

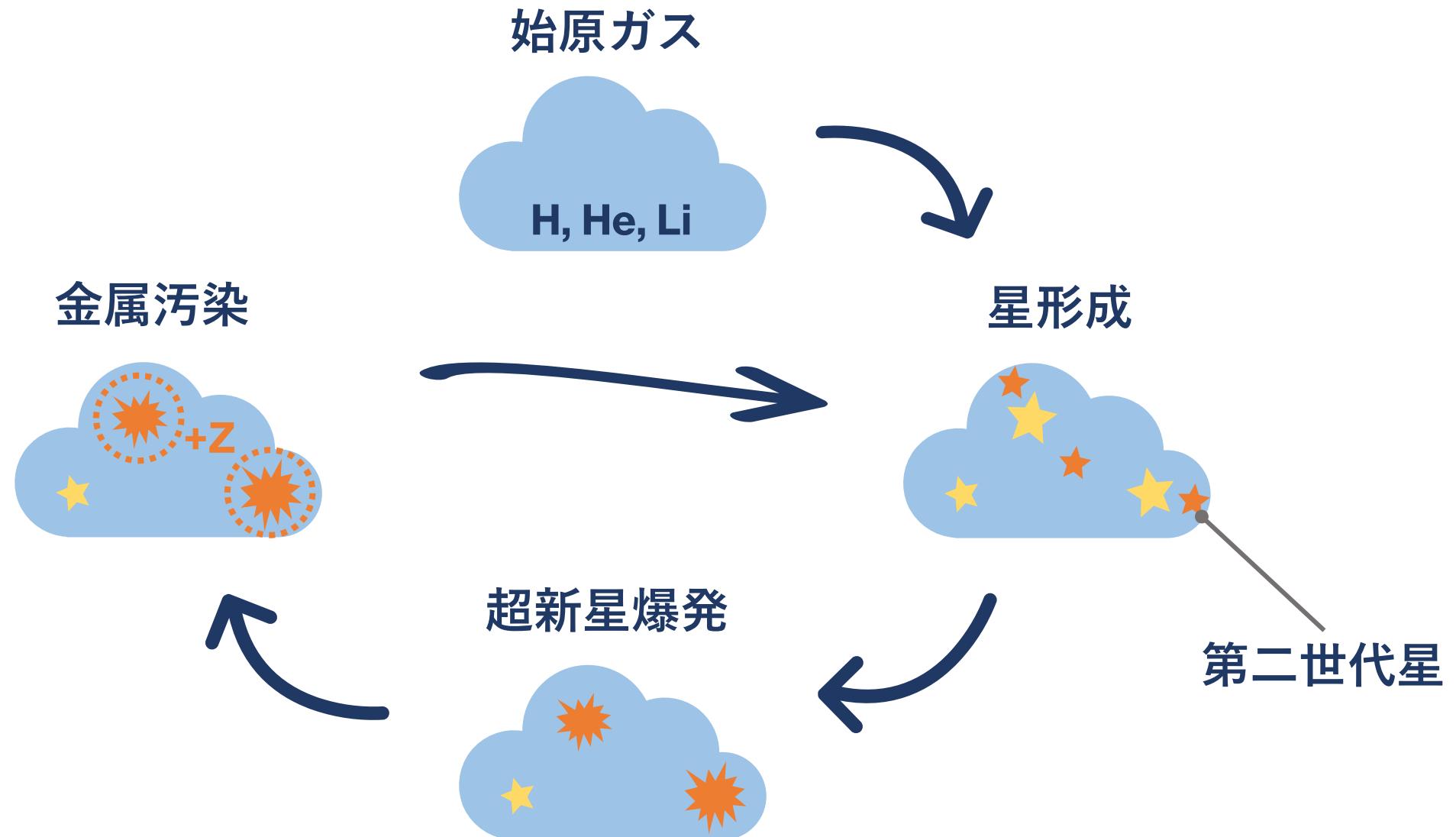
初代星・初代銀河研究会 2025

# 明るい金属欠乏星の高分散分光観測

岡田 寛子（兵庫県立大学/国立天文台）

松野允郁(Heidelberg University), 富永望, 青木和光(国立天文台),  
本田敏志(兵庫県立大学), 須田拓馬(東京工科大学), 石垣美歩(国立天文台),  
古塚来未(兵庫県立大学), 諸隈智貴(千葉工業大学), 前田啓一(京都大学)

# 銀河化学進化



# 金属欠乏星

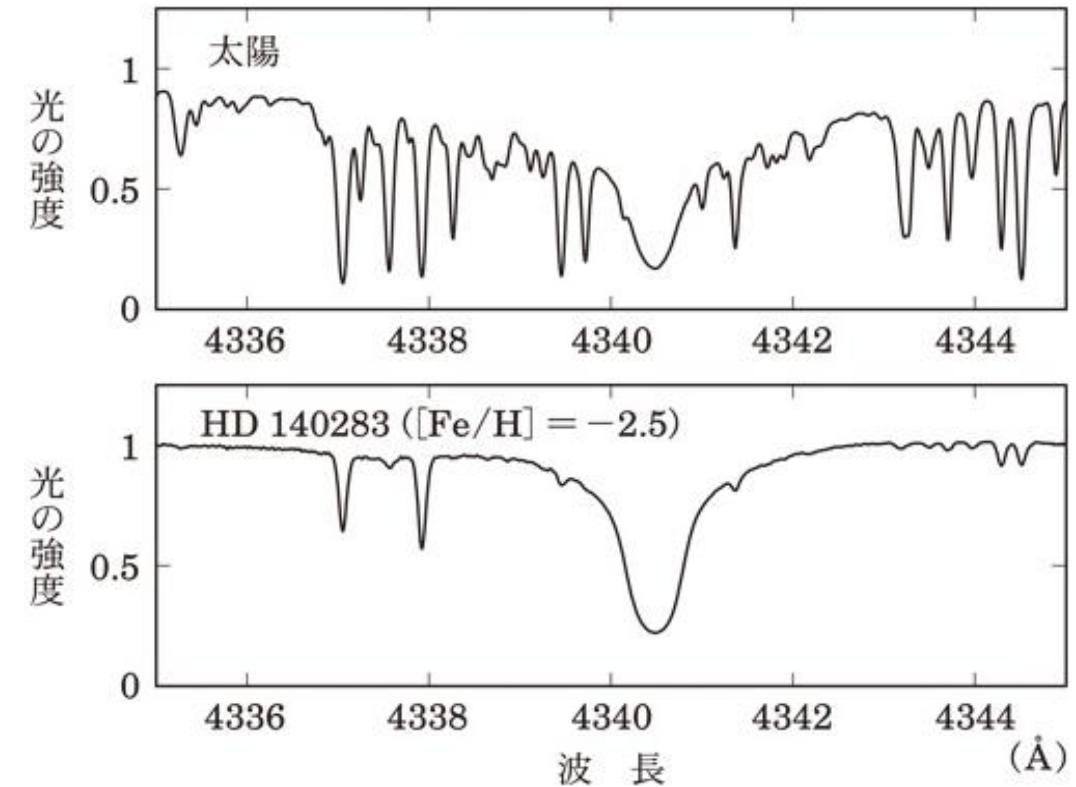
## ● 金属欠乏星

- 太陽に比べ重元素の含有量が少ない恒星
- 恒星大気に形成当時(=宇宙初期)の化学情報を保持している

## ● 恒星の元素組成

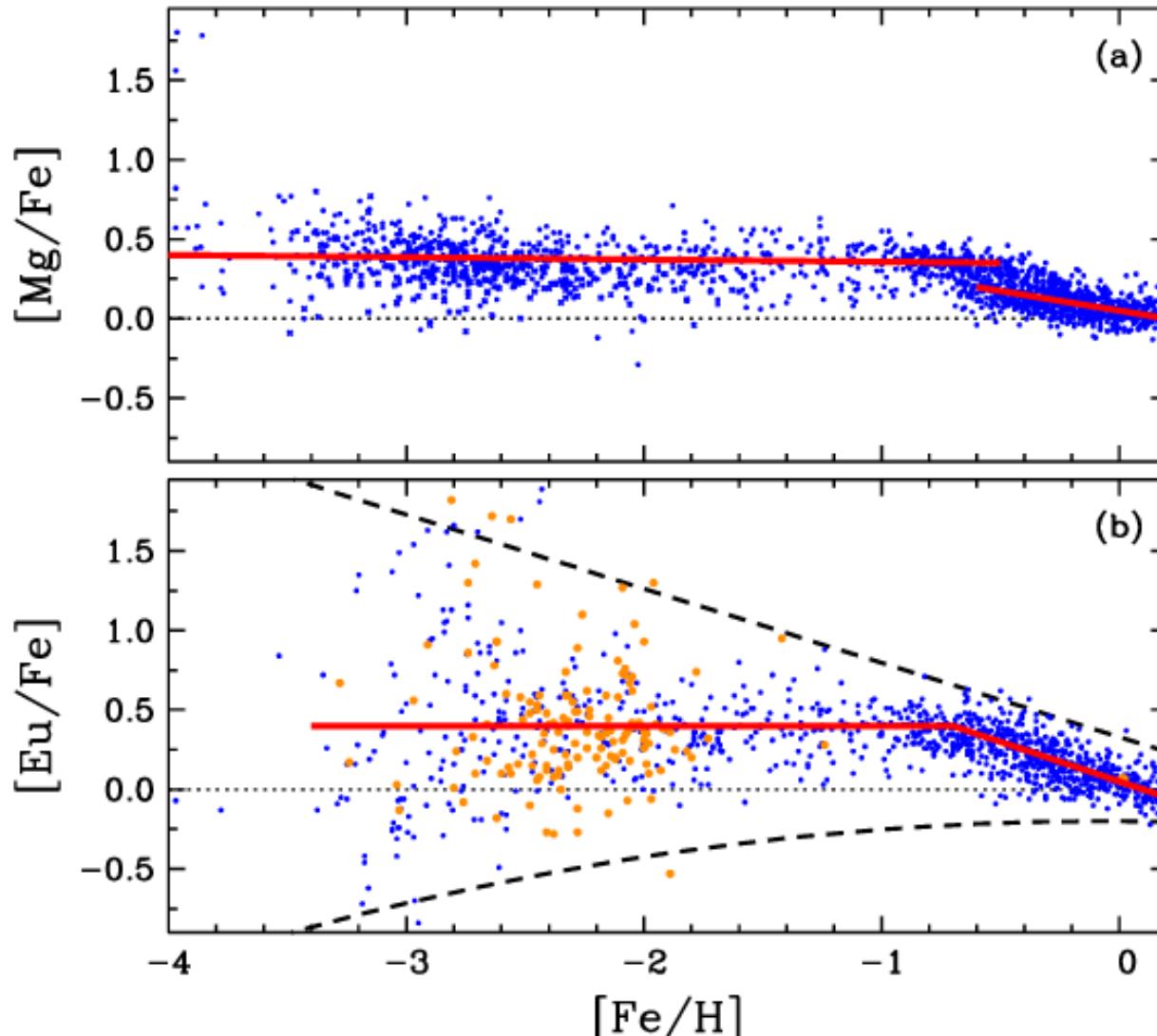
- 元素Yに対する元素Xの個数比を太陽組成で規格化して常用対数で表す

$$[X/Y] = \log \frac{(n_X/n_Y)_{\text{star}}}{(n_X/n_Y)_{\text{sun}}}$$



宇宙初期に誕生した金属欠乏星の化学組成を観測的に明らかにすることは、初代星の性質や元素合成、銀河化学進化の初期段階を理解する上で重要。

# 金属欠乏星観測からわかる銀河化学進化



- **Mg (α元素)**
  - 大質量星・重力崩壊超新星に由来
  - 発生頻度が高く、  
星間ガスに均一に混ざりやすい  
→ 低金属量領域も分散が小さい
- **Eu (中性子捕獲元素)**
  - 中性子星合体などの  
希少なイベントが起源
  - 初期宇宙では混合が不完全  
→ 低金属量領域で大きな分散

# 中性子捕獲元素

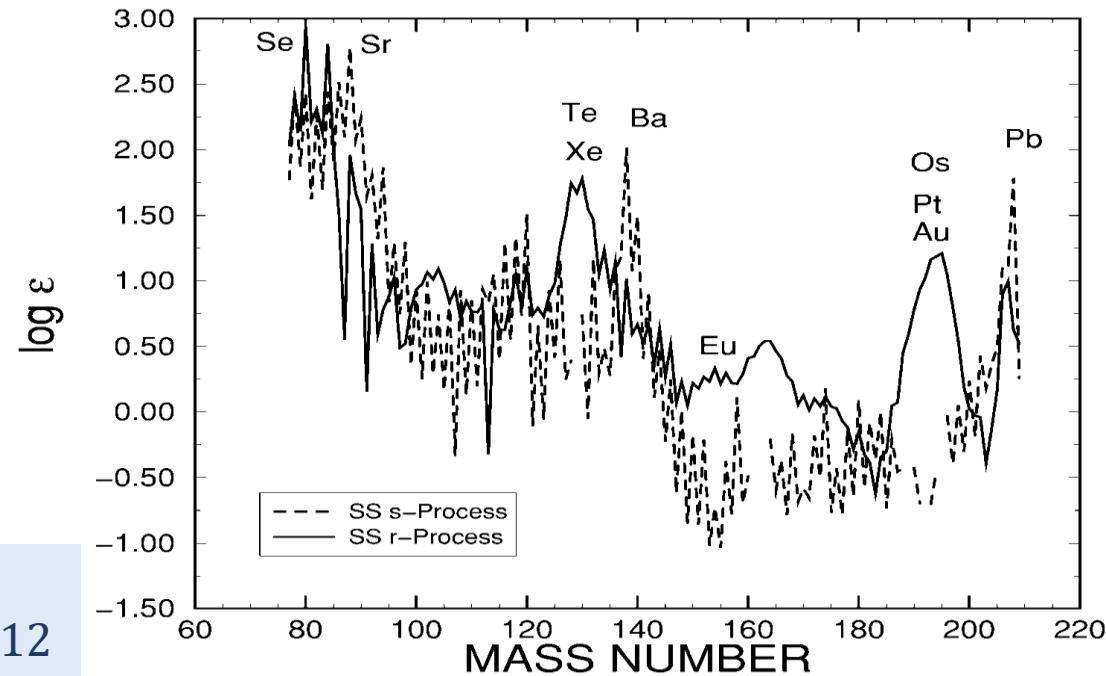
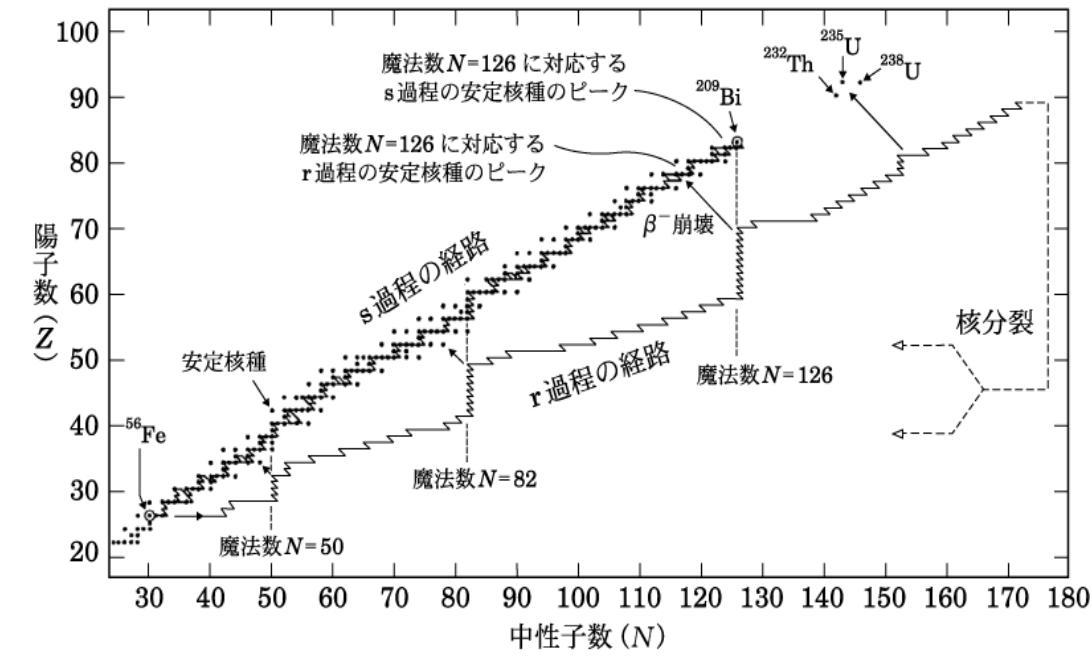
## ● 中性子捕獲反応

- s プロセス：
  - $\beta^-$ 崩壊より遅く中性子を捕獲
  - 安定核種に沿って進む
  - 起源：中質量星の進化段階(AGB)
- r プロセス：
  - $\beta^-$ 崩壊より速く中性子を捕獲
  - 中性子過剰な不安定核へと進む
  - 起源：中性子星合体や一部の超新星

## ● 太陽系の中性子捕獲元素の寄与割合：

- Sr : ~85% s, ~15% r
- Ba : ~81% s, ~19% r
- Eu : ~6 % s, ~94% r

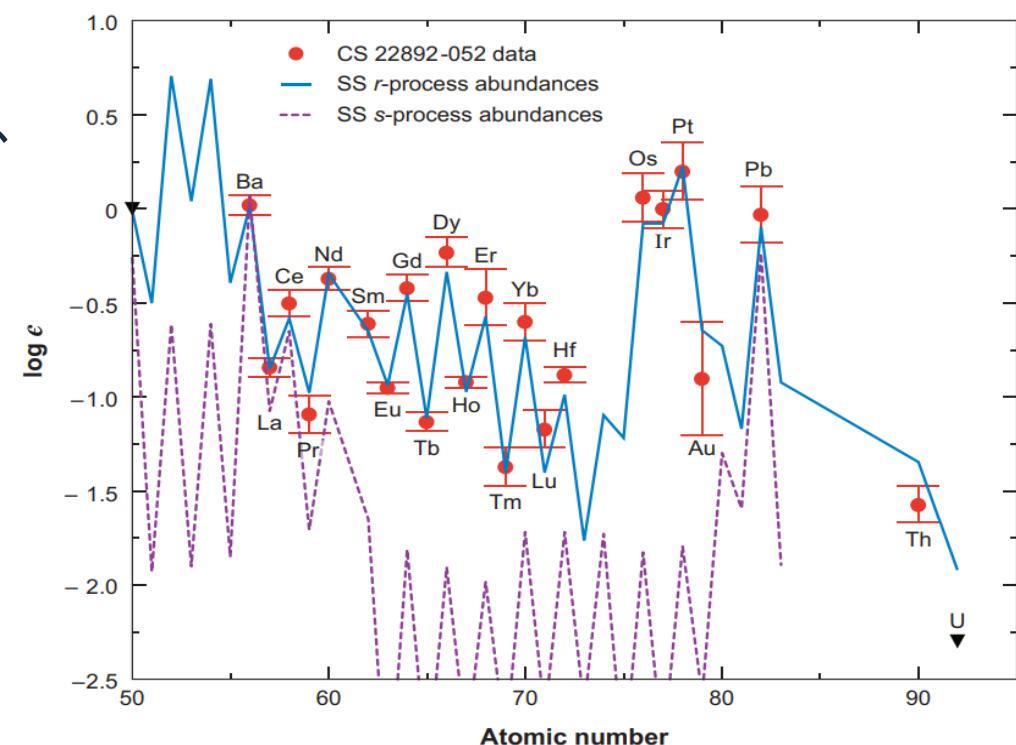
$$\log \varepsilon(X) = \log_{10}(n_X/n_Y)_{\text{star}} + 12$$



Truran et al. 2002

# 金属欠乏星の中性子捕獲元素

- 金属欠乏星の中には、Eu 増強 (R-Process Enhanced; RPE) 星が存在
  - r-I :  $+0.3 < [\text{Eu}/\text{Fe}] < +1.0$ ,  $[\text{Ba}/\text{Eu}] < -0$
  - r-II :  $+1.0 < [\text{Eu}/\text{Fe}] < +2.0$ ,  $[\text{Ba}/\text{Eu}] < -0$
  - r-III :  $+2.0 < [\text{Eu}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Ba}/\text{Eu}] < -0.5$
- RPE 星の中性子捕獲元素の存在量パターンは、太陽系 r プロセス元素存在量パターンと一致  
→ r プロセスは金属量に依らない普遍性

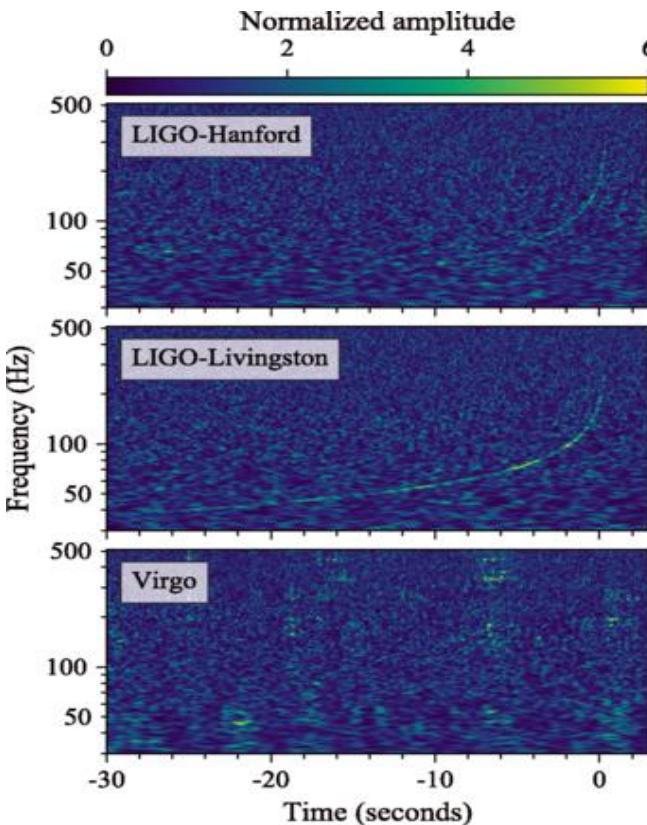


# 中性子星合体によるrプロセス元素合成

近年のマルチメッセンジャー観測(重力波の検出、対応天体の探査・追観測)によって、  
中性子星合体によるrプロセス元素合成が初めて直接確認された。

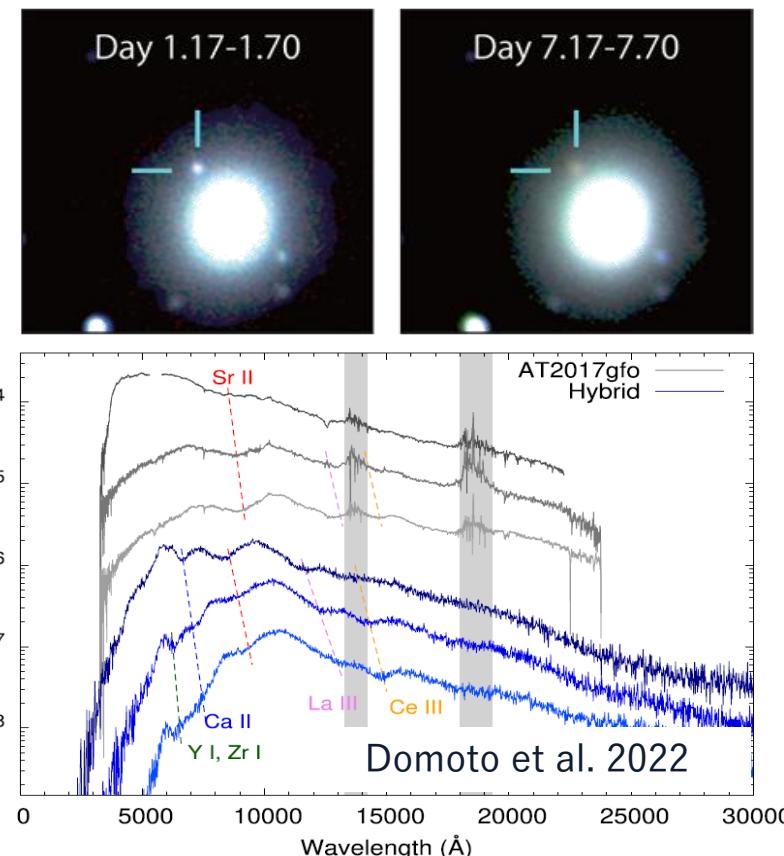
## 重力波GW170817の検出

Abbott et al. 2017



## 電磁波放射(キロノバ)の観測

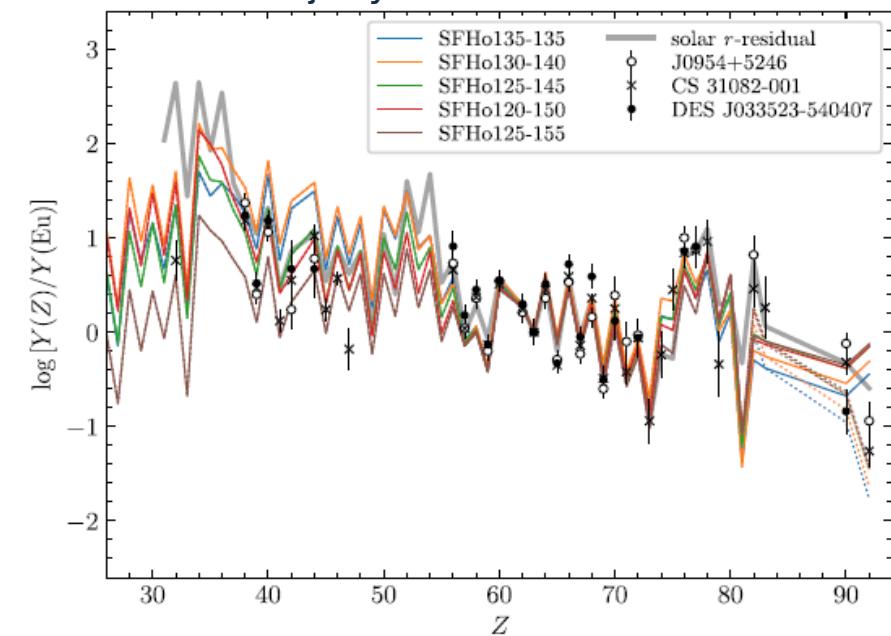
Utsumi et al. 2017; Pian et al. 2017



## 中性子星合体の元素合成

### 理論モデルとの比較

Fujibayashi et al. 2020



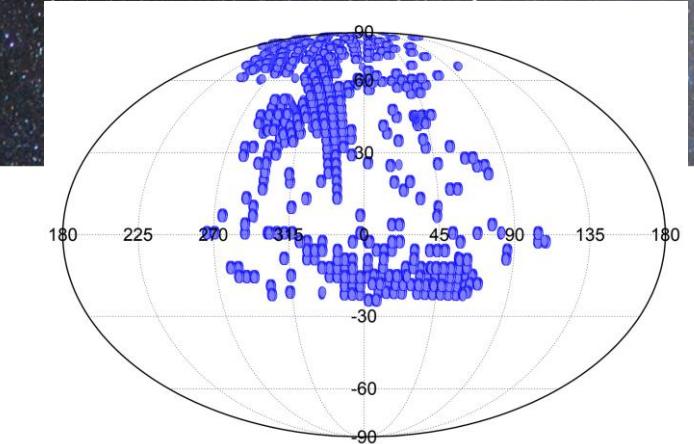
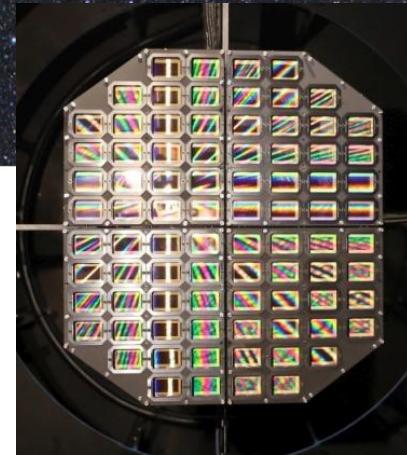
NSMですべてのrプロセスを説明できるのか？

# 金属欠乏星探査

## Tomo-e Gozen 狹帯域測光探査

Okada et al. (to be submitted)

- 395nm(CaHK), 433nm (CH),  
656nm (Ha), 411nm をカバーする  
4 種類の狭帯域フィルタを  
Tomo-e Gozen Cameraに搭載し  
測光観測を実施
- 観測領域 : ~7500 deg<sup>2</sup>
- 12等より明るい天体 :  
50万天体以上
- [Fe/H]< -2 : ~2500天体



## Gaia XP/RV spectra

- **Ca Triplet** 解析 Matsuno+2024
- **CaHK** 測光 Martin+2024
- **ML** Andrae+2023, Zhang+2023

複数のカタログを組み合わせて候補選択

# 観測・解析

## ● 観測

- Subaru/HDS を用いた可視分光観測  
(2024年7月, 2025年2月, 4月, 6月)
- 観測波長域 : 4030 – 6730 Å
- 波長分解能 R : ~85,000
- 観測時間 : 合計~2.5夜 (64天体を観測)
- 信号雑音比 S/N > 100 (@6700 Å)

Okada et al., in prep.

## ● 化学組成解析 (w/iSpec, Blanco-Cuaresma+2014)

- 等価幅測定 : Mg, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni
- 合成スペクトル : C, Na, V, Zn, **Sr, Y, Zr, Ba, Eu**
- 検出限界から上限値を決定

# 結果：rプロセス元素組成

Okada et al., in prep.

# 結果：RPE星の同定・分類

Okada et al., in prep.

# r-III 星の abundance pattern

Okada et al., in prep.

# BH-NS のモデル (Wanajo et al. 2024) との比較

Okada et al., in prep.

# まとめ

Okada et al., in prep.