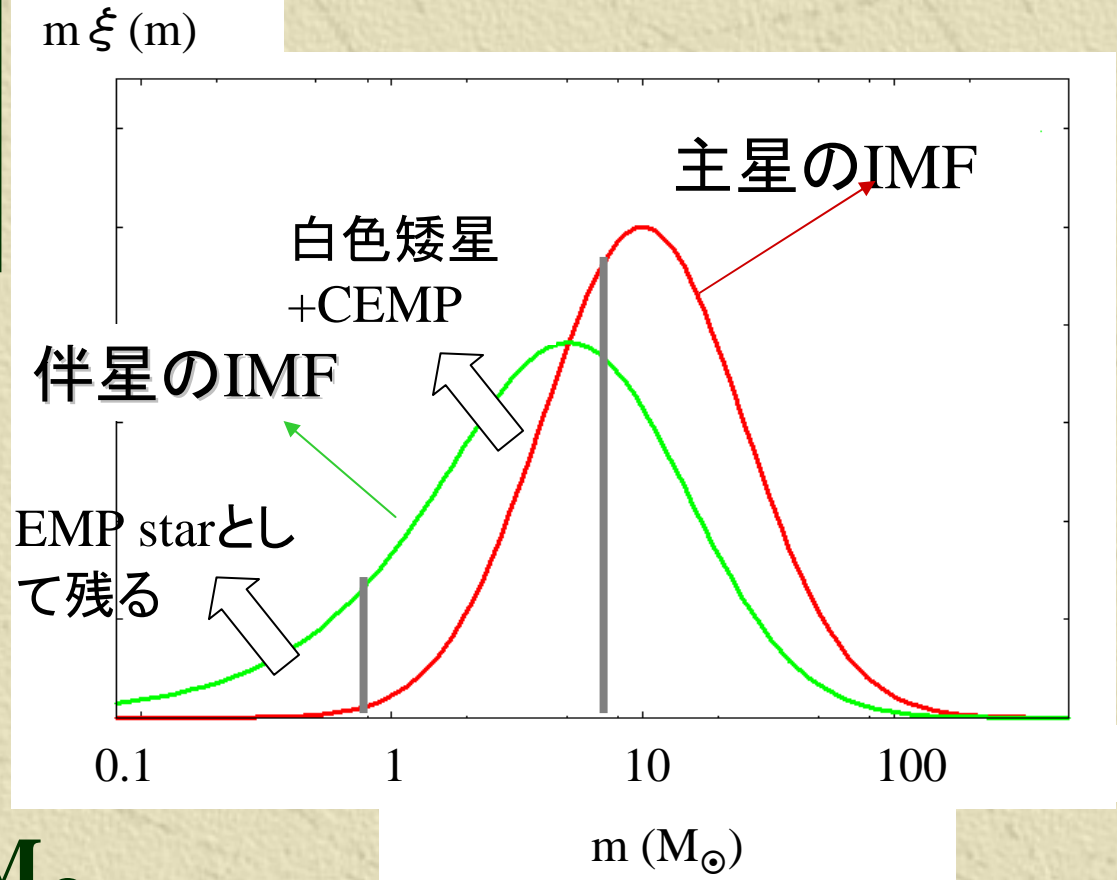


IMFが違った.



# IMF

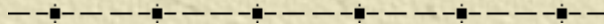
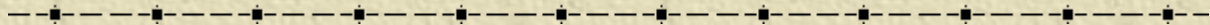
Lognormal IMF,  
質量比分布  $n(q)=1$   
を仮定すると



IMFのピークは $10M_{\odot}$

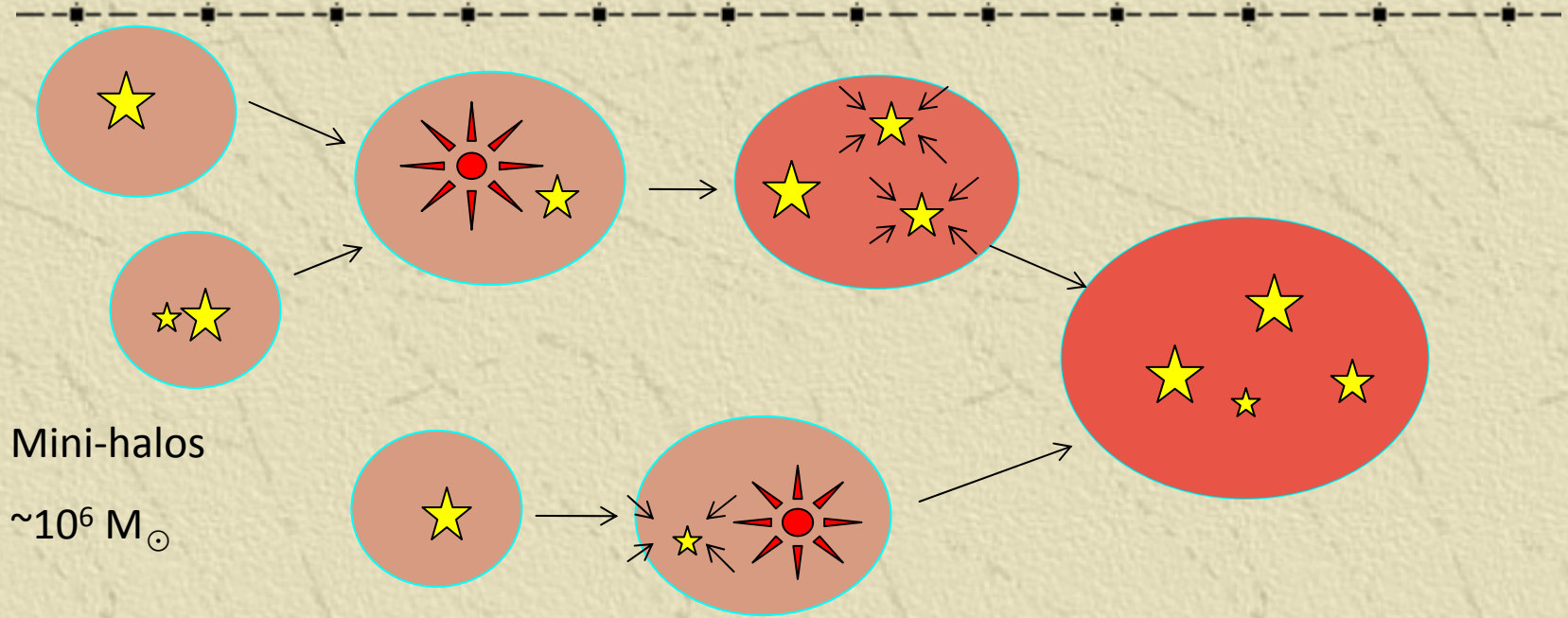
EMP starの多くは伴星として生まれた

# 超金属欠乏星と 銀河形成





# 階層的化学進化



## 構造形成 + 化学進化 + 表面組成変化

Extended Press-Schechter  
(Somerville & Kollat 1999)  
 $T_{\text{vir}} > 10^3 \text{K}$ で星形成

各mini-haloで独立  
に進化すると仮定  
Massive IMF  
Type II supernova

星間物質降着。  
連星質量輸送。

# 仮定

- 
- ✦ Merger tree : Somerville & Kollat (1999)
    - Total mass:  $10^{12}M_{\odot}$ ,  $T_{\text{vir}} > 1000\text{K}$ のハローで星形成
  - ✦ 個々のハローは独立,ハロー内は一様組成
  - ✦ 大質量星の寿命 : Schaerer (2002)
  - ✦ Iron yield : Umeda & Nomoto (2002) ( $0.07M_{\odot}$  /SN)
  - ✦ 星形成効率  $10^{-10}/\text{yr}$  で一定 ( $10^{-9}/\text{yr}$ ,  $10^{-11}/\text{yr}$ )
    - ✦ 各Mini haloで最初の大質量星形成から、その星の爆発までは星形成なし。
  - ✦ IMF :
    - ◆  $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ では、 $\xi(\log m) \propto \exp\left(-\frac{(\log(m / 10M_{\odot}))^2}{2 \times 0.33^2}\right)$
    - ◆  $[\text{Fe}/\text{H}] > -2.5$ では、現在と同じIMF (Chabrier et al.2003)
    - ◆ 半分は連星
    - ◆ 連星系の質量比 $q(=m_2/m_1)$ 分布  $n(q)=\text{const.}$

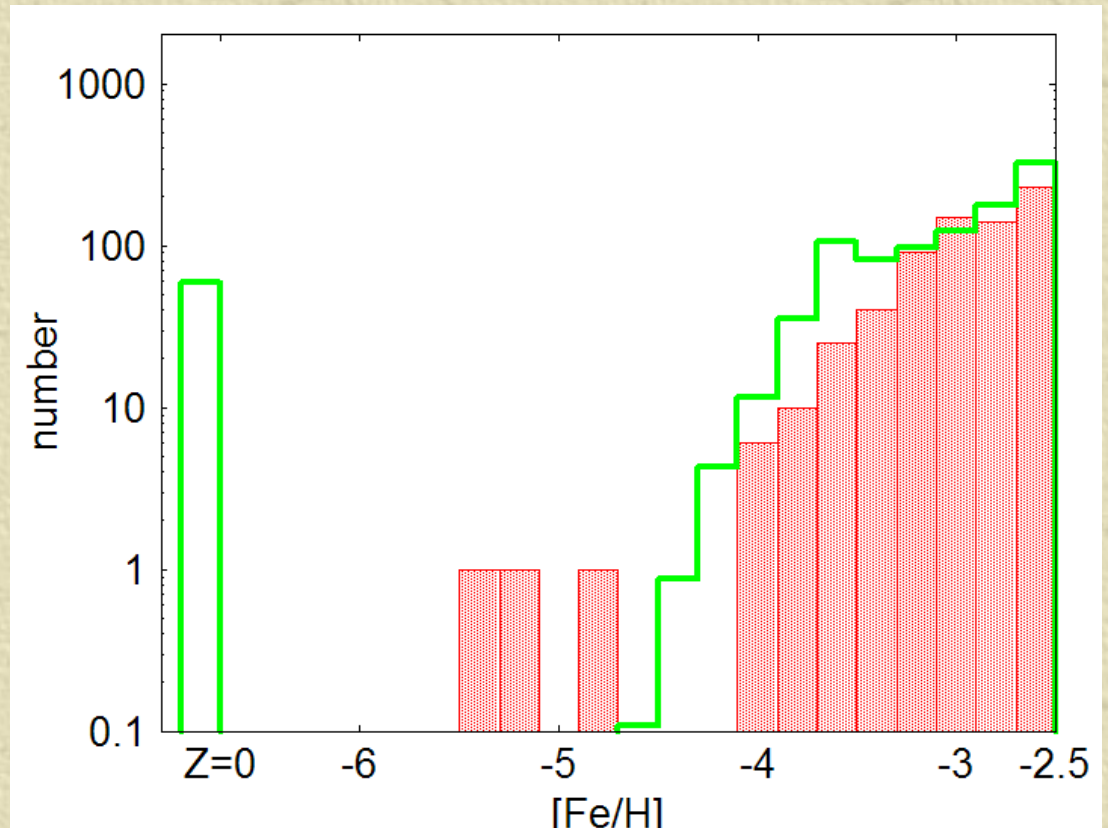


# 結果

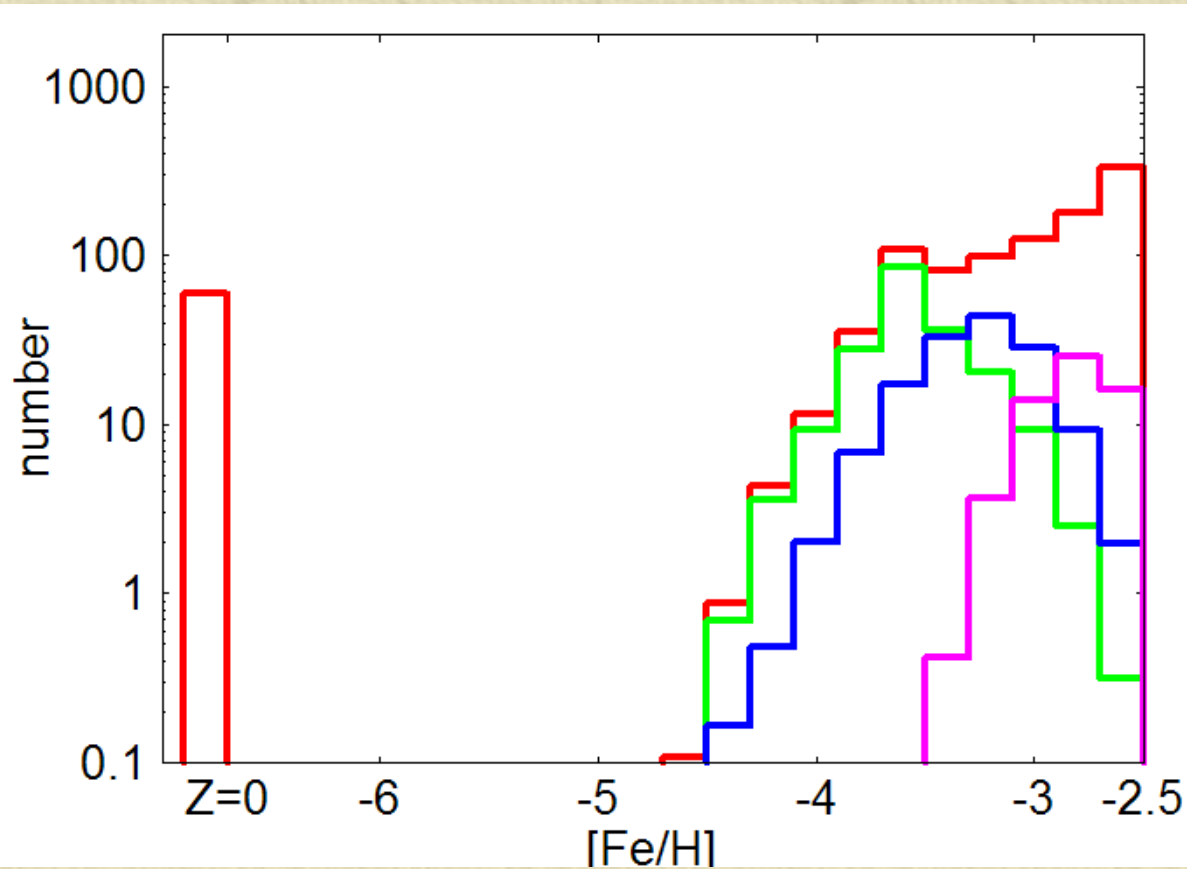


## HES survey での MDFと比較

- 視野 6900 deg<sup>2</sup>
- 40%の星をfollow up
- 空間分布は
  - 視野方向の  
Giant は全て  
(haloの端まで)  
見える
  - 方向分布は一様



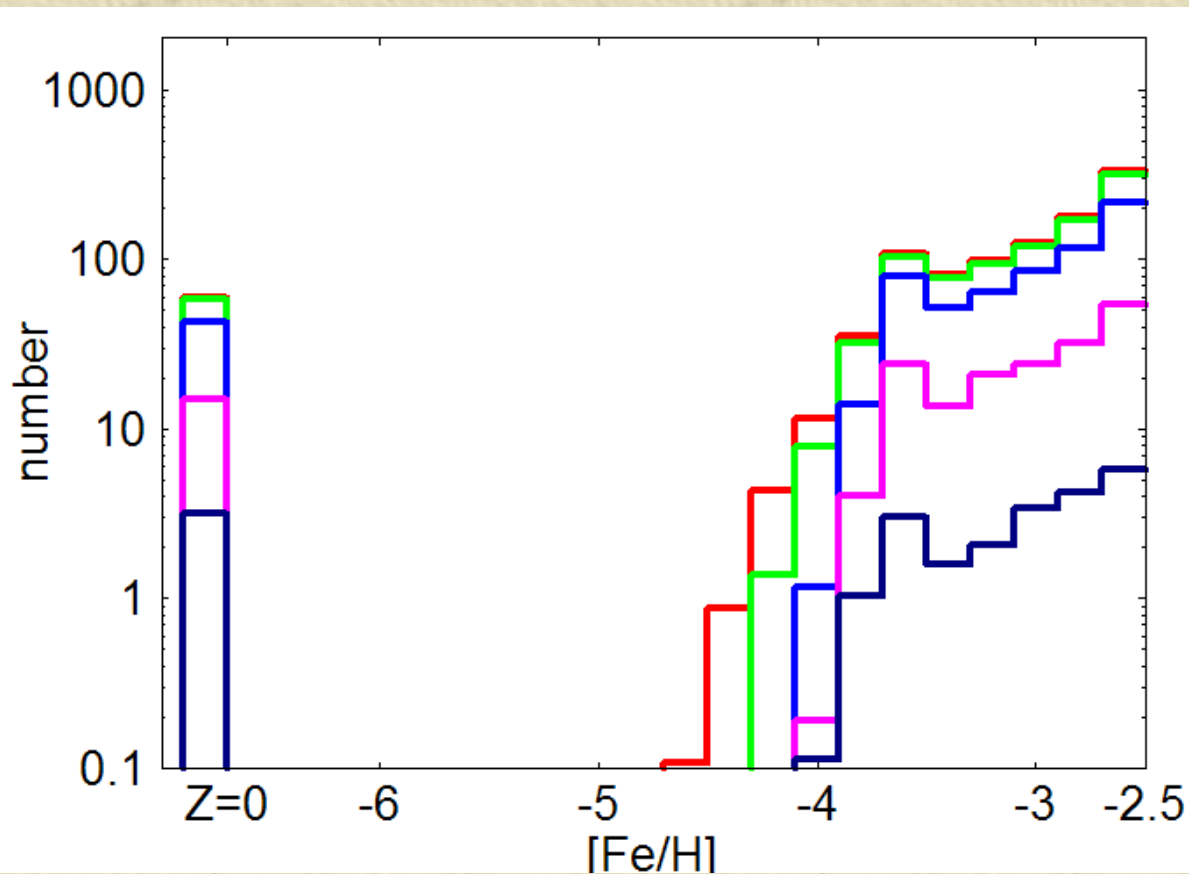
# 超新星



1発SNのあった所  
で形成された星  
2, 5 個のSNによる



# age

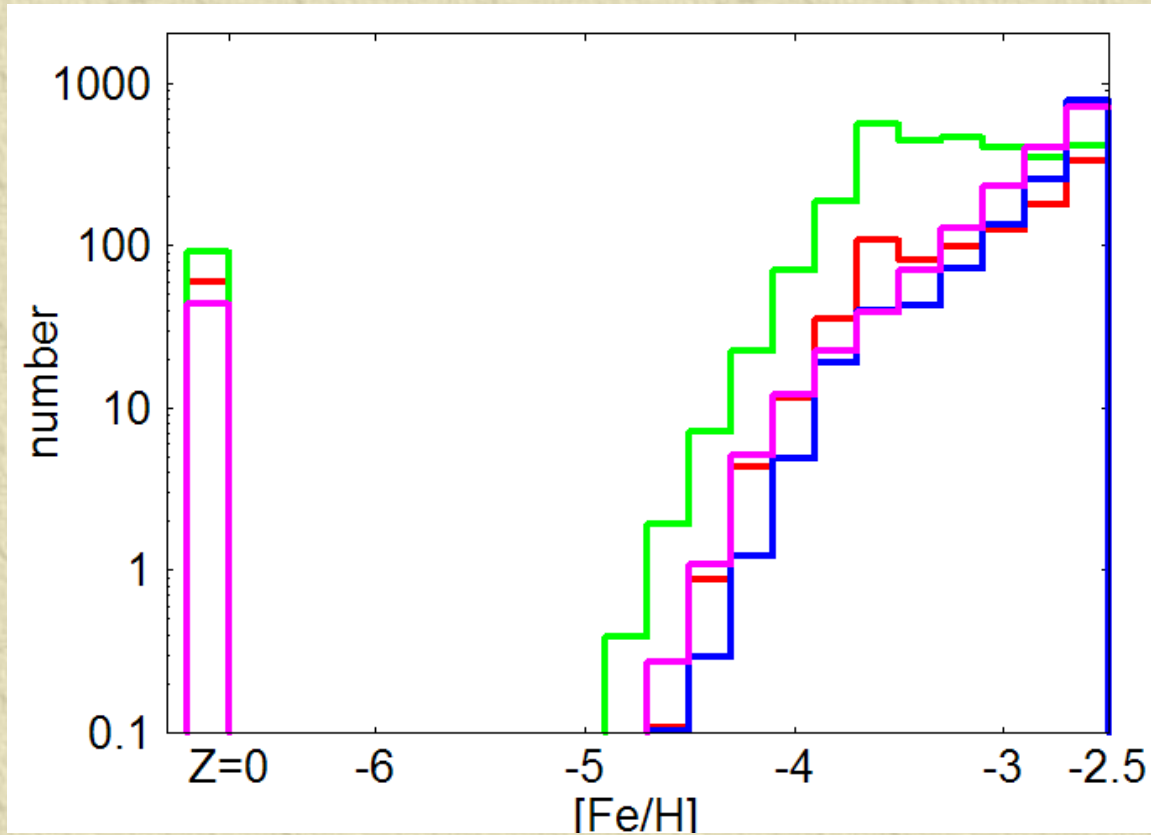


$z=0, 5, 10, 15,$   
20 の時点での  
MDF

Age-metallicity  
には相関なし。

ほぼ  $z > 5$  で形成

# Star formation rate



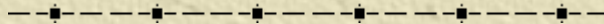
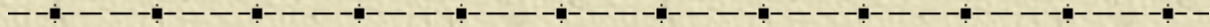
SFE=

$10^9$ ,  $10^{10}$ ,  $10^{11}$ ,  
 $10^{12}$

とした場合の  
結果



# 超金属欠乏星と Pop.III星

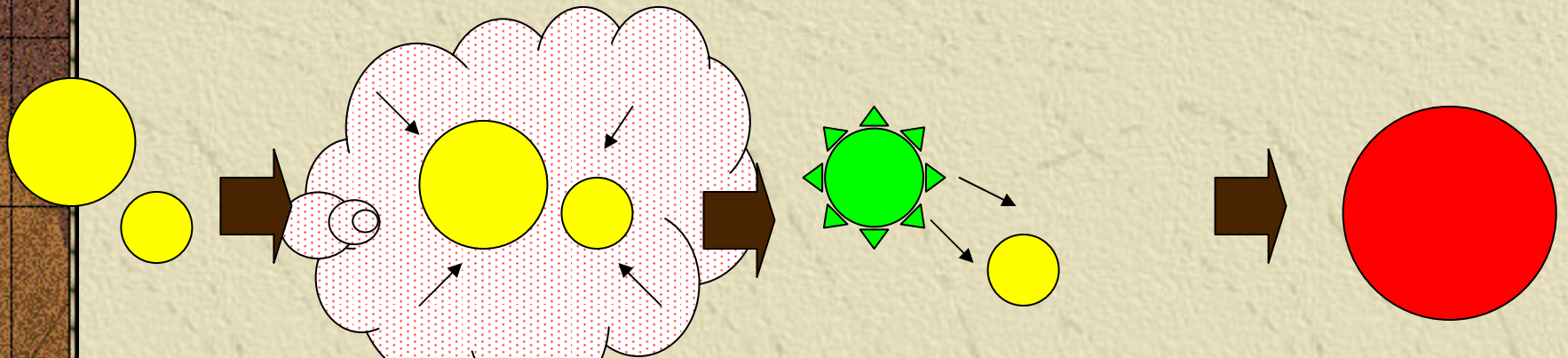
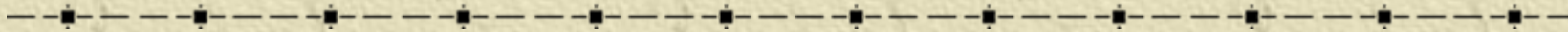


- 
- ✦ Pop. III(.2)にはlow mass starがあるかも
    - ◆ 生き残っていたとしたら、どんな観測結果？
    - ◆ HMP star = low mass Pop.IIIの可能性は？

- ✦ Pop. III(.1)はvery massive starらしい
    - ◆ その後の星形成への影響は？
    - ◆ very massive starの時代はいつまで？
- 金属欠乏星からどんな制限が可能か



# 初代星の生き残り?



金属量0で  
誕生

周囲の星間物質  
を降着  
[Fe/H]~-3

主星からの質量降着  
(主星が中質量星なら炭素  
星に)

赤色巨星に  
[Fe/H]<-5

HMP star

# 星間物質降着

仮定

✦ Bondi accretion

$$\dot{m} = \pi \left( \frac{2Gm}{V^2 + c_s^2} \right)^2 \sqrt{V^2 + c_s^2} \rho$$

✦ 星間物質

- ◆ mini-halo内では  $T=200\text{K}$ まで冷える

$$\rho = \rho_{\text{vir}} \times (T/200), \quad V \sim c_s(200\text{K})$$

- ◆ より大きなhaloに落ちたら

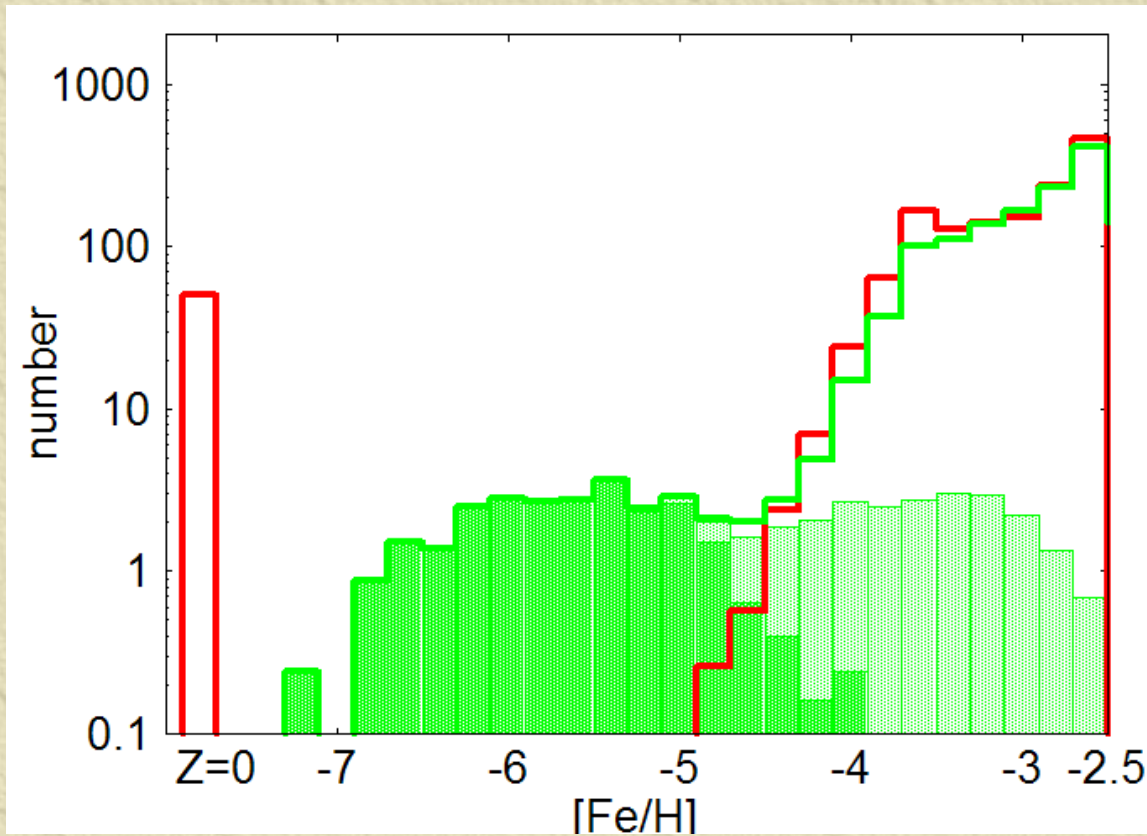
$$V = V_{\text{vir}}, \quad \rho_{\text{vir}} (\text{virializeしたhaloの平均密度})$$

✦ 降着した物質はsurface convection zoneで混ざる

- $M_{\text{scz}} = 0.3M_{\odot}$  for giant
- $= 0.03M_{\odot}$  for main sequence



# 降着量



濃緑:  $Z=0$  で生まれた giant の分布  
薄緑: dwarf の分布

Low-mass  
Pop.III star は  
巨星になると  
 $[Fe/H] \sim -5$  の金  
属量を持つ

⇒ HMP star として  
観測される

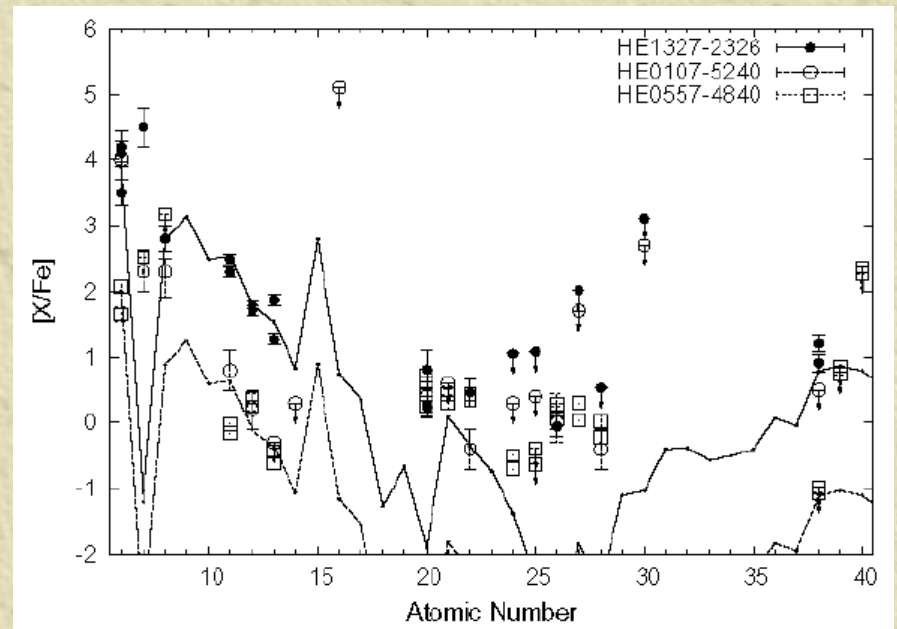
# HMP stars の組成

•C,N,O, Na,Mg, Al  
の組成は、  
Z=0の中質量星での元素  
合成結果とconsistent  
(Nishumura+ 2008)

•Low energyのSupernova  
(Umeda & Nomoto03)

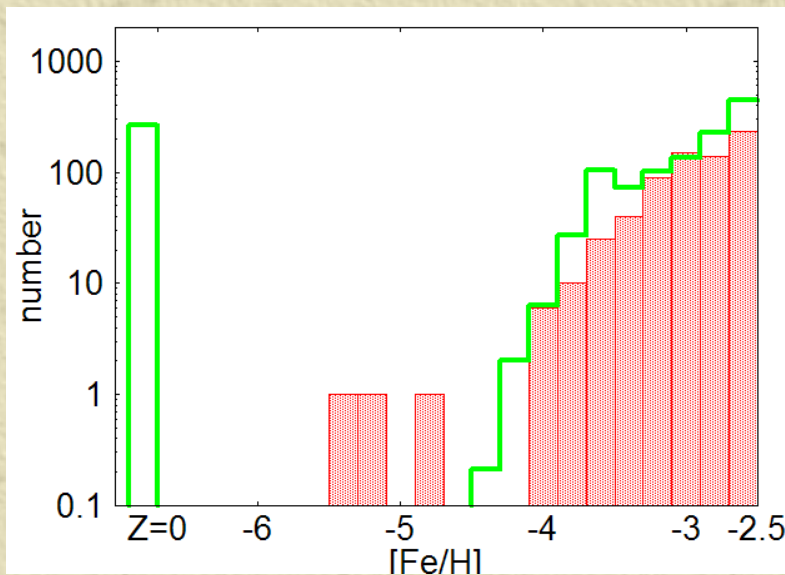
•Roating massive starから  
のwind(Maynet+ 2006)

によるとの説もある。

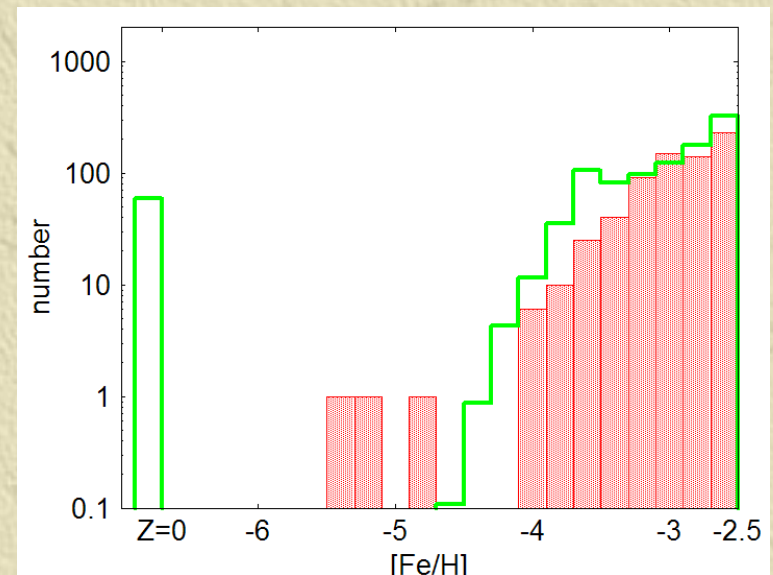




# Low mass Pop.III starの数



Pop.IIIもEMPと同じIMF, SFRと  
仮定すると  
~250個のlow-mass Pop.IIIを予測



最初のSNまでの間  
星形成が抑制されたとすると  
~50個

# HMP starsの数

最初のSNまで星形成が抑制された  
とすると

~50個のlow-mass Pop.IIIを予測

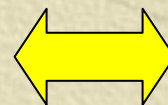
✦ Main-sequence は $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3$ に

✦ 高分散分光されている率 ~ 159/400

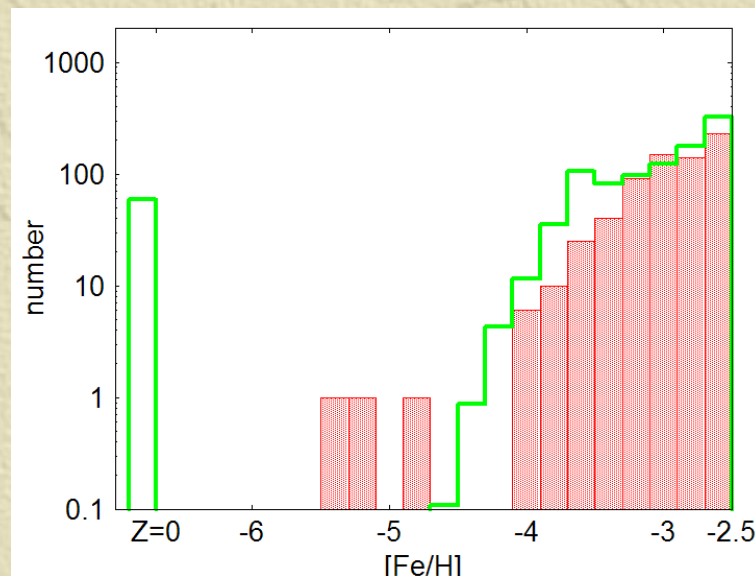
(HMP starは高分散分光でしか見つからない)

✦ 主星が超新星になる場合、そこで放出した鉄を受け取る?

予測されるHMP star数は ~7個



$[\text{Fe}/\text{H}] < -4.5$   
の星3個



Pop. IIIとEMP starのIMFはさほど違わなくてよい?



# Very massive stars

---

✦ Simulation等によると初代星は  $>100M_{\odot}$   
⇒ Pair-instability supernova

◆ EMP starに残る痕跡は？

✦ EMP starのような  
low-mass starを含む星形成への変化は

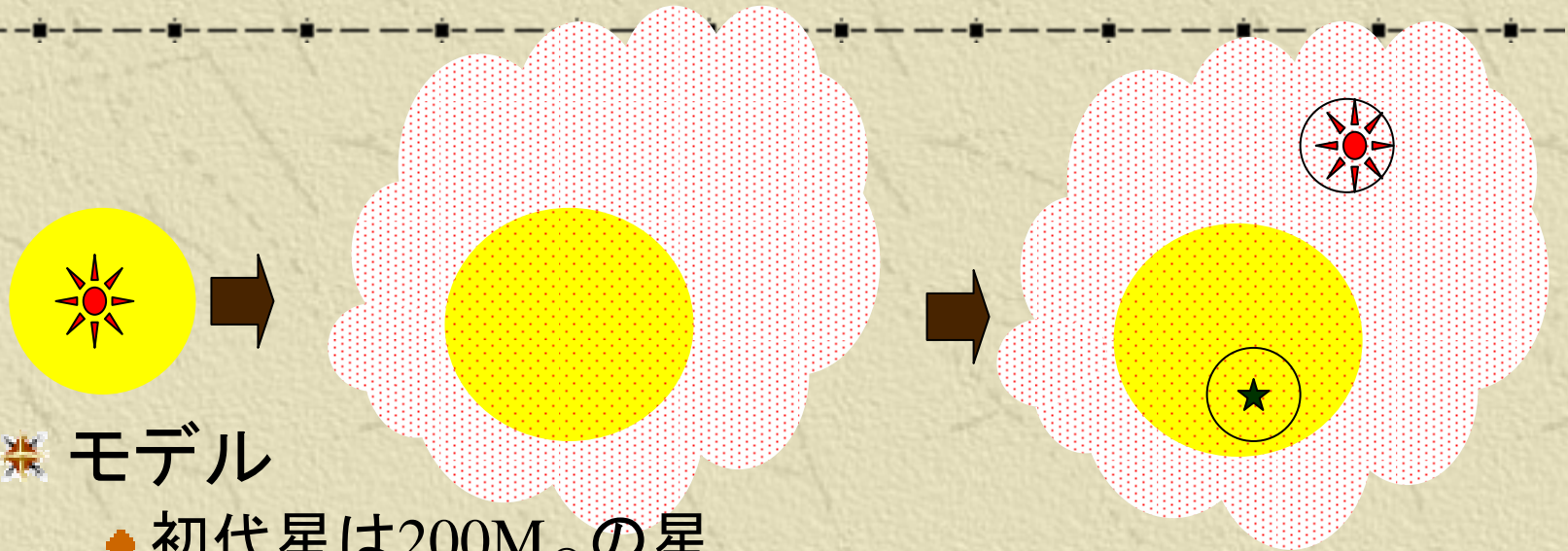
◆ Ionizationによる？

• 電離による $H_2$ 分子形成促進→冷却

◆ Metallicityの増加による？

• Dust cooling, metal line

# Ionization

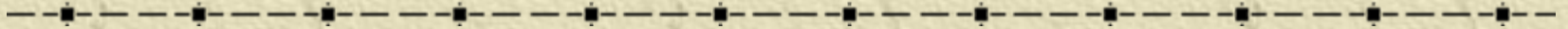


## ✠ モデル

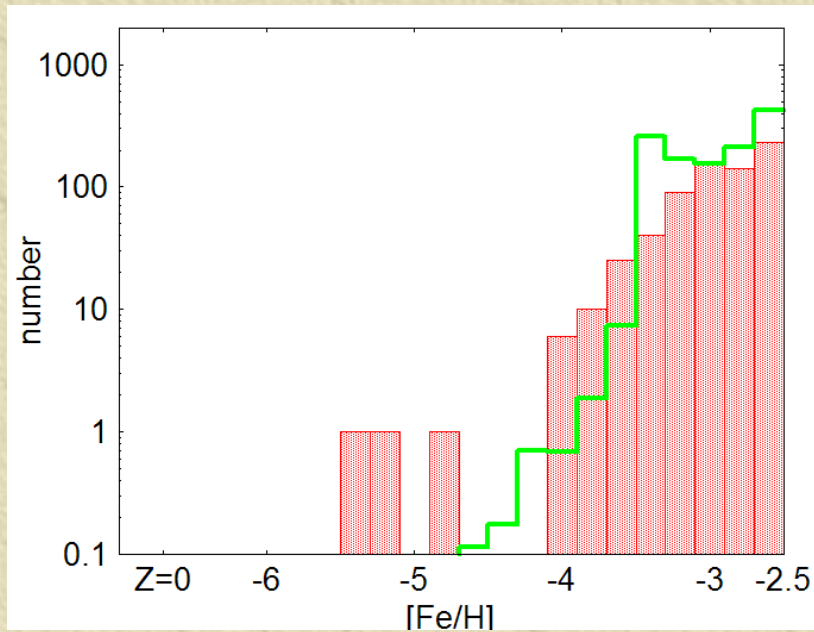
- 初代星は $200M_{\odot}$ の星
  - Host haloは蒸発
  - $10M_{\odot}$ の鉄を銀河間空間に放出
  - 電離光子でmini-halo間空間を電離  
(電離効率 E: 電離される水素数/電離光子数)
- 電離した領域で生まれたハローではEMP starと同じ条件で星形成
- 電離されていない領域では $200M_{\odot}$ の星が形成



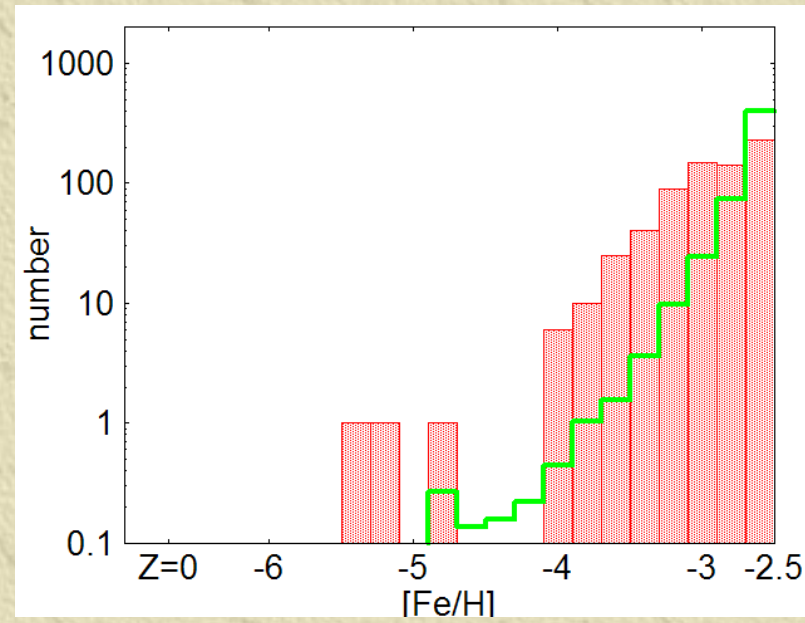
# 結果



$E=1$

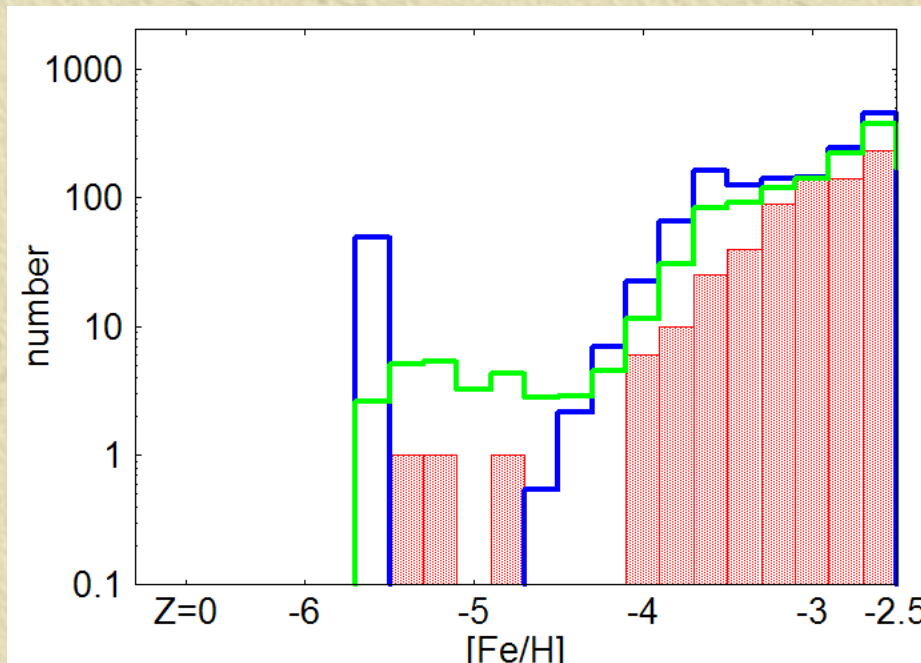


$E=0.1$



# Metallicity

Ionizationの影響は考えず、  
[Fe/H]<-6でのみ~200Moの星が生まれ、  
[Fe/H]>-6ではEMP starと同じ星形成



Z=0が出来ずに、  
-6程度が出来る。

表面汚染に影響により  
組成は通常の超新星の組成になる。



# まとめ

---

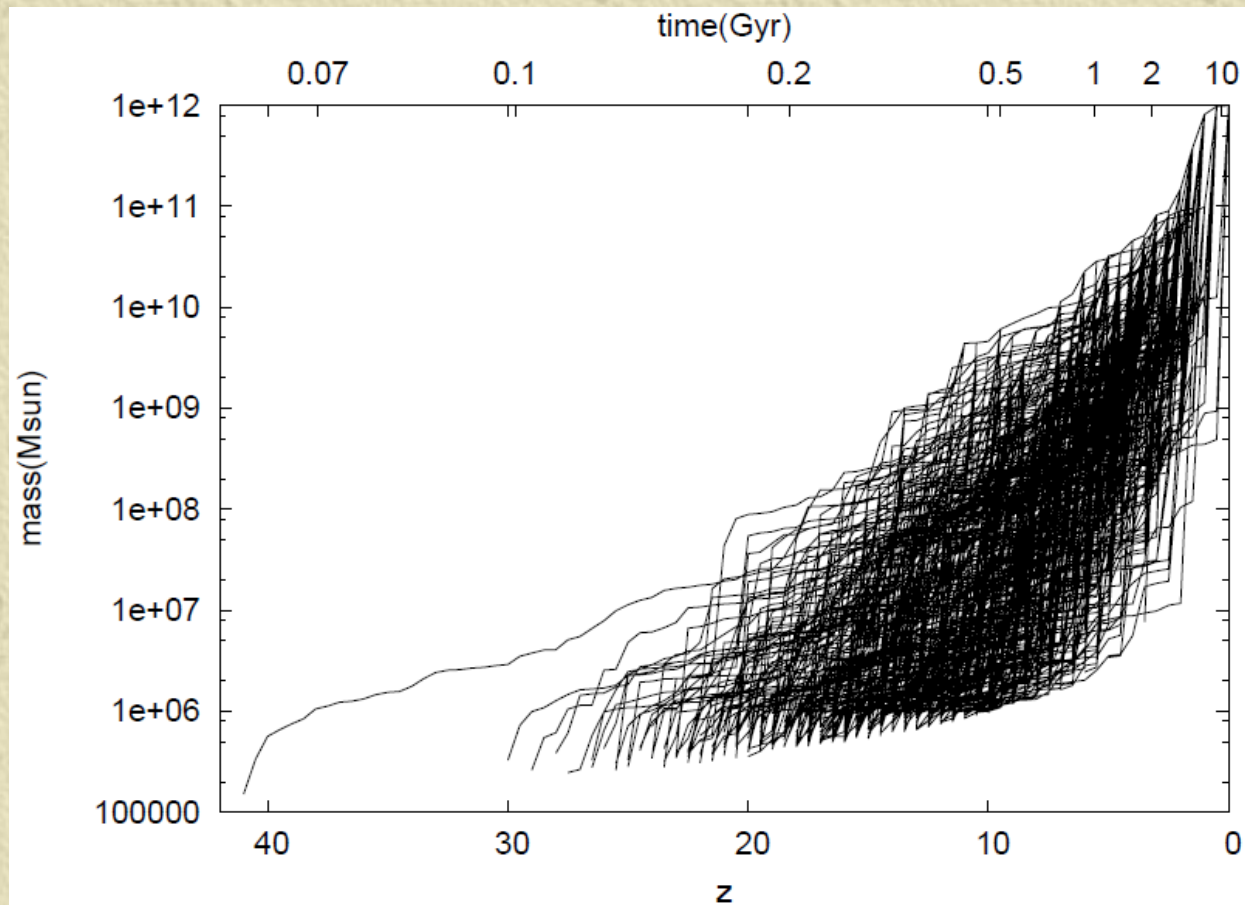
## ✦ 金属欠乏星

- ◆ 連星の影響が大きい
- ◆ High-mass IMF
- ◆ 第2世代以降は $[\text{Fe}/\text{H}] > -4$ に分布
  - 構造形成の影響と考えられる

## ✦ 初代星

- ◆ HMP star : low-mass Pop. III の可能性
  - 表面組成は後の質量降着による
- ◆ PISNになる星はごく少数
  - あったとしても $[\text{Fe}/\text{H}] < -6$

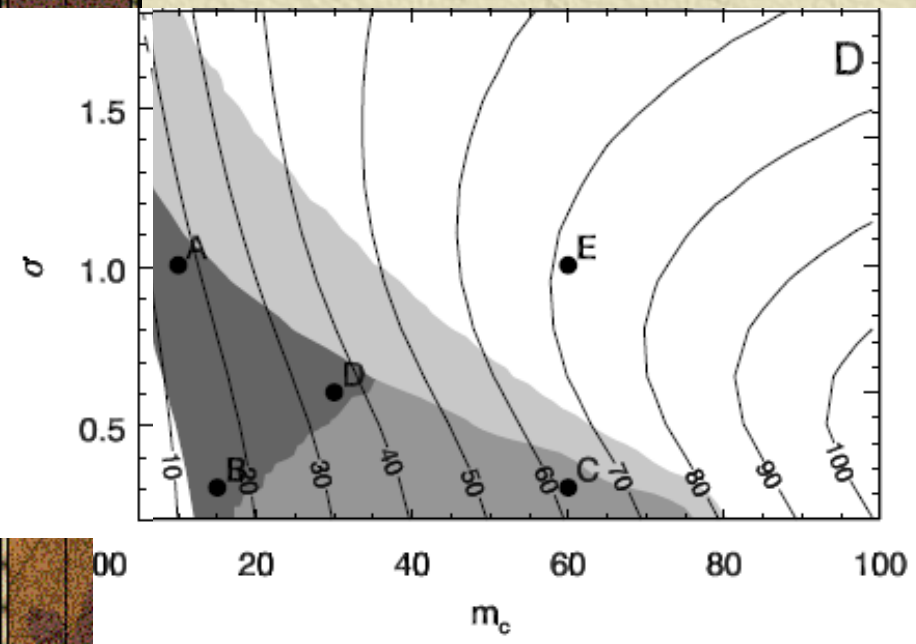
# Merger tree





# IMFの違い

Tumlinson (2006)



- Pop.III starが観測されていない
  - Pop.III starが再電離に十分な光子を放出
  - R-process元素は全て~12Moの星から
  - PISNによる元素合成のパターンが見えない
- という条件からPop.III starのIMFを推定すると、  
 $\langle M \rangle = 8 \sim 40 M_{\odot}$