

初代星・初代銀河研究会2025

# 銀河考古学の現状と課題

平居 悠 (HIRAI, Yutaka)

東北公益文科大学



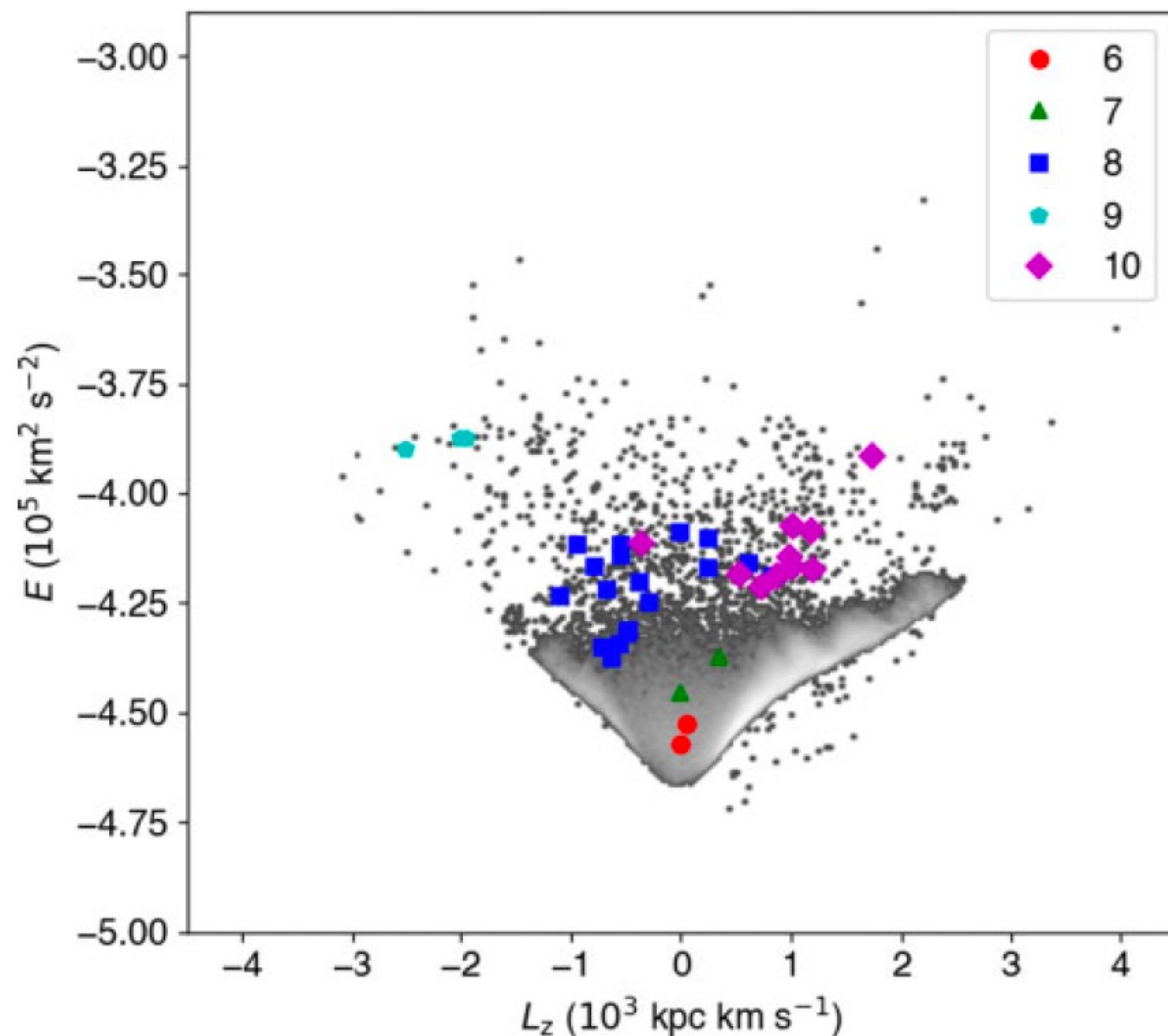
# 銀河考古学

星の化石情報（運動、化学組成）から  
銀河の歴史を読み解く



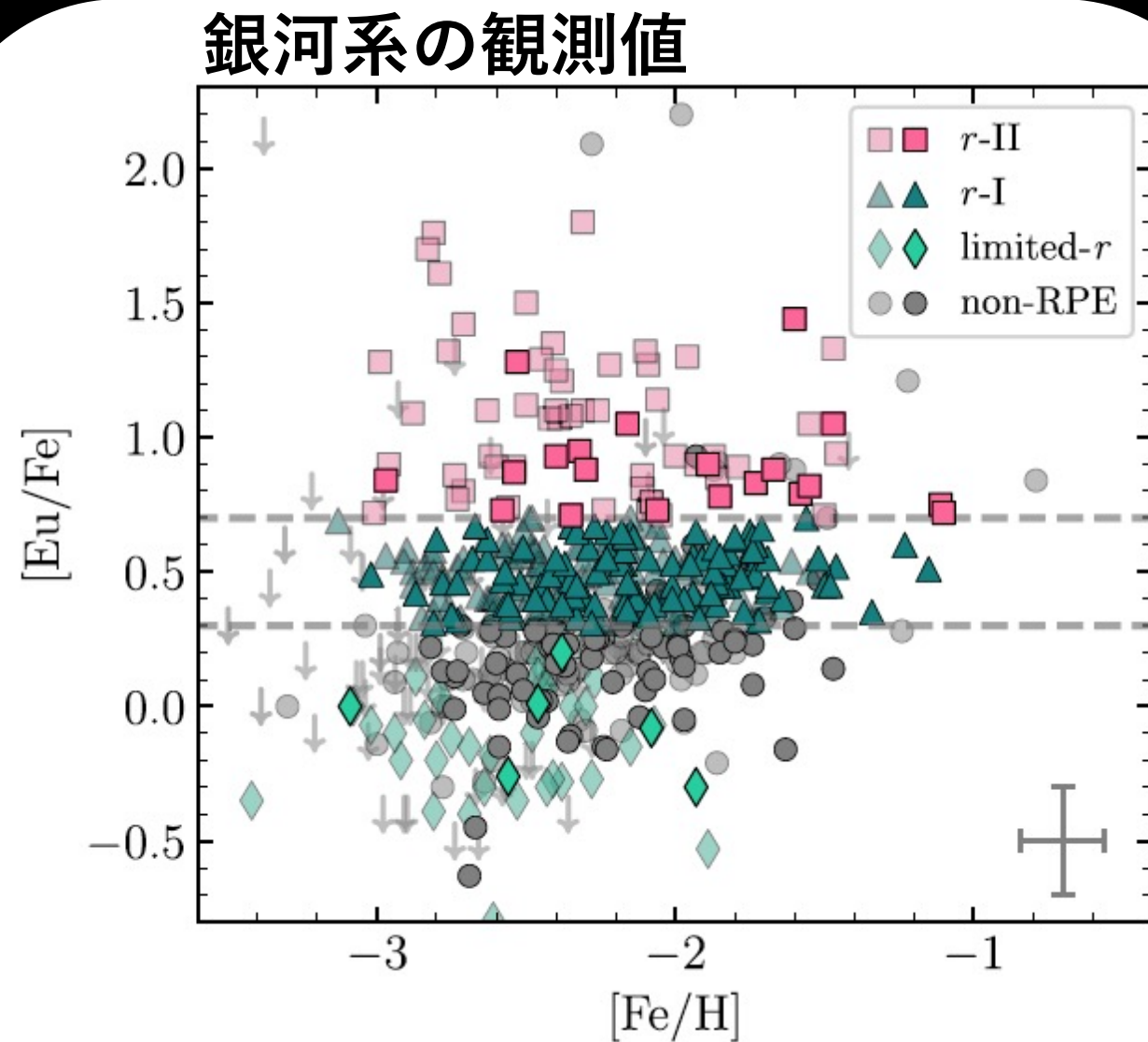
# 動力学的指標

似た環境で生まれた星は、力学的保存量（エネルギー、角運動量など）も似た値を持つ。



Hirai et al. (2022)

# 星のrプロセス元素（ユーロピウム, Eu）組成



EuとFeは  
異なる起源

Holmbeck et al. (2020)



# 銀河系の化学動力学構造



# 銀河系の構造

厚い円盤

バルジ

球状星団

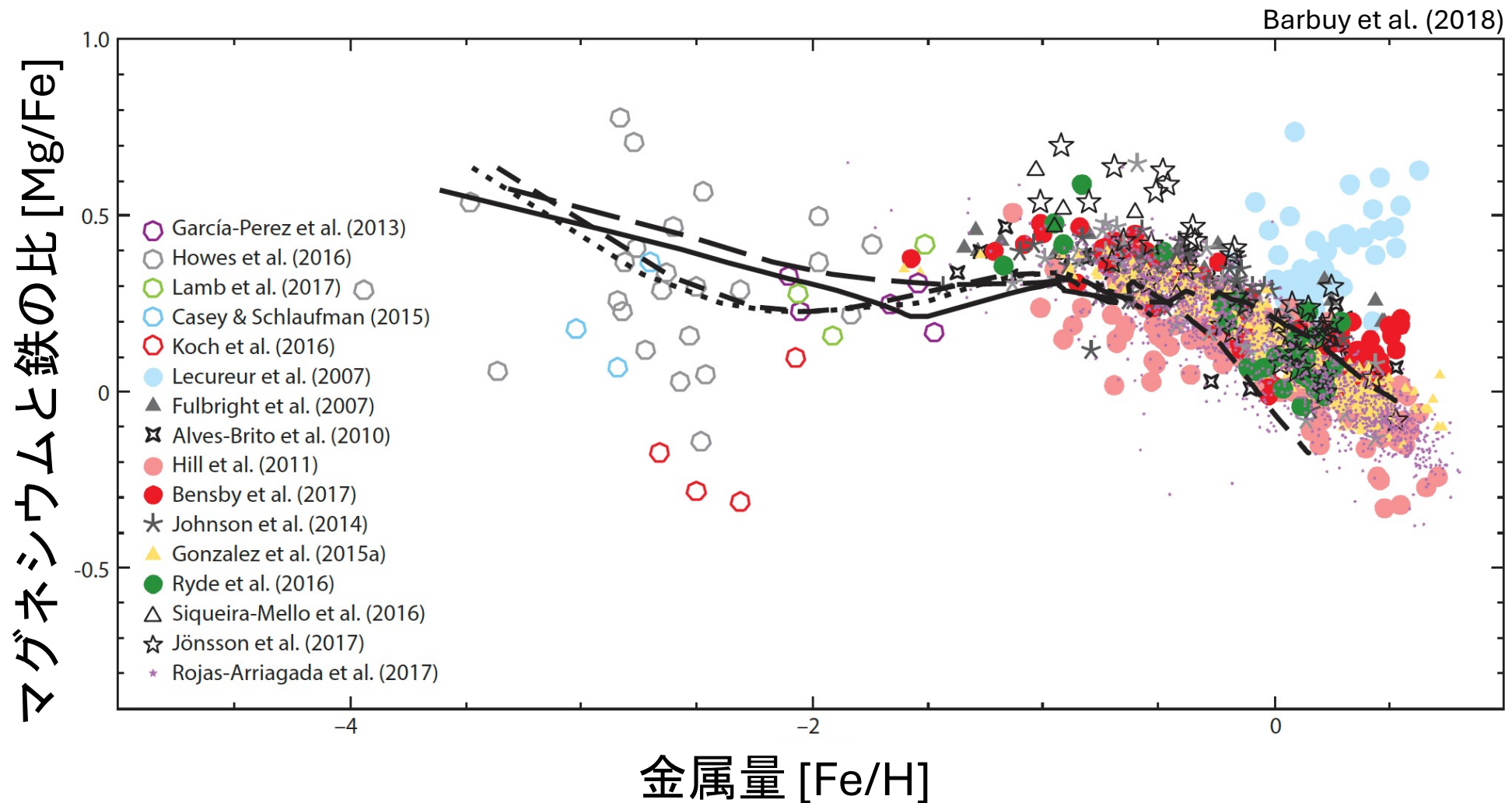
薄い円盤

ハロー

衛星銀河



# バルジの化学組成



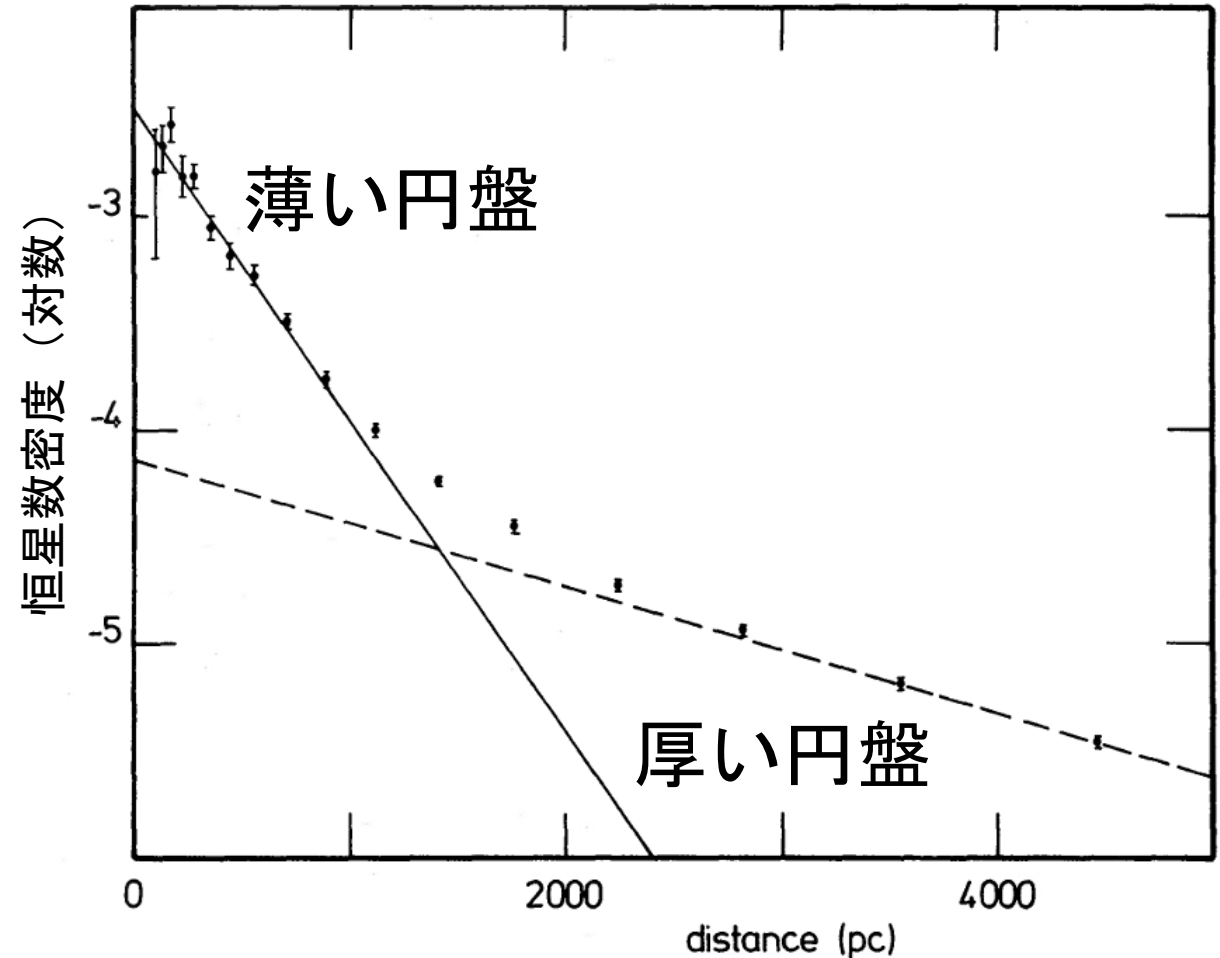
短い時間スケール~3億年で形成されたことが示唆



# 薄い円盤と厚い円盤

Gilmore & Reid (1983)

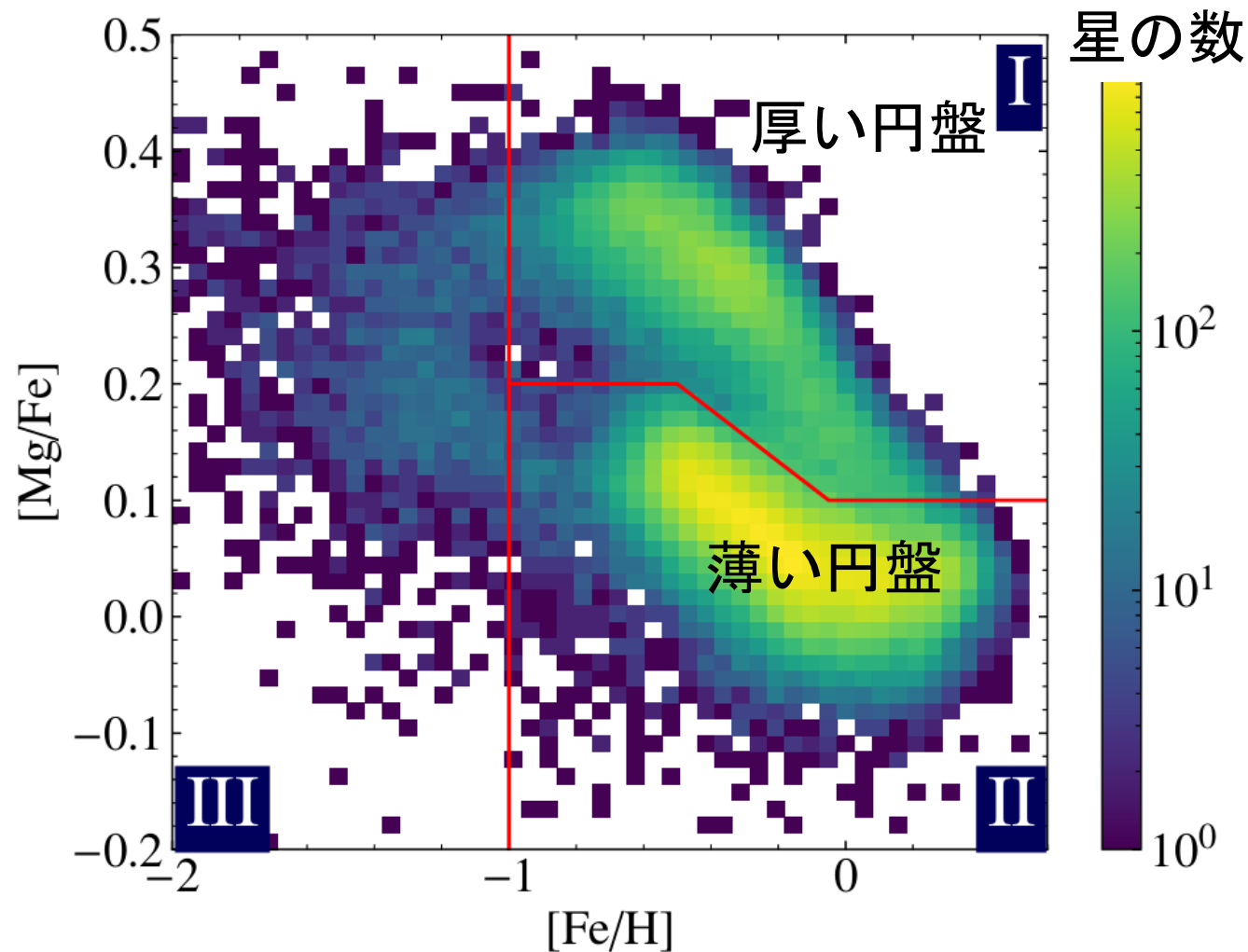
銀河系の円盤は厚さ  
300 pc程度の**薄い円盤**  
と厚さ1 kpc程度の**厚い**  
**円盤**で構成される。



# 銀河円盤の化学組成

Alinder et al. (2025)

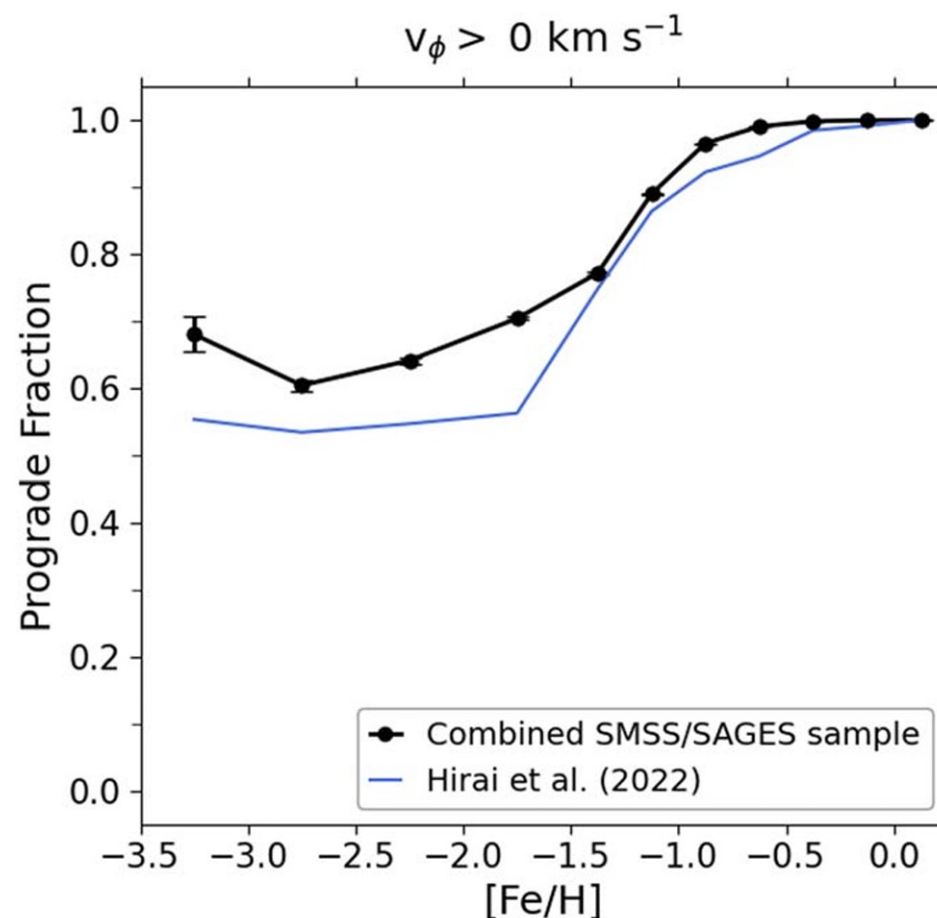
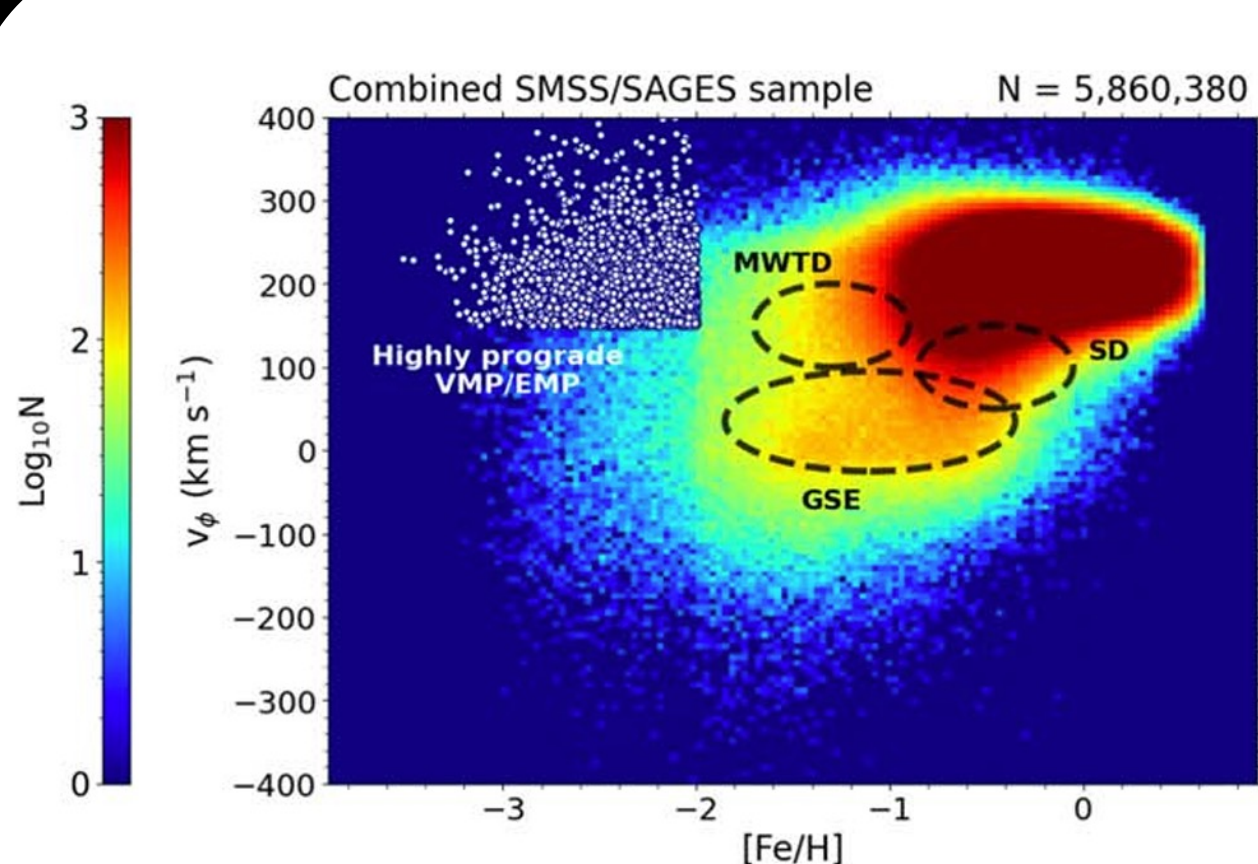
銀河系円盤では  
[Mg/Fe] vs. [Fe/H]  
分布に二峰性がある。





# 超金属欠乏なprograde星

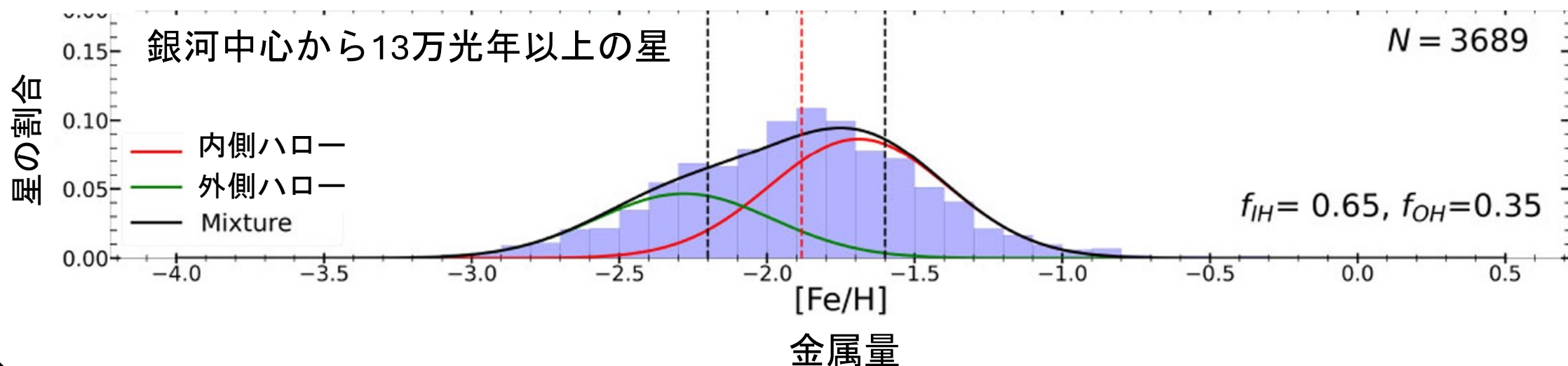
Hong (incl. YH) et al. (2024)



超金属欠乏星でprograde軌道を持つ星が卓越

# 恒星系ハローの金属量分布

Cabrera Garcia (incl. YH) et al. (2024)

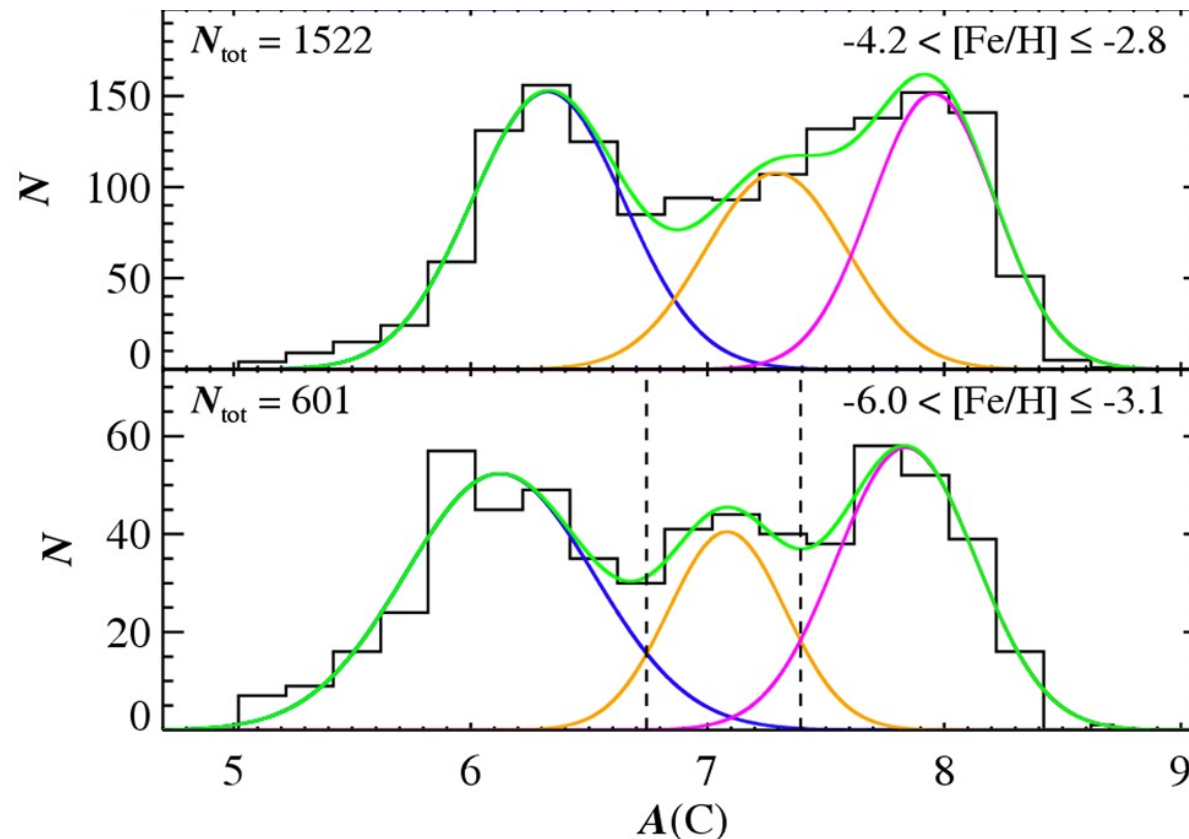
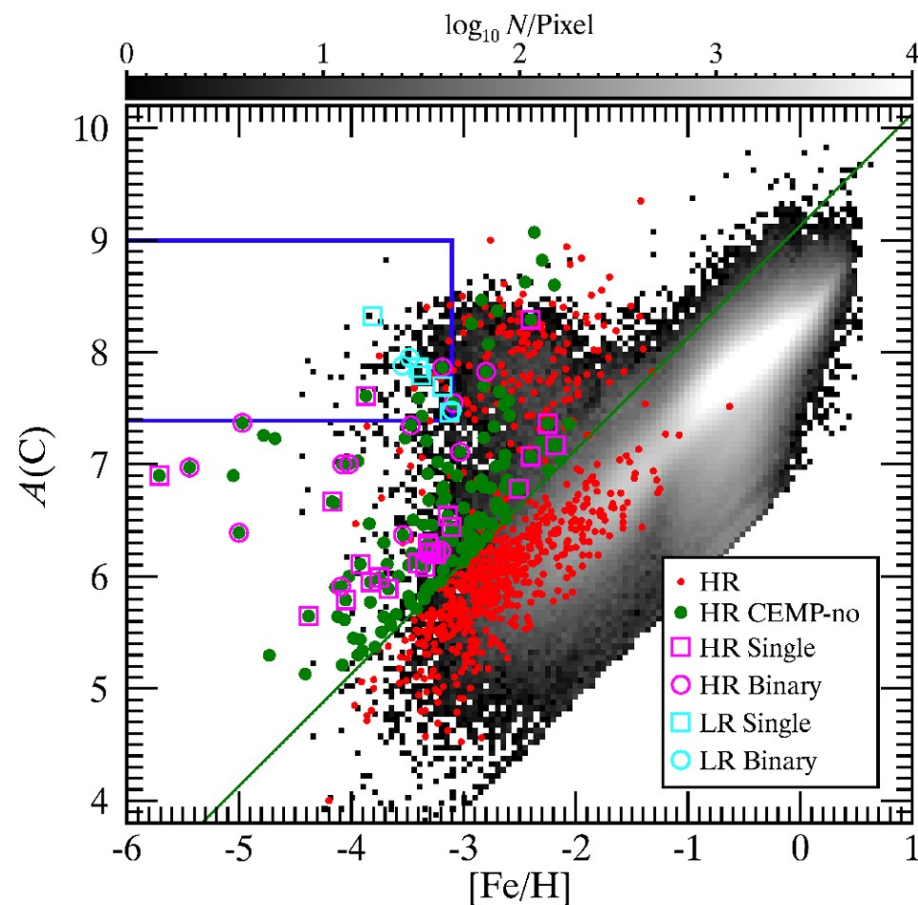


- **内側ハロー**：主に銀河中心から20 kpc以内に存在し、円盤状に分布
- **外側ハロー**：主に銀河中心から20 kpc以上に存在し、球状に分布



# CEMP星の新たなカテゴリ

Lee, Beers, Hirai et al. (2024)



超金属星で非常に炭素に過剰な星の成分が卓越( $A(C) > 7.39$ ,  $[Fe/H] \leq -3.1$ )

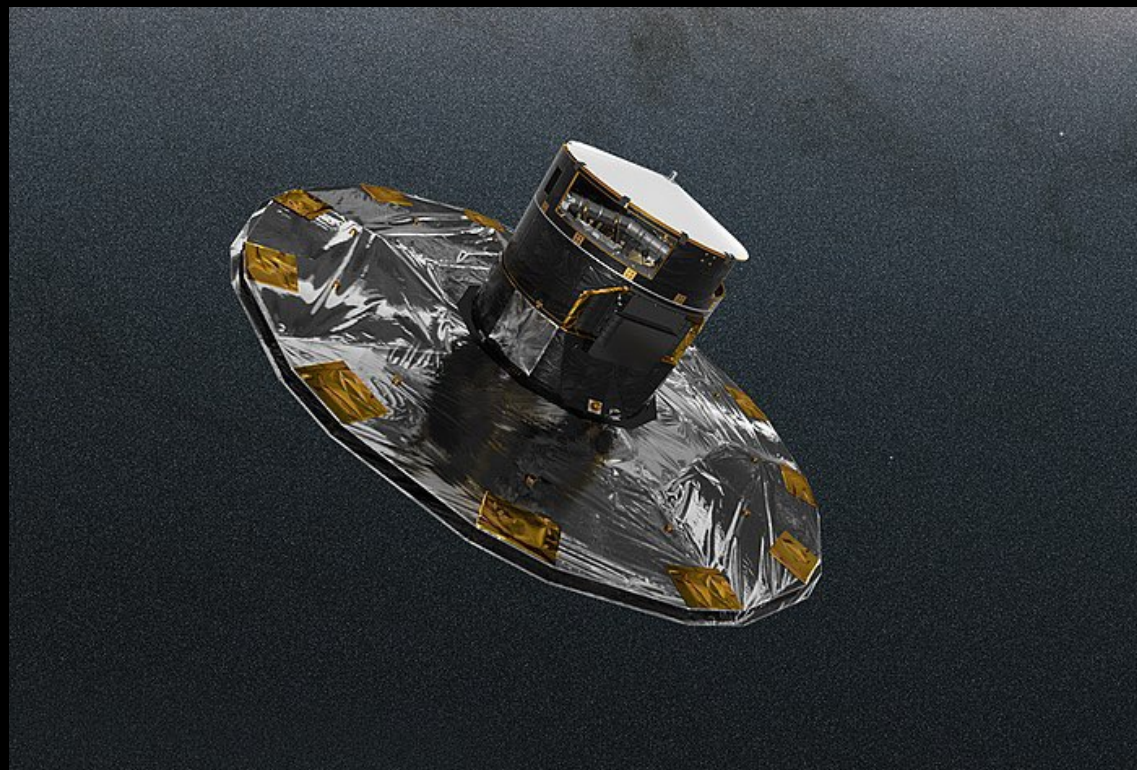
# 銀河系・衛星銀河の形成進化



# 位置天文衛星Gaia

<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/home>

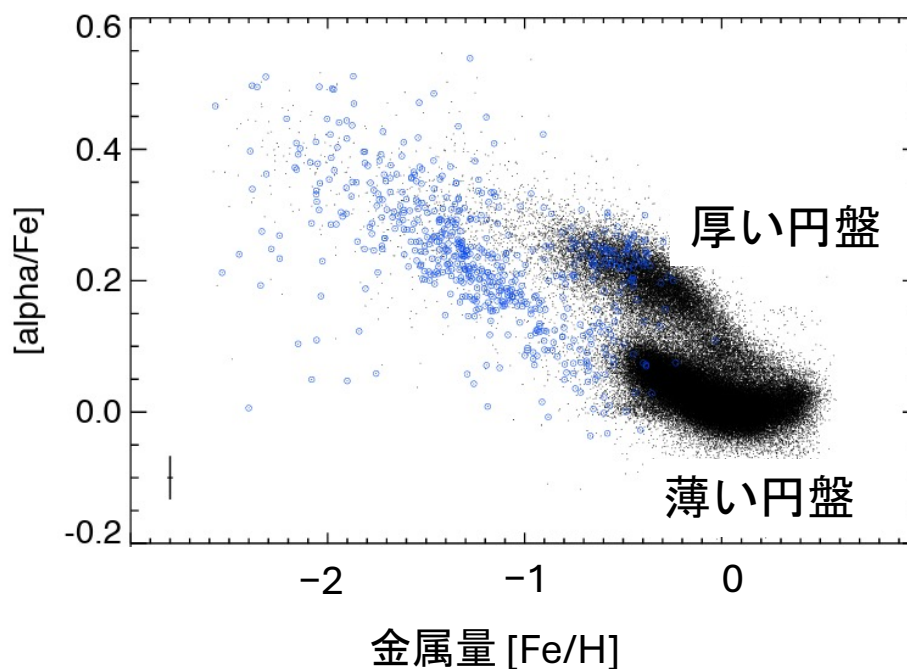
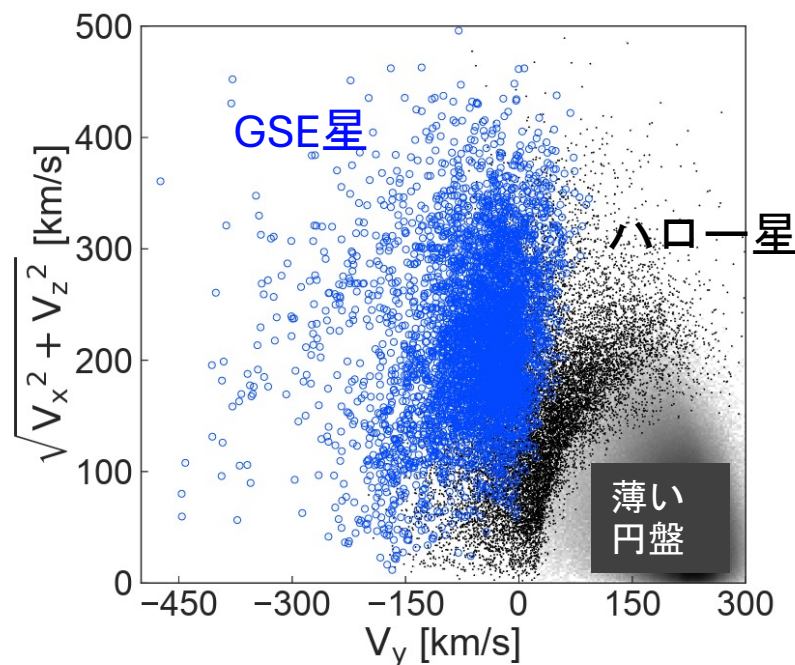
18億個の星の位置と  
運動を測定



© ESA/Gaia/DPAC

# 銀河合体の痕跡：Gaia-Sausage-Enceladus (GSE)

Gaiaデータから求めた星  
の速度分布



Helmi et al. (2018);  
Belokurov et al. (2018)

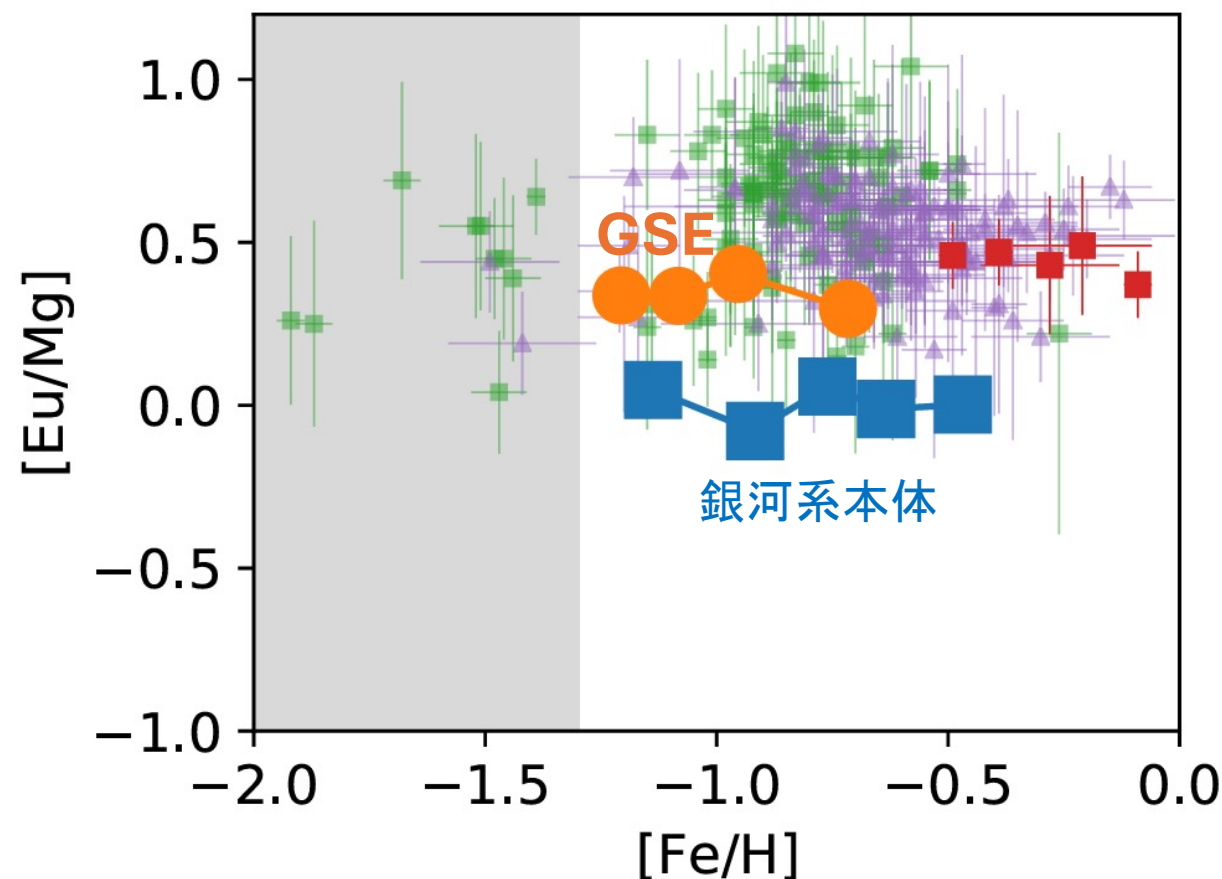
- 速度分布と化学組成が特徴的な大きな星の集団
- かつて銀河系に合体した小マゼラン雲より大きな銀河の痕跡



# GSEの化学的特徴

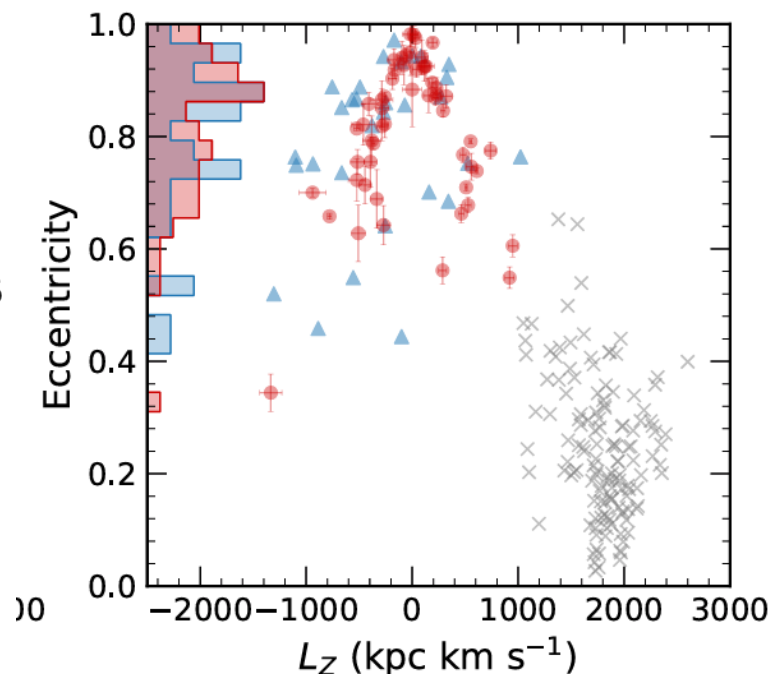
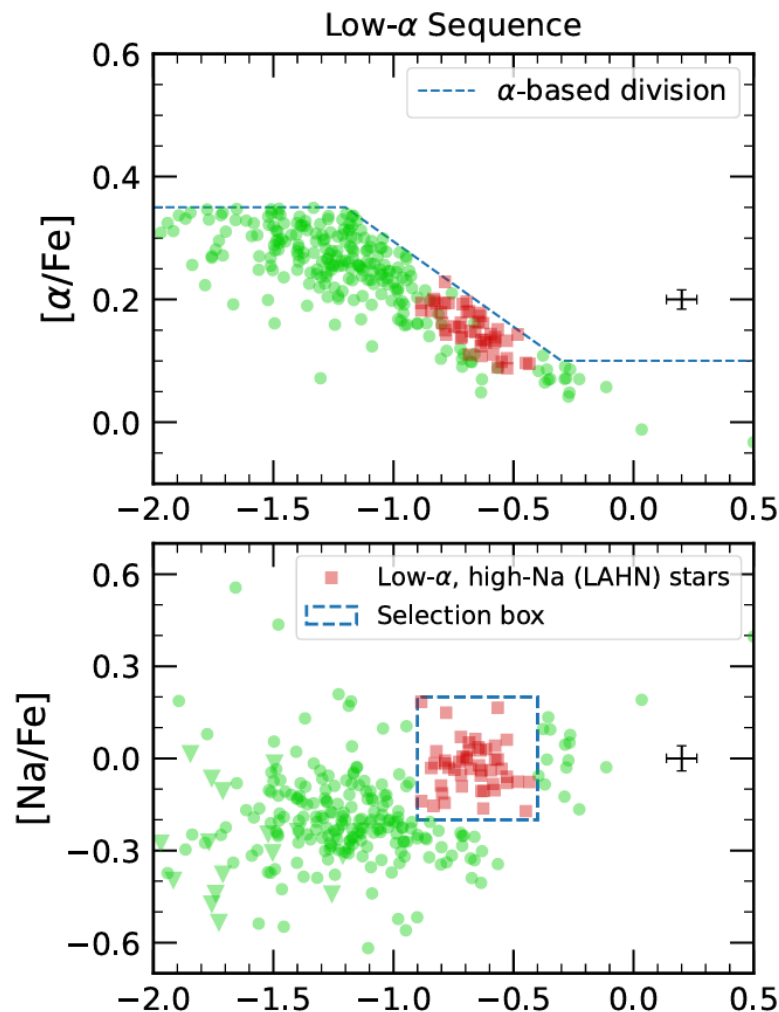
Matsuno, Hirai et al. (2021)

GSE由来の星は銀河系本体で形成された星よりrプロセス元素に富んでいる



# GSE合体による星形成誘発の痕跡

An, Lee, Hirai & Beers (2025)



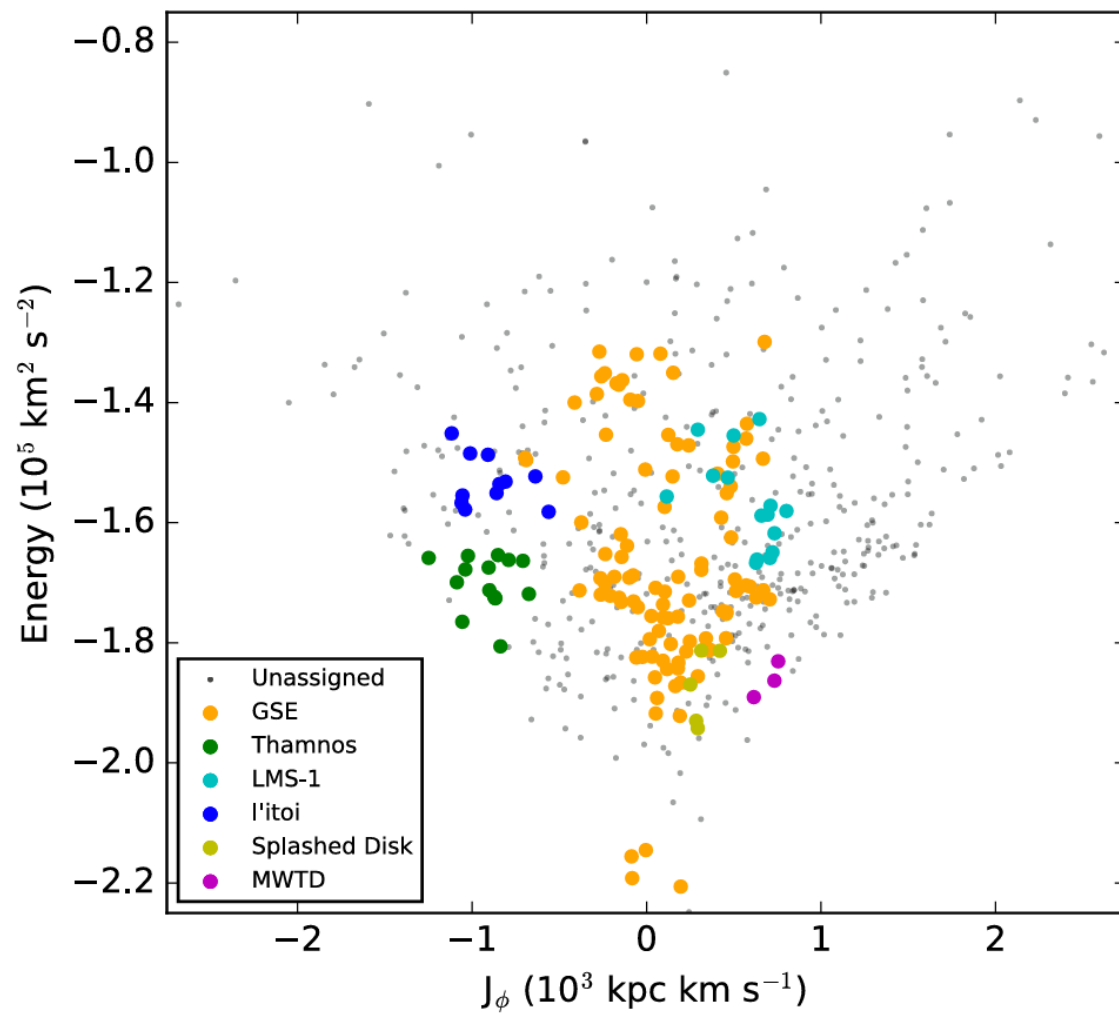
- Low- $\alpha$ , high-Na星の確認
- 軌道離心率と角運動量がGSEと似ている
- GSE合体でもたらされたガスで形成された？



# その他のサブ構造

Zepeda (incl. YH) et al. (2023)

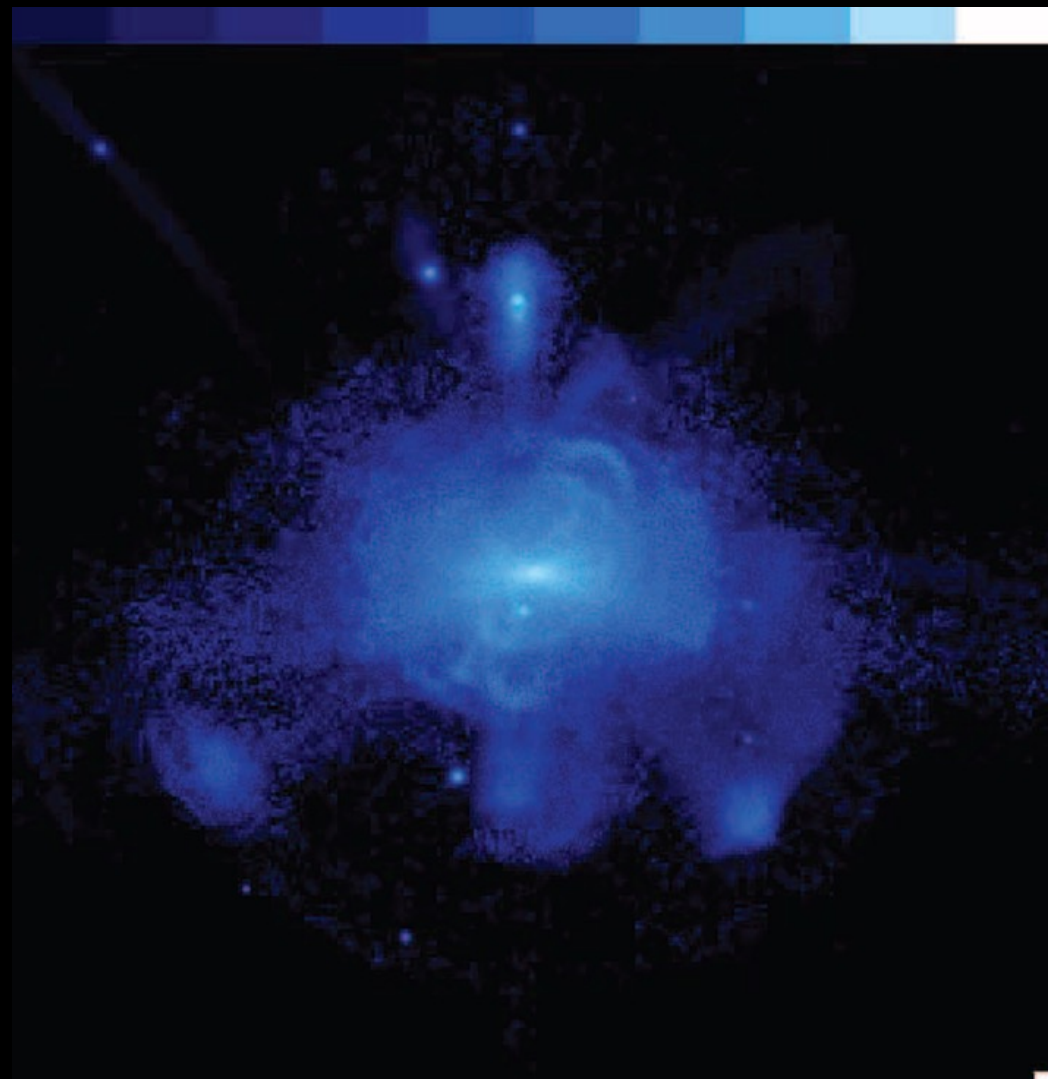
GSE以外にも多数  
のサブ構造が検出



# 恒星系ハロー形成シミュレーション

Bullock & Johnston (2005)

複数の矮小銀河を合  
体させ、恒星系ハロ  
ーの構造を計算



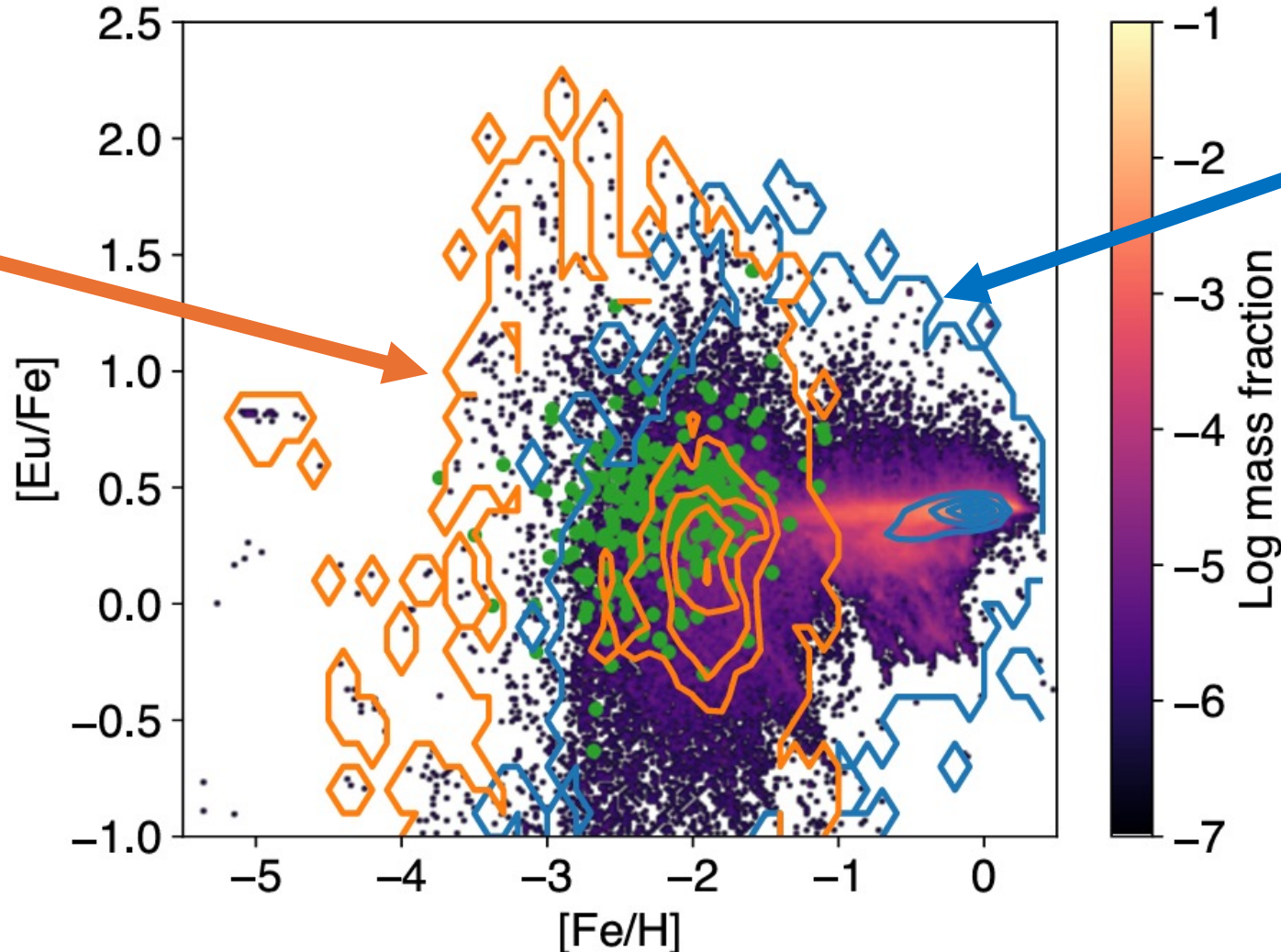




# rプロセス元素分布から探る銀河系形成

Hirai et al. (2025b)

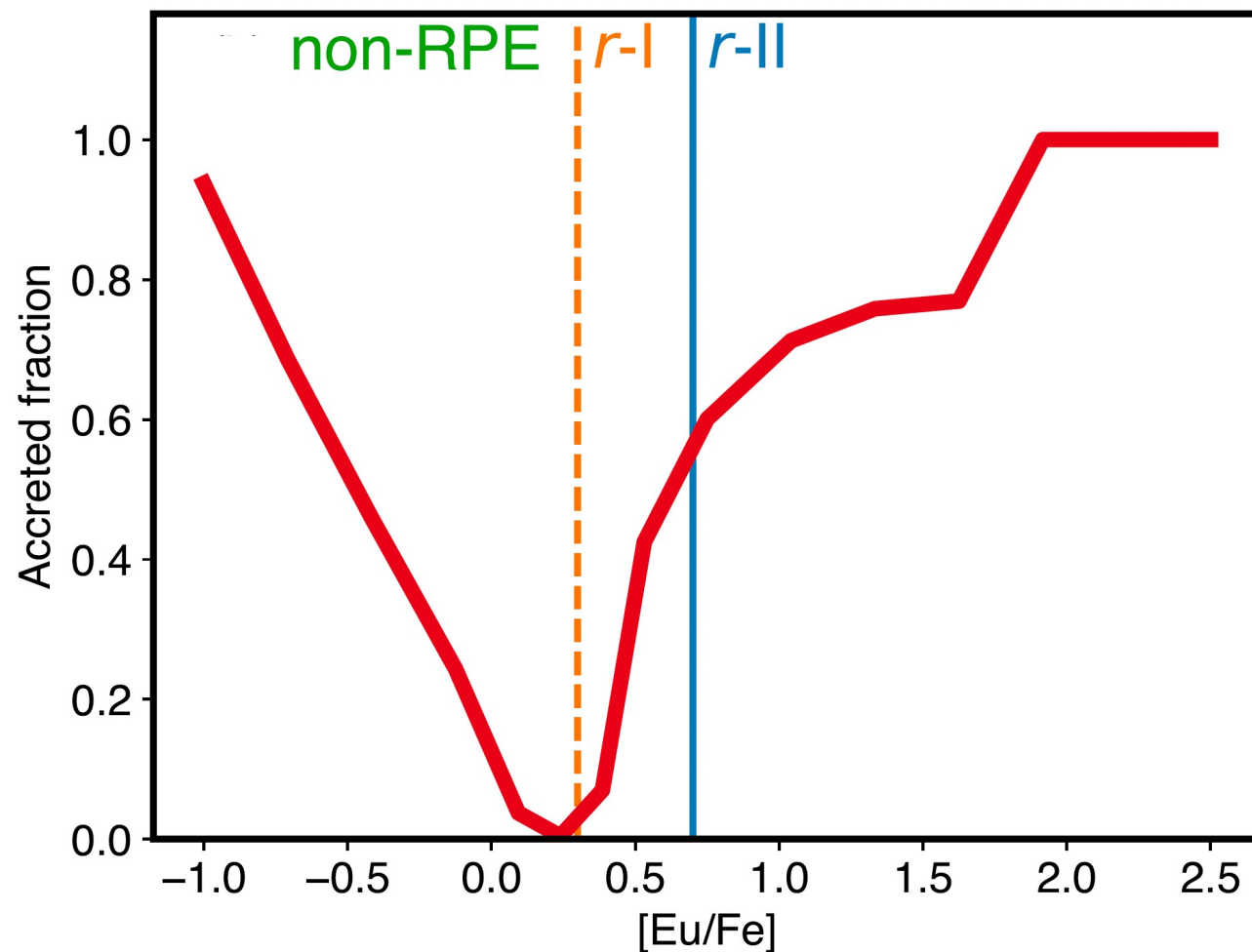
矮小銀河  
由来



銀河系本体  
由来

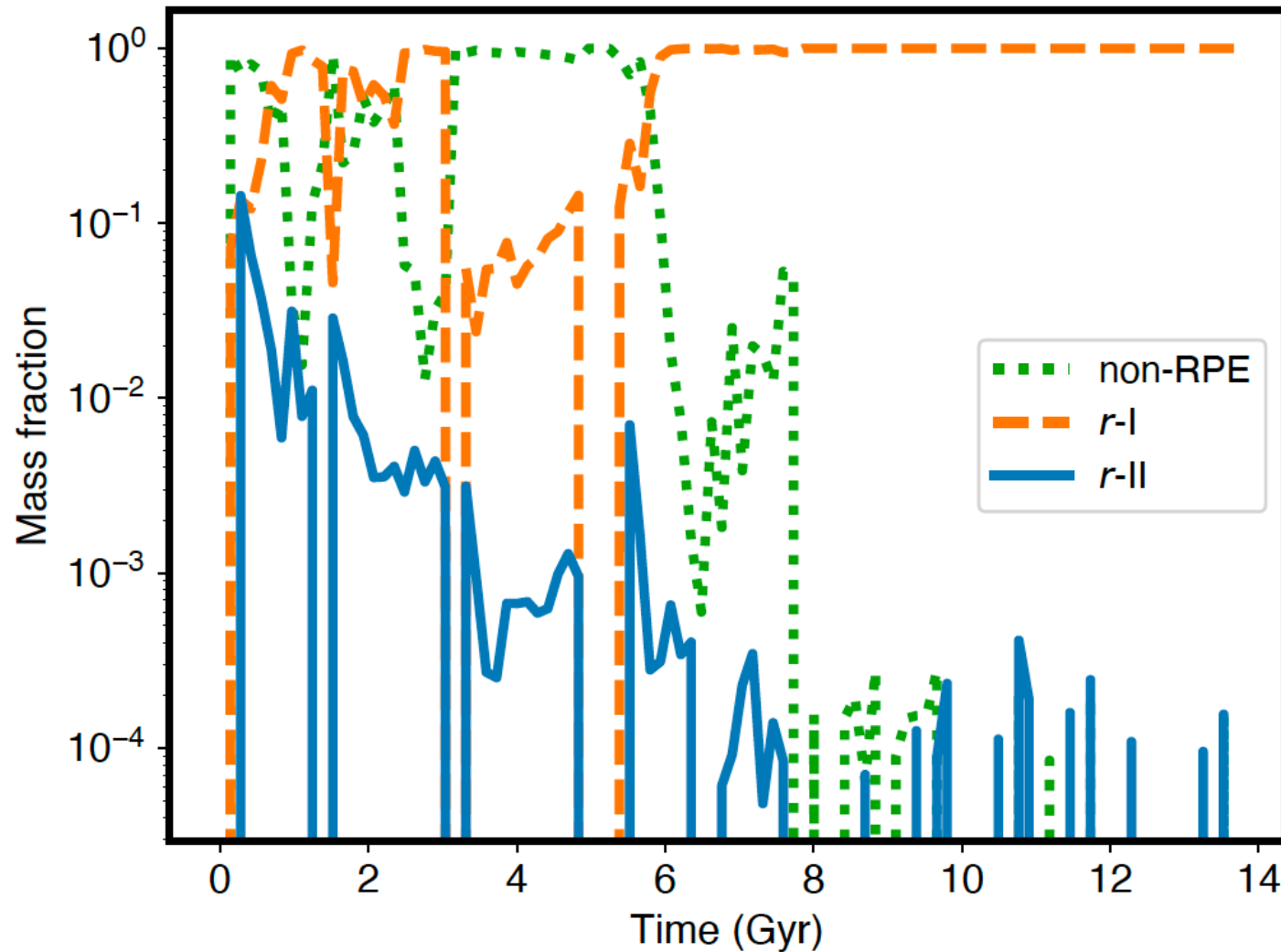


# 金属欠乏星はどこで形成されたのか？



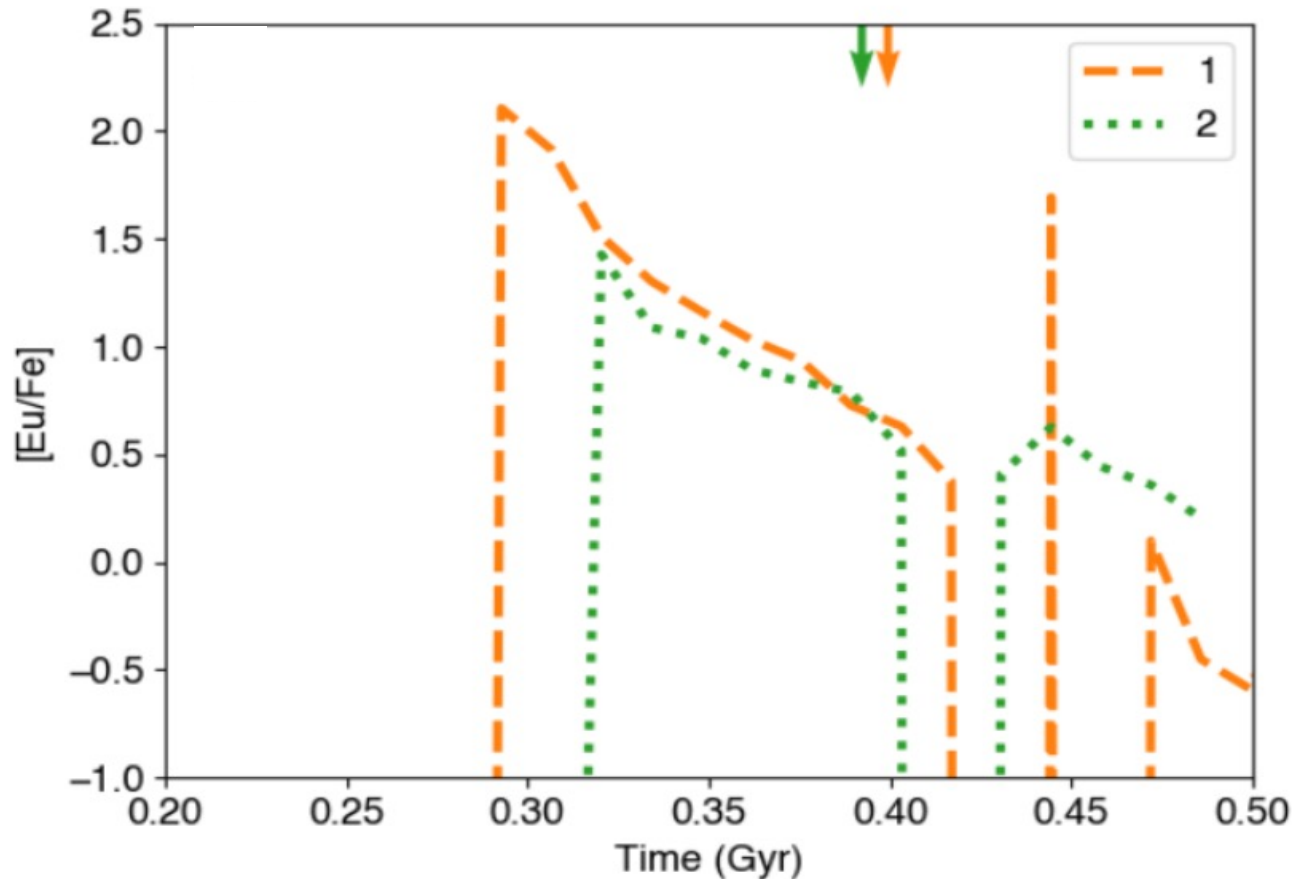
**r-II星 ( $[\text{Eu}/\text{Fe}] > 0.7$ )  
とnon-RPE星  
( $[\text{Eu}/\text{Fe}] \leq 0.3$ )で過去  
に降着した銀河由来  
の星の割合が高い**

# 金属欠乏星はどこで形成されたのか？



ほとんどのr-II星  
とnon-RPE星は  
最初の60億年で  
形成された

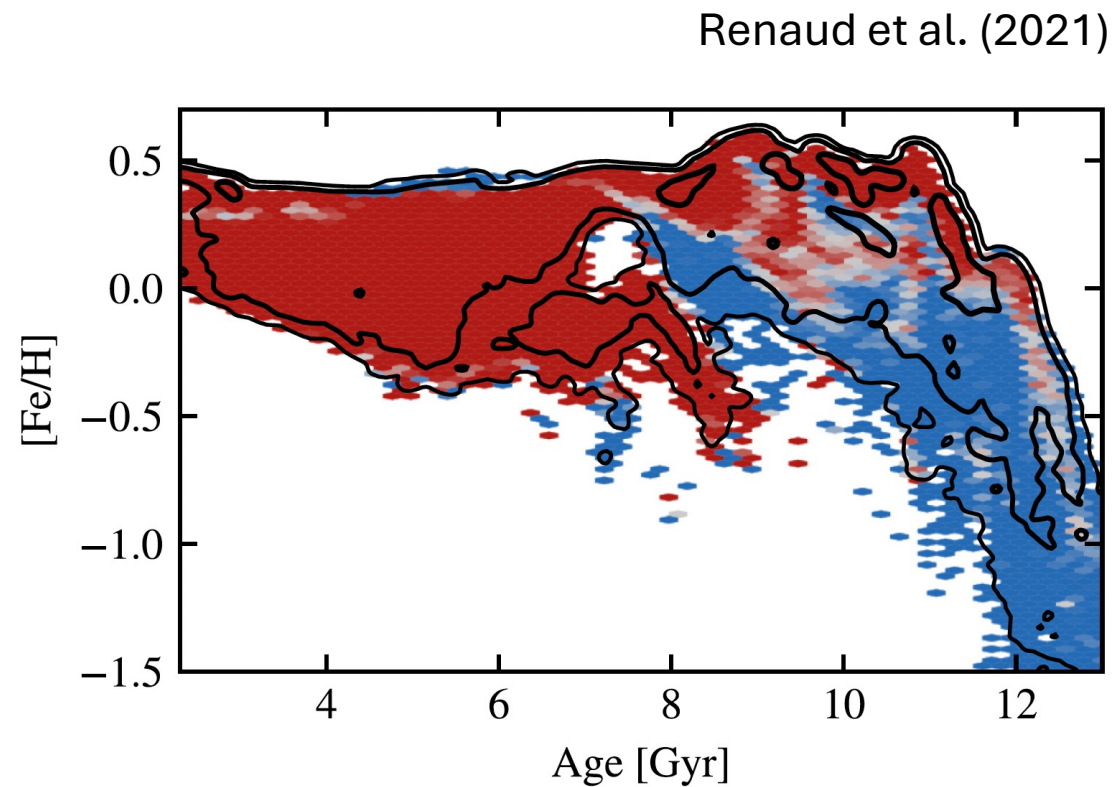
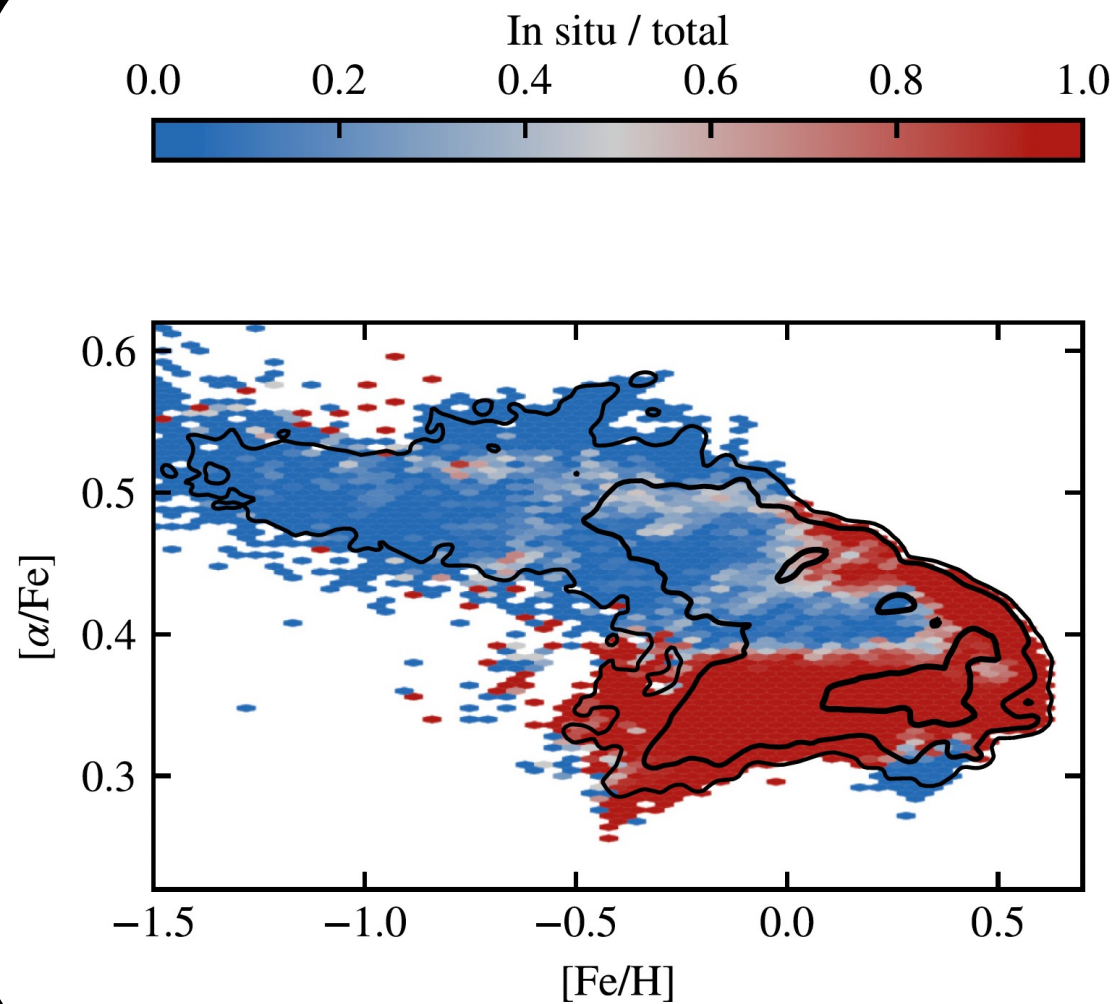
# rプロセス元素に富んだ星はどのように形成されたのか？



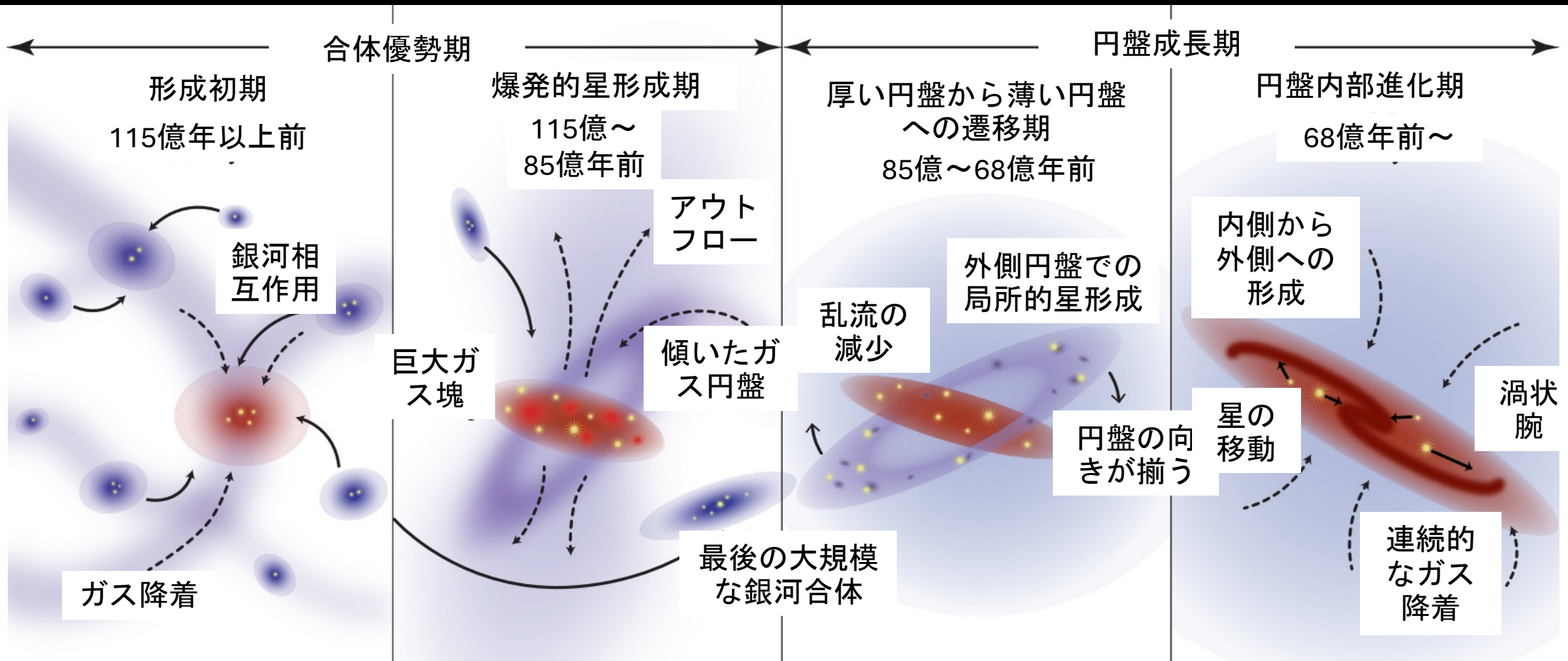
矮小銀河内のrプロセス元素に富んだガスで主に形成された



# 銀河系円盤形成

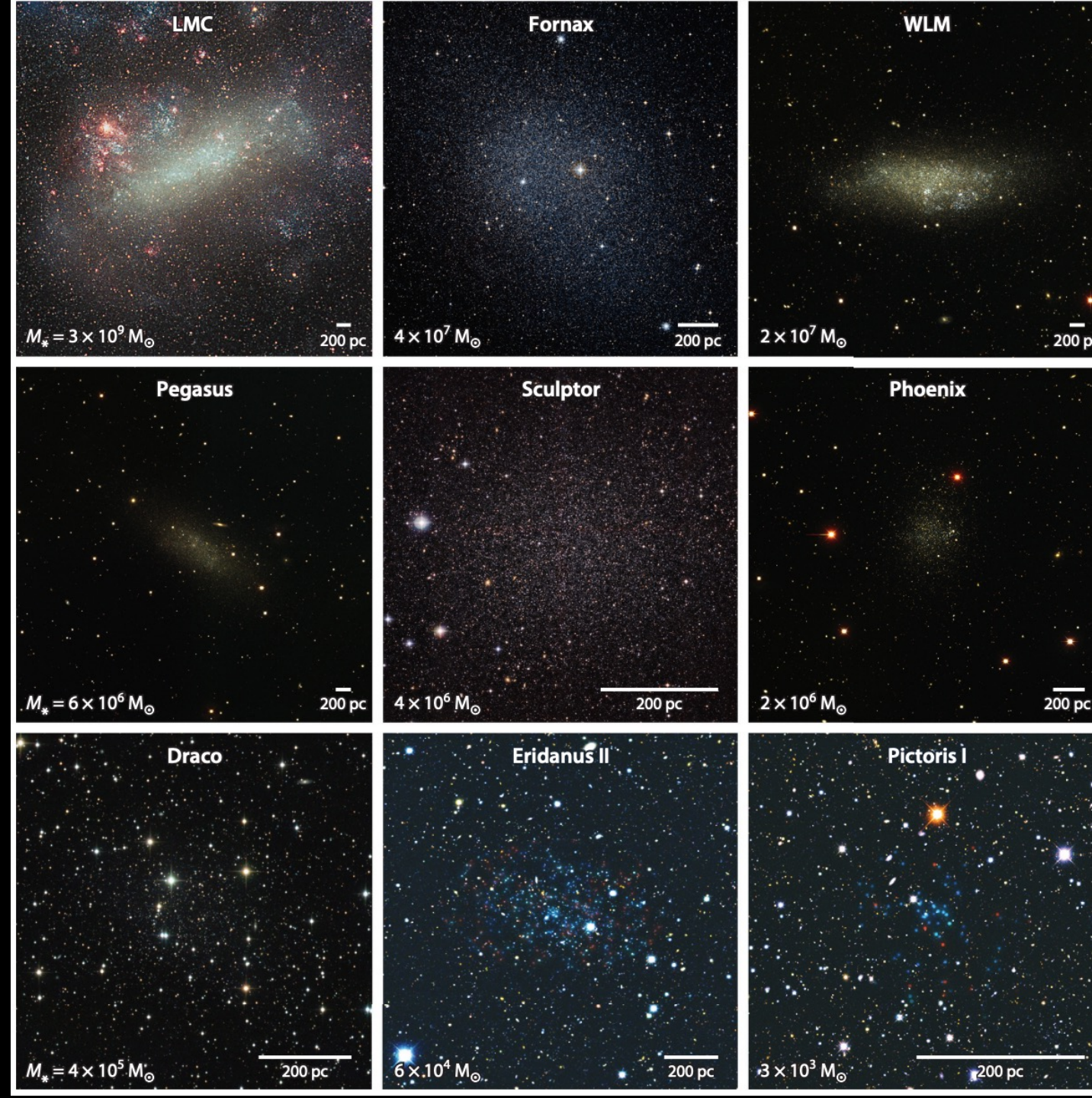


# 銀河系円盤形成のシナリオ





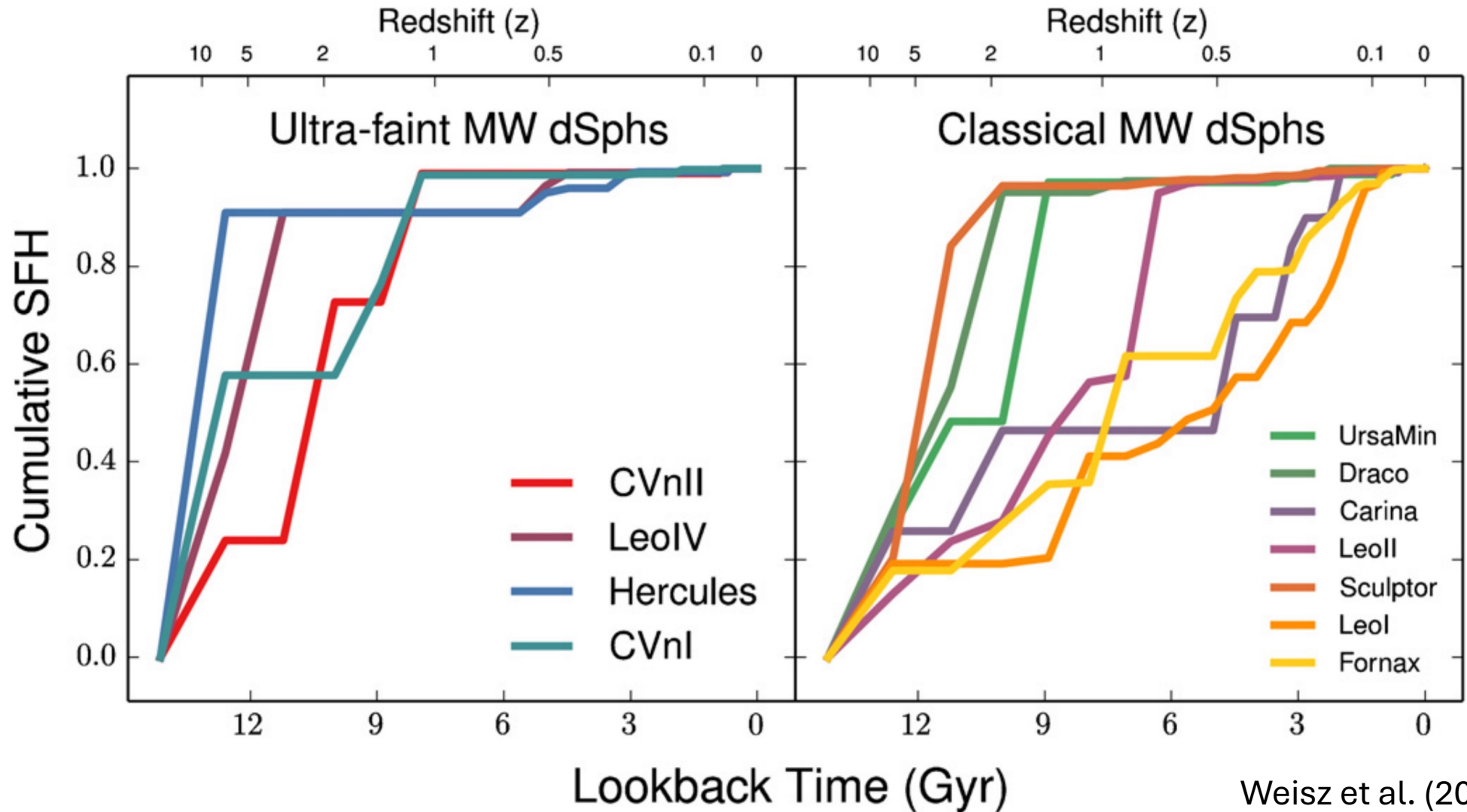
# 局所銀河群 矮小銀河



Bullock & Boylan-Kolchin (2017)

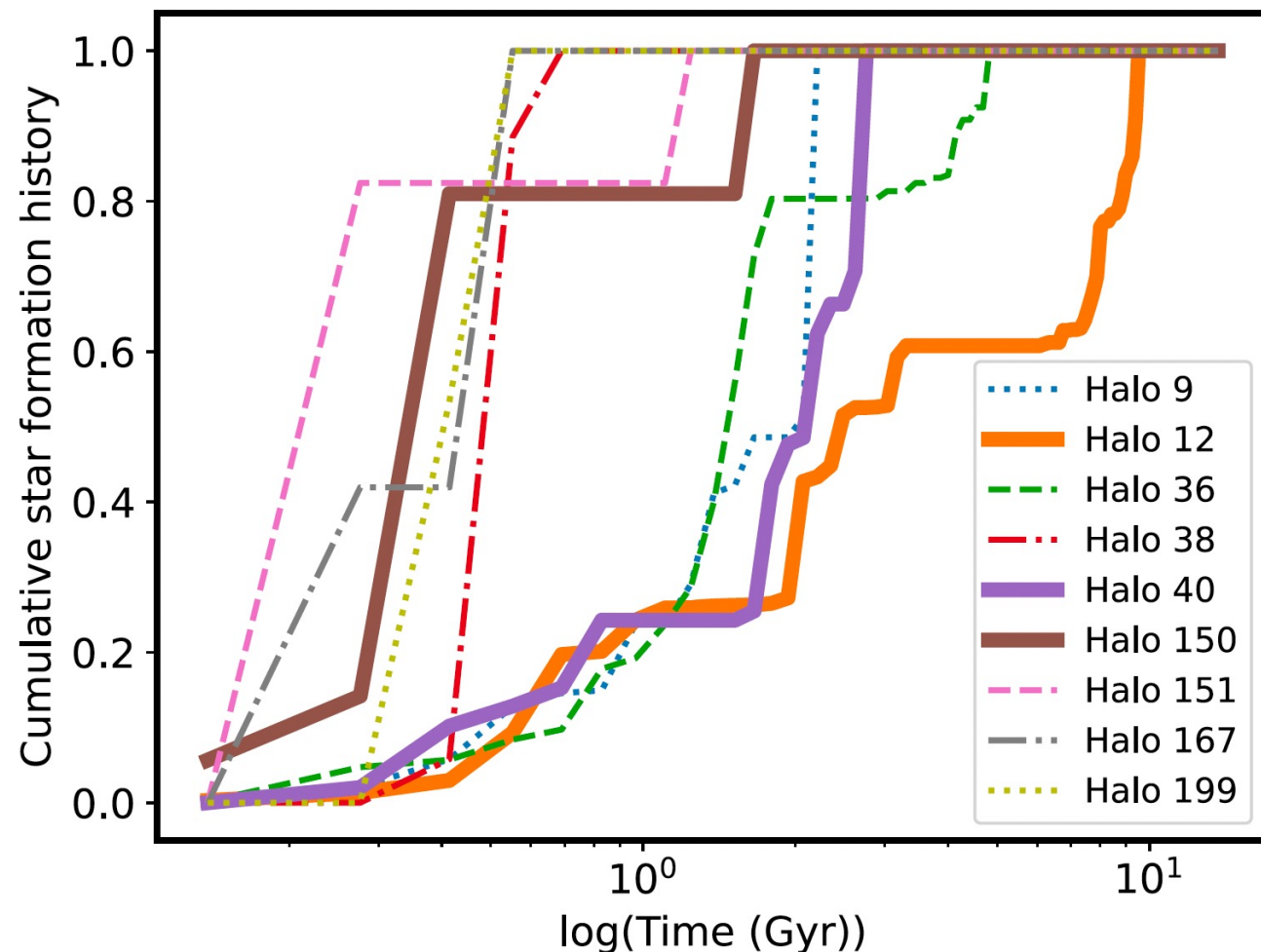


# 銀河系衛星銀河の星形成史



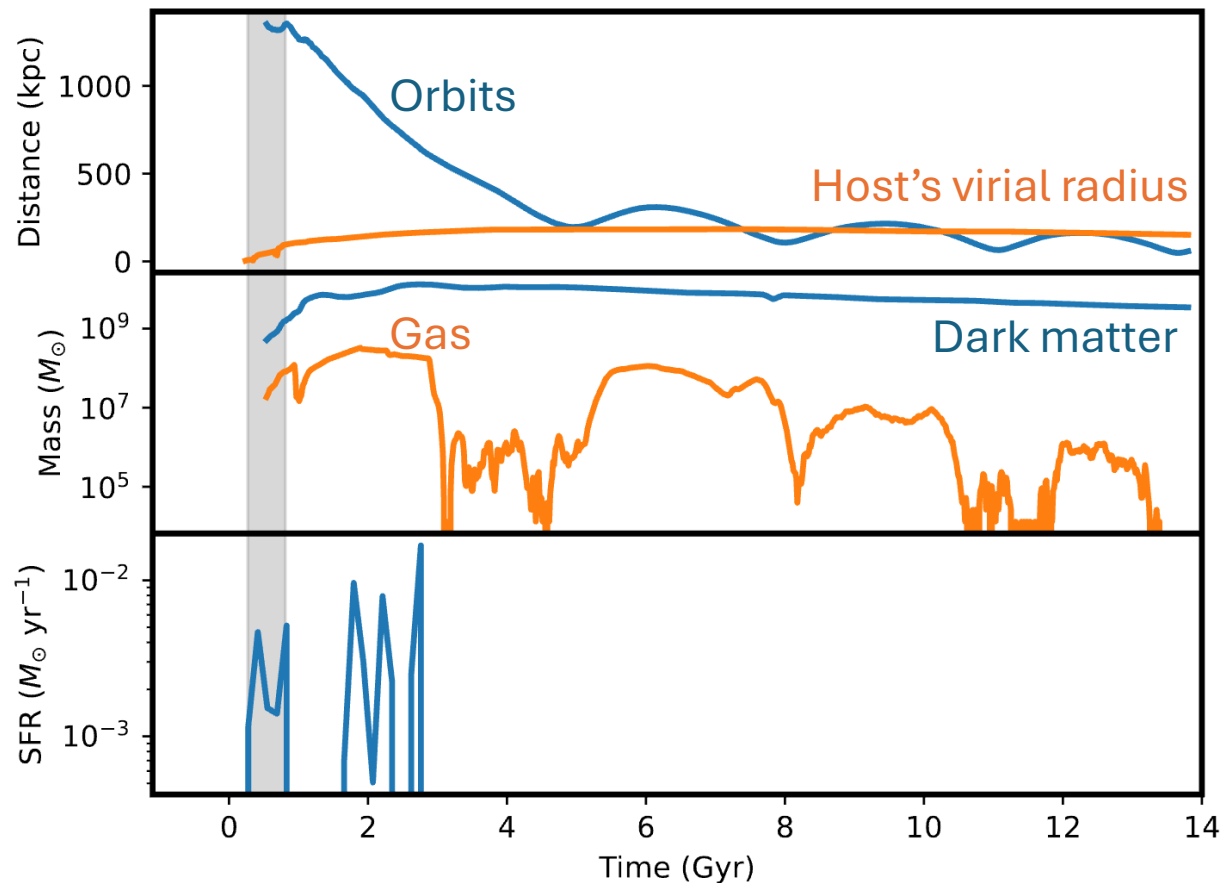
Weisz et al. (2014)

# シミュレーションで得られた衛星銀河の星形成史



より重い銀河  
ほど星形成は  
長期間継続

# 軌道と星形成史の例



$$M_* = 4.0 \times 10^6 M_{\odot}$$

超新星フィードバックにより、周期的な星形成

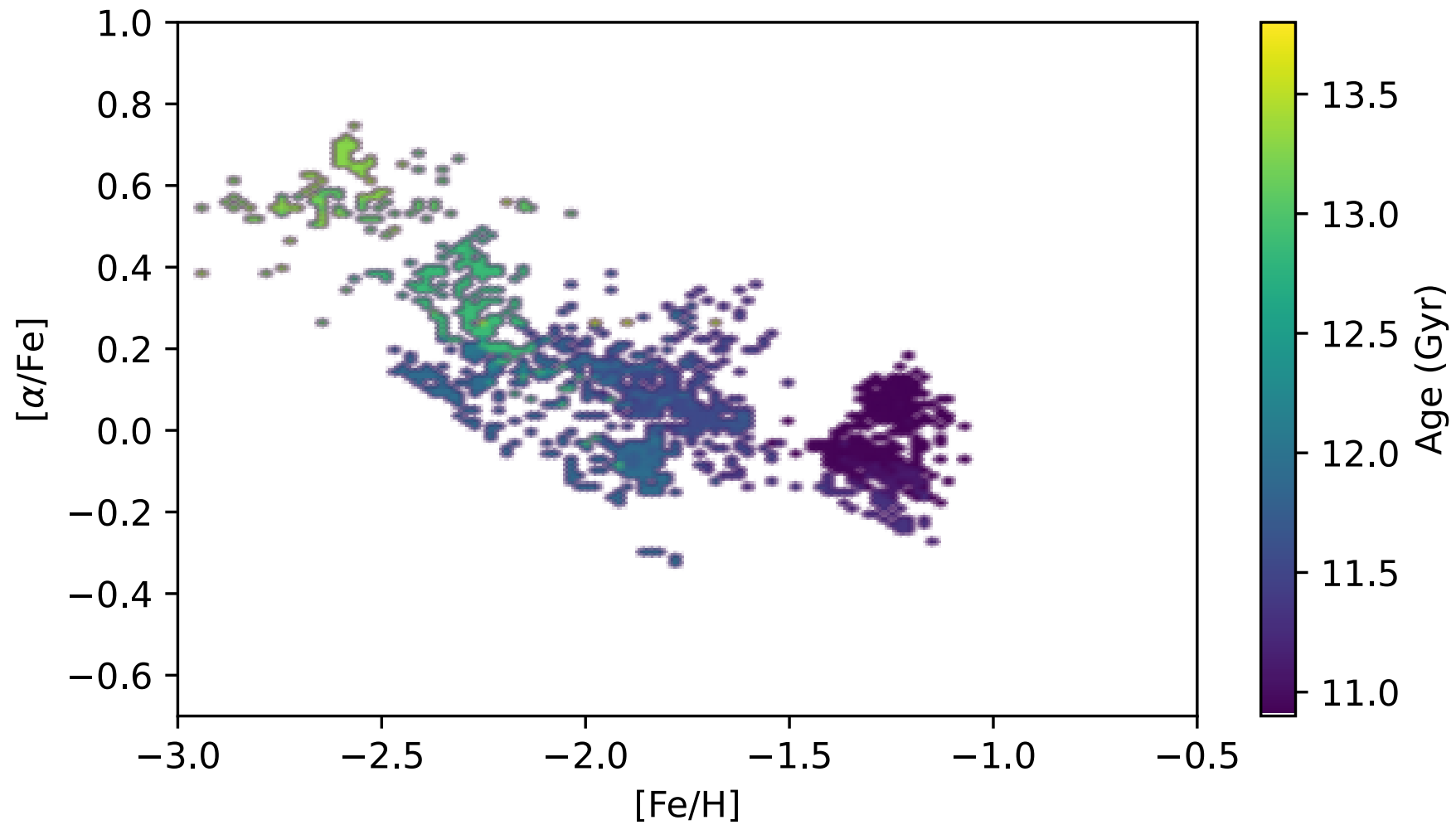
中心銀河のビリアル半径内に入ると星形成は終了

Hirai et al. (2024)



# $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$

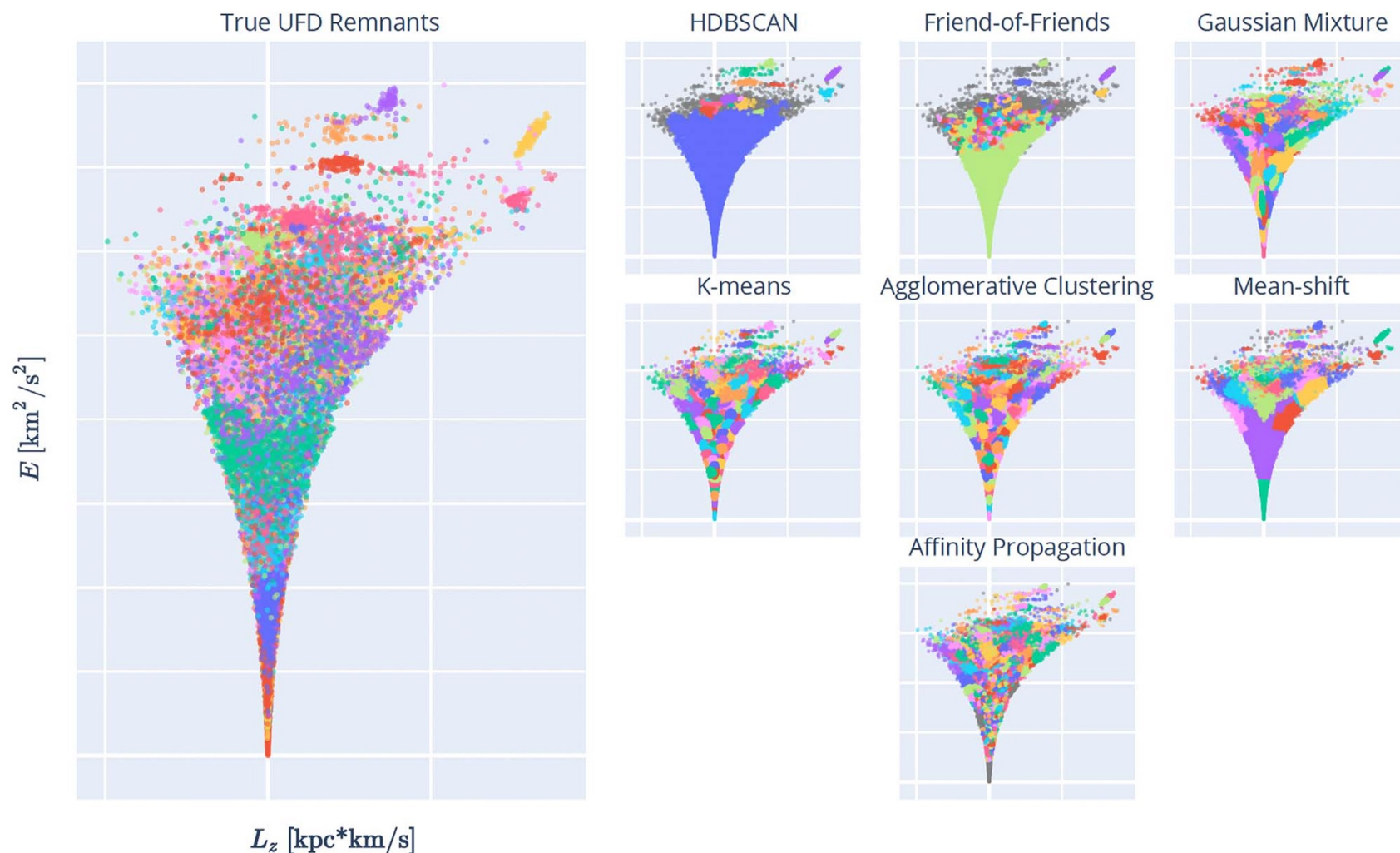
Hirai et al. (2024)



# 課題と展望

# 過去に合体した衛星銀河の痕跡

動力学的性質のみでは正しく合体の痕跡を同定できない？

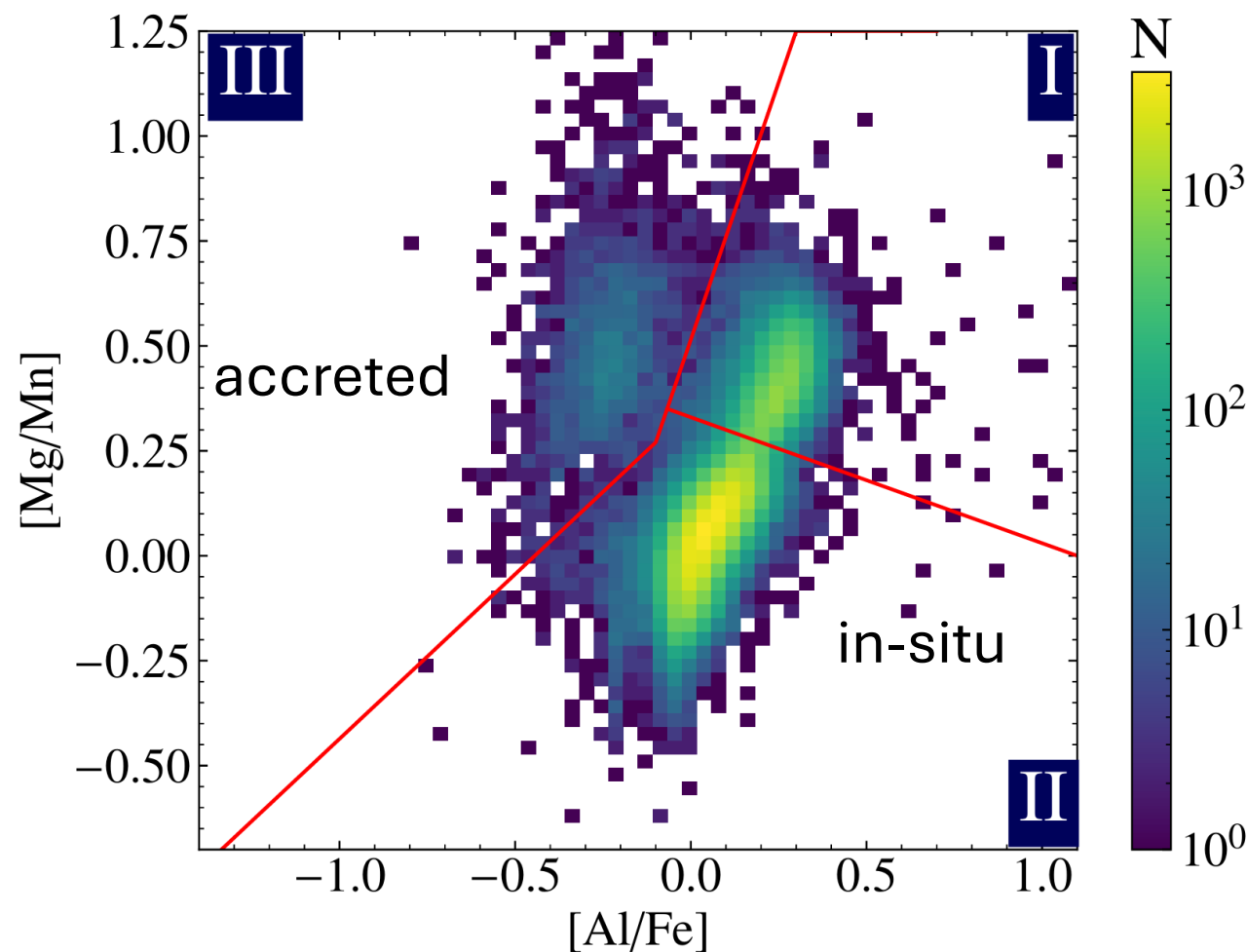


Brauer et al.  
(2022)



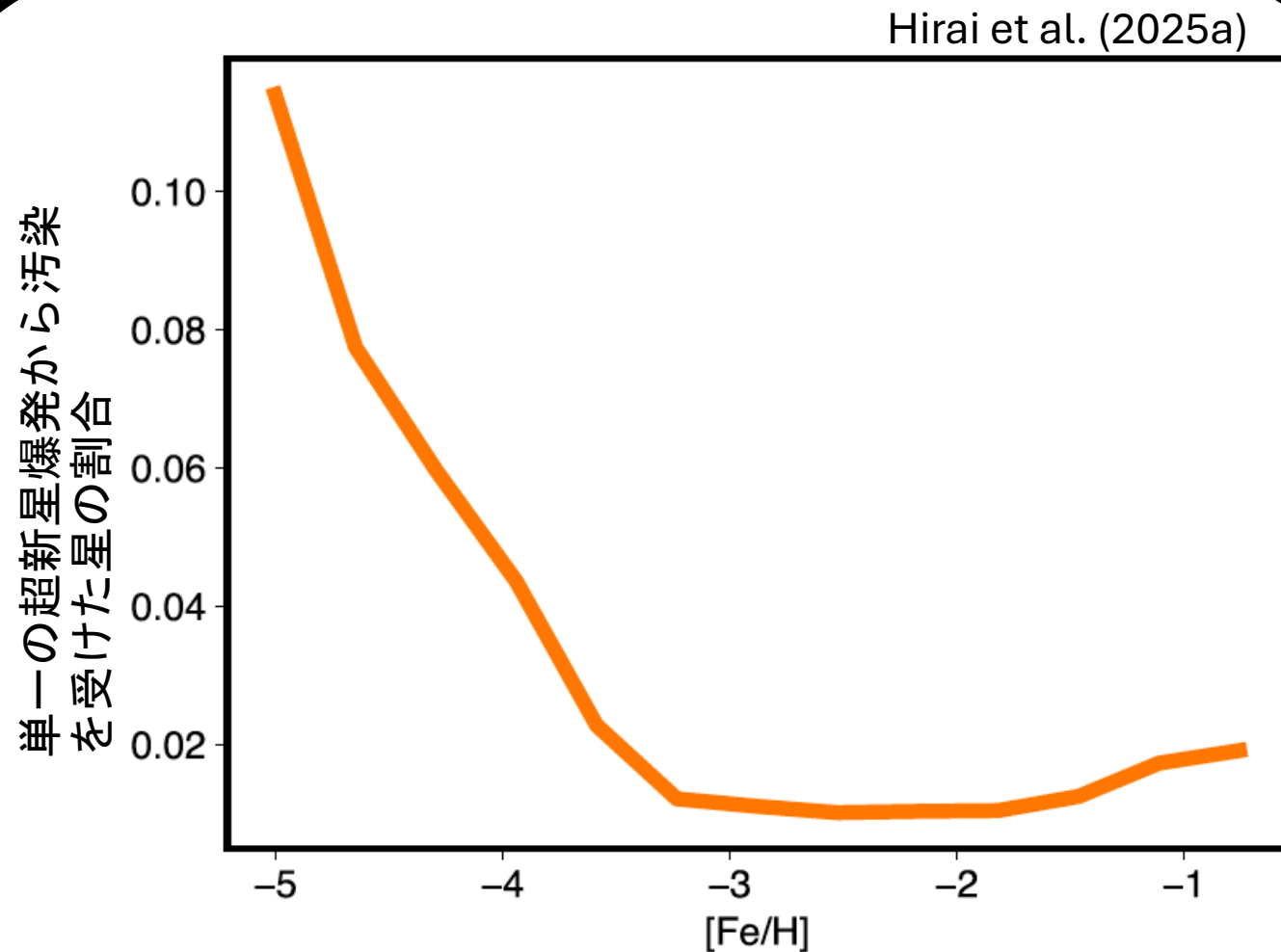
# 過去に合体した衛星銀河の痕跡

衛星銀河由来  
の星を分離で  
きる化学組成  
は？



# 初代星元素合成の痕跡はどこにあるのか？

単一の超新星爆発から汚染を受けた星は  
超金属欠乏星の5%  
程度



# すばる望遠鏡超広視野多天体分光器 (PFS)

- 今年から運用開始
- 2400本のファイバーで分光観測を行い、星の運動や化学組成を測定
- 2032年以降、すばる3としてアップグレードする計画も進行中

## 分光器

同じデザインの分光器を望遠鏡ドーム4階に設置。ここで天体からの光を波長ごとに分け「スペクトル」を取得します。



※図は1台の分光器

## 主焦点装置

望遠鏡の主焦点に広視野補正光学系とともに設置され、約2400本のファイバーを配置するシステムを備えています。



## メトロロジカメラ

カセグレン焦点に設置され、約2400本のファイバーの位置を一挙に測定します。

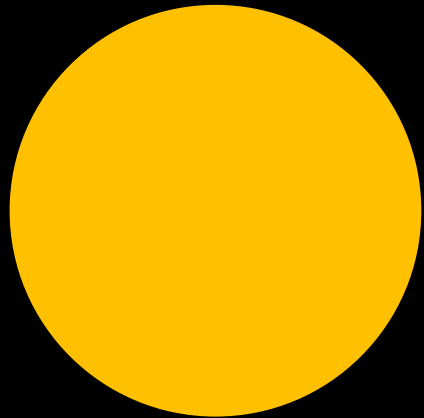


Prime Focus Spectrograph (PFS)



# すばるPFS擬似観測

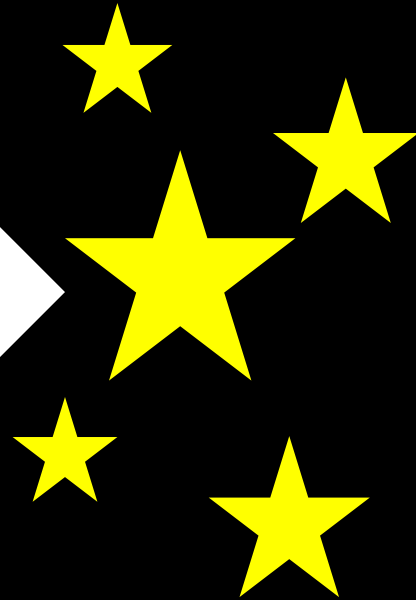
Star particle



IMF



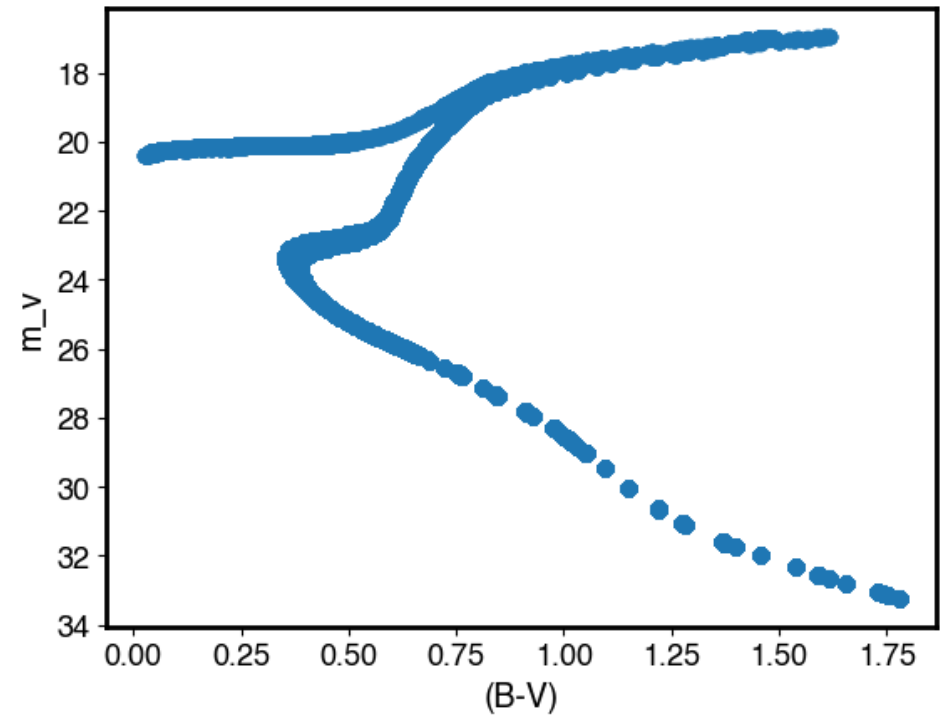
YH+21



Stellar  
evolution  
model



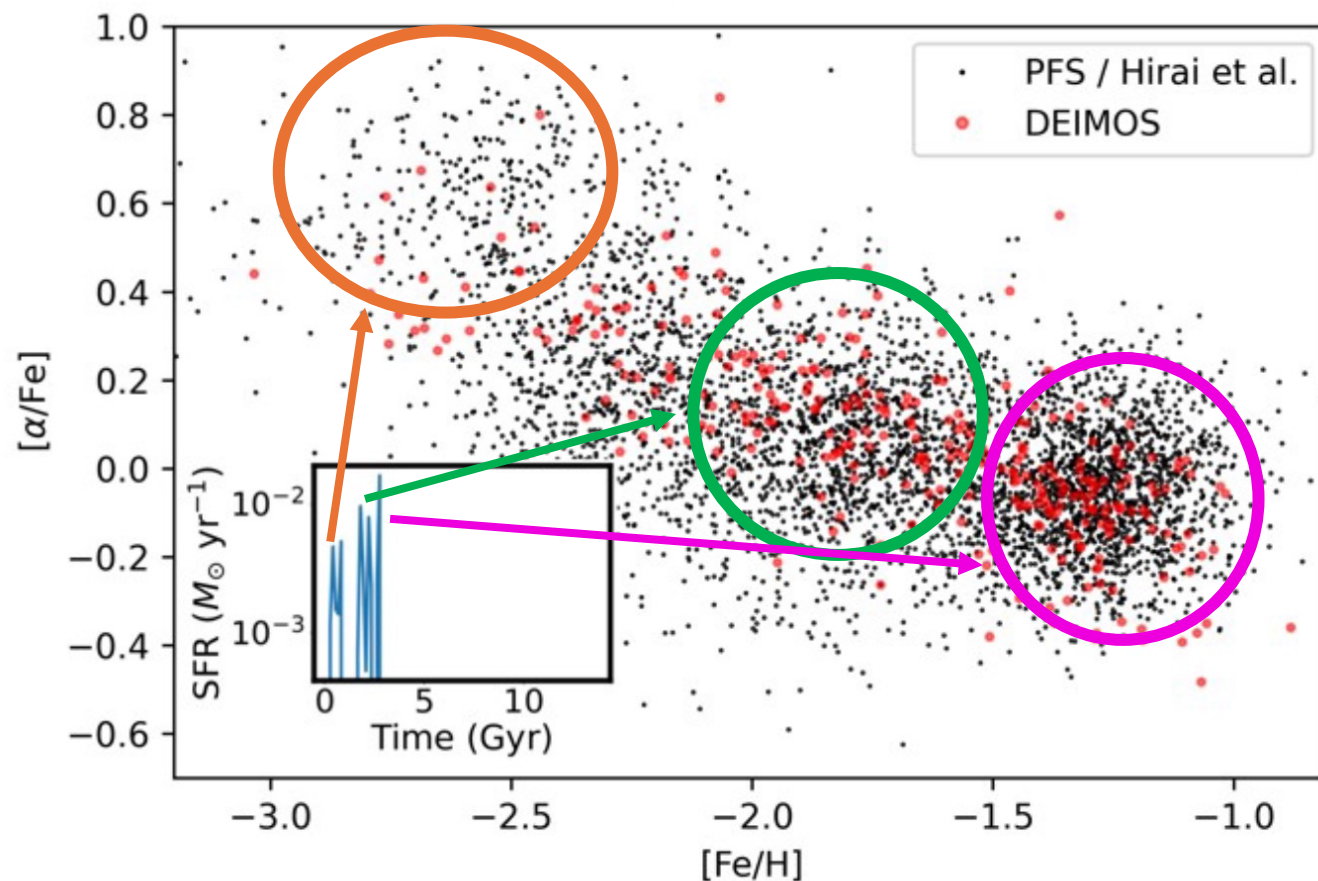
PARSEC  
(Bressan+12)



# すばるPFS擬似観測

Hirai et al. (2024)

- すばるPFSの擬似観測を銀河形成シミュレーションを用いて実施
- 宇宙初期に衛星銀河で起きた周期的星形成の痕跡が星の化学組成から確認できる可能性



# まとめ

- 銀河考古学は、星の化石情報（**動力学**、**化学組成**）から銀河形成史を読み解く。
- 近年、位置天文衛星**Gaia**の登場により、過去に銀河系に合体した銀河の痕跡が多数発見された。
- **銀河合体史**を理解するためには、星の化学動力学の性質を正しく読み解く必要がある。