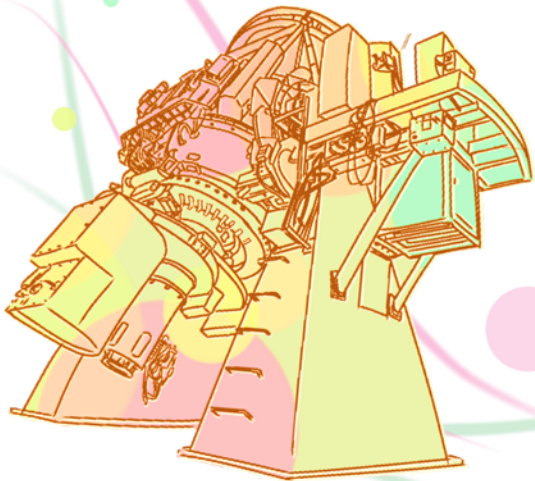
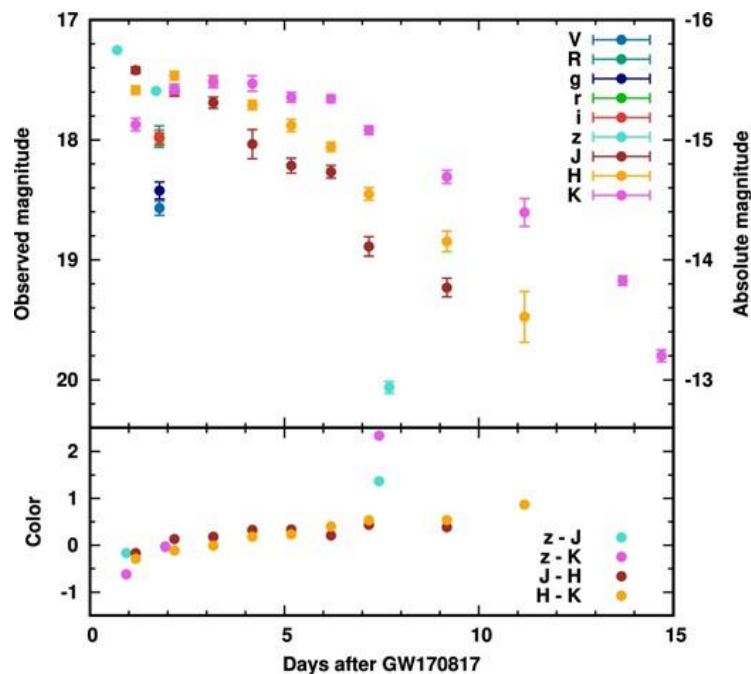


# 恒星の高分散分光観測による 重元素組成の調査

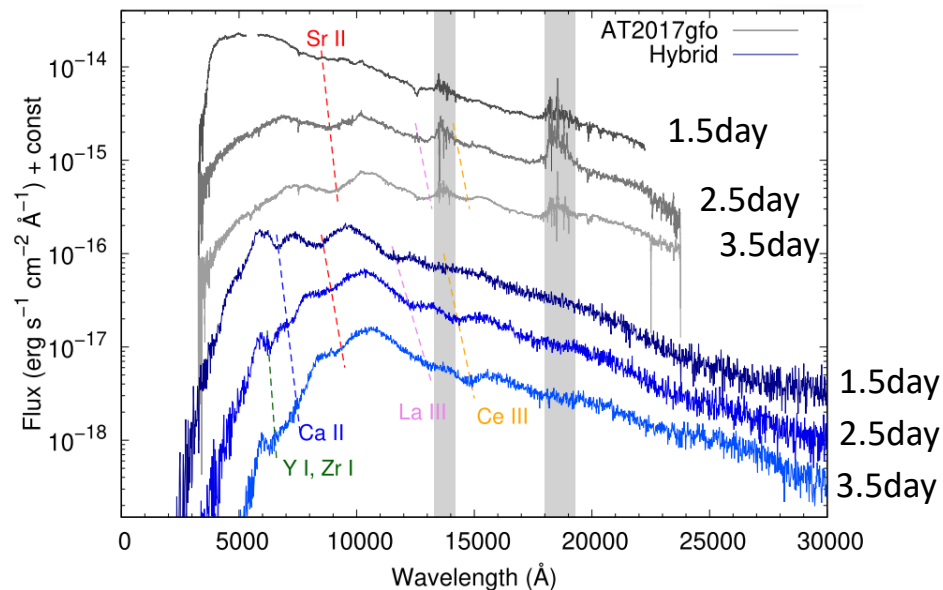
古塚来未, 本田敏志(兵庫県立大学)



2017年に重力波が観測され、その後の測光観測などから中性子星合体によるものと考えられている(Tanaka et al., 2017)。



(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)。

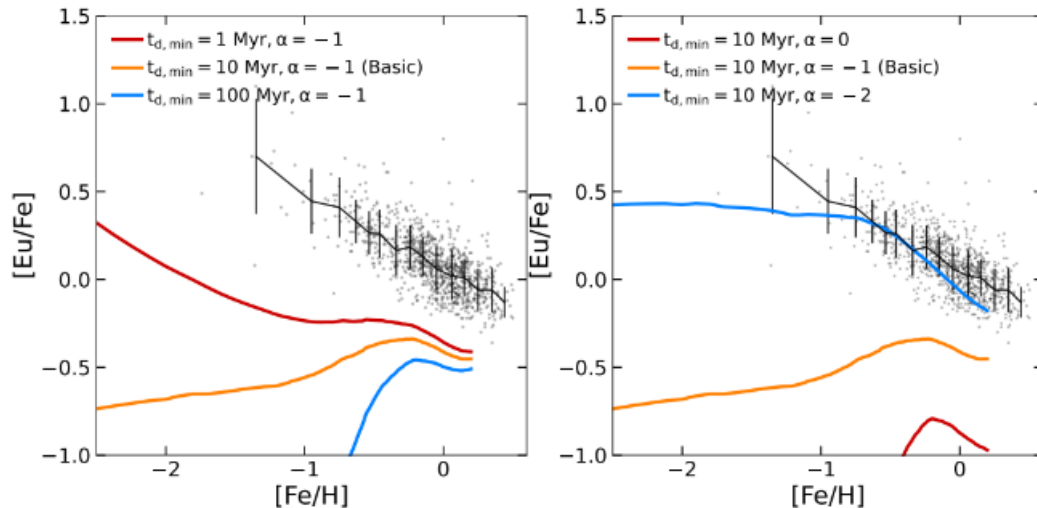
さらに分光観測は重元素(La, Ceなど)が合成されていることを示唆。このような重元素を合成するrプロセスの起源は長年の謎であり、超新星爆発などが考えられてきたが、現在では中性子星合体もその候補である。

# 複数種のrプロセス起源と恒星の観測

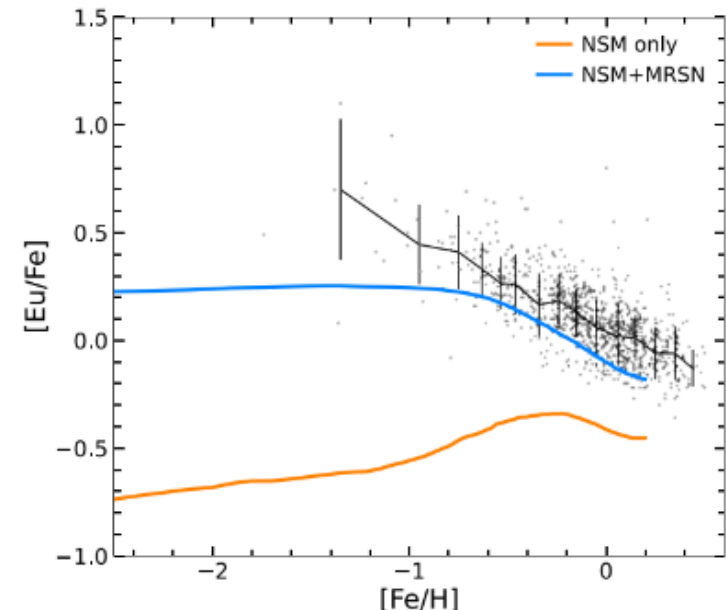
rプロセスの起源は主に重力崩壊型超新星爆発と、中性子星合体が考えられている。

恒星の観測では、rプロセスで合成される元素の代表として比較的観測しやすい**ユーロピウム(Eu)**を用いる。

古い恒星ほど金属量は少なく、金属量はだまかに時間の指標となる。 $[Fe/H] = \log_{10} \frac{(n_{Fe}/n_H)_{star}}{(n_{Fe}/n_H)_{\odot}}$   
**[Eu/Fe]**が、**金属量(=時間軸)に対して減少**することを説明するには、**中性子星合体のみでは収量が足りない**。  
 イベントが起こるまでの時間が短い、**重力崩壊型超新星**を考えると説明できる (e.g. Lian et al., 2023)。



中性子星合体のみのモデル



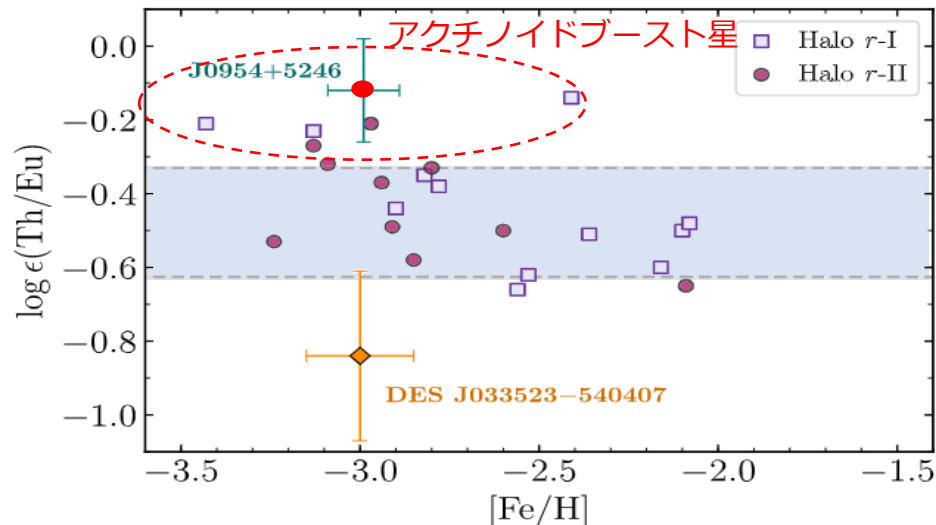
中性子星合体と重力崩壊型超新星を考えたモデル

(図3) Euの観測と銀河の化学進化モデルの比較

トリウム(Th)はrプロセスのみで合成される重元素。

金属欠乏星の観測では、rプロセス元素(原子番号56以降)の組成のパターンがどの天体でも**太陽と一致**することから、Th/Euはどの天体でも同様に考えられてきた。

しかし、一部の金属欠乏星では高いTh/Euを示す**アクチノイドブースト星**が見つっている。

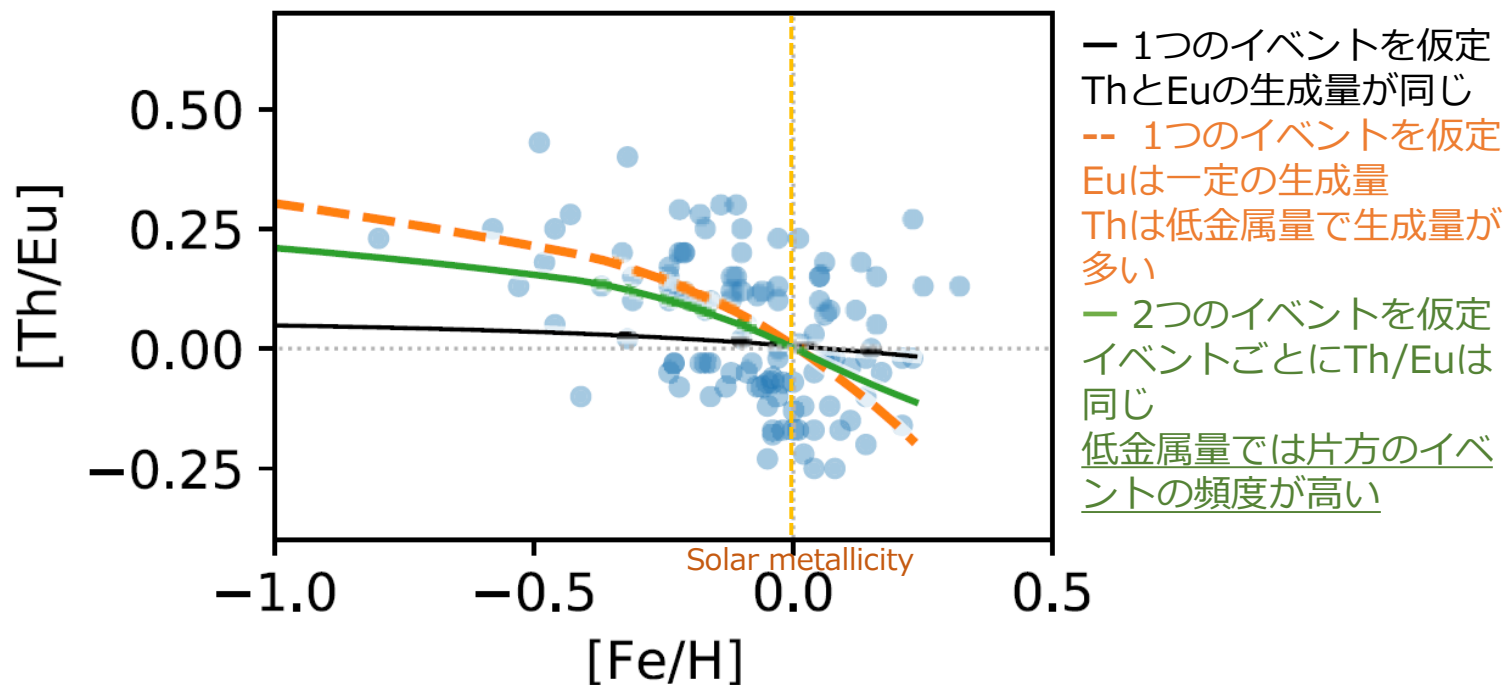


$$[Fe/H] = \log_{10} \frac{(n_{Fe}/n_H)_{star}}{(n_{Fe}/n_H)_{\odot}}$$
$$\log \epsilon(Th/Eu) = \log (n_{Th}/n_H) - \log (n_{Eu}/n_H)$$

(図4) 金属量に対するThとEu組成比の分布 (Holmbeck et al., 2018)

これらの星はThのみを高い割合で合成する起源を経験したと考えられ、**rプロセス起源の多様性**を示唆。

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)。  
[Th/Eu]は太陽金属量程度で金属量に対して減少する。



(図5) 観測による[Th/Eu]の分布と銀河の化学進化モデルとの比較 (Mishenina et al., 2022)

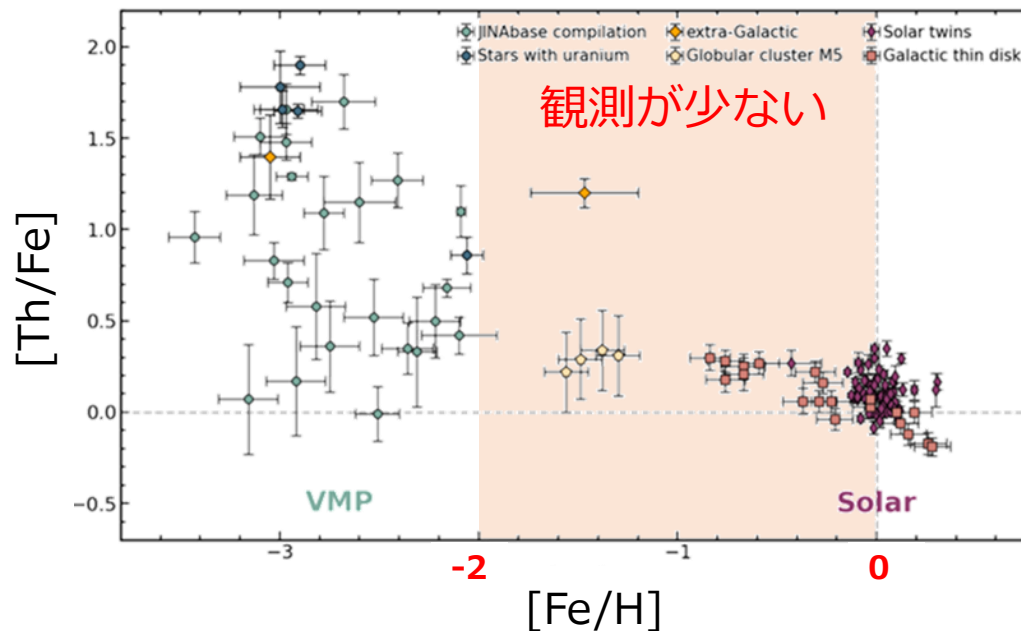
観測と銀河の化学進化モデルを比較。

3つのうちでは2つのイベントを仮定した緑のモデルが観測に合い、**rプロセスが複数の起源をもつ**ことを示唆。

複数種類のrプロセス元素を調べることでrプロセス起源を推定する手掛かりとなる。

# Thの観測は少ない

[Fe/H]=-2以下の金属欠乏星で観測されているが、 $-2 < [Fe/H]$ の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。



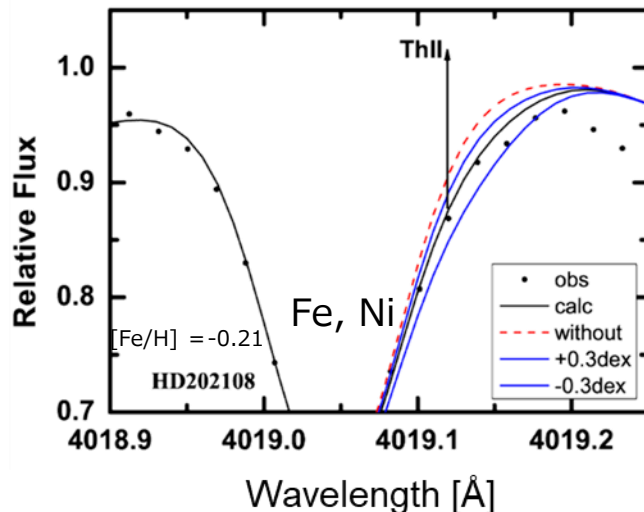
(図6) 先行研究の[Th/Fe]の分布(Holmbeck et al., 2023)

観測できるThの吸収線は少ないことが原因として挙げられる。

# 観測できるトリウムの吸収線

## 4019.1 Å

これまで主にThの検出に使われてきた。他の吸収線(Fe, Niなど)と混ざって観測されるため、高い金属量の星では検出が難しい。

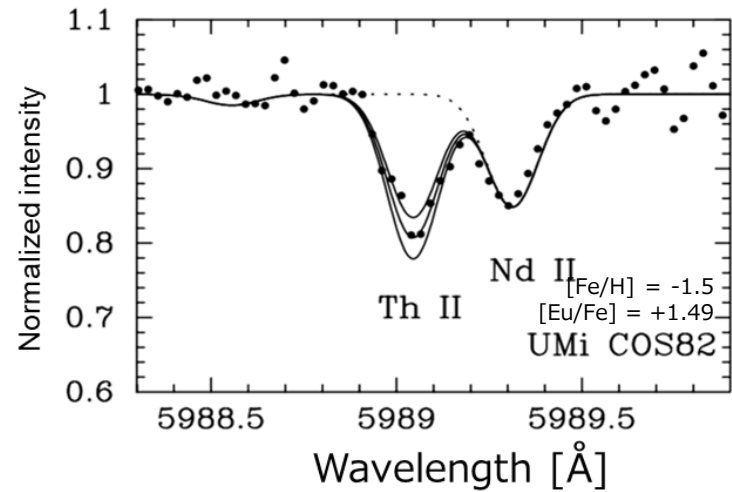


(図7) 4019.1 ÅのTh吸収線(Mishenina et al., 2022)

## 5989.0 Å

強度は弱いですが、他の吸収線と混ざらない。  
高い金属量の星でThを検出できる可能性がある。

今回この吸収線を使った。

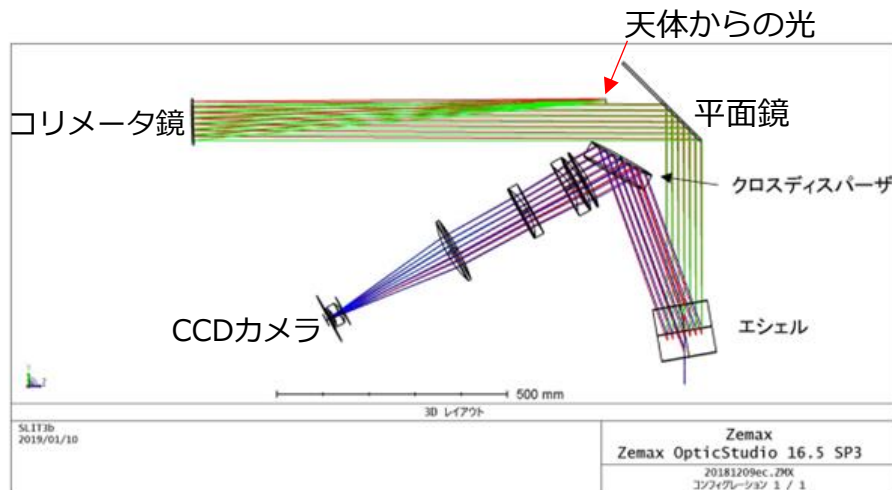


(図8) 5989.0 ÅのTh吸収線(Aoki et al., 2007)

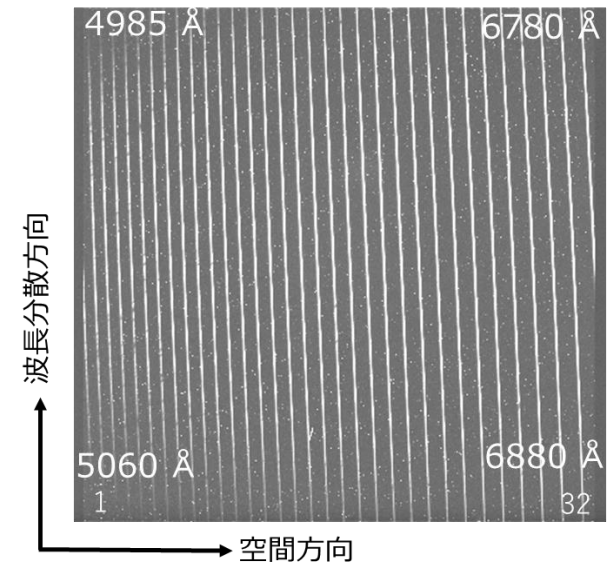
# なゆた望遠鏡/MALLS エシエルモード

2m なゆた望遠鏡の分光器MALLSは改良され、2019年よりエシエルモードでの高分散分光観測( $R \sim 35,000$ , 波長域:  $4985\text{--}6880 \text{ \AA}$ )が可能となった。

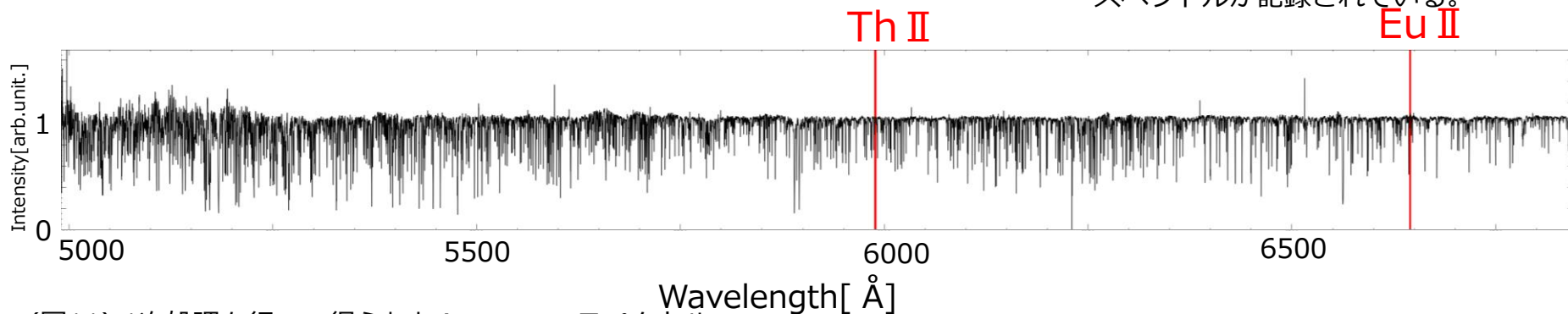
クロスディスペルザを入れて従来のロングスリットモードからエシエルモードに切り替える。



(図9) MALLSエシエルモードの光学系。



(図10) エシエルモードで観測されたArcturusの画像。回折光の次数ごとにスペクトルが記録されている。



(図11) 1次処理を行って得られたArcturusのスペクトル。



# 目的、観測

**目的** rプロセスの起源を明らかにするため、 $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}]$ の星でThを検出する。

## 観測

- ・ 2 m なゆた望遠鏡
- ・ 分光器 MALLS (R~35000)



(図12) なゆた望遠鏡とMALLS

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



(図13) ぐんま天文台150 cm望遠鏡とGAOES

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



(図14) HDS©NAOJ

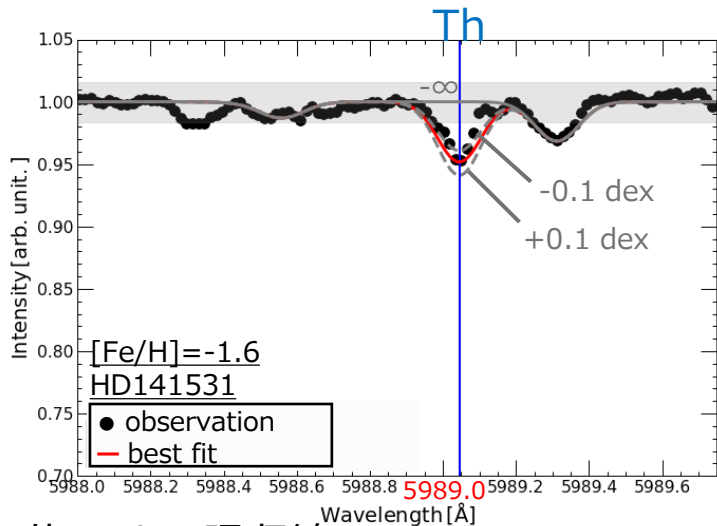
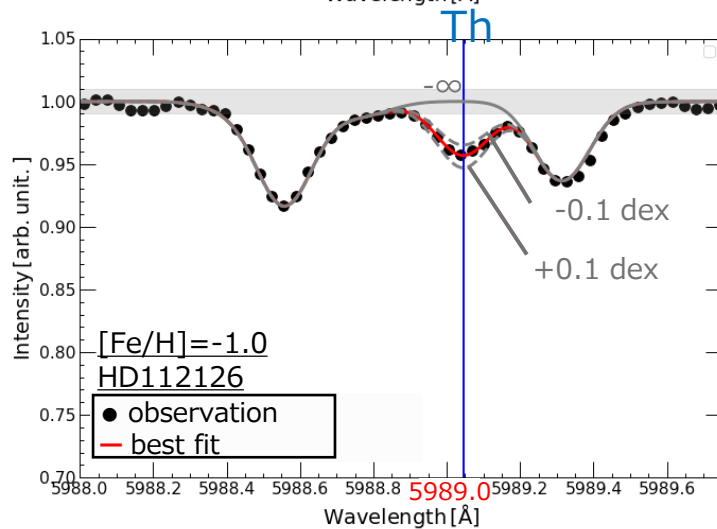
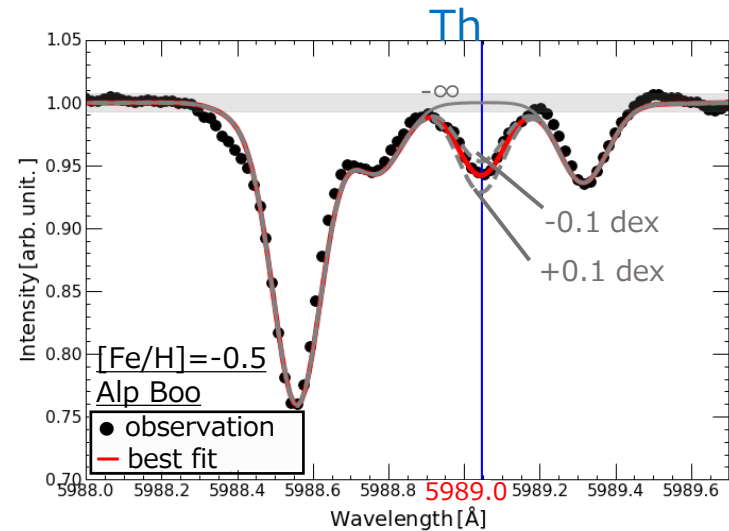
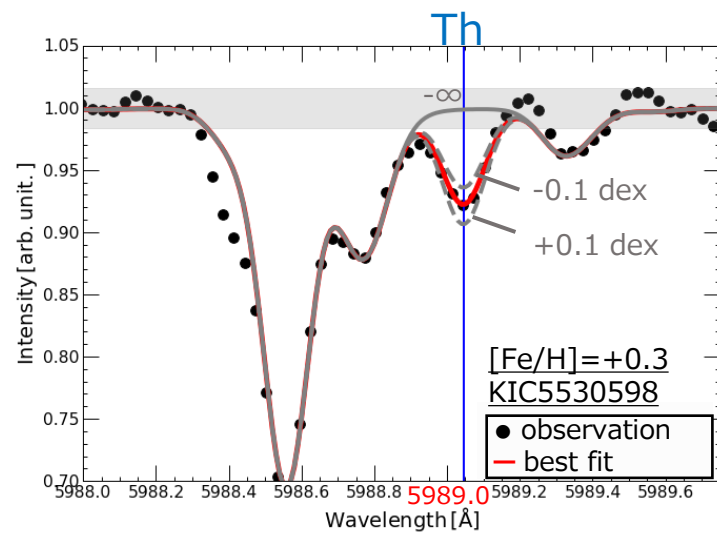
HDSのアーカイブデータと、2 m級の望遠鏡で十分観測できる明るい巨星 ( $8 < V_{\text{mag}}$ ) を含む**41天体**を対象とした。S/Nは100 - 200程度, 波長域は 5000 - 7000 Å。

(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

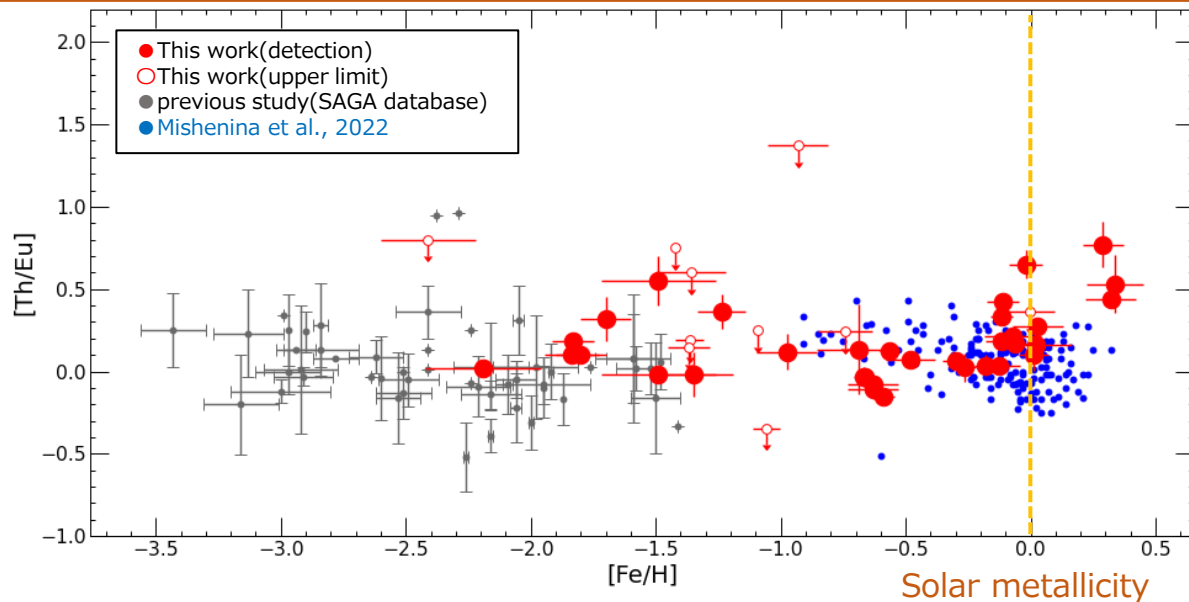
# 元素組成の見積もり

大気パラメータとともにTh, Euの組成を見積もった(SPTOOL; Kurucz 1993, Takeda et al. 2002)。



(図15) 今回観測した天体のThの吸収線

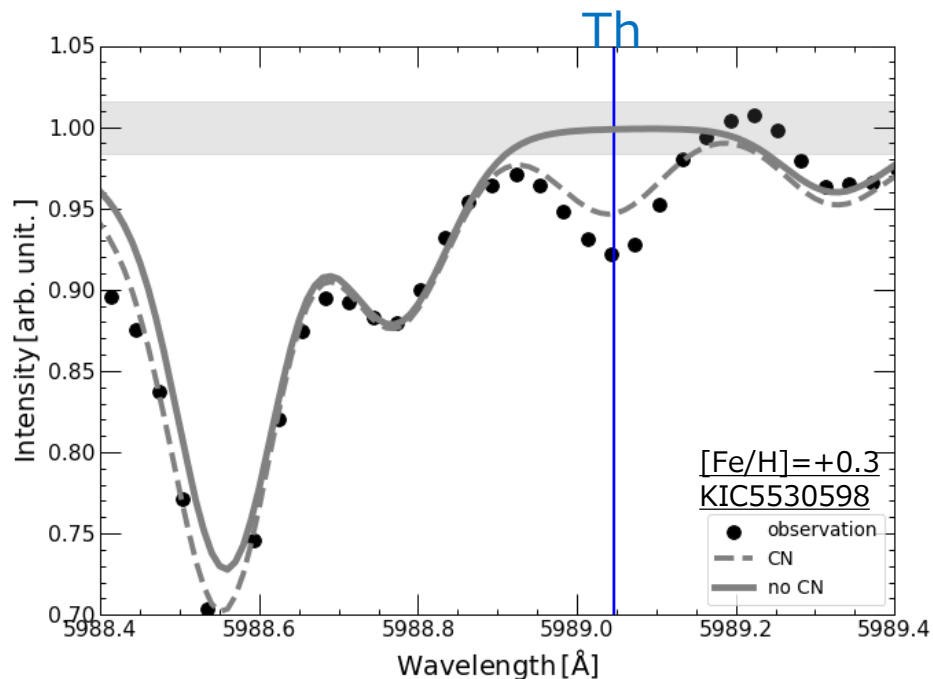
# 金属量に対する[Th/Eu] の分布



(図16) 金属量に対する[Th/Eu] の分布

- 金属量に対する**[Th/Eu]**は**ほぼ一定**の傾向。  
これらの星ではThとEuが1種類のイベントによって合成された可能性  
がある。
- 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**、  
**[Fe/H]  $\sim -0.7$ でも低い値**を示した。

## CN分子の吸収線の混合



(図17) KIC5530598([Fe/H]=+0.3)のスペクトル

CN分子の吸収線を考慮した場合、[C/Fe]が0.2 dex増加すると、[Th/Fe]は0.1 dex減少。

金属量の高い星でTh組成を高く見積もる原因となり得る。

# まとめと展望

**問題** 恒星大気の化学組成の観測は中性子星合体のみで説明できないなど、rプロセス起源は明らかでない。

**目的** rプロセスの起源を明らかにするため、5989 Åの吸収線を使って  $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}]$  の天体でThを検出する。

**結果考察** 41個の巨星の高分散分光観測によるデータを解析。  
**[Fe/H]<0 では[Th/Eu]はほぼ一定の傾向**  
 これらの星ではThとEuの組成が1種類のイベントによって合成された可能性がある。

**0<[Fe/H]では高い[Th/Eu]を示す**  
 [Th/Eu]が高い原因として、CN分子の吸収線の混合が考えられる。

**展望**  $V_{\text{mag}} \leq 8$ であれば口径2m で元素組成の見積もりが可能。  
 高分散分光と高いS/Nが必要なため、明るい金属欠乏星の探査も進められている(cf. 岡田さん)。

今後は、軽元素も含めた複数種の元素組成も調べるとともに、 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ や0以上の観測候補も探して高分散分光観測を行いたい。  
 せいめい/GAOESでも波長域が広がり5989 Åが観測できると嬉しいです。

ご清聴ありがとうございました