

鉄より原子番号が大きい元素のほとんどは中性子捕獲過程によって生成される。s過程は漸近巨星分枝星 (AGB星) で起きることが分かっている。また、r過程は中性子星合体で起きていると考えられている。Keck望遠鏡のエシエル分光器HIRESで撮られたアーカイブデータを使用し、散開星団で中性子捕獲過程元素の組成を調べることを目的に、プレアデス星団、ヒアデス星団、プレセペ星団で9種類の中性子捕獲過程元素 (Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu)を調べた。その結果、星団内では組成がほぼ同じであることが分かった。また、星団間の[X/Fe]の比較ではプレアデス星団の組成がヒアデス星団、プレセペ星団の組成より~0.02-0.20 dex 大きいことが分かった。一方で星団間の[X/H]の比較ではY, Zr, La, Ce, Sm, Euでプレアデス星団の組成が~0.03-0.19 dex小さいことが分かった。

## 1. イントロダクション

### 1.1 中性子捕獲過程元素

鉄より原子番号が大きい元素のほとんどは中性子捕獲過程によって生成される。中性子捕獲過程は中性子の捕獲がβ崩壊より遅いs過程と、早いr過程に分類される。中性子捕獲過程元素のほとんどはs過程とr過程の両方で生成される。s過程とr過程の寄与の割合は元素によって異なる。

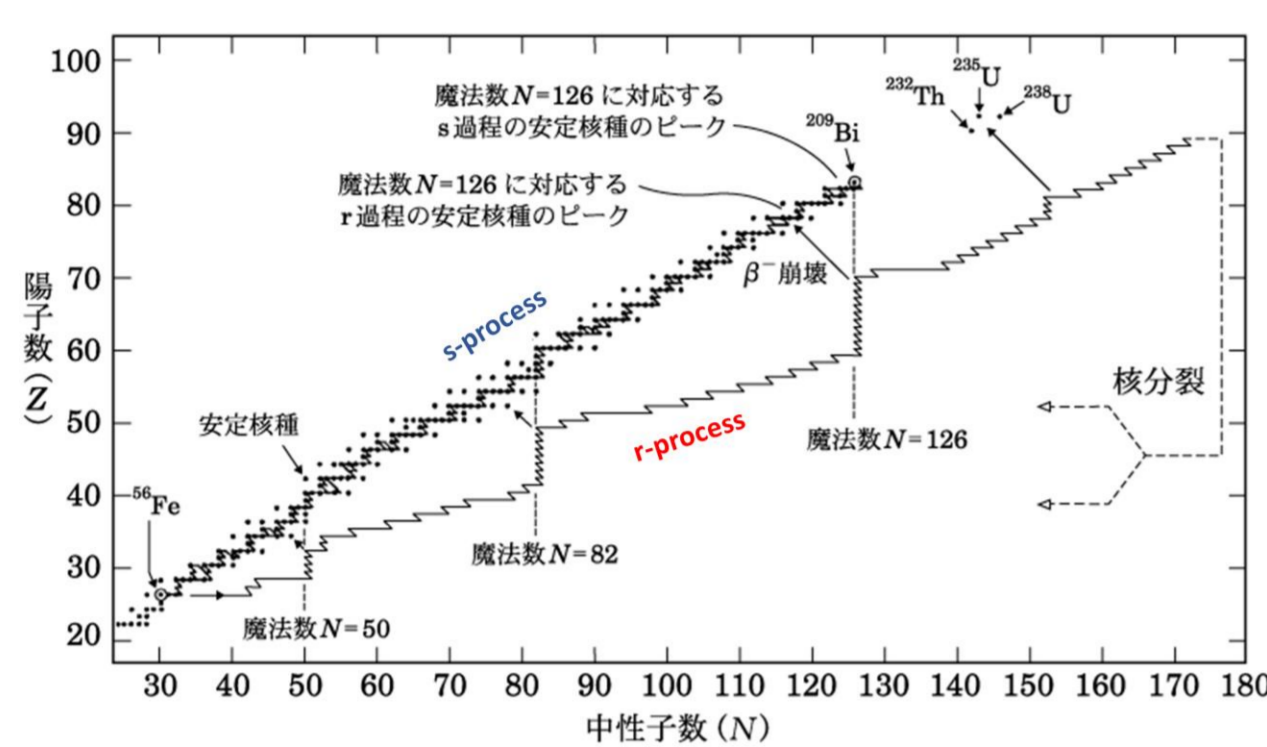


図1 核図表

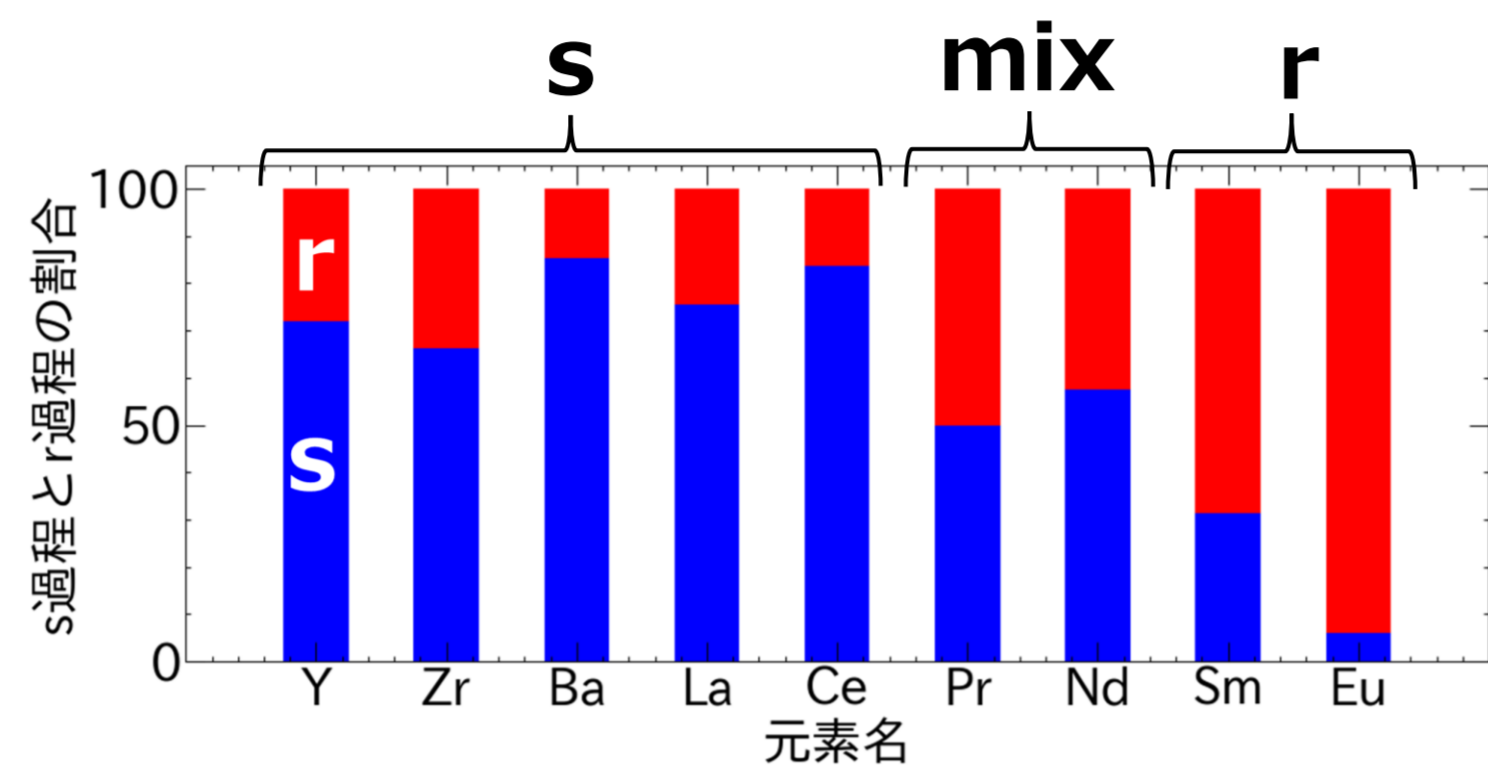


図2 s過程とr過程の割合 (Spina et al. 2018)

Tautvaišienė et al. (2021)の分類をもとに、本研究では元素を3つに分類した。

s過程元素: Y, Zr, Ba, La, Ce

r過程元素: Sm, Eu

s過程とr過程が混ざった(mix)元素: Pr, Nd

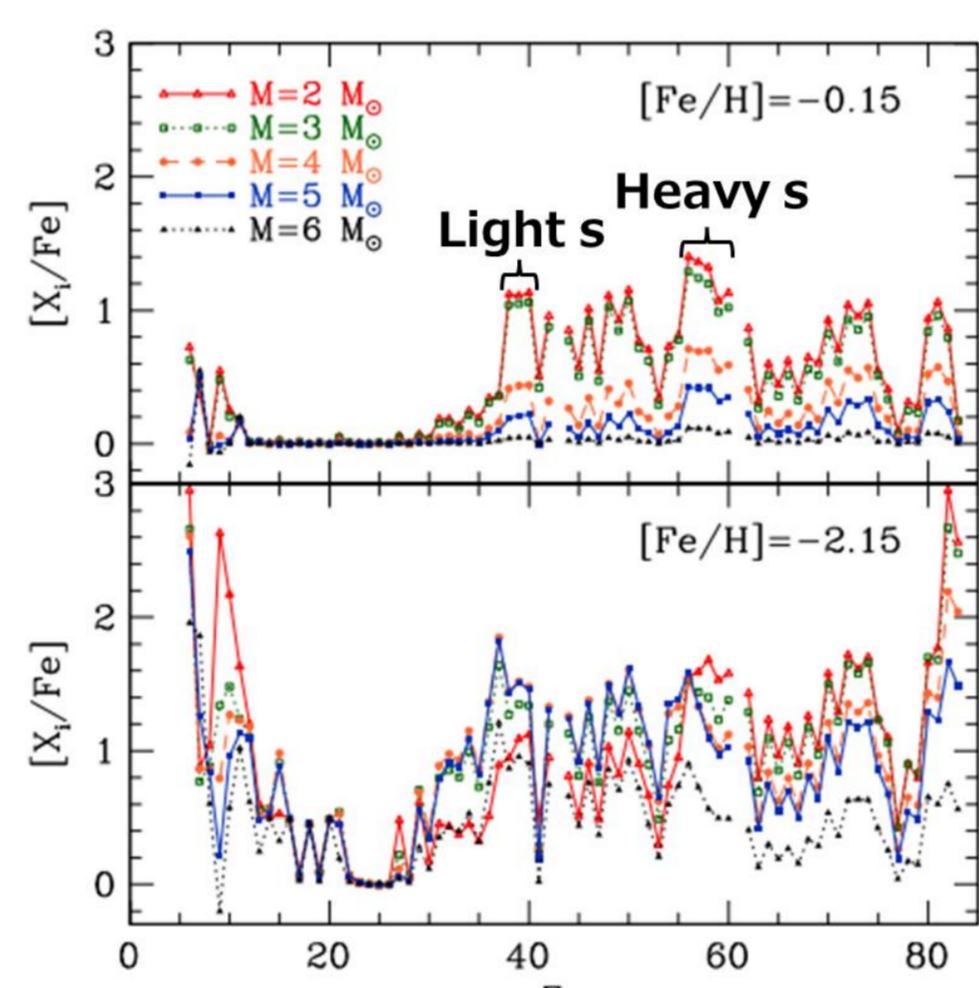
### 1.2 中性子捕獲過程が起きる場所

#### AGB星とs過程

Cristallo et al. (2009, 2015)はAGB星の質量・金属量と生成されるs過程元素の量の関係性を調べた。

低質量のAGB星や低金属量のAGB星ほどs過程元素を多く生成することが分かった。

図3 AGB星でのs過程元素の生成量を計算したモデルの結果 (Cristallo et al. 2015)



D'Orazi et al. (2009)やMaiorca et al. (2011)、Carbajo-Hijarrubia et al. (2024)は散開星団で中性子捕獲過程元素を調べ、若い星団で組成([X/Fe])が大きいことを発見した。また、若い星団で組成([X/Fe])が大きくなる理由が低質量のAGB星によるs過程元素の生成と考えている。

#### 中性子星合体とr過程

Fujibarashi et al. (2023)は合体する中性子星の質量比と生成されるr過程元素の量の関係性を調べた。

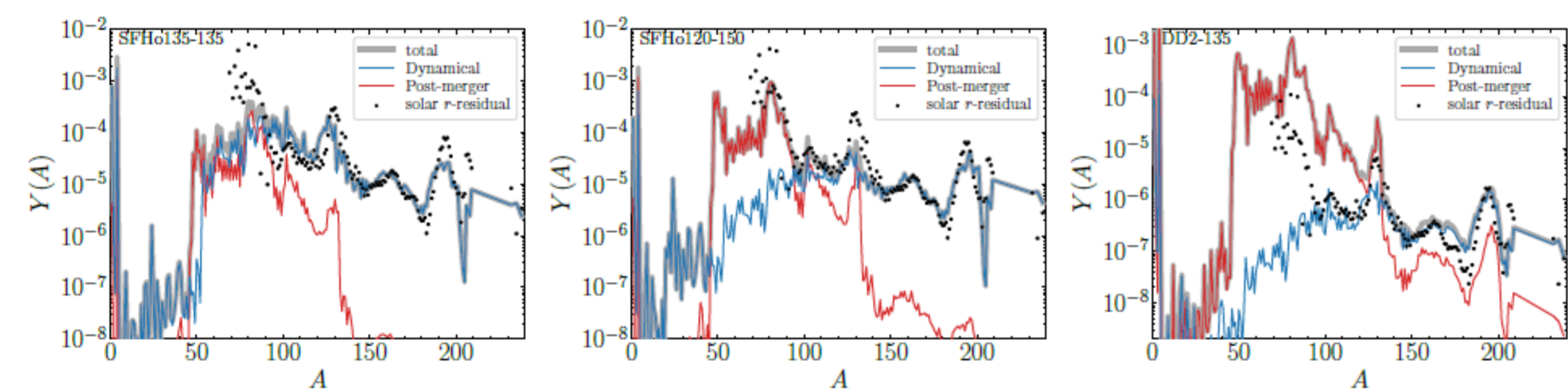


図4 中性子星合体での元素の生成量を計算したモデル結果 (Fujibarashi et al. 2023)

合体する中性子星の質量の差が大きいほど原子番号の大きい元素が生成されやすいことが分かった。

一方で、r過程を起こすイベントとして中性子星合体以外が必要と考える論文もあるなど、r過程の起源については現在も議論が行われている。

(ex. Chen et al. 2024)

Jacobson & Freil (2013)やOverbeek et al. (2016)は、若い星団でr過程元素の組成([X/Fe])が小さいことを発見した。

### 1.3 目的と対象

#### 目的

散開星団で中性子捕獲過程元素の組成を調べる

#### 対象

表1 対象の情報 (Cantat-Gaudin et al. 2020)

プレアデス星団とヒアデス星団は13天体、プレセペ星団は10天体調べた

	プレアデス	ヒアデス	プレセペ
logAge	7.89	8.9	8.83
太陽からの距離 (pc)	128	47	183
赤緯 (deg)	56.601	67.477	130.054
赤経 (deg)	24.114	16.948	19.621

## 2. データと解析

Keck望遠鏡のエシエル分光器HIRESで撮られたアーカイブデータを使用した。

表2 使用データの情報

波長分解能	47,700 - 71,700
波長範囲	3,360 - 9380 Å
S/N	90 - 236

#### 元素組成の導出

SPTOOL上で合成スペクトルを観測スペクトルにフィッティングすることで組成を求めた。

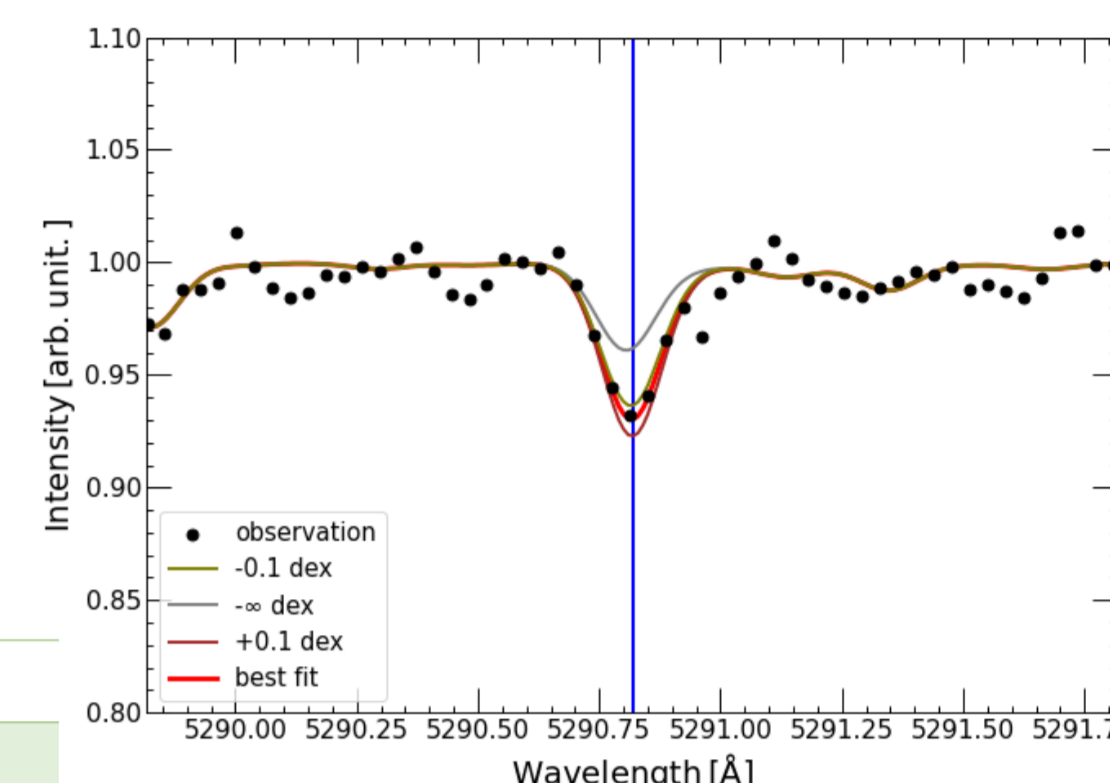


図5 合成スペクトルを観測スペクトルにフィッティングしている様子(プレアデス星団に属する恒星のLaの吸収線)

#### 大気パラメータを求めるまでの手順

1. MAKEEを用いた一次処理
2. 連続光の規格化と波長校正
3. 大気パラメータの導出

表3 各星団の大気パラメータ

	プレアデス	ヒアデス	プレセペ
$T_{\text{eff}}$ (K)	4600-6900	5400-6300	5500-6100
log g (dex)	4.4-4.7	4.4-4.9	4.3-4.6
$v_t$ (km/s)	0.7-1.9	1.0-1.3	1.0-1.3
[Fe/H](dex)	-0.1-0.1	0.2-0.3	0.2-0.3

## 3. 結果と議論

#### 結果

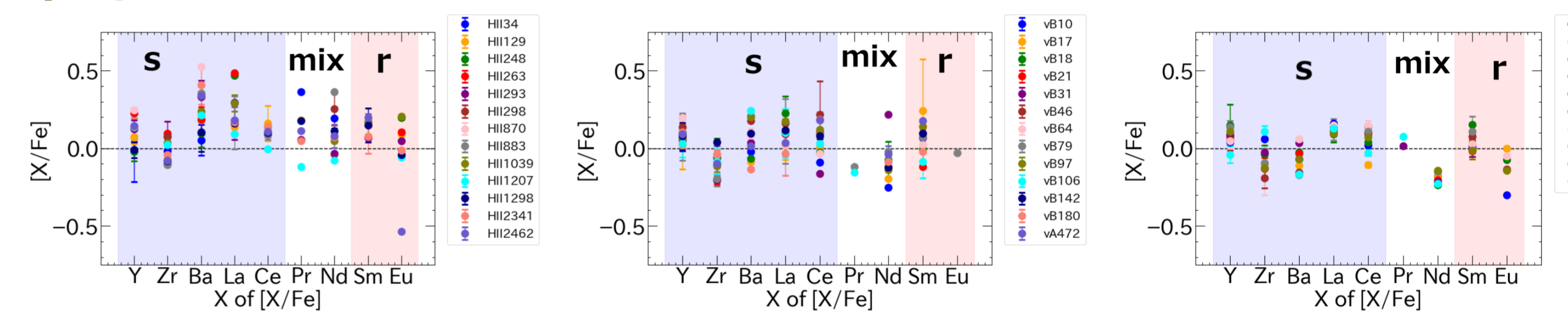


図6 星団内での組成の比較

(左)プレアデス星団 (中)ヒアデス星団 (右)プレセペ星団

星団内の恒星の組成を比較すると、ほぼ同じ組成を示す。

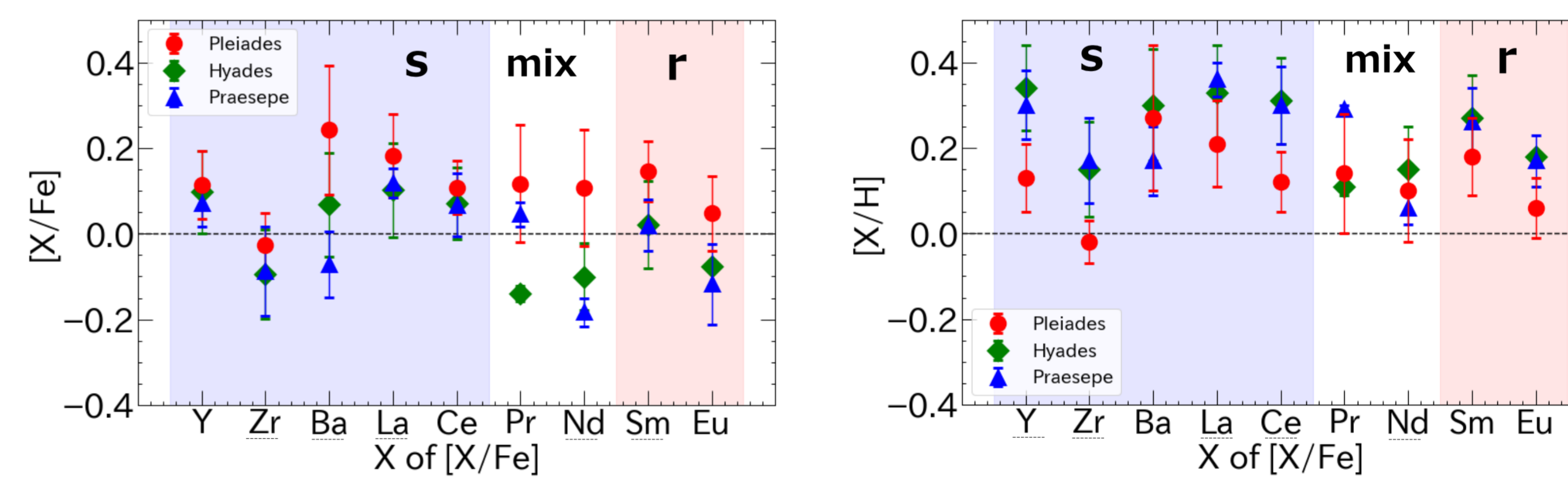


図7 星団間の組成の比較 (左)[X/Fe] (右)[X/H]

1. ヒアデス星団とプレセペ星団は[X/Fe]と[X/H]どちらもほぼ同じ組成を示す
2. [X/Fe]に着目すると、**プレアデス星団**は**ヒアデス星団**と**プレセペ星団**の組成より~0.02-0.20 dex値が大きいことが分かった。
3. [X/H]に着目すると、**プレアデス星団**は**ヒアデス星団**と**プレセペ星団**の組成よりY, Zr, La, Ce, Sm, Euで~0.03-0.19 dexが小さいことが分かった。

※プレアデス星団とヒアデス星団・プレセペ星団の比較でマンホイットニーのU検定を行い、[X/Fe]ではZr(ヒアデス星団のみ)・Ba・La・Nd・Sm・Eu(プレセペ星団のみ)で、[X/H]ではY, Zr, La, Ce, Smで差が偶然ではない(有意差がある)ことを確認した。

#### 考察

1. **プレアデス星団とヒアデス星団・プレセペ星団の組成が異なる点について**  
s過程元素 (Y, Zr, Ba, La, Ce)は低質量のAGB星による放出で組成が大きくなると考えられる。r過程元素(Sm, Eu)は中性子星合体で生成されると考えると、中性子星合体が起きることで組成が大きくなると考えられる。s過程とr過程が混ざっている元素(Pr, Nd)は両方の要因が関係していると考えられる。
2. **[X/H]でプレアデス星団の値がヒアデス星団やプレセペ星団より小さい点について**  
ヒアデス星団とプレセペ星団はプレアデス星団より年老いている。そのため、ヒアデス星団・プレセペ星団で[X/H]の値が大きくなるためには、ヒアデス星団・プレセペ星団が生まれた環境で起きた化学進化とプレアデス星団が生まれた環境の化学進化が異なる必要性が示唆される。

#### 結論

プレアデス星団、ヒアデス星団、プレセペ星団で9種類の中性子捕獲過程元素 (Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) を調べた。星団間の[X/Fe]の比較ではプレアデス星団の組成がヒアデス星団、プレセペ星団の組成より~0.02-0.20 dex 大きいことが分かった。一方で星団間の[X/H]の比較ではY, Zr, La, Ce, Sm, Euでプレアデス星団の組成が~0.03-0.19 dex小さいことが分かった。