

原子核物理でつむぐrプロセス

# 銀河の化学進化とrプロセス

平居 悠 (Hirai, Yutaka)

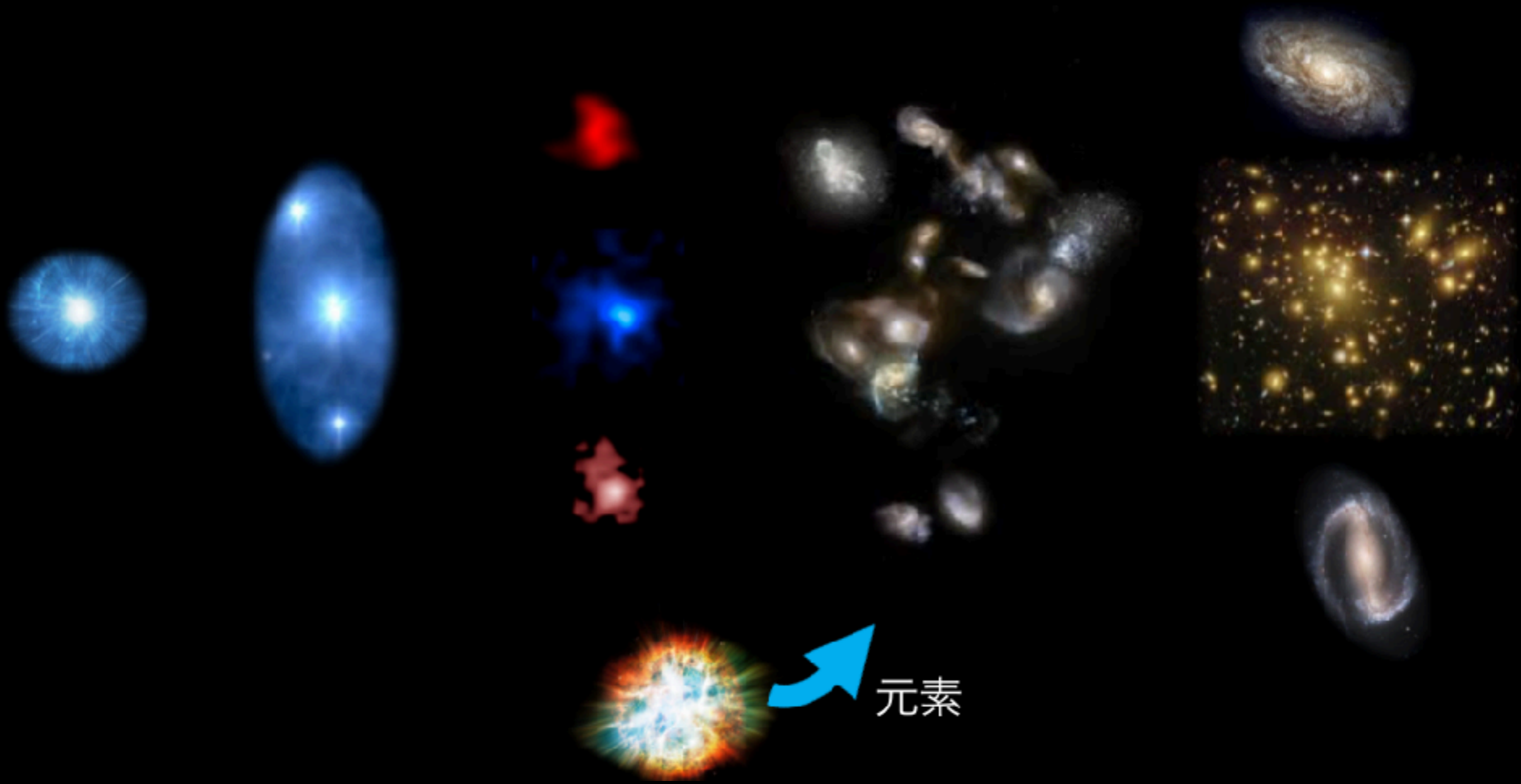
理化学研究所計算科学研究センター

基礎科学特別研究員



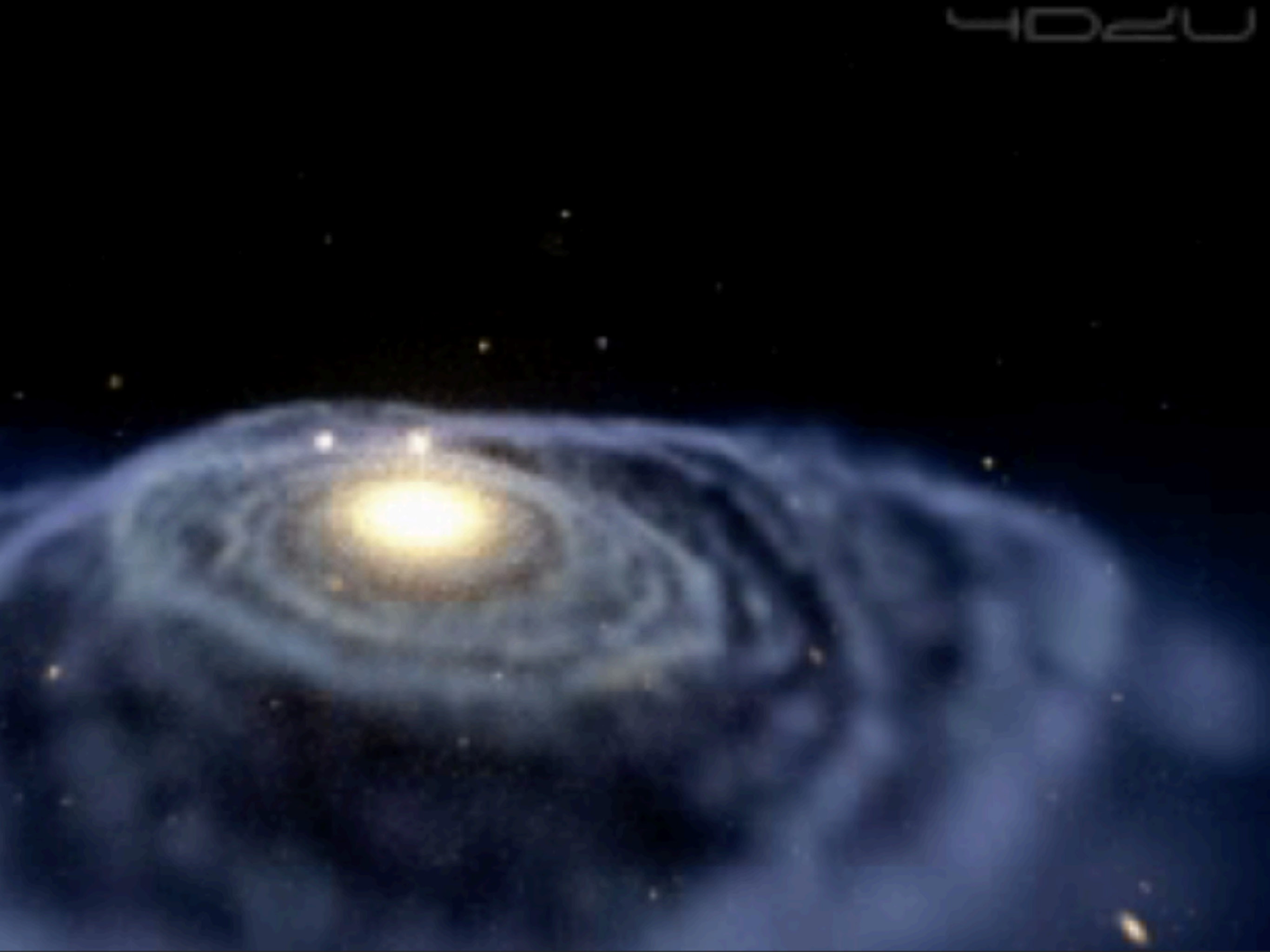
ビッグバン 初代星形成

銀河の形成進化



元素

超新星爆発、  
連星中性子星合体など



# 銀河内での物質循環

超新星爆発など



星形成



超新星残骸



星間空間

# 銀河の化学進化研究



元素の起源



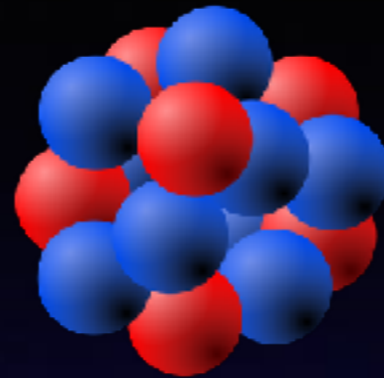
元素合成史



銀河進化史

# 原子核物理との関係

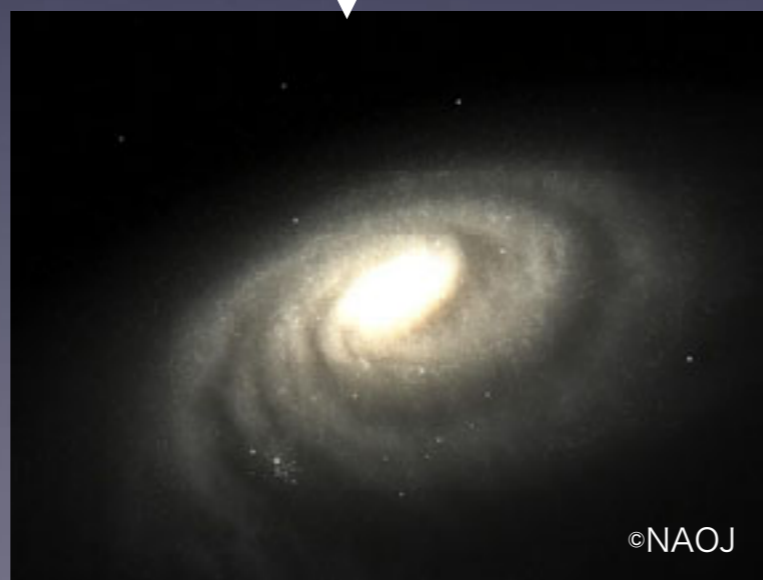
原子核物理



元素合成

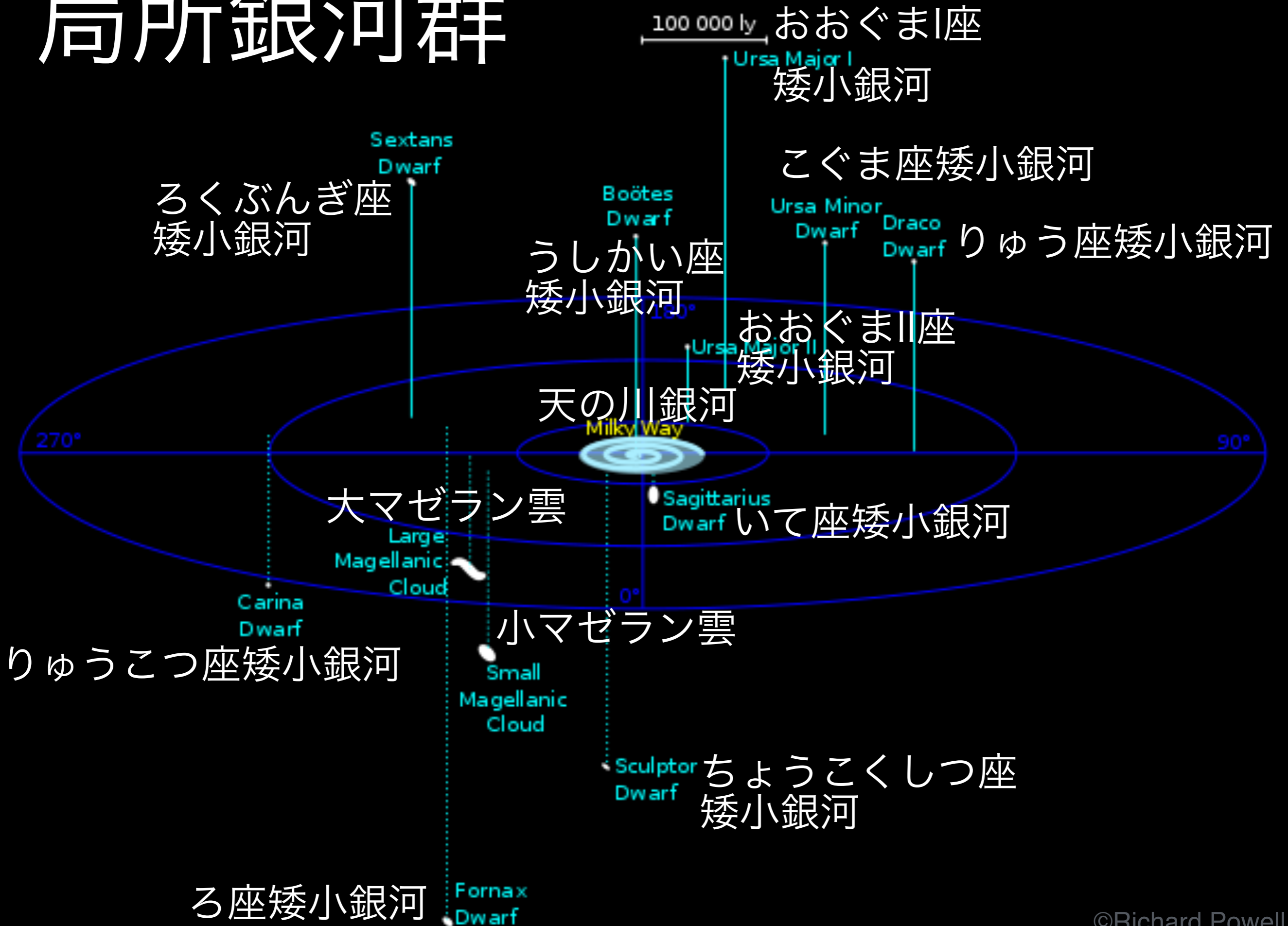


銀河進化





# 局所銀河群

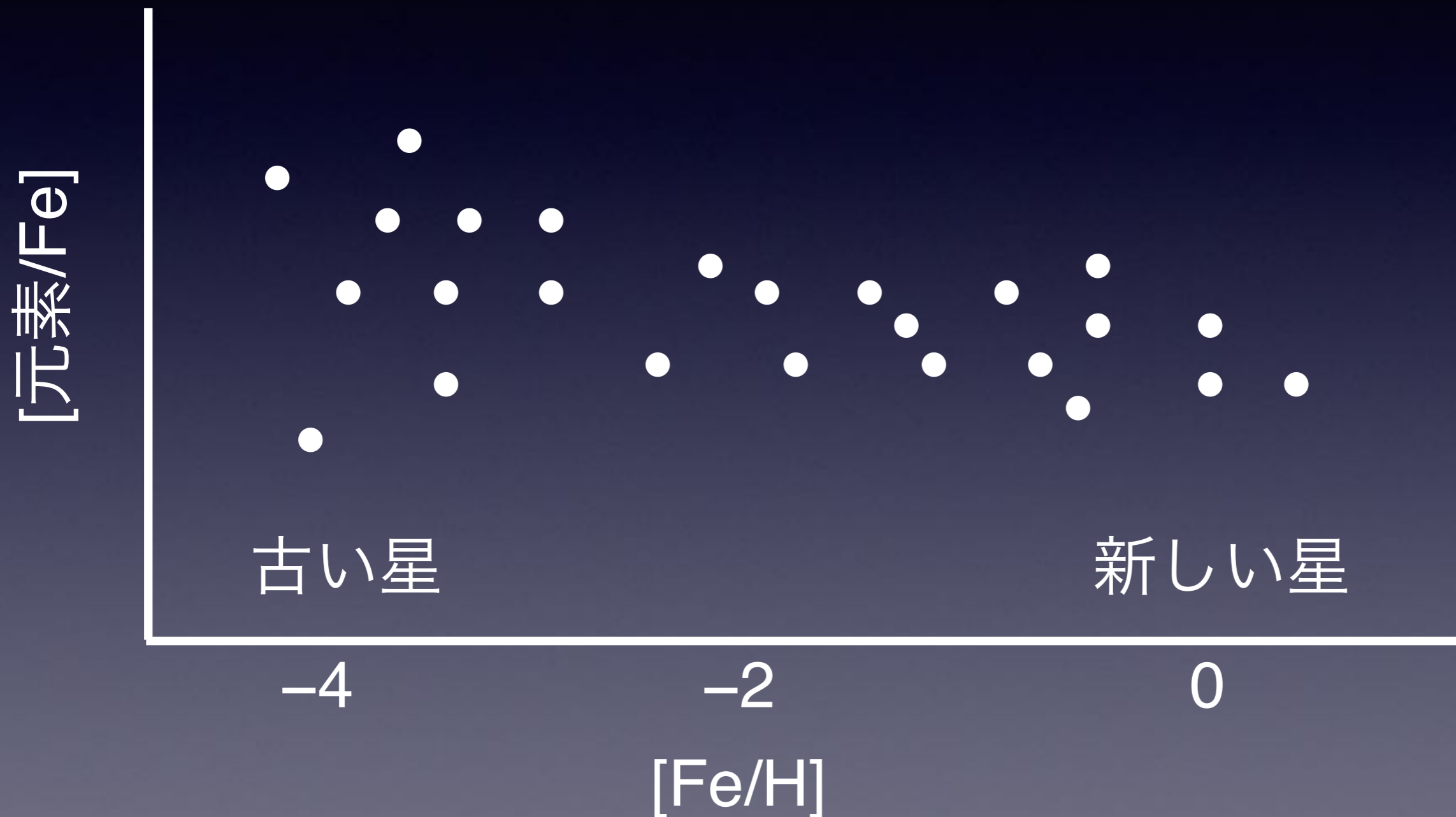




# 銀河の化学進化

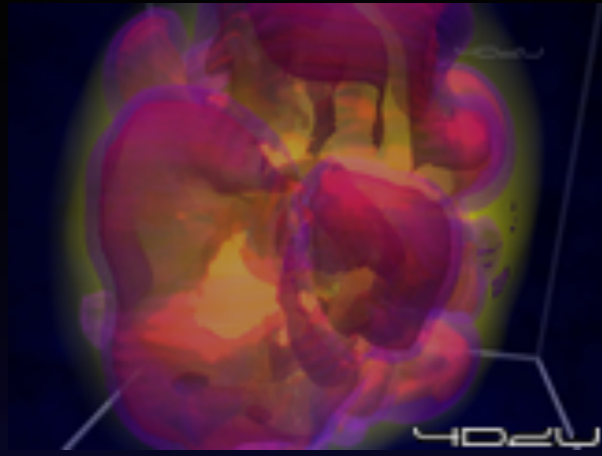
[Fe/H] : 時間と共に増加

[元素/Fe] : 元素の起源・星間空間への元素の混合過程を反映

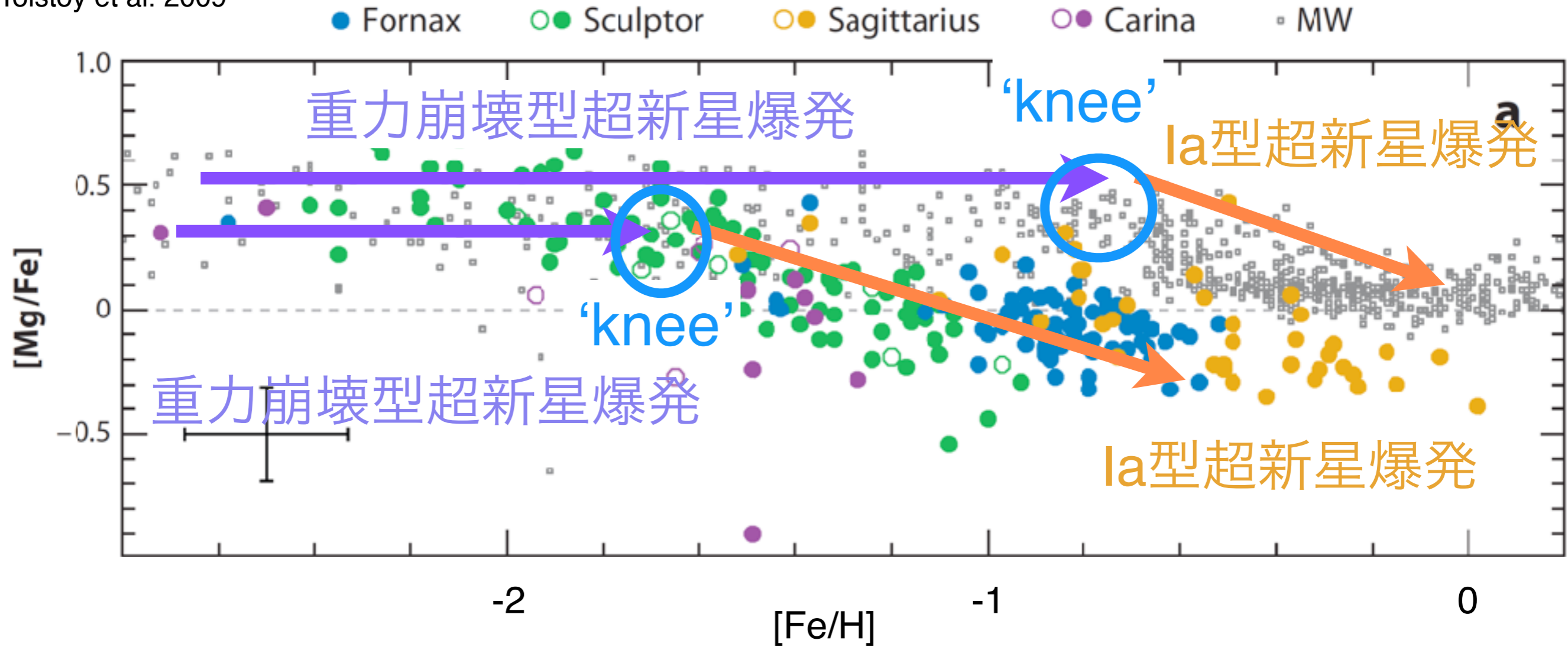


$$[A/B] = \log_{10}(N_A/N_B) - \log_{10}(N_A/N_B)_{\odot}$$

# 銀河中の子星の元素組成(例：Mg)



Tolstoy et al. 2009



# 銀河の化学進化モデル

e.g., Prantzos 2007, arXiv: 0709.0833

## One-zoneモデル

元素は放出された瞬間に銀河全体に混ざる

e.g.,  
Tinsley 1980, Fund.  
Cosmic Phys., 5., 287;  
Matteucci et al. 1989,  
MNRAS, 239, 885;  
Timmes et al. 1995,  
ApJS, 98, 617

## 非一様モデル

元素を局所的にばらまき、元素分布の非一様性を考慮

e.g.,  
Tsujiimoto et al. 1999,  
ApJ, 519, 63;  
Argast et al. 2000,  
A&A, 356, 873;  
Ishimaru et al. 2004,  
ApJL, 600, L47

## 化学力学進化モデル

銀河の動力学進化も同時に計算

e.g.,  
Steinmetz & Müller,  
1994, A&A, 281, L97;  
Kobayashi & Nakasato  
2011, ApJ, 729, 16;  
Hirai et al. 2018, ApJ,  
855, 63

# One-zoneモデル

ガス元素量の時間進化

$$\frac{d(m_G X_i)}{dt} = -\Psi X_i + E_i + [f X_{i,f} - o X_{i,o}]$$

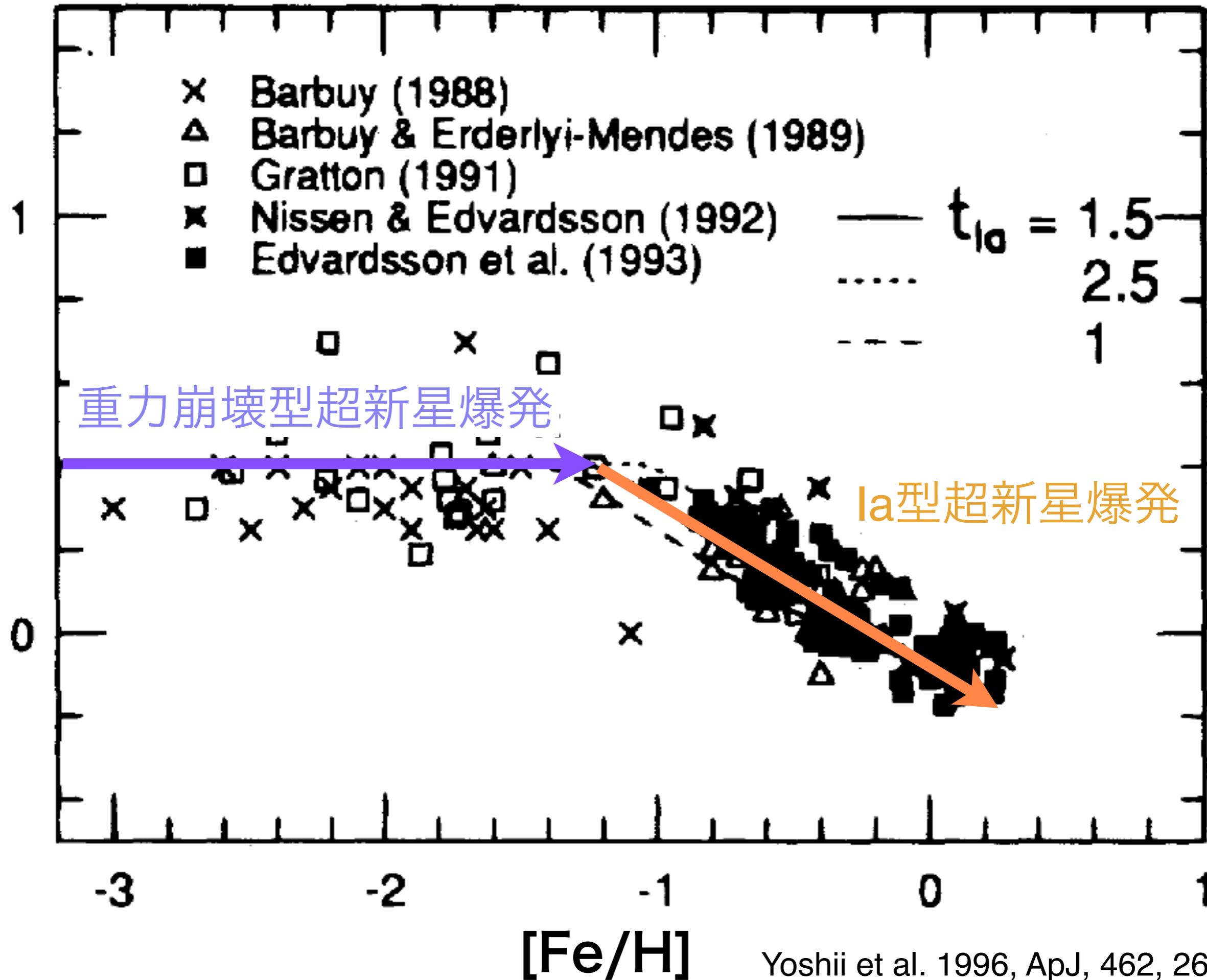
星に取り込  
まれる量

元素合成量

外部からの流入量

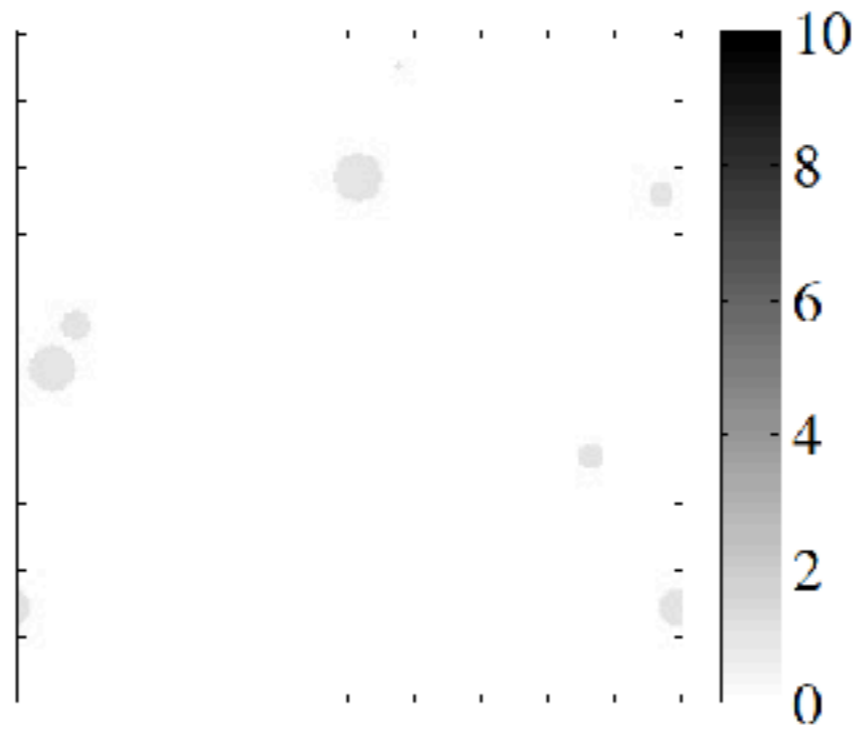
流出量

[O/Fe]

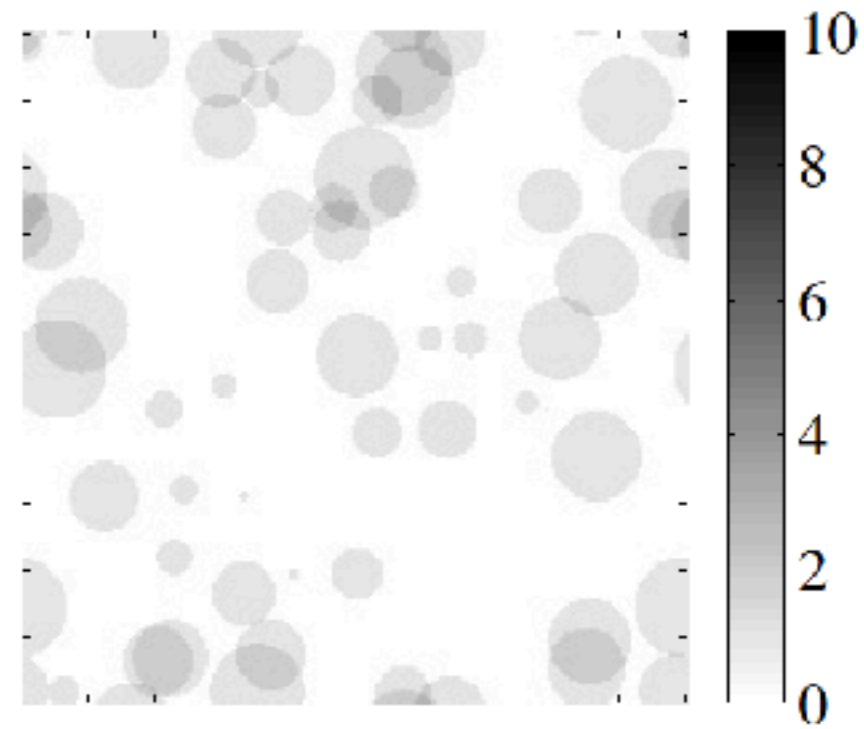


# 非一様モデル

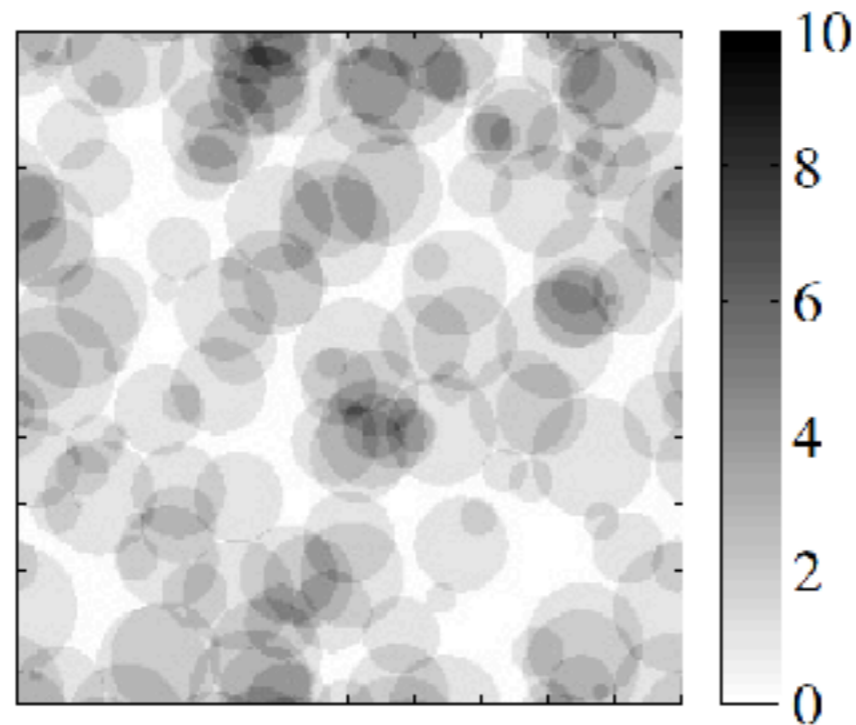
Karlsson 2005, A&A, 439, 93



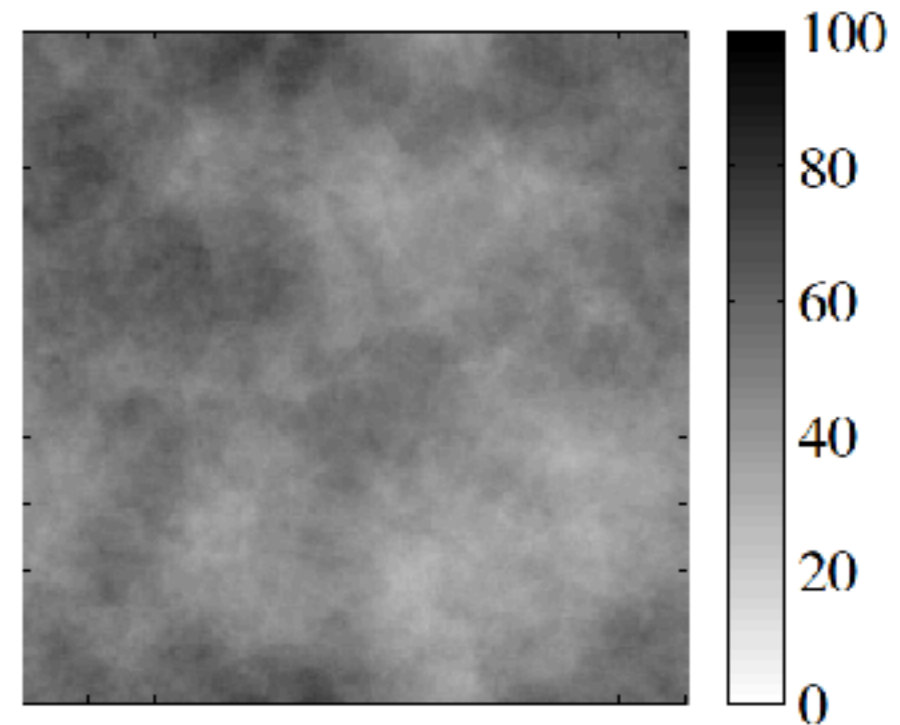
$t = 1; \mu = 0.02;$



$t = 5; \mu = 0.5;$



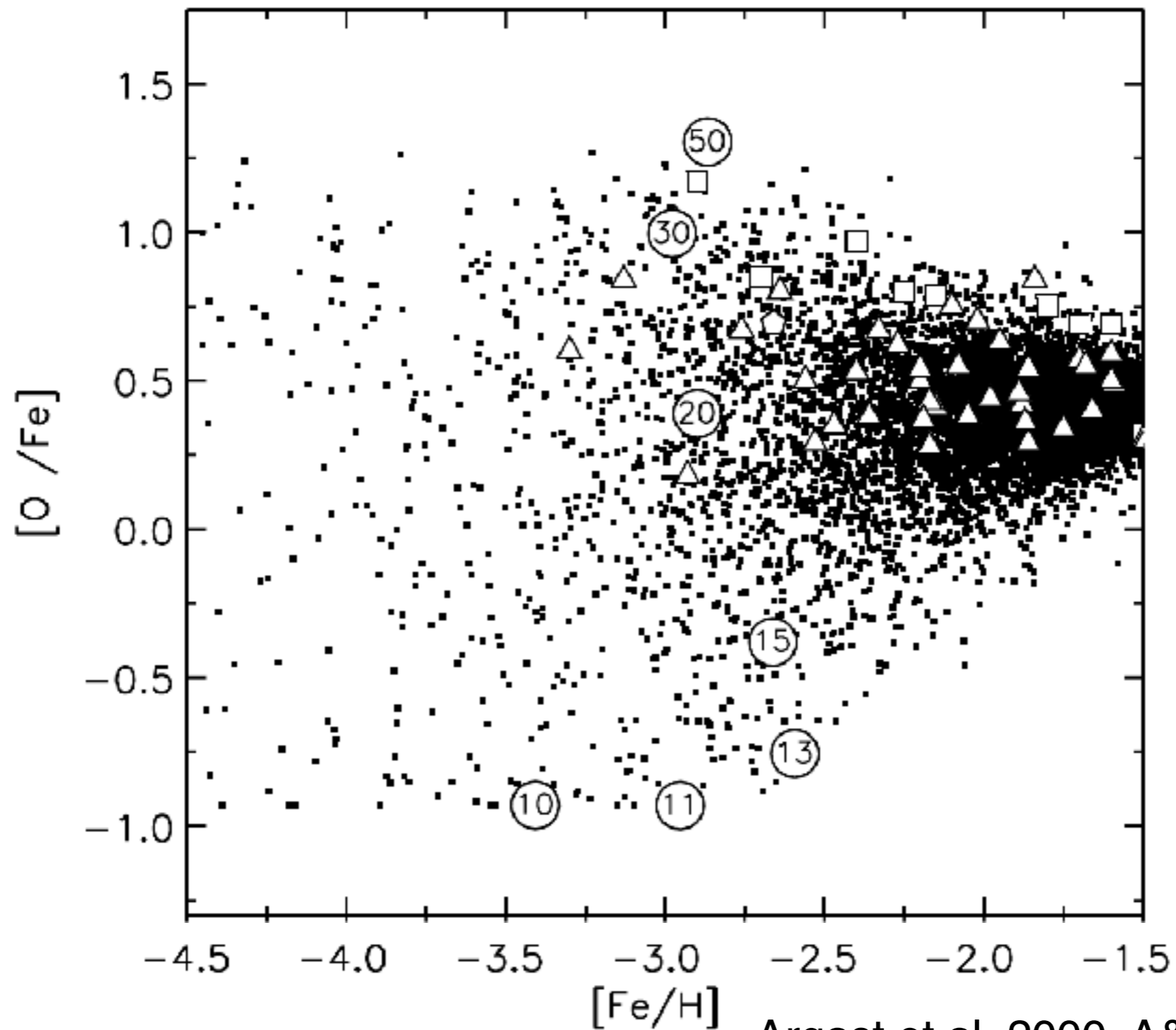
$t = 10; \mu = 2;$



$t = 50; \mu = 50$

# 非一様モデル

個々の超新星爆発による元素分布の非一様性を考慮



Argast et al. 2000, A&A, 356, 873

# 化学動力学進化シミュレーション

銀河の化学進化と動力学進化を同時に計算

ガス→星形成

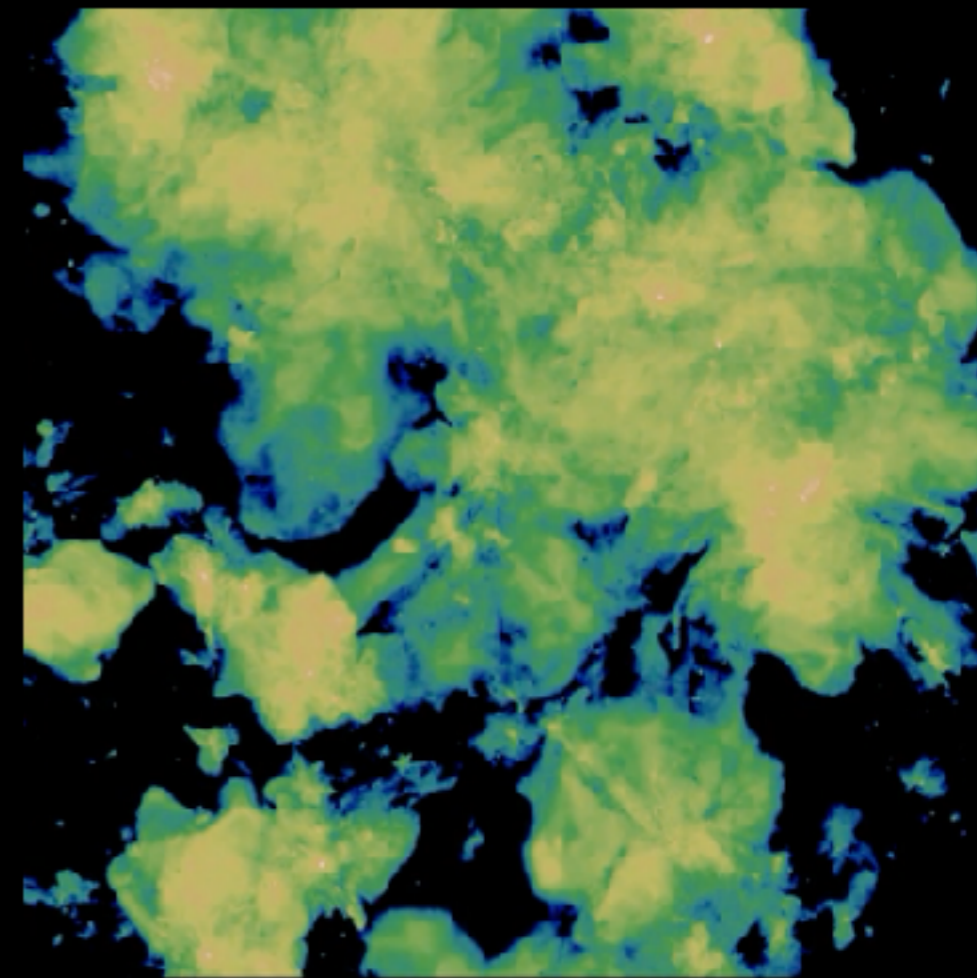
超新星爆発/

中性子星合体

(頻度：超新星爆発の0.5 %,  
合体時間：~1億年)



元素

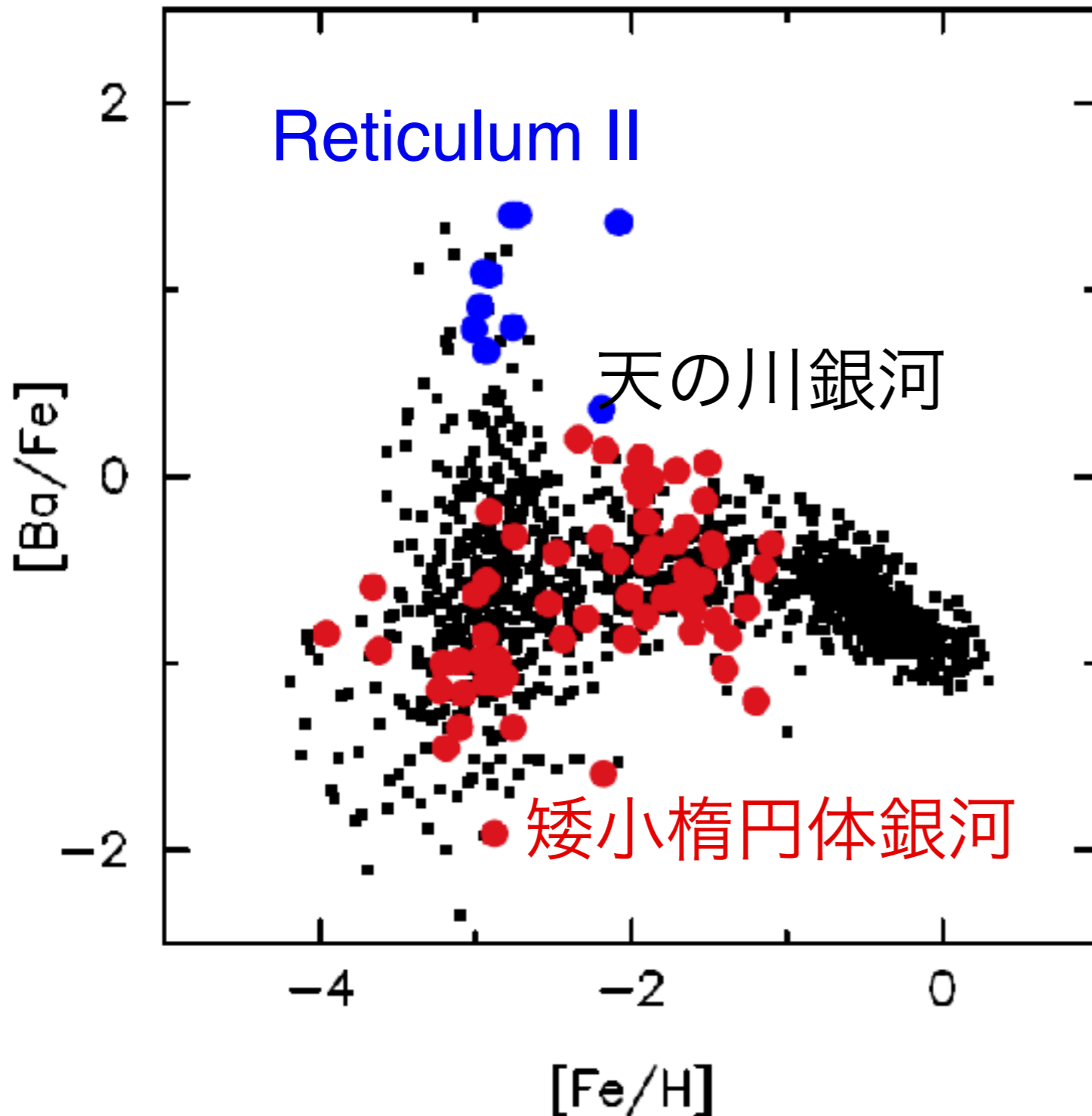


-2.0 -1.4 -0.8 -0.2 0.4  
Gas Metallicity [ $\log Z_{\odot}$ ]



# rプロセス元素の化学進化史

# rプロセス元素



天の川銀河：  
 $[Fe/H] < -2.5$ で分散

矮小楕円体銀河：  
 $[Fe/H] < -2.5$ でrプロ  
セス元素に富んだ星が  
見つかっていない

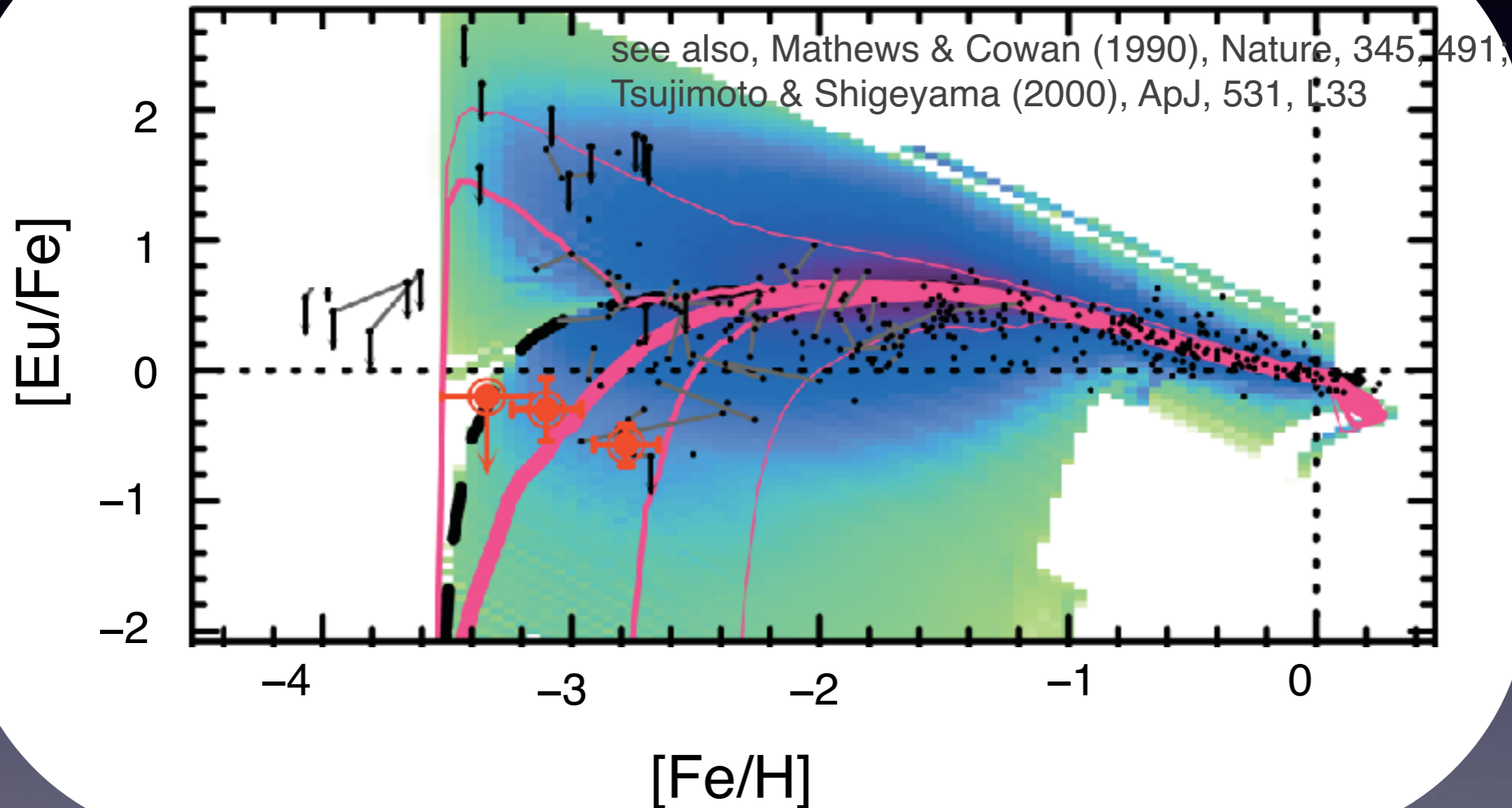
Reticulum II矮小銀河：  
rプロセス元素に富んで  
いる

SAGA database (Suda et al. 2008; 2017)  
e.g., Honda et al. (2004), ApJ, 607, 404; Ji et al. (2016),  
Nature, 531, 610; Hansen et al. (2018), ApJ, 858, 92

# 超新星爆発によるrプロセス元素の化学進化

親星質量 **8-10  $M_{\text{sun}}$** の超新星爆発で観測値を説明できる

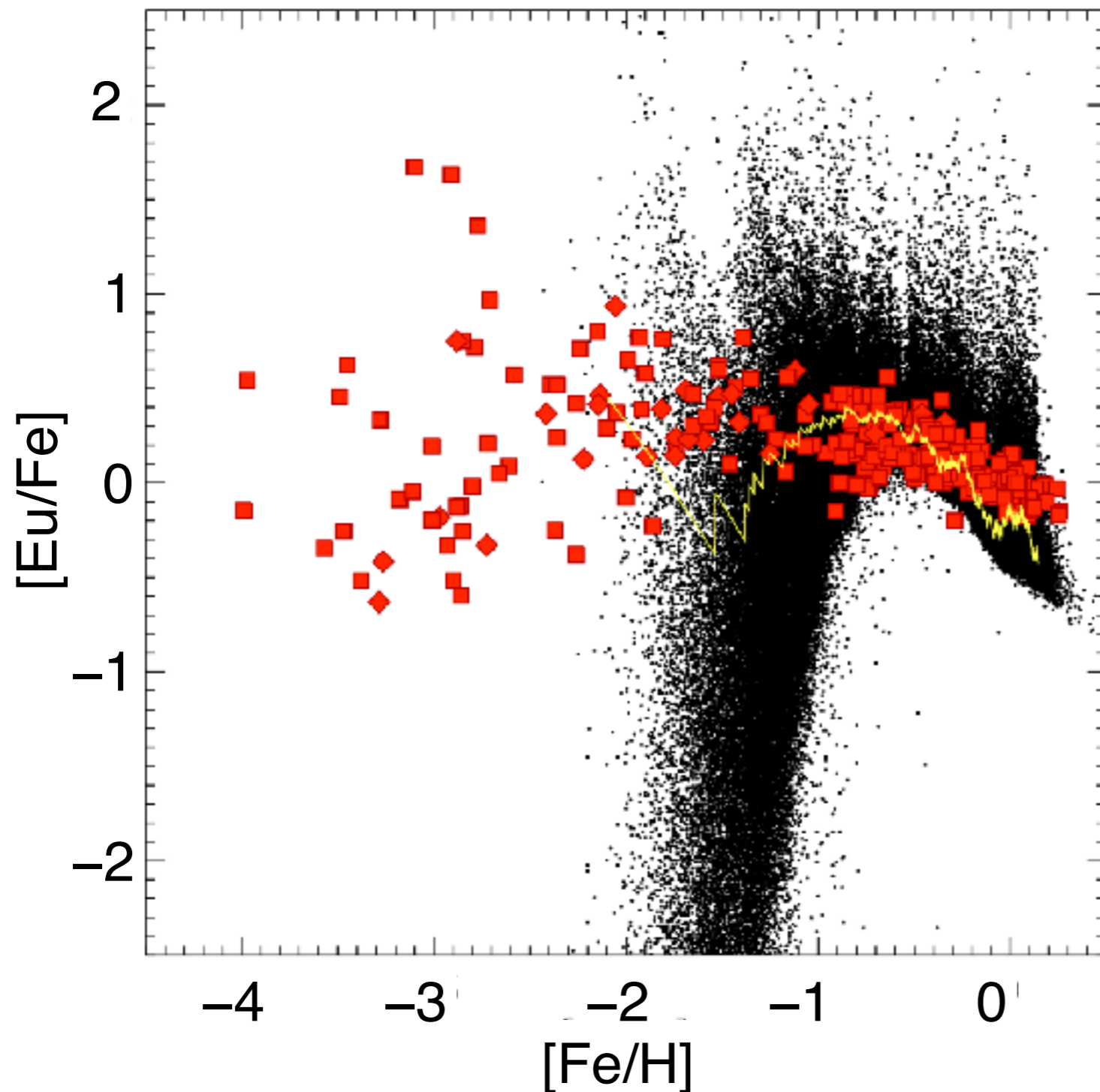
Ishimaru et al. 2004, ApJL, 600, L47



元素合成計算から、質量数110以上のrプロセス元素の合成が困難であることが指摘されている

# 連星中性子星合体による化学進化

非一様化学進化モデル



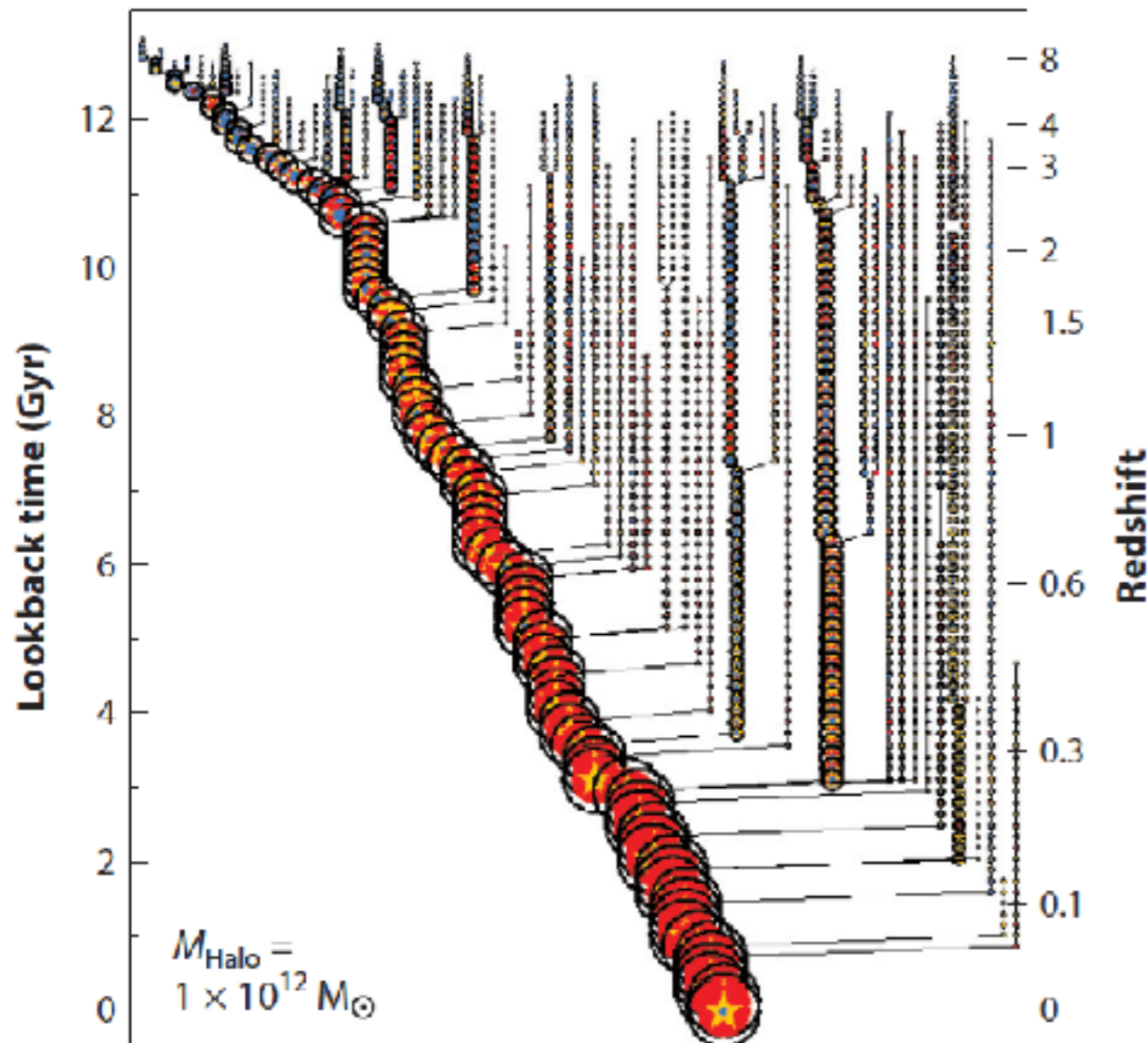
Argast et al. 2004, A&A, 416, 997

連星中性子星合体の長い合体時間(~1億年)+低い頻度: CCSNeの~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

# 階層的構造形成



Hirschmann et al. 2012, MNRAS, 419, 3200

銀河はより小さい構造  
の合体集合により形成  
された

rプロセス元素の化学  
進化研究でも考慮す  
る必要がある

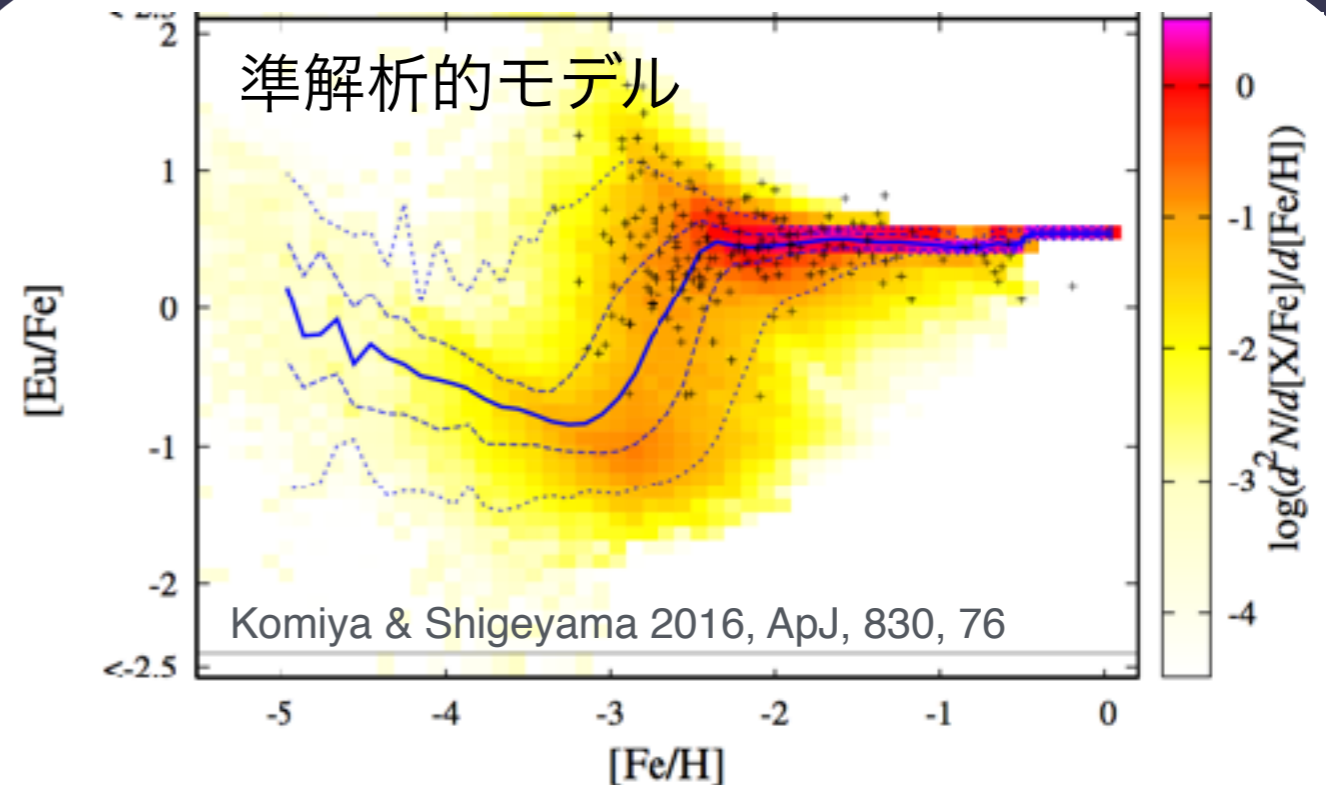
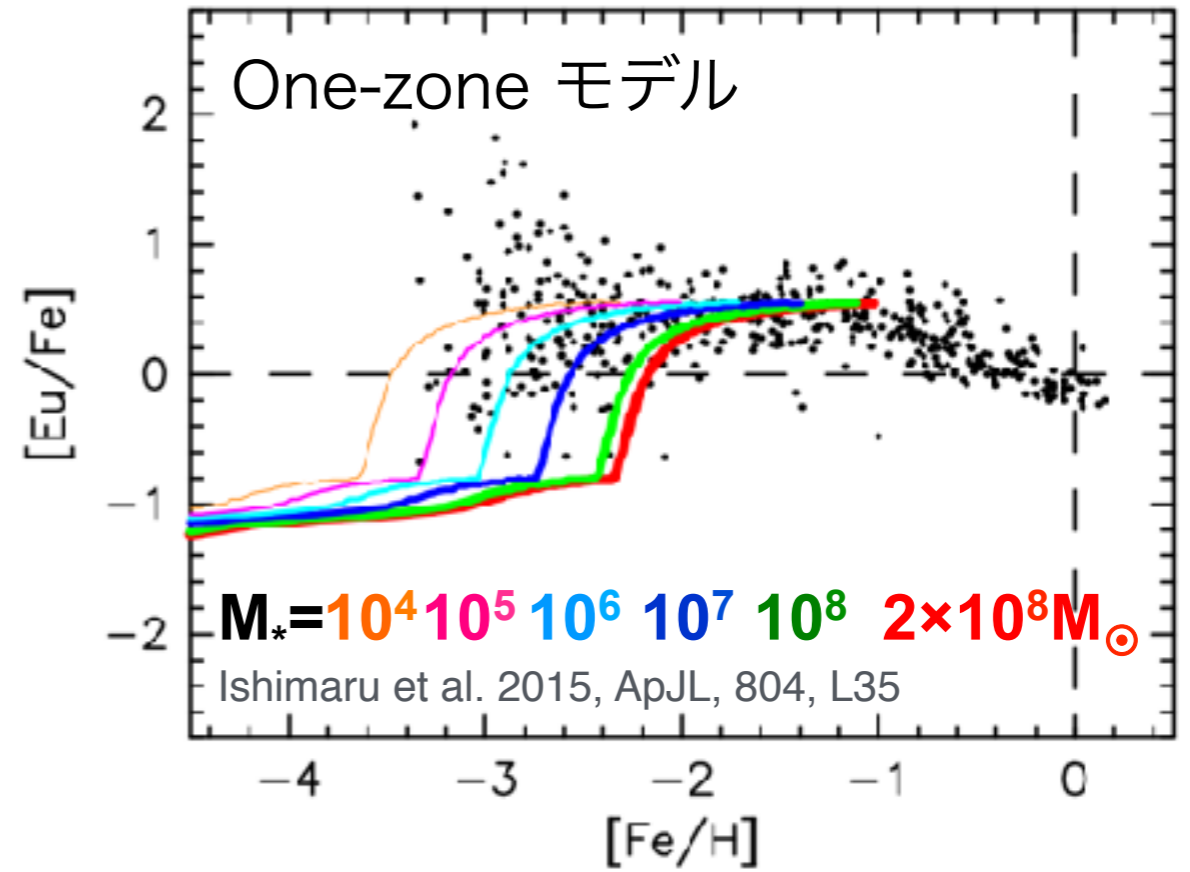
# 階層的構造形成を考慮した化学進化モデル

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

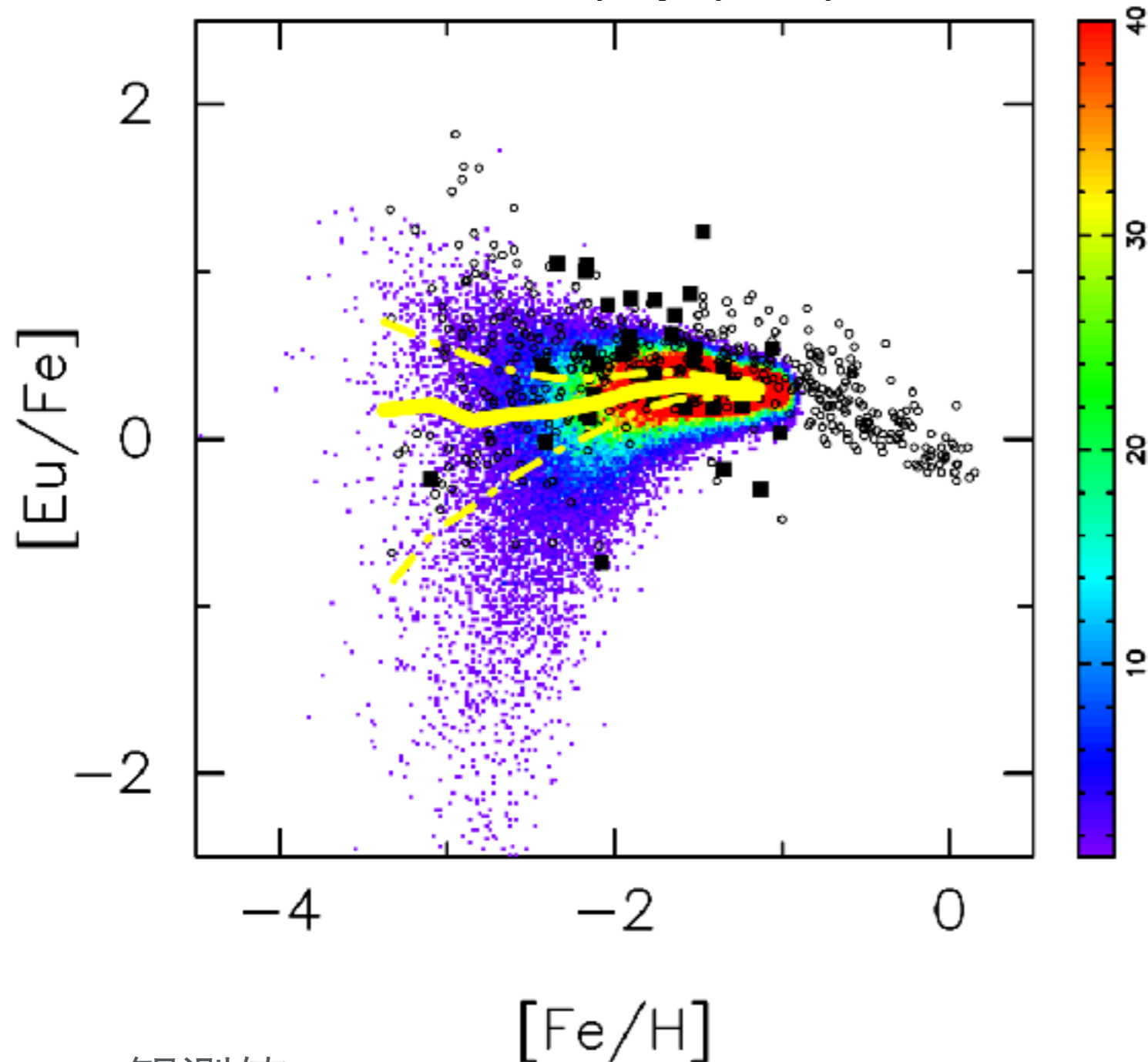
星形成効率は銀河の力学進化と深く関わっており、化学進化と力学進化を同時に計算することが必須



see also, Ojima et al. 2018, ApJ, 865, 87

# rプロセス元素分布

Hirai et al. 2015, ApJ, 814, 41



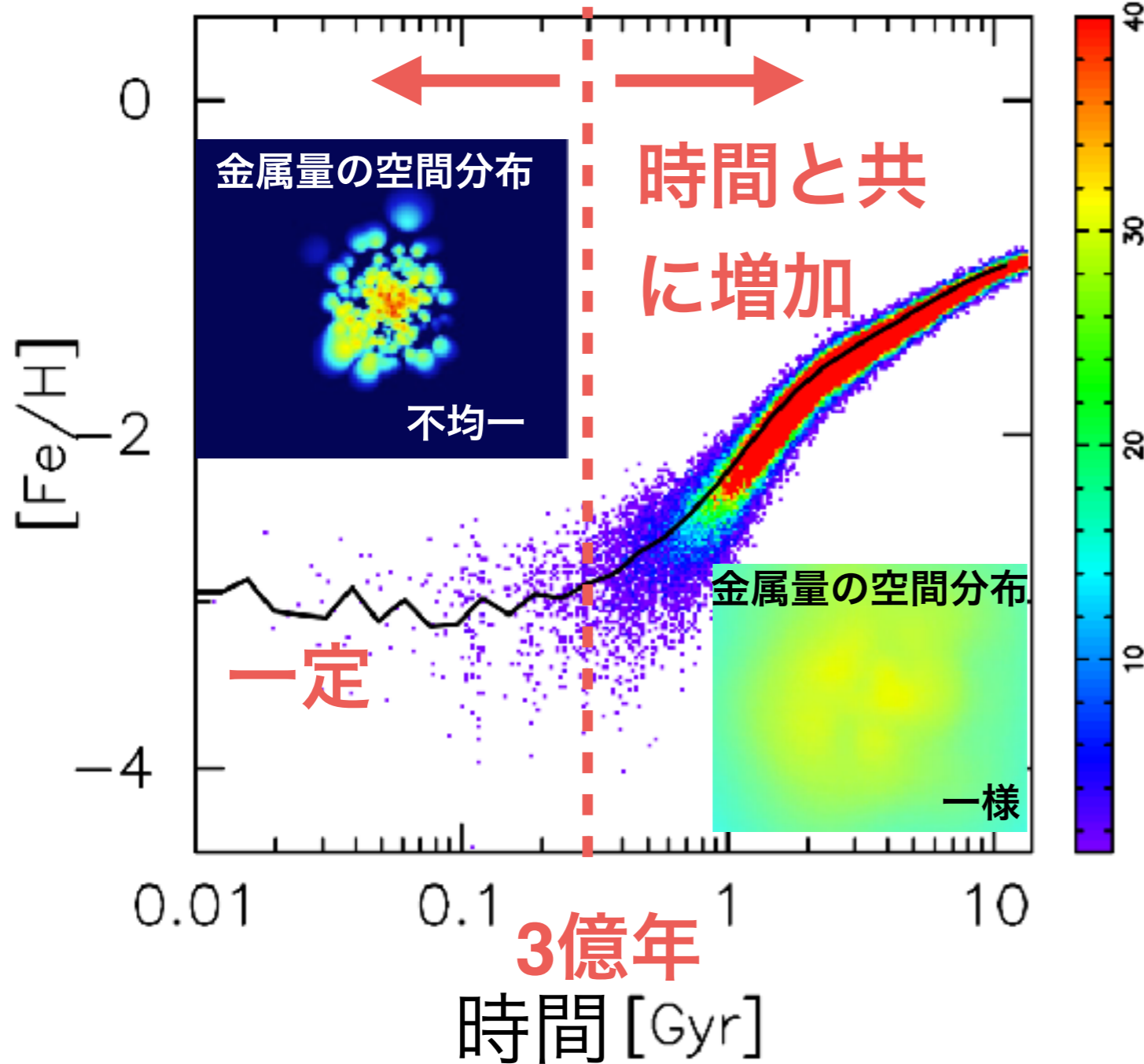
観測値 (SAGA database, Suda et al. 2008; 2014)

- 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

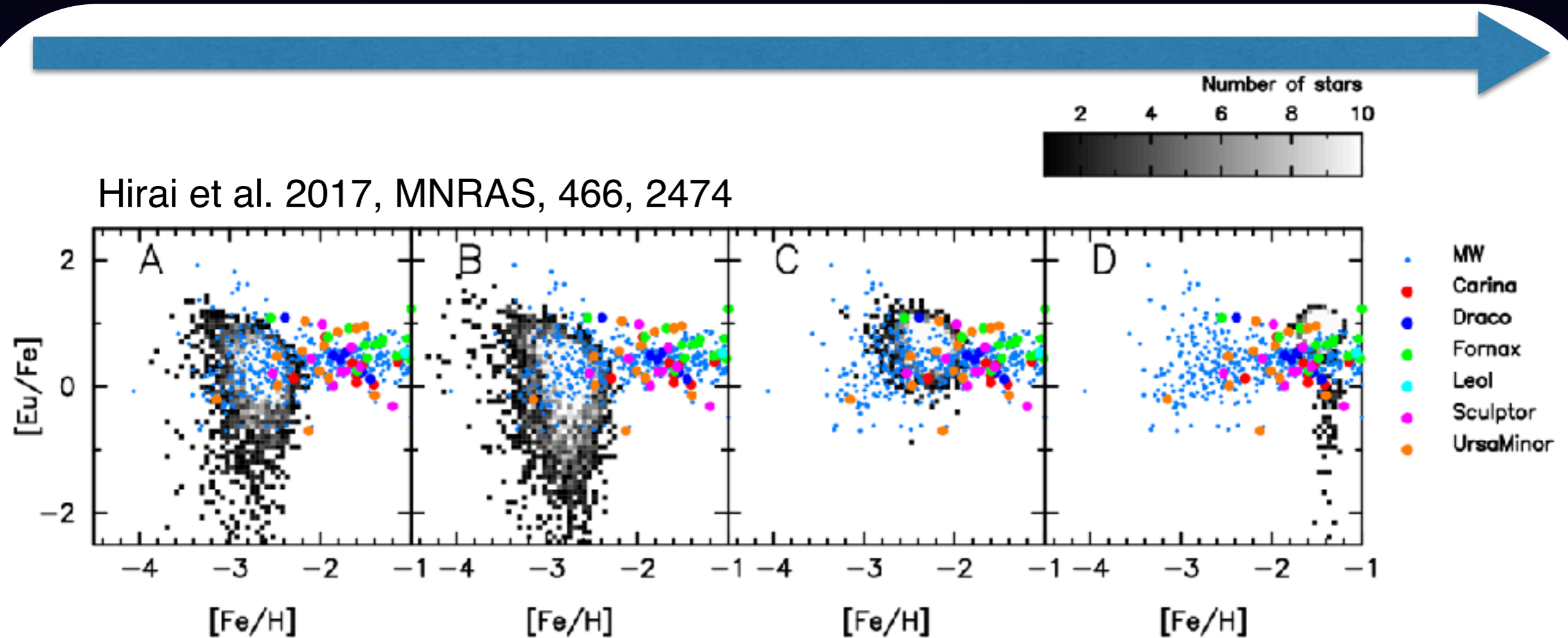
$t < 3$ 億年で中性子星合体が起きれば、 $[Fe/H] < -3$ でEuが現れる



# 星形成効率の影響

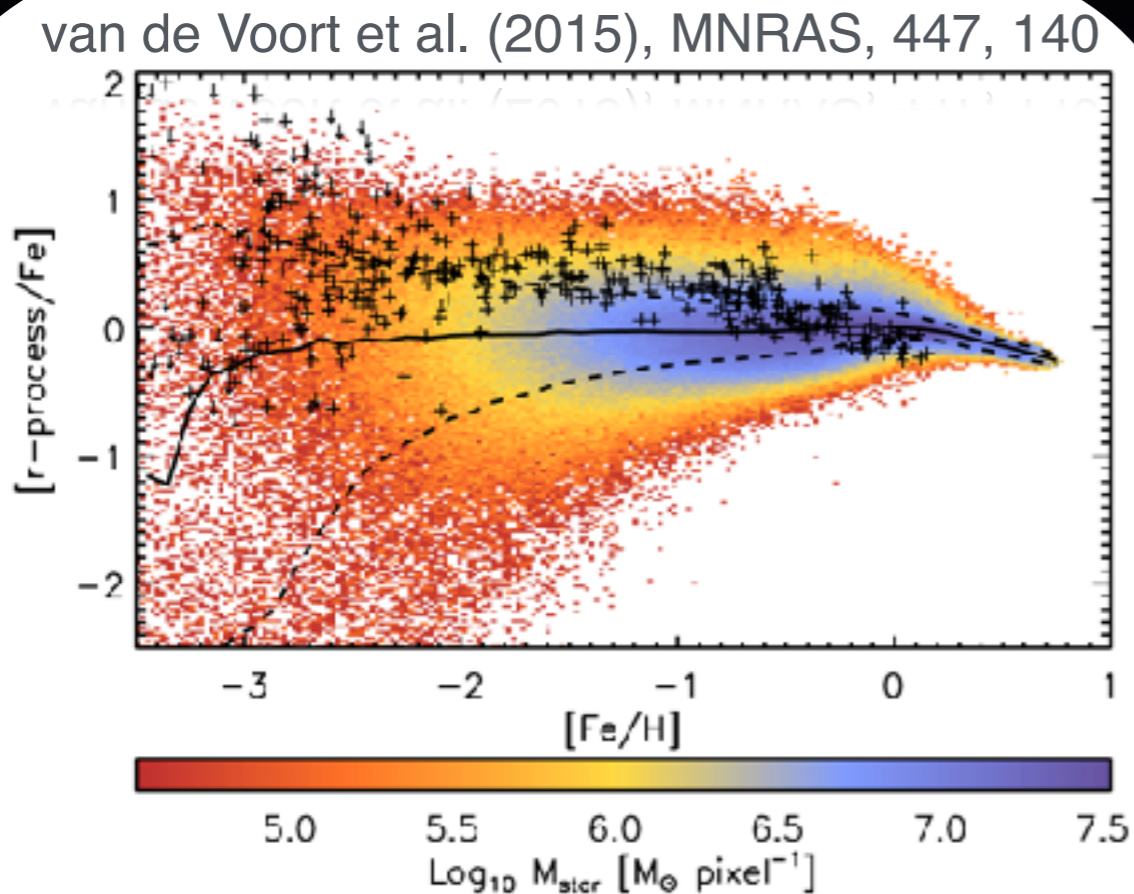
低

高

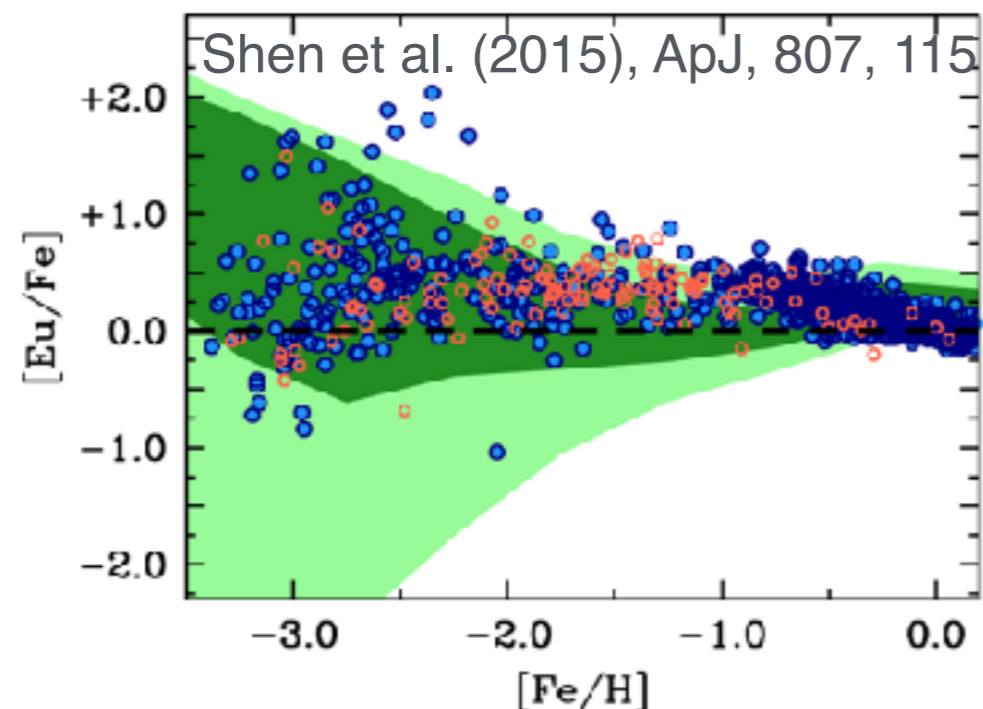


初期の星形成効率の高いモデルほど高い金属量でEuを持つ星が現れる

# 銀河形成シミュレーションによる結果



連星中性子星合体でrプロセス元素を放出させた場合もrプロセス元素を持つ超金属欠乏星が形成

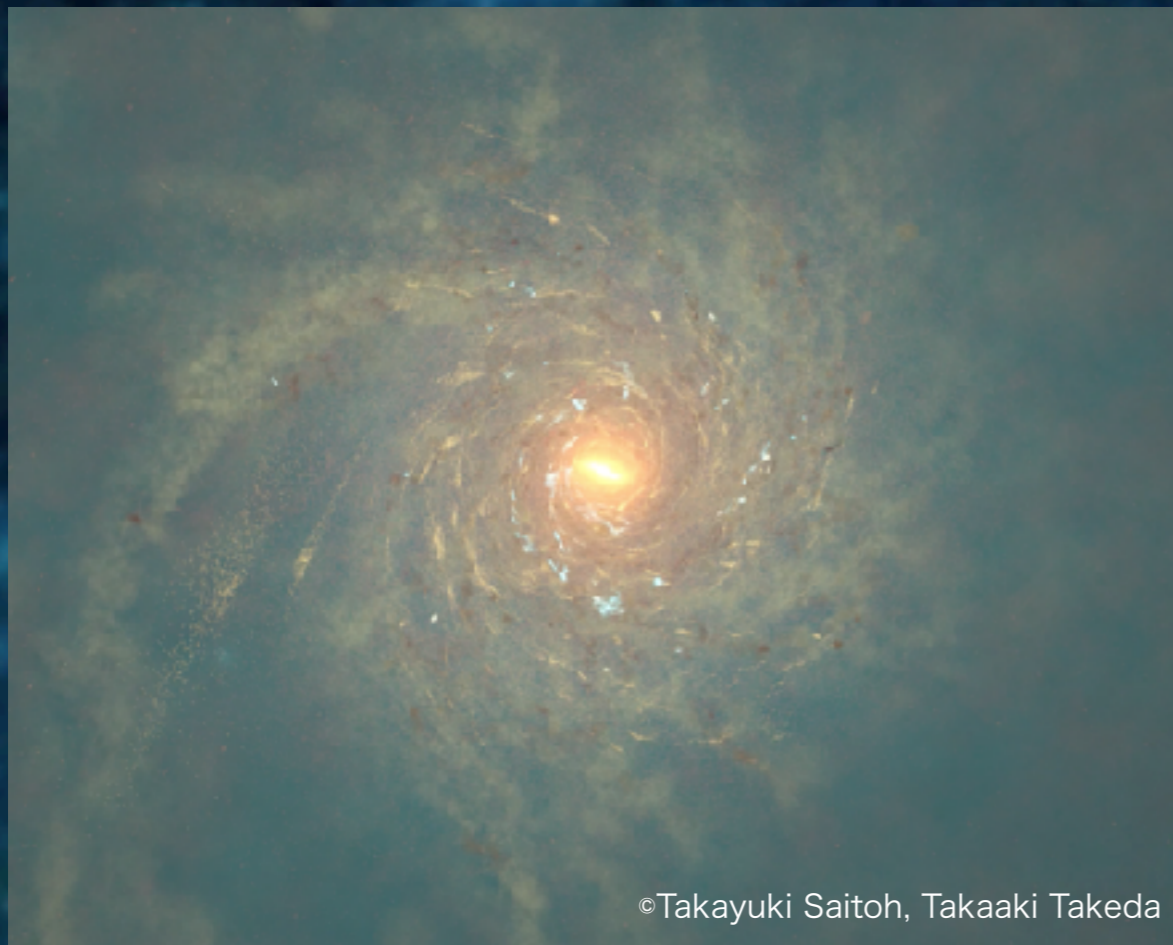


分解能は不十分  
(1粒子あたりの質量  
 $\sim 10^4$ — $10^6$  太陽質量)

see also, Naiman et al. 2018, MNRAS, 477, 1206; Haynes & Kobayashi, 2019, MNRAS, 483, 5123; Hirai 2019, Springer Theses

# 宇宙論的ズームインシミュレーション

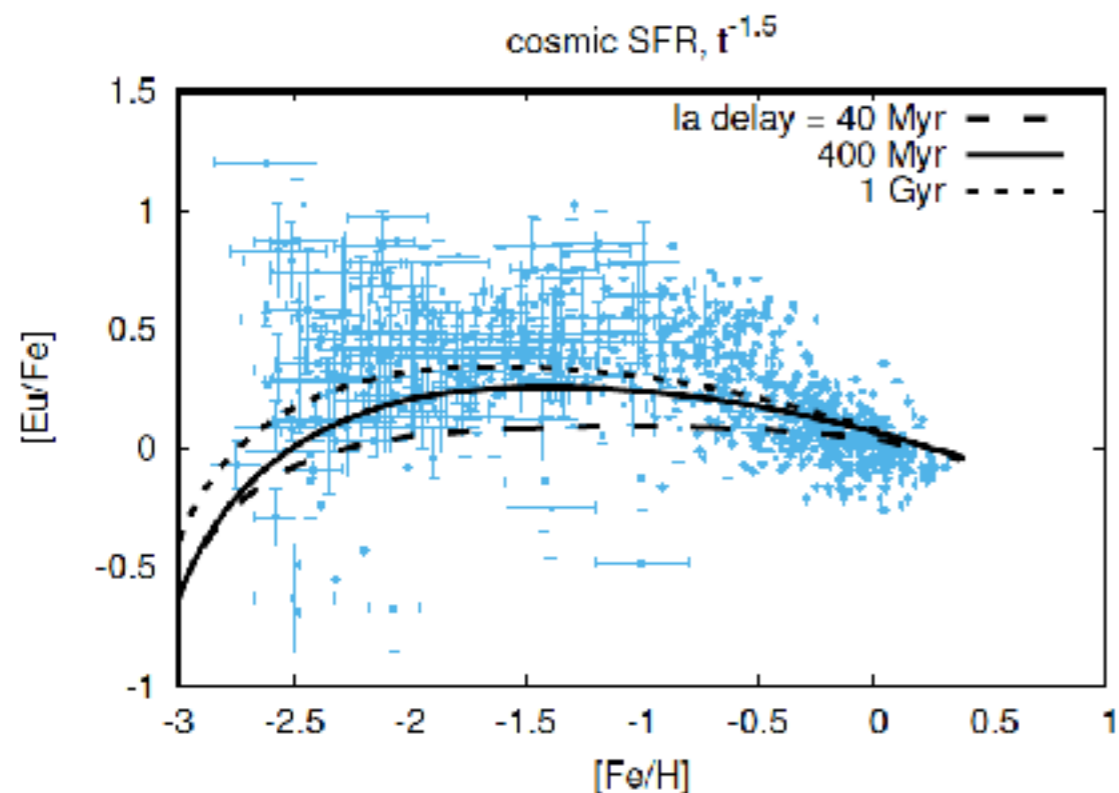
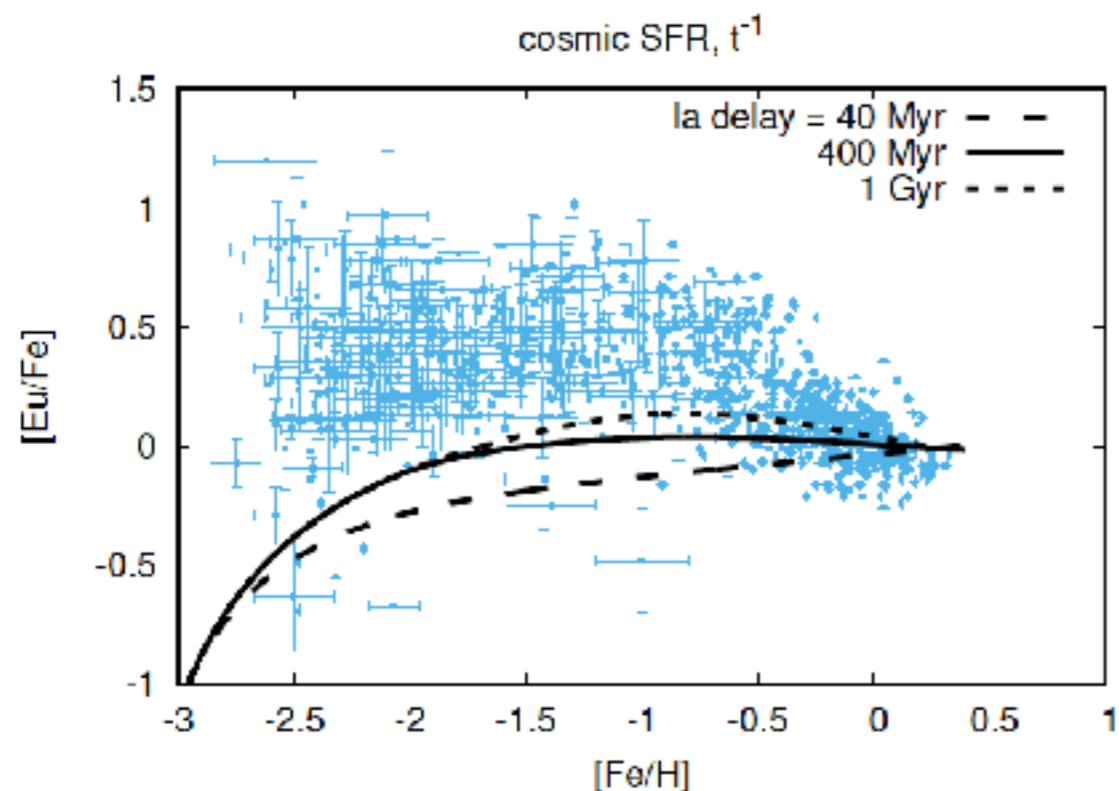
1. 低分解能で構造形成のN体計算
2. N体計算の結果から、調べたいハローを切り出す
3. 調べたいハローの周囲のみを高分解能にして初期条件から計算する



# 今後の課題

# 銀河円盤における [Eu/Fe]の減少傾向

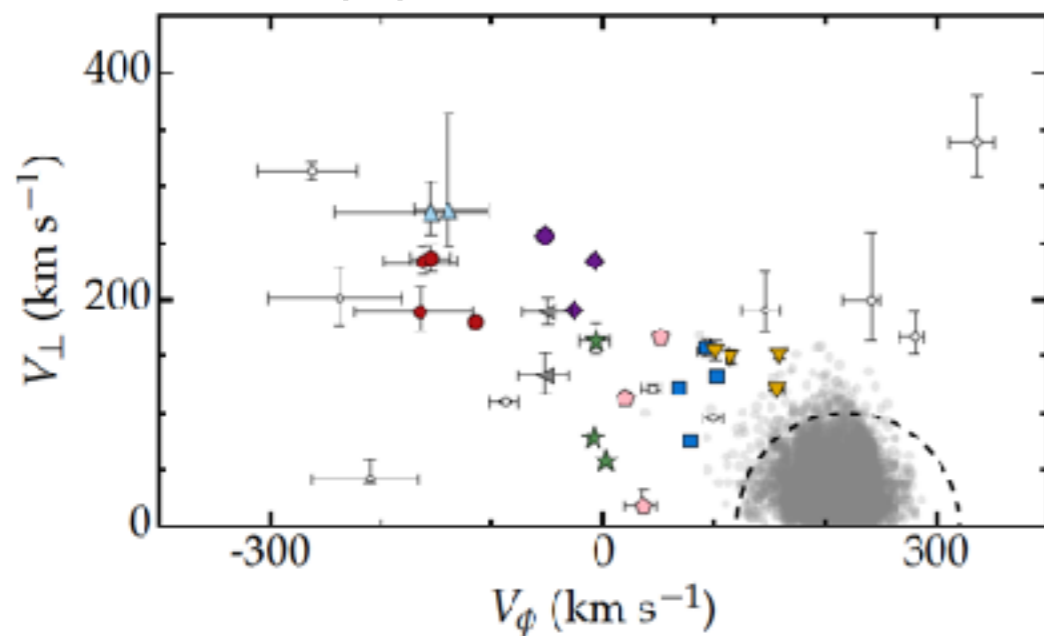
遅延時間分布が $t^{-1}$ の連星  
中性子星合体では説明で  
きない



Hotokezaka et al. (2018), IJMPD, 1842005,  
see also, Côté et al. (2019), ApJ, 835, 106;  
銀河円盤の化学進化: Tsujimoto & Baba  
(2019), arXiv: 1905.08275

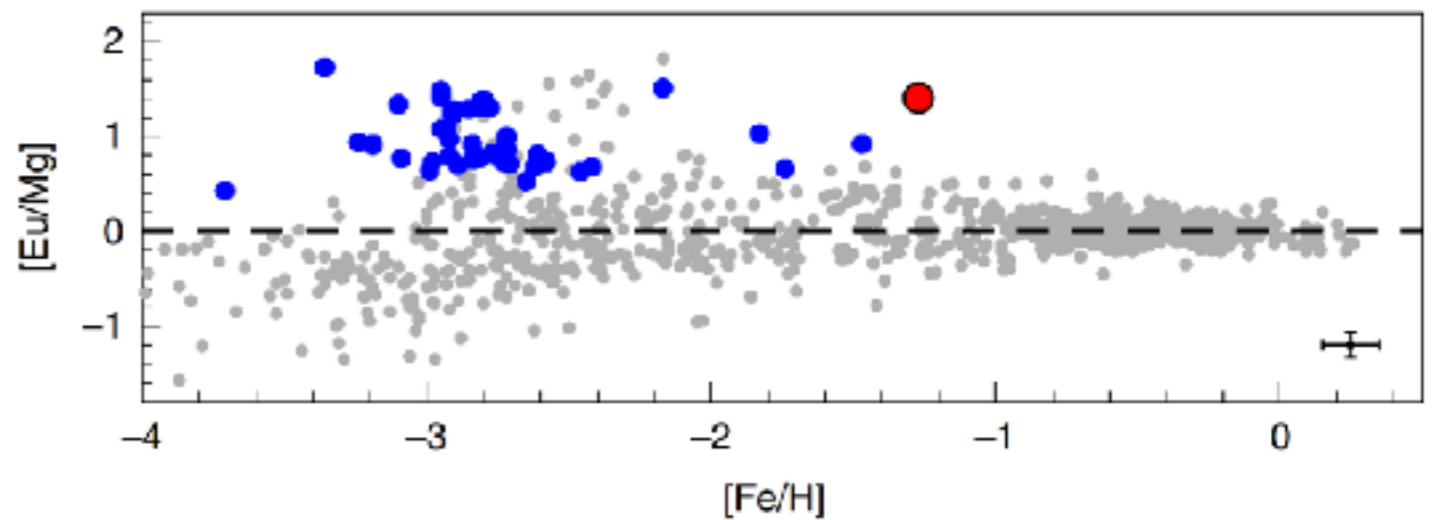
# rプロセス元素に富んだ星の起源

銀河円盤上で太陽とは逆回転している



Roederer et al. 2018, AJ, 156, 179

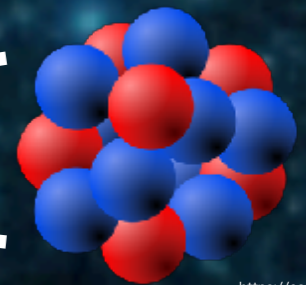
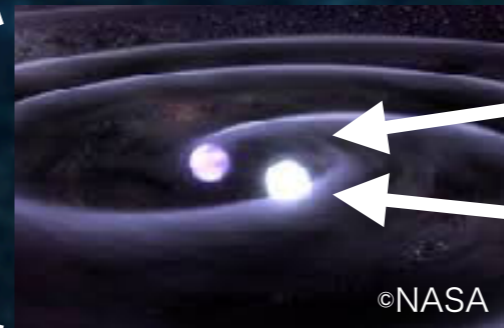
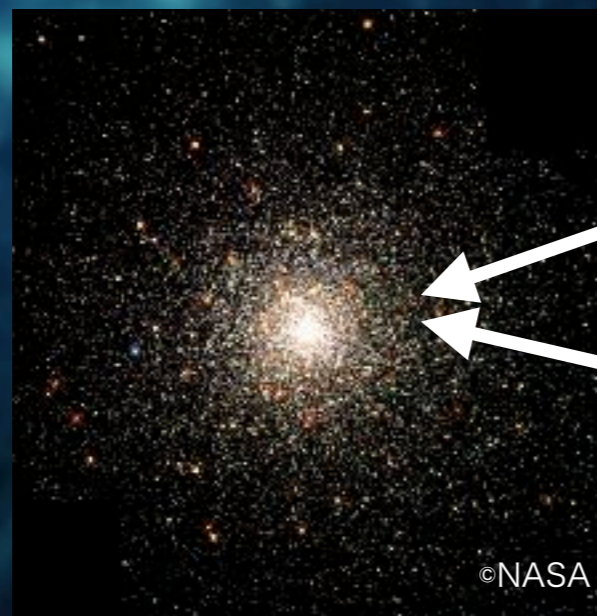
矮小銀河と似た元素組成



Xing et al. 2019, Nature Astronomy

矮小銀河で形成され後に天の川銀河に降着?

# 個々の星を分解した銀河形成シミュレーションへ



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleus\\_drawing.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleus_drawing.svg)

# まとめ

- ・ 銀河の化学進化研究から元素の起源天体・銀河進化史を制限できる
- ・ 階層的構造形成を考慮すると連星中性子星合体で金属欠乏星のrプロセス元素組成を説明できる可能性がある
- ・ rプロセス元素は銀河進化史の指標となりうる