

初代星・初代銀河研究会2018@茨城

# r-process元素の起源と進化

平居 悠 (Hirai, Yutaka)

理化学研究所計算科学研究センター

基礎科学特別研究員



# 連星中性子星合体



初代星・  
初代銀河

超新星爆発



r-process

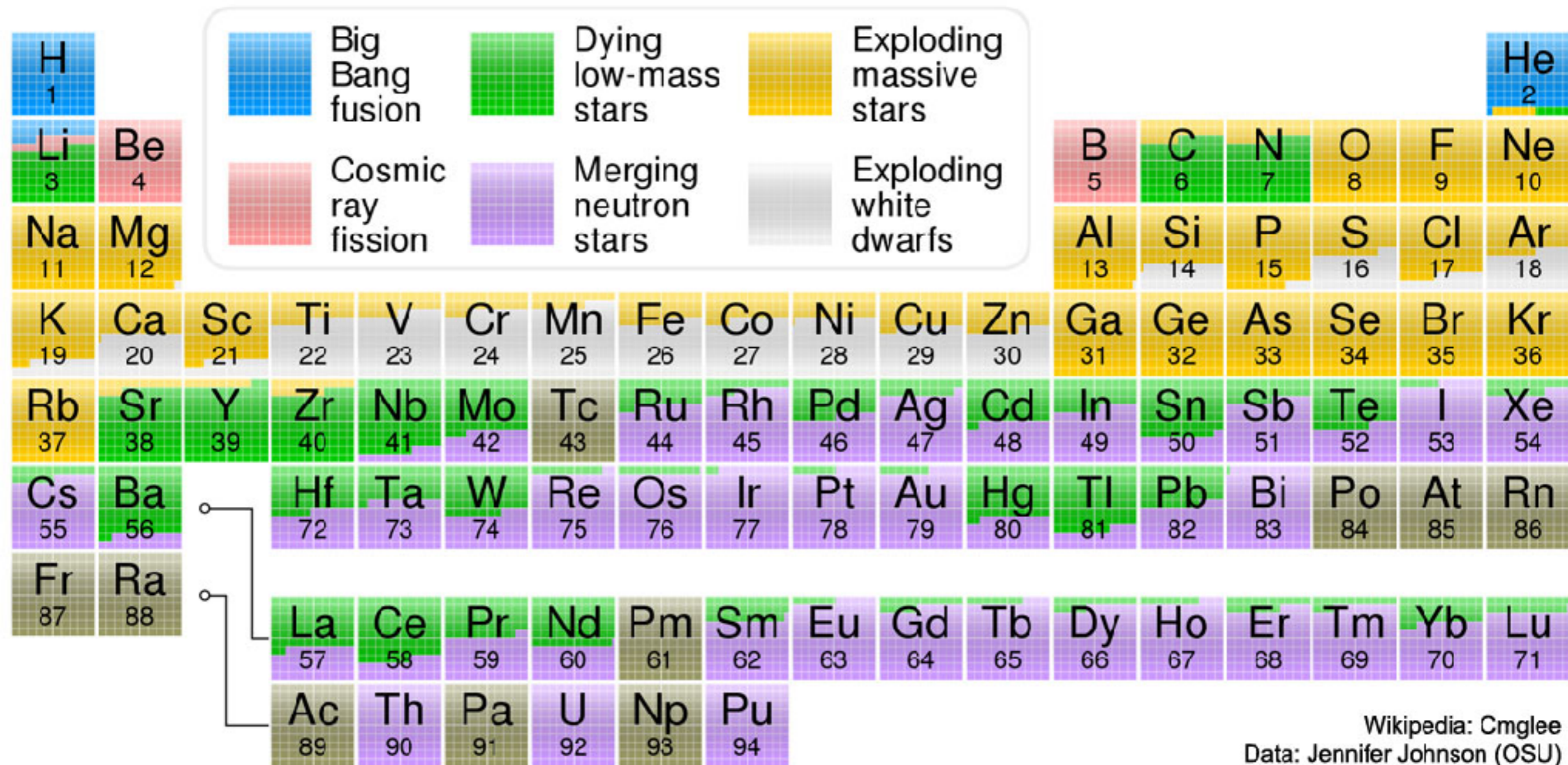
次世代星



金属欠乏星のr-process元素組成から初代星形成環境を制限？

# 鉄より重い核種の約半数は速い中性子捕獲過程

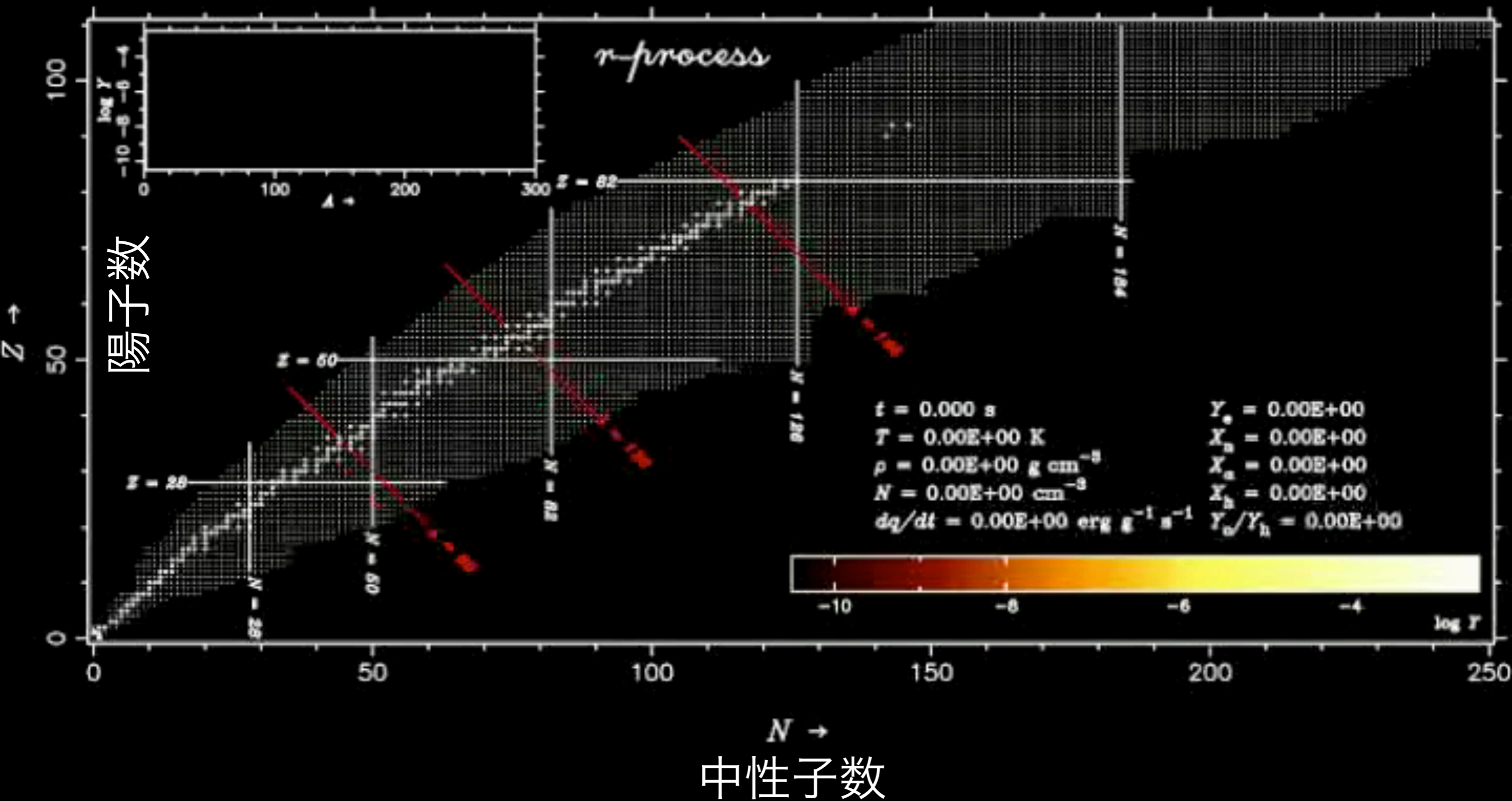
(**r-process**)で合成される



Thielemann et al. (2017), ARNPS, 67, 253; Frebel (2018), ARNPS, 68, 237  
天文月報：rプロセス特集 (2014年1月, 2月号), 平居 (2016), 2016年7月号

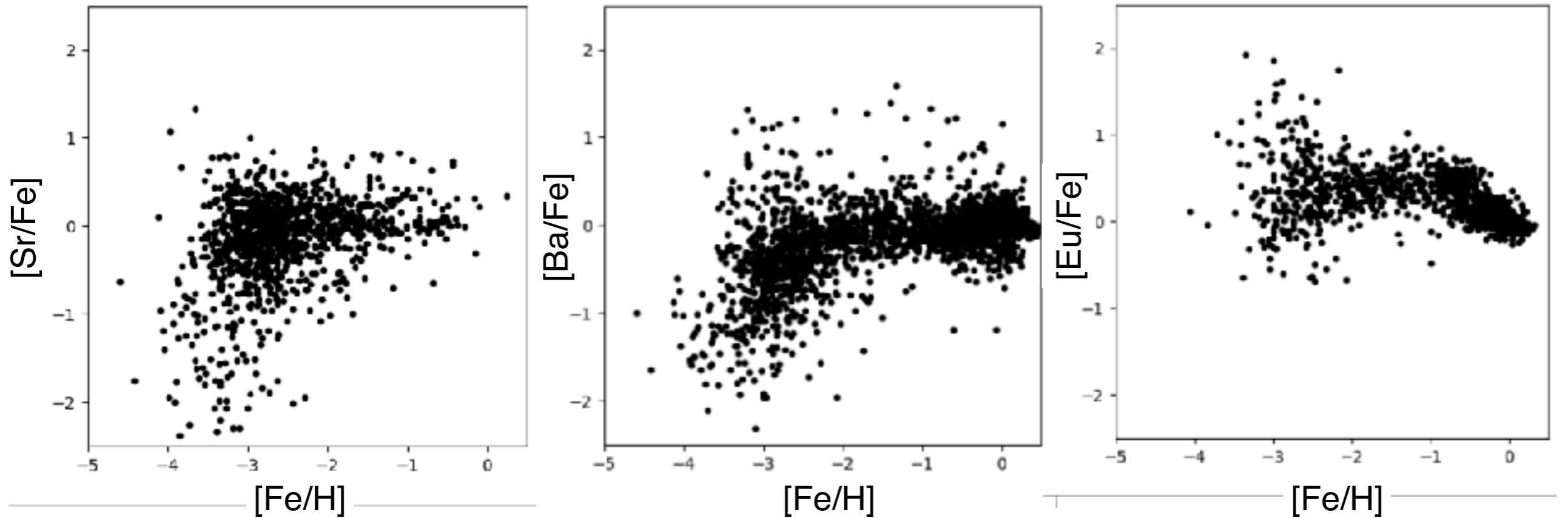
# r-process元素合成

中性子過剰な環境が必要



# r-process元素の観測

# r-process元素の観測



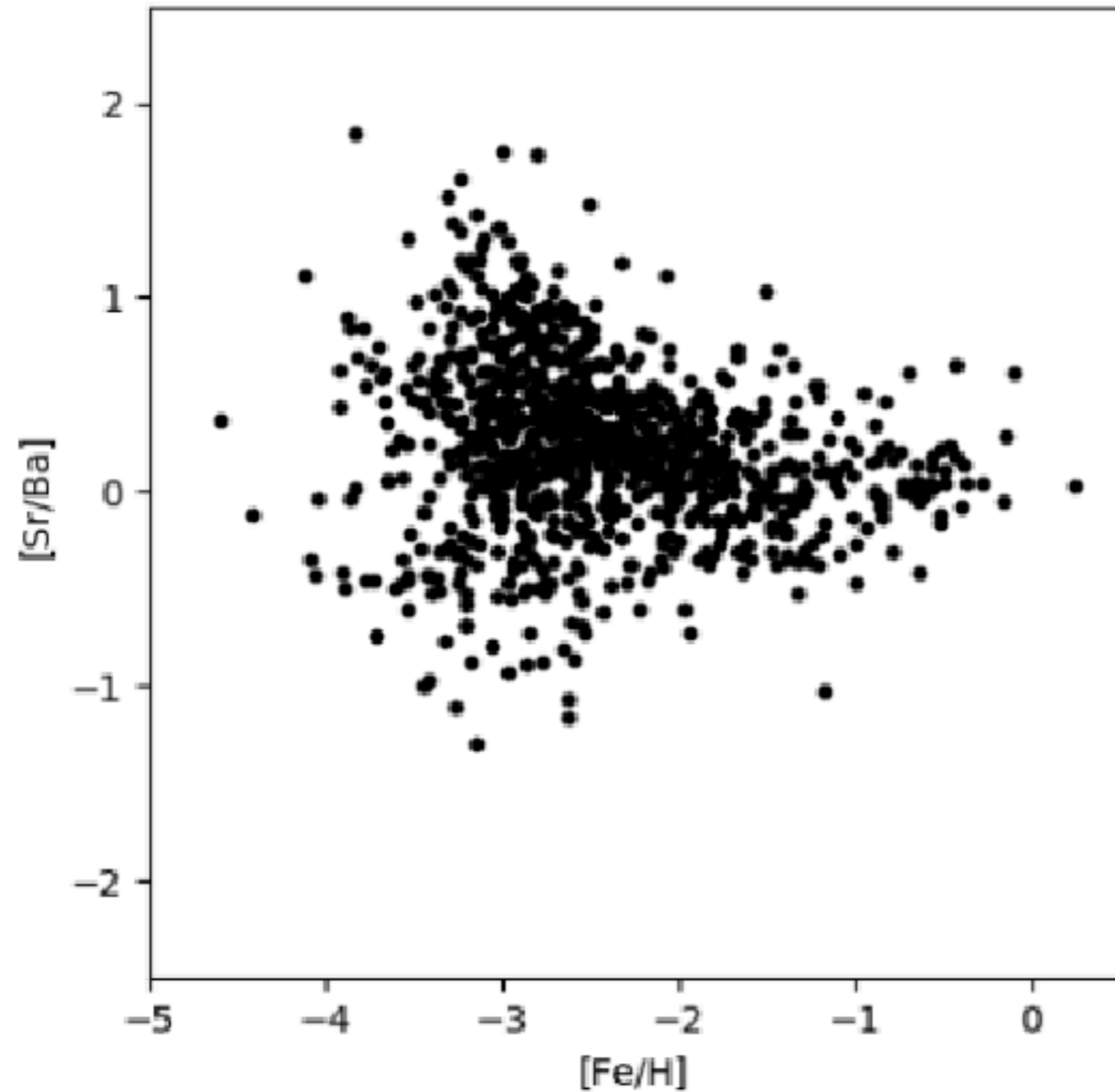
SAGA database (Suda et al. 2008; 2017)

[Fe/H] < -2.5で[r/Fe]に分散

r-process元素の起源：

- Feとは異なる
- 低い頻度/高いyield

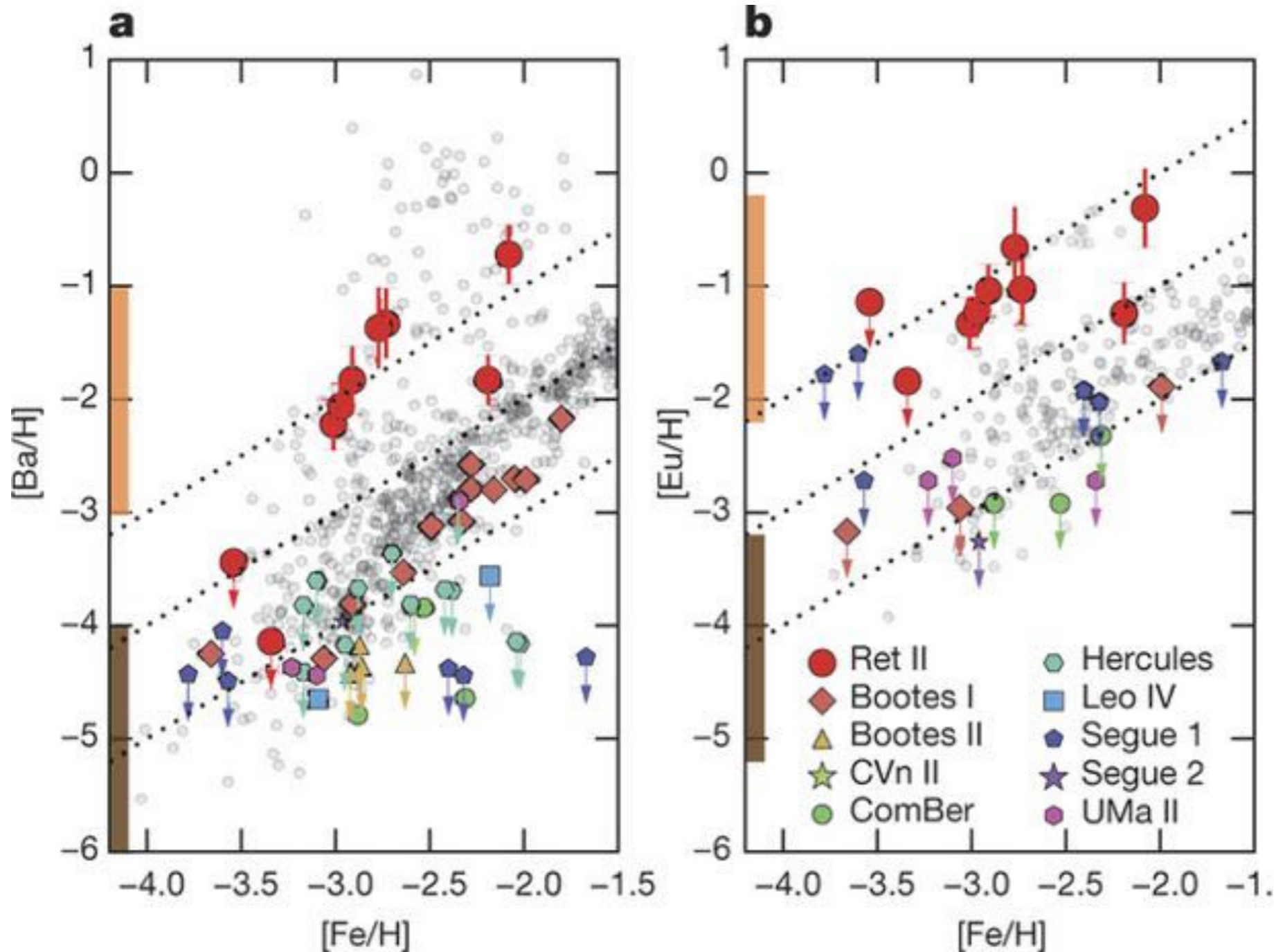
# 軽いr-process元素/重いr-process元素の分散



SAGA database (Suda et al. 2008; 2017)

軽いr-process元素  
(Sr, Yなど)と  
重いr-process元素  
(Ba, Euなど)で  
起源が異なる可能性

# Ultra-faint dwarf galaxy Reticulum II

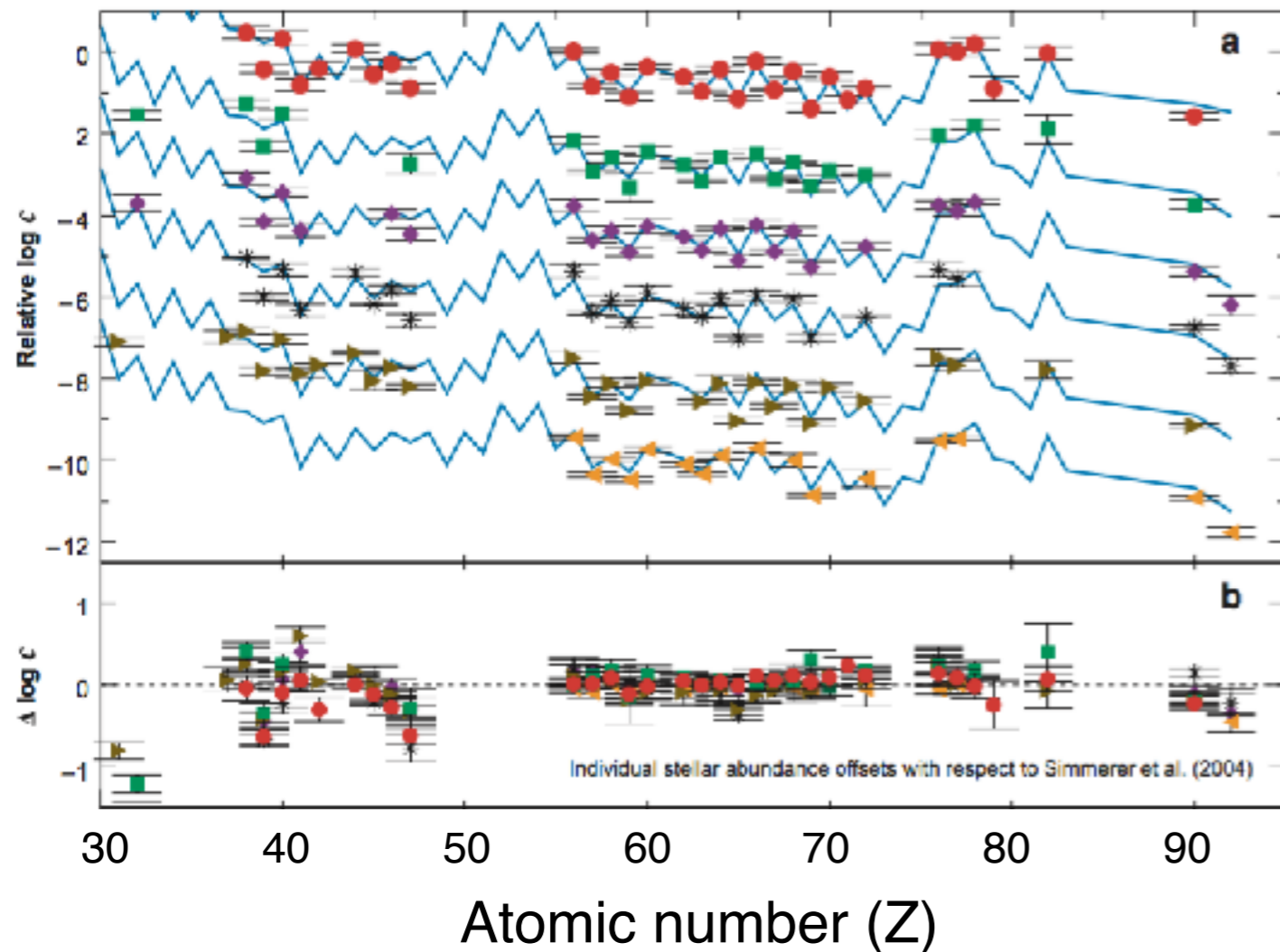


起源天体：  
低い頻度/  
高いyield

Ji et al. 2016, Nature, 531, 610; Roederer et al. 2016, AJ, 151, 82



# 金属欠乏星と太陽系のr-process元素組成



原子番号  
 $56 \leq Z < 90$

太陽系の元素組成と一致

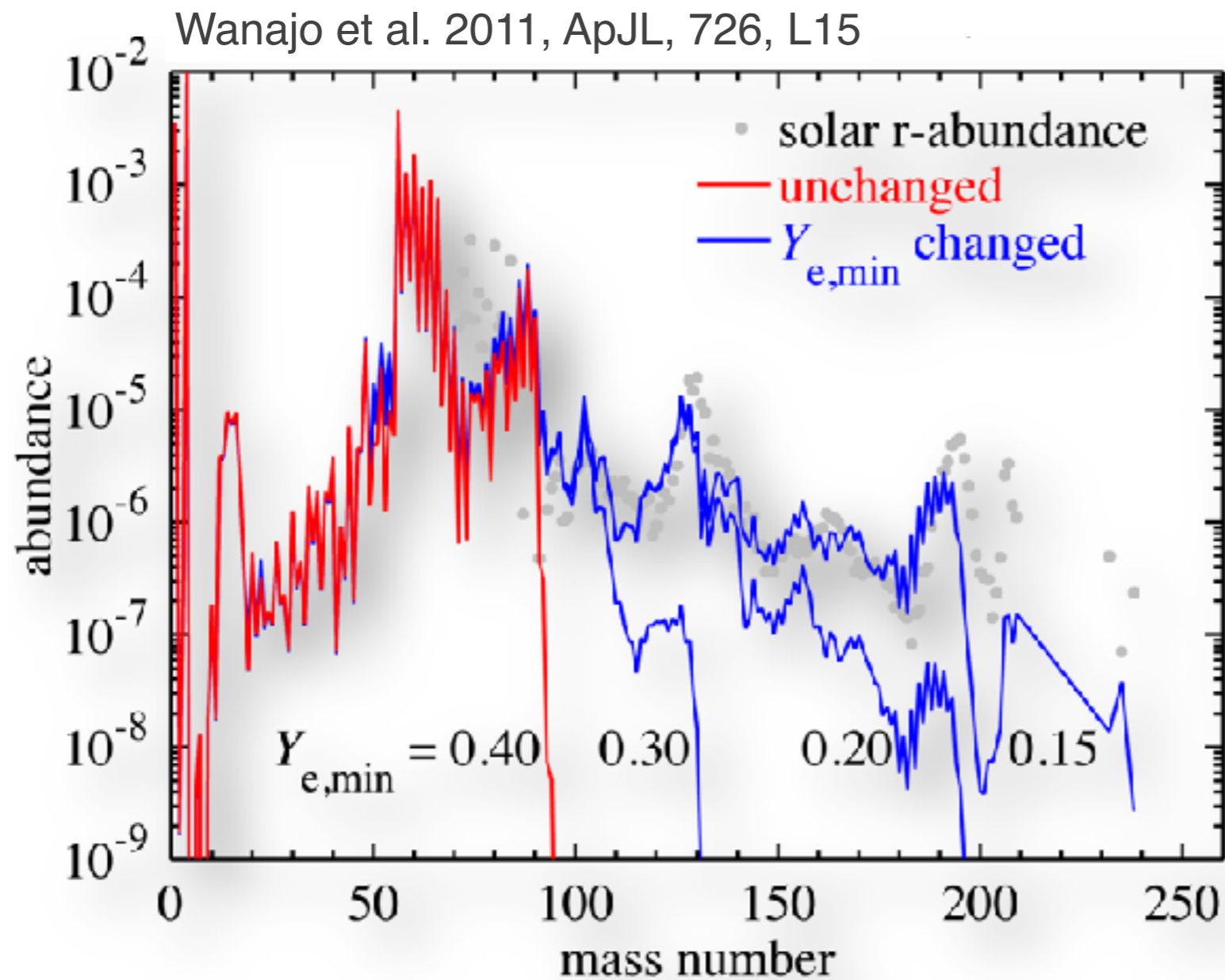
$Z < 56, Z > 90$

星ごとにvariation

# 重いr-process元素(Ba, Euなど)の 起源と進化

# 超新星爆発におけるr-process

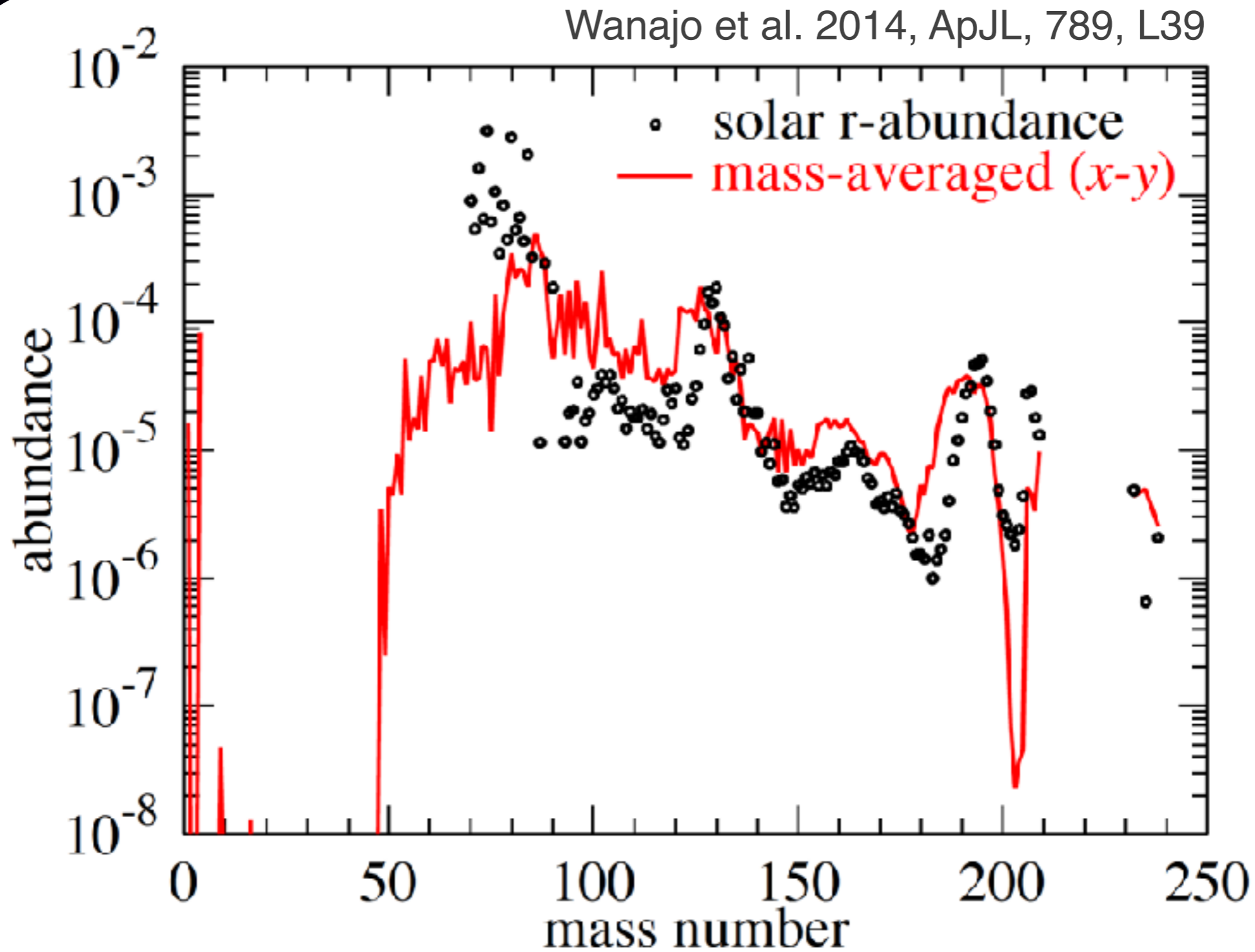
重いrプロセス元素 (質量数110以上) を合成するのは難しい



磁気駆動型超新星では合成できる可能性がある

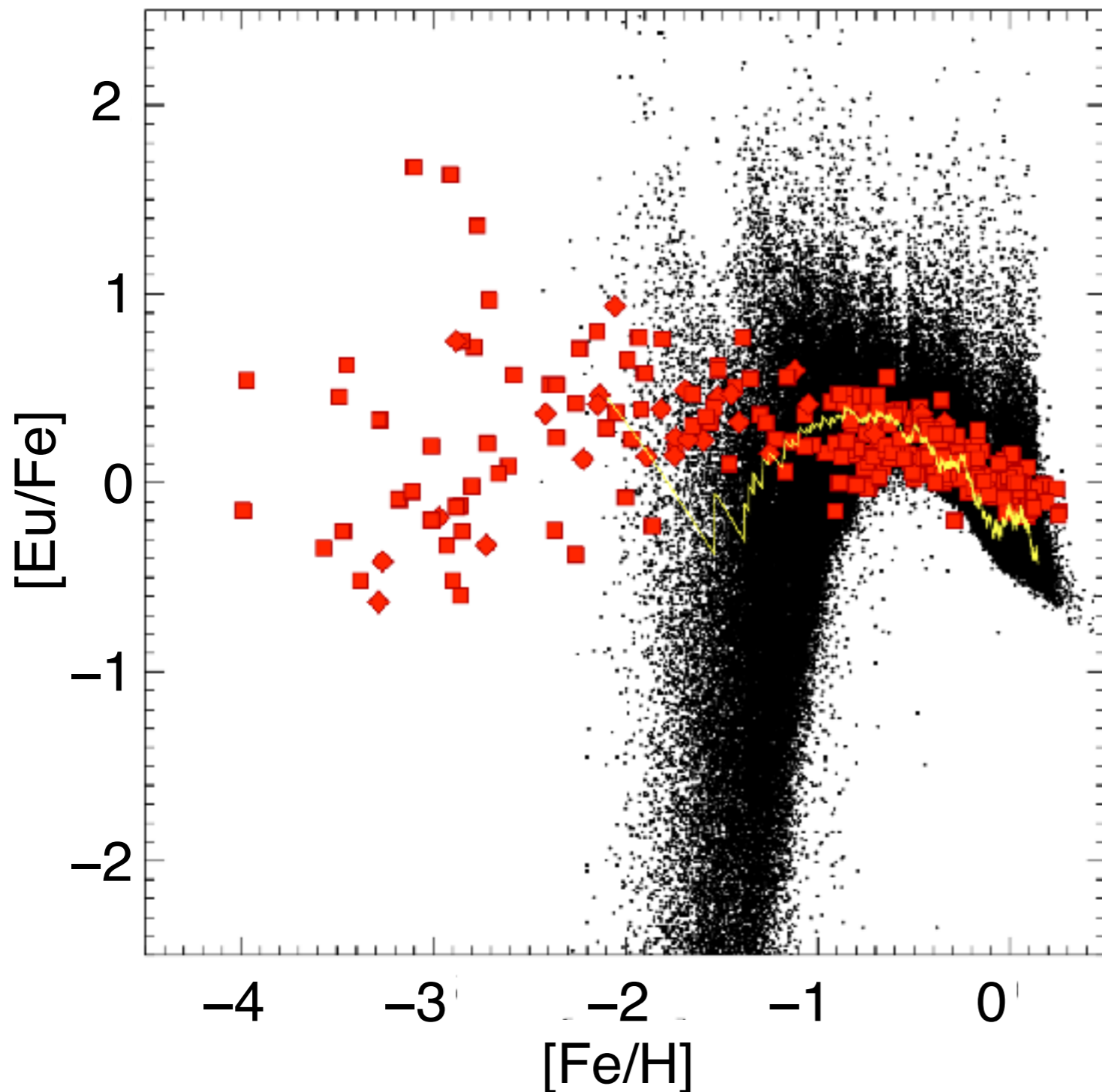
(e.g., Winteler et al. 2012, ApJL, 750, L22; Nishimura et al. 2015, ApJ, 810, 109)

# 連星中性子星合体によるr-process元素合成 質量数110以上のr-process元素を合成できる



# 銀河の化学進化モデルにおける中性子星合体の問題点

非一様化学進化モデル



Argast et al. 2004, A&A, 416, 997

連星中性子星合体の長い合体時間( $\sim 1$ 億年)+低い頻度: CCSNeの $\sim 1/1000$ , 高いyield:  $10^{-2} M_{\text{sun}}$ )



銀河の化学進化から金属欠乏星のrプロセス元素組成を説明するのは困難だった

銀河のrプロセス元素化学進化モデル (Argast et al. 2004; Matteucci et al. 2014; Wehmeyer et al. 2015など) の問題点

銀河進化全体を通じて  
一定の星形成効率 ( $\text{SFR}/M_{\text{gas}} \sim 1 \text{ Gyr}^{-1}$ ) を仮定

元素の混合は超新星残骸の周囲のみ

(e.g., Argast et al. 2004; Wehmeyer et al. 2015)

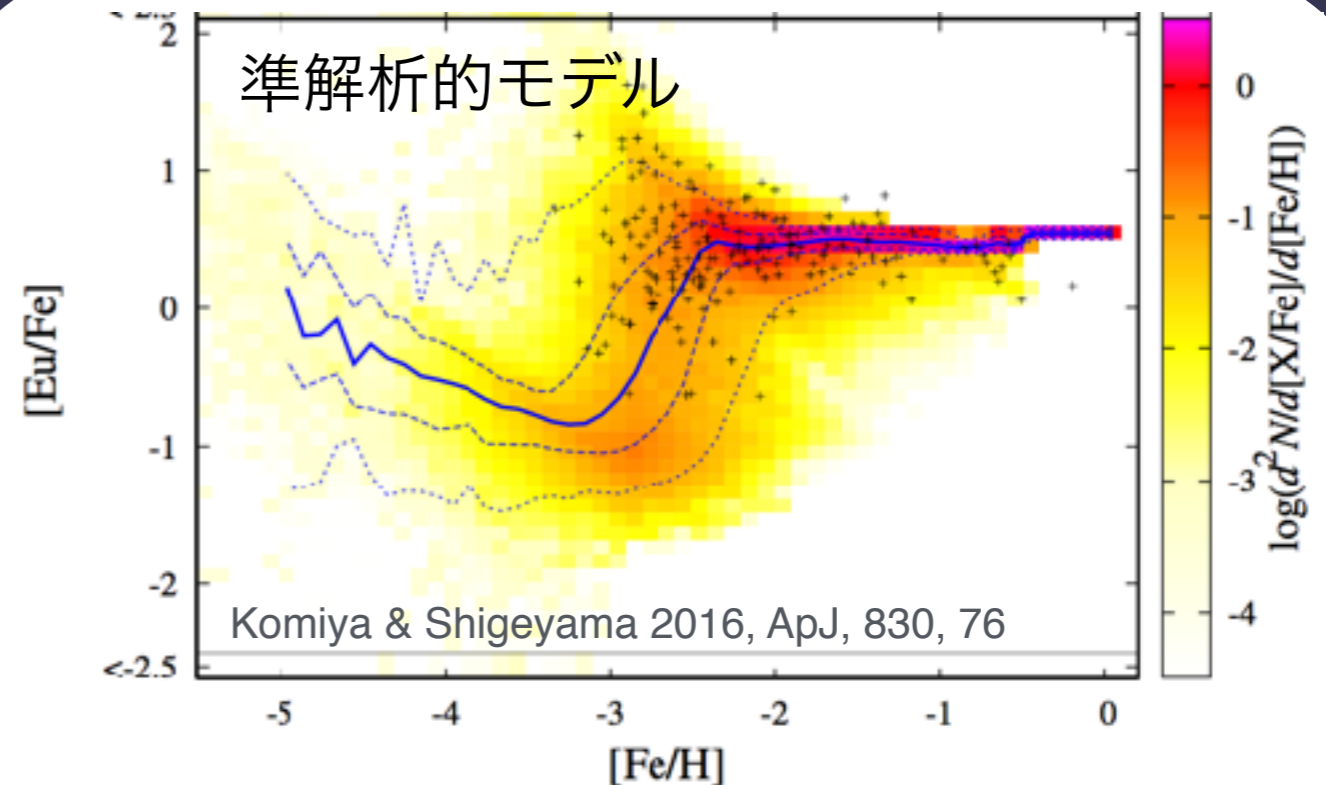
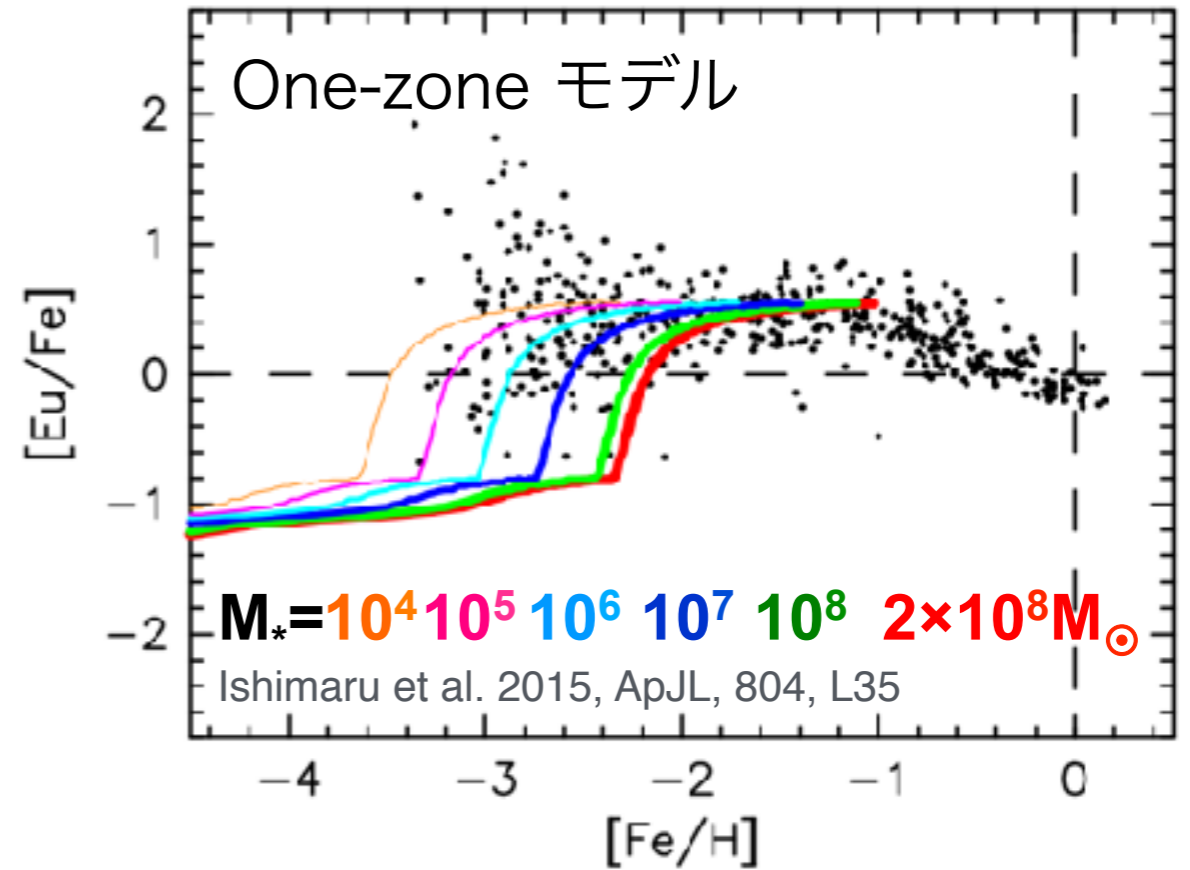
# 階層的構造形成を考慮した化学進化モデル

質量の小さいハローほど星形成効率が低いと仮定



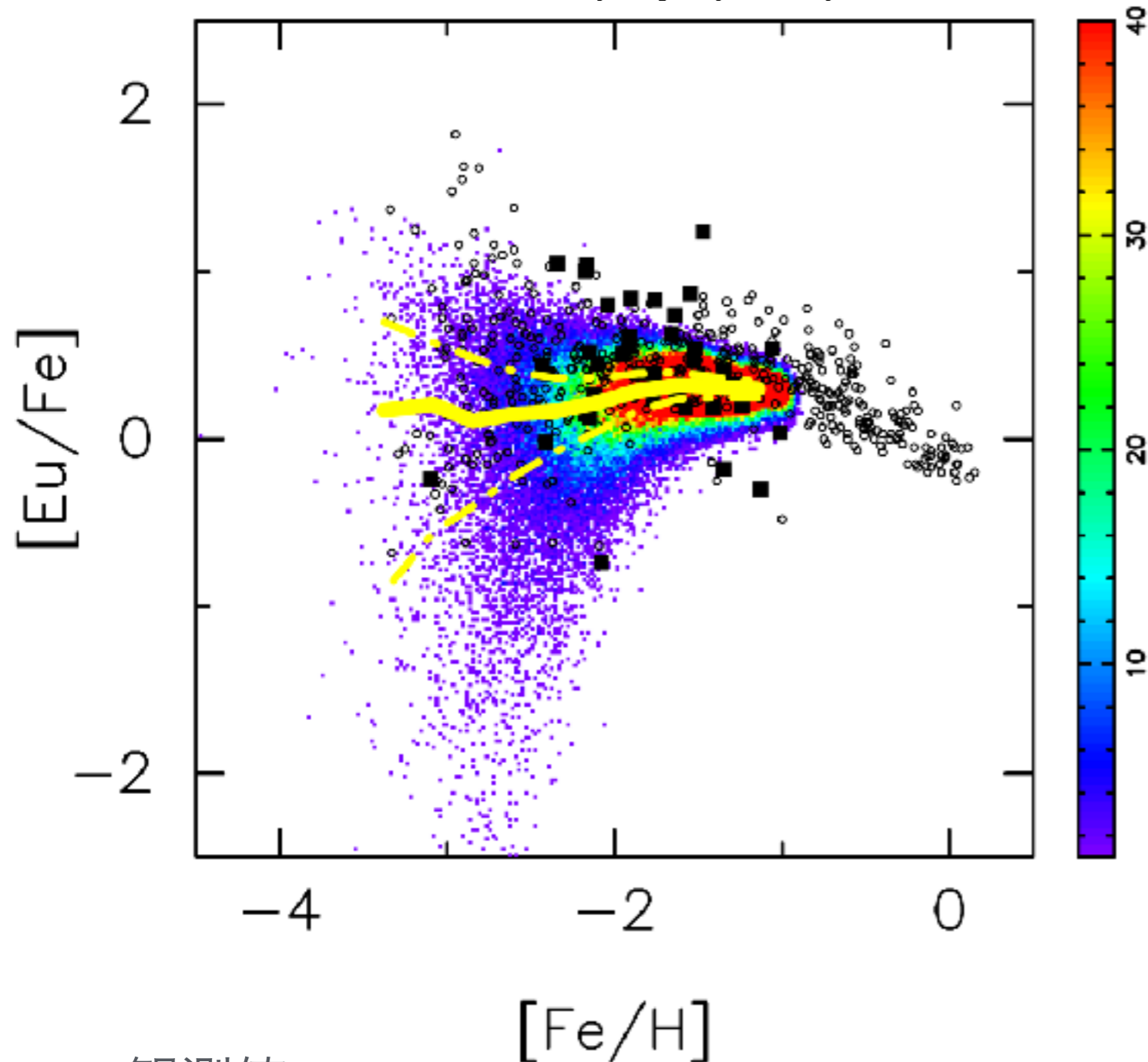
質量の小さいハローでは、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ で $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ の増加がみられる

星形成効率は銀河の力学進化と深く関わっており、化学進化と力学進化を同時に計算することが必須



# rプロセス元素分布

Hirai et al. 2015, ApJ, 814, 41



観測値 (SAGA database, Suda et al. 2008; 2014)

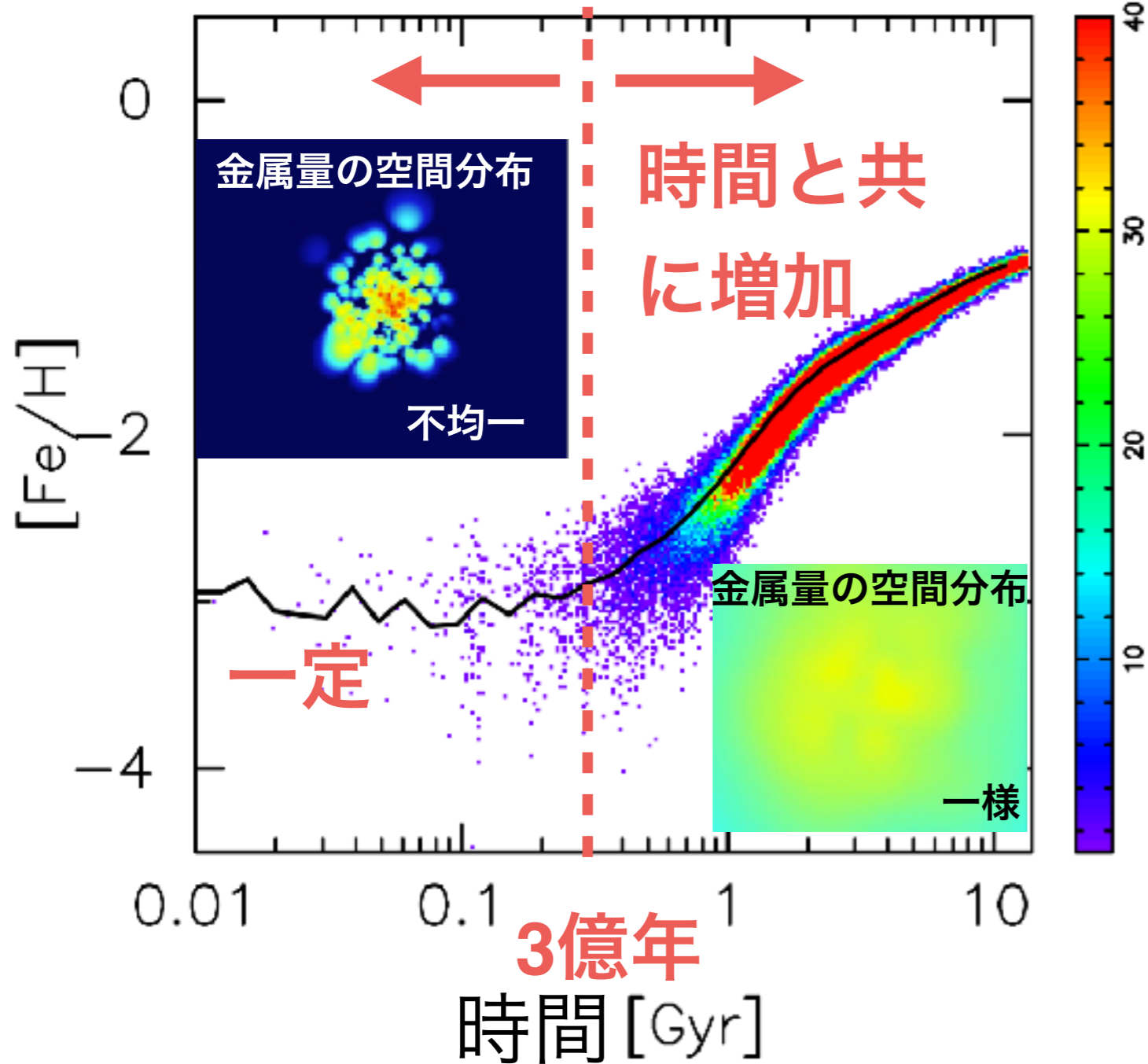
- 矮小銀河
- 銀河系

合体時間1億年の  
中性子星合体で  
観測値を説明可能



# [Fe/H]の時間進化

Hirai et al. 2015, ApJ, 814, 41



$t < 3$ 億年 :

低い星形成率+  
不均一な金属量の空間分布  
金属量が増加しない

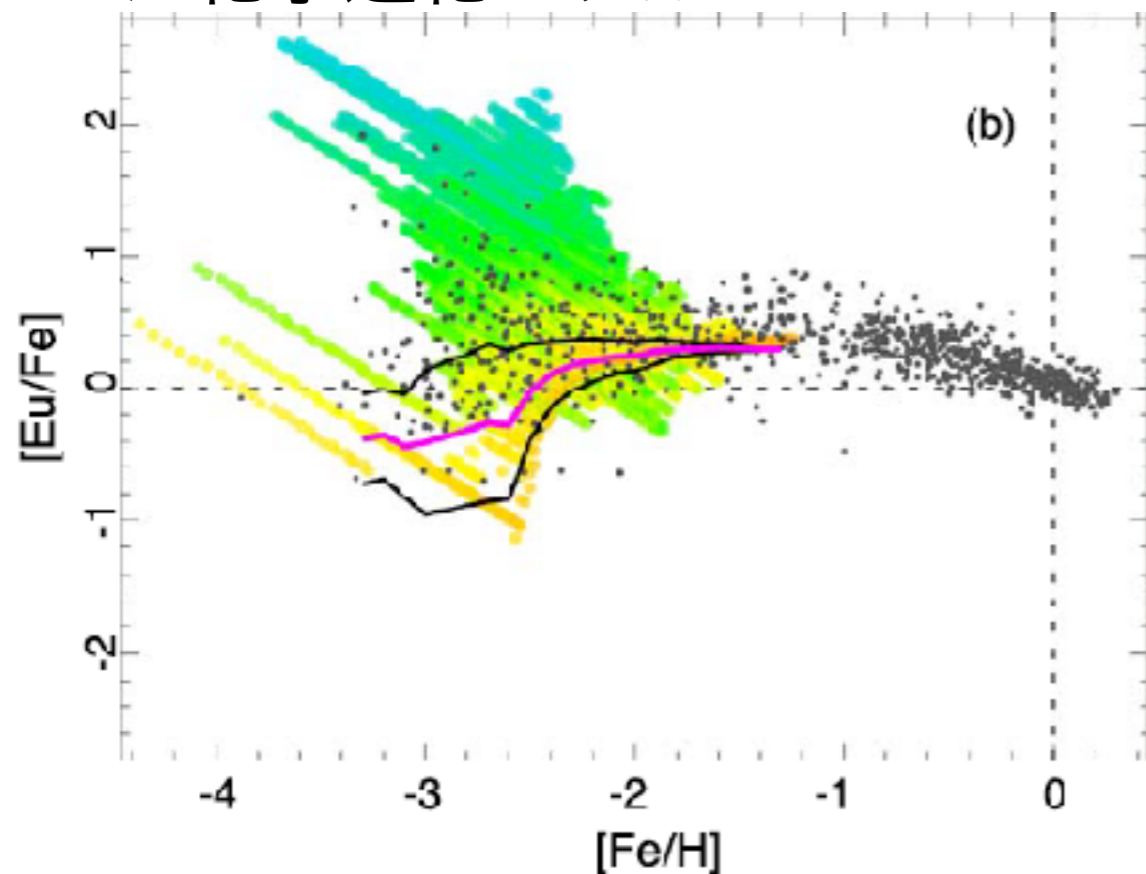
$t > 3$ 億年 :

金属量の空間分布が一様になると、超新星爆発の数に比例して金属量が増加

$t < 3$ 億年で中性子星合体が起きれば、 $[Fe/H] < -3$ でEuが現れる

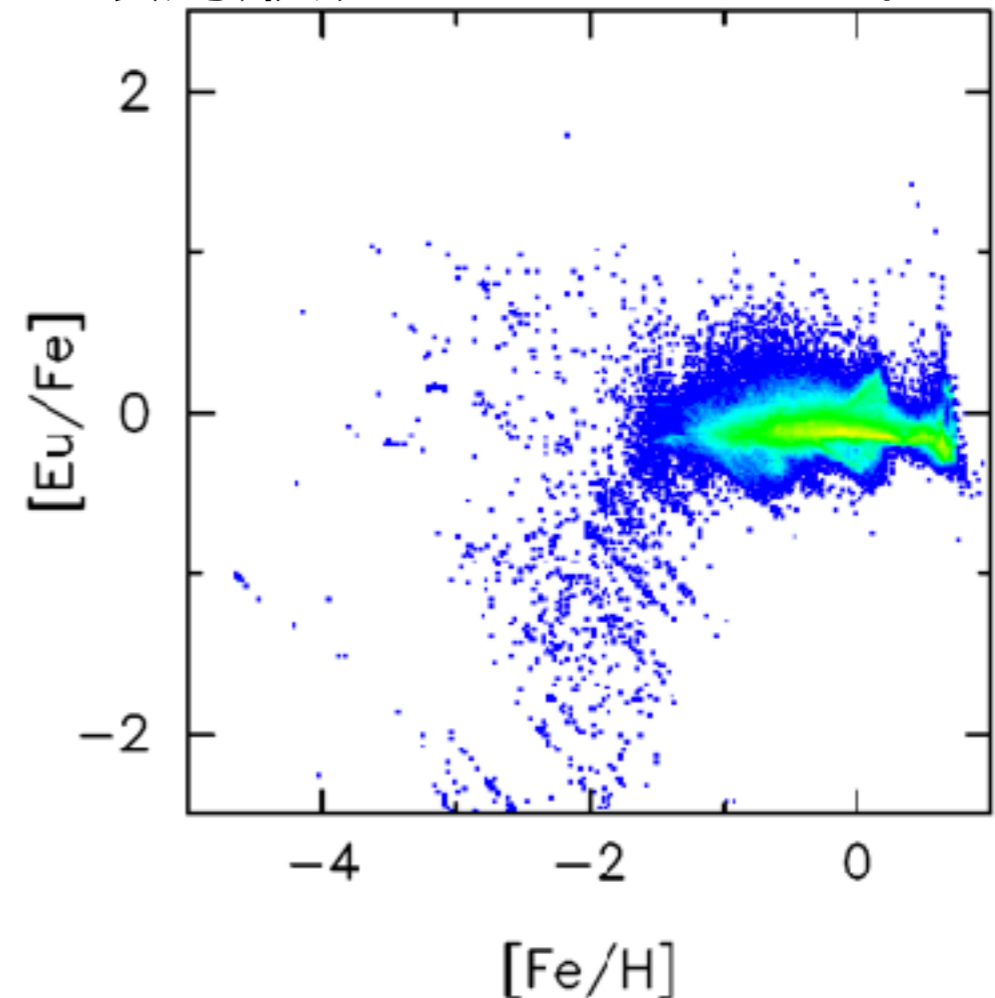
銀河系にみられるr-process元素の分散は異なる質量のハローの重ね合わせにより説明できる可能性がある

階層的構造形成を考慮した化学進化モデル



Ojima et al. 2018, ApJ, 865, 87

銀河形成シミュレーション

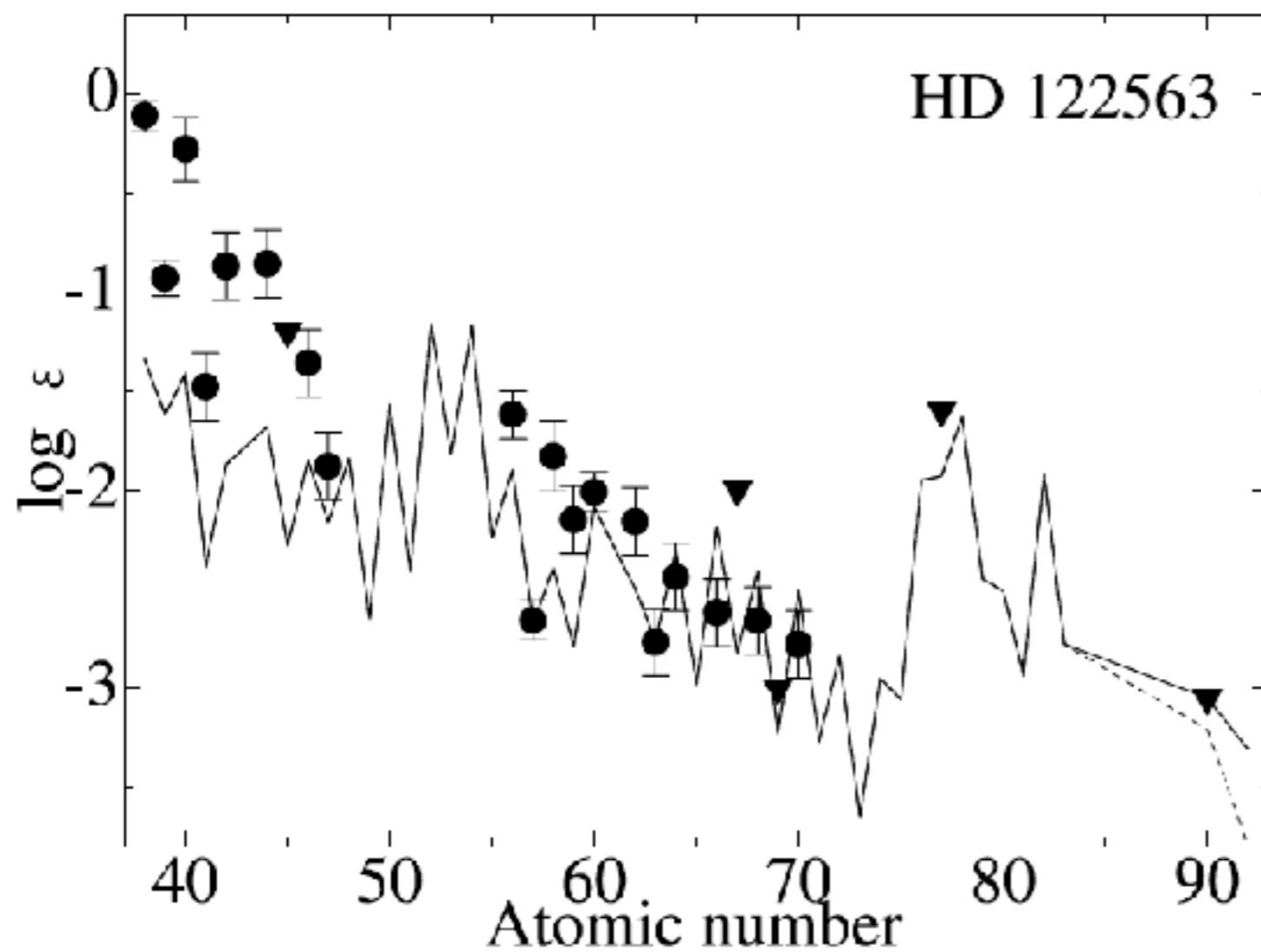


Hirai et al. 2019, Springer Theses

1星粒子あたり100-1000 Msun程度の銀河形成シミュレーションを行う必要がある

# 軽いr-process元素(Sr, Y, Zrなど) の起源と進化

# 軽いr-process元素のみを多く持つ星

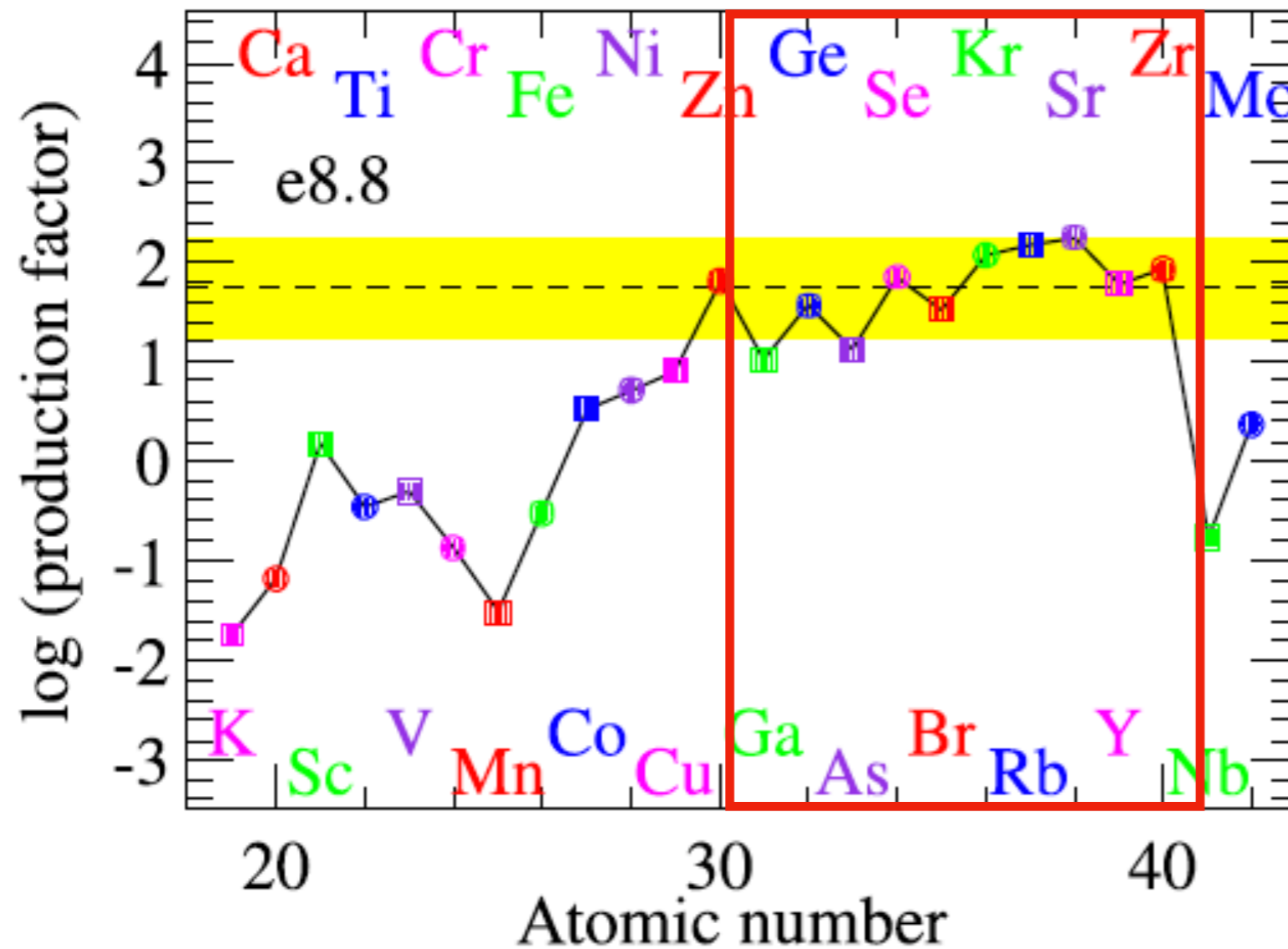


Honda et al. 2006, ApJ, 643, 1180

Lighter Element  
Primary Process  
(LEPP)?

Travaglio et al. 2004,  
ApJ, 601, 864

# 電子捕獲型超新星爆発におけるweak r-process

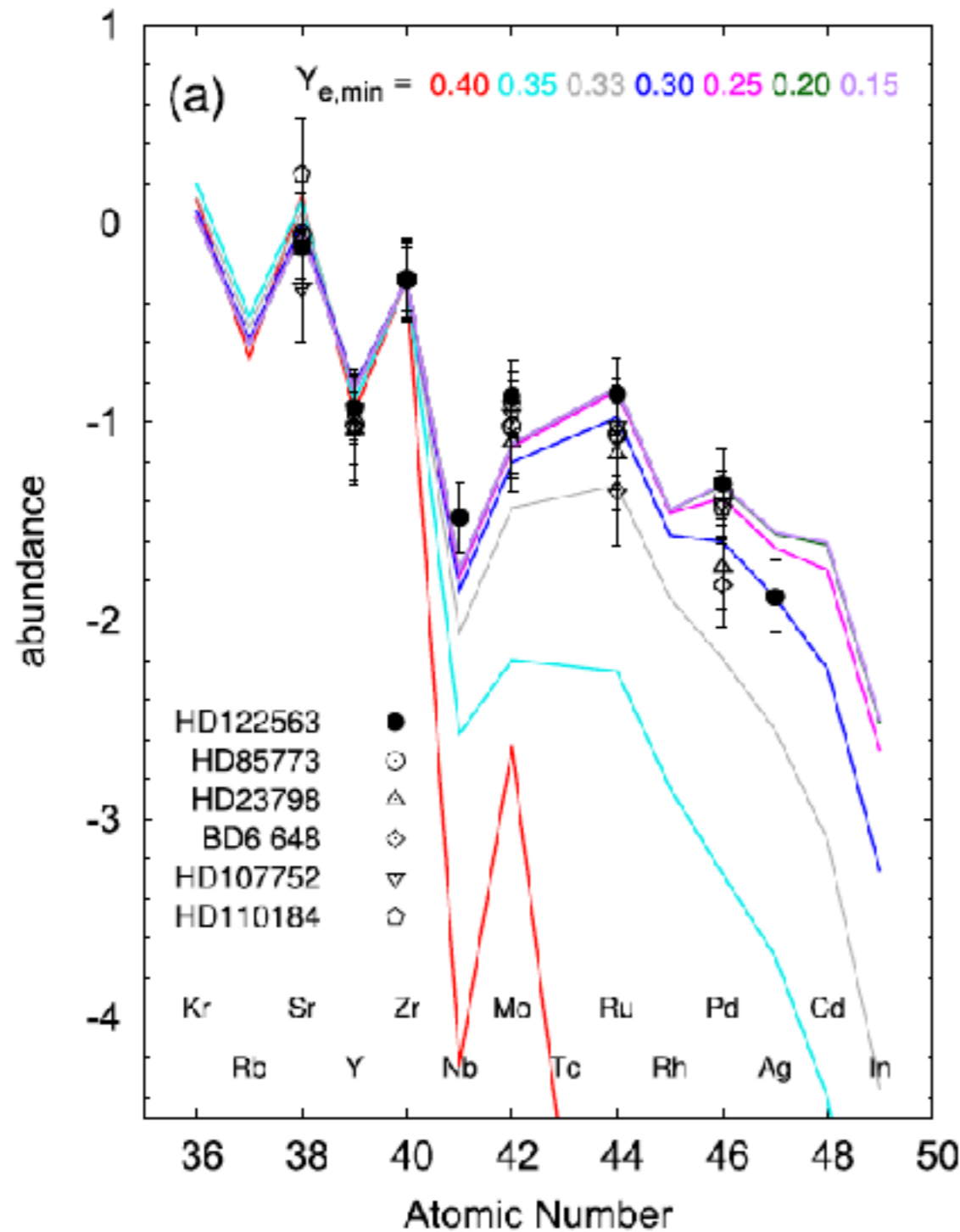


中性子過剰 ( $Y_e \sim 0.2-0.4$ ) な ejecta



軽い r-process 元素を合成

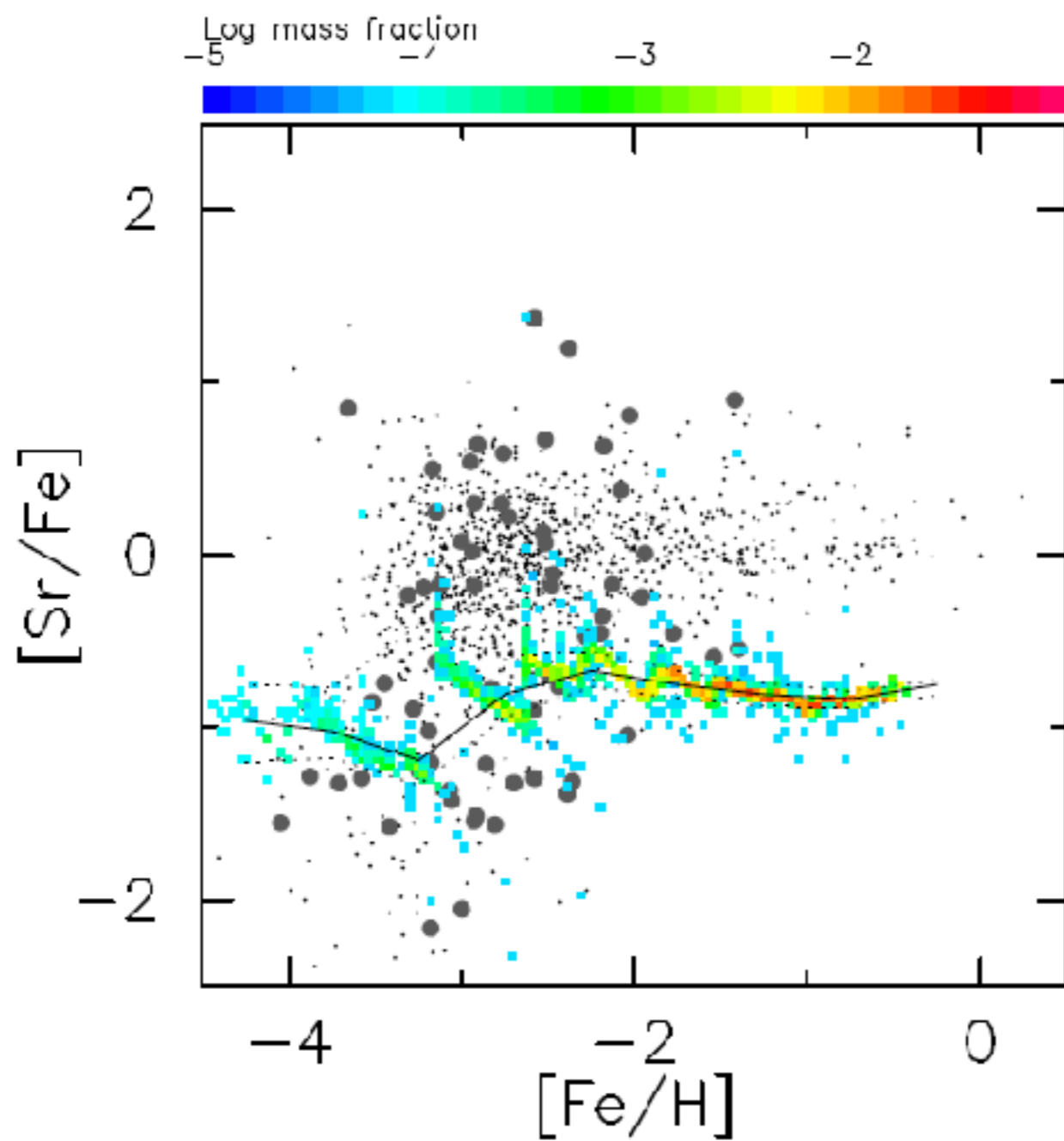
# 多様な軽いr-process元素組成



Weak r-processの多  
様性により説明でき  
る可能性

Aoki et al. 2017, ApJ, 837, 8

# 軽いr-process元素の化学進化



電子捕獲型超新星爆発  
(ECSN)+  
連星中性子星合体(NSM)



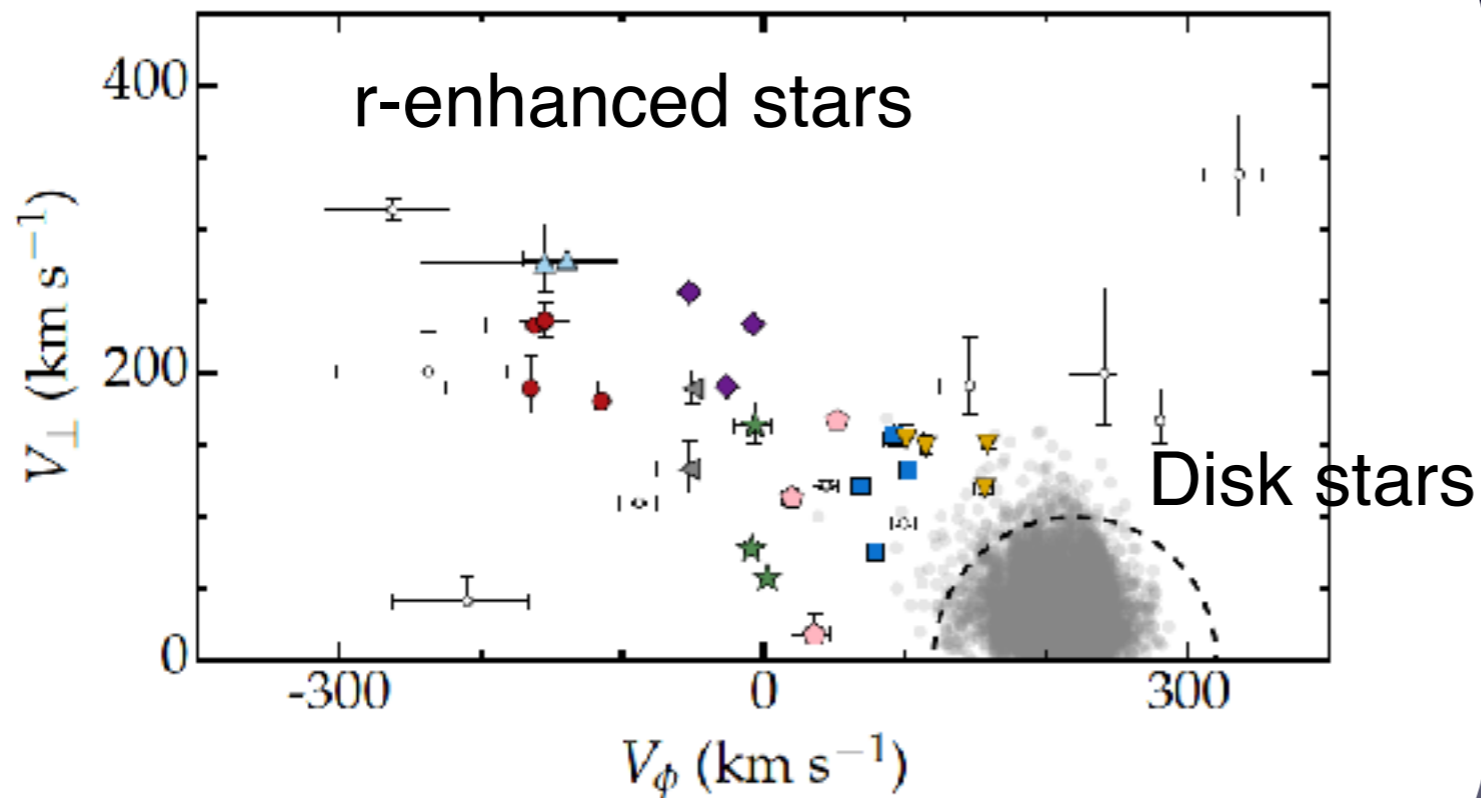
[Fe/H] < -2.5の[Sr/Fe]  
を説明できる可能性

# r-process元素から探る銀河の 初期進化史



# r-process元素に富んだ星の力学的特性

No disk like kinematics



r-process元素に富んだ星は  
過去に銀河系に降着した矮  
小銀河由来の可能性

高分解能な銀河形成シミュレ  
ーションを行う必要がある

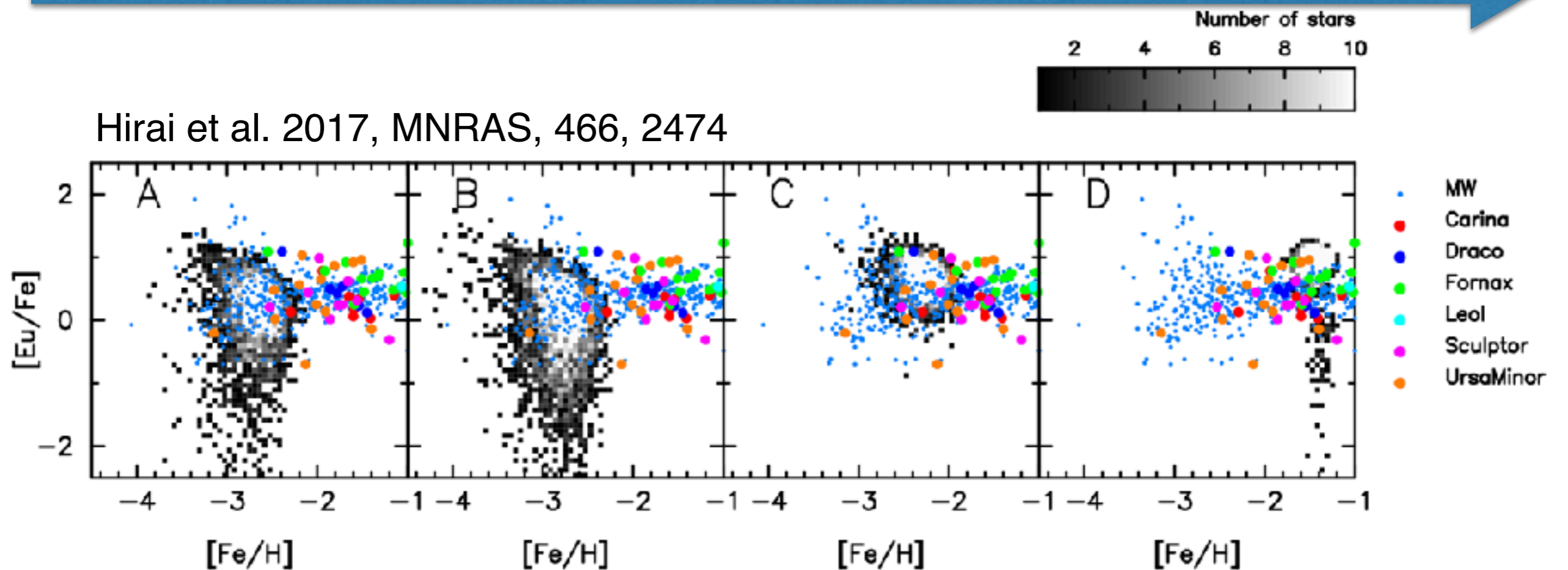
Roederer et al. (2018), AJ, 156, 179

# 異なる星形成効率を持つ銀河のr-process元素分布

星形成効率

低

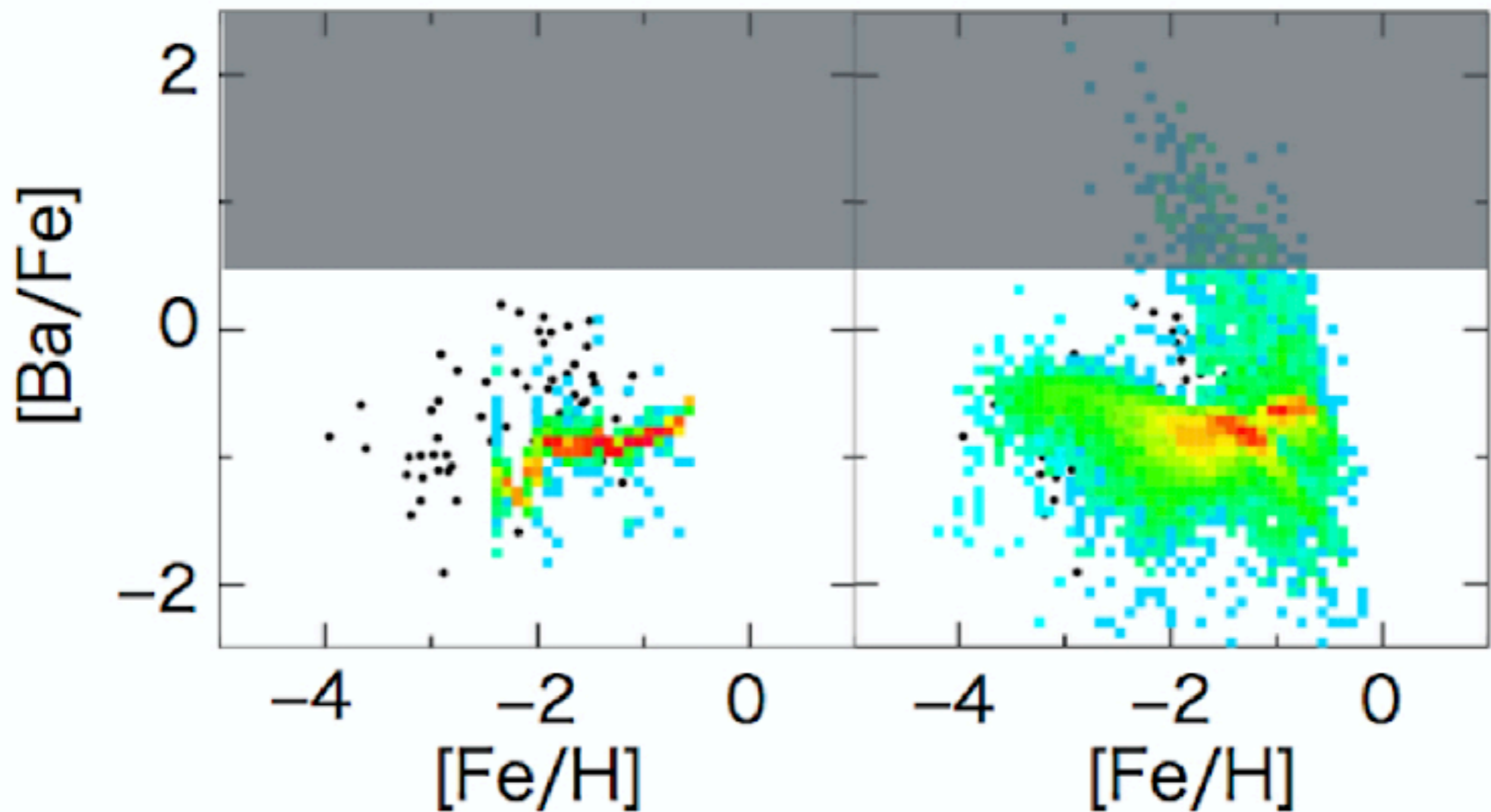
高



r-process元素は銀河初期の星形成史の指標となりうる

# r-process元素から探る元素の混合効率

混合時間 :  $C_d = 10^{-2}$  4000万年       $C_d = 10^{-4}$  16億年



Hirai & Saitoh (2017), ApJL, 838, L23

r-process元素は銀河中の元素の混合効率の指標となりうる

# まとめ

- ・ 鉄より重い核種の約半数は**r-process**により合成される
- ・ 理論的・観測的には**連星中性子星合体**が主なr-processの起源天体として有力
- ・ 軽いr-process元素(Sr, Y, Zrなど)には**低質量親星の超新星爆発**による**weak r-process**が影響している可能性が高い
- ・ r-process元素は銀河の**初期進化史の指標**となりうる