

# s-process elements in dwarf galaxies

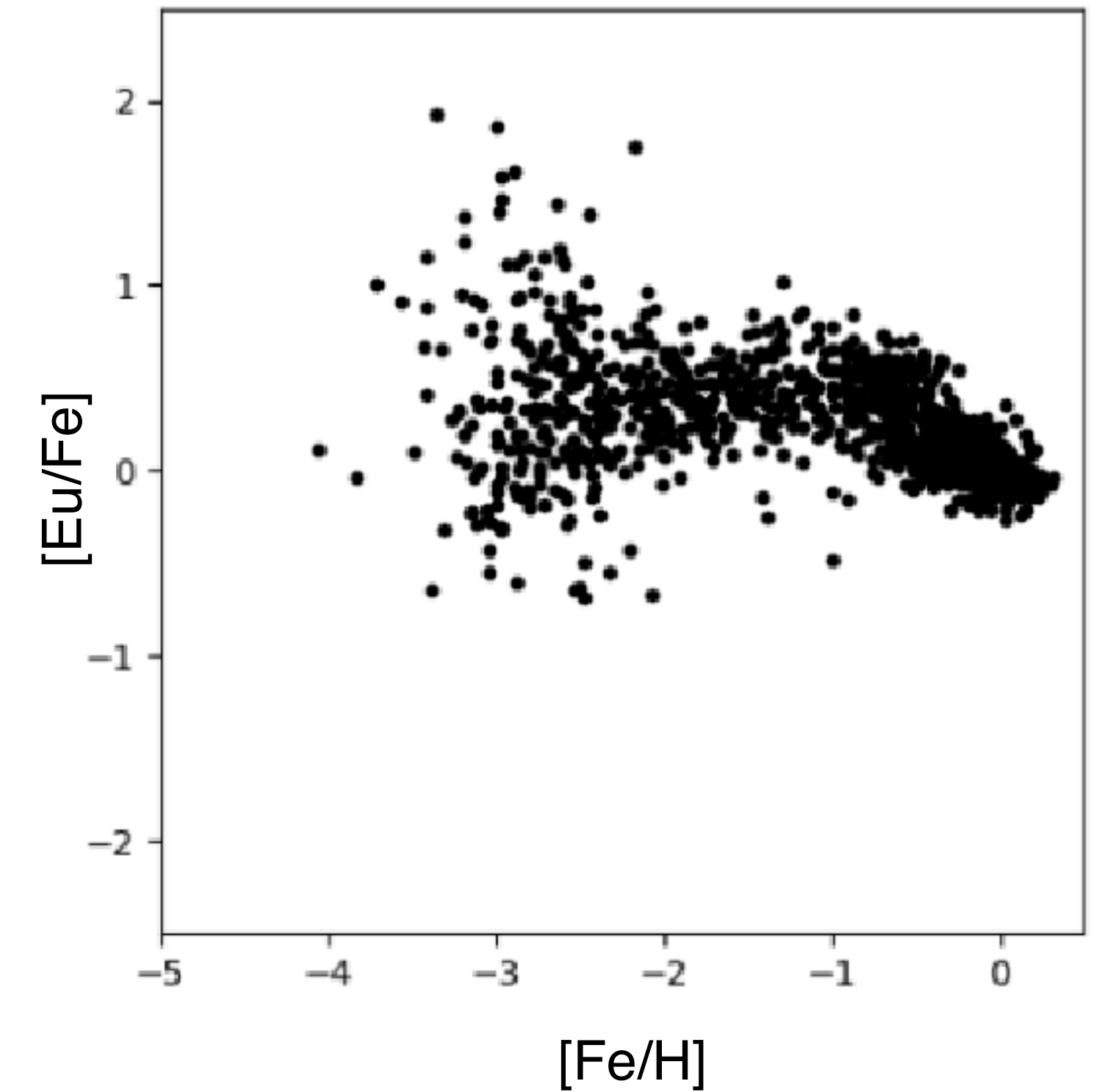
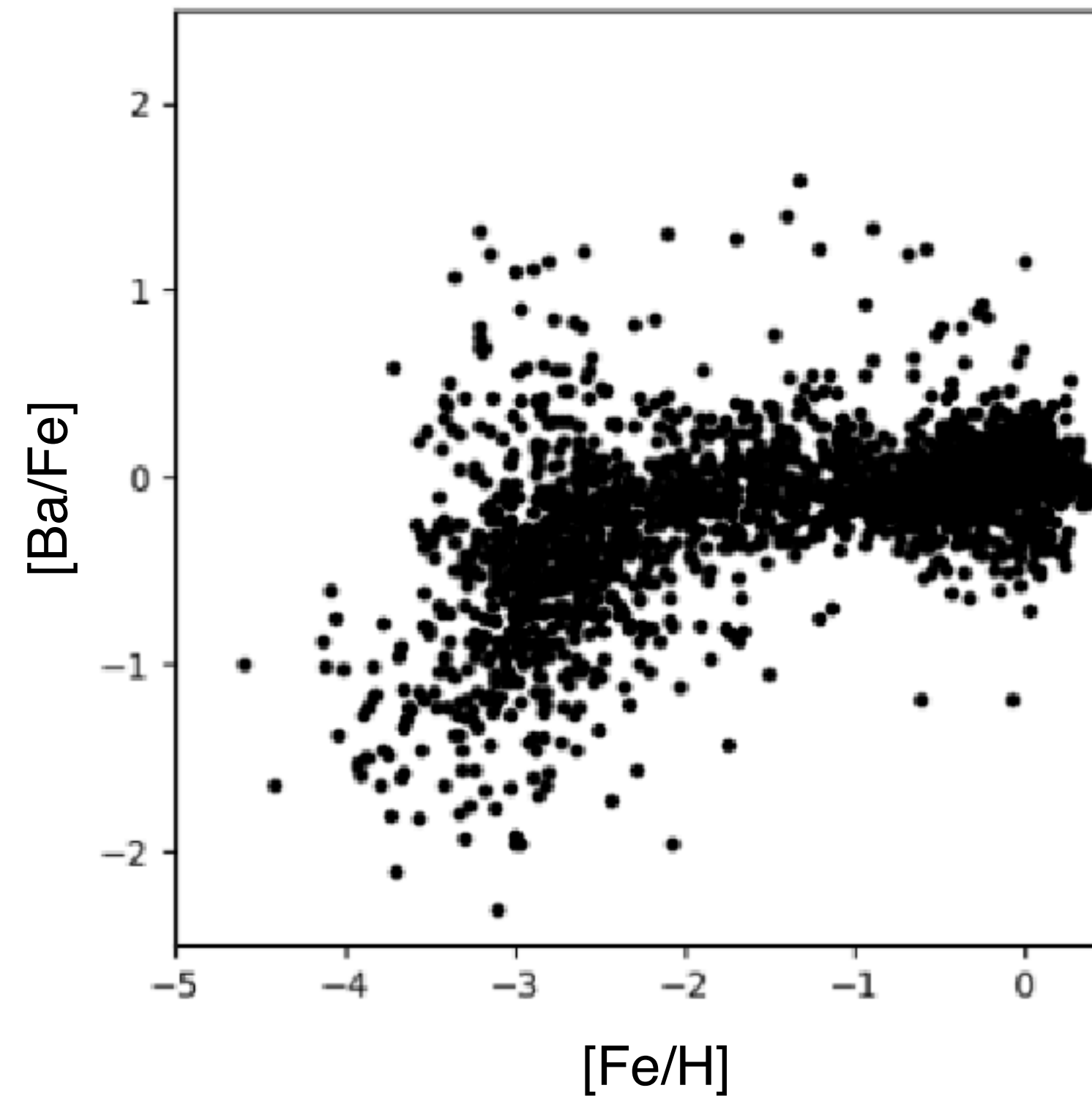
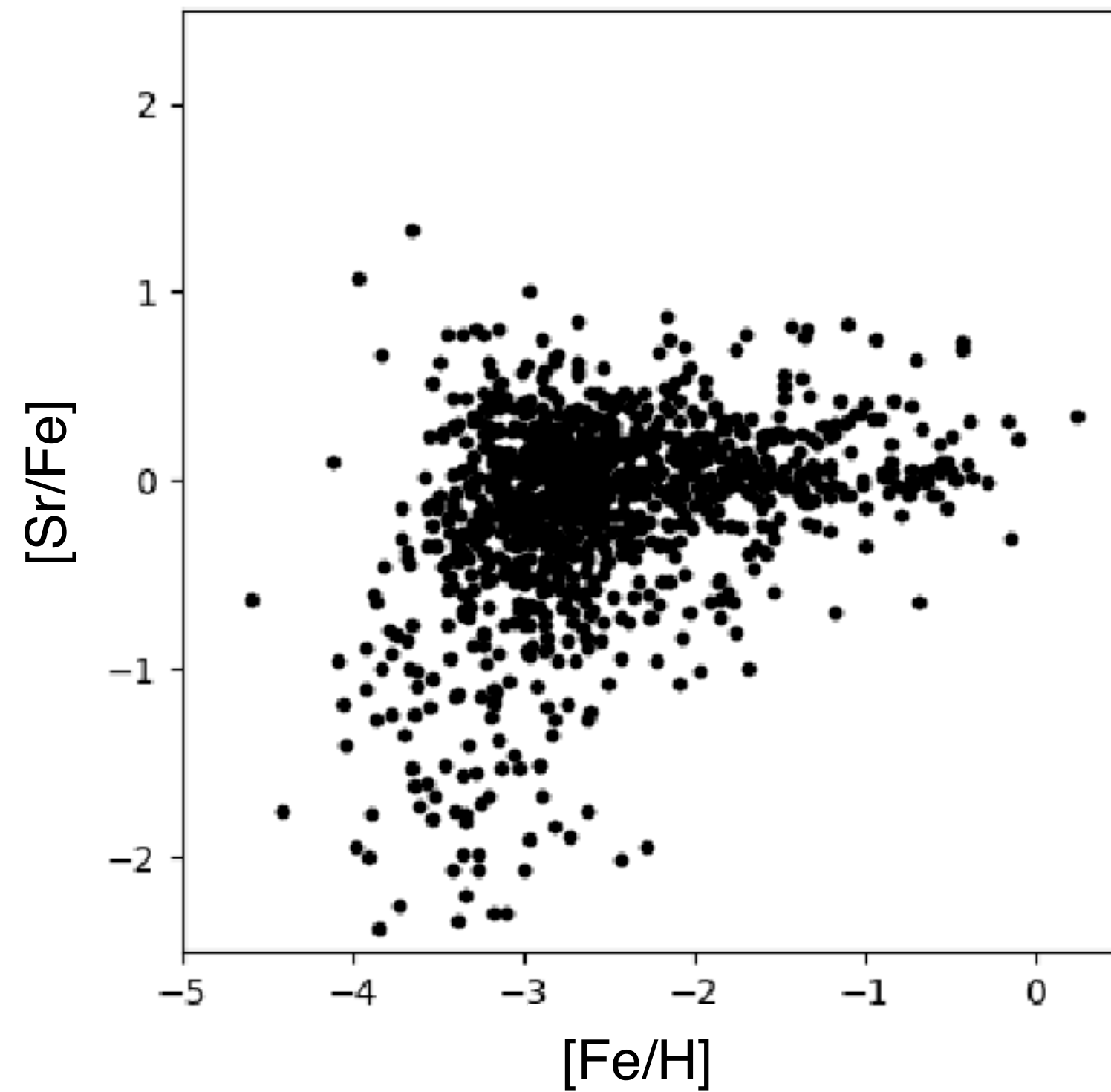
平居 悠

理化学研究所計算科学研究センター

粒子系シミュレータ研究チーム

# 中性子捕獲元素の観測

SAGA database (Suda et al. 2008)



[Fe/H] < -2.5で[Sr, Ba, Eu/Fe]に分散がある

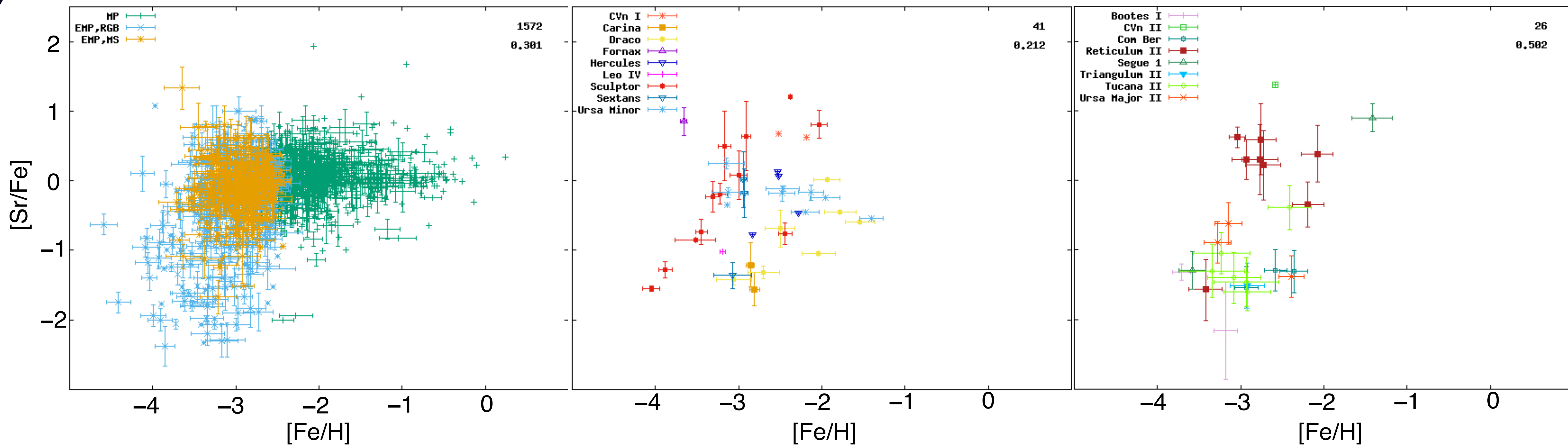
# [Sr/Fe] vs. [Fe/H]

銀河系

dSph

UFD

SAGA database (Suda et al. 2008, 2017)



[Fe/H] < -4から分散

矮小銀河は銀河ごとに異なる傾向

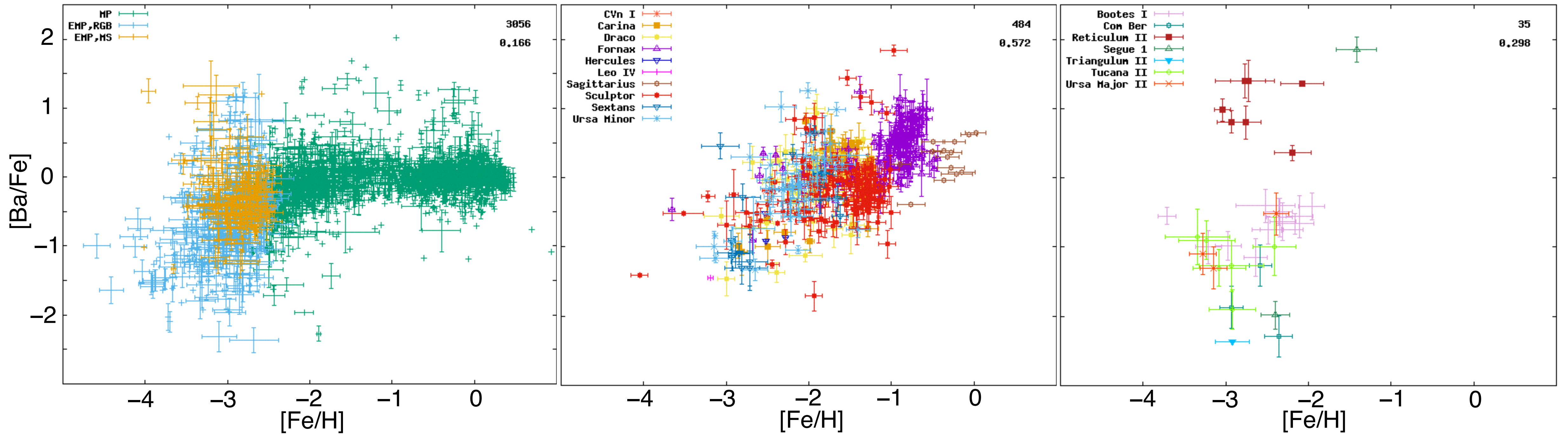
# [Ba/Fe] vs. [Fe/H]

銀河系

dSph

UFD

SAGA database (Suda et al. 2008, 2017)



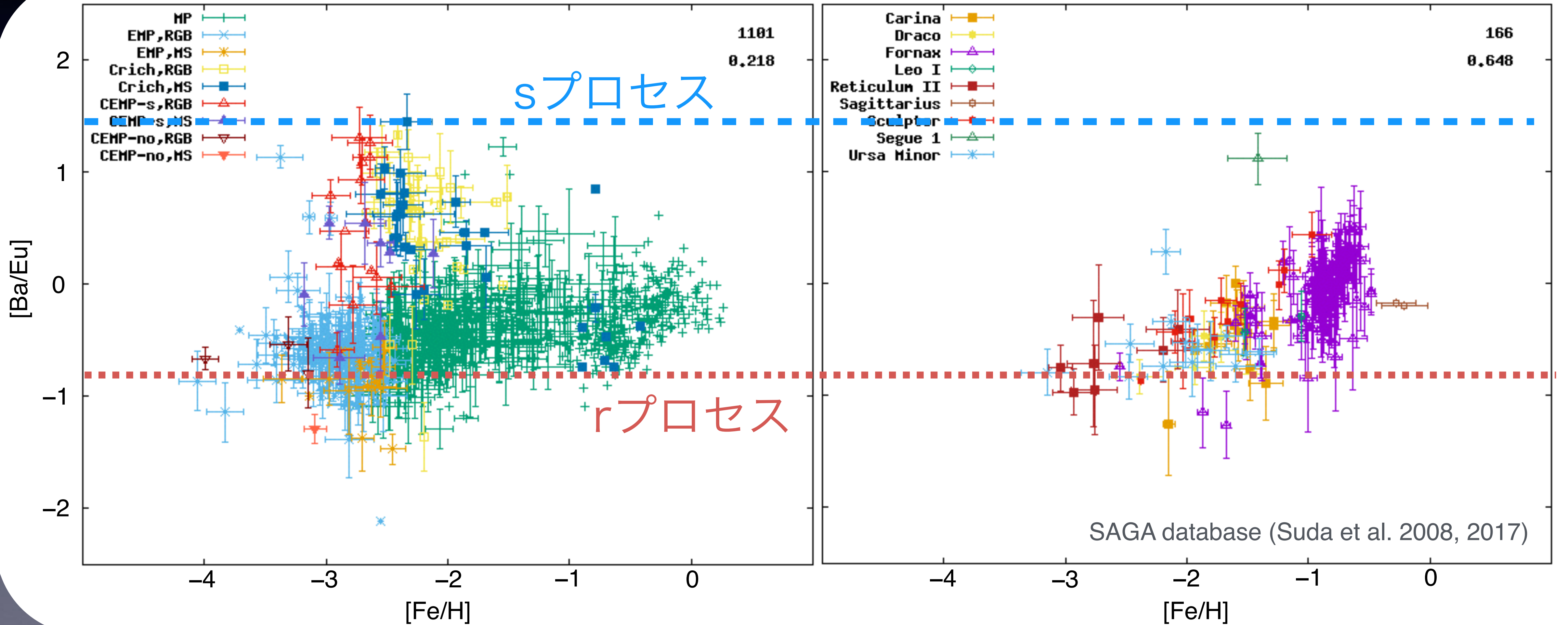
銀河系:  $[Fe/H] < -4$ は $[Ba/Fe] < 0$

dSph: 金属量と共に増加

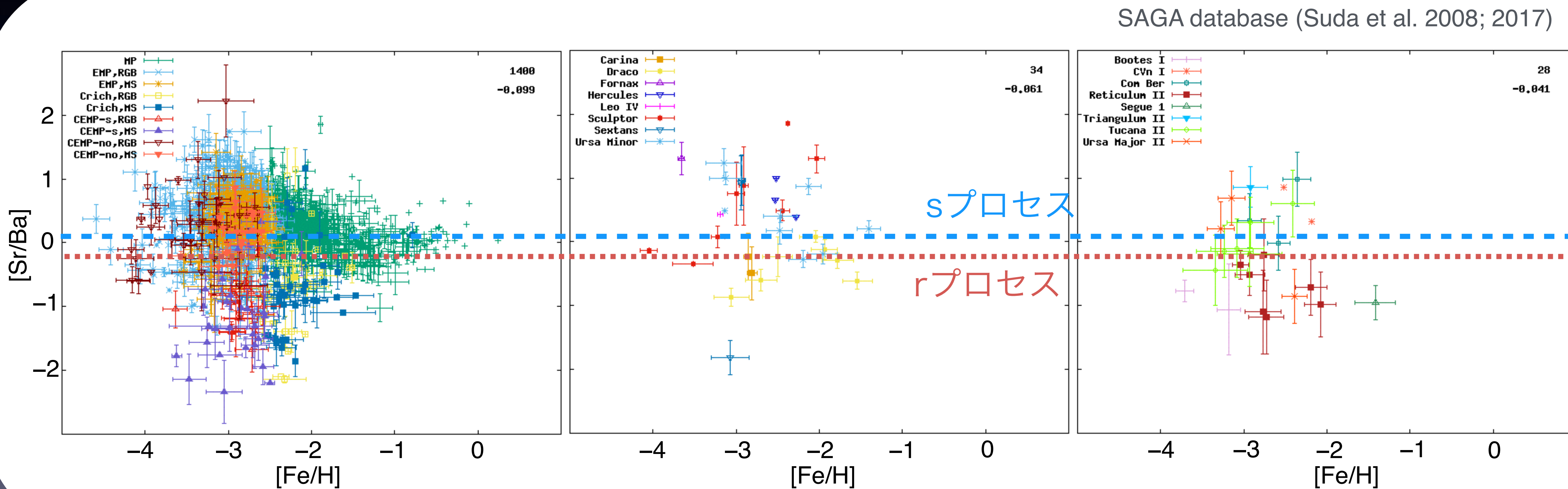
# [Ba/Eu] vs. [Fe/H]

銀河系

矮小銀河



# [Sr/Ba] vs. [Fe/H]



軽い中性子捕獲元素 (e.g., Sr, Y, Zr) と重い中性子捕獲元素 (e.g., Ba, Eu)  
で起源が異なる可能性

# [Ba/Sr] vs. [Ba/Fe]

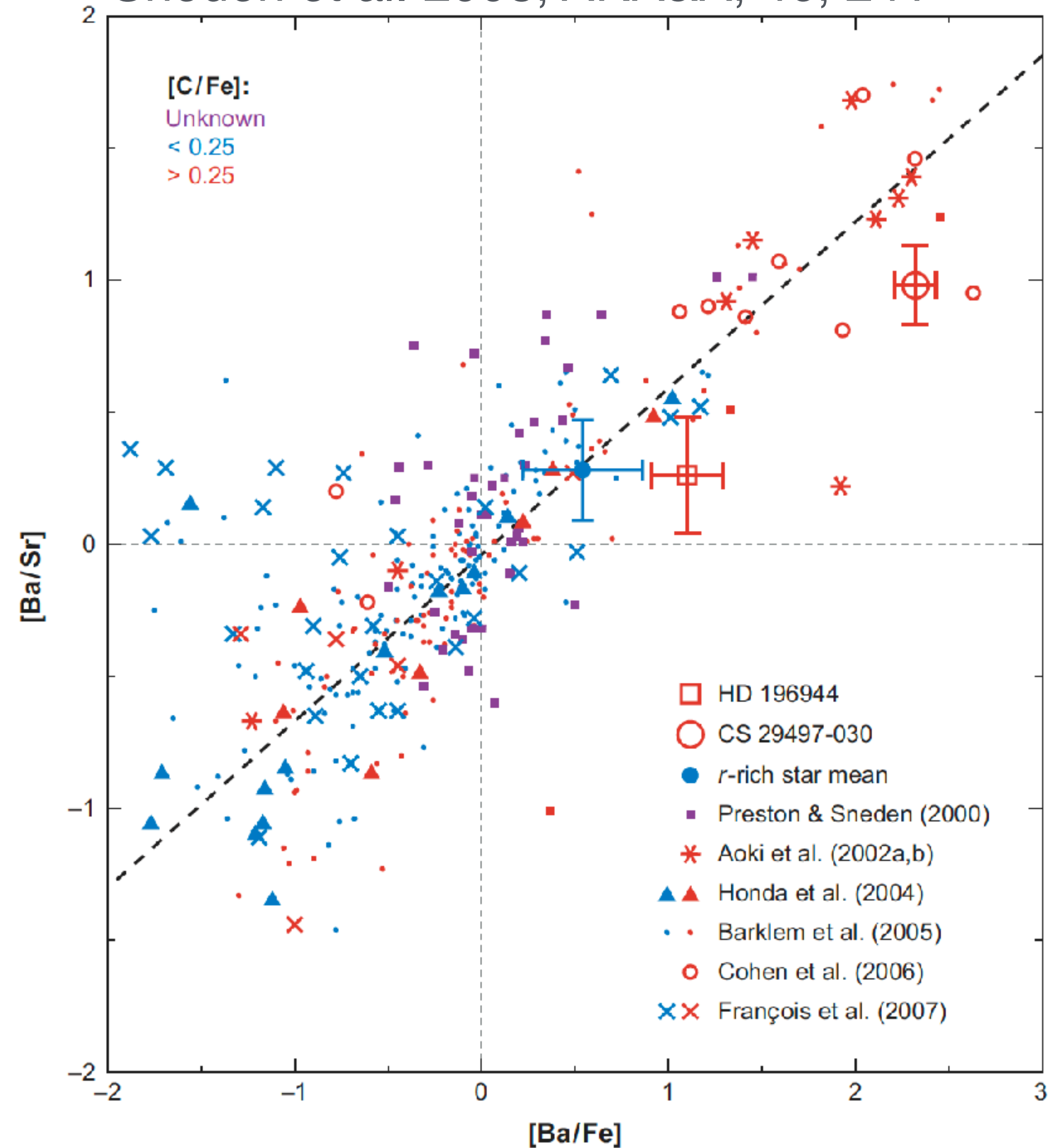
[Ba/Sr]と[Ba/Fe]に相関

[Ba/Fe] > 1の多くは炭素過剰星

AGB星からのsプロセスの影響を強く受けた星はSrよりBaを多く持つ傾向

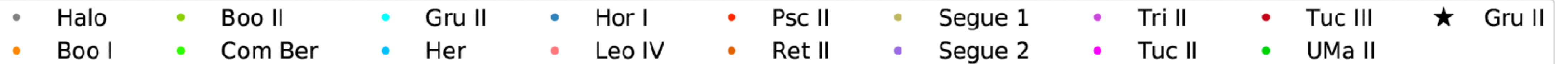
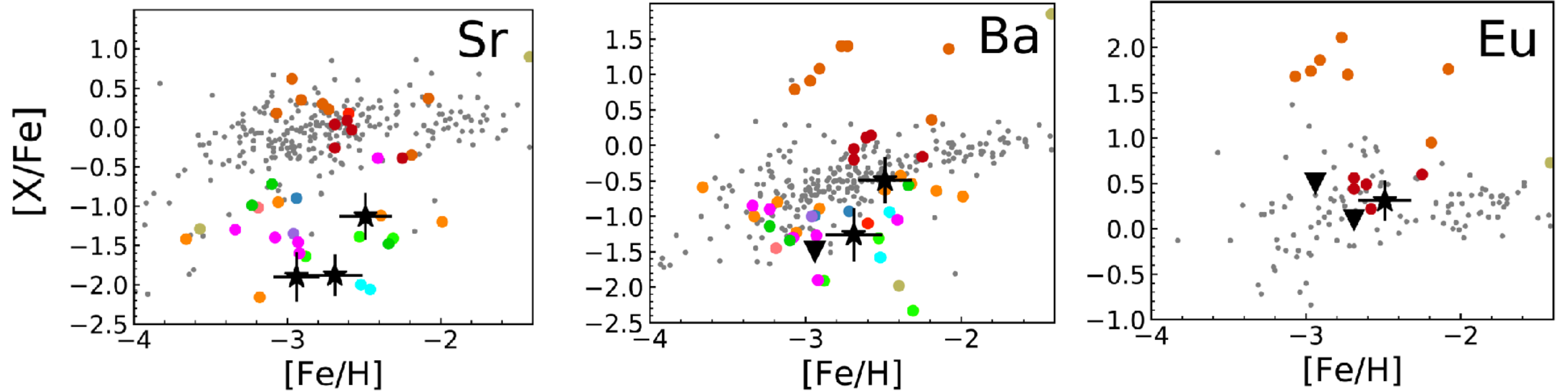
炭素過剰星は連星での質量輸送の影響を受けている可能性が高く、モデルと比較の際は要注意

Sneden et al. 2008, ARA&A, 46, 241



# Grus IIの中性子捕獲元素

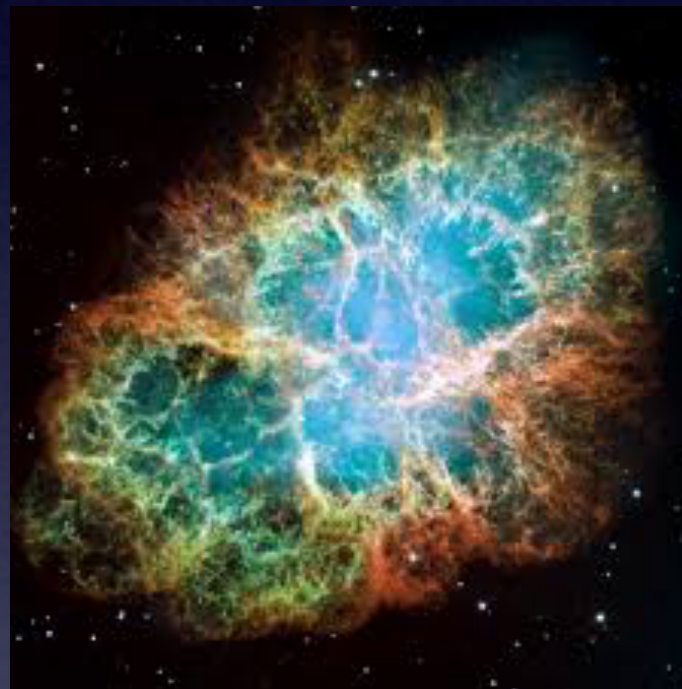
Hansen et al. arXiv: 2005.10767





# 中性子捕獲元素の起源天体候補

**Electron-capture  
supernovae (ECSNe)**  
(Supernovae with low mass  
progenitors)



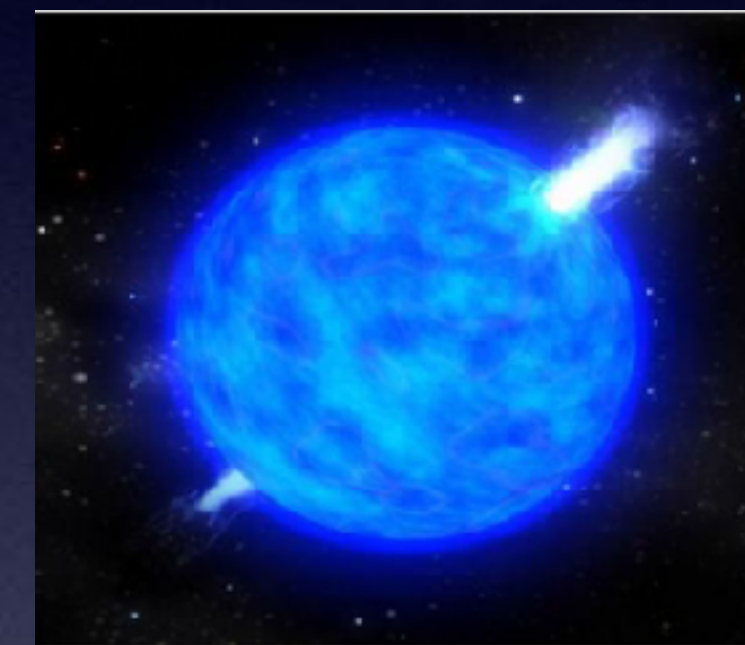
©NASA

**Neutron star mergers (NSMs)**



©NASA

**Rotating massive stars (RMS)**



<http://swift.gsfc.nasa.gov/>

**Asymptotic giant branch stars (AGB)**

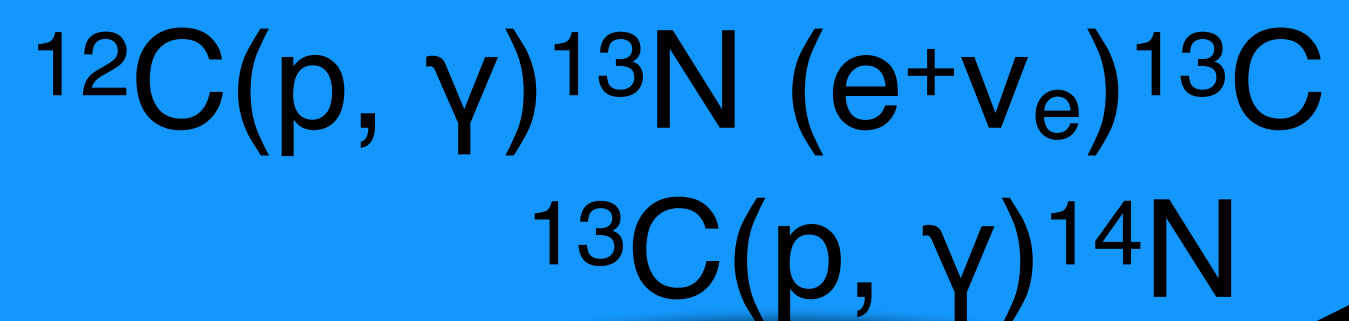


[http://astro.hopkinsschools.org/course\\_documents/stars/faintest\\_and\\_coollest/red\\_giants/agb%20\\_stars.htm](http://astro.hopkinsschools.org/course_documents/stars/faintest_and_coollest/red_giants/agb%20_stars.htm)

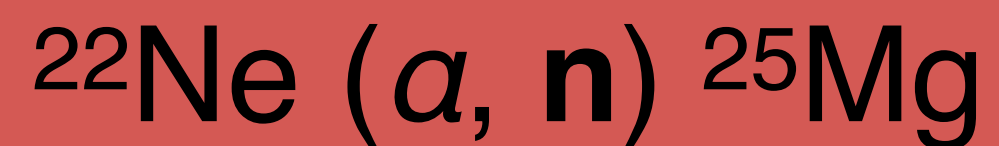
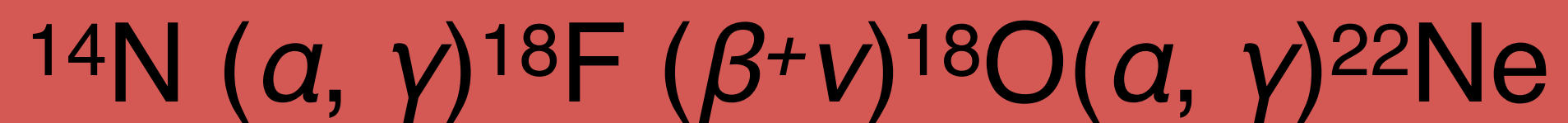
個々の起源天体の化学進化に対する寄与は不明

# Rotating massive stars

H-core



rotationally  
induced mixing

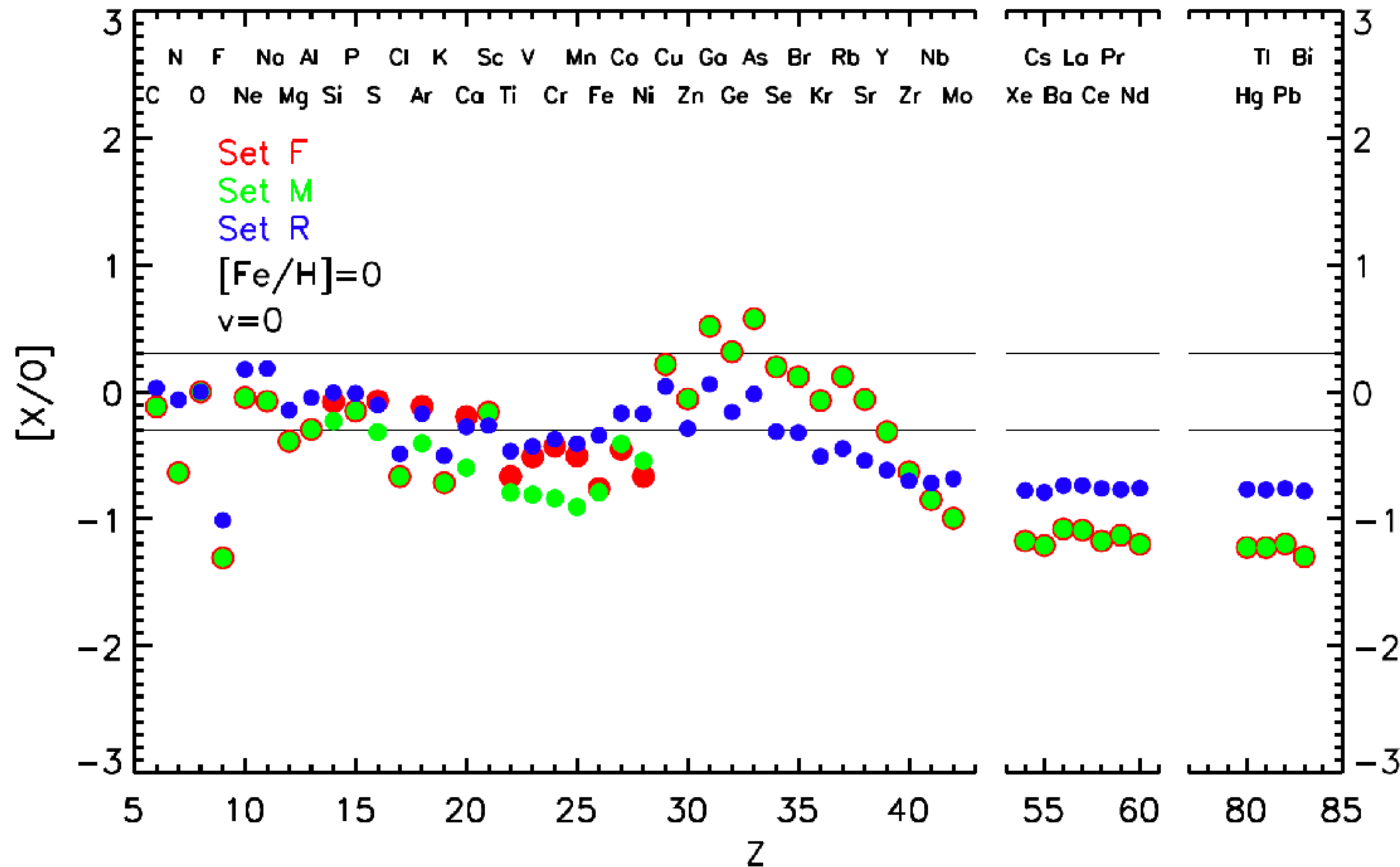


He-core

sプロセス

# Yields

Limongi & Chieffi 2018, ApJS, 237, 13



set F

$^{56}\text{Ni}$ 量( $0.07 M_{\text{sun}}$ )を固定

Chieffi & Limongi 2013, ApJ, 764, 21

set M

Mixing and fallback scheme  
(Umeda & Nomoto 2002)を導入

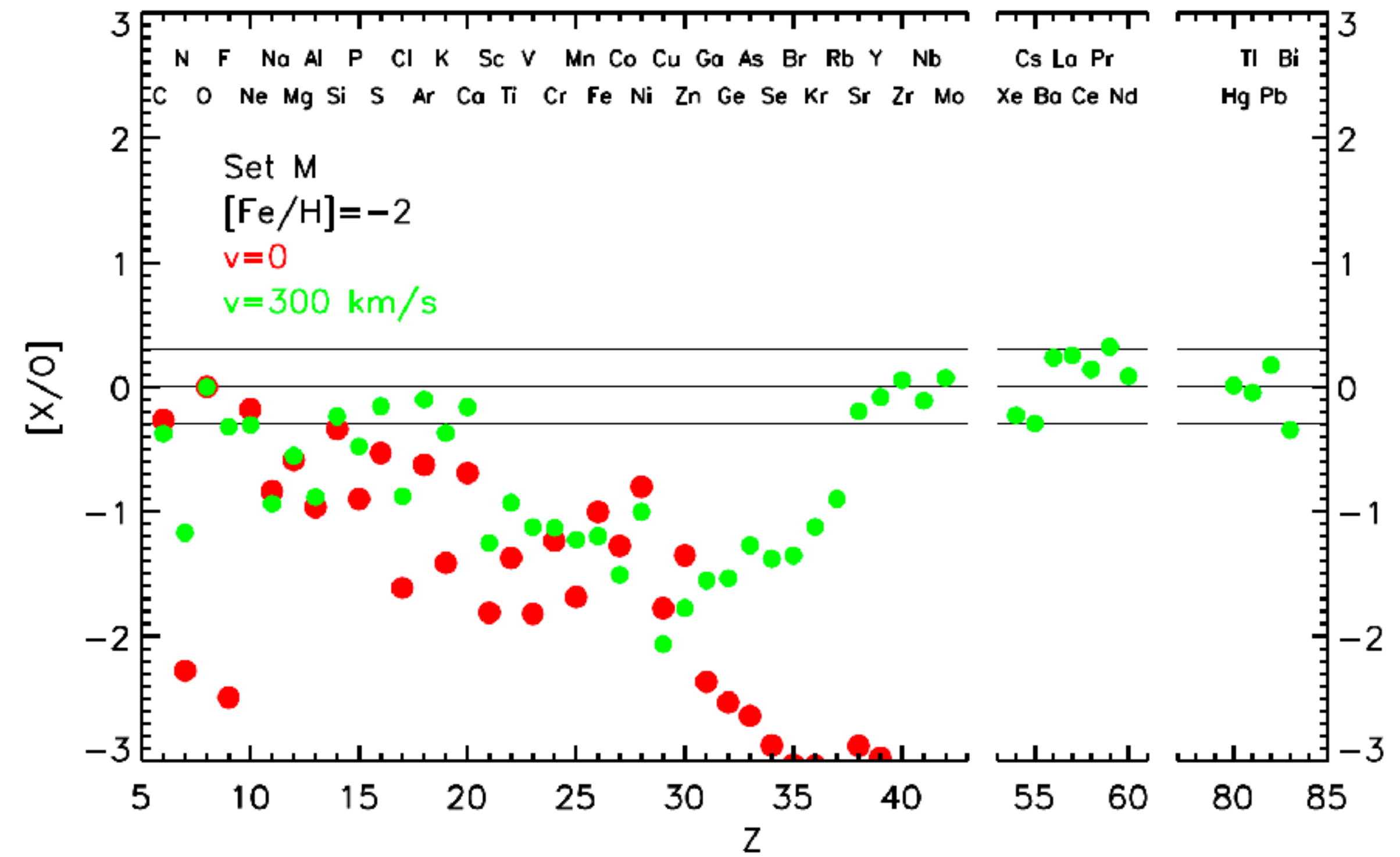
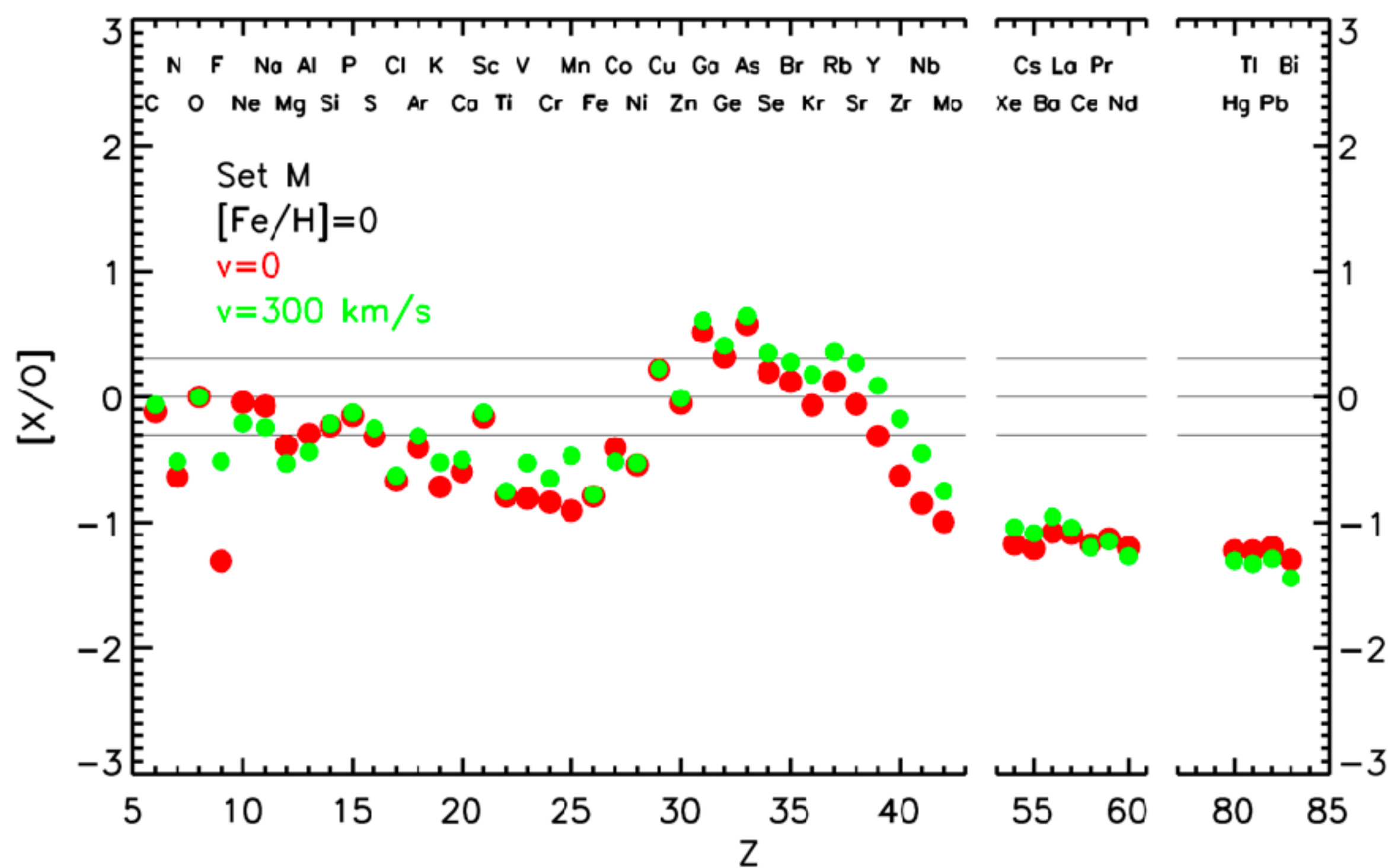
set R

13–25  $M_{\text{sun}}$ はset Mと同様

25  $M_{\text{sun}}$ 以上は超新星爆発を起こ  
さずブラックホールになると仮定

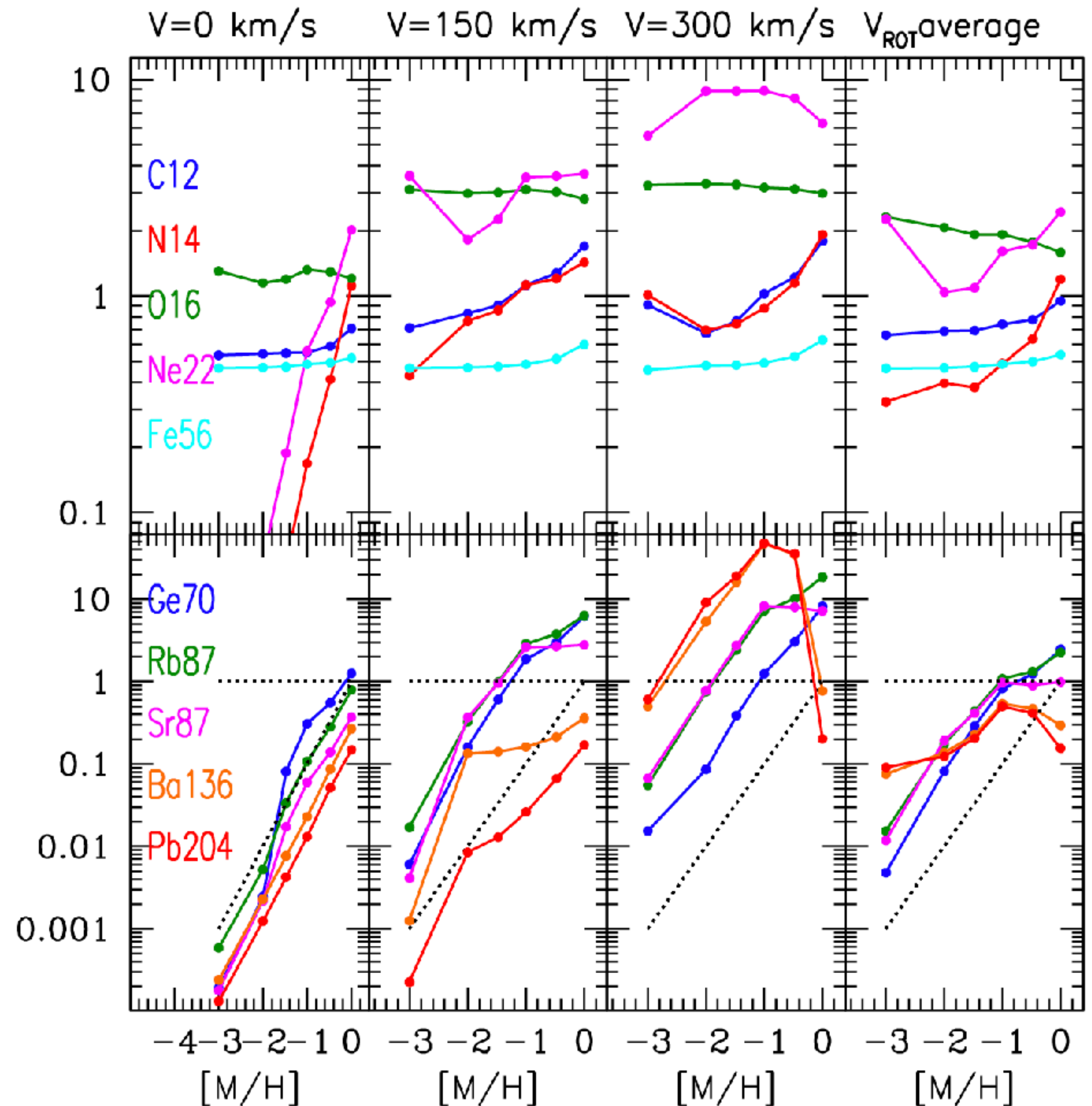
# 回転の影響

Limongi & Chieffi 2018, ApJS, 237, 13



# Yieldの回転速度・ 金属量依存性

Sr, Baのyieldは大質量  
星の回転速度、金属量  
に強く依存する



# 星の回転についての観測

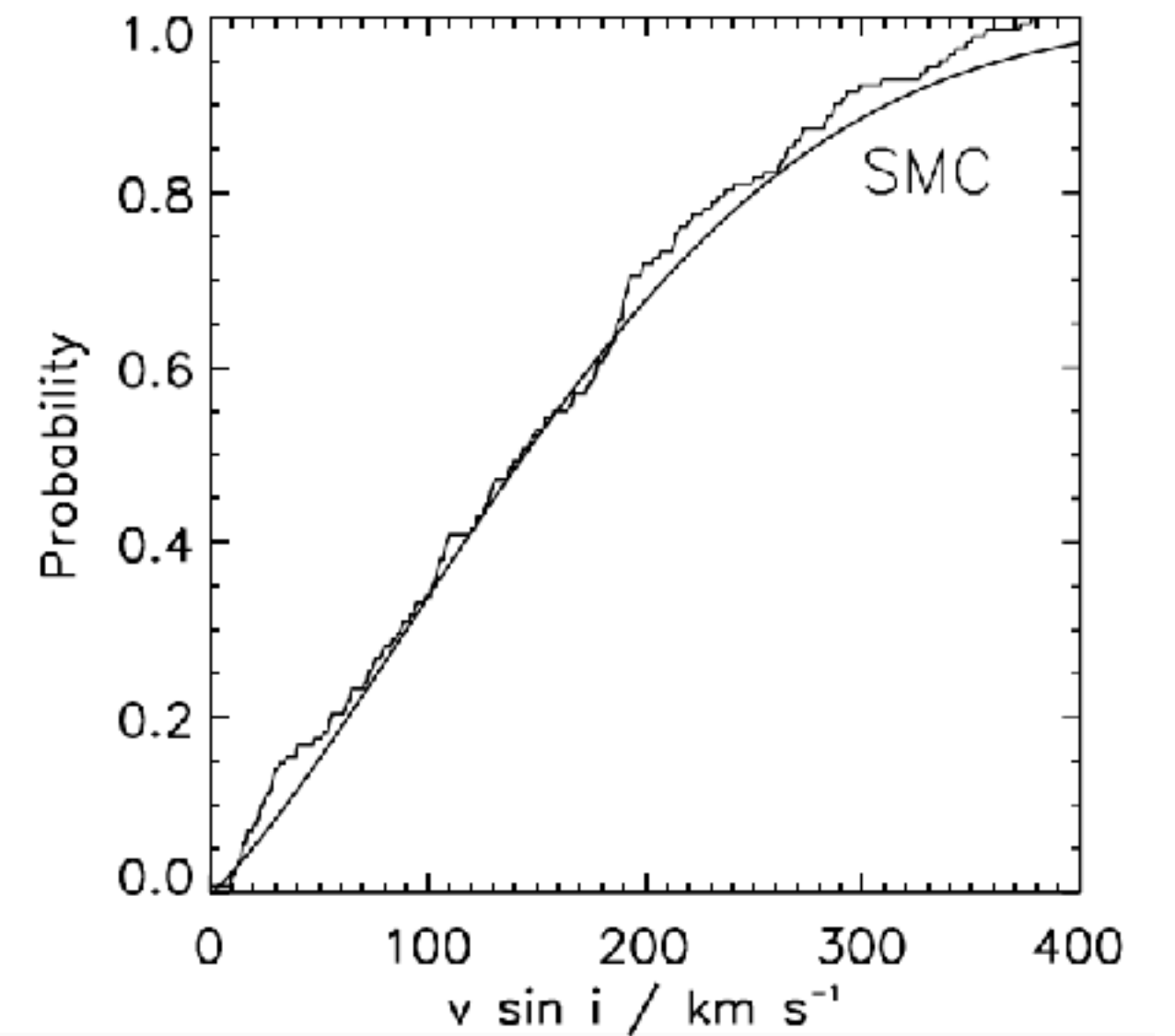
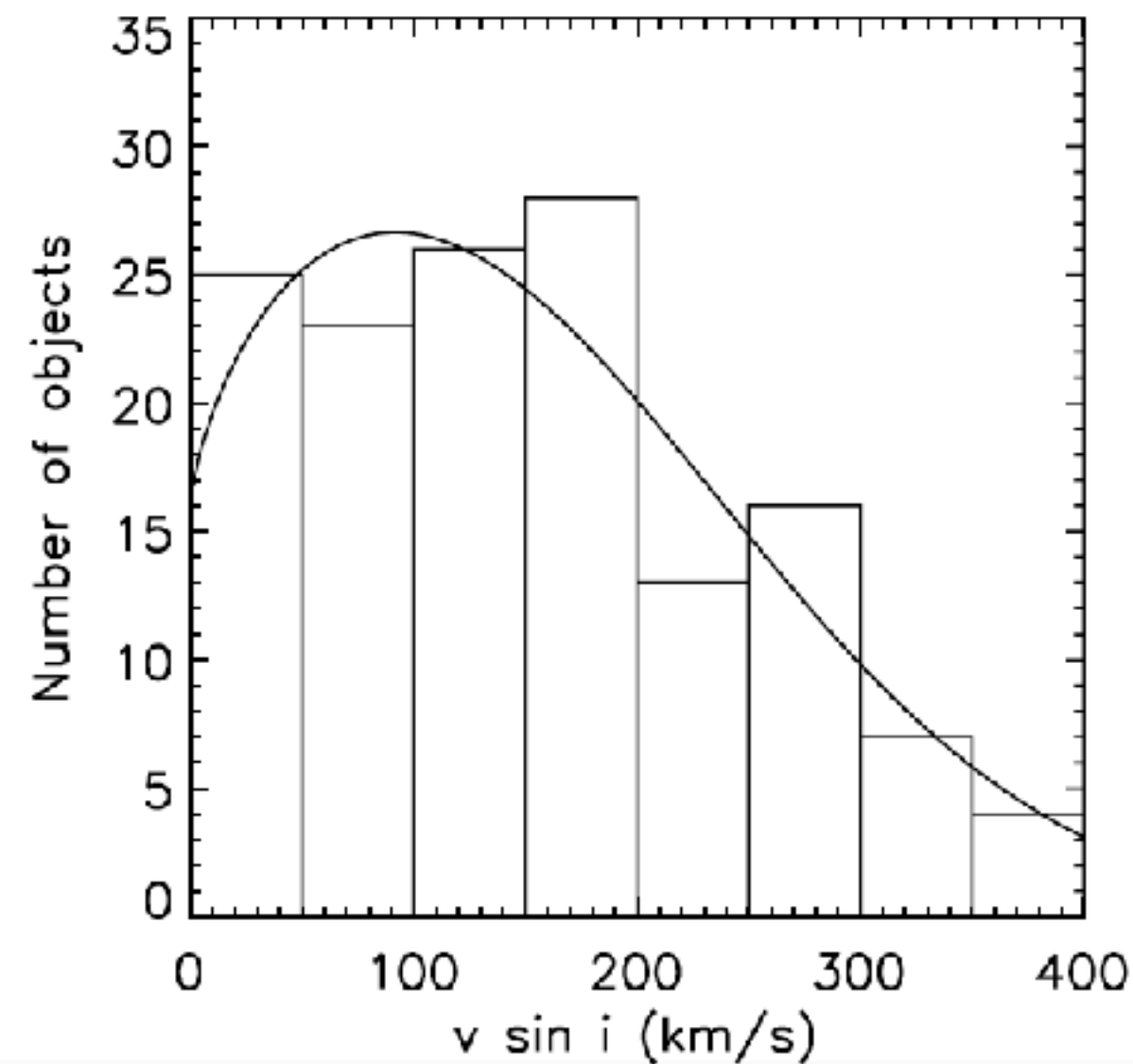
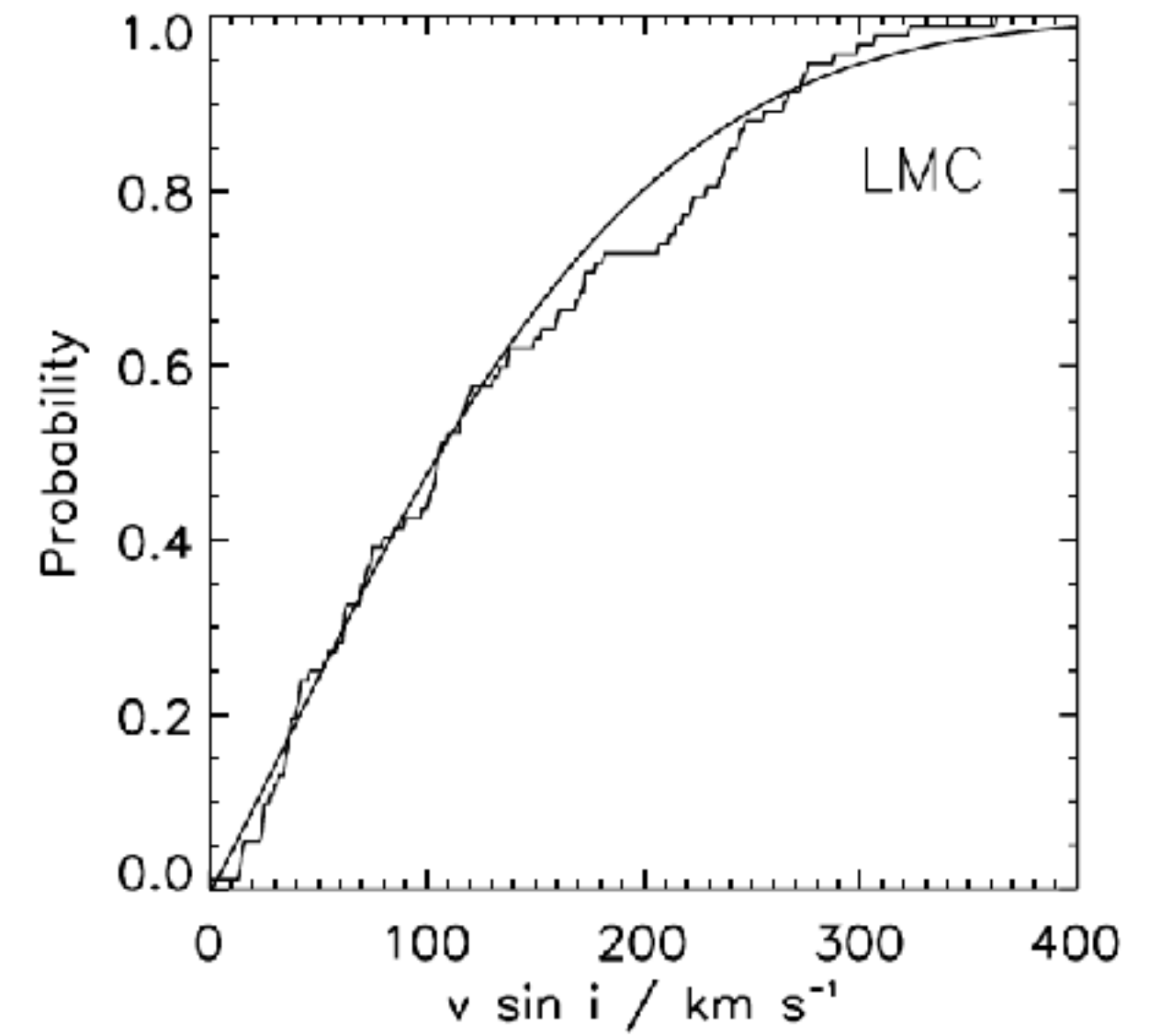
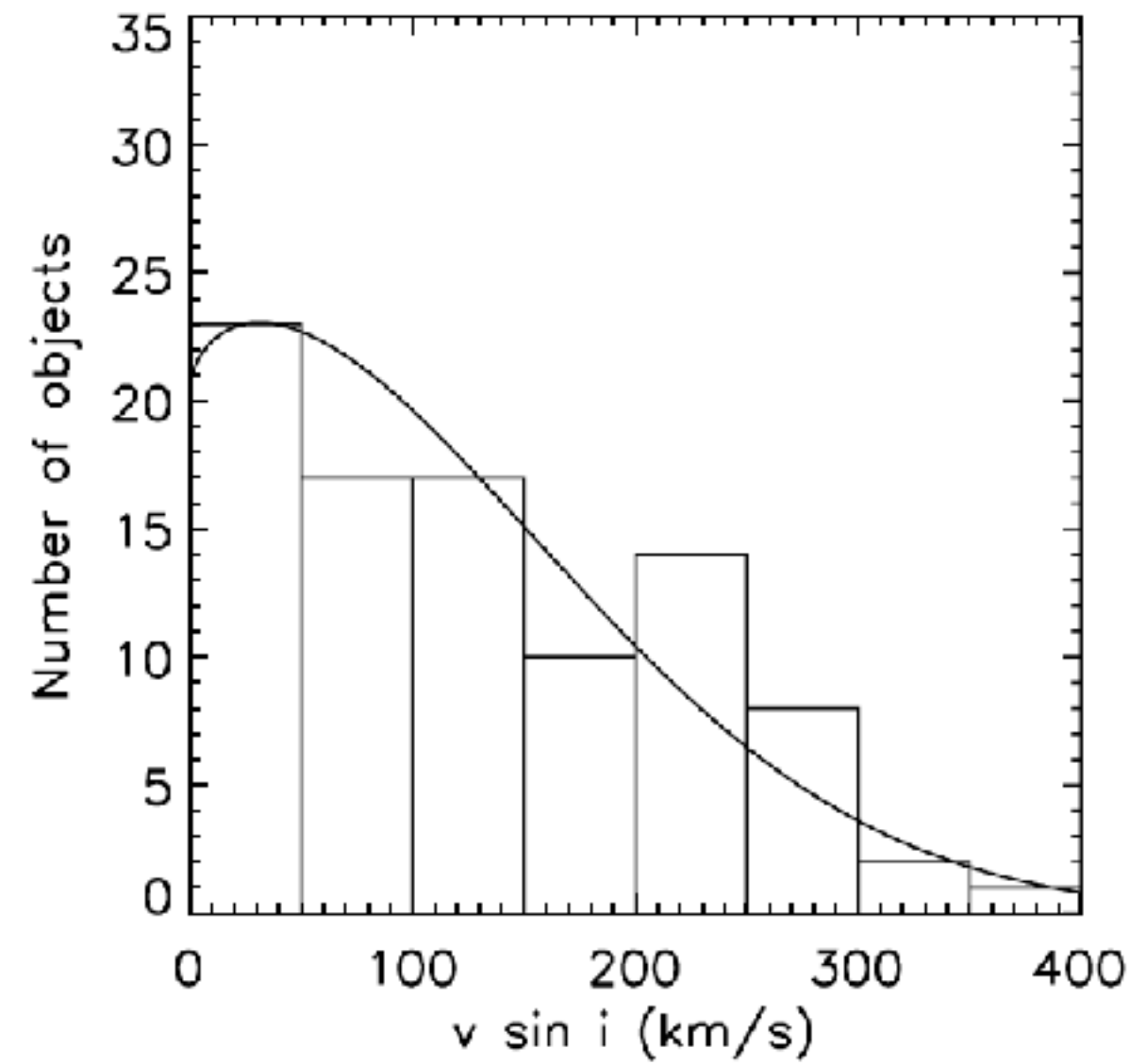
Hunter et al. 2008, A&A, 479, 541

## OB型星回転速度分布のピーク

LMC:  $100 \text{ km s}^{-1}$

SMC:  $175 \text{ km s}^{-1}$

大質量星の回転速度には  
金属量依存性がありそう

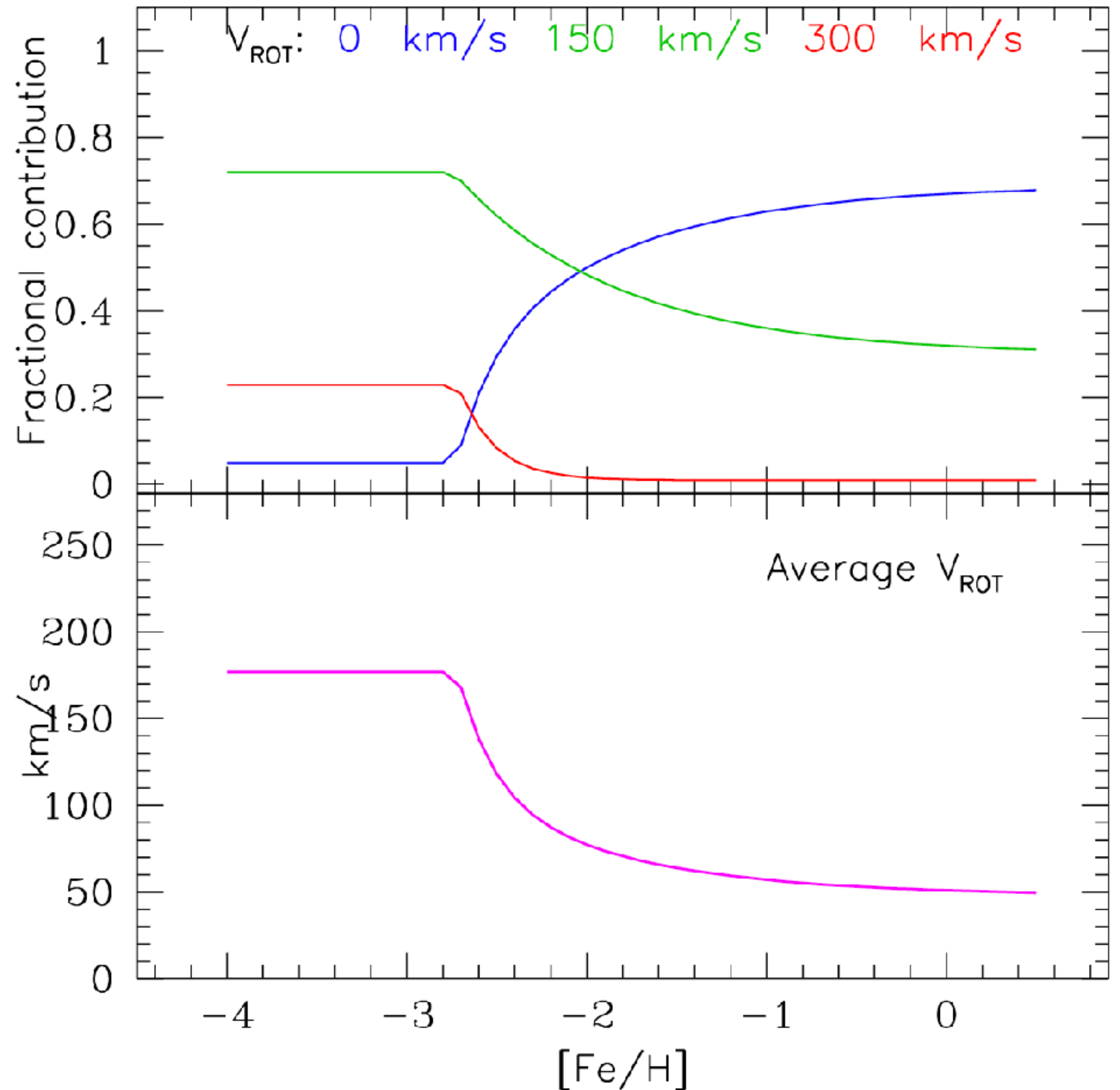


# 回転速度の較正

Prantzos et al. 2018, MNRAS, 476, 3432

以下の点を再現できる金属量に依存した回転速度の組み合わせを仮定

- ・窒素の観測値 (EMP星にも多く存在)
- ・  $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$  で sプロセス元素が過剰にならない



# sプロセス元素の化学進化

Serminato et al. 2009, PASA, 26, 153

Travaglio et al. 2004, ApJ, 601, 864

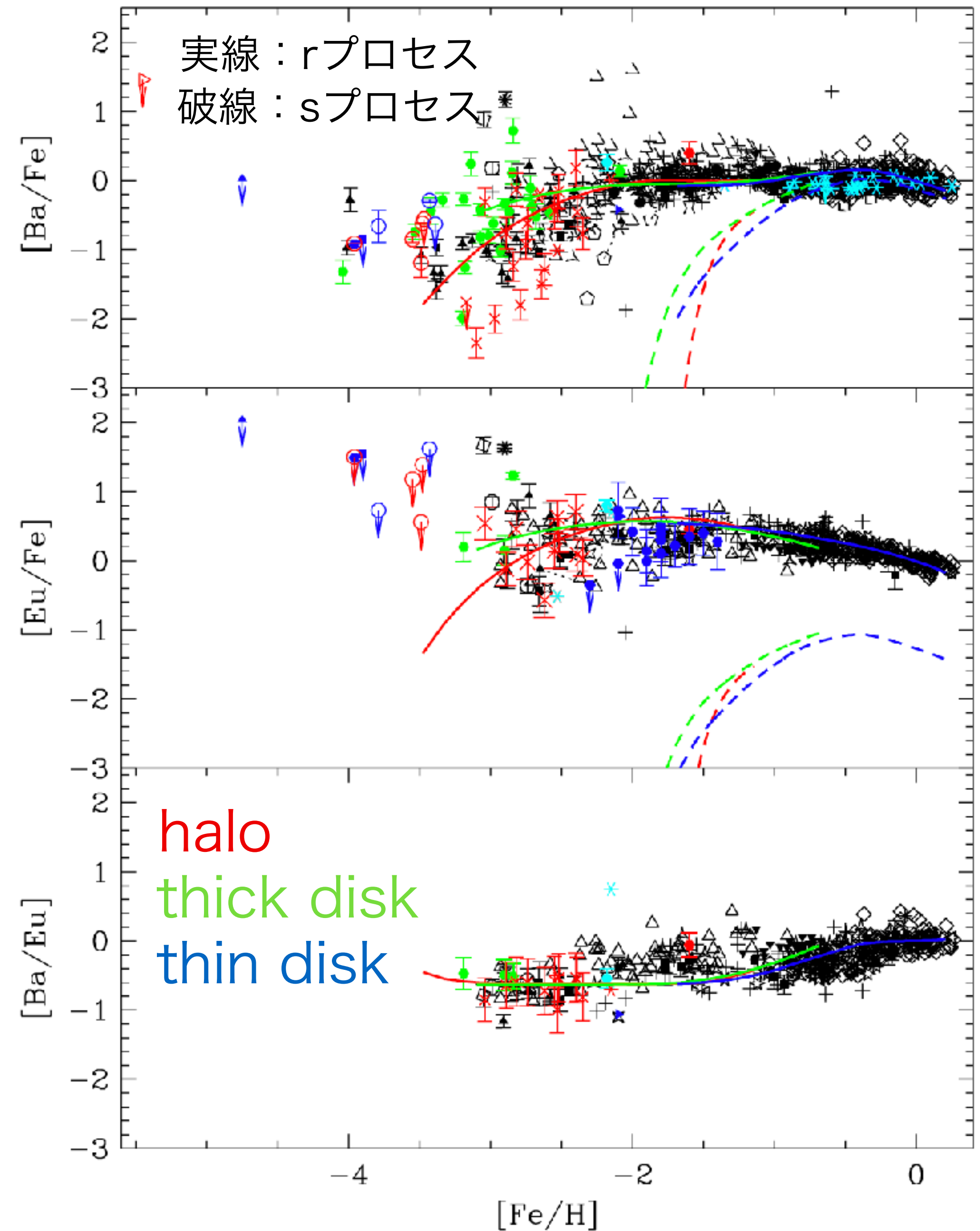
(仮定)

sプロセス：AGB星 ( $1-7 M_{\text{sun}}$ )

rプロセス：II型超新星爆発

( $8-10 M_{\text{sun}}$ )

$[\text{Fe}/\text{H}] > -1.5$ からAGB星による  
sプロセスの寄与が始まる





# AGB, RMSの影響

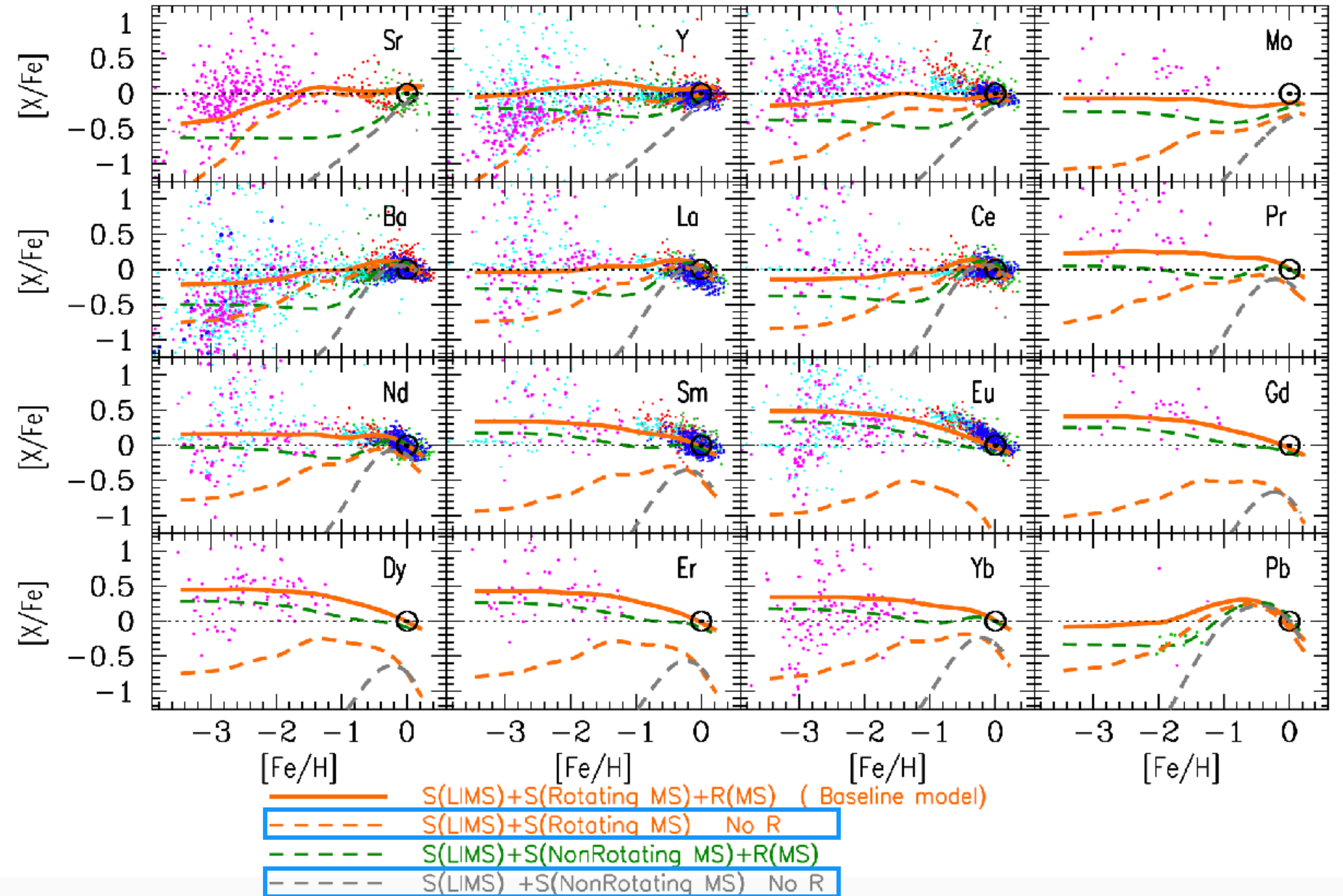
AGB星:

- $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$  から寄与
- 重い元素ほど低金属量からAGB星の影響がみられる

RMS:

- $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.6$  で全ての元素においてAGB星より強い寄与

Prantzos et al. 2018, MNRAS, 476, 3432



# 矮小銀河モデル

Hirai et al. 2019, ApJ, 885, 33

総質量:

$$7 \times 10^8 M_{\odot}$$

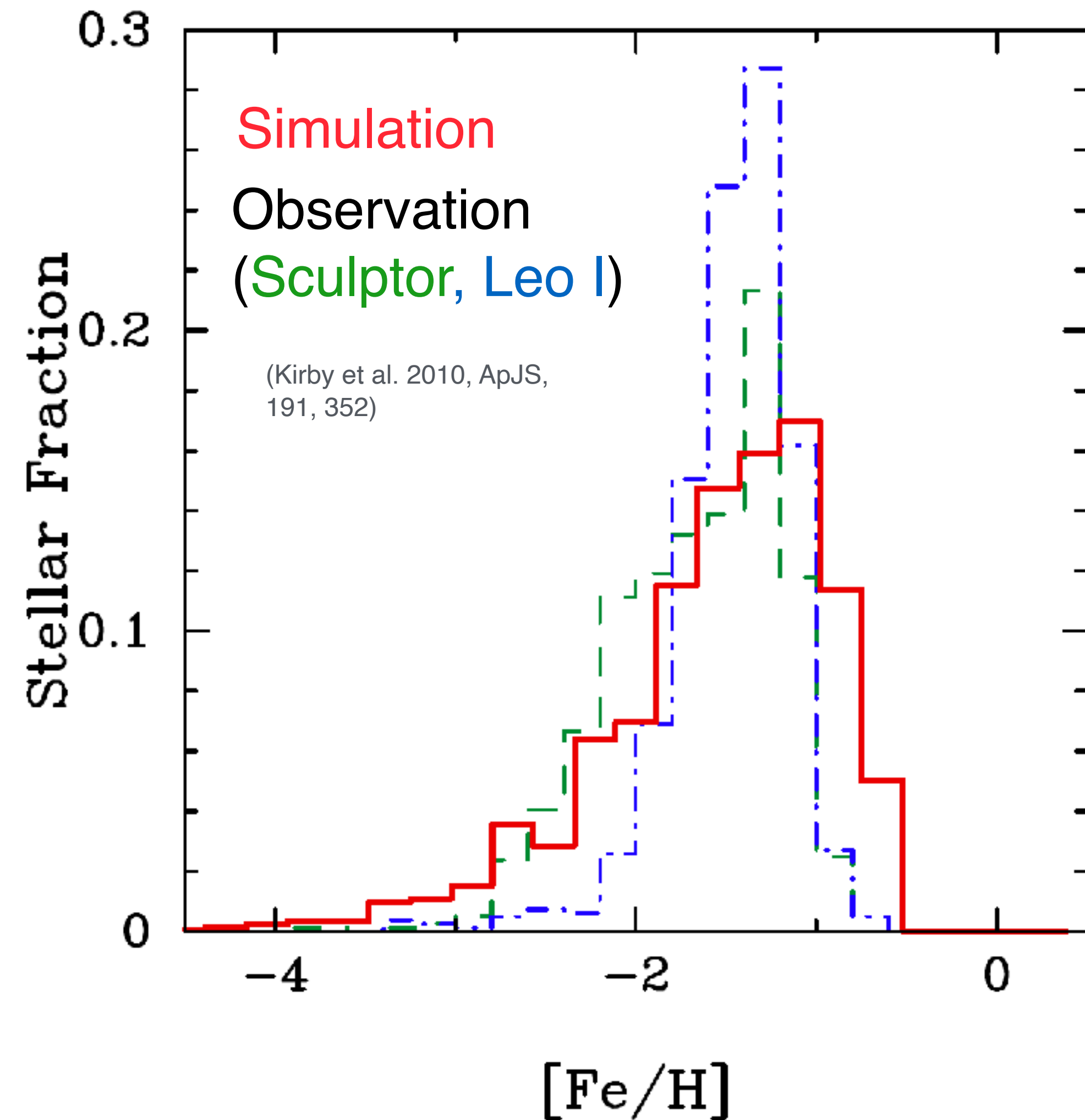
13.8 Gyr時点での星質量:

$$3 \times 10^6 M_{\odot}$$

総粒子数:  $3 \times 10^5$

ソフトニング長:  $7.8 \text{ pc}$

## 金属量分布



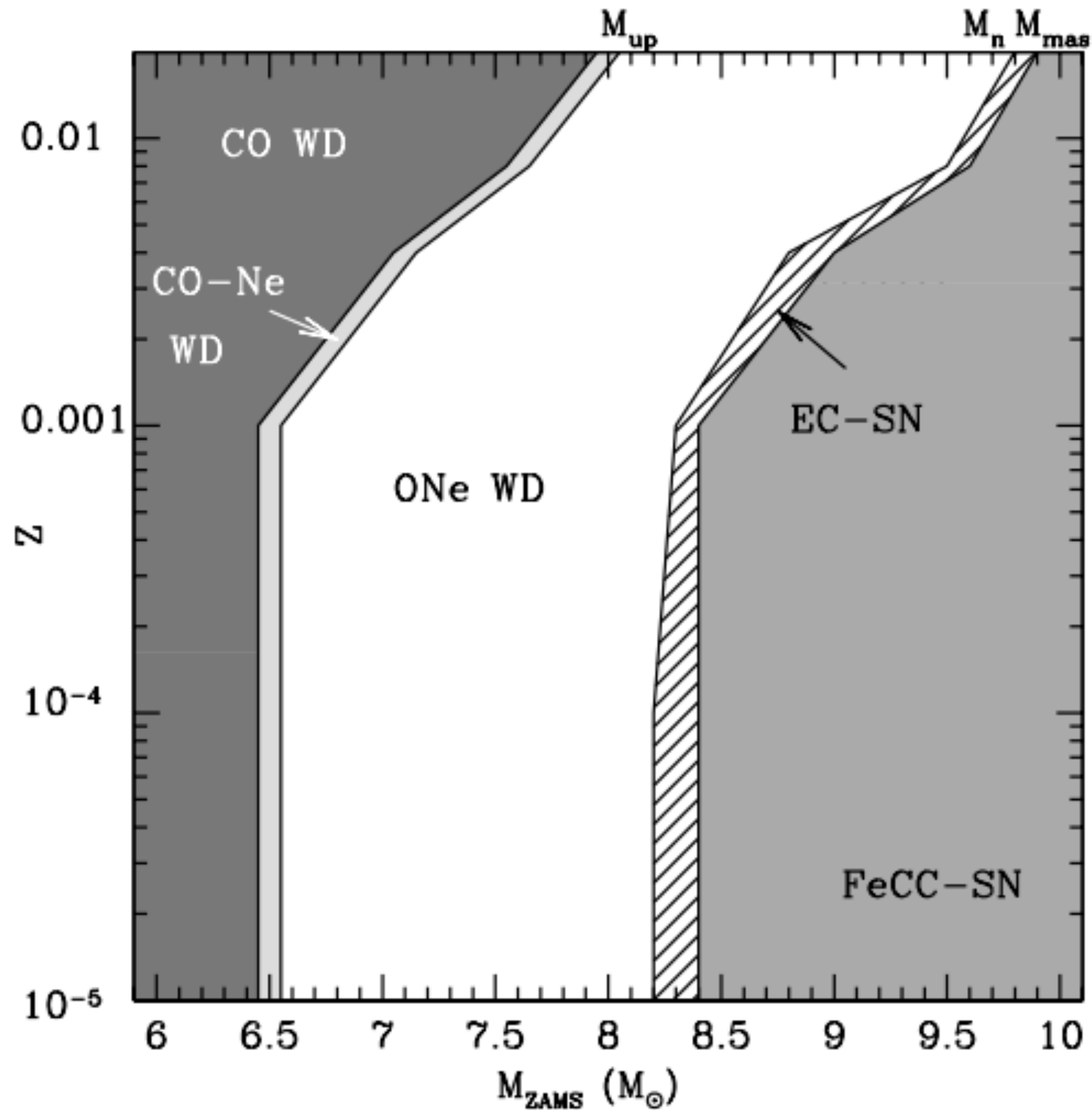
# Method

Hirai et al. 2019, ApJ, 885, 33

***N*-body/SPH code ASURA** (Saitoh et al. 2008; 2009)

- Star Formation
- Cooling and Heating Function (Cloudy, Ferland et al. 2013)
- Supernova Feedback
- Chemical Evolution (CELib, Saitoh 2017)
  - Core-Collapse Supernovae, Hypernovae  
(yield: Nomoto et al. 2013, mass range: 13-40  $M_{\text{sun}}$ )
  - Electron-Capture Supernovae (yield: Wanajo et al. 2018, mass range: Doherty et al. 2015)
  - Rotating Massive Stars (yield: set F, Limongi & Chieffi 2018,  $v_{\text{rot}} = 150 \text{ kms}^{-1}$ )
  - Neutron Star Mergers (yield: Wanajo et al. 2014, delay time:  $t^{-1}$ )
  - Type Ia Supernovae (yield: Seitenzahl et al. 2013, N100)
  - AGB stars (yield: Cristallo et al. 2009, 2011, 2015)

# ECSNの質量範囲



Doherty et al. 2015, MNRAS, 446, 2599

**8.2-8.4  $M_{sun}$  at  $Z = 10^{-4}$**

(metallicity dependent, Doherty et al. 2015)

不定性が大きいいため、

8.2-9.2  $M_{sun}$ 固定でも計算

# モデル

Hirai et al. 2019, ApJ, 885, 33

Model	Mass Ranges of ECSNe	RMSs	NSMs	AGBs
A	no	no	yes	yes
B	Doherty et al. (2015)	no	yes	yes
C	8.2–9.2 $M_{\odot}$ for $Z > 10^{-5}Z_{\odot}$	no	yes	yes
D	Doherty et al. (2015)	yes	yes	yes
E	Doherty et al. (2015)	no	no	yes
F	Doherty et al. (2015)	yes	no	yes

# [Sr/Fe] vs. [Fe/H]

AGB+NSM: 銀河系の平均値を説明するには不足

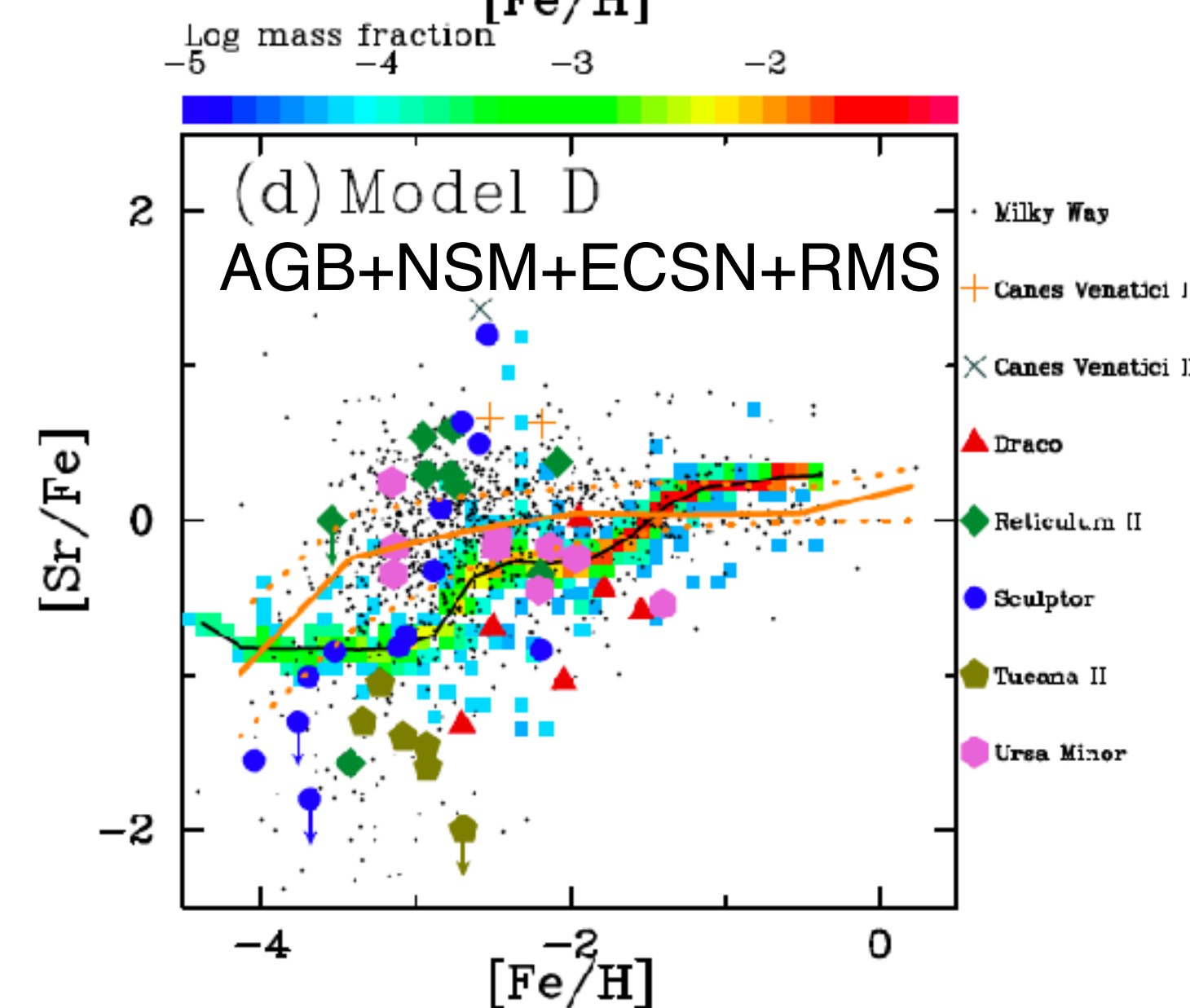
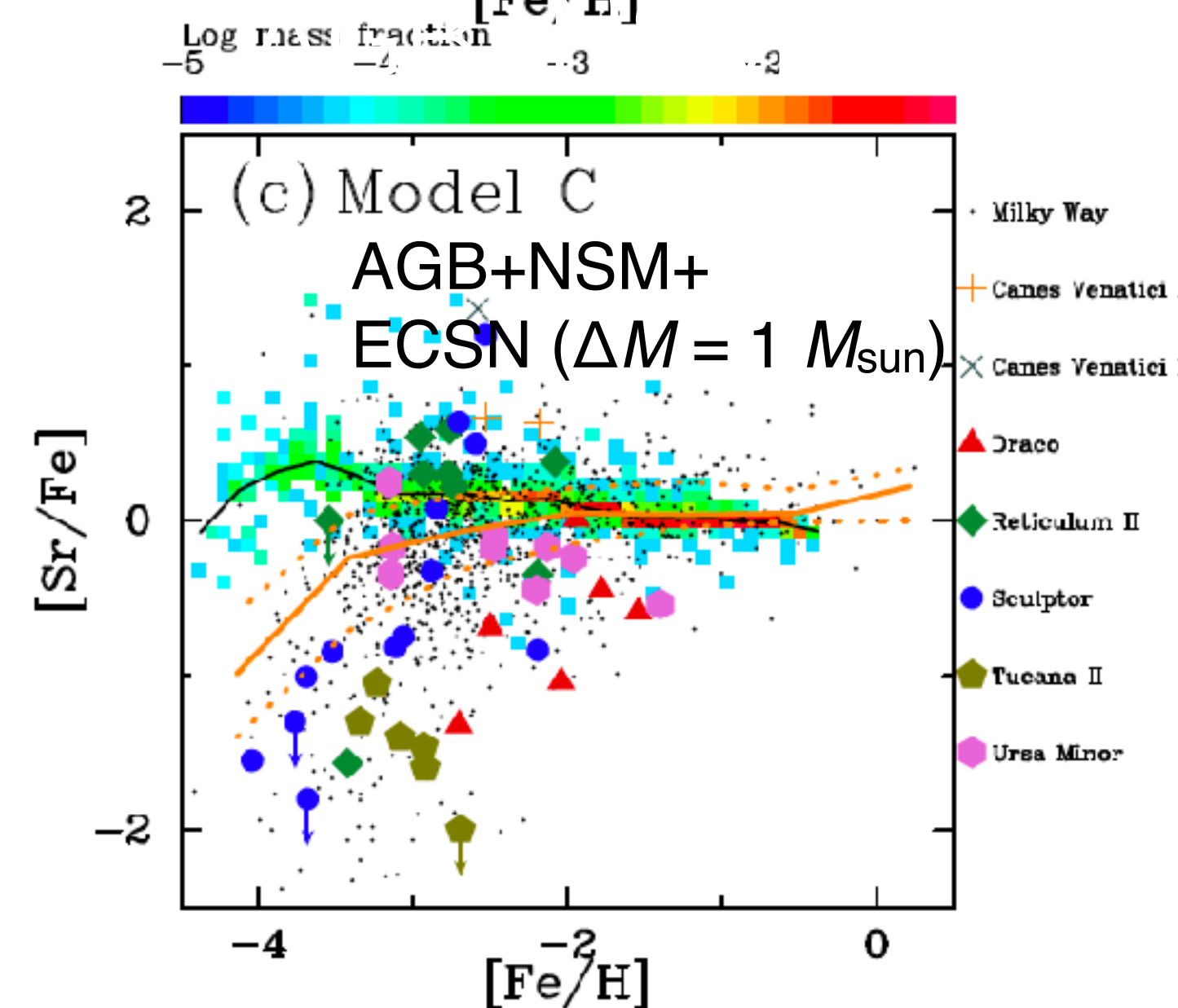
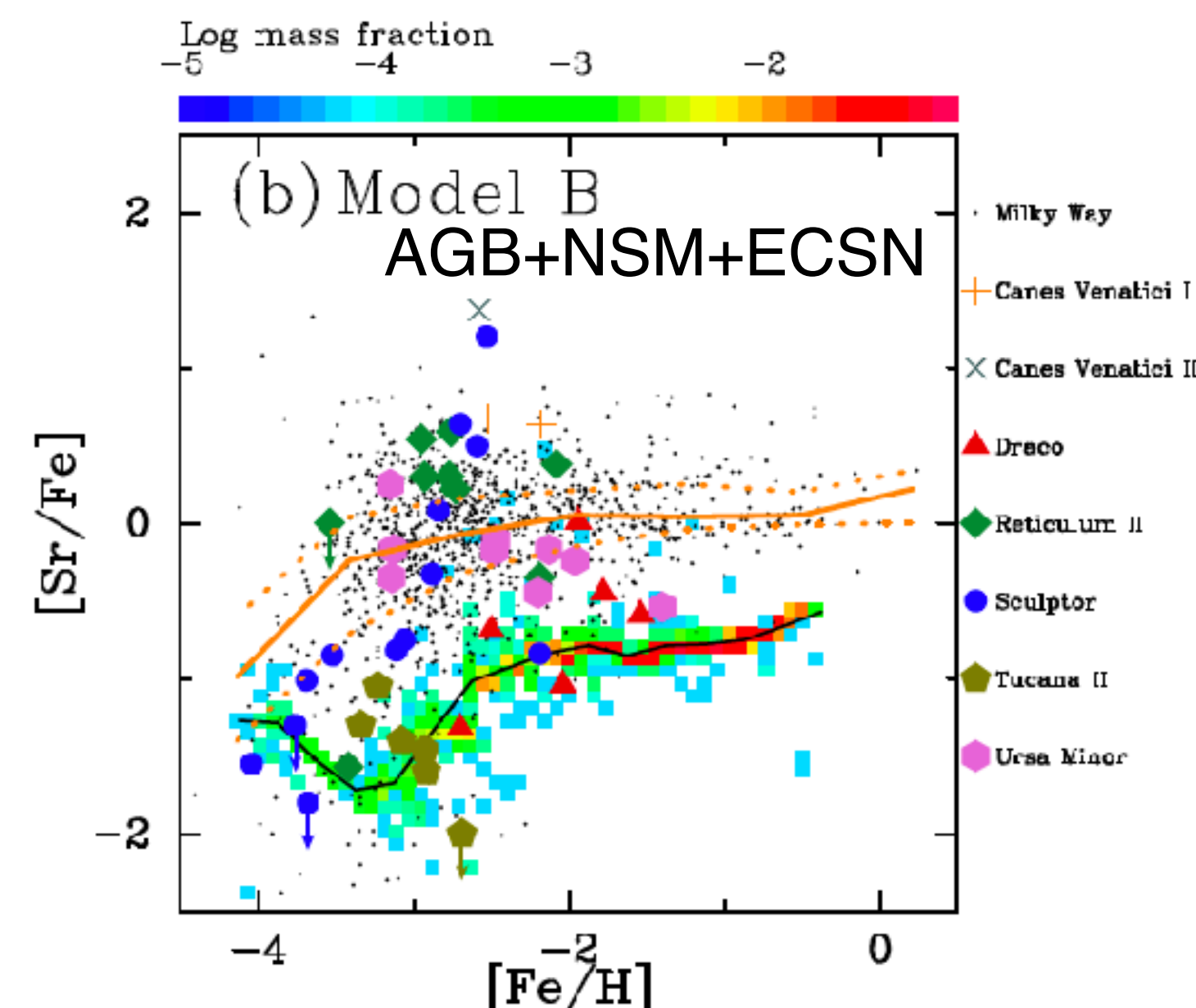
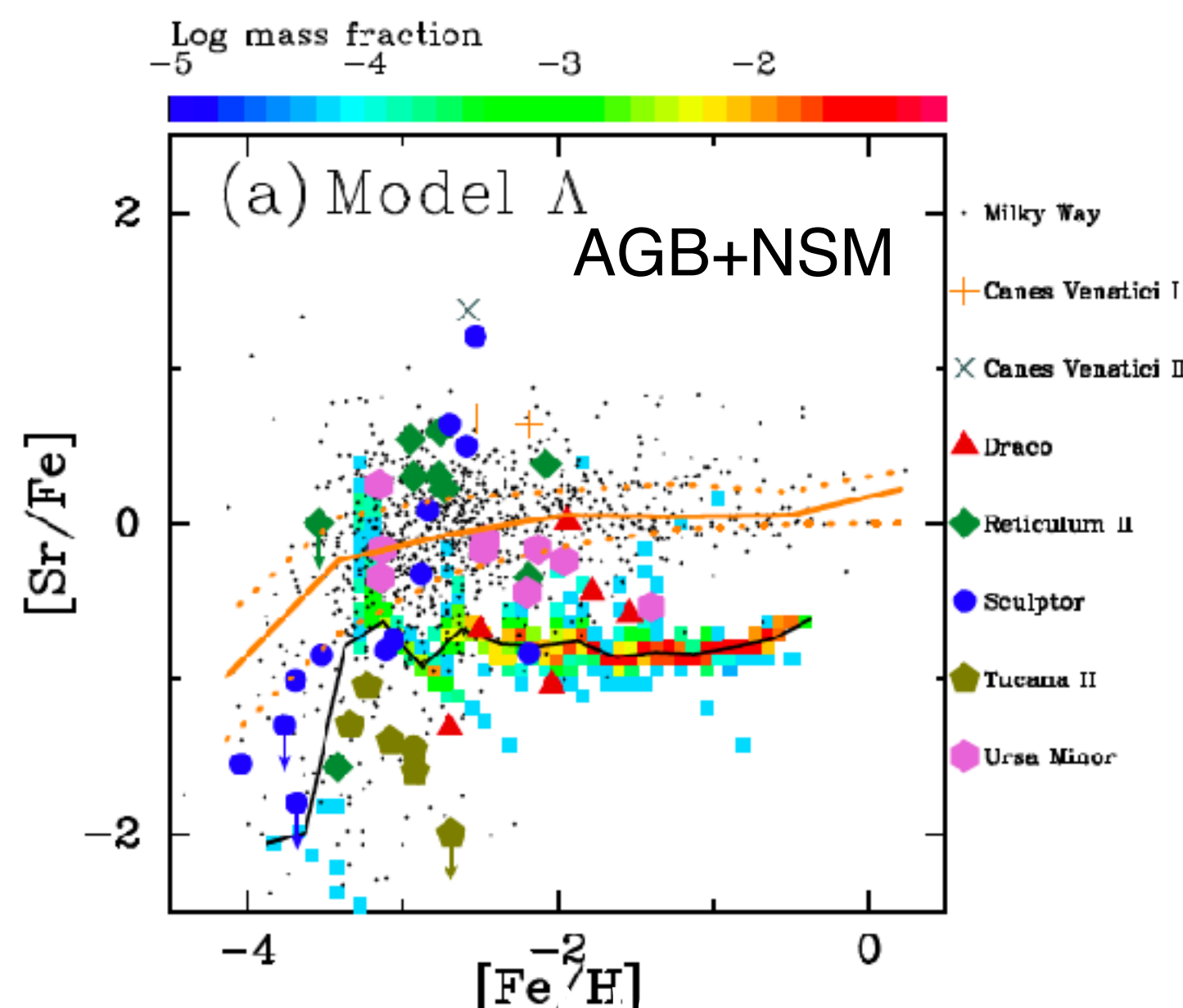
AGB+NSM+ECSN:

- ・ EMP星でECSNが寄与
- ・ ECSNの質量範囲に大きく依存

AGB+NSM+ECSN+RMS:

- ・ [Sr/Fe]比を増加させる

AGB+NSMだけでは足りず、ECSN・RMSの寄与が必要



# [Ba/Eu] vs. [Fe/H]

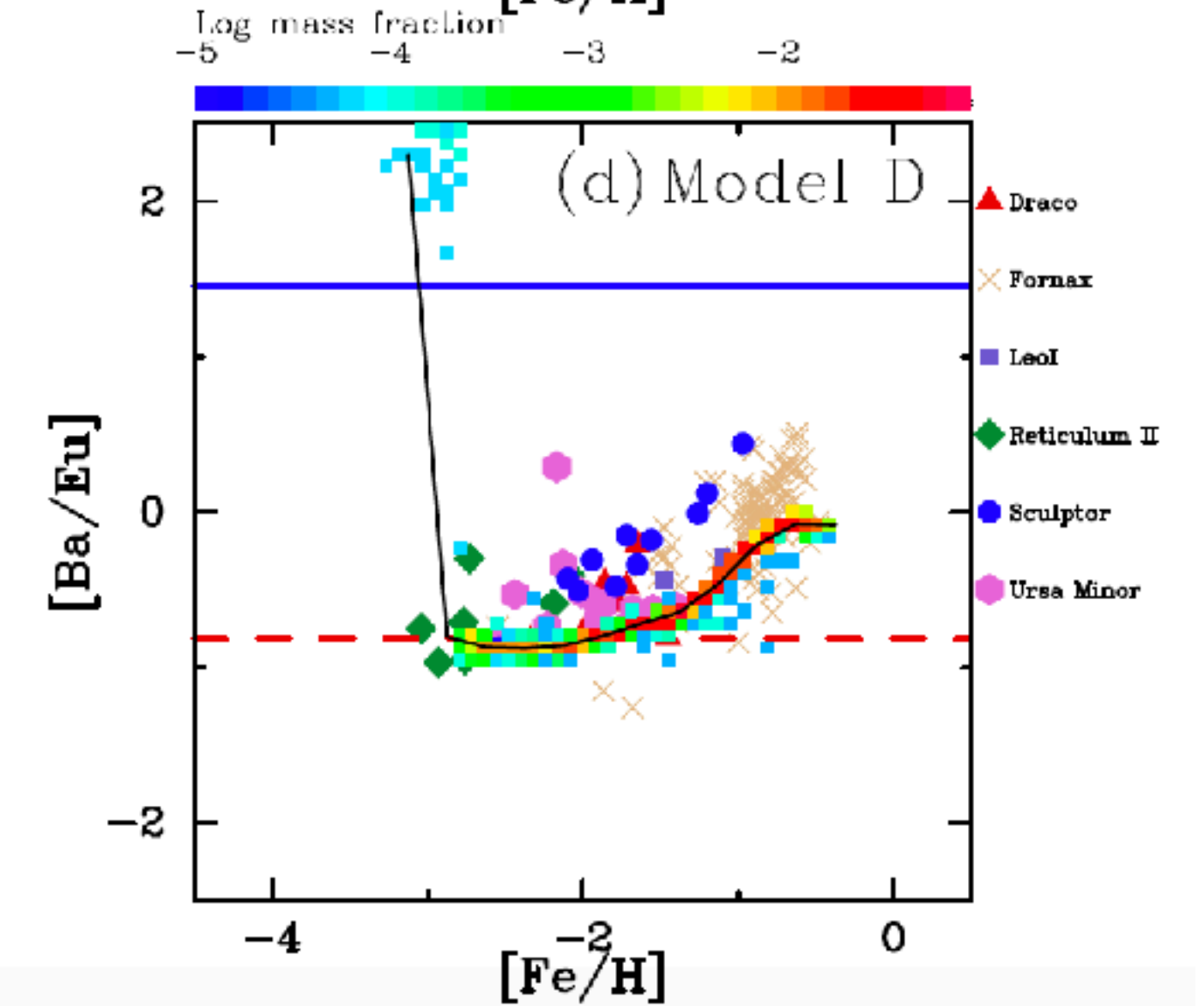
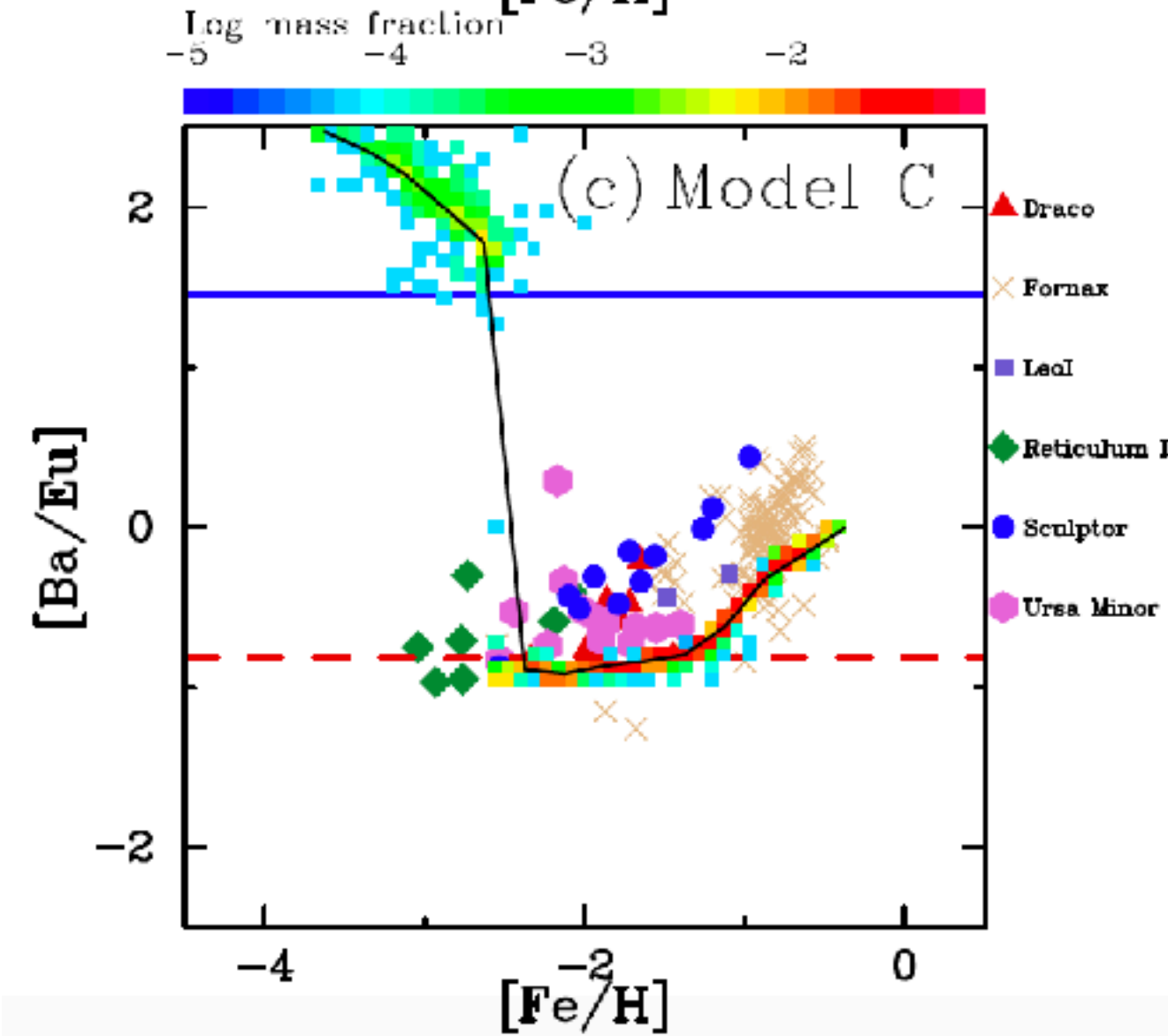
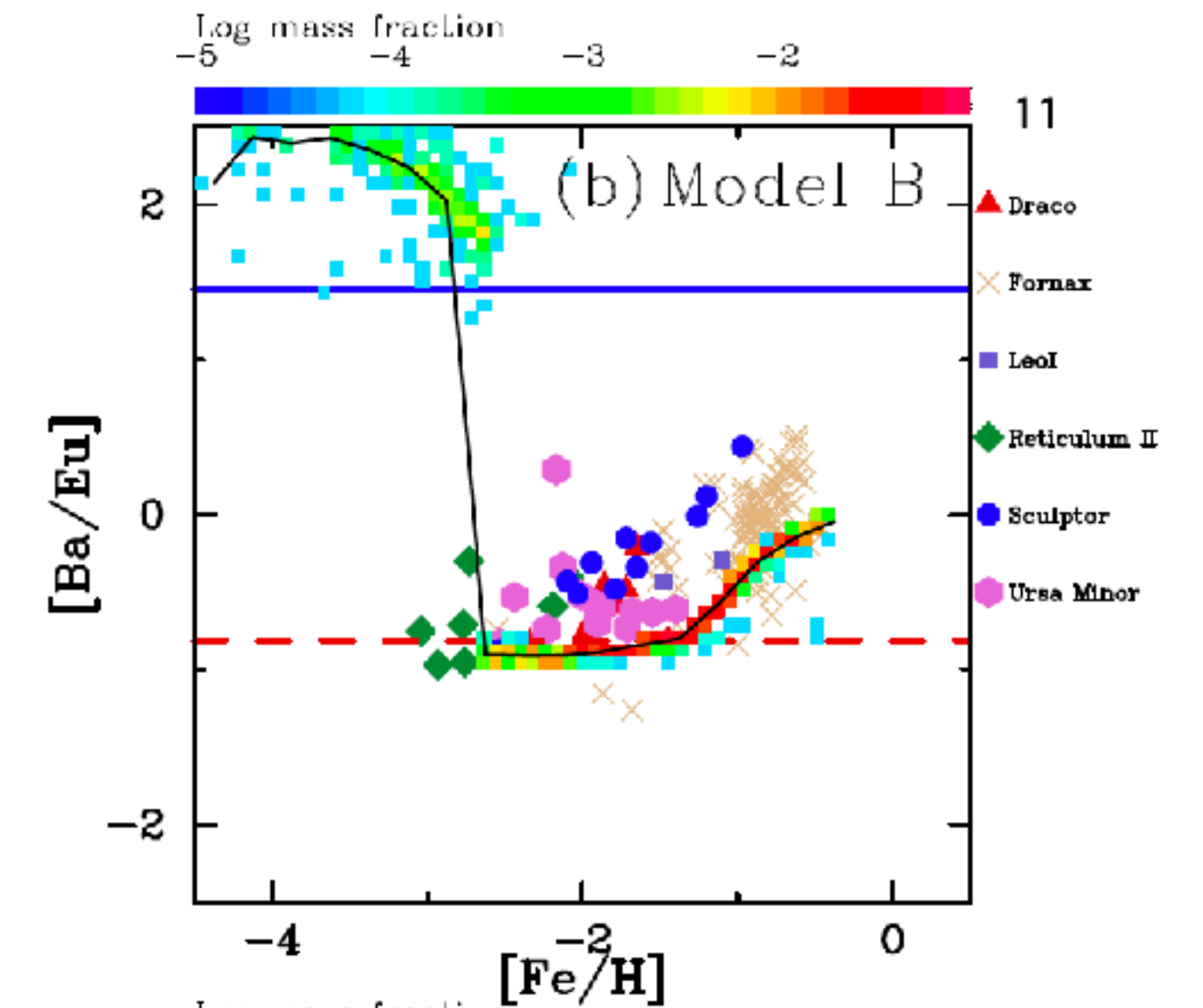
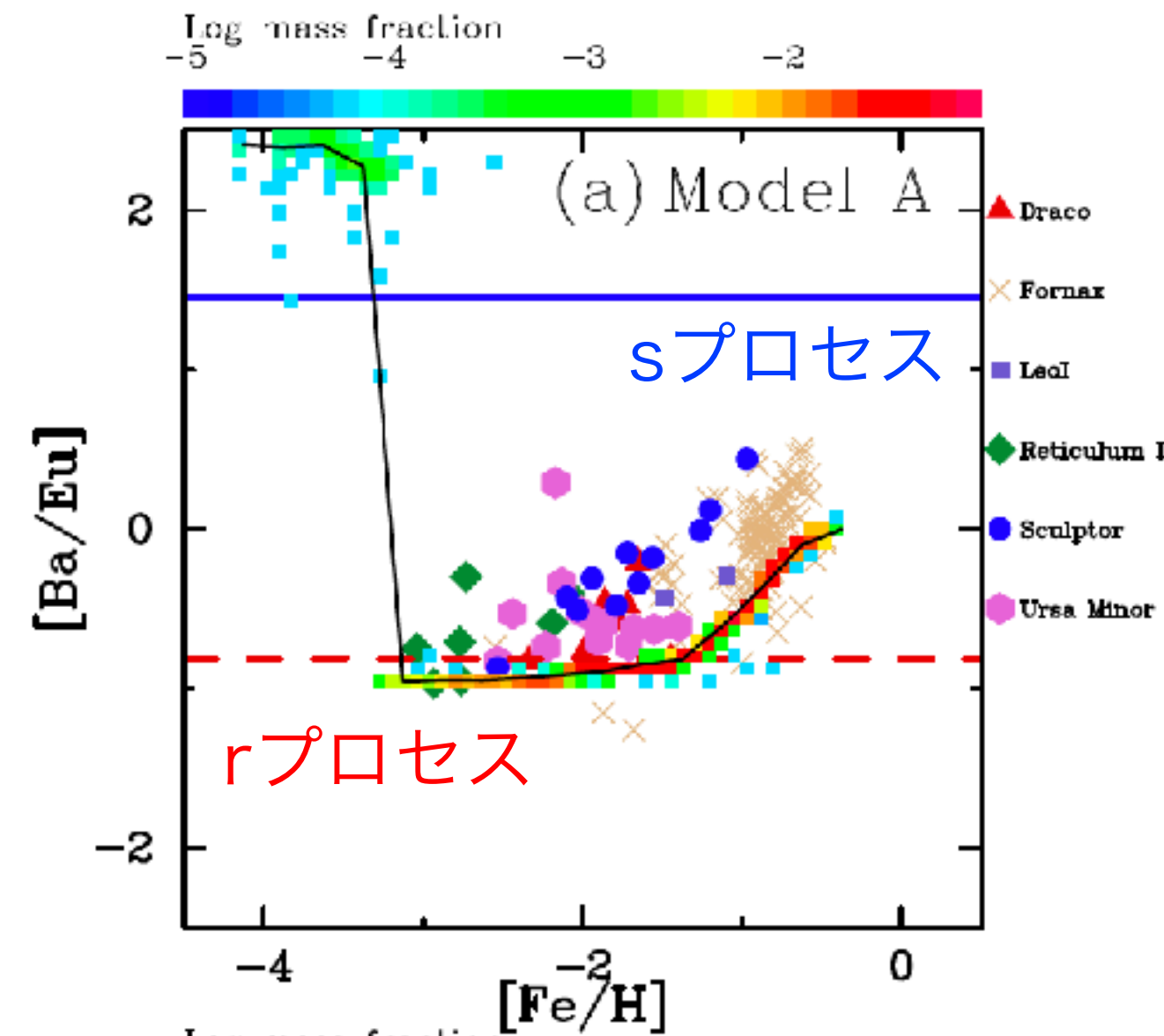
## AGBとNSMで決まる

[Ba/Eu] > 2の星：AGB由来  
(現在の観測では受からない)

[Ba/Eu] ~ -1の星：NSM由来

AGBのyieldの金属量依存性  
→ [Fe/H] > -1 から [Ba/Eu] 増加

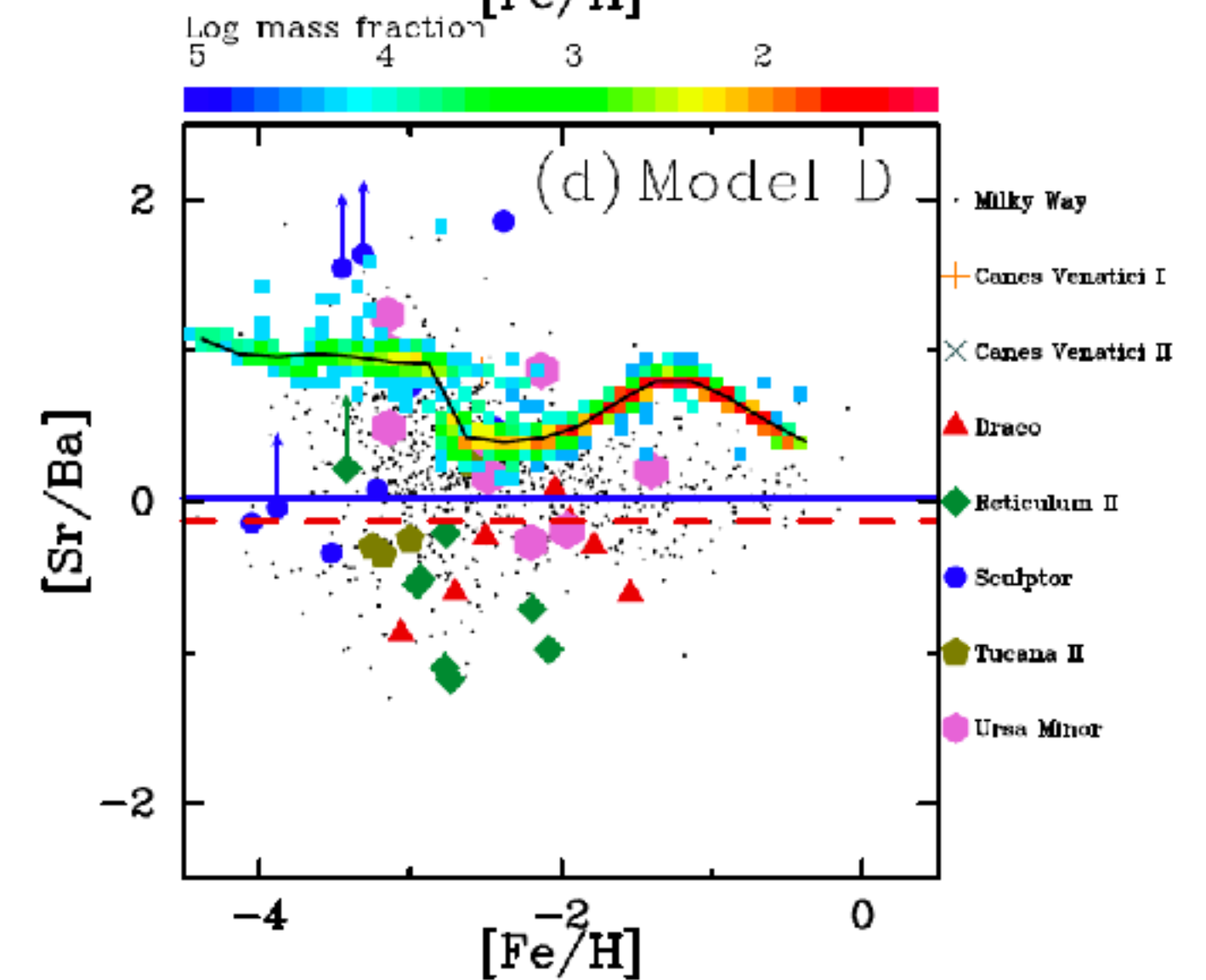
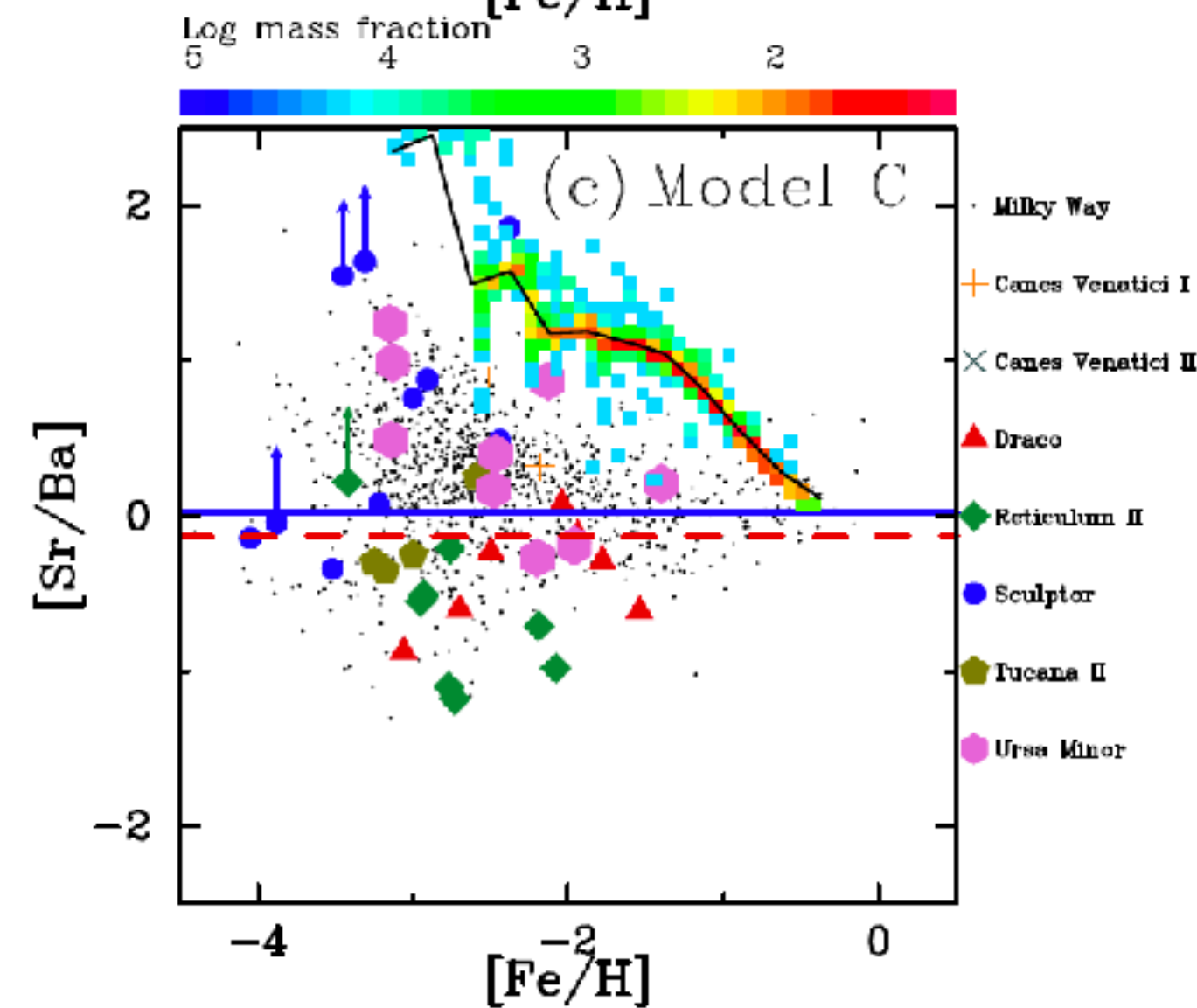
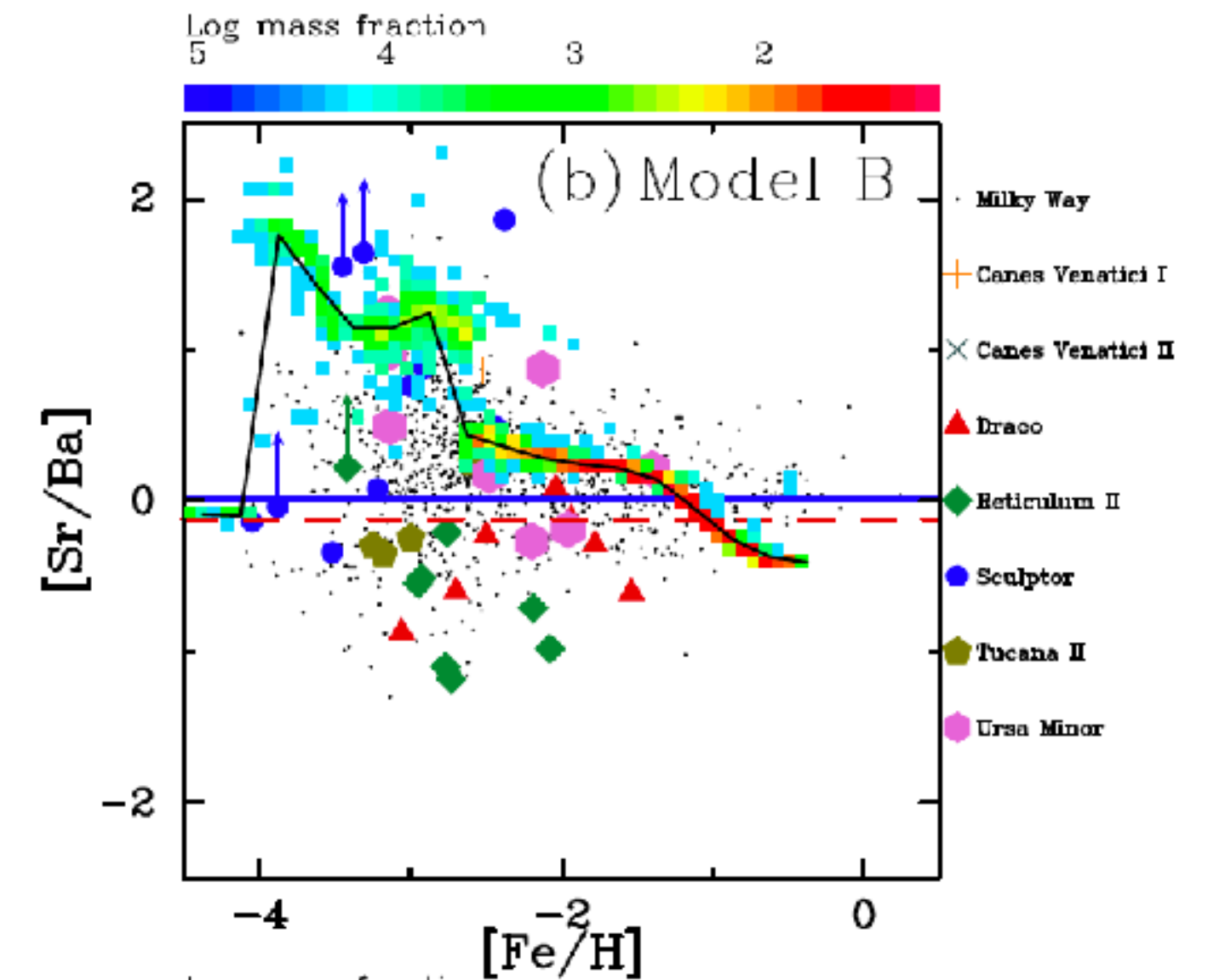
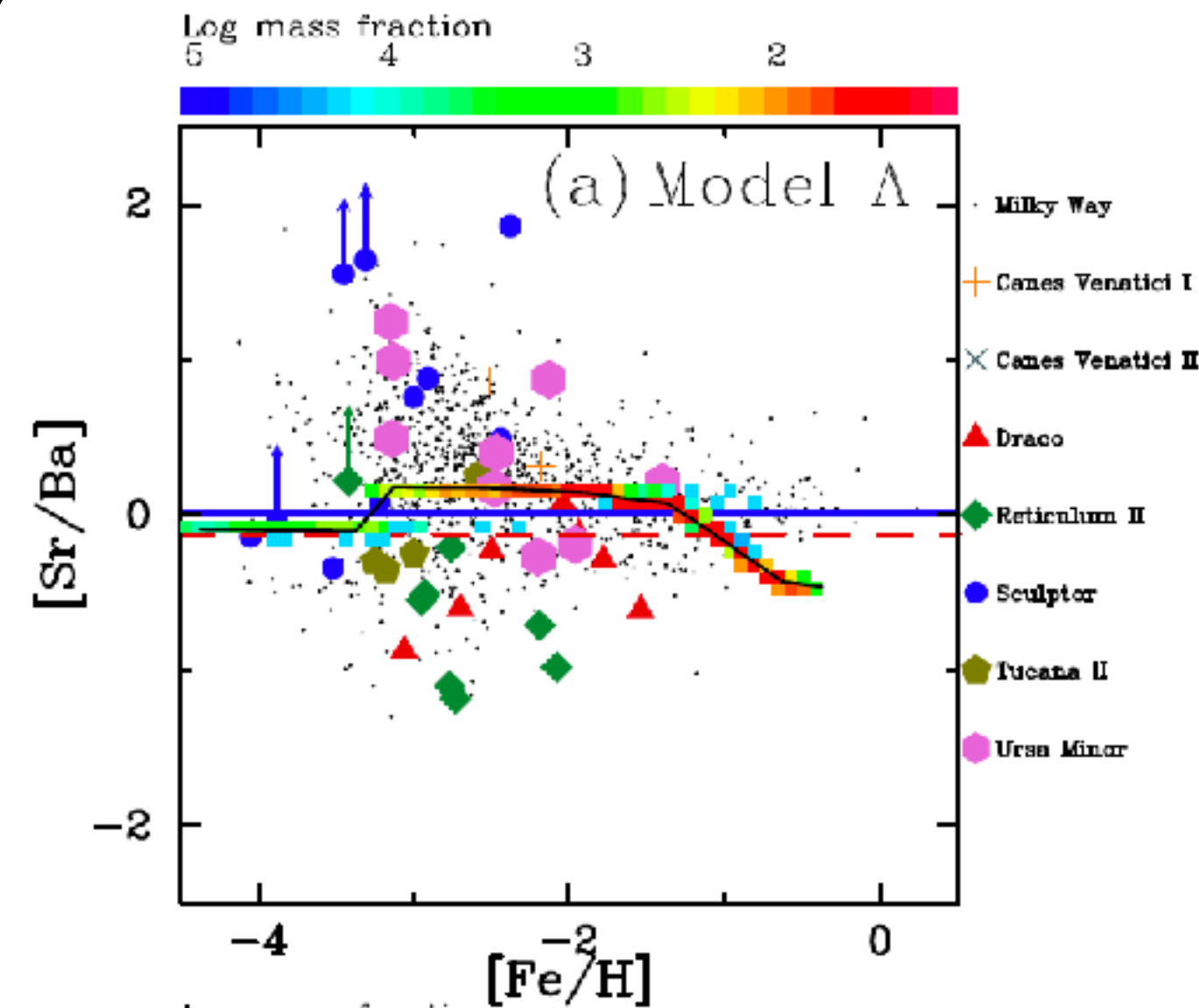
ECSNとRMSの影響は小さい



# [Sr/Ba] vs. [Fe/H]

[Sr/Ba]に富んだ星：  
ECSN由来

モデルC：[Sr/Ba]過剰  
→ECSNの親星質量範囲は  
 $\Delta M < 1 M_{\text{sun}}$





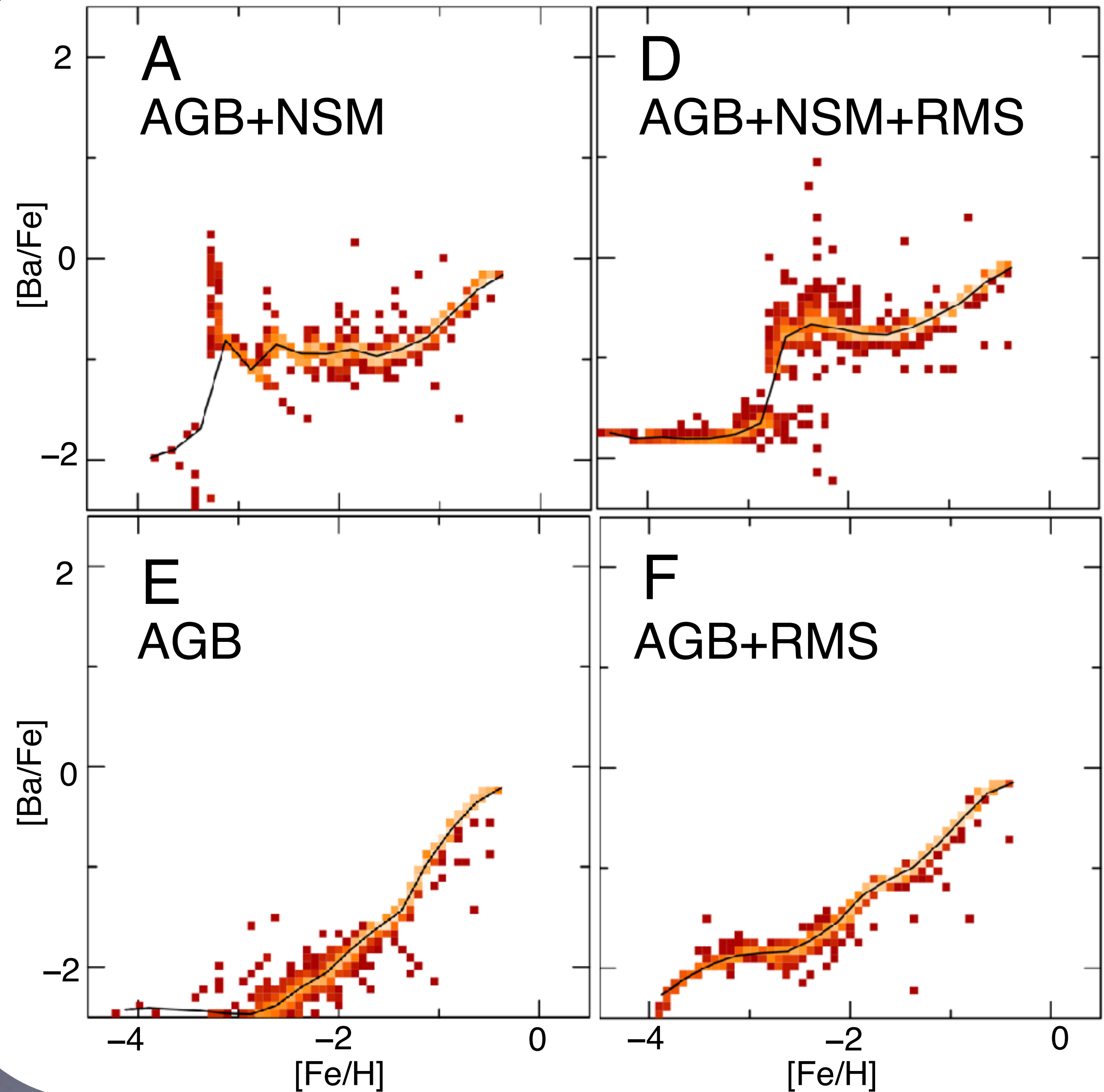
# [Ba/Fe] vs. [Fe/H]

Hirai et al. 2019のモデルでの  
[Ba/Fe]比

dSphsならAGB+NSMでも  
説明できそう

AGBのみ (モデルE)だとEMP  
星の[Ba/Fe]は不足する

RMSの回転速度を低金属量  
でより大きくすれば[Ba/Fe]  
量を増やせそう



# まとめ

- ・ Srの化学進化には、NSM, ECSN, AGB, RMSが寄与
- ・ 高い[Sr/Ba]比を持つ星はECSN由来の可能性が高い
- ・ Baの化学進化理解には、NSM, AGB, RMSからの汚染史を理解する必要がある
- ・ sプロセスの寄与の程度を[Ba/Eu]比から理解できる

# 今後の課題

## 銀河進化

UFD：低い中性子捕獲元素量の起源は？

dSph：銀河ごとに[Sr/Fe], [Ba/Fe]比は異なる傾向→銀河進化史との関係？

銀河系：低い中性子捕獲元素量の起源・UFD/dSphでの元素組成比との関係

## 元素合成/恒星進化

AGB/rotating massive starの元素合成の理解

恒星進化後期の理解

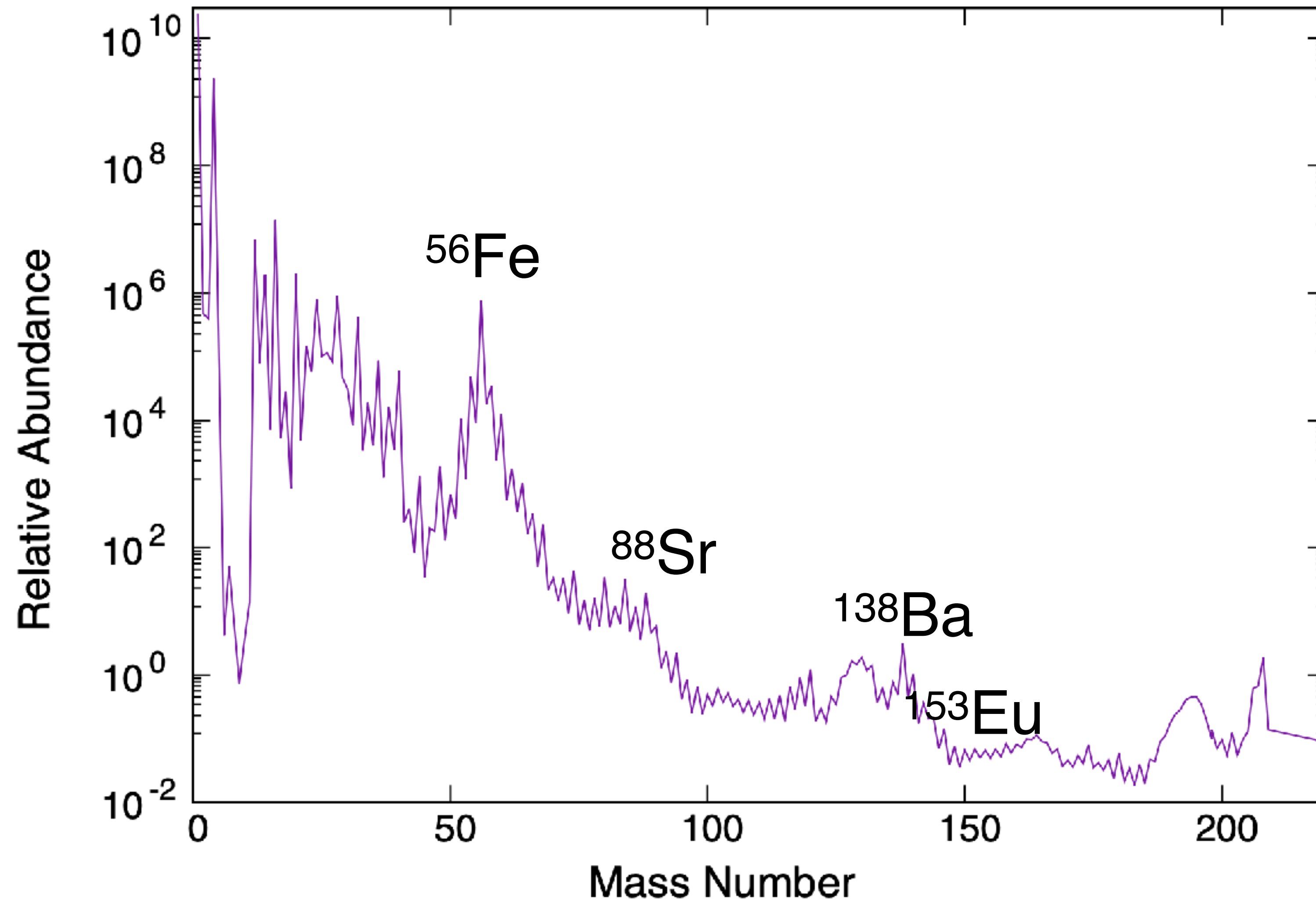
## 観測

低いBa組成の星のEu量→EMP星の中性子捕獲元素はr, sどちらが優勢か？

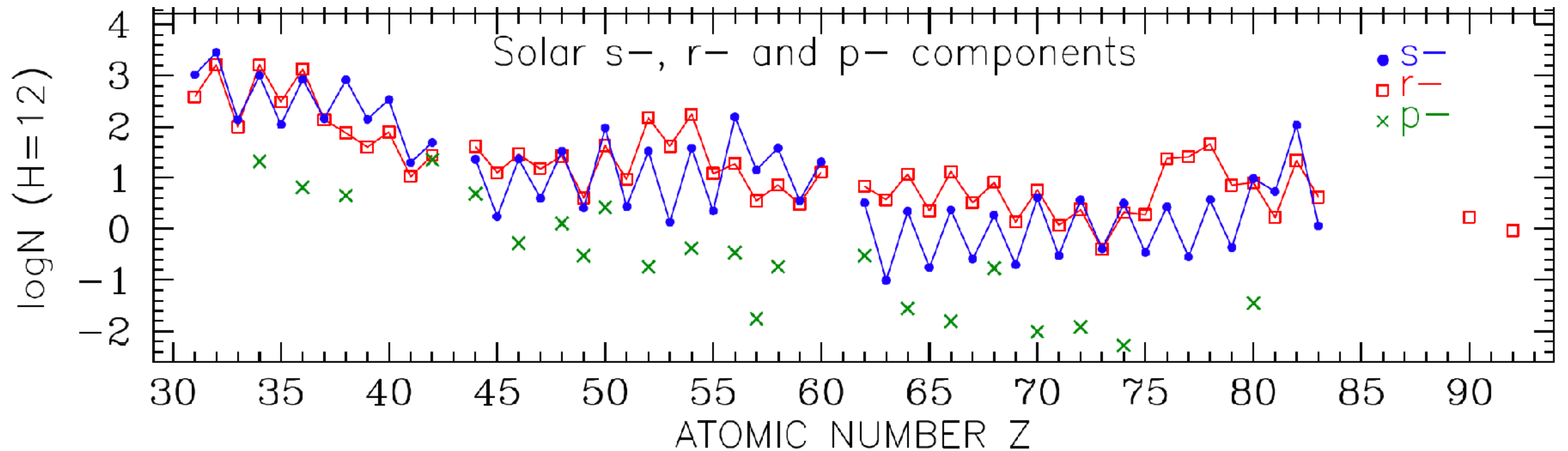
大質量星の回転速度→LMC, SMC以外では？

補足

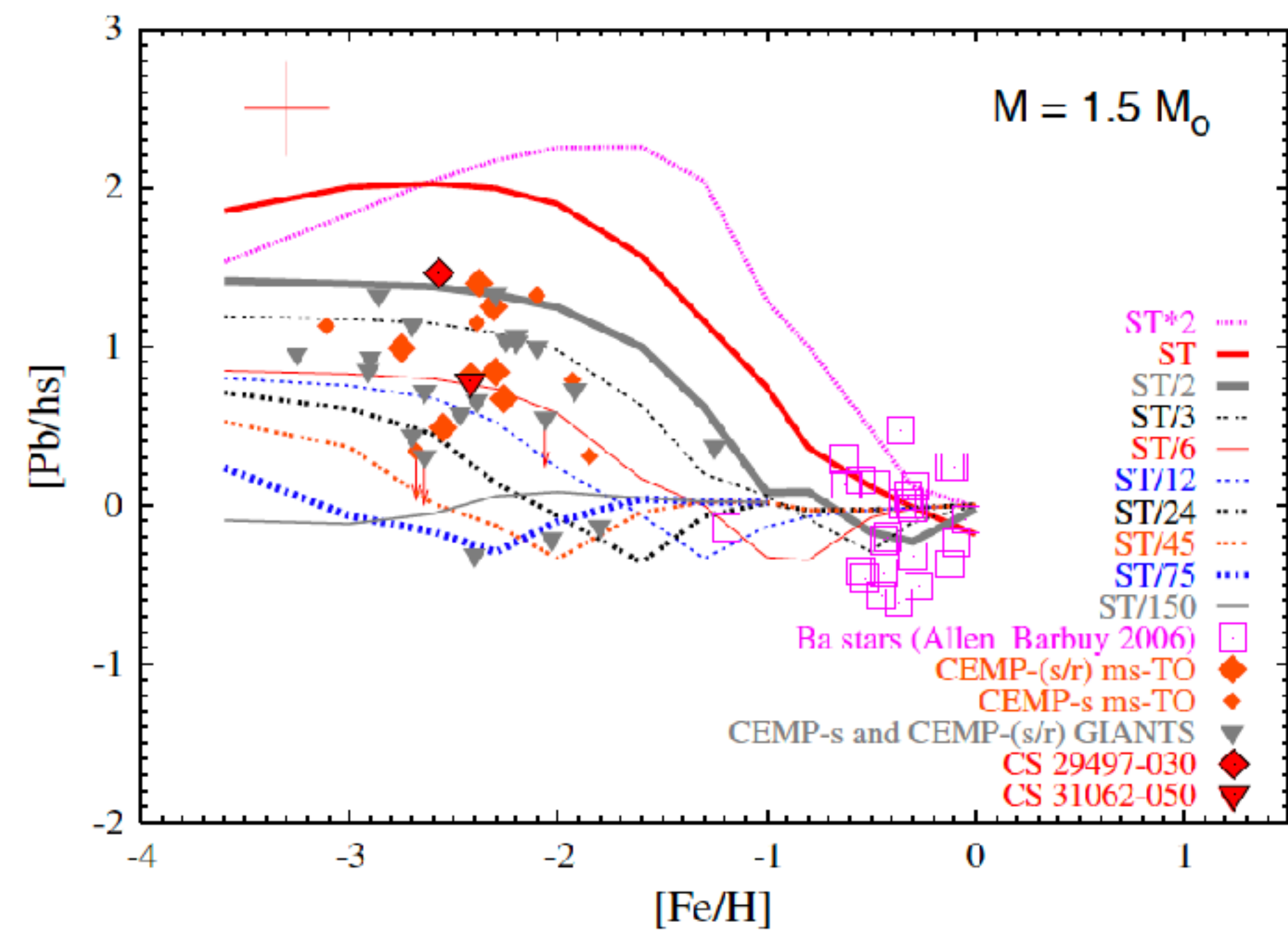
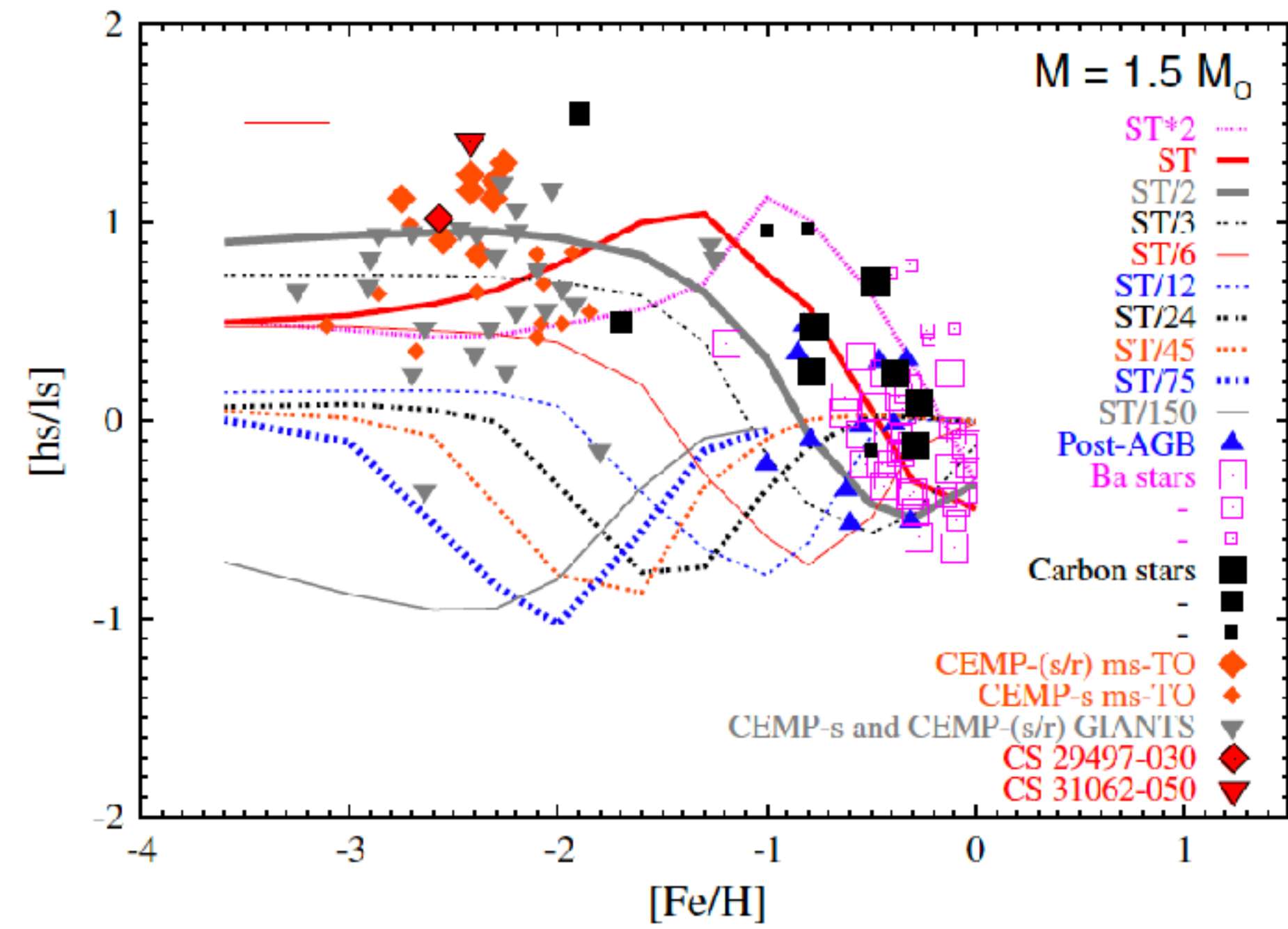
# 太陽系の元素組成



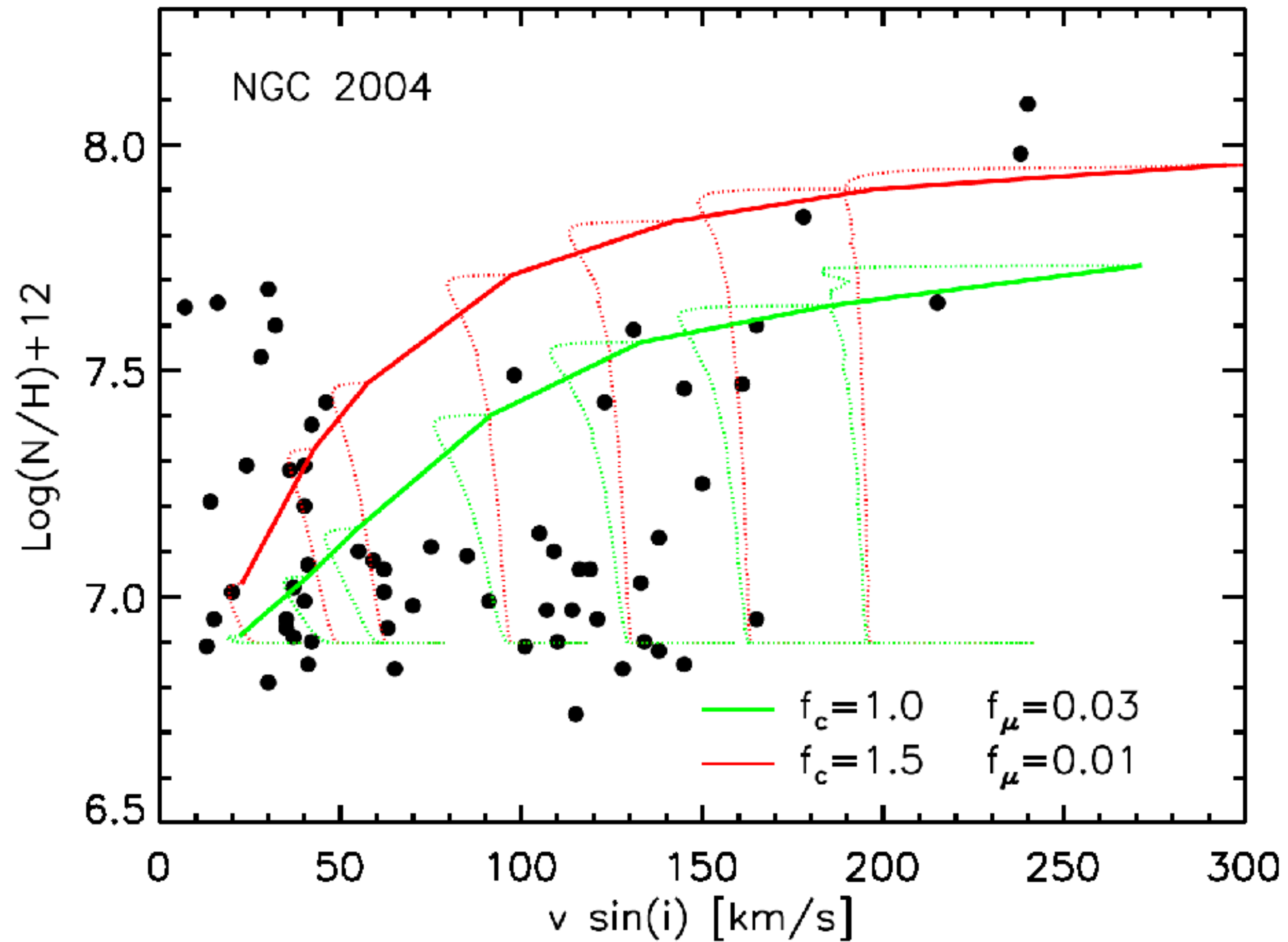
# Solar abundance pattern of s-, r-, and p- components



# [ls/hs] vs. [Fe/H]

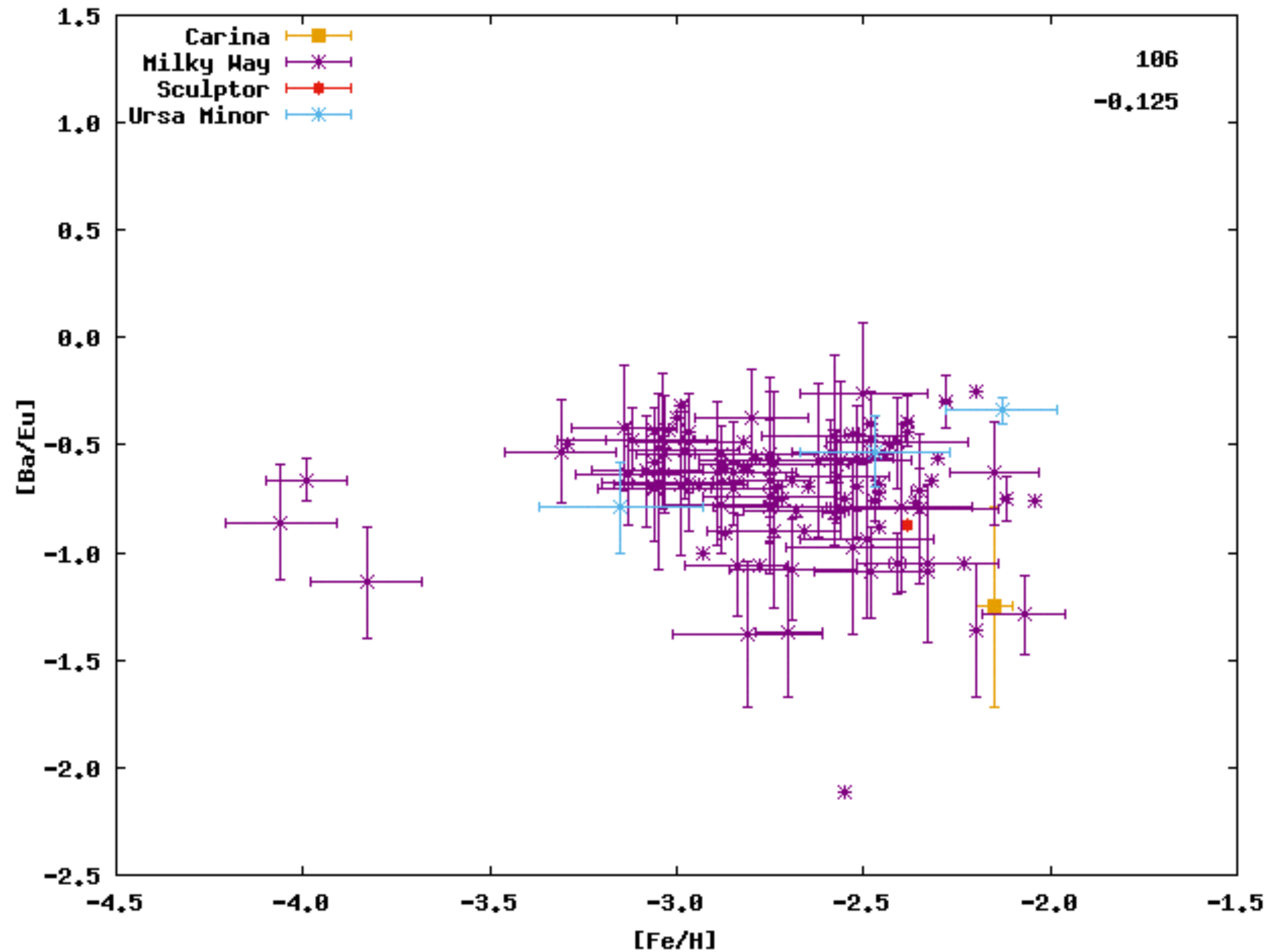


# Calibration of the mixing efficiency





# [Ba/Eu] vs. [Fe/H] with [Ba/Fe] < -0.5



# [Sr/H] vs. [Fe/H] in model B

