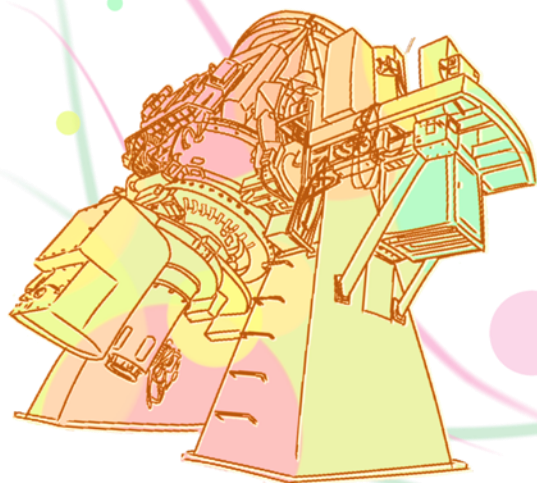




# 高分散分光観測による 恒星の化学組成調査

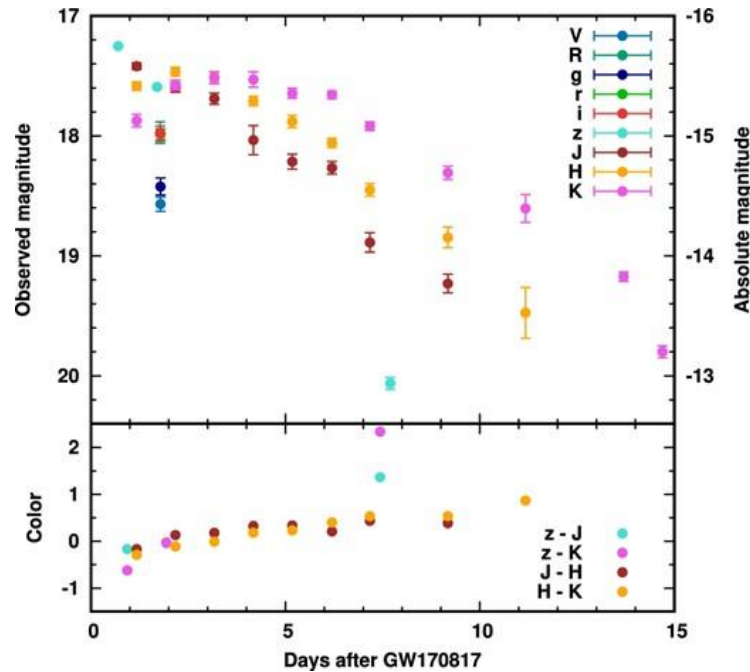
古塚来未、本田敏志 (兵庫県立大学)



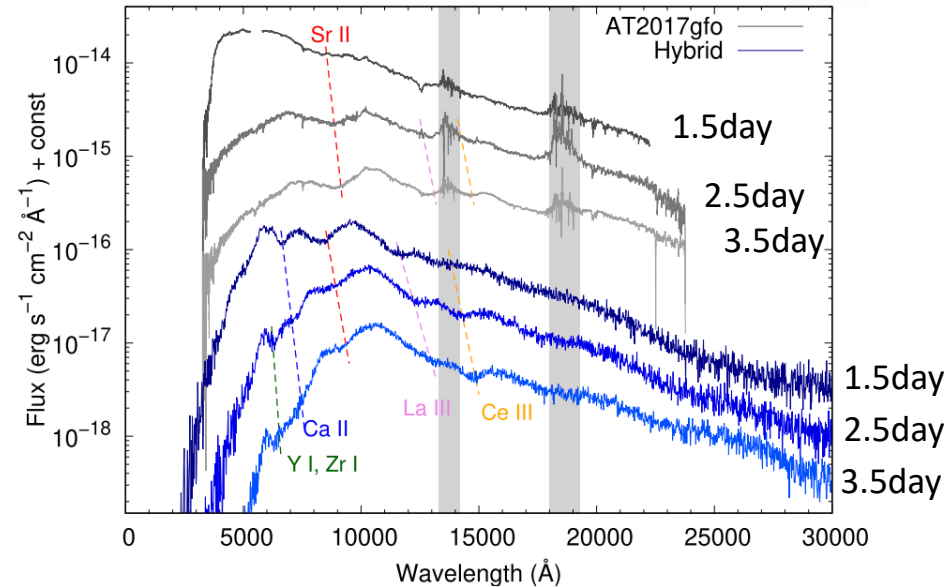
# 背景 重元素の起源と中性子星合体

2

鉄より原子番号の大きい元素を合成するrプロセスの起源は長年の謎であり、超新星爆発などが考えられてきた。



(図1) 重力波の観測の後に観測された光度曲線 (Utsumi et al., 2017)。



(図2) 中性子星合体の後に観測された電磁波のスペクトルと合成スペクトルの比較 (Domoto et al., 2022)。

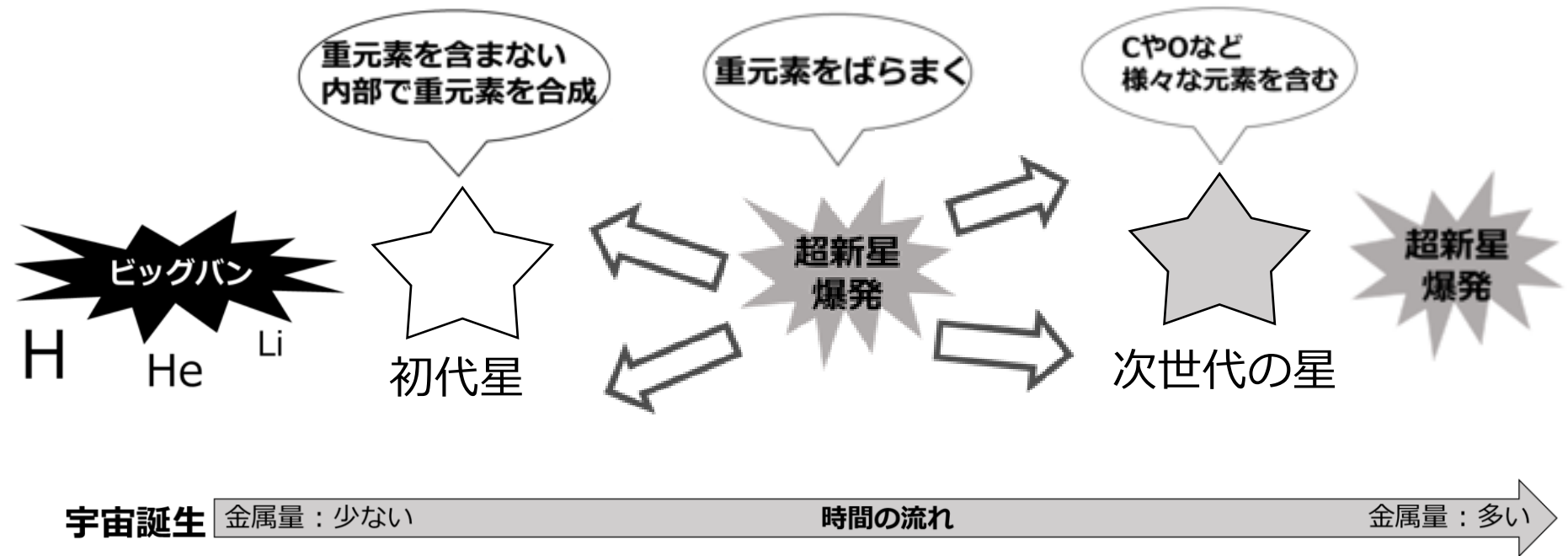
中性子星合体がrプロセス起源として有力。

2017年に重力波が観測され、(e.g. Tanaka et al., 2017) 測光観測や分光観測は重元素が合成されていることを示唆。

他の起源も存在するかは議論されている。

# 恒星の観測と銀河の化学進化

元素の起源を調べるために、宇宙での元素合成の結果が記録されている、恒星の化学組成を調査する。

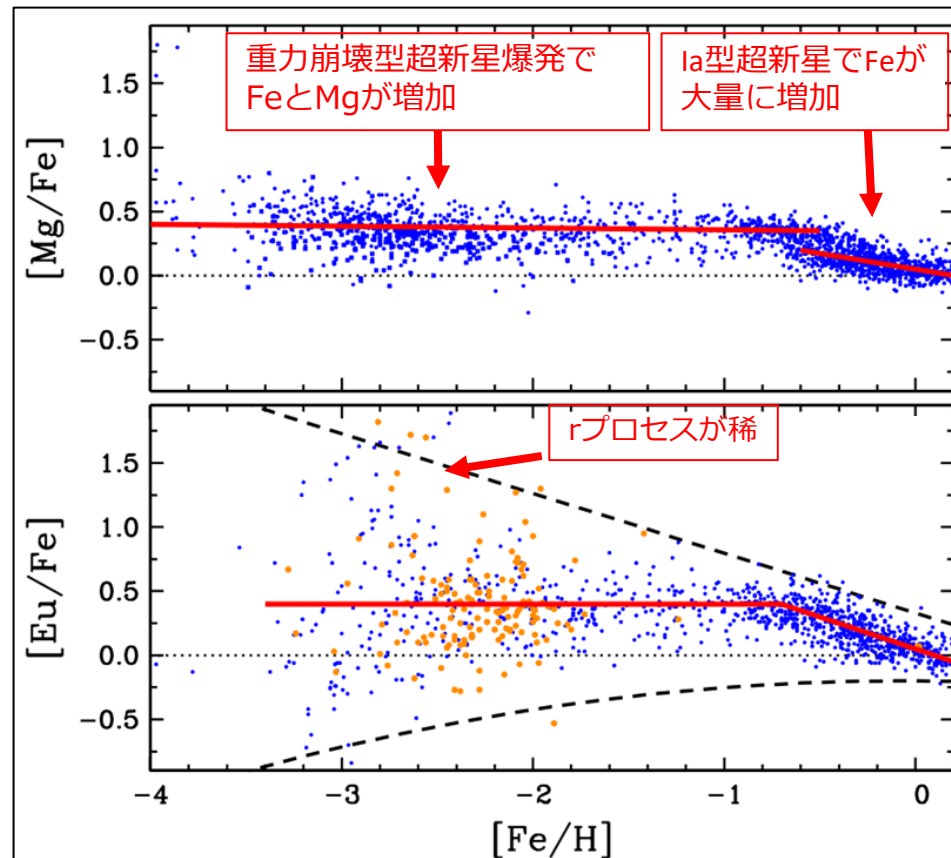


(図3) 銀河の化学進化。

# 銀河の化学進化と元素の起源

Mg:  
熱核融合反応で合成

Eu:  
rプロセスで合成



$$[X/Y] = \log_{10} \frac{(n_X/n_Y)_{\text{star}}}{(n_X/n_Y)_{\odot}}$$

(図4) 銀河系の恒星の(a)Mg,(b)Euの化学進化 (Cowan et al., 2021)。

様々な金属量の恒星を観測し、化学組成を調べることで、どのような現象を経て元素が増えてきたかを推定できる。

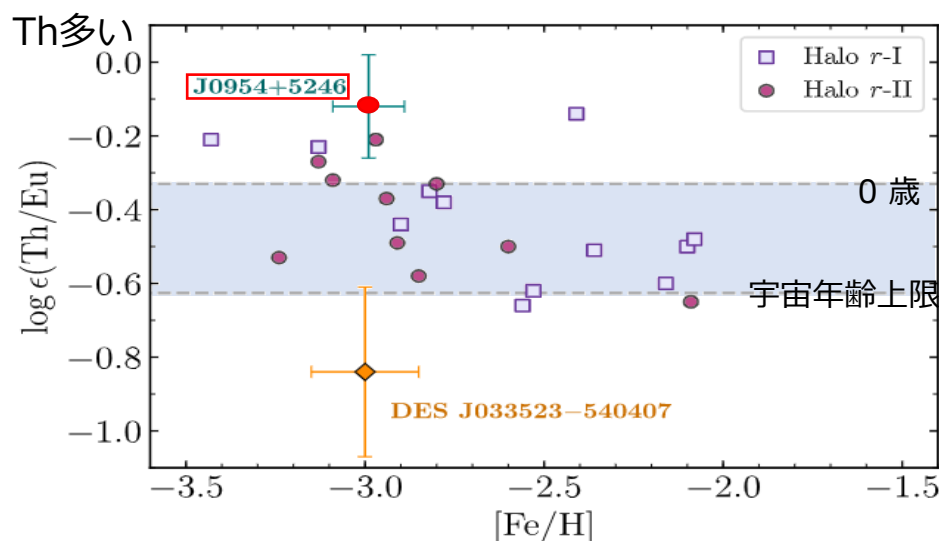
# 先行研究① アクチノイドブースト星

5

トリウム (Th)はrプロセスのみで合成される。

rプロセス過剰な金属欠乏星の約30%でThの組成が他のrプロセス元素に対して多い星(アクチノイドブースト星)が確認された。

このことはrプロセス起源の多様性を示唆し、rプロセス起源か単一か複数かが議論されている。

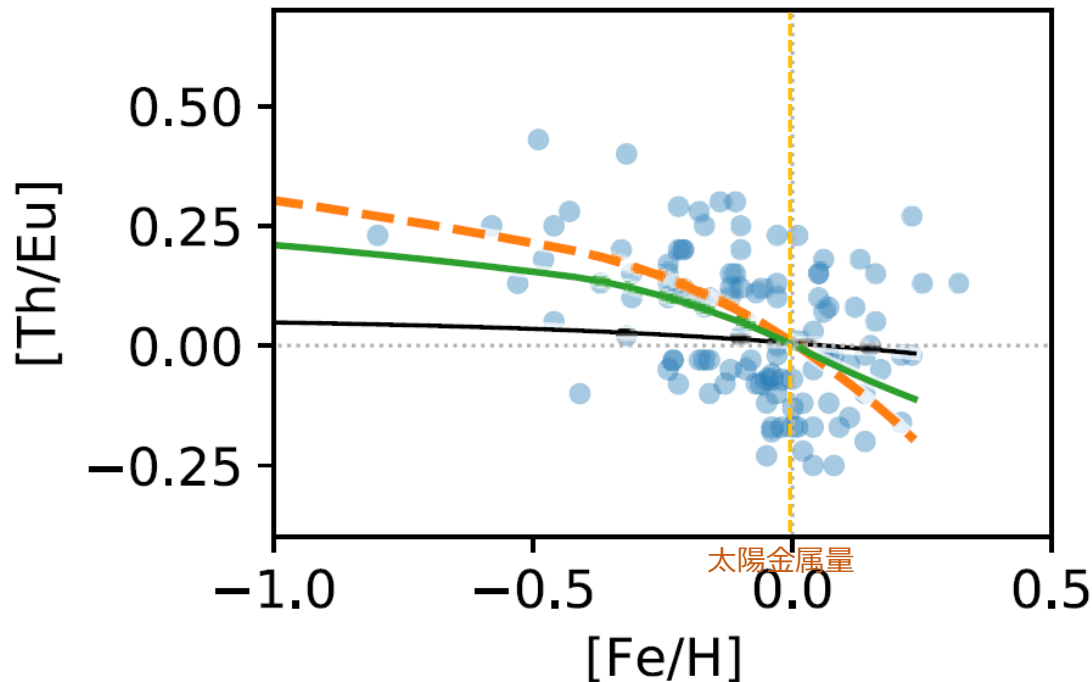


$$\log \epsilon(\text{Th}/\text{Eu}) = \log (n_{\text{Th}}/n_{\text{H}}) - \log (n_{\text{Eu}}/n_{\text{H}})$$

(図5)金属量と $\log \epsilon(\text{Th}/\text{Eu})$ の関係(Holmbeck et al., 2018)。

# 先行研究② 銀河円盤の主系列星の観測

近年、銀河円盤の主系列星でのTh組成が調査された(Mishenina et al., 2022)。



モデルはThとEuの生成量が違う

— 1つのイベントを仮定

(ThとEuの生成量が同じ)

-- 1種類のイベントで生成量の多様性を想定  
(Euは一定の生成量、Thは低金属量で生成量が多い)

— 2つのイベントで頻度の違いを想定  
(それぞれのイベントでTh/Euは同じ、低金属量では片方のイベントの頻度が高い)

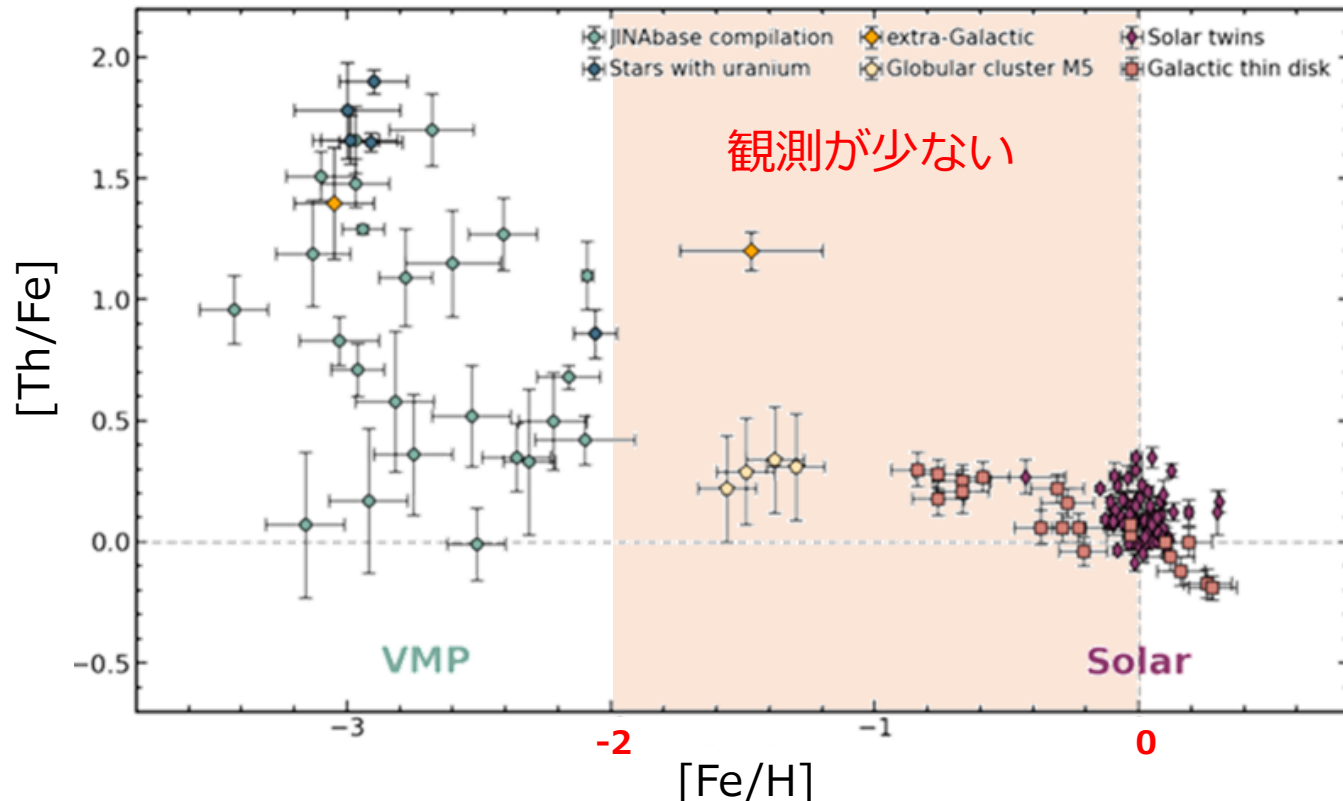
(図6) 銀河円盤の主系列星での  $[\text{Th}/\text{Eu}]$  の観測。(Mishenina et al., 2022)。

$[\text{Th}/\text{Eu}]$  は太陽金属量程度で金属量に対して減少する。

観測と銀河の化学進化モデルを比較。rプロセスが複数の起源をもつことを示唆。

# 問題 これまでのトリウムの観測

より広い金属量範囲でトリウムの観測例を見ると、 $-2 < [\text{Fe}/\text{H}]$ の恒星では観測が少なく、金属量に対するTh組成の分布はよくわかっていない。



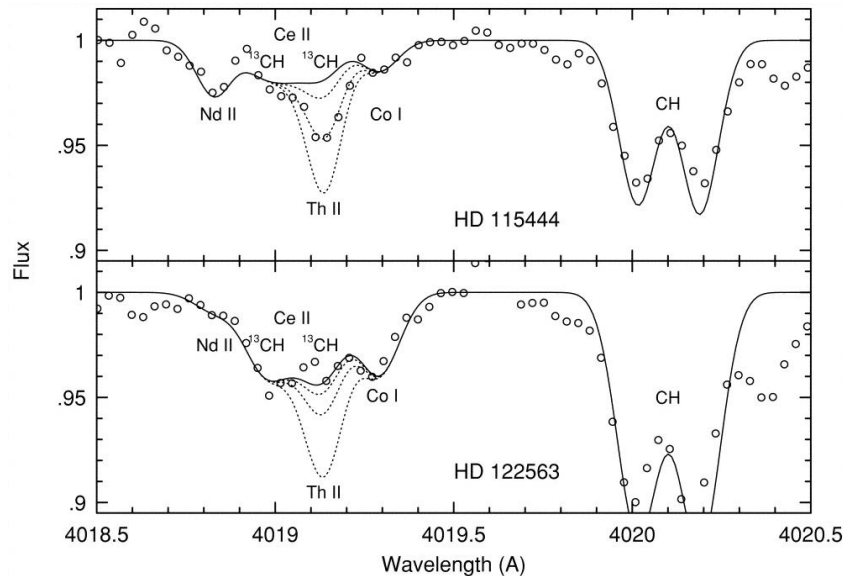
(図7) 先行研究の $[\text{Th}/\text{Fe}]$ の分布 (Holmbeck et al., 2023)

Thの吸収線の観測が難しいことが原因。

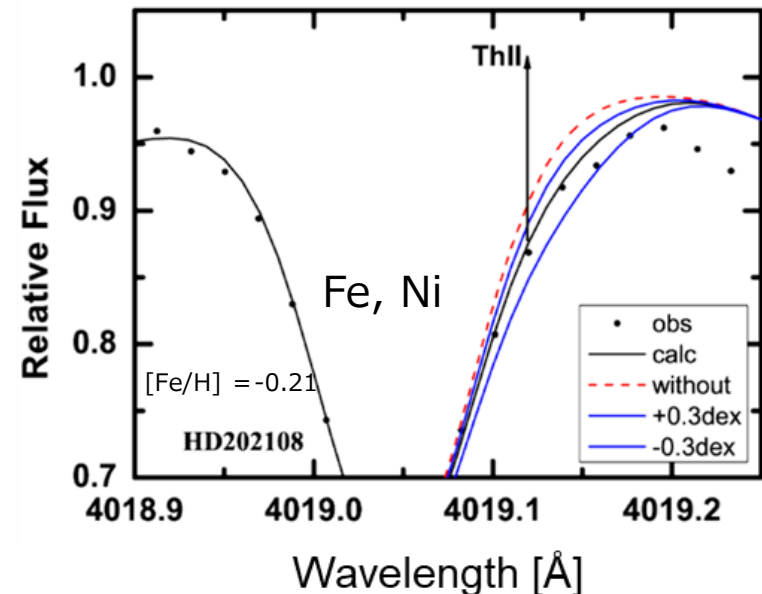
# 問題 観測できるトリウムの吸収線

## 4019 Å

これまで主に低金属量かつTh組成の多い天体で利用されてきた。  
他の吸収線(Fe, Niなど)と混ざって観測されるため、高金属量の星では検出が難しい。



(図8) HD115444( $[Eu/Fe] \sim 0.9$ のr-rich star)の4019 ÅのTh吸収線(Westin et al., 2000)



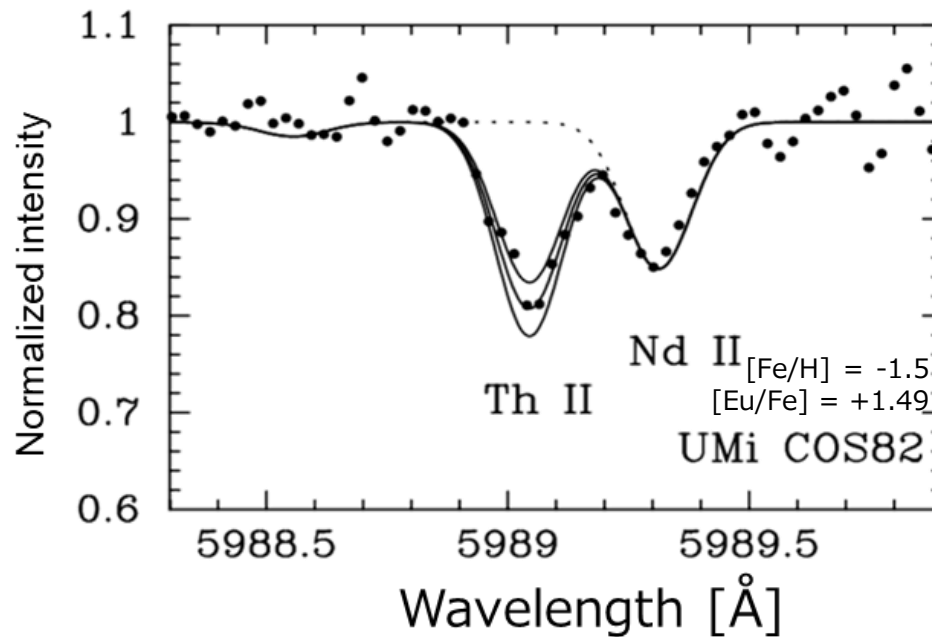
(図9) 4019 ÅのTh吸収線(Mishenina et al., 2022)

# 問題 観測できるトリウムの吸収線

## 5989 Å

強度は弱い、他の吸収線と混ざらない。

高金属量の星でThを検出できる可能性がある。今回この吸収線を使った。



(図10) 5989 ÅのTh吸収線(Aoki et al., 2007)

# 目的、観測

## 目的

rプロセスの起源を制限するため、 $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}]$ の天体で5989 Åの吸収線を用いてThを検出する。

## 観測

- ・ 2 m なゆた望遠鏡
- ・ MALLS エシエルモード (R~35000)



(図11) なゆた望遠鏡とMALLS

- ・ ぐんま天文台150 cm望遠鏡
- ・ GAOES (R~70000)



(図12) ぐんま天文台150 cm望遠鏡とGAOES

- ・ すばる望遠鏡
- ・ HDS(R~70000)  
アーカイブデータ(SMOKAより)



(図13) HDS©NAOJ

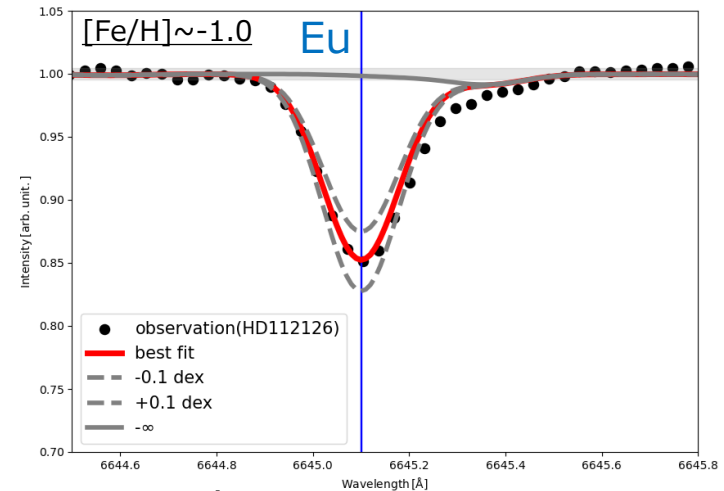
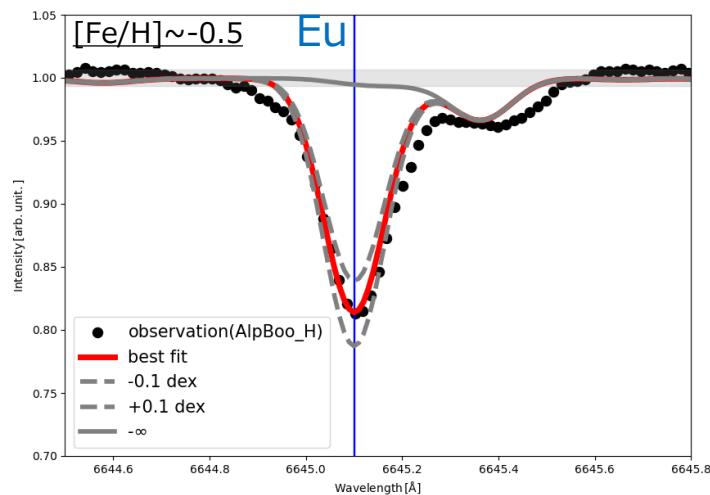
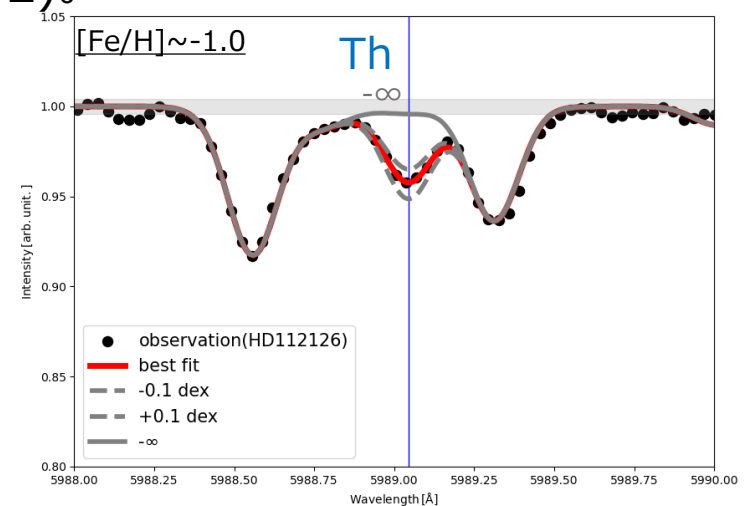
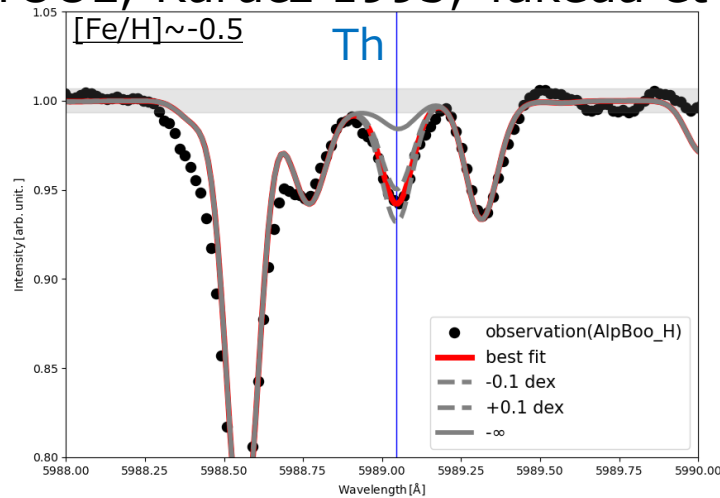
2 m級の望遠鏡で十分観測できる明るい巨星 ( $8 < V_{\text{mag}}$ )を含む**37天体**を対象とした。  
S/Nは100 - 200程度, 波長域は 5000 - 7000 Å。

# 解析 元素組成の見積もり

まず大気パラメータを観測で得られた天体のスペクトルから決定(TGVITプログラム; Takeda et al., 2005)。

その後、モデルと比較することで元素の組成を見積もった。

(SPTOOL; Kurucz 1993, Takeda et al., 2002)。



(図14) 観測された天体のTh、Euのスペクトル。

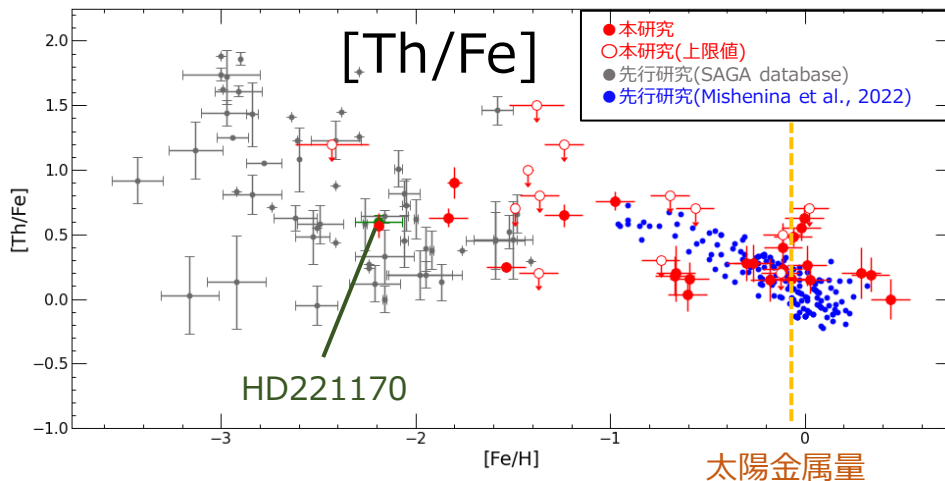
# 結果 トリウム、ユーロピウム組成

**24天体でThを検出できた。**

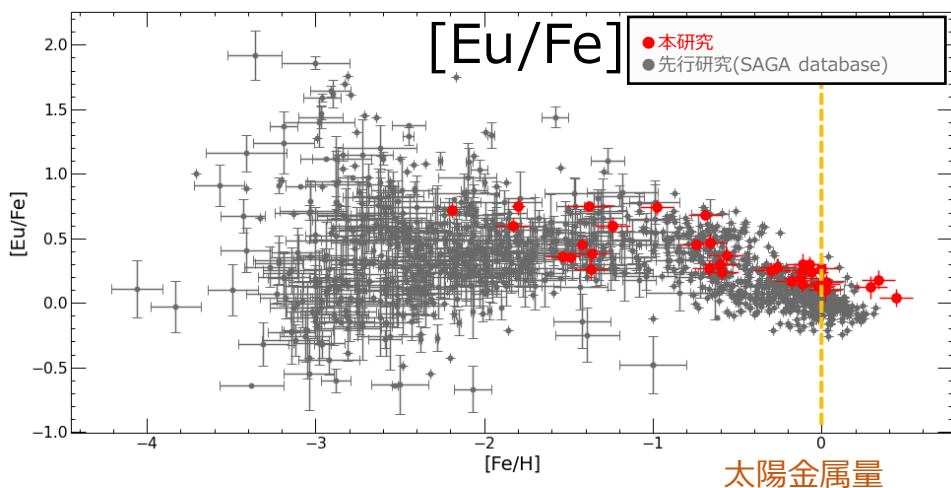
また、表1の大気パラメータを持つ天体で検出が可能であると分かった。

(表1) 天体の大気パラメータ

|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| 有効温度[K]                 | 4000 – 5000 |
| 表面重力(log g)             | 1.0 – 3.8   |
| ミクロ乱流速度( $V_t$ ) [km/s] | 0.7 – 1.8   |
| [Fe/H]                  | -2.2 – 0.4  |



(図15) 金属量に対する[Th/Fe] の分布。



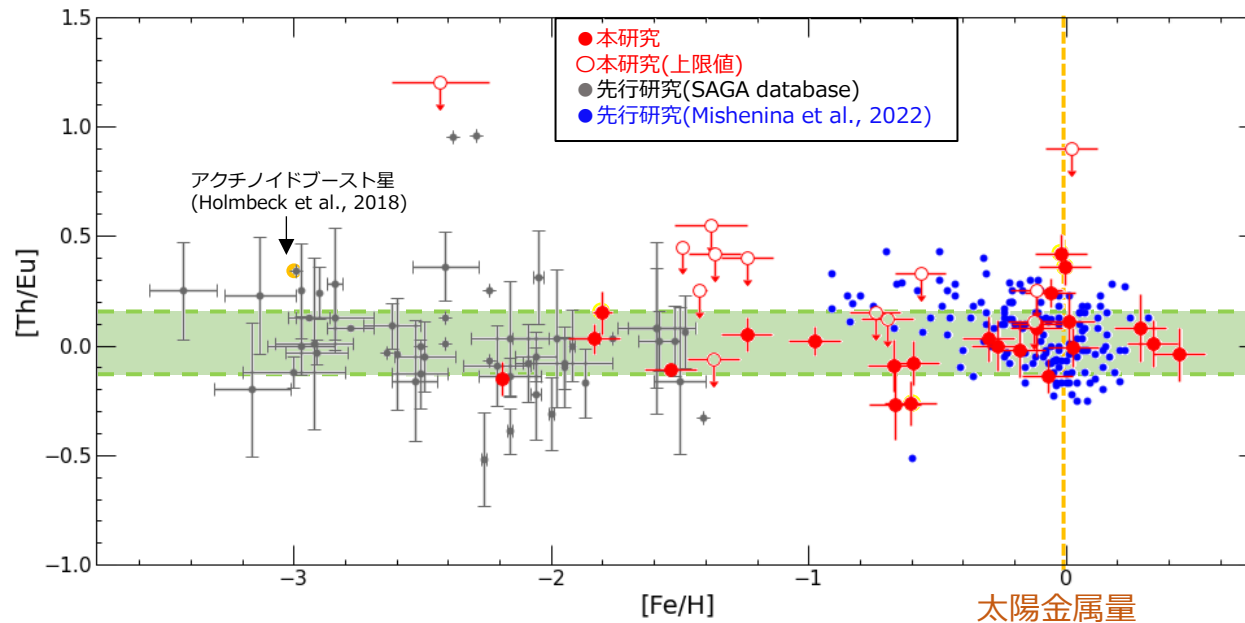
(図16) 金属量に対する[Eu/Fe]の分布。

先行研究と比較して、  
[Fe/H]~-0.7の4天体で低く、  
[Fe/H]~0の4天体で高く  
見積もった。

## HD221170の比較

主に4019 Åの吸収線を用いて  
得られた[Th/Fe] の値(Ivans et al.,  
2006)と一致することを確認。

[Eu/Fe] の傾向は先行研究と矛盾しない。



(図17)金属量に対する $[Th/Eu]$  の分布。先行研究(Holmbeck et al., 2018)と比較。

- 太陽金属量程度でMisheninaらが示した減少する傾向はみられず、ほぼ一定の傾向。
- 金属欠乏星の観測であるHolmbeck et al., 2018と比較すると、 $-2 < [Fe/H] < 0$ ではアクチノイドブースト星は見つからなかった。

$-2 < [Fe/H] < 0$ では、**主に1種類のrプロセス起源の元素合成の結果を反映している**と考えられる。

## 問題

rプロセス起源となる天体現象は複数存在する可能性が示唆されており、完全には明らかになっていない。

---

## 目的

rプロセスの起源を制限するため、 $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}]$ の巨星で5989 Åの吸収線を用いてトリウムを検出する。

---

## 結果

37個の巨星の高分散分光観測によるデータを解析し、24天体でトリウムを検出した。有効温度 4000 – 5000 K, 表面重力( $\log g$ ) 1.0 – 3.8, ミクロ乱流速度 0.7 – 1.8 km/sの天体で5989 Åを利用して検出が可能。

太陽金属量程度でMisheninaらが示した減少する傾向はみられず、ほぼ一定の傾向が見られた。

金属欠乏星の観測であるHolmbeck et al., 2018と比較すると、 $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ ではアクチノイドブースト星は見つからなかった。

---

## 考察

$-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ では、主に1種類のrプロセス起源の元素合成の結果を反映していると考えられる。

---

## 展望

他の元素も調査し、rプロセス以外の寄与も調査。

銀河の化学進化モデルと比較し、より具体的にrプロセス起源の可能性を探る。