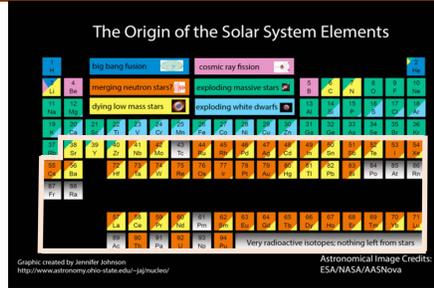


金属欠乏星の観測では、rプロセス元素のThがEuに対して過剰な星が存在し、また、太陽金属量程度の星では、[Th/Eu]に金属量依存の傾向が示されるなど、rプロセスの多様性が示唆されている。Thは検出できる吸収線が極めて限られ、主に用いられている4019 Åはブレンドが強く、低金属かつrプロセス過剰な星以外は検出が困難である。そこで、なゆた/MALLS、ぐんま/GAOESの観測とすばる/HDSのアーカイブ(SMOKA)を用いて、弱いブレンドの少ない5989 Å吸収線からトリウム組成を得た。-2 ≤ [Fe/H] ≤ 0で、[Th/Eu]過剰な星はみられなかった。また、金属量依存の傾向はみられなかった。先行研究では低金属量でThが効率的に合成されると示唆されたが、本研究の天体は主に単一のイベントの元素合成の結果を反映した可能性がある。

### 元素の起源と恒星の化学組成

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。

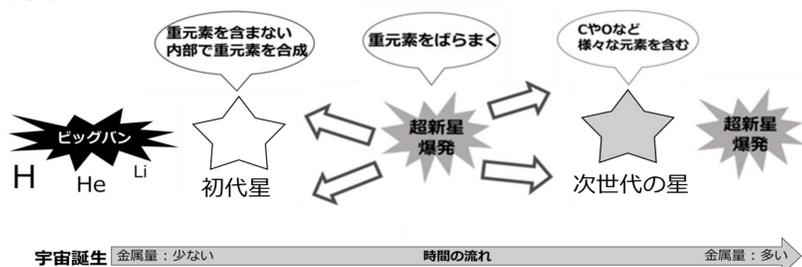
2017年に重力波が観測され、(e.g. Tanaka et al., 2017) 中性子星合体がrプロセス起源と考えられている一方、磁気駆動型超新星など他の起源(e.g. Nishimura et al., 2015)も提案されている。



(図1) 周期表。水素、ヘリウム、リチウムはビッグバン元素合成、鉄までの元素は恒星内部の核融合反応で合成される。

### 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。



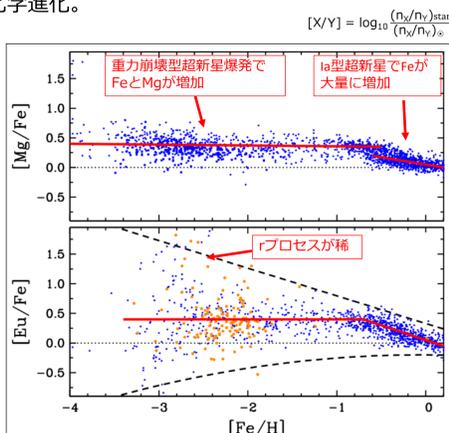
(図2) 銀河の化学進化。

様々な金属量の恒星を観測し、化学組成を調べることで、起源となる現象を推定できる (e.g. Kobayashi et al., 2006)。

- Mg: 恒星内部、重力崩壊型超新星で合成
- Fe: 恒星内部、超新星で合成
- I a型超新星で合成量が多い
- Eu (ユーロピウム): rプロセスで合成

rプロセスはその起源が複数あるか、

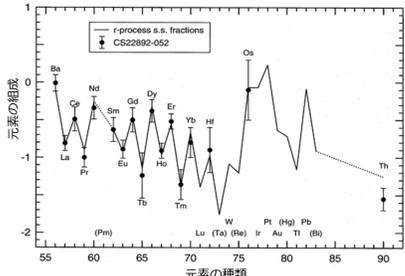
具体的なイベントは何か議論の対象である。(図3) 銀河系の恒星の(a)Mg,(b)Euの化学進化 (Cowan et al., 2021)。



### 金属欠乏星の化学組成の観測

rプロセスのユニバーサリティー  
 金属欠乏星(古い星)と、太陽(新しい星)で同じ組成パターンを示す。

rプロセスは毎回同じ割合で元素を合成する可能性を示唆。

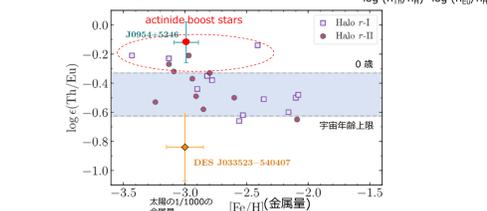


(図4) rプロセス元素が豊富な金属欠乏星と、太陽の元素組成パターンの比較 (Snedden et al., 1996)。

### アクチノイドブースト星

rプロセス過剰な金属欠乏星の約30%でTh (トリウム)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。

rプロセス起源の多様性を示唆し、rプロセス起源が単一か複数かが議論されている。



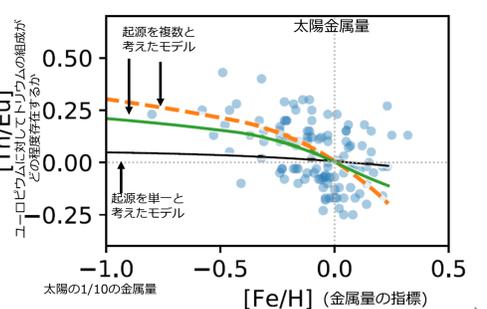
(図5) Euに対してTh組成が過剰な恒星の観測 (Holmbeck et al., 2018)。

### rプロセス元素トリウムの観測

トリウム(Th)はrプロセス元素かつ、半減期140億年の放射性元素。太陽金属量程度の恒星の観測では、Euに対するThの組成比が金属量に対して減少することが示された (Mishenina et al., 2022)。

この結果は金属量の多い星でも複数のrプロセス起源による違いがみられることを示唆する。

一方で金属量が太陽の1/100程度の恒星ではThの観測が少なく、金属量に対するTh組成の分布は不明である。この領域は宇宙初期と太陽誕生の中間の時期での銀河系のrプロセス起源の多様性と化学濃縮を反映し、銀河の化学進化を推定する手掛かりとなる。



(図6) 太陽金属量程度の恒星の観測 (Mishenina et al., 2022)。

### 目的 rプロセスの起源を制限するため、-2 ≤ [Fe/H]の恒星で5989 Åの吸収線を用いてThを検出する。

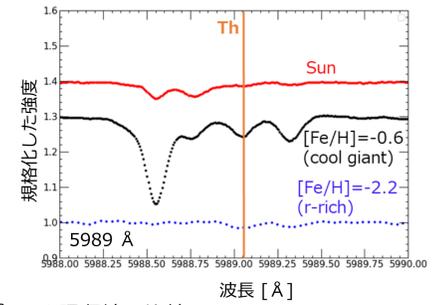
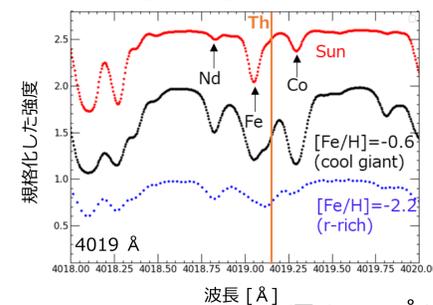
### 観測・解析

なゆた/MALLS、ぐんま/GAOESでの高分散分光観測で得たデータと、すばる/HDSのアーカイブ(SMOKA)データを解析した。2 m級の望遠鏡で十分観測できる明るい恒星 (8<V等級)を含む**36天体**を対象とした。波長分解能は35,000 (MALLS), 70,000 (HDS, GAOES), S/Nは100 - 200程度、波長域は5000 - 7000 Å。



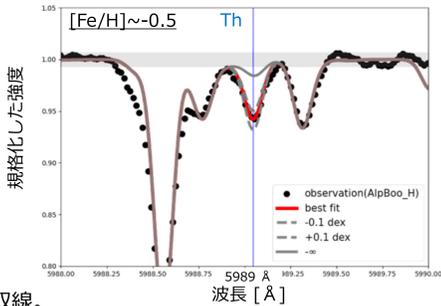
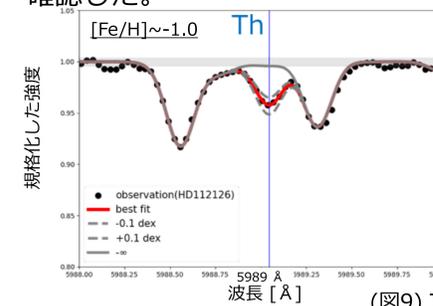
(図7) 2 mなゆた望遠鏡、ぐんま天文台 150 cm望遠鏡、8m すばる望遠鏡。

Thの吸収線は弱いものが多く検出が難しい。これまで使われてきた4019 Åの吸収線は高金属量ほど他の元素の吸収線と混合する。そこで本研究ではこれまで注目されていなかった**5989 Å**の吸収線に着目し、Thの検出を目指した。



(図8) 4019 Åと5989 ÅのTh吸収線の比較。

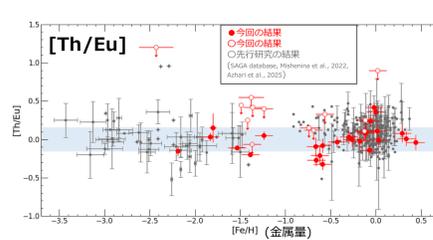
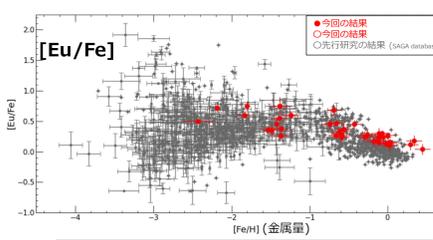
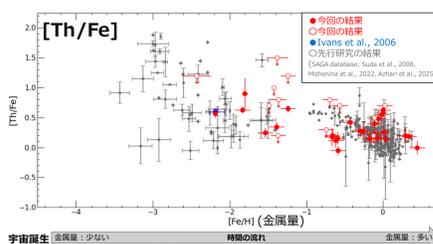
観測スペクトルとモデルスペクトルを比較し、元素組成を見積もった (SPTOOL; Takeda et al., 2002, Kurucz 1993)。今回データを得た36天体中、**23天体でトリウムを測定することができた**。また、金属欠乏星の観測で4019 Åから得られた値と一致することも確認した。



(図9) Thの吸収線。

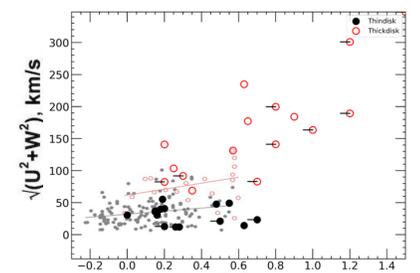
### 結果・考察

#### Th/Eu組成比とアクチノイドブースト星



(図10) 本研究と先行研究の観測結果。

#### 銀河系内の運動との関係



(図11) 恒星の空間運動とTh組成 (c.f. Bensby et al., 2014)。

[Fe/H] ~ -0.7では、先行研究より**低いTh組成**が得られた。-2 ≤ [Fe/H] ≤ 0では、**[Th/Eu] はほぼ一定**、金属欠乏星で見られたような**アクチノイドブースト星は存在しなかった**。

先行研究では低金属量でThが効率的に合成されると示唆されたが、本研究の天体は主に単一のイベントの元素合成の結果を反映した可能性がある。

先行研究と同様に、恒星の空間運動とTh組成の間に相関はみられなかった。本研究ではより広い金属量範囲のを含むため、先行研究より運動のばらつきが大きく見られた。