

# 超金属欠乏星で探る weak r-process の起源

岡田 寛子（兵庫県立大学）

青木 和光、富永 望（国立天文台）、本田 敏志（兵庫県立大学）



## ■ 元素の起源

1 **H** ビッグバン 2 **He**

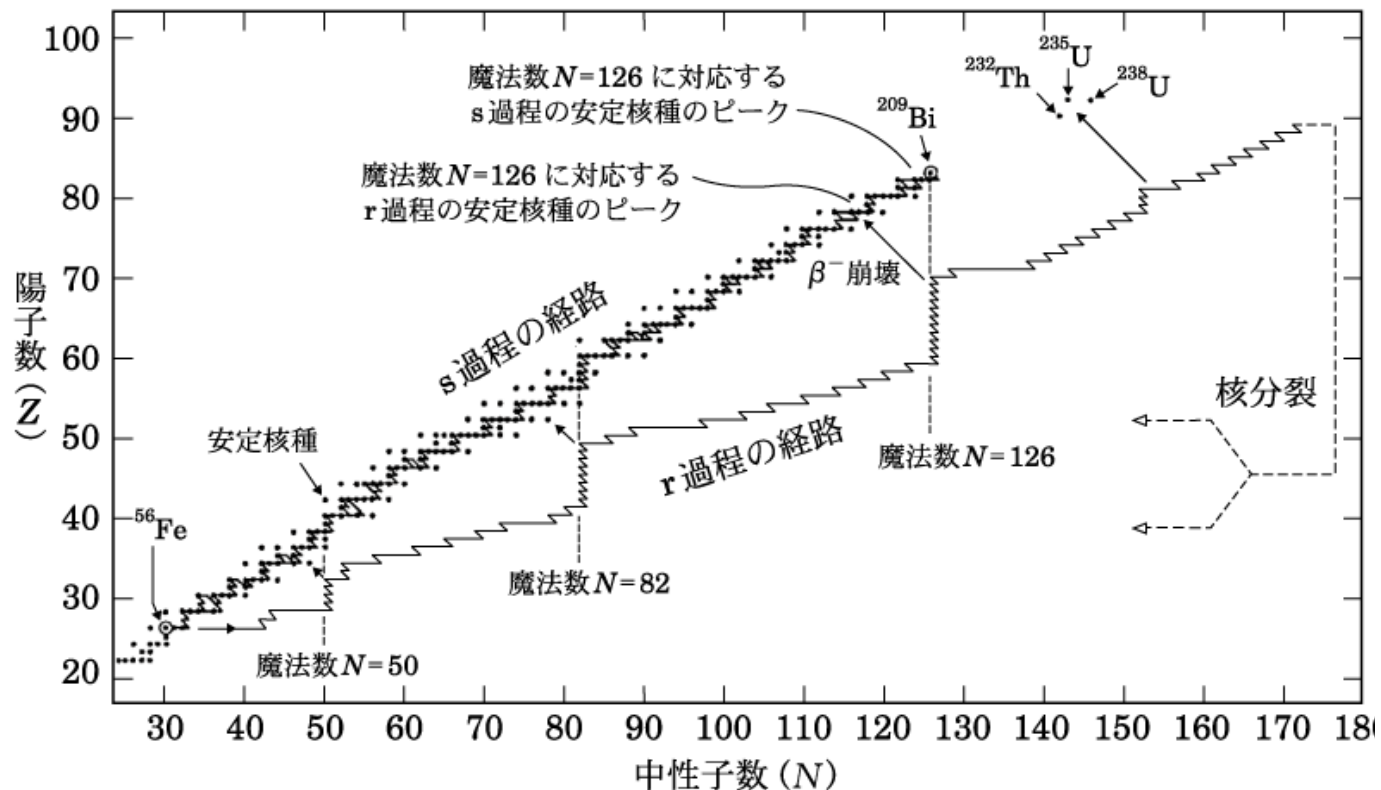
3 <b>Li</b>	4 <b>Be</b>											5 <b>B</b>	6 <b>C</b>	7 <b>N</b>	8 <b>O</b>	9 <b>F</b>	10 <b>Ne</b>
11 <b>Na</b>	12 <b>Mg</b>											13 <b>Al</b>	14 <b>Si</b>	15 <b>P</b>	16 <b>S</b>	17 <b>Cl</b>	18 <b>Ar</b>
19 <b>K</b>	20 <b>Ca</b>	21 <b>Sc</b>	22 <b>Ti</b>	23 <b>V</b>	24 <b>Cr</b>	25 <b>Mn</b>	26 <b>Fe</b>	27 <b>Co</b>	28 <b>Ni</b>	29 <b>Cu</b>	30 <b>Zn</b>	31 <b>Ga</b>	32 <b>Ge</b>	33 <b>As</b>	34 <b>Se</b>	35 <b>Br</b>	36 <b>Kr</b>
37 <b>Rb</b>	38 <b>Sr</b>	39 <b>Y</b>	40 <b>Zr</b>	41 <b>Nb</b>	42 <b>Mo</b>	43 <b>Tc</b>	44 <b>Ru</b>	45 <b>Rh</b>	46 <b>Pd</b>	47 <b>Ag</b>	48 <b>Cd</b>	49 <b>In</b>	50 <b>Sn</b>	51 <b>Sb</b>	52 <b>Te</b>	53 <b>I</b>	54 <b>Xe</b>
55 <b>Cs</b>	56 <b>Ba</b>	57~71 <b>La-Lu</b>	72 <b>Hf</b>	73 <b>Ta</b>	74 <b>W</b>	75 <b>Re</b>	76 <b>Os</b>	77 <b>Ir</b>	78 <b>Pt</b>	79 <b>Au</b>	80 <b>Hg</b>	81 <b>Tl</b>	82 <b>Pb</b>	83 <b>Bi</b>	84 <b>Po</b>	85 <b>At</b>	86 <b>Rn</b>
87 <b>Fr</b>	88 <b>Ra</b>	89~103 <b>Ac-Lr</b>	104 <b>Rf</b>	105 <b>Db</b>	106 <b>Sg</b>	107 <b>Bh</b>	108 <b>Hs</b>	109 <b>Mt</b>	110 <b>Ds</b>	111 <b>Rg</b>	112 <b>Cn</b>						

恒星の内部

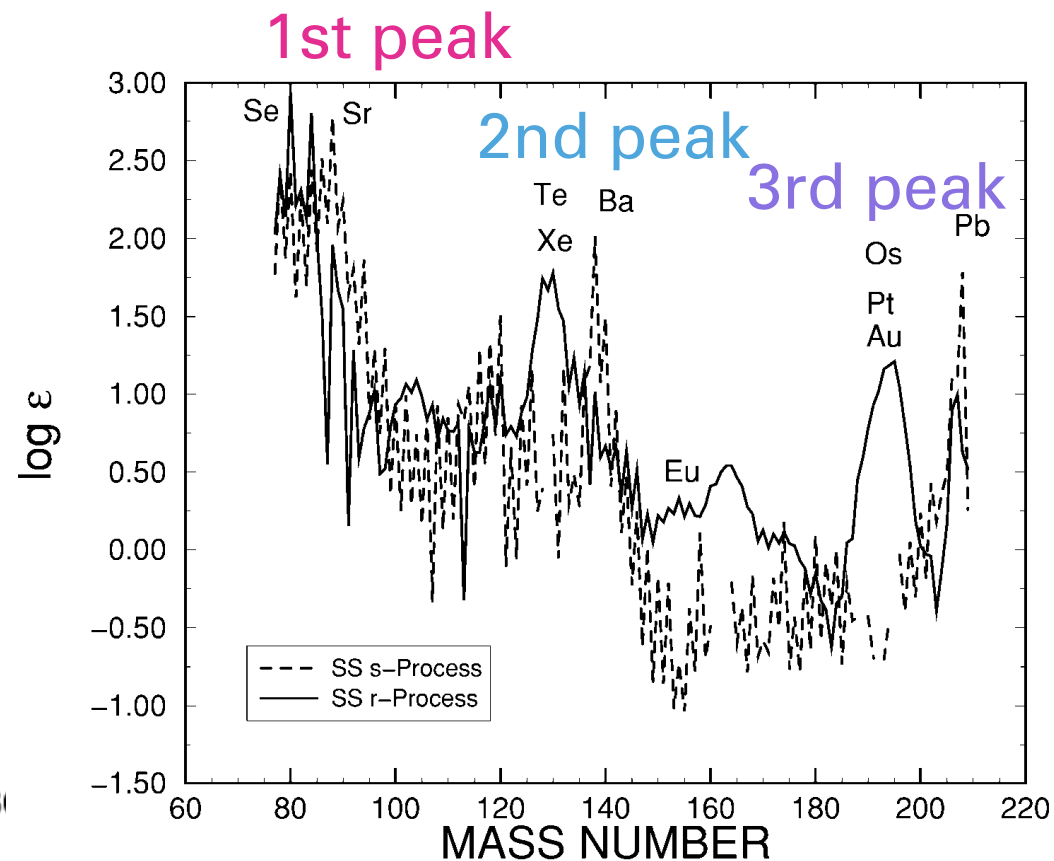
57 <b>La</b>	58 <b>Ce</b>	59 <b>Pr</b>	60 <b>Nd</b>	61 <b>Pm</b>	62 <b>Sm</b>	63 <b>Eu</b>	64 <b>Gd</b>	65 <b>Tb</b>	66 <b>Dy</b>	67 <b>Ho</b>	68 <b>Er</b>	69 <b>Tm</b>	70 <b>Yb</b>	71 <b>Lu</b>
89 <b>Ac</b>	90 <b>Th</b>	91 <b>Pa</b>	92 <b>U</b>	93 <b>Np</b>	94 <b>Pu</b>	95 <b>Am</b>	96 <b>Cm</b>	97 <b>Bk</b>	98 <b>Cf</b>	99 <b>Es</b>	100 <b>Fm</b>	101 <b>Md</b>	102 <b>No</b>	103 <b>Lr</b>

## ■ 鉄より重い元素の起源 = 中性子捕獲反応

Truran et al. 2002



- Slow (s) process  
… AGB星

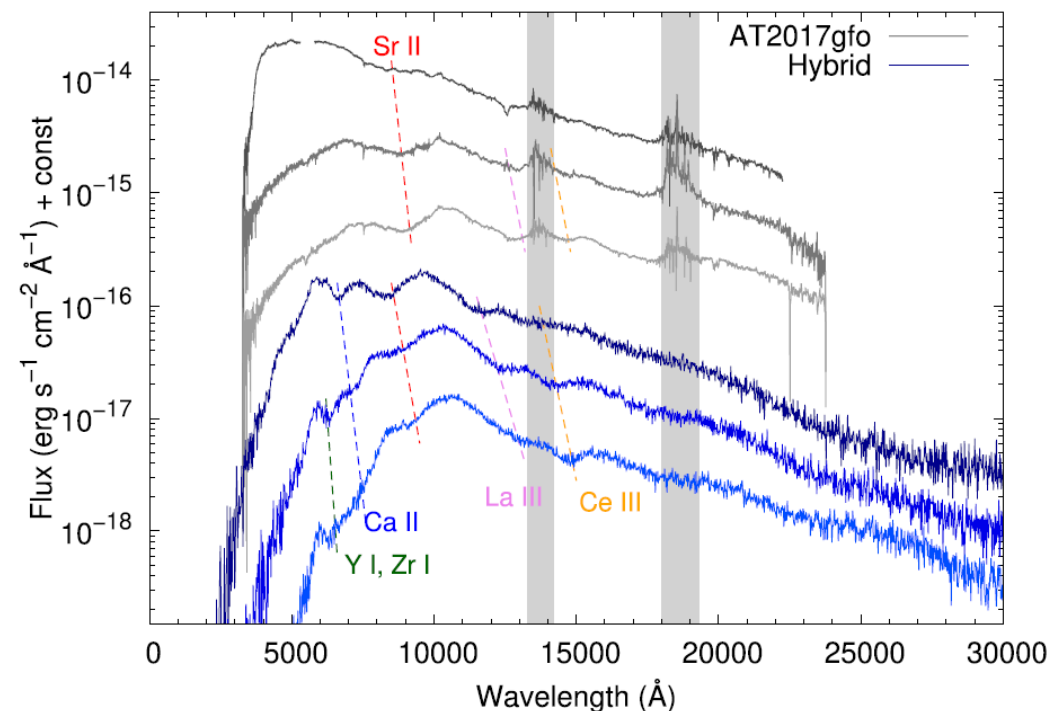
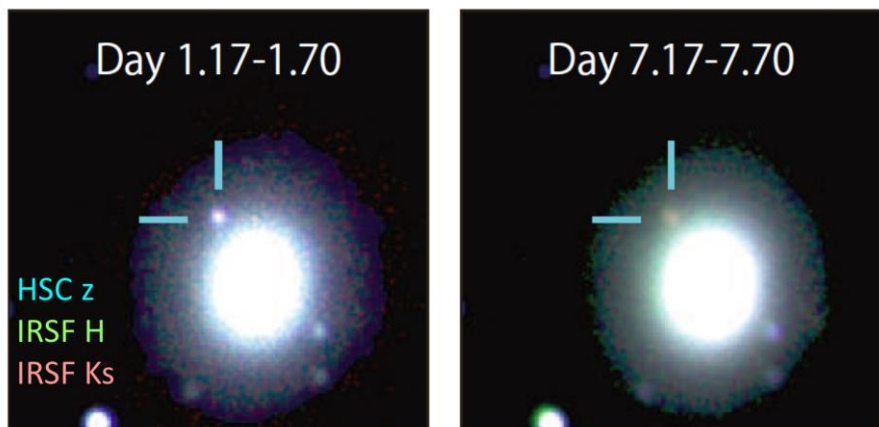


- Rapid (r) process  
… 中性子星合体？ 超新星？

## ■ 中性子星合体による r-process 元素合成

Utsumi et al. 2017;  
Domoto et al. 2022

### GW170817



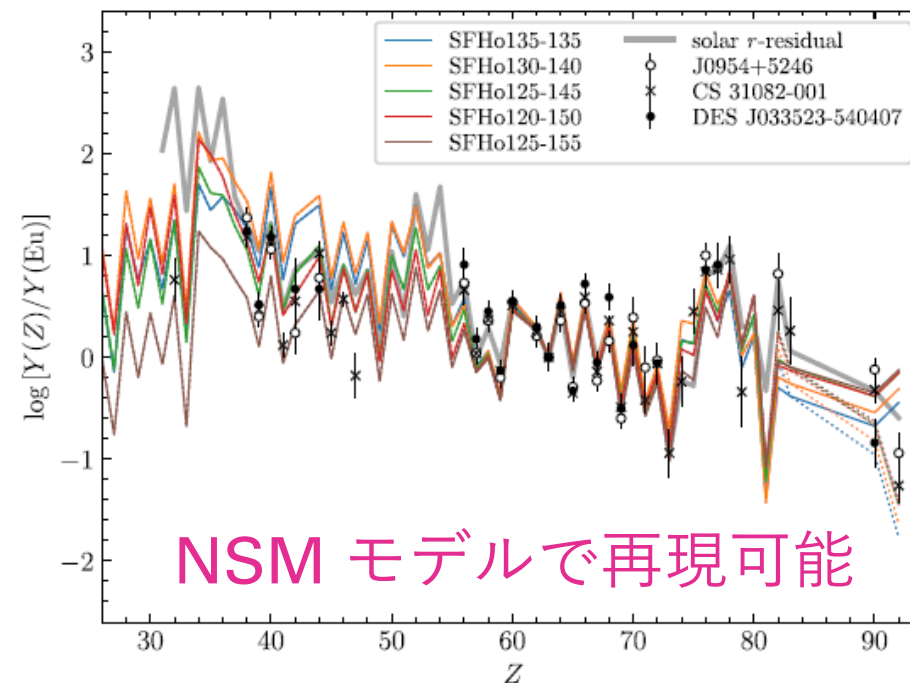
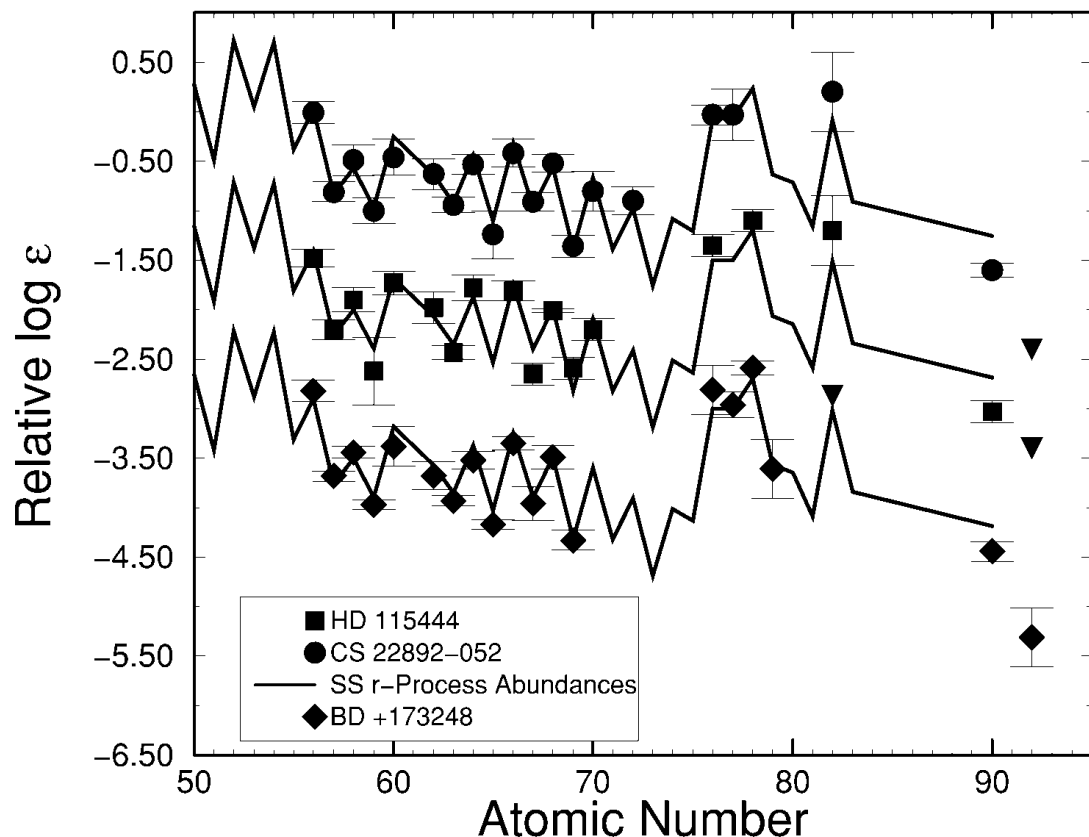
- マルチメッセンジャー観測により、  
中性子星合体による r-process 元素合成を直接確認
- キロノバの近赤外線スペクトルから重元素の吸収線を検出

## ■ 金属欠乏星の観測 ①

e.g., Truran et al. 2002; Sneden et al. 2000;  
Westin et al. 2000; Cowan et al. 2002

- 金属欠乏星の重中性子捕獲元素 ( $Z > 50$ ) の組成は、  
太陽系の r-process 組成と一致  $\rightarrow$  r-process 元素合成の universality

Fujibayashi et al. 2023

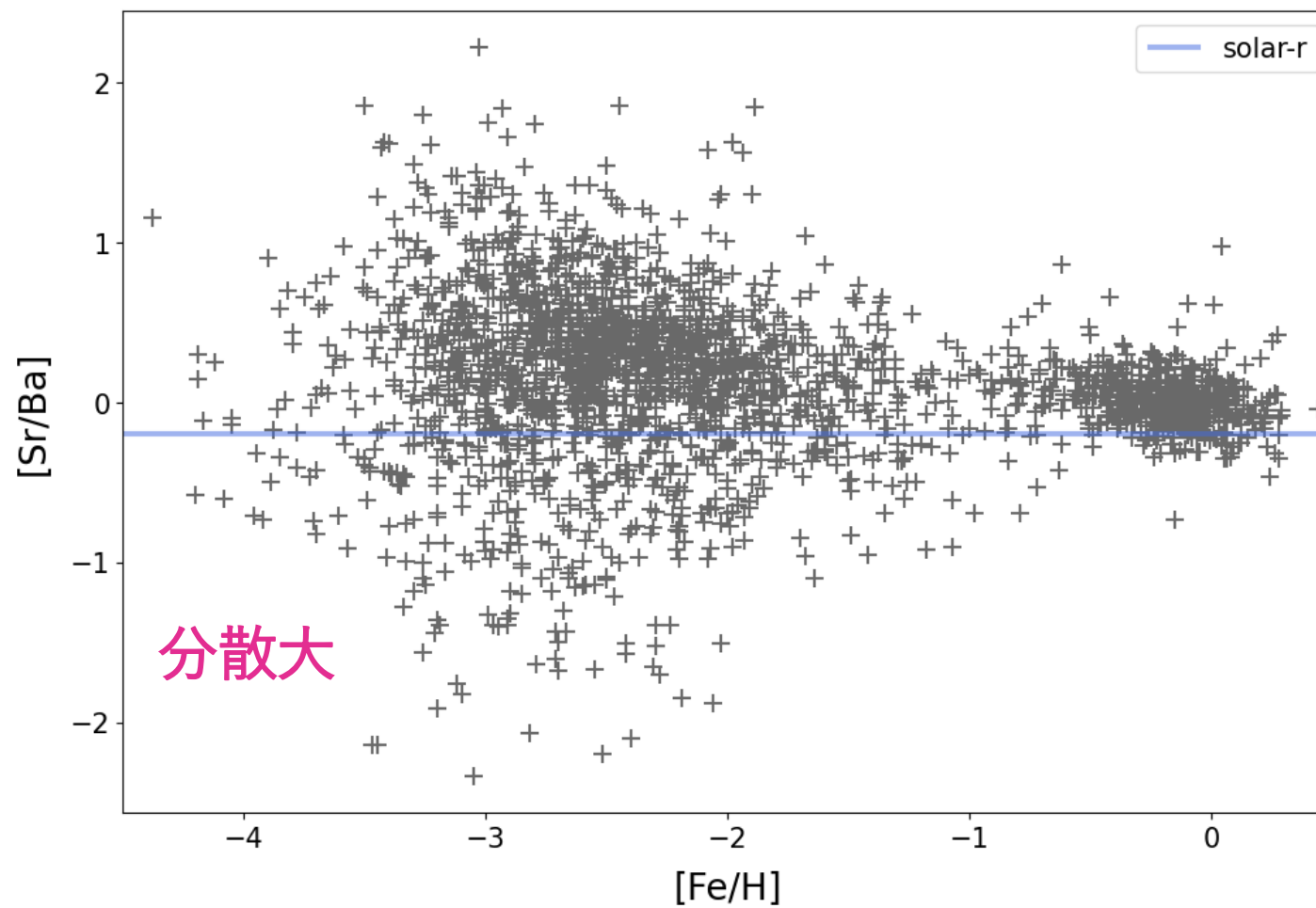


r-process の起源は NSM だけなのか？

## ■ 低金属量での [Sr/Ba]

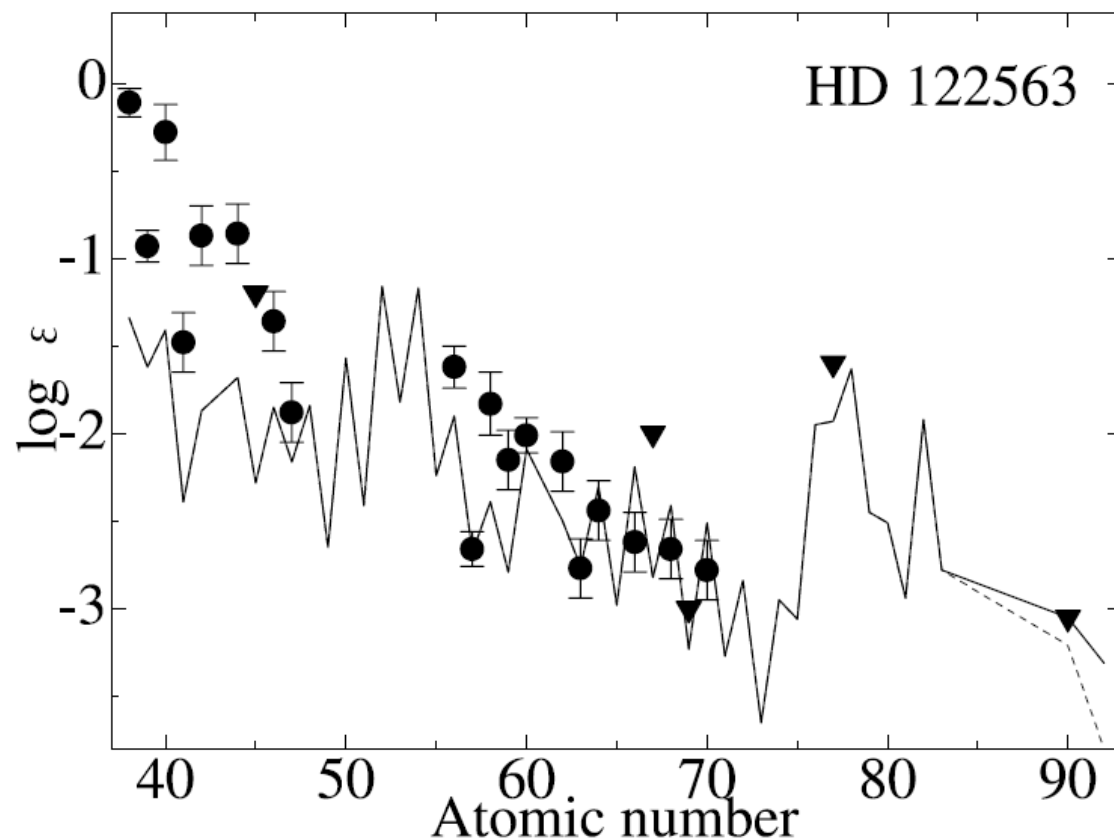
e.g., McWilliam 1998

SAGA database (Suda et al. 2017)



## ■ 金属欠乏星の観測 ②

Honda et al. 2006



- 太陽系の r-process との不一致
- 軽中性子捕獲元素までしか作られていない

軽い中性子捕獲元素までしか作らない  
元素合成サイトがあるのか？

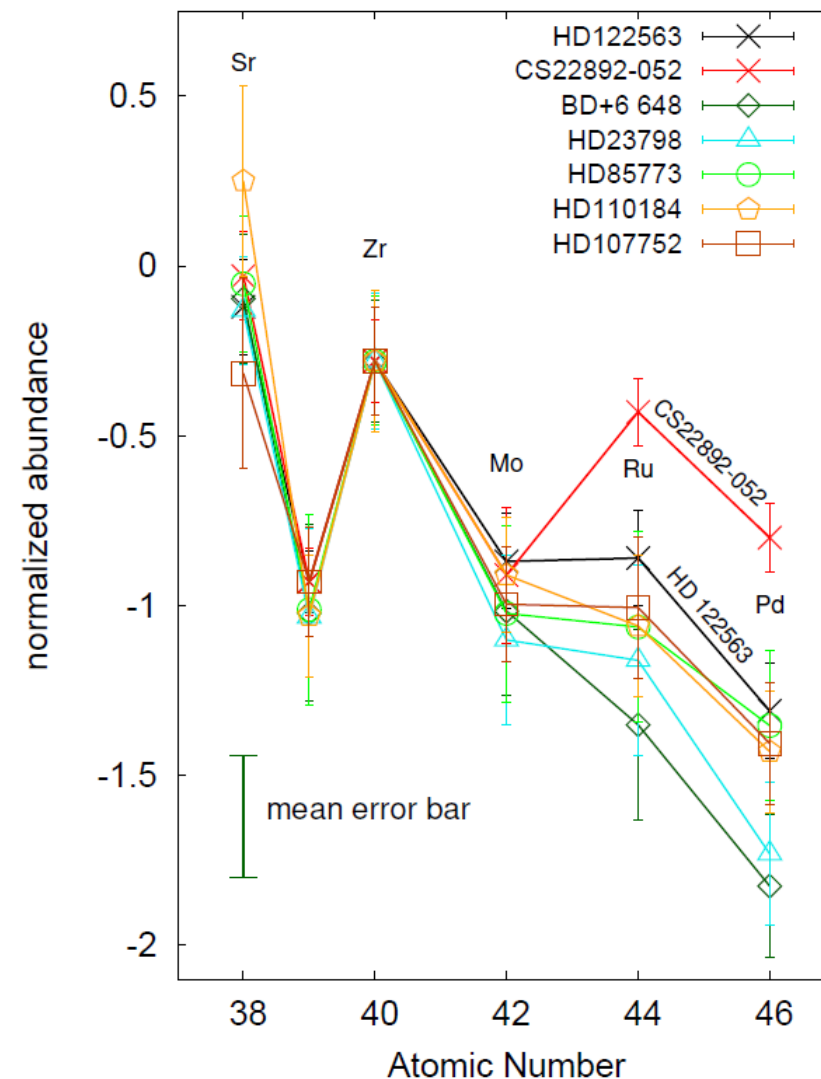
Weak r-process ?

## ■ Weak r-process の多様性

- Aoki et al. 2017 では、weak r-process の兆候を示す金属欠乏星の 1st peak 元素 ( $Z = 38 - 46$ ) の組成を調査
- Ru より重い元素の組成にばらつきがある  
-> weak r-process の多様性を示唆
- しかし、先行研究のサンプルは比較的高金属量 ( $[Fe/H] \sim -2$ ) のため、他の起源も寄与している可能性がある

Weak r-process の起源を制限するためには、より低金属量の星の 1st peak 元素組成を詳しく調べる必要がある

M. Aoki et al. 2017;  
Honda et al. 2006; Sneden et al. 2003

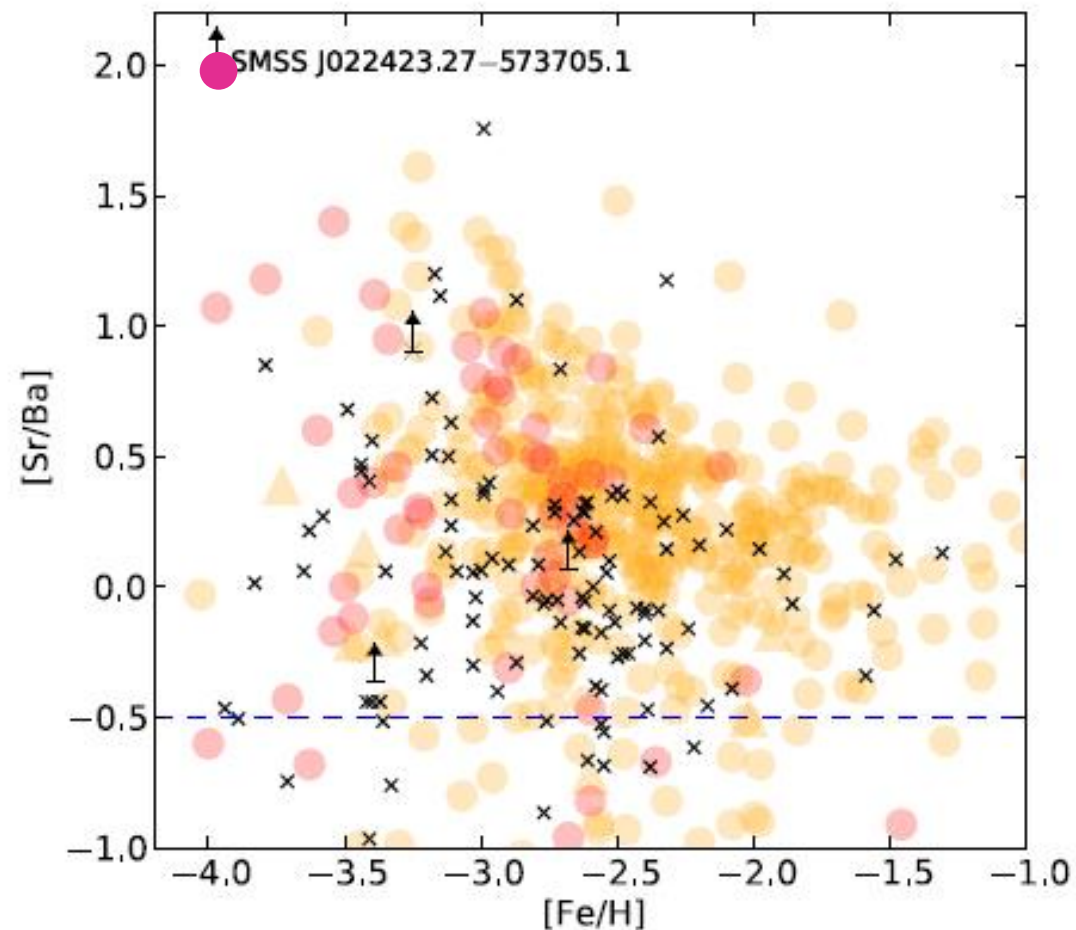




## ■ SMSS J022423.27-573705.1

Jacobson et al. 2015

- SkyMapper Southern Sky Survey で発見された金属欠乏星 ( $V = 13.4$ )
  - $[\text{Fe}/\text{H}] = -3.97$
  - $[\text{Sr}/\text{Ba}] > 2.0$   
\* Ba は検出できなかった
  - 重めの 1st peak ( $Z > 41$ ) 元素の組成報告はなし



# Summary

- マルチメッセンジャー天文学によって、ランタノイドなどの少なくとも一部の r-process 元素が NSM で作られていることが明らかとなった
- 一方で 2nd peak 元素以降が少ない金属欠乏星が発見されていて、weak r-process を示唆している
- これまでに観測された weak r-process の兆候を示す星の金属量は -2 程度で、他の起源の影響があるかもしれない
- Weak r-process の起源に迫るには、より低金属量の星の軽中性子捕獲元素の組成を決定する必要がある