

散開星団に属する恒星の 中性子捕獲過程元素の組成

兵庫県立大学 光学赤外線天文学研究室

M2 杉村風曉

元素が生成される方法

- ① **H、He、Li**：今から138億年前に起きた**ビッグバン**で生成された
(H、He、Liの質量比は $H:He:Li = \text{約} 1 : 0.25 : 10^{-8}$)
- ② 原子番号が**鉄まで**の元素：恒星内部で**核融合反応**によって生成される
- ③ 原子番号が**鉄より先**の元素：**中性子捕獲過程**によって生成される

銀河の化学進化

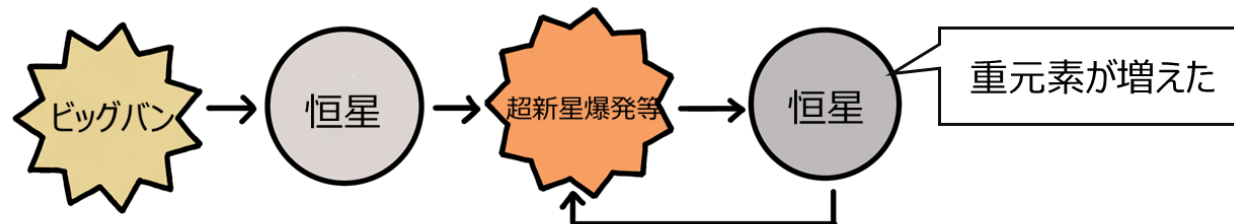


図1 銀河の化学進化の概略図

- ビッグバン直後にできた恒星は**主にHとHeで構成**される
- その後、恒星内部で生成された重元素は超新星爆発等で星間空間に放出され、星間空間に含まれる**重元素が増加**する
- 新しい恒星は重元素の増えた星間空間から誕生する

※ 重元素・・・本研究ではHとHe以外の元素のことを指す

中性子捕獲過程

r過程：原子が中性子を捕獲する時間が β 崩壊よりも**短い**過程のこと

起源は中性子星合体と考えられている
元素の例：Th(トリウム)、Eu(ユーロピウム)

この経路を進む
時間は約10分より短い

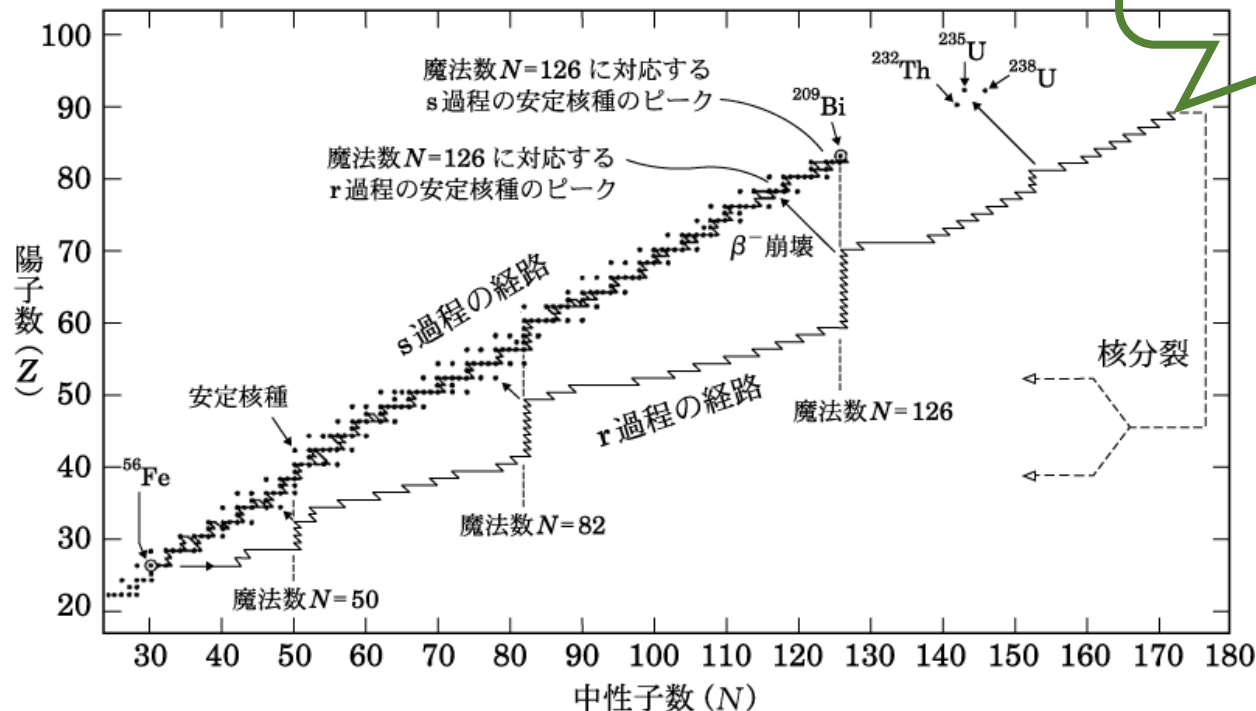


図2 r過程の進み方
(シリーズ現代の天文学第1巻『人類の住む宇宙』)

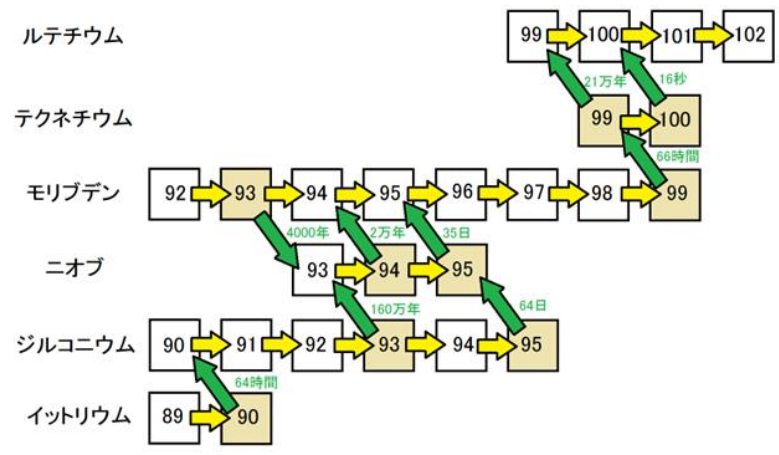
中性子捕獲過程

s過程：原子が中性子を捕獲する時間がβ崩壊よりも**長い**過程のこと

太陽の1-8倍の質量をもつ恒星が進化したAGB星(漸近巨星分枝星)で起きていると考えられている

元素の例：Y(イットリウム)、Ba(バリウム)

図3 s過程の進み方
枠内の数字：質量数
黄色の矢印：中性子を捕獲している過程
緑色の矢印：β崩壊



元素の組成の表し方

$$\log \epsilon(X) = \log \left(\frac{n_X}{n_H} \right) + 12 \quad (1)$$

n_X ：元素Xの数密度

吸収線から求まる

$$[X/H] = \log \left(\frac{n_X}{n_H} \right)_{\text{star}} - \log \left(\frac{n_X}{n_H} \right)_{\odot} \quad (2)$$

化学組成を表すときに使う

中性子捕獲過程元素

s過程とr過程の割合は元素によって異なる

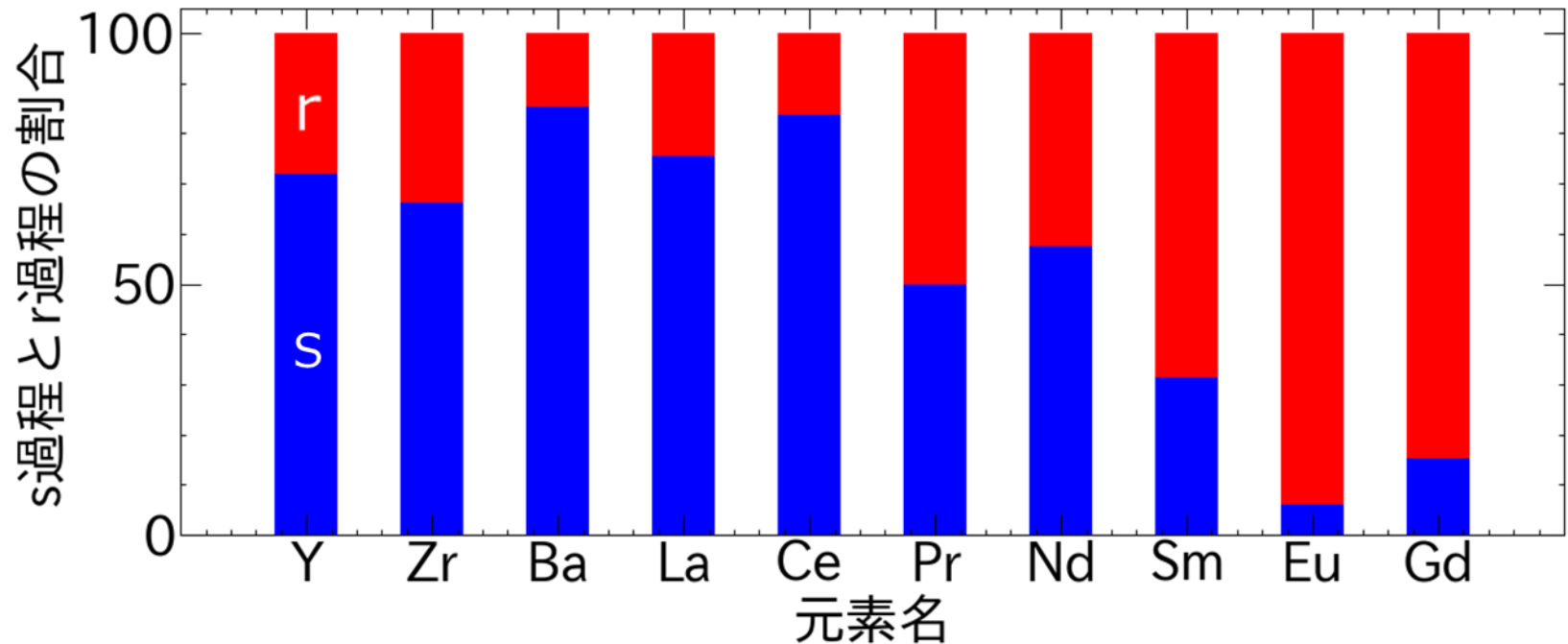


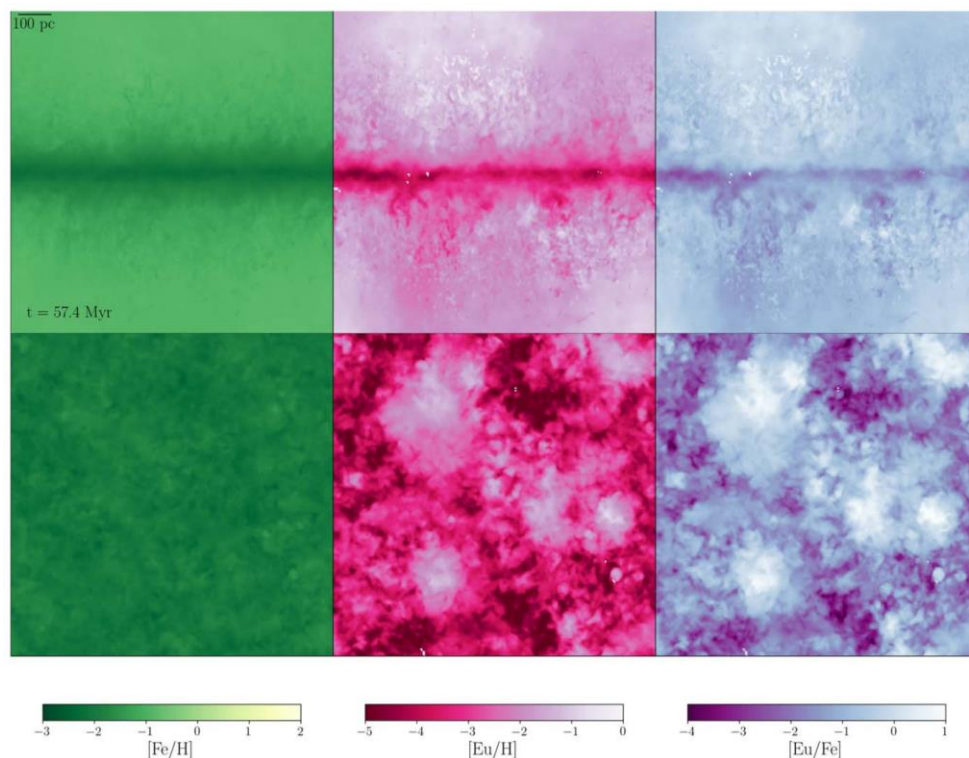
図4 各元素のs過程とr過程の割合 (Spina et al. (2018))

中性子捕獲過程元素を調べることで、恒星の生まれた環境でs過程の寄与が大きい
か、r過程の寄与が大きいかを調べることができる

先行研究：r過程元素の空間分布

Kolborg et al. (2023)は、r過程元素 (Eu)の空間分布を 1000×1000 pcの範囲で125 Myr間数値シミュレーションした

仮定： **Fe**は重力崩壊型超新星爆発(**cc-SNe**)で、**Eu**は中性子星合体(**NSMs**)で合成され、合成された元素は乱流と銀河風で広がる



Feの空間分布は一様であるのに対し、**Eu**の空間分布は100 pcのスケールで一様でない



NSMsがレアなイベント(※)であることが原因で**Euの組成が空間に依存している**ことを示唆している

※ 1000×1000 pcの範囲を125 Myrシミュレーションをして32回発生
※ 100 pc^3 では300 Myrに1回 NSMsが起きる

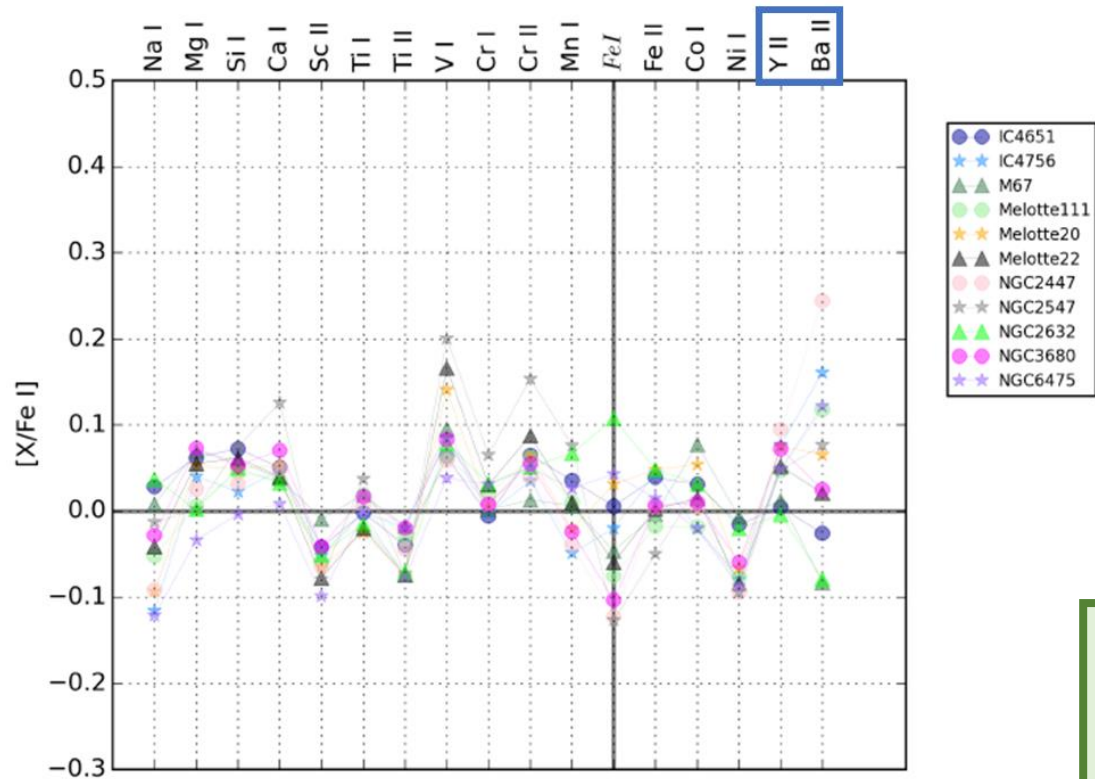
図5 FeとEuの空間分布の数値シミュレーション結果

上図：銀河系を横からみた図 下図：銀河系を上からみた図

左図：[Fe/H] 中央図：[Eu/H] 右図：[Eu/Fe]

先行研究：散開星団の化学組成の比較

Blanco-Cuaresma et al. (2015)は複数の散開星団に対して17種類の元素の組成を調べて比較を行った



- 星団ごとの化学組成に違いはあまり見られない
- 一方で、組成の違いの度合いは元素ごとに異なっている
- **特にBaのばらつきはほかの元素と比べると大きい**



BaやY以外の中性子捕獲過程元素について、組成のばらつきが気になる結果である

図6 11の散開星団の化学組成を比較した図

先行研究の課題

- 距離が100 pc以上離れている星団や年齢が300 Myr離れている星団では中性子捕獲過程元素の組成が異なるかもしれない

このような観点で**1つ1つの散開星団に着目して、中性子捕獲過程元素**を中心に化学組成を調べた研究が少ない

本研究の目的

星団の位置や年齢によって化学組成が異なるかどうかを調べる

プレアデス星団・ヒアデス星団・プレセペ星団に属するGK型主系列星(それぞれ16,12,10天体ずつ)を対象に**10種類**の**中性子捕獲過程元素**(Y、Zr、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd)の組成を調べた

データの取得

望遠鏡：Keck望遠鏡
装置：エシエル分光器HIRES
アーカイブデータ取得場所：
Keck Observatory Archive(KOA)

表1 HIRESの性能

HIRES

波長分解能	約25,000 – 85,000
波長域	3,000 – 10,000 Å

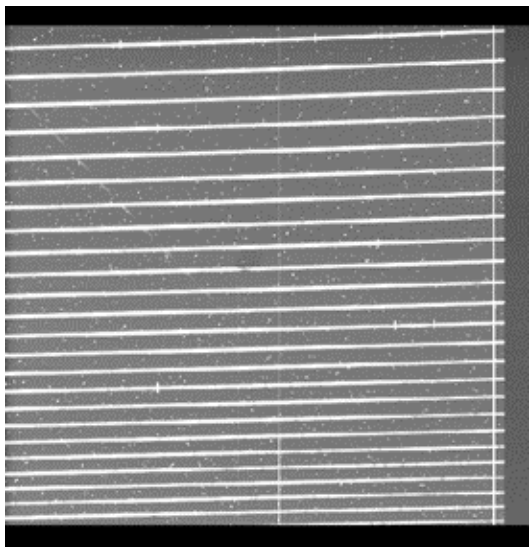


図7 HIRESで撮られた天体の生画像

表2 プレアデス星団の概要(Cantat-Gaudin et al.(2020))

プレアデス星団

位置	赤経 56.601 deg 赤緯 24.114 deg
距離	128 pc (約420 光年)
年齢	約7800万歳

表3 ヒアデス星団の概要(Cantat-Gaudin et al.(2020))

ヒアデス星団

位置	赤経 67.477 deg 赤緯 16.948 deg
距離	47 pc (約150 光年)
年齢	約8億歳

表4 プレセペ星団の概要(Cantat-Gaudin et al.(2020))

プレセペ星団

位置	赤経 130.054 deg 赤緯 19.621 deg
距離	183 pc (約600 光年)
年齢	約7億歳

一次処理

天体の生画像は**一次処理**するコマンドのMAKEEを用いて解析した

※MAKEEはKeck望遠鏡で撮られた天体画像を処理するために用意されたコマンド

【必要なデータ】天体画像・トレース用画像・フラット画像・コンパリソン画像・バイアス画像

規格化・波長較正

一次処理を行ったスペクトルは天体画像処理ソフトIRAFを用いて**規格化**した

モデル大気を使ったスペクトルを表示するSPTOOL上で、観測スペクトルとモデルスペクトルを比較して**波長較正**をした

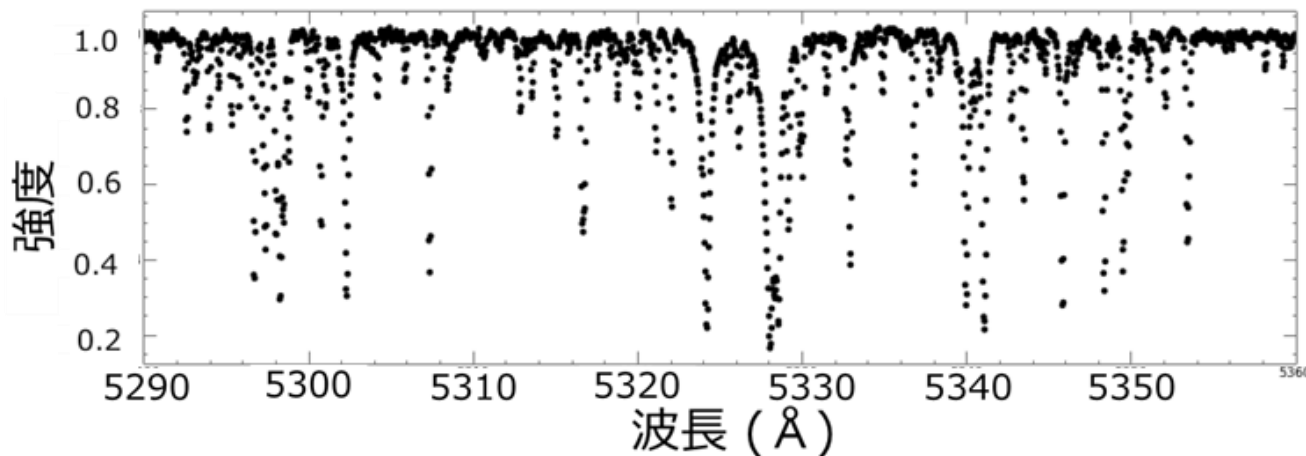


図8 波長較正まで行ったスペクトル

大気パラメータと元素の組成の導出

大気パラメータの導出

Fe I の吸収線が100本程度、Fe II の吸収線が10本程度を目安に等価幅を測り、モデル大気計算プログラムのTGVITを用いて大気パラメータを求めた

表5 各星団に属する恒星の大気パラメータ

	プレアデス	ヒアデス	プレセペ
有効温度(K)	4500-6000	5400-6300	5500-6100
表面重力(dex)	4.4-4.7	4.4-4.9	4.3-4.6
微小乱流速度 (km/s)	0.7-1.9	1.0-1.3	1.0-1.3
[Fe/H](dex)	-0.4-0.1	0.2-0.3	0.2-0.3

元素の組成の導出

モデル大気を使ったスペクトルを表示する
SPTOOL上で**合成スペクトル**を**観測スペクトル**
に合わせることで求めた

各元素、**1-4本**の吸収線を用いて組成を求めた

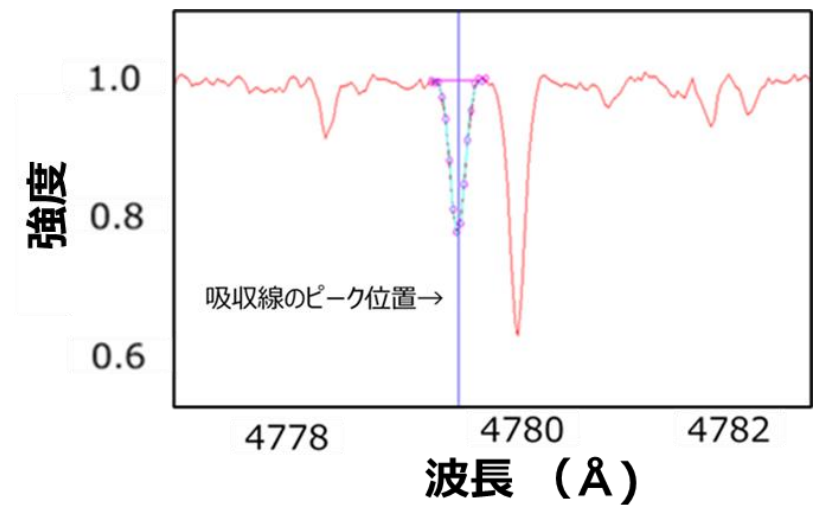


図9 Feの等価幅を測っている様子

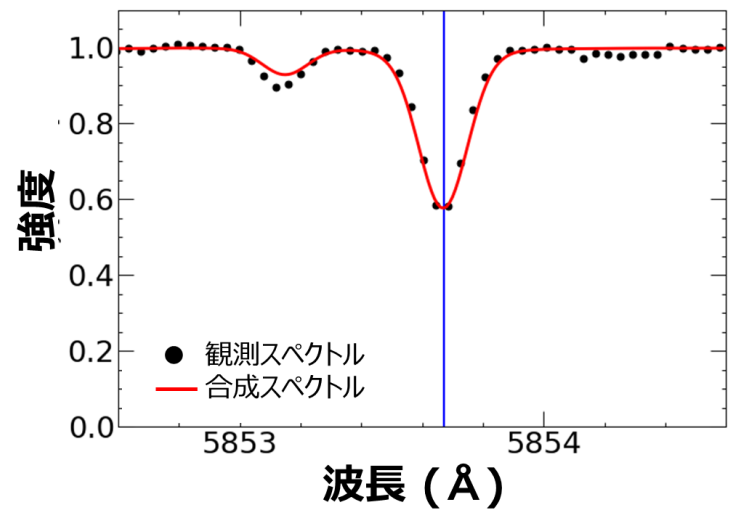


図10 合成スペクトルを観測スペクトルに
フィットさせている様子

各星団の距離と年齢の関係

距離を求めるために必要な星団間の角度は球面余弦定理を用いて求めた

星団間の距離は余弦定理を用いて求めた

表6 星団間の年齢差と距離

	ヒアデス	プレセペ
プレアデス	710 Myr	550 Myr
	83 pc	179pc
ヒアデス	-	110 Myr
		164 pc

年齢による組成の違いを調べるときは**プレアデス星団**と**ヒアデス星団**で比較する

距離による組成の違いを調べるときは**ヒアデス星団**と**プレセペ星団**で比較する

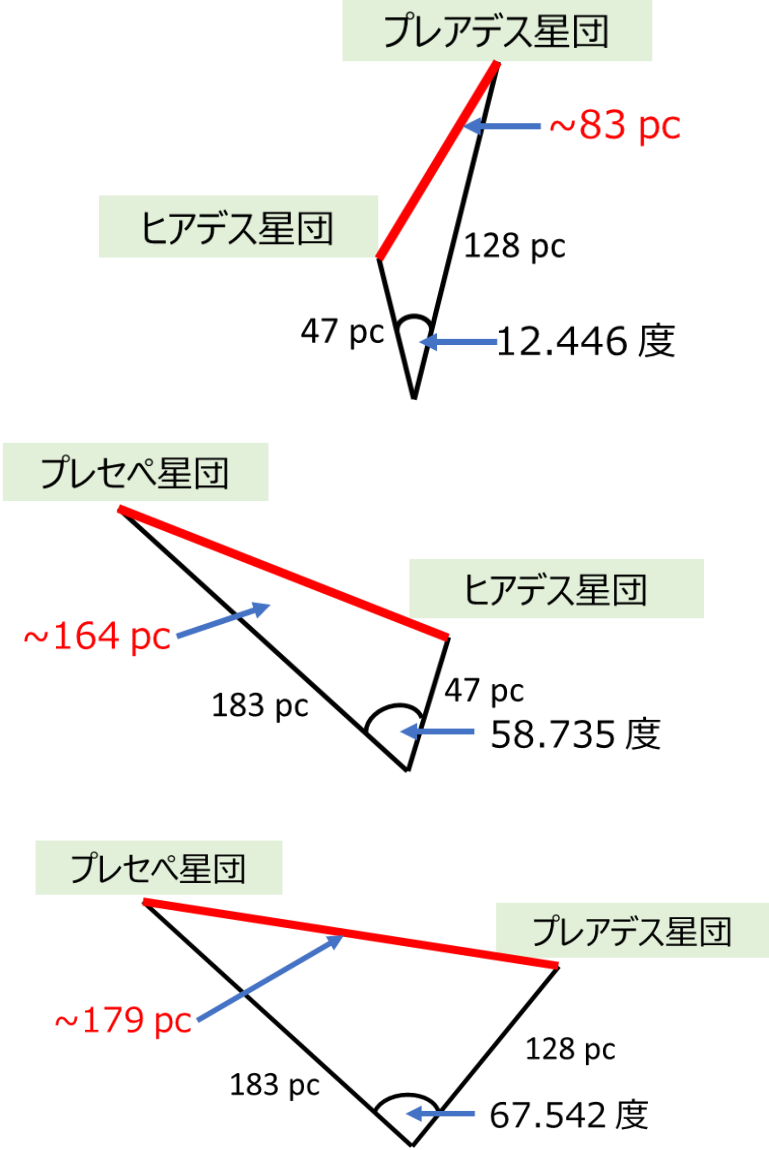
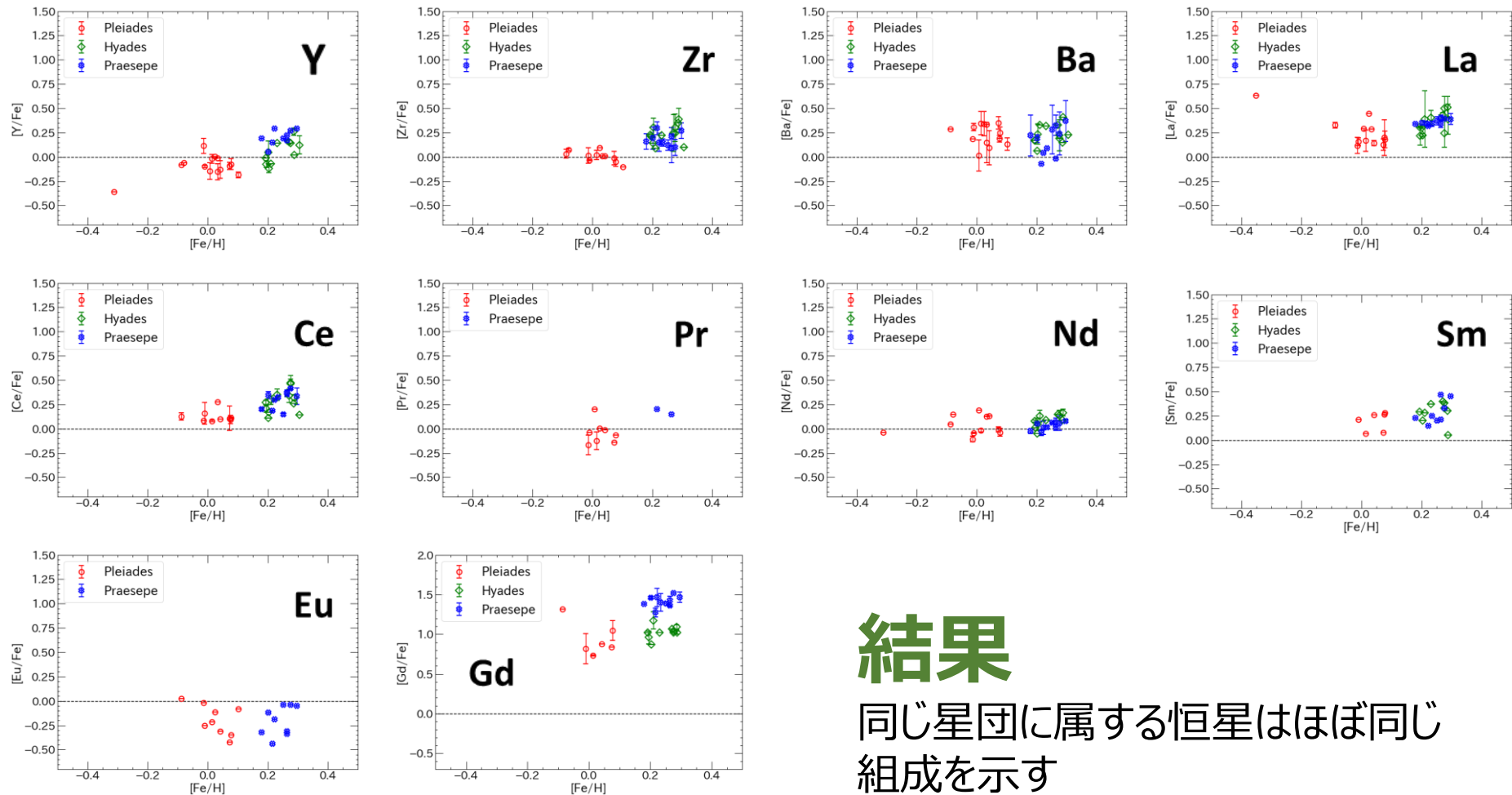


図11 各星団の位置関係

結果：各天体の化学組成

星団内で、天体ごとの化学組成の比較を行った



結果

同じ星団に属する恒星はほぼ同じ組成を示す

図12 各天体での組成の比較

結果：星団間の組成の比較

各恒星の組成を求めたのち、求めた組成の平均値を星団の組成とした

結果

1. **ヒアデス星団**と**プレセペ星団**の化学組成はほぼ同じ
2. **プレアデス星団**の化学組成はほか2つの星団と比べると少し異なる

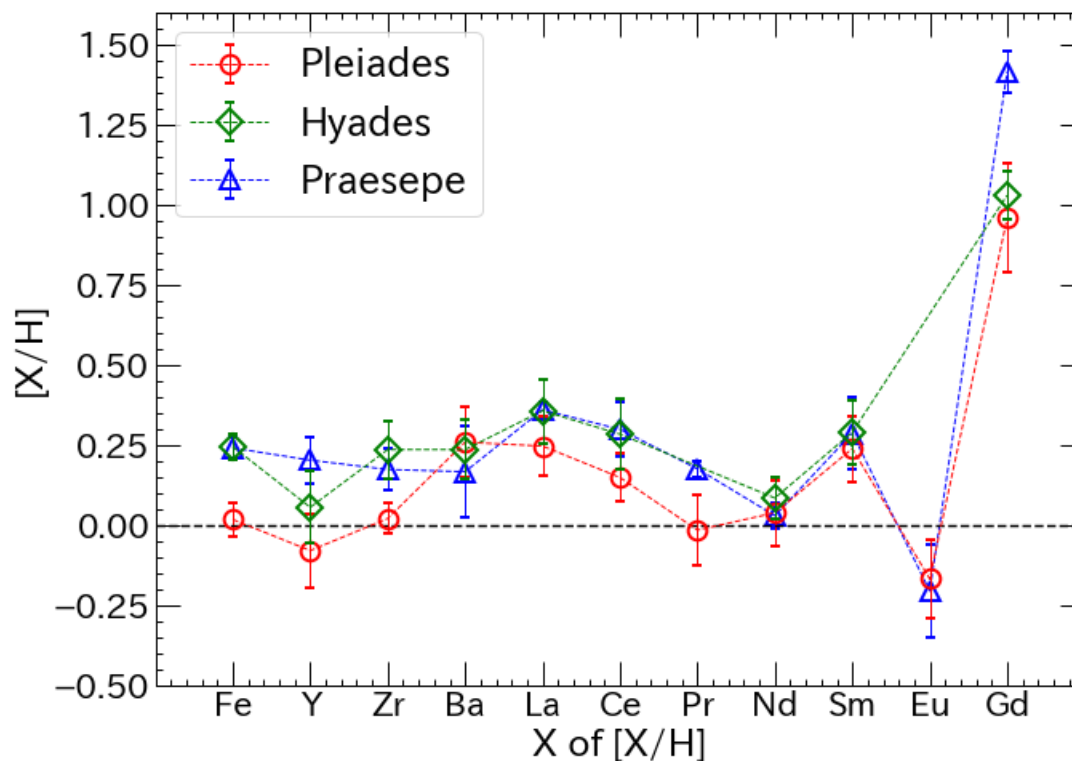


図13 星団ごとの化学組成の比較

背景

距離が100 pc以上離れている星団や年齢が300 Myr離れている星団では中性子捕獲過程元素の組成が異なるかもしれないという観点で**1つ1つの散開星団に着目して、中性子捕獲過程元素**を中心に化学組成を調べた研究が少ない

目的

星団間の距離や年齢差で中性子捕獲過程元素の組成が変わるか調べること

手法

Keck望遠鏡のHIRESで観測された高分散可視光スペクトルのアーカイブデータを用いて、プレアデス星団、ヒアデス星団、プレセペ星団に属するGK型主系列星を対象に10種類の中性子捕獲過程元素(Y、Zr、Ba、Ce、La、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd)の組成を求めた

結果

- ・**ヒアデス星団**と**プレセペ星団**はほぼ同じ化学組成を示す
- ・**プレアデス星団**はほか2つの星団と比べると異なる化学組成を示す

今後の予定

- **ヒアデス星団のEuの結果がない**
 - ヒアデス星団のEuの組成を求める
 - 新しくEuの吸収線が観測波長範囲に入っているアーカイブデータをKOAより取得する
- **[X/H]で比較した場合、プレアデス星団の化学組成がほか二つの星団と比べて下にプロットされている**
 - [X/Fe]で比較するとプレアデス星団の化学組成がほか二つの星団より上にプロットされている
 - どちらで比較し議論に進めるかは慎重に考えてから、考察に進む

