

天体観測で分かるrプロセスの情報

本田 敏志

兵庫県立大学 自然・環境科学研究所
天文科学センター 西はりま天文台

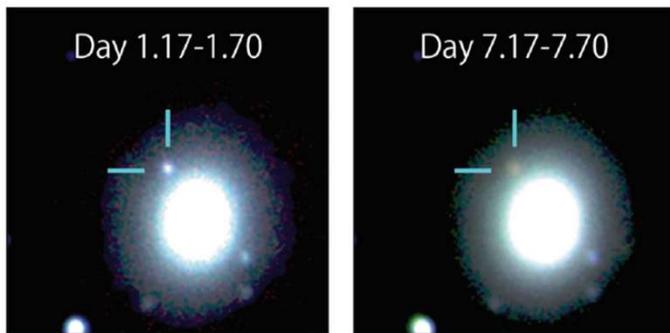


兵庫県立大学
UNIVERSITY OF HYOGO

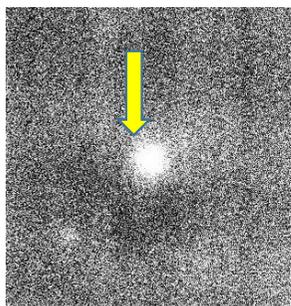
原子核物理でつむぐrプロセス@京大基研 2019.5.22-24

Neutron Star mergers are origin of r-process

Observation of gravitational waves from a neutron star inspiral (e.g., Abbott et al. 2017)



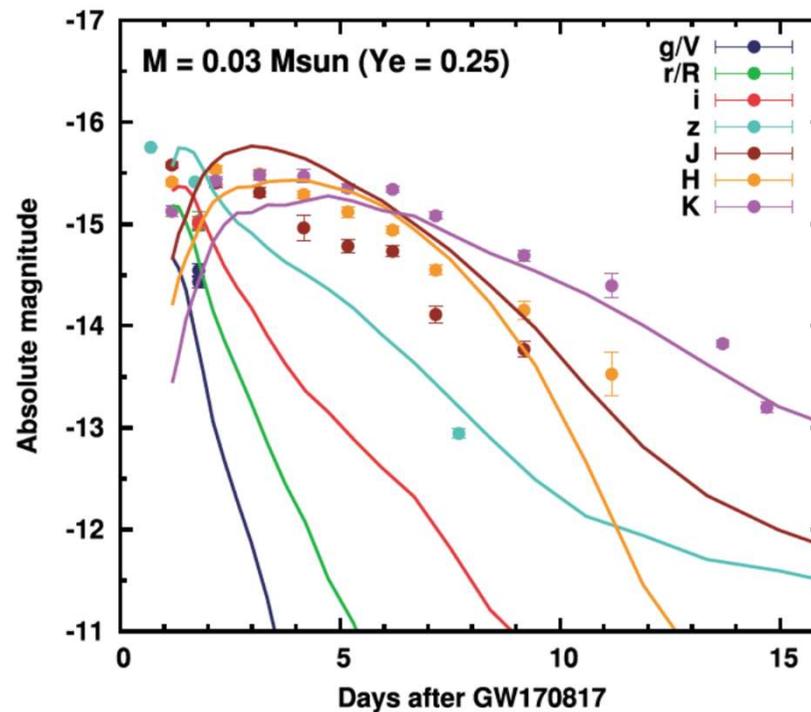
Utsumi et al. (2017)



@NHAO H-band

J-GEM collaboration

SSS17a : an
electromagnetic
counterpart of
GW170817



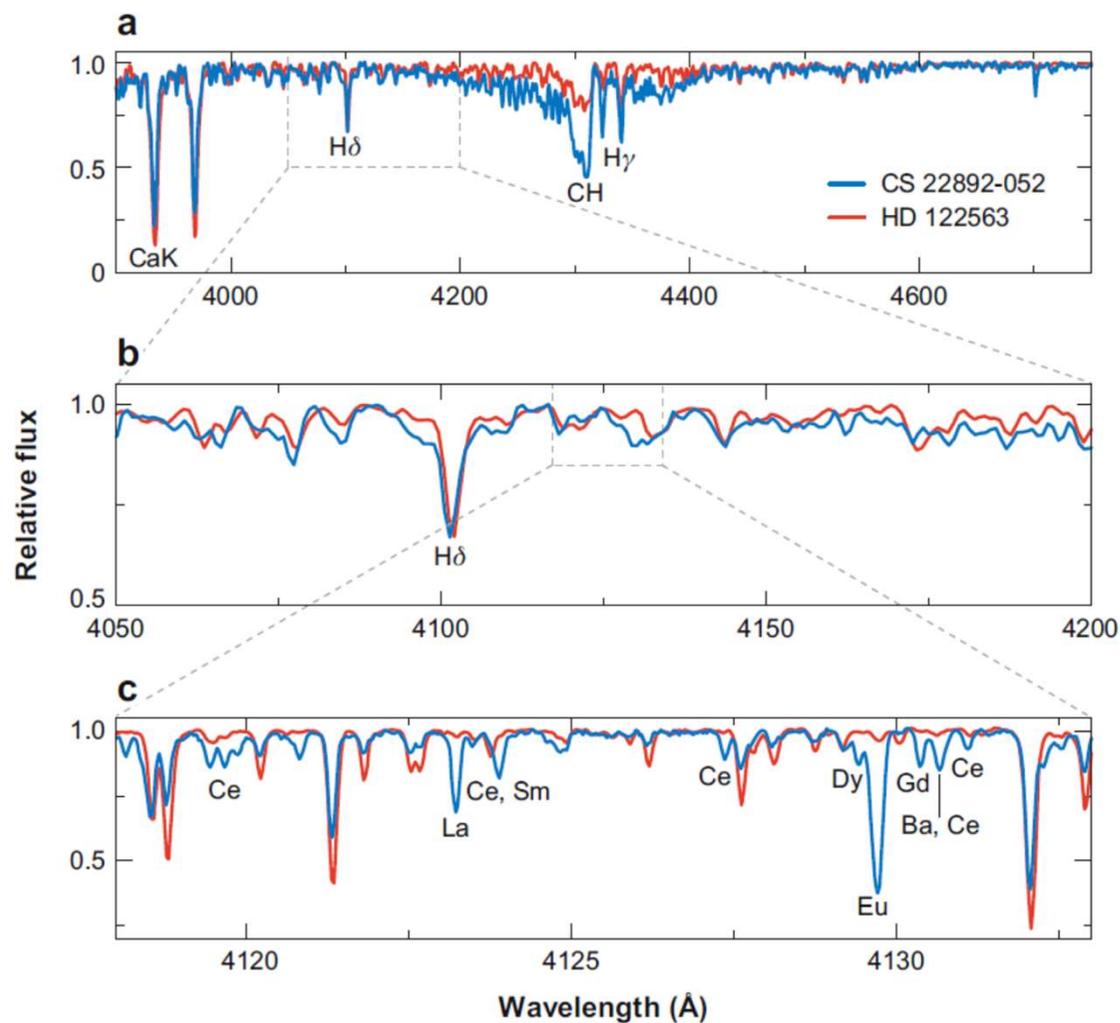
Optical, and Near-IR Light Curves and
Comparison to Kilonova Models

Tanaka et al. (2017)

天体観測からrプロセス元素合成へのアプローチ

- 重力波の観測 → rプロセスについて (cf. 久徳さん、木坂さん、関口さんの発表)
- rプロセスの直接観測はまだ出来ていない？
- rプロセス元素合成の結果を反映していると考えられる恒星の大気組成が観測できる。
- 宇宙の様々な時代におけるガス組成から銀河系の化学進化を探る。
 - 同位体比まで測定できるのはごく一部の元素。
- 高分散分光観測が必要なため、基本的には太陽近傍の明るい星がターゲット。
 - G,K型巨星などが主
 - すばる等8-10m級の望遠鏡では矮小銀河の星までターゲットになる。

星の吸収線

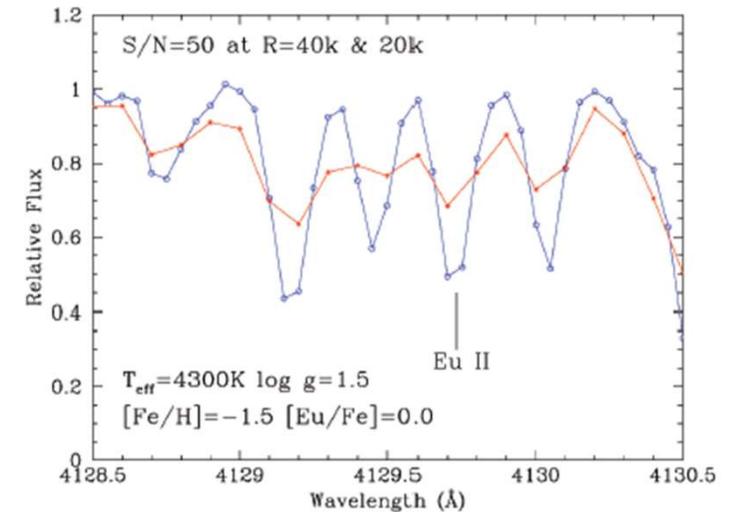


- 吸収線の強さは星の大気パラメータと組成に依存する。
- 吸収線の強さなどを測定し、組成を見積もる。
- 高い波長分解能のスペクトルが得られれば、各元素についての情報が得られる。

高分散分光観測

- 星の吸収線は、ガスのランダムな運動や星の自転などによって広がる。
 - 太陽のような自転の遅い星でも2km/sほどある。
 - キロバだと光速の ~20%。
- むやみに波長分解能を上げててもラインの分離には限界がある。
 - 1pixあたりのS/Nは下がる。
- 組成解析に良く使われるのはRが5万 (6km/s)程度 of スペクトル。

暗い天体には向かない → 近傍の星が主なターゲット



WF MOS feasibility report

同じS/NでR=2万と4万の違い

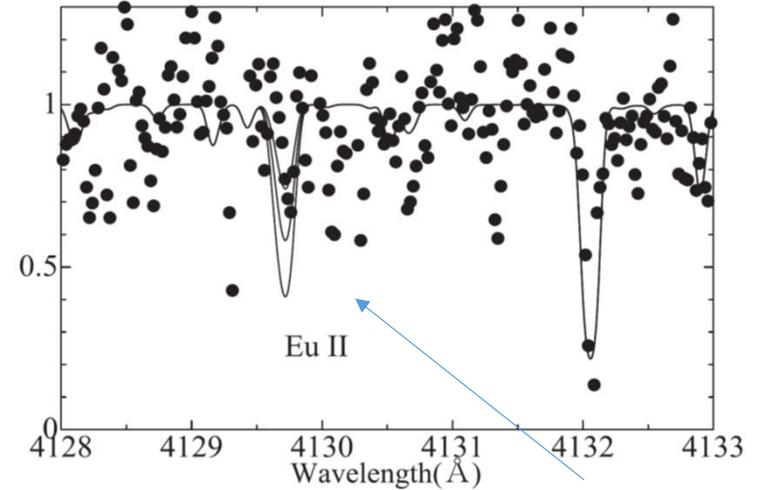
波長分解能: $R = \lambda / \Delta\lambda$

吸収線測定 of 誤差

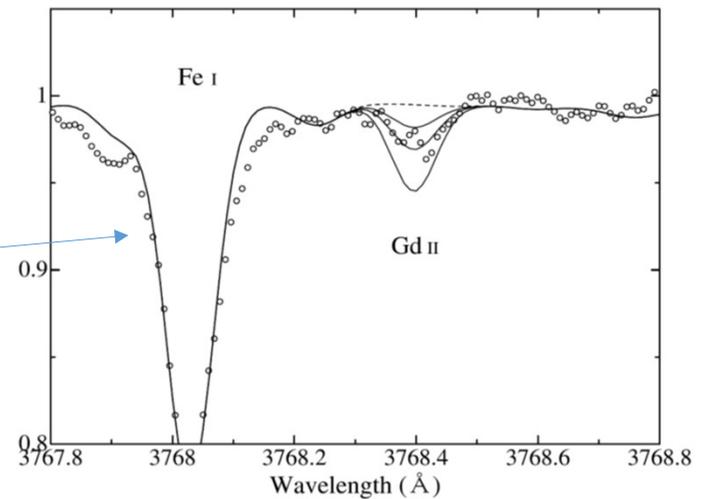
- フォトンノイズ (S/N)。
- ラインのブレンド成分。
- 連続光成分の決定精度。
- ガウシアンでfitした場合のずれ。
- 広がったwing成分の取り扱い。

星の大気パラメータを見積もり、モデル(合成)スペクトルを使って組成を見積もる。

矮小銀河の星 V=17.5 S/N ~ 20



この場合上限値しか決められない。



近傍の明るい金属欠乏星 V=6.2 S/N ~ 900

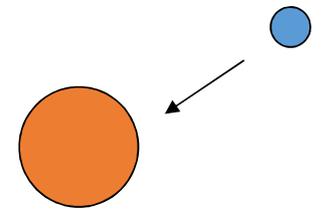
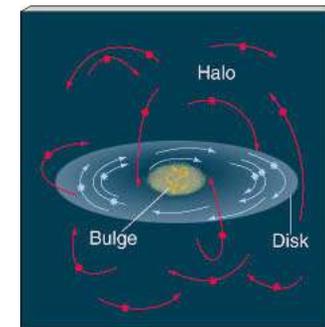
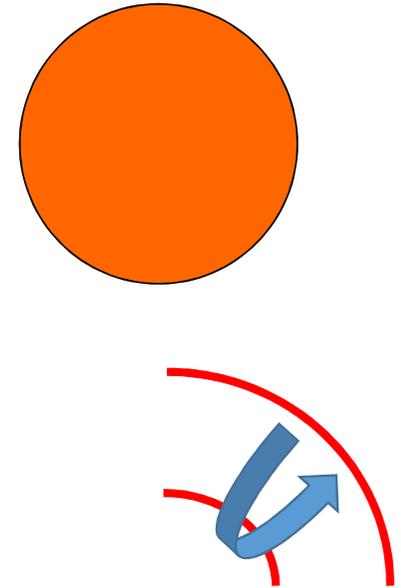
星の化学組成と進化

観測できるのは星の大気表面

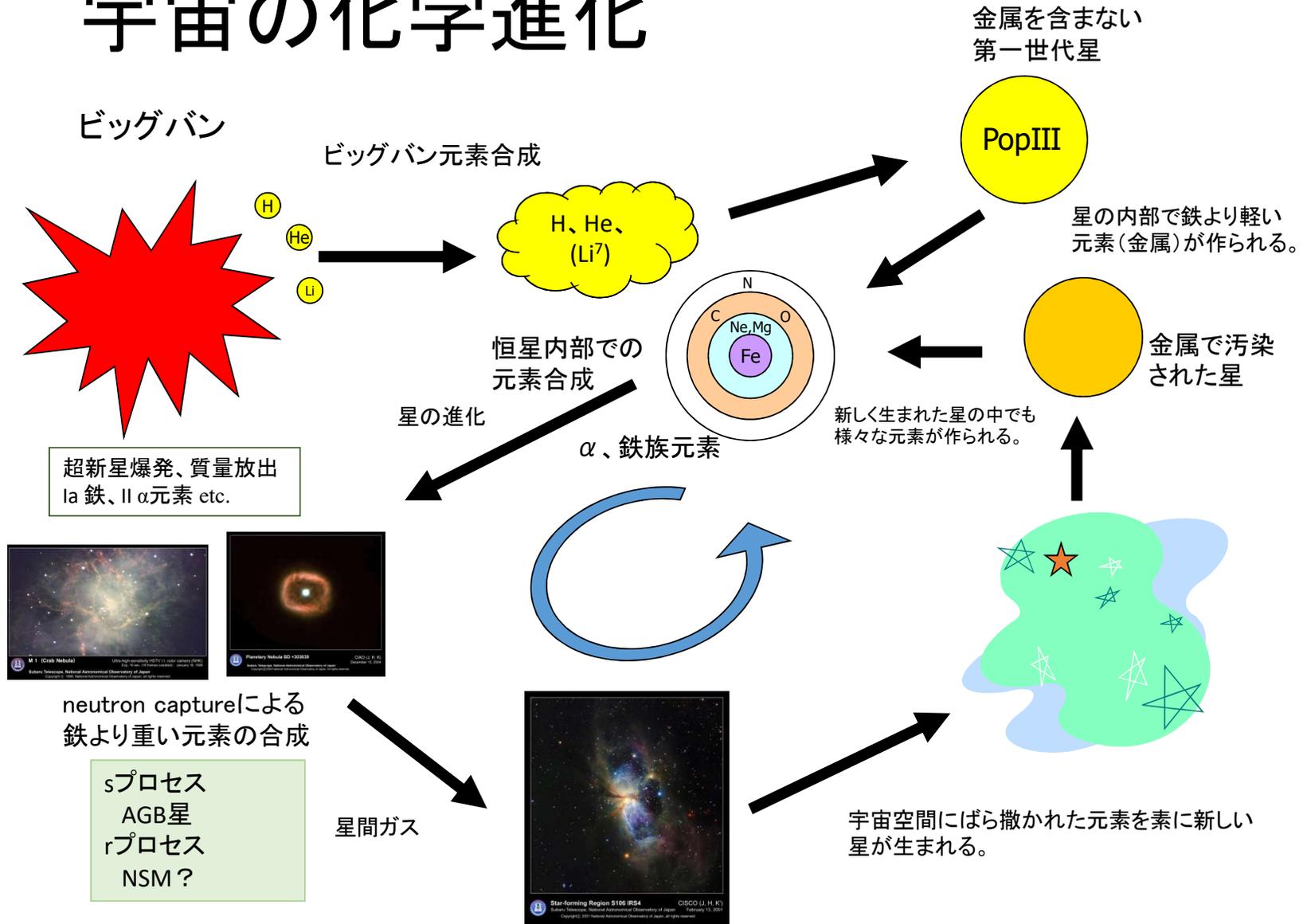
星の化学組成はその星が誕生した時の環境を反映する。

- 主系列星 (e.g., 太陽)
 - 誕生した時のガス組成を大気にそのまま保持。
- 進化した星 (e.g., AGB星)
 - 内部で合成された元素が対流などによって表面まで組み上げられる。
- 連星系に属している星
 - 進化した伴星からの質量放出

星の運動によっては星間物質を捕獲している可能性もある。

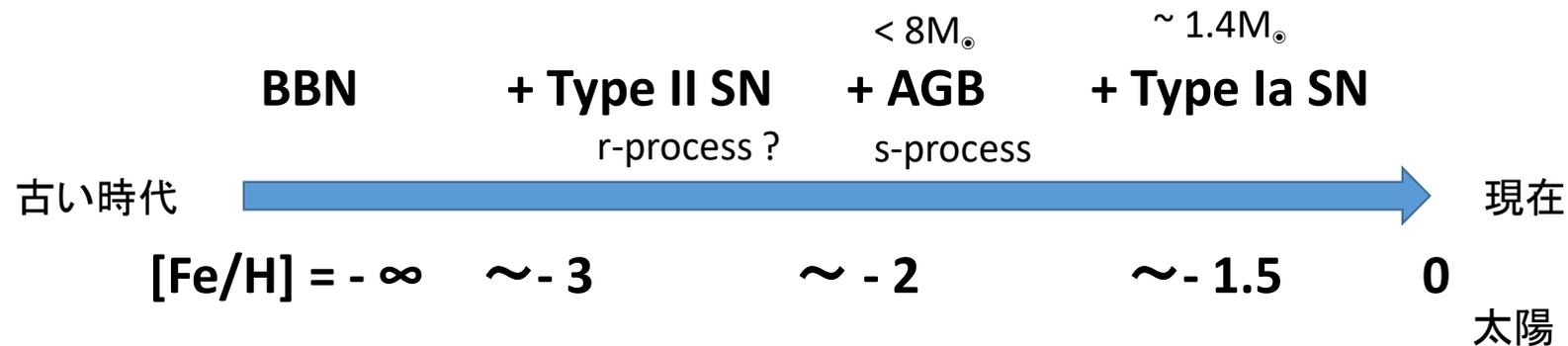


宇宙の化学進化



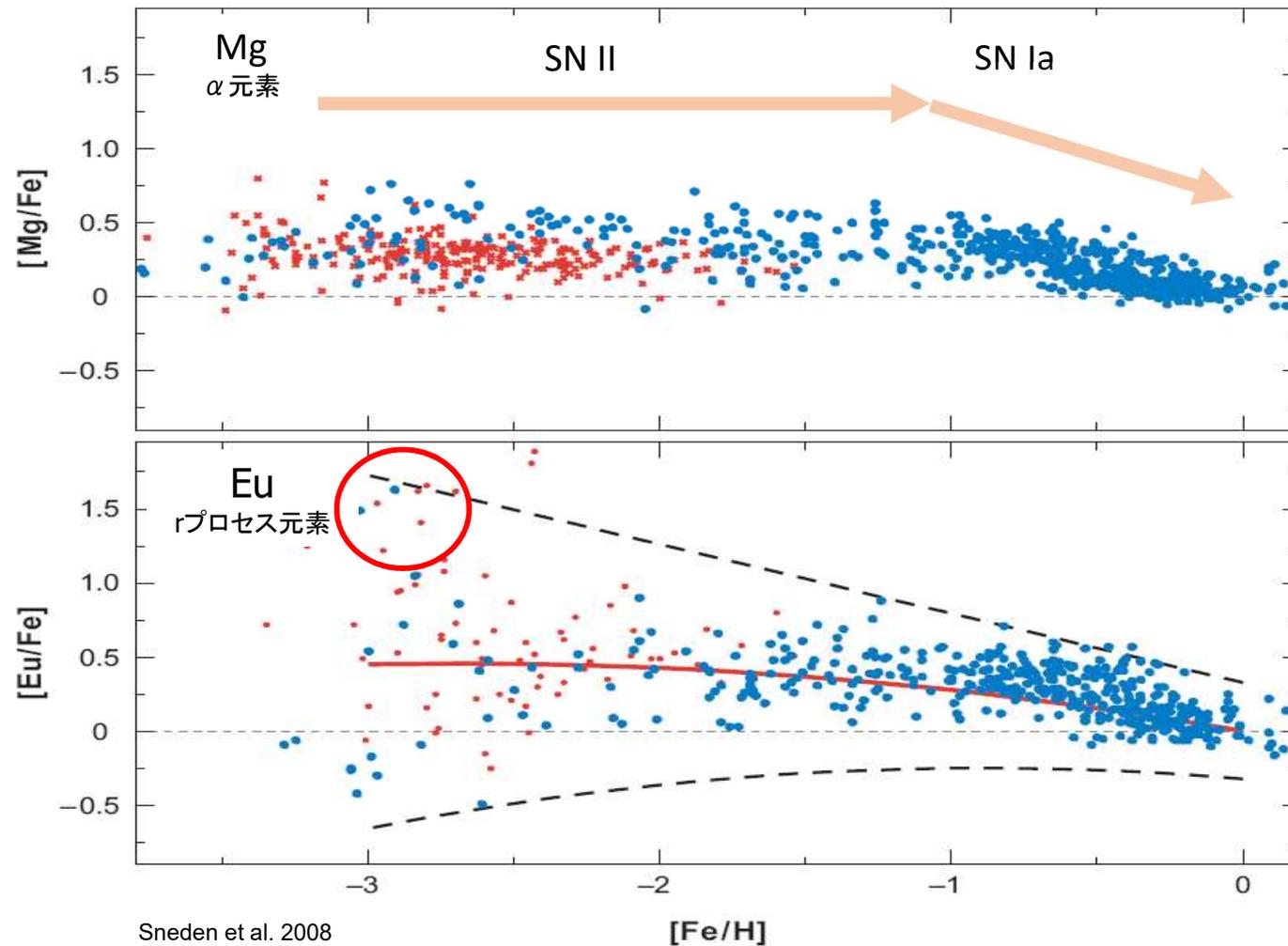
金属欠乏星の化学組成

- 古い時代の元素合成を反映。
- 単一の元素合成過程を探るために重要な天体。
- 超金属欠乏星 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$) の化学組成は銀河系初期の単一の元素合成の結果をそのまま反映していると考えられる。



$$[\text{X}/\text{Fe}] = \log(\text{Fe}/\text{H}) - \log(\text{Fe}/\text{H})_{\text{sun}}$$

銀河の化学進化と金属欠乏星の化学組成



Snedden et al. 2008

$[Fe/H] < -2.5$ でEuのばらつきがMgと比べて大きい。

銀河系内でのガス組成が均一になっていないことを反映。

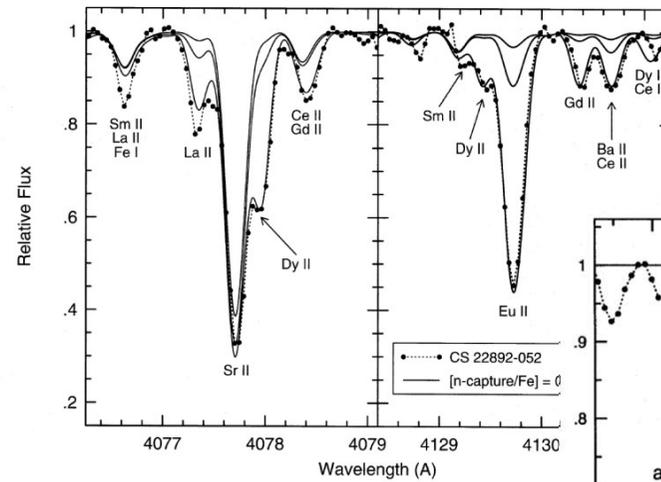
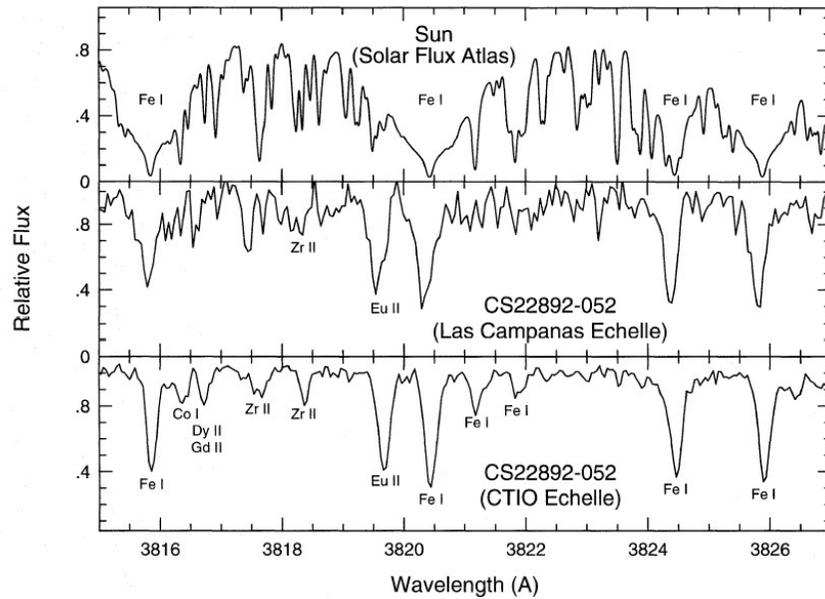
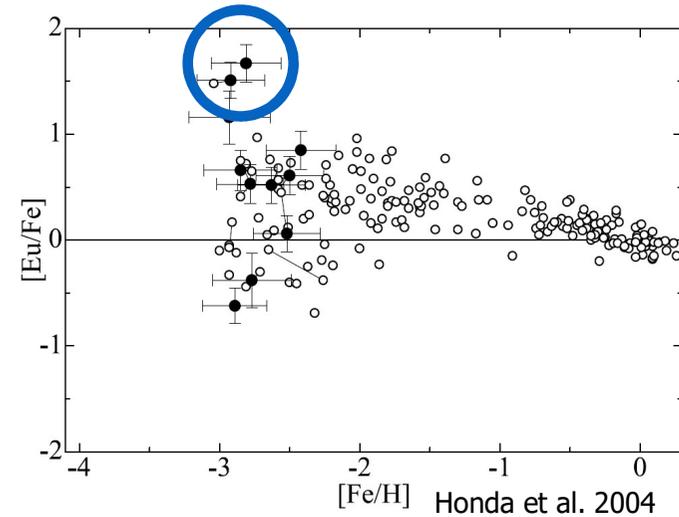
EuはMgより稀なイベントで合成される。 α 元素とrプロセス元素に相関は見られない。

$[Fe/H] = \sim -3$ の星でもEuが検出されている。

Euなどrプロセス元素が過剰な星の組成はrプロセス元素合成の結果を反映している。
(r-II stars : $[Eu/Fe] > +1$ $N \sim 5\%$)

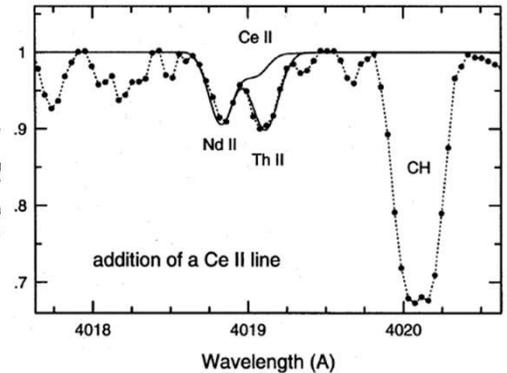
Eu過剰な星

- r-process enhanced stars
 - rプロセスそのものを反映している
 - r-II : $+1 < [Eu/Fe]$
 - $-2.5 > [Fe/H] > -3.1$ の範囲に存在
 - r-I : $+0.3 < [Eu/Fe] < +1$

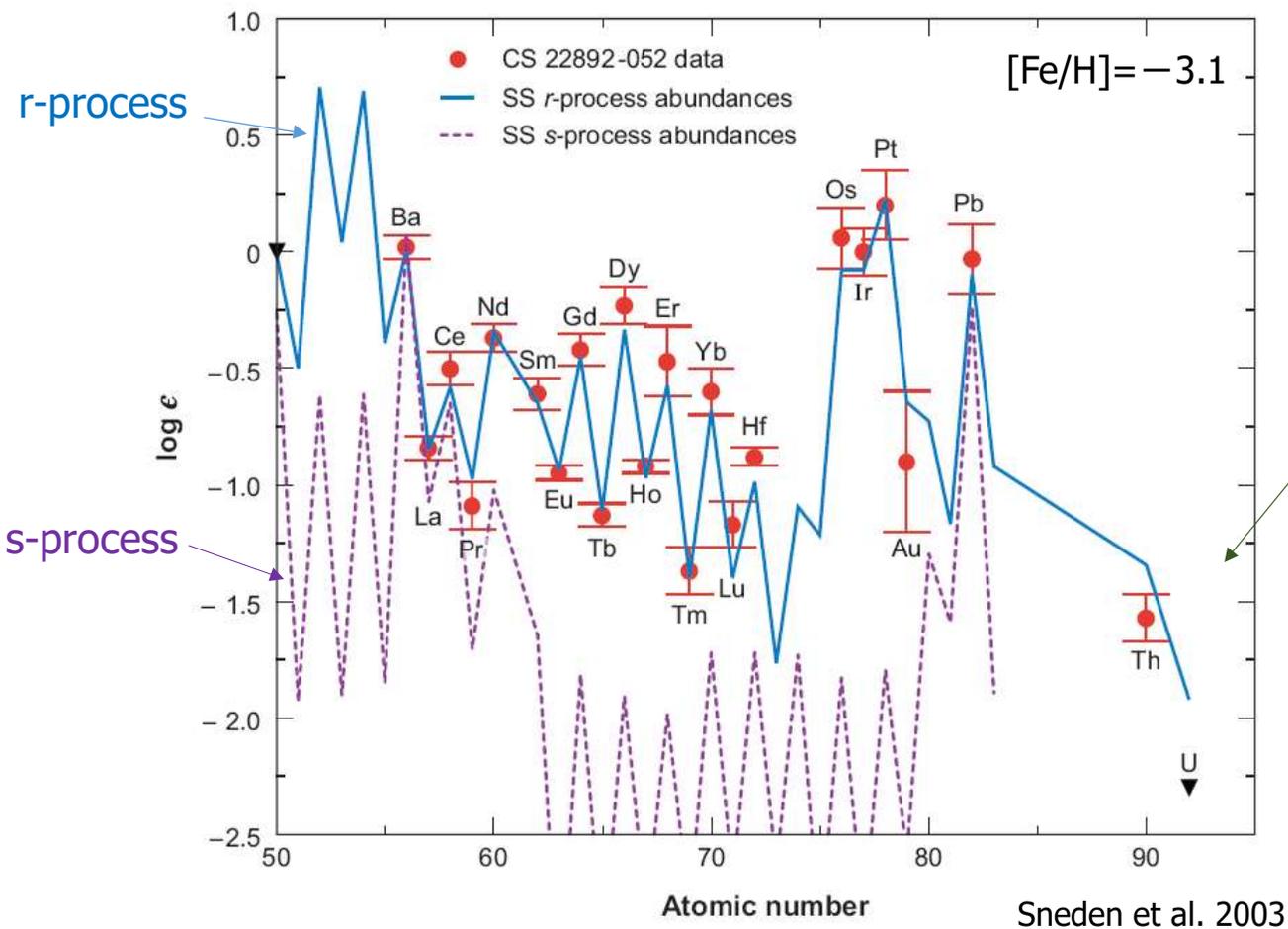


太陽では検出できない
ラインが検出できる。

Sneden et al. 1996



r-process rich 星の組成パターン



r-II ($[Eu/Fe] > +1$) は太陽の rプロセスと同じパターンを示す。(total - s = r)

Th (half life 14Gyr)

r-process rich 星の組成パターン



weak r-process ?

Universality

Pb? Actinide boost ?

- Abundance patterns of r-II stars are very similar with the solar r-pattern.

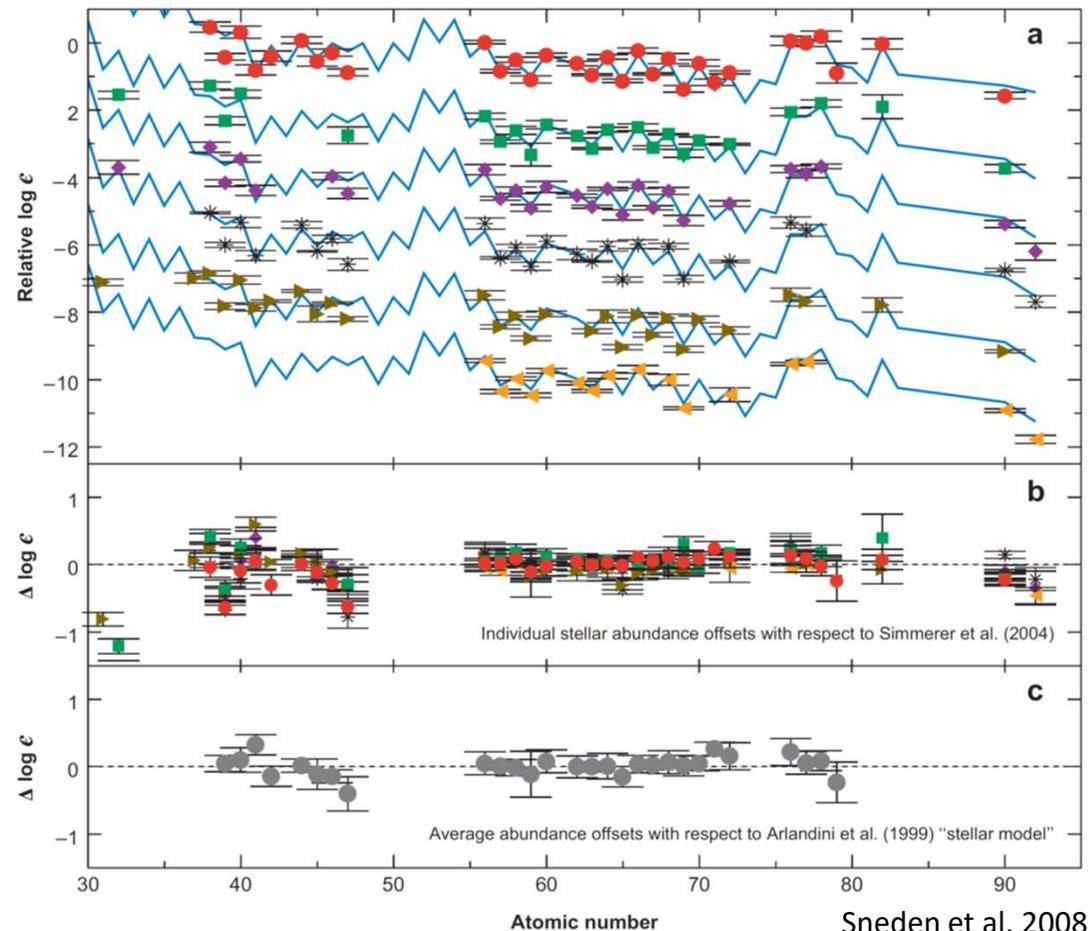
Universality ($56 \leq Z \leq 72$?)

- Observed differences in the patterns of actinides (Th, U) in some r-II stars.

1/3 of r-II are actinide boost stars ?

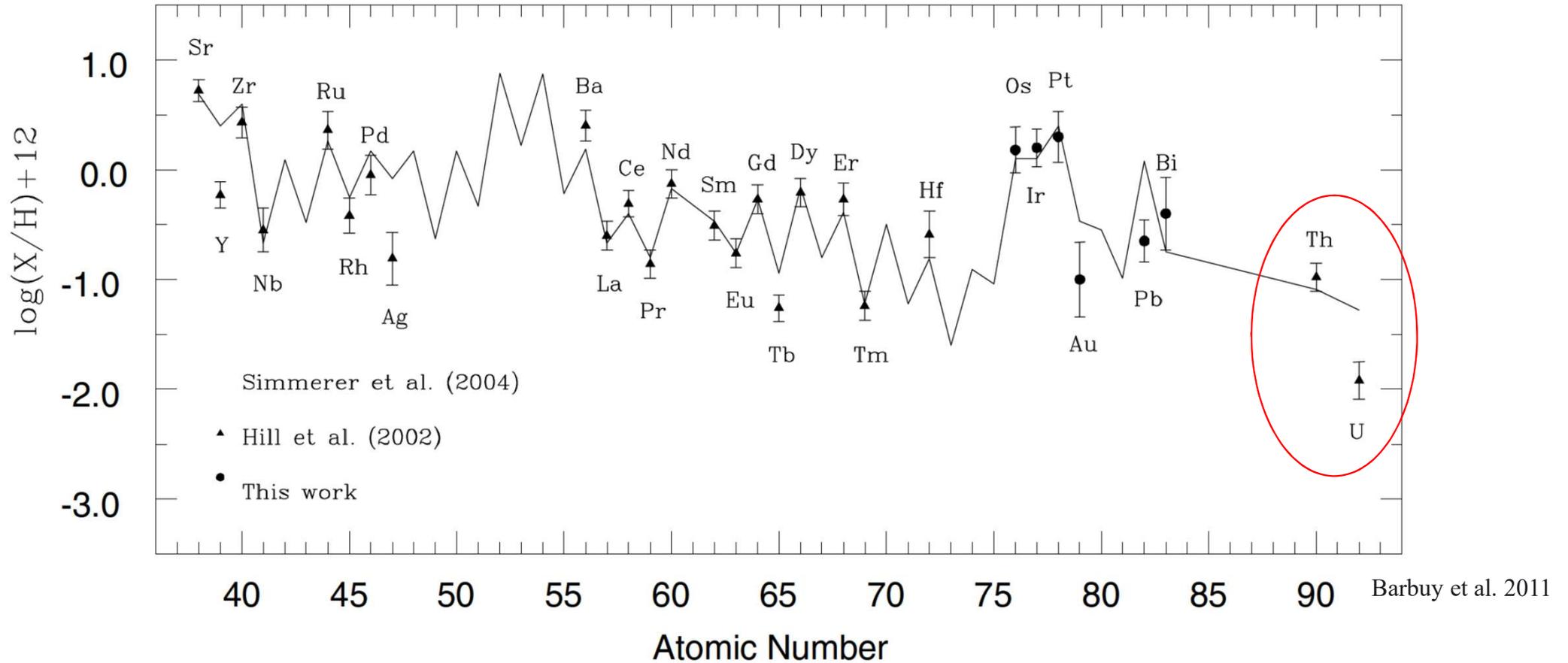
But having a low Pb in CS31082-001.

- weak r-process in r-II star ?



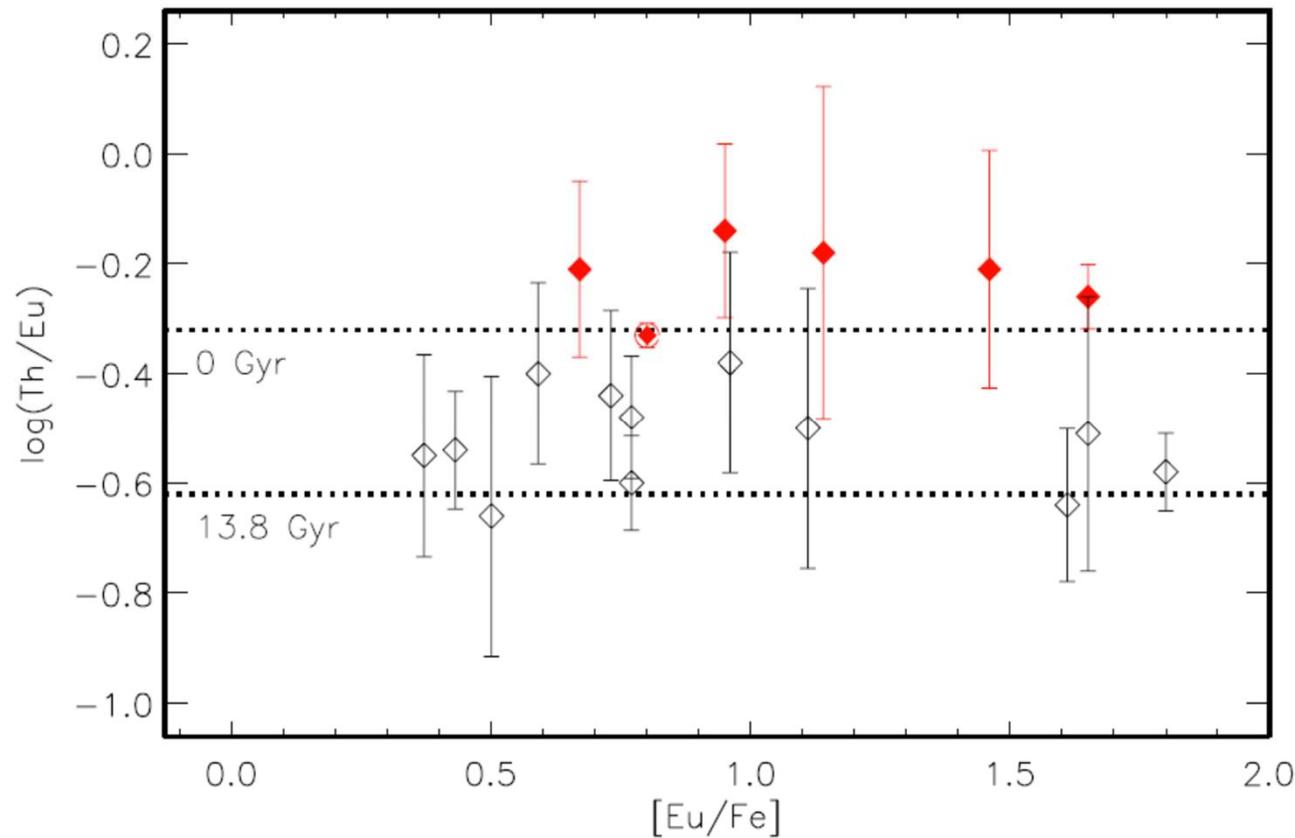
r-II star CS 31082-001 ([Fe/H] = -2.9)

Cayrel et al. 2001
Hill et al. 2002



- Compared to other stars CS31082-001 has higher abundances of the actinides, but a very low Pb abundance.
 - estimating the age from $U/Th \neq Th/Eu$
 - actinide boost star

Actinide boost stars are common ?



r-II starの約1/3程度は
Actinide boostを示す。

何が違うのか？

sensitive to the electron fraction of
the outflow (Holmbeck et al. 2018,
Eichler et al. 2019)

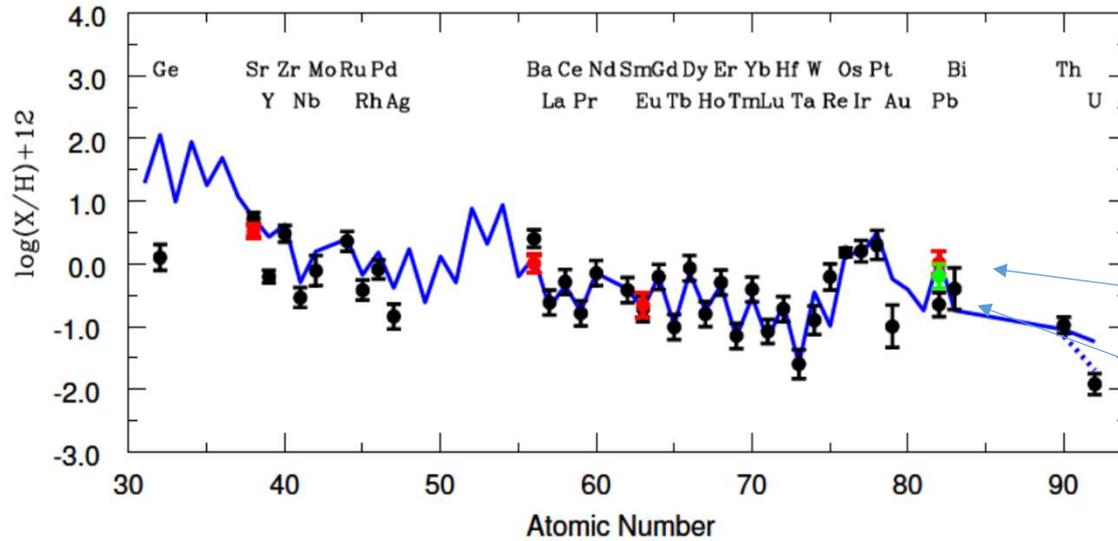
Mashonkina et al. 2014

分散はそれほど大きくはない

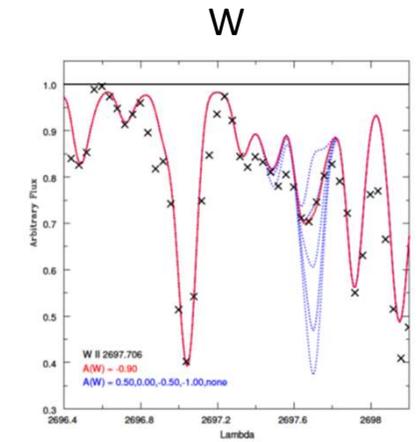
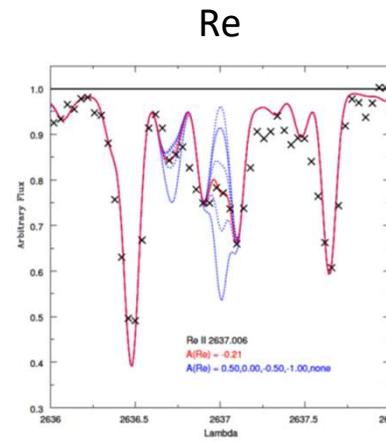
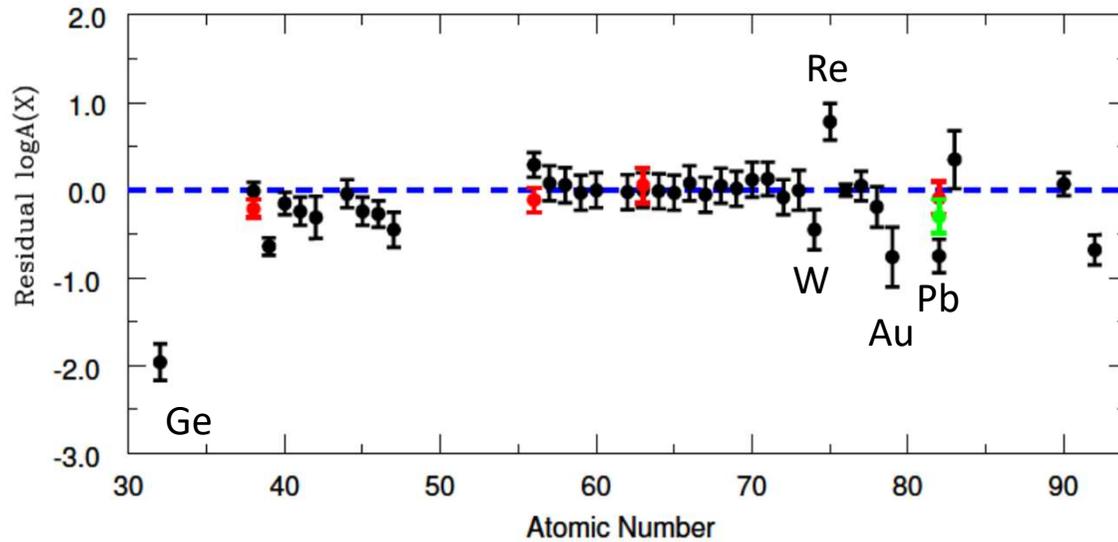
CS 31082-001

HSTによるUV域の観測

Siqueira Mello et al. 2013

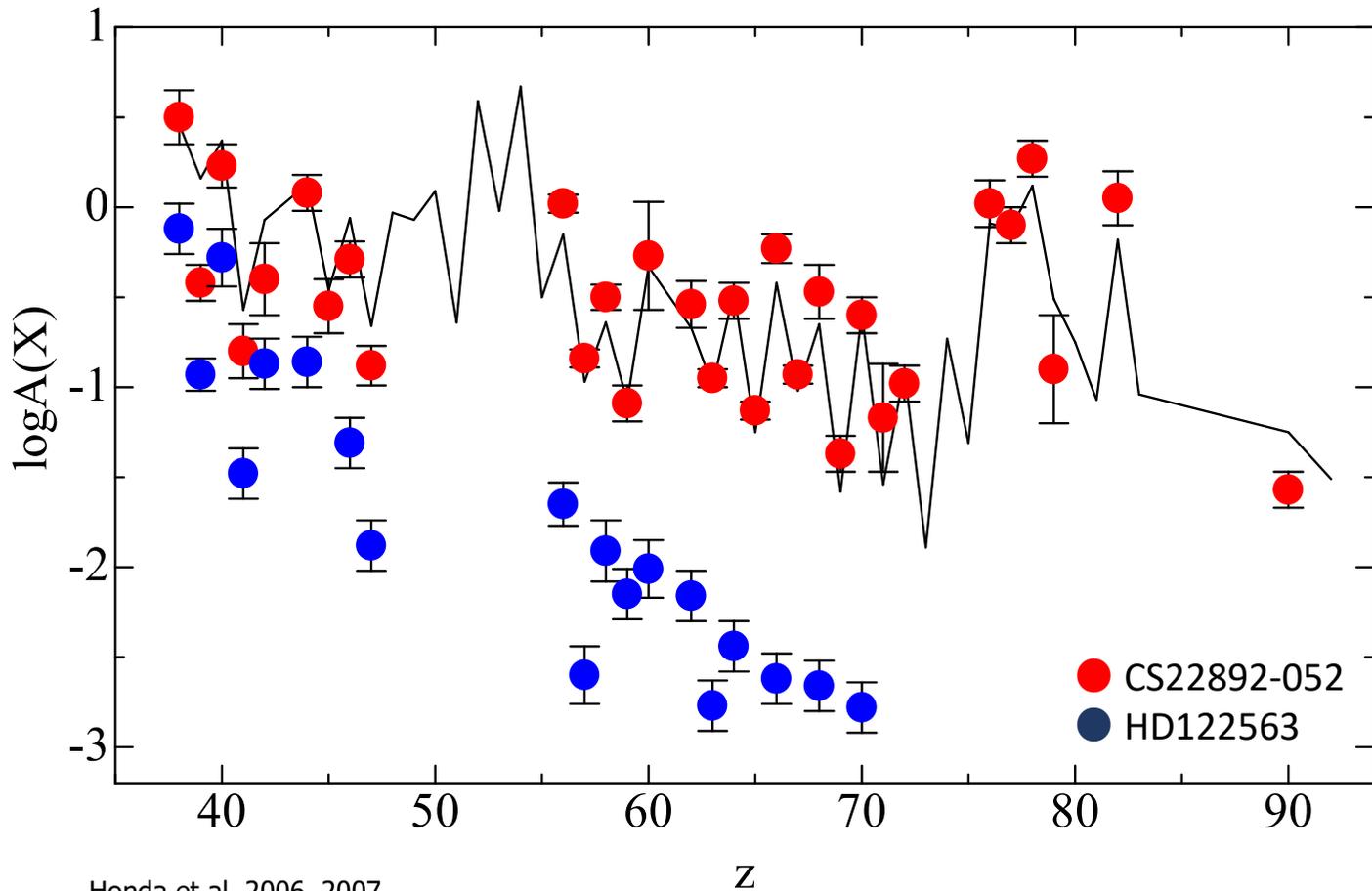


- non-LTEモデルでの計算
- non-LTE + 3Dモデル



地上では観測できない波長域

Srなどやや軽い方の元素で過剰を示す星 weak r-process ?

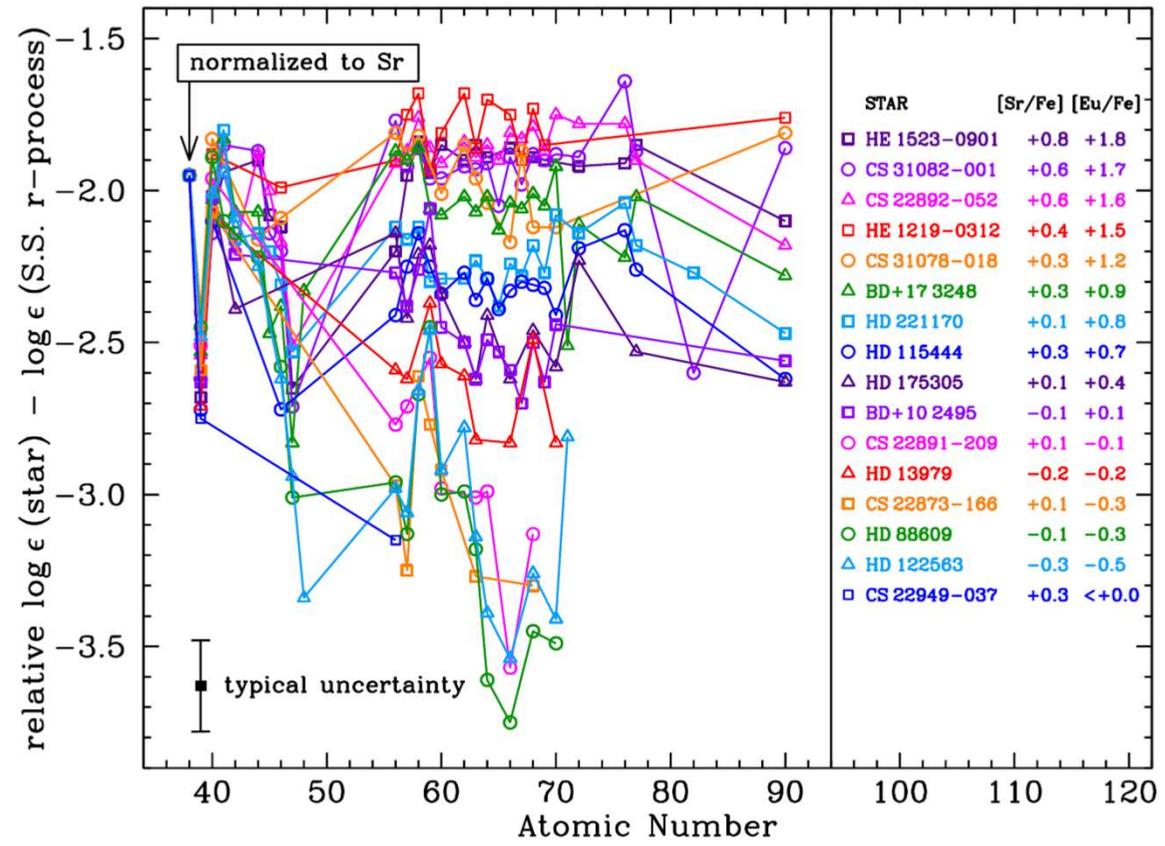
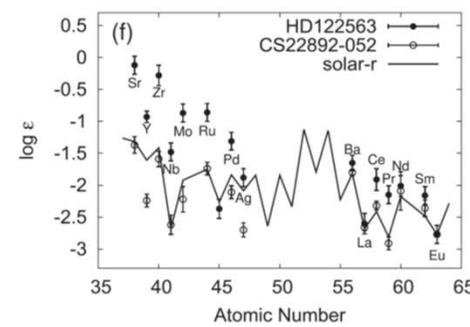
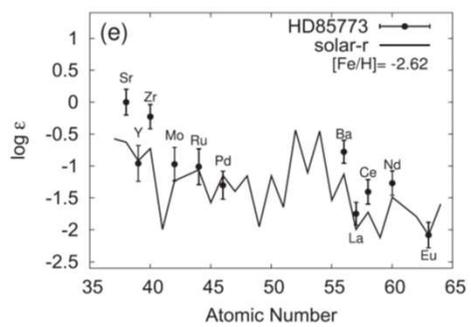
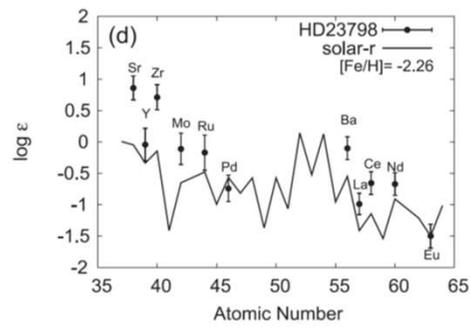
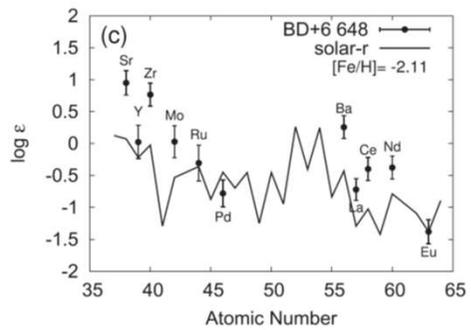
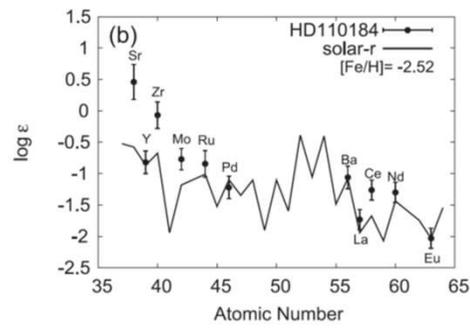
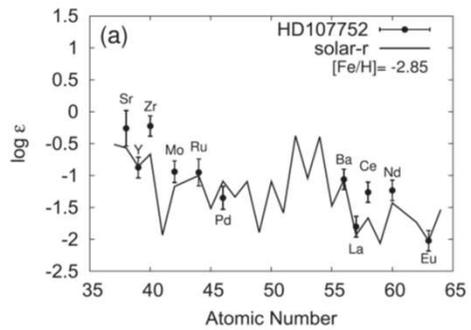


Honda et al. 2006, 2007

HD 122563 has a significantly different abundance pattern from that of the solar system r-process abundance pattern.

LEPP (lighter element primary process) ?
e.g., Travaglio et al. 2004

limited r-process
Wanajo 2013

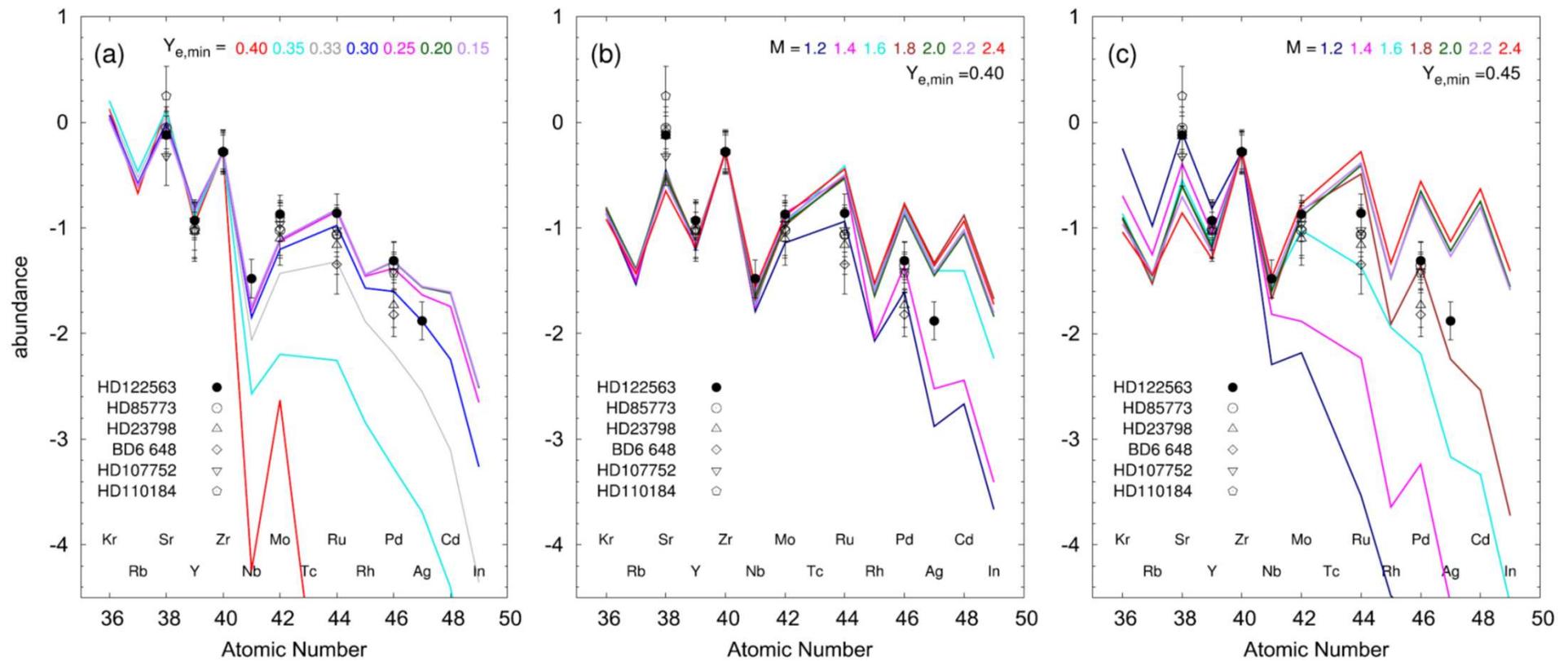


Roederer et al. 2010

パターンにvariation?

M.Aoki et al. 2017

The models of proto-neutron-star wind of core-collapse supernovae (Wanajo 2013)



r-process rich 星の組成パターン

- Abundance patterns of r-II stars are very similar with the solar r-pattern.

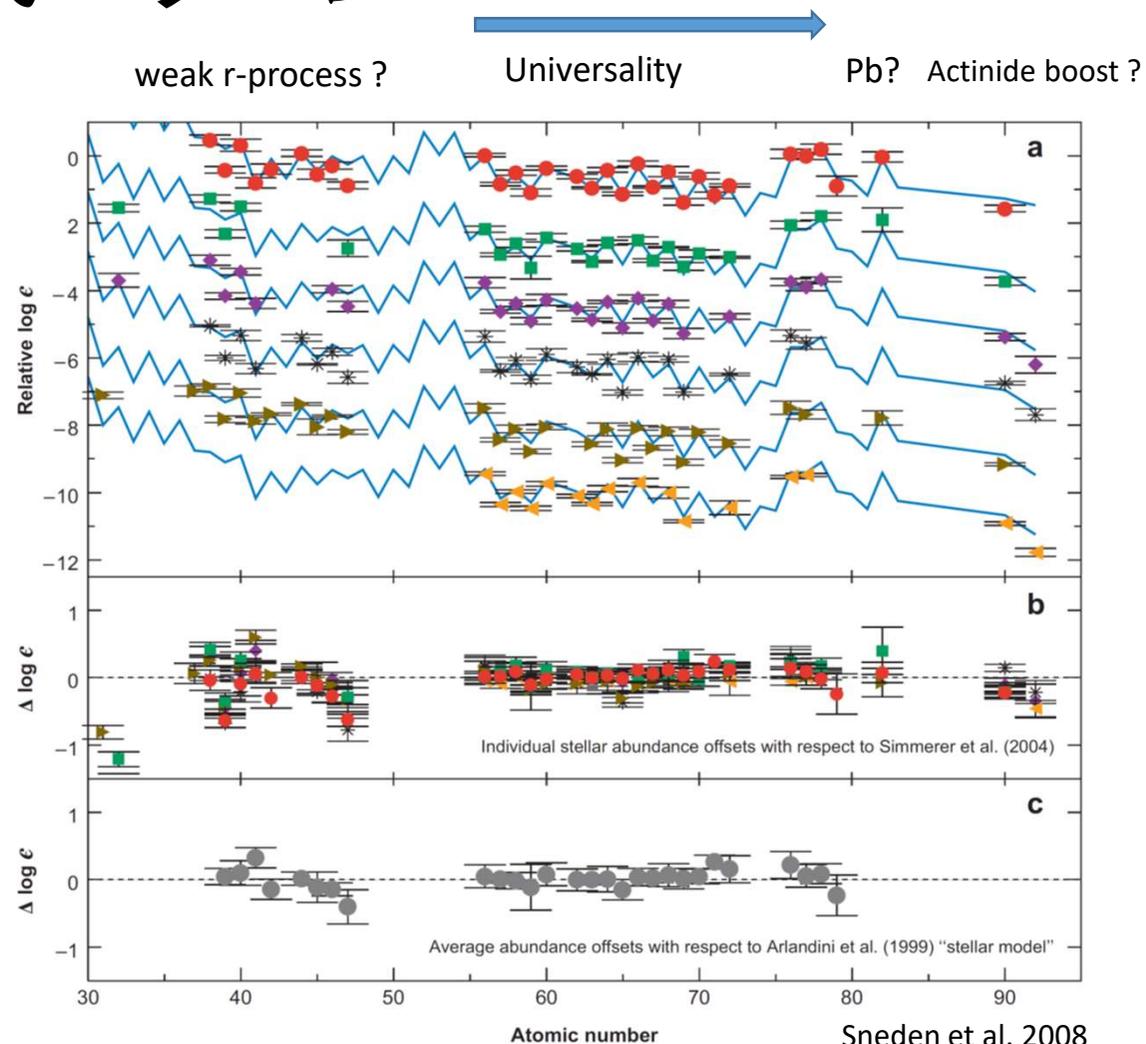
Universality ($56 \leq Z \leq 72$?)

- Observed differences in the patterns of actinides (Th, U) in some r-II stars.

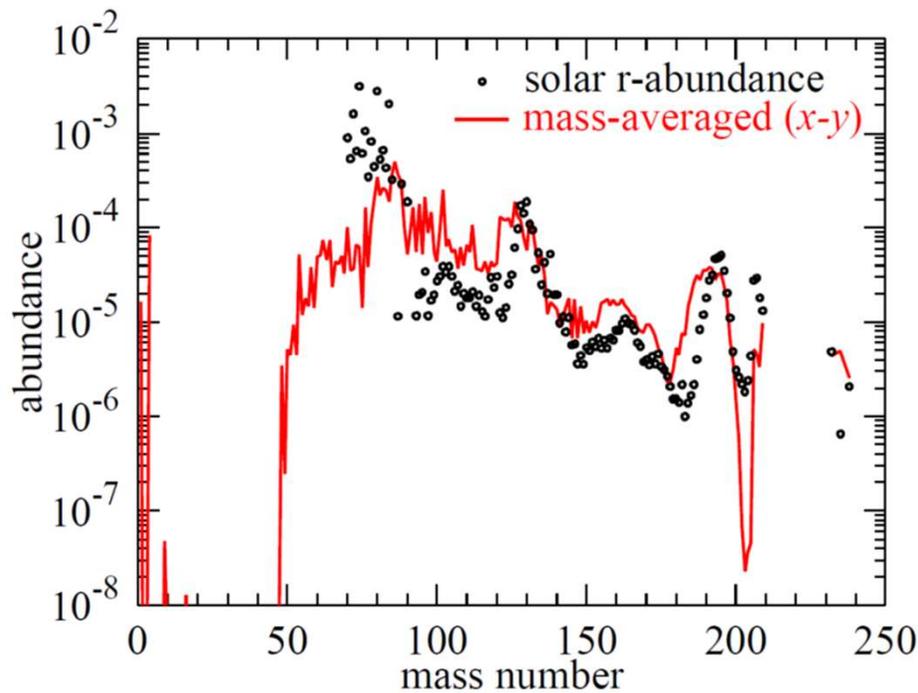
1/3 of r-II are actinide boost stars ?

But having a low Pb in CS31082-001.

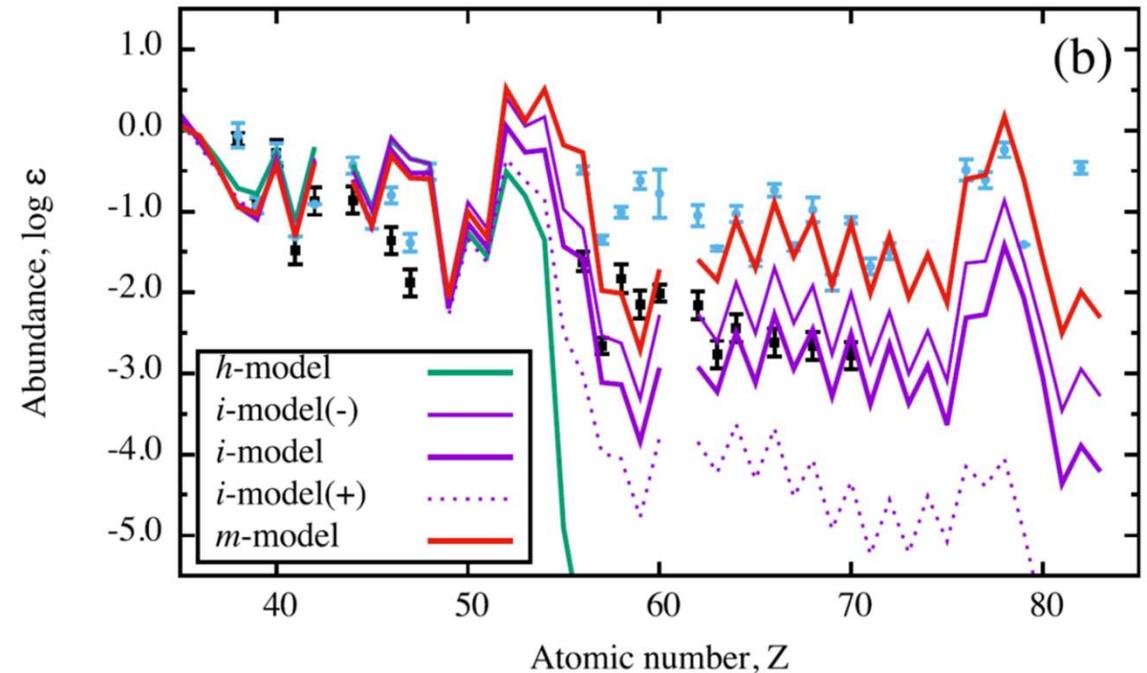
- weak r-process in r-II star ?



r-process models compared with the abundance pattern of the r-process of solar system and metal-poor stars.

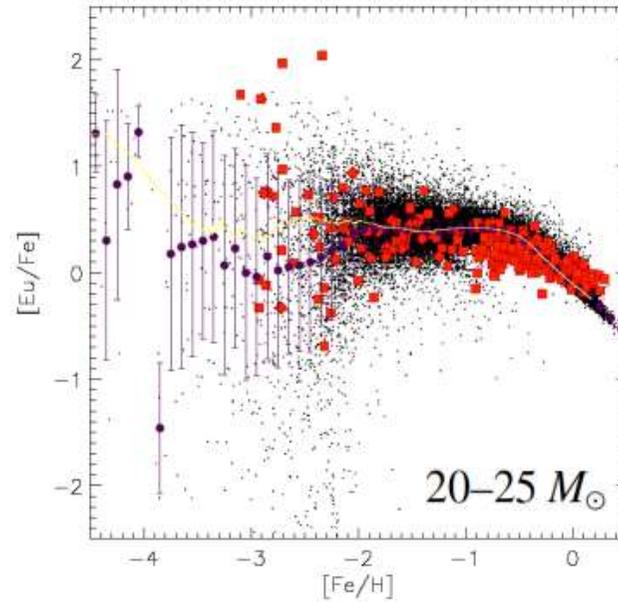
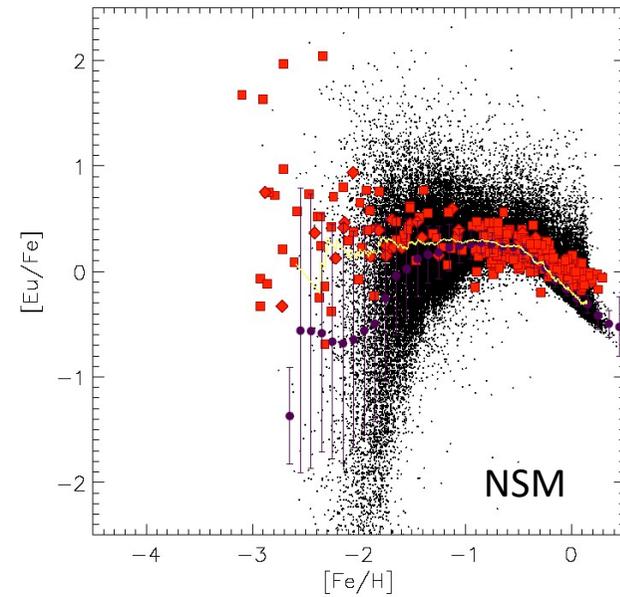


Neutron star mergers (NSM)
Wanajo et al. 2014

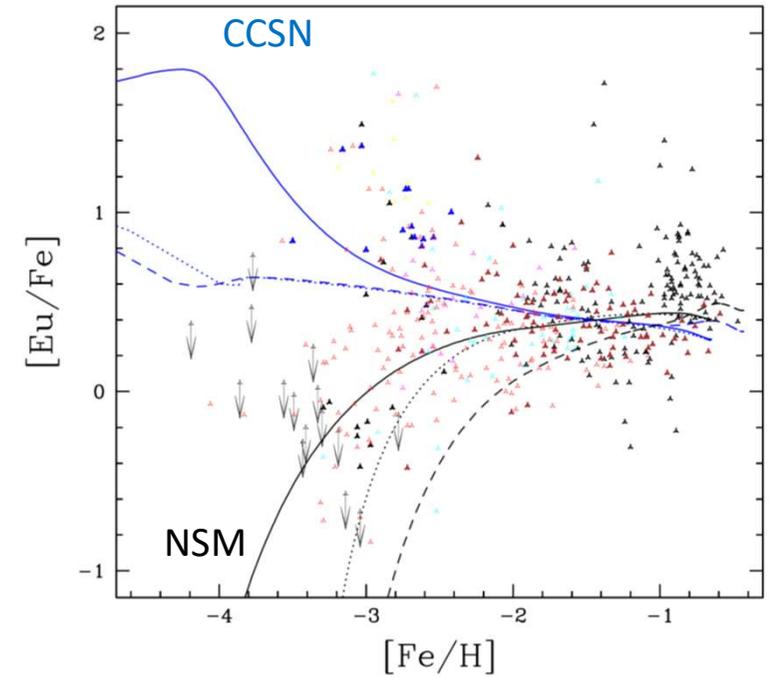


Core-collapse SNe (CCSN)
driven by the magneto-rotational instability
Nishimura et al. 2016

Models of galactic chemical evolution



Argast et al. 2004

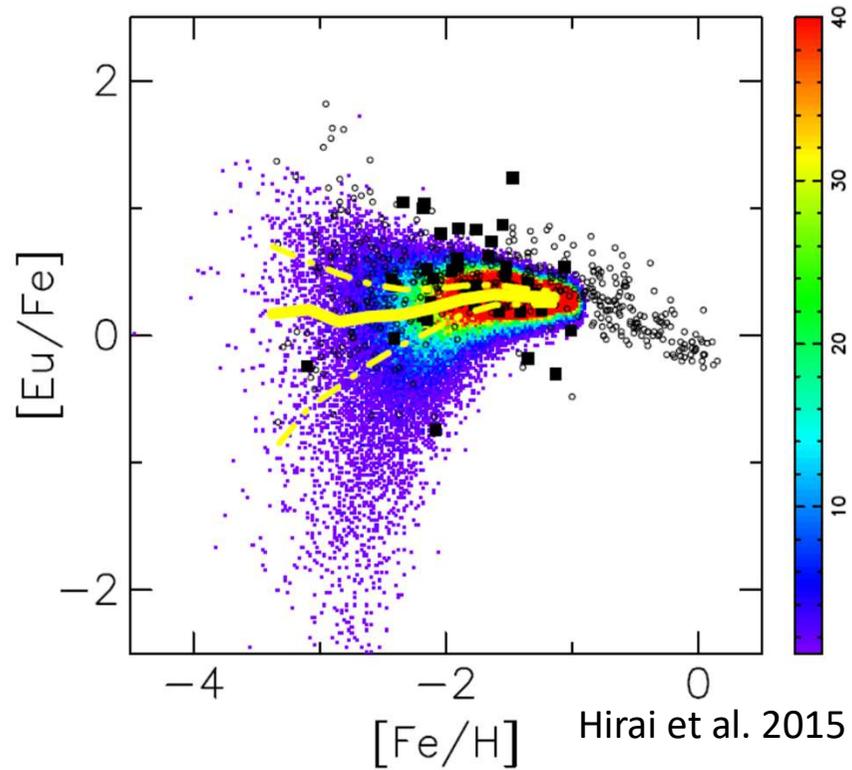


Vangioni et al. 2017

NSM could not reproduce large dispersion of Eu in very low metal stars.
Very short merger time of NSM are needed.

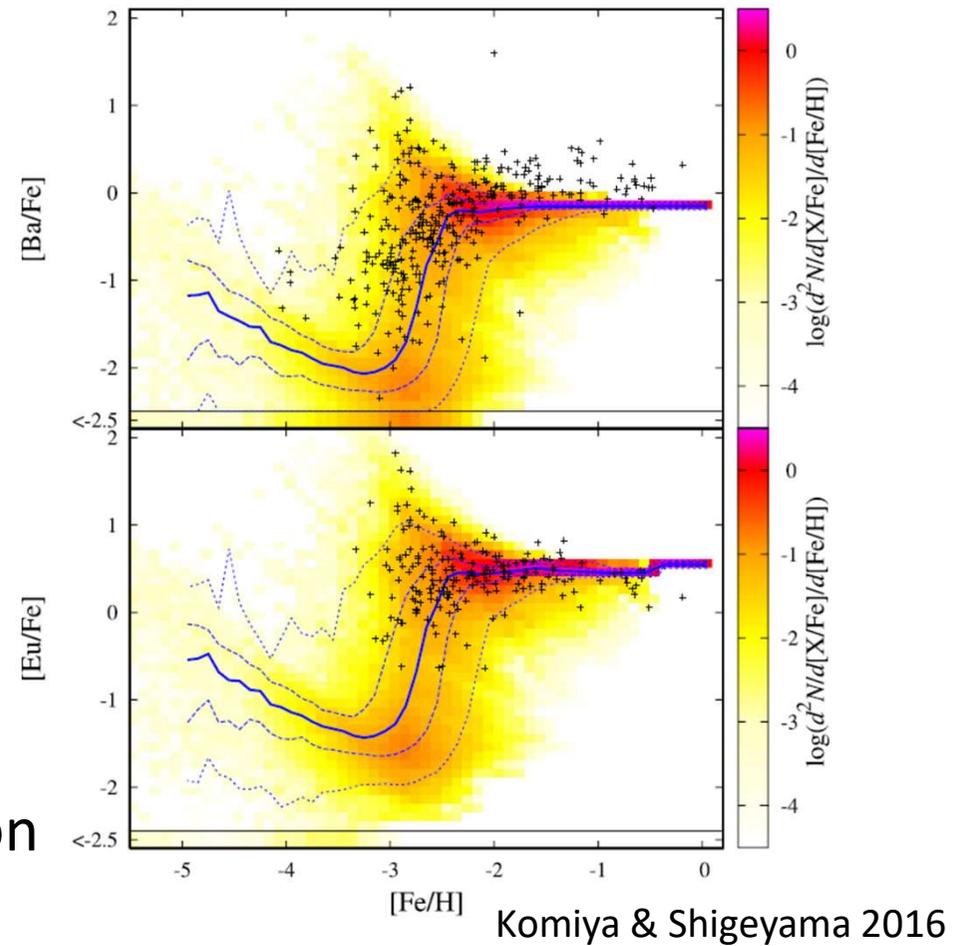
銀河の化学進化からはr-processは超新星起源を示唆していた

Chemical evolution models of r-process by NSM



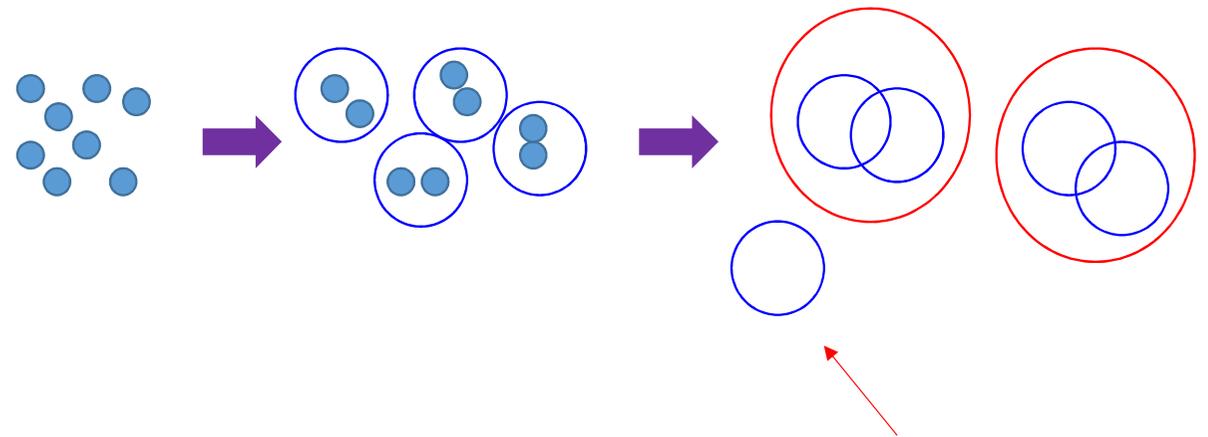
Considering hierarchical structure formation solves the problem.

cf.平居さんの講演



矮小銀河は銀河系の構成要素

- 銀河系のBuilding block
 - Λ CDM 階層的構造形成
 - 銀河ハロー形成での生き残り



Andrey Kravtsov



z=9



z=5

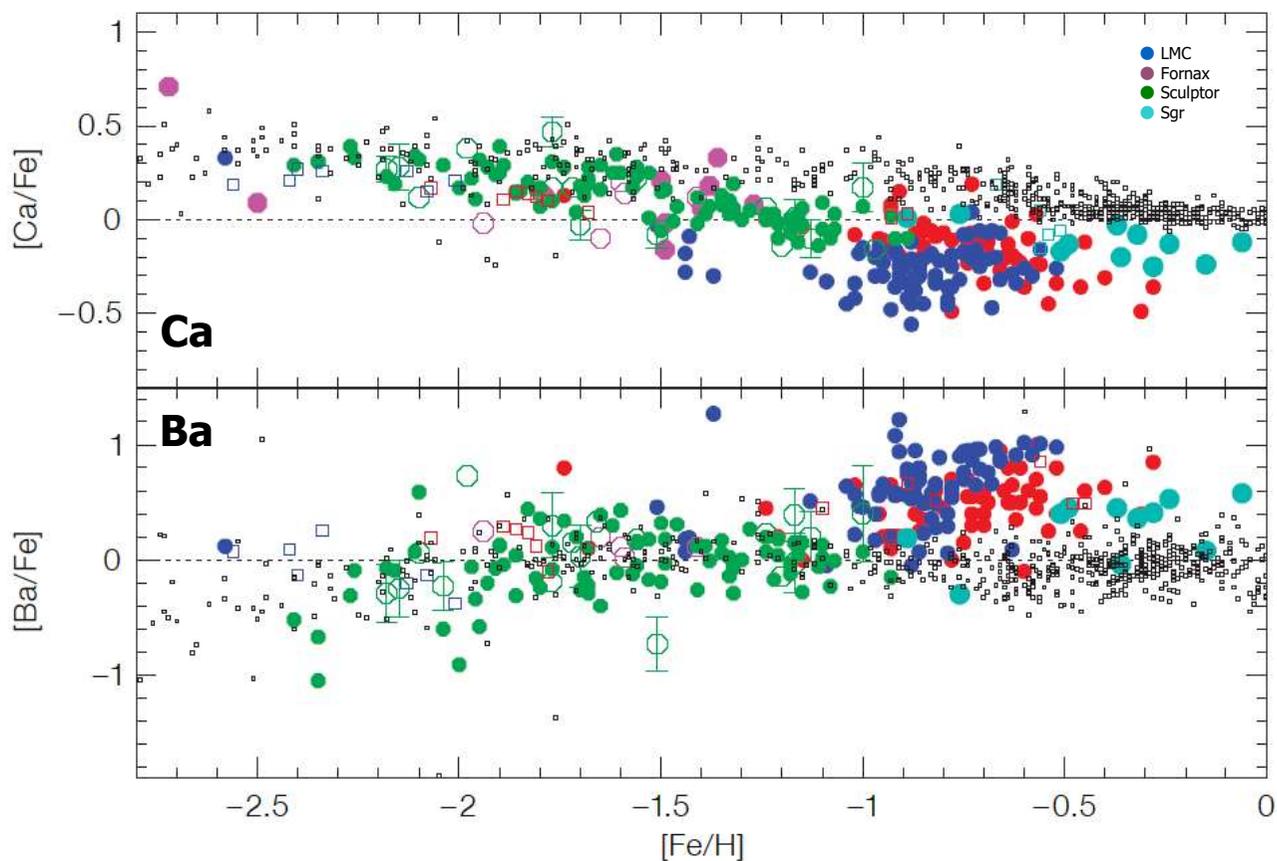


z=1



z=0

Chemical composition of the star in the dwarf galaxies



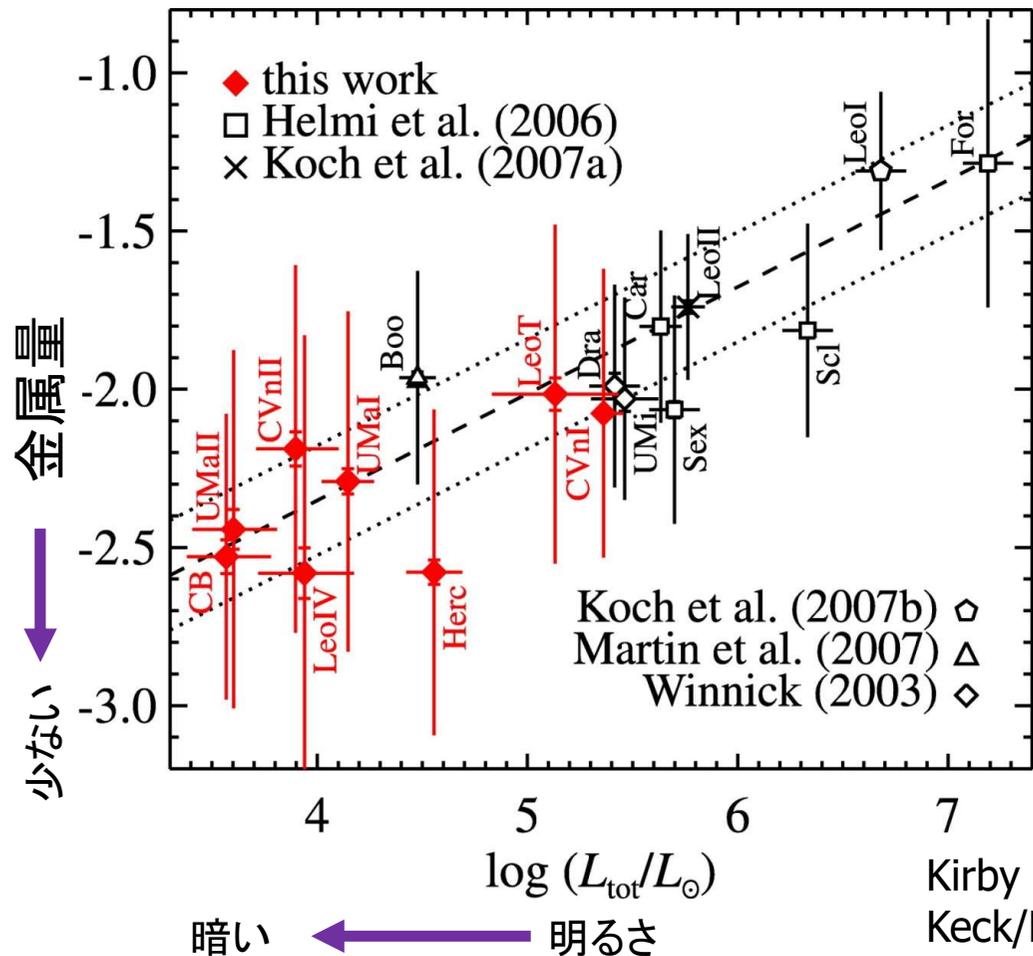
Venn & Hill (2007)

- Chemical abundance trend of dwarf spheroidal galaxies is different from MW halo.

Luminosity-Metallicity Relation

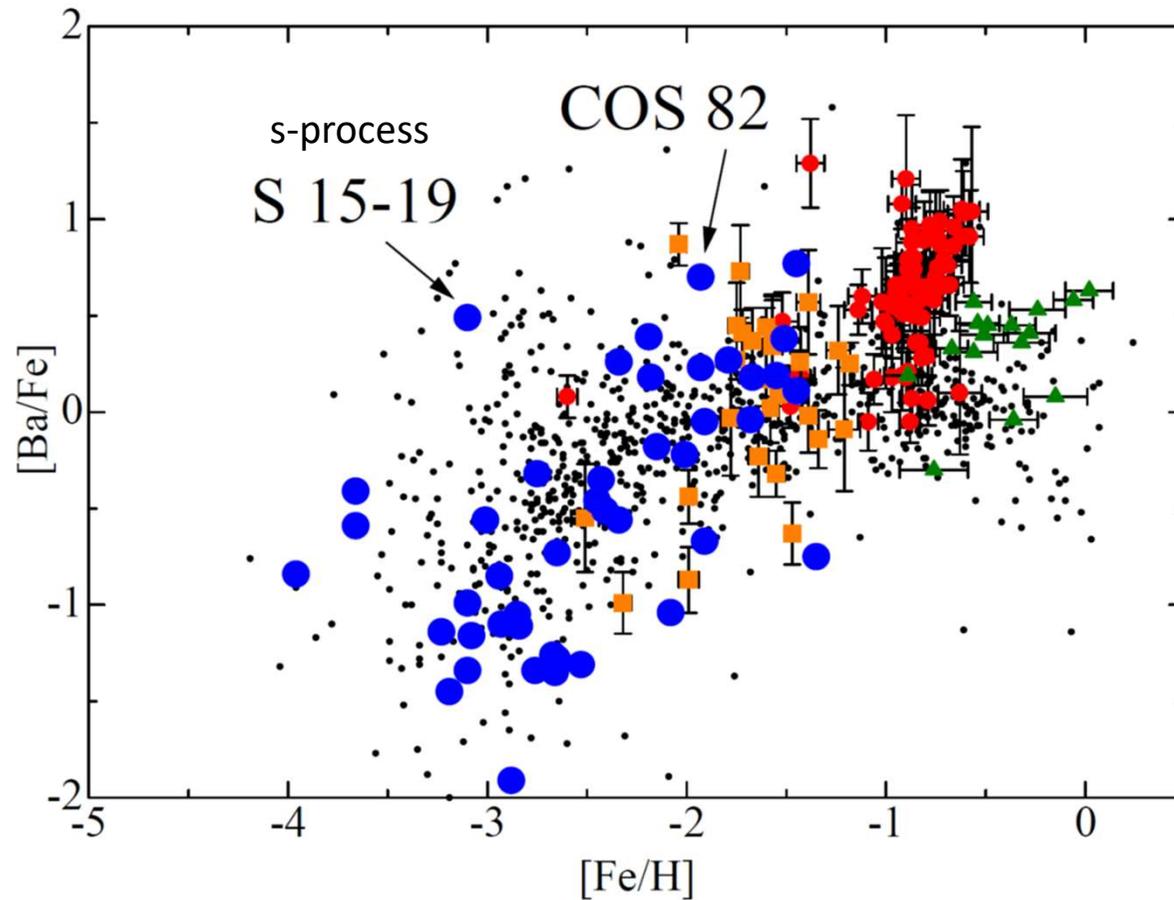
暗い矮小銀河には
金属量の少ない星が
多く含まれている。

この様な矮小銀河内の
星の重元素組成は？



Kirby et al. 2008
Keck/DEIMOS

Neutron-capture elements in EMP stars in faint dwarf galaxies



Honda et al. 2011

No r-process enhanced EMP star was found in dwarf galaxies and ultra-faint dwarf galaxies.

5% \sim r-II star in MW
Barklem et al. 2005

This trend supports the NSM.

c.f. Tsujimoto & Shigeyama 2014

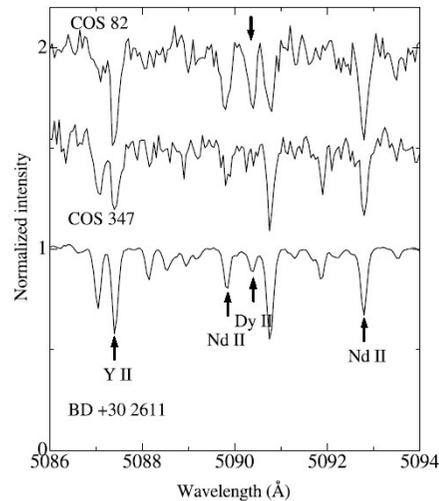
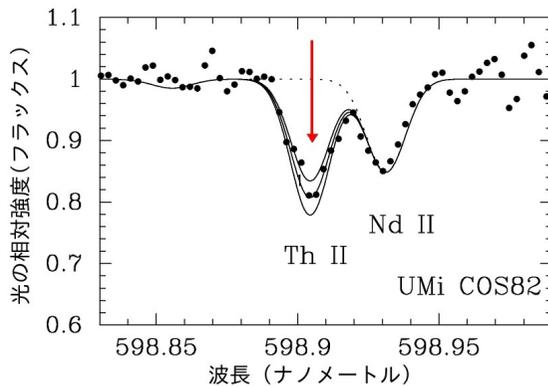
矮小銀河のrプロセス過剰星

UMi COS82

- Thを含むrプロセス元素を検出
- 太陽rプロセスパターンに一致。

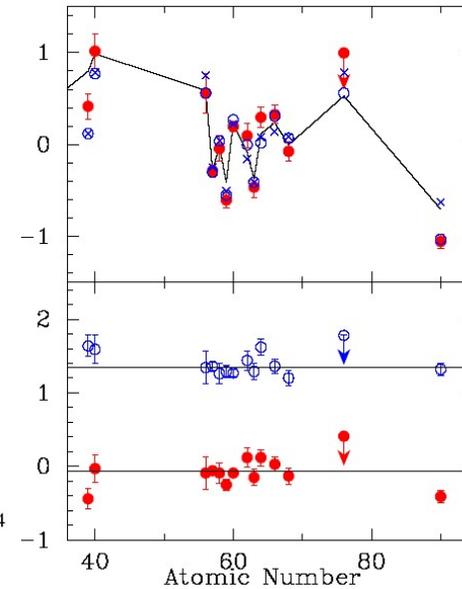


Red giant ($V=17$)
 $T_{\text{eff}} = 4300\text{K}$ $\log g = 0.6$
 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$
 $[\text{Eu}/\text{Fe}] = +1.5$



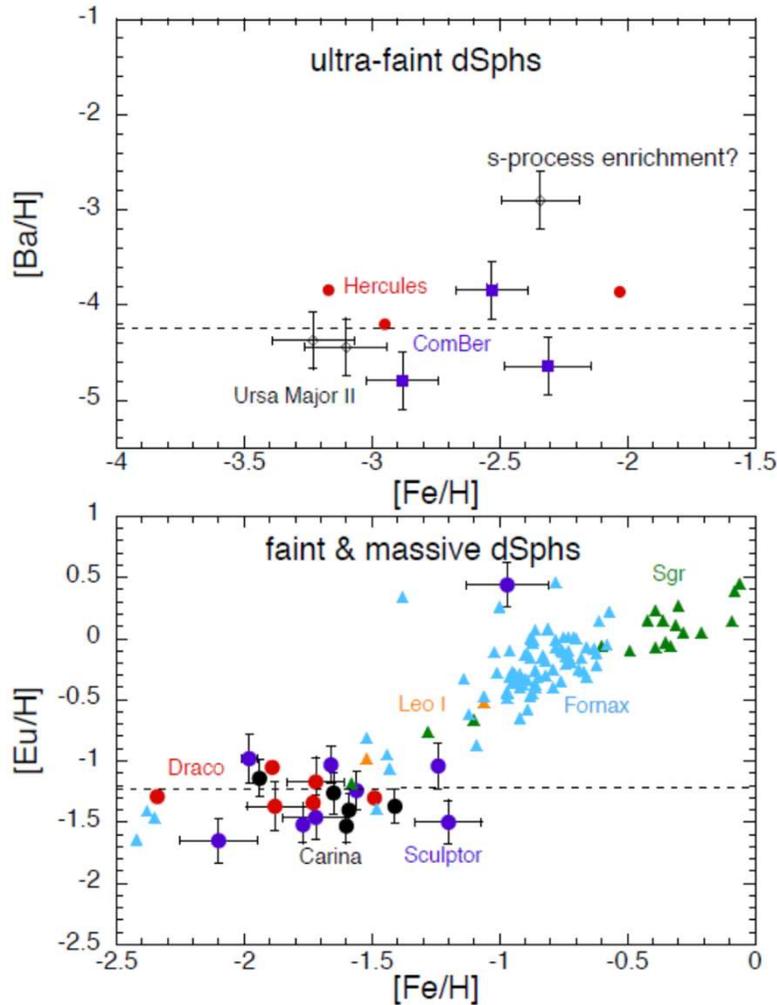
Sakari Telescope, NAOJ

Sadakane et al. 2004



Aoki et al. 2007

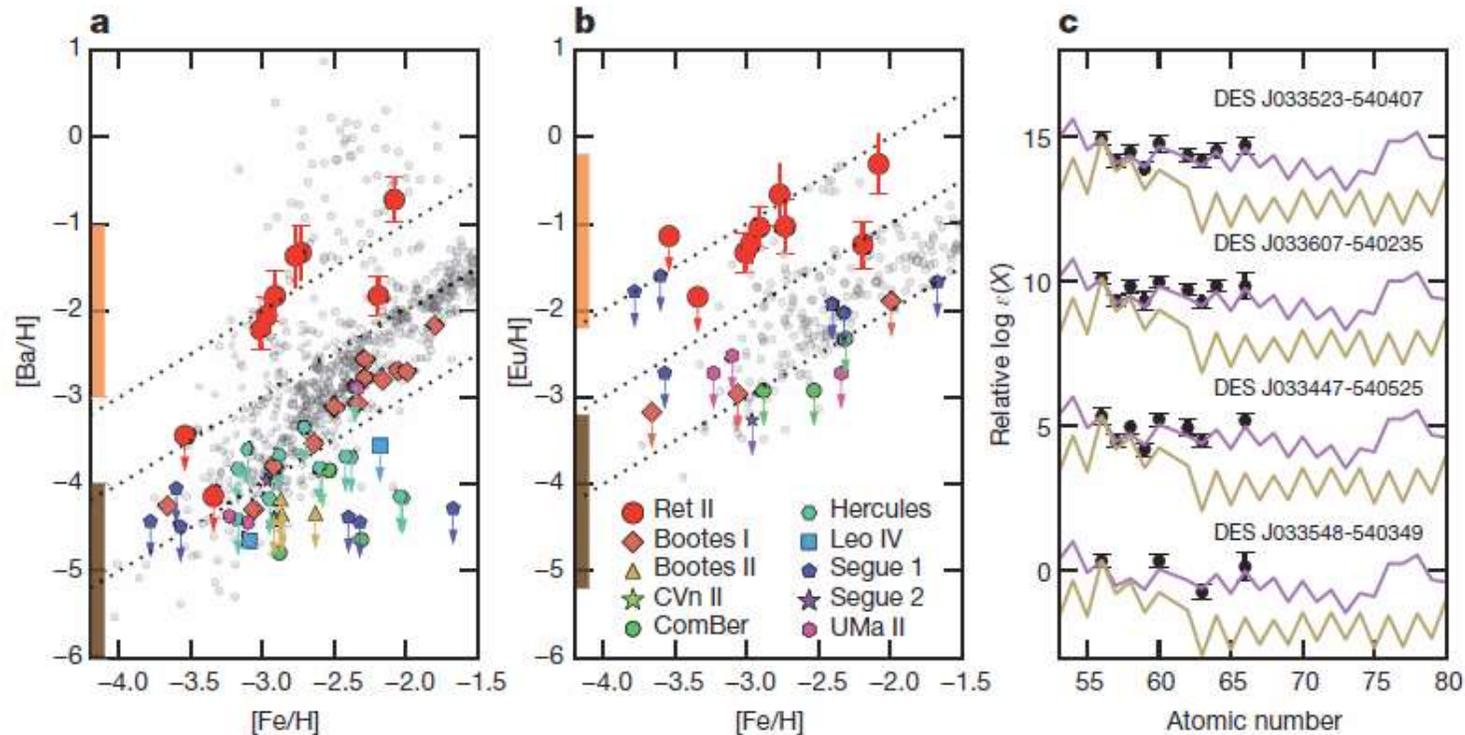
中性子星合体説を支持？



- 矮小銀河でEuの過剰が見られないのは、これらの銀河で中性子星合体が起こっていないから。
- 超新星がrプロセスを作るなら、鉄の増加にともなってrプロセスの増加も見られるはず。

Tsujimoto & Shigeyama 2014

Neutron Star mergers are origin of r-process



Ji et al. 2016, Roederer et al. 2016

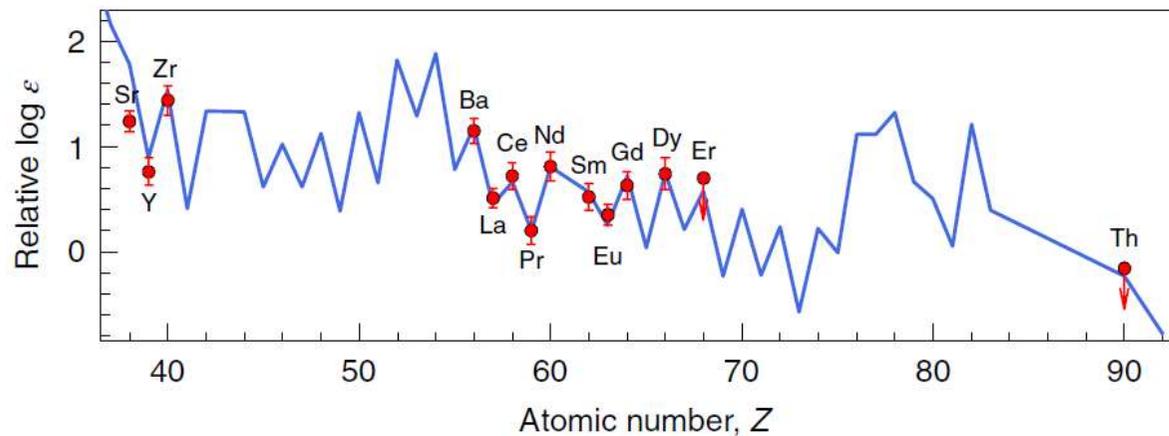
Discovery of the r-process-rich dwarf galaxy Reticulum II

-> enriched in r-process elements by a single, rare event, such as a neutron star.

天の川銀河に存在する 矮小銀河起源のrプロセス星

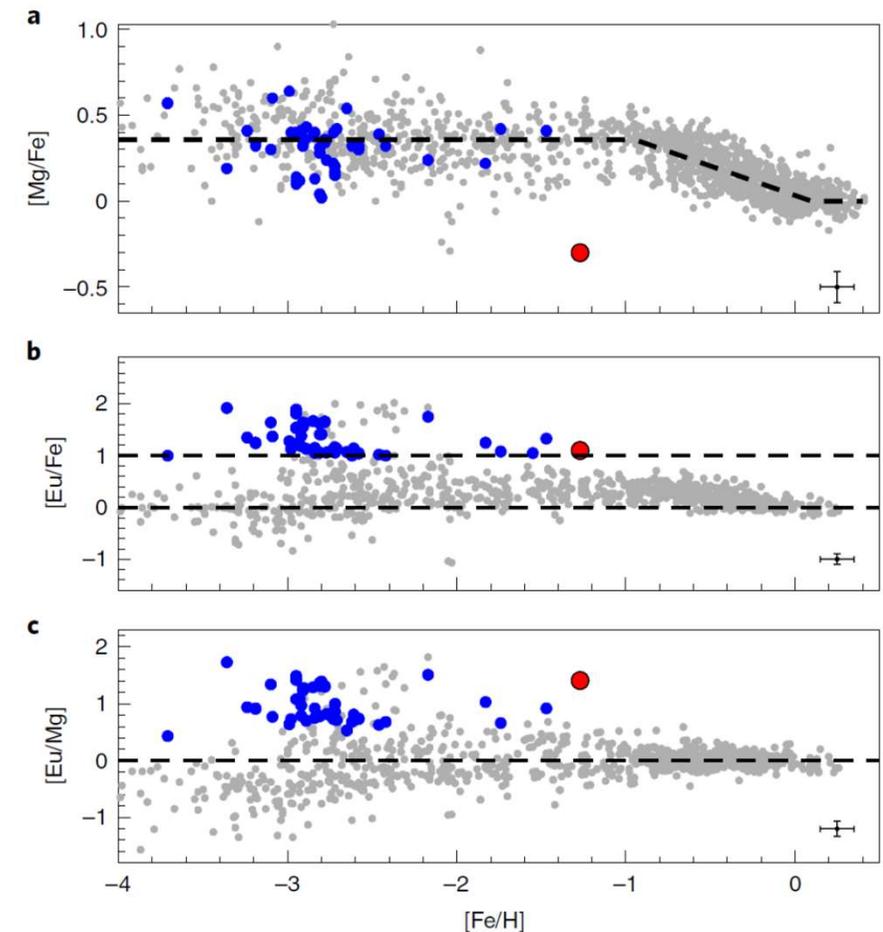
Xing et al. 2019

LAMOST+Subaruで発見した星 J1124+4535

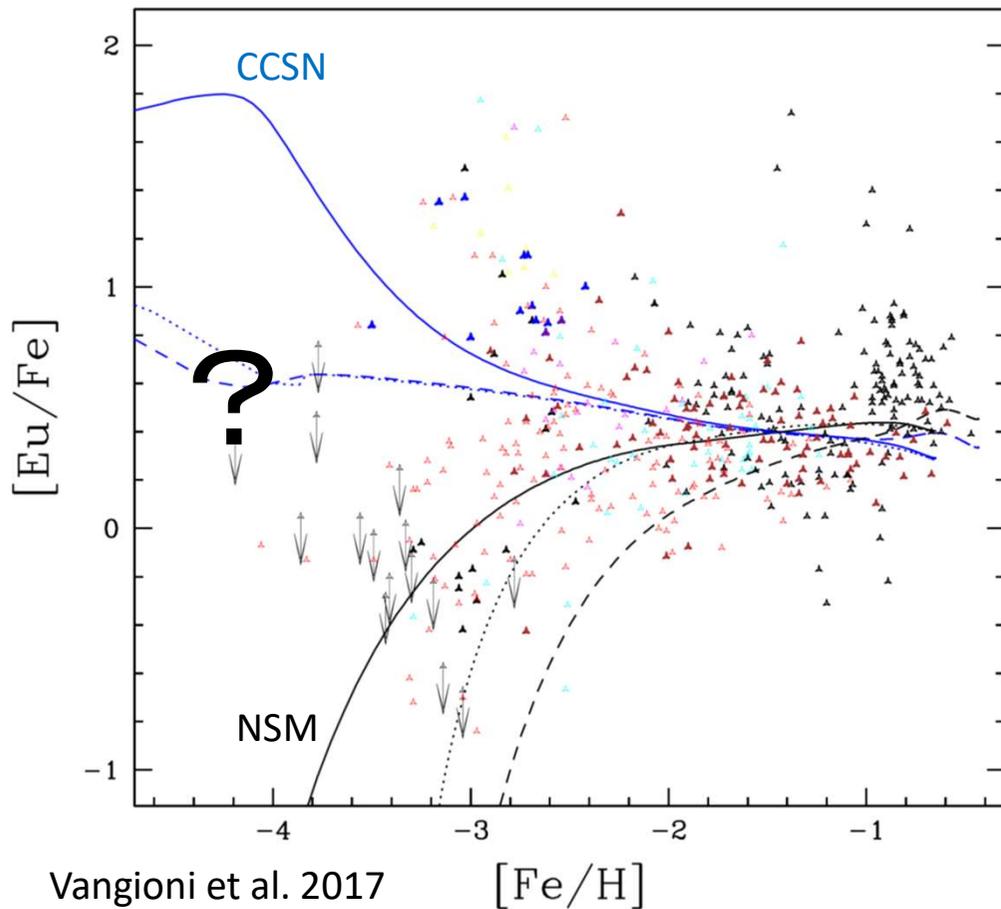


Fe/H = -1.5 程度でMgが非常に低い
→ 矮小銀河起源

rプロセスがenhanceしており、r-processパターンに一致
→ NSMを反映



Chemical evolution models of r-process



- r-process elements (e.g., Eu) show large scatter in $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$
- Some objects show extremely large abundance.
 - $[\text{Eu}/\text{Fe}] > +1$, $[\text{Ba}/\text{Eu}] < 1$: r-II star
- NSM could not reproduce large dispersion of Eu in very low metal stars.
- Very short merger time of NSM are needed.

Chemical evolution models prefer CCSN ?

Survey of ultra metal-poor stars ($[Fe/H] < -4$)

- Survey projects

- HK survey and Hamburg/ESO Survey
- SDSS/SEGUE, APOGEE, RAVE
- Photometric survey with SkyMapper (+Kiso?)
- GAIA/ESO
- LAMOST
- etc.

- Follow-up with high-resolution spectroscopy

- 8-10m class telescopes
- 4-2m for bright stars
- Next generation large telescopes
 - 2027~
 - TMT, GMT, E-ELT



SkyMapper



SDSS



refining the target by 2-4m telescope

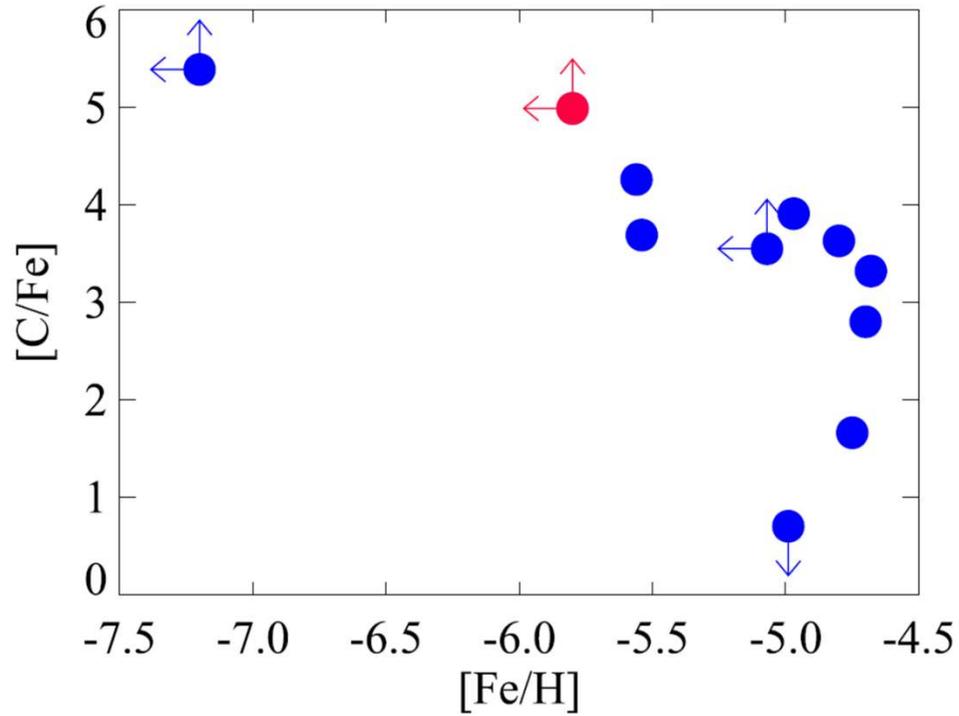


Subaru, Keck, GMT etc.

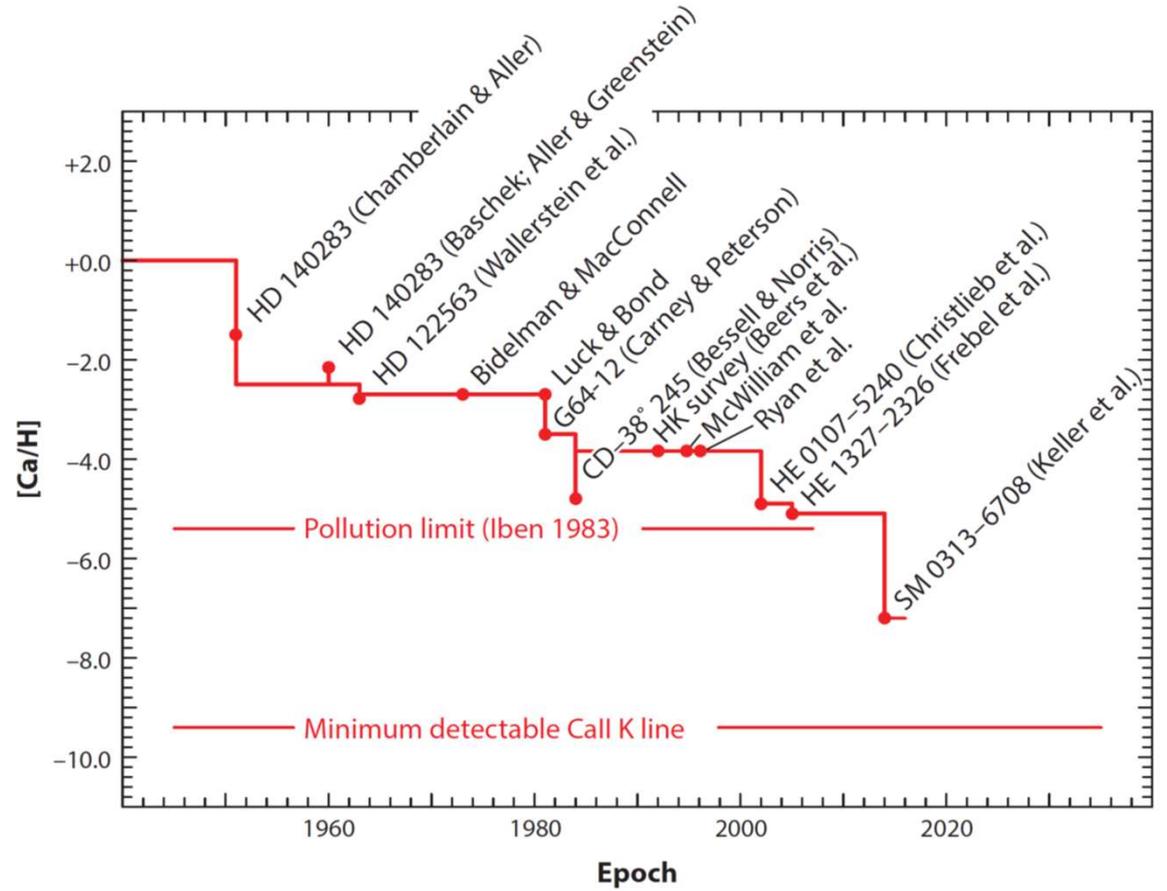


TMT

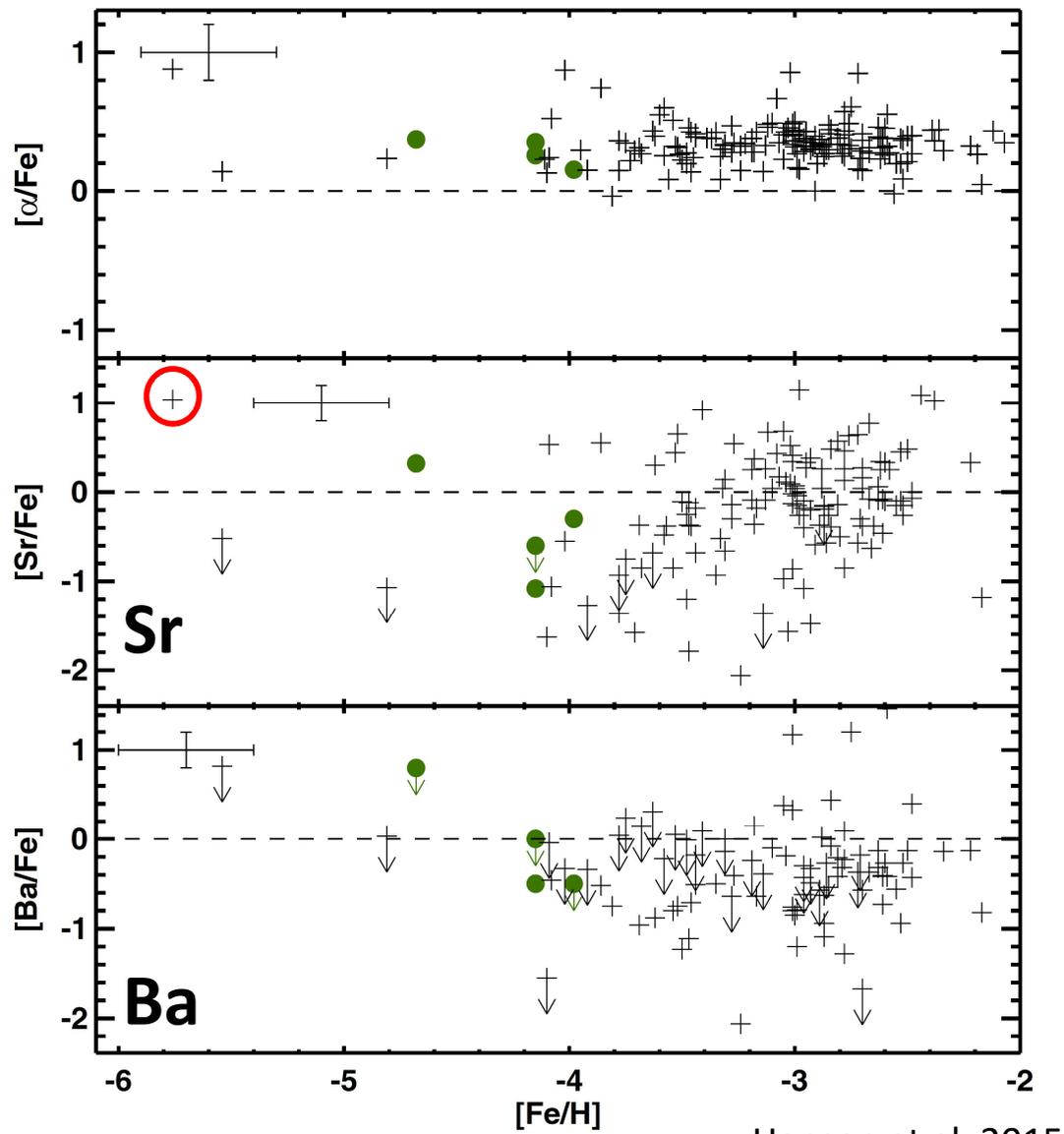
Discovery of hyper metal-poor stars ($[Fe/H] < -5$)



Aguado et al. 2018



Frebel & Norris 2015



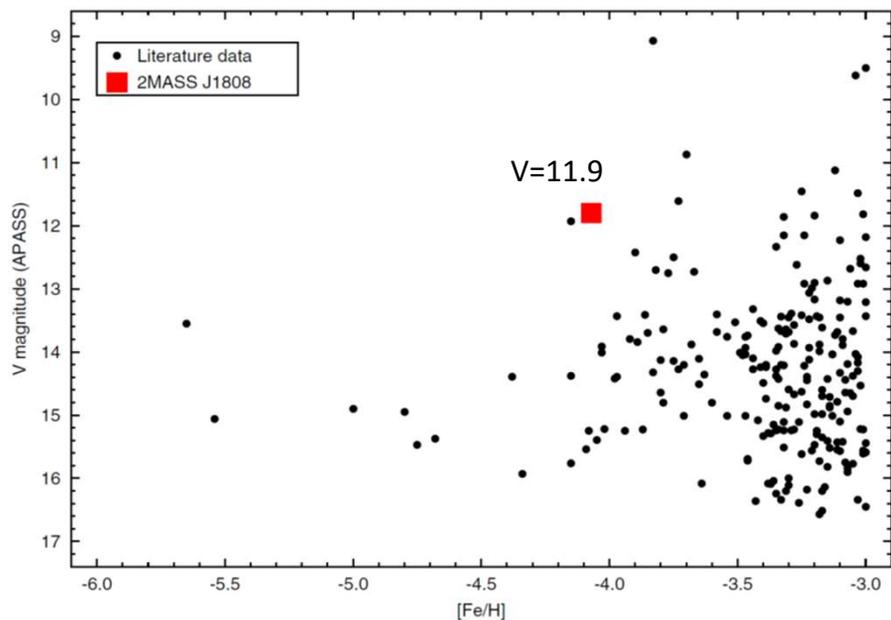
Hansen et al. 2015

Neutron-capture elements

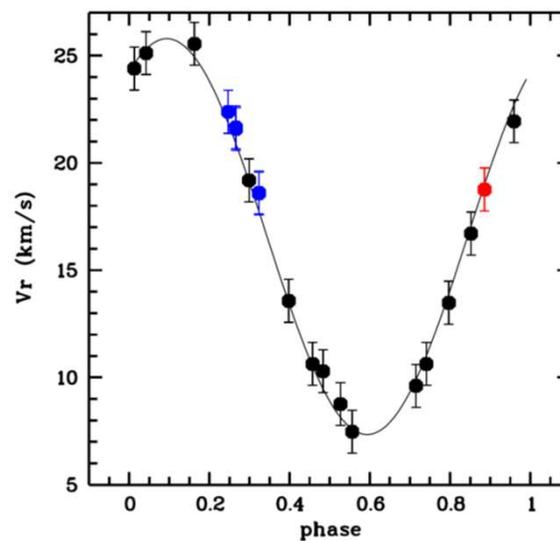
- Sr and Ba are the most detectable elements.
- no stars with high Ba in $[Fe/H] < \sim -4$
- Sr was detected in HE 1327-2326 ($[Fe/H] = -5.7$)
- weak r-process is primary process ?
- Support NSM scenario.

2MASS J1808-5104 ($[Fe/H]=-4.1$)

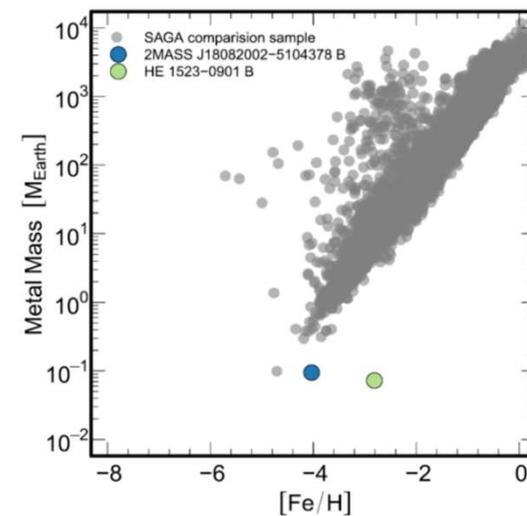
明るい金属欠乏星が銀河円盤の軌道で見つかった。
伴星 ($M=0.14M_{\odot}$) の存在も観測された。



Melendez et al. 2016

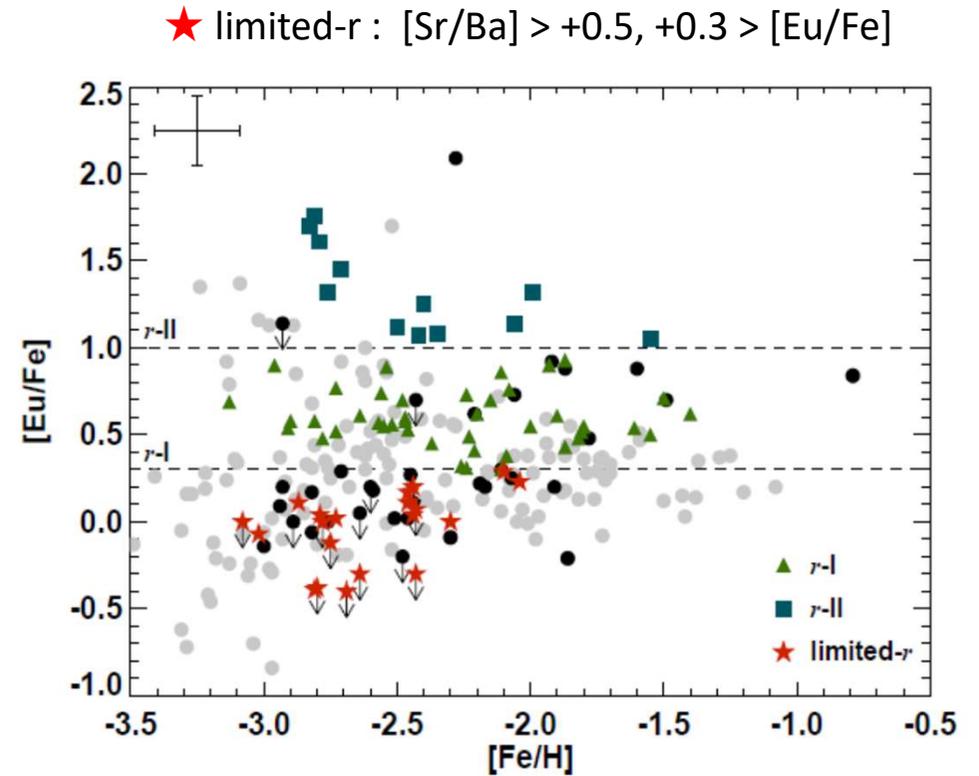
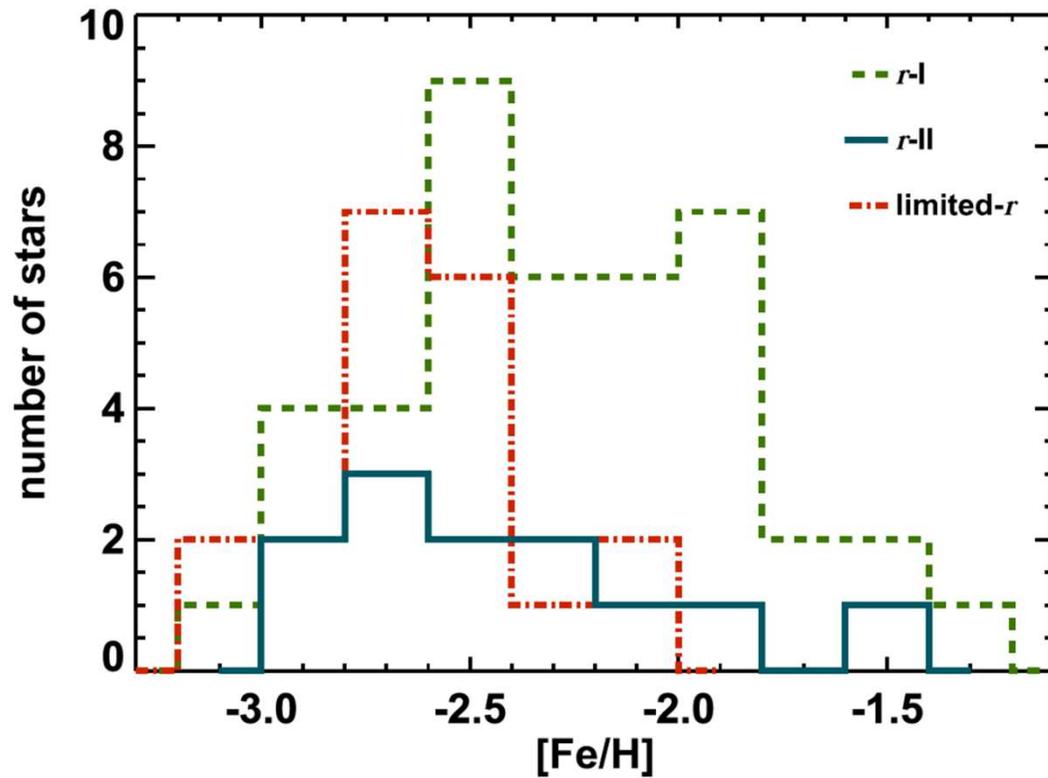


Spite et al. 2019



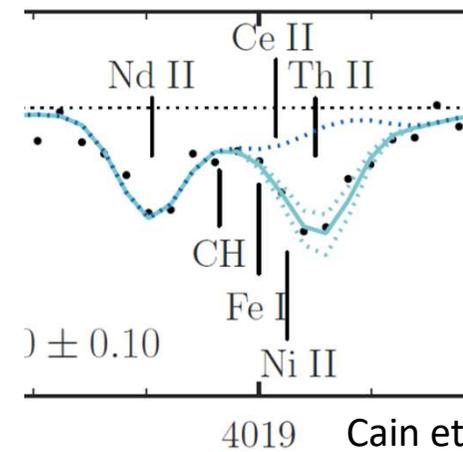
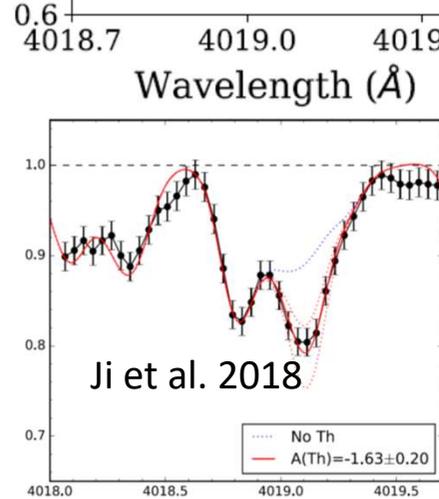
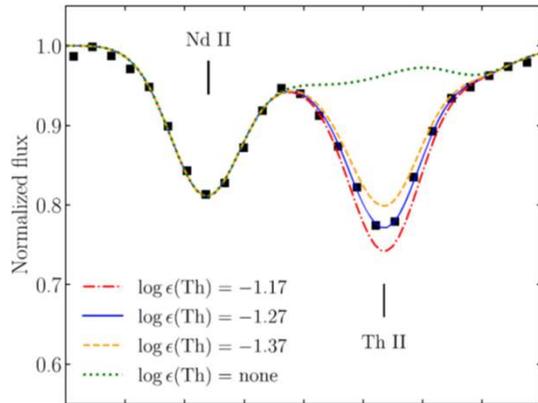
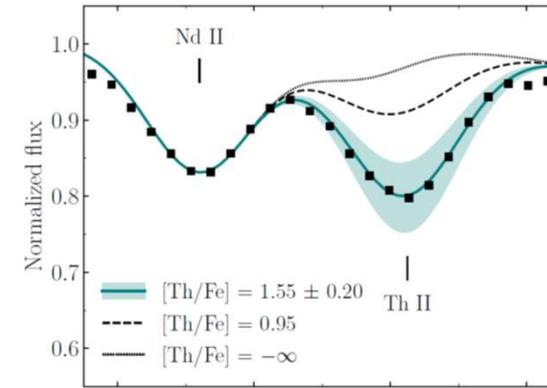
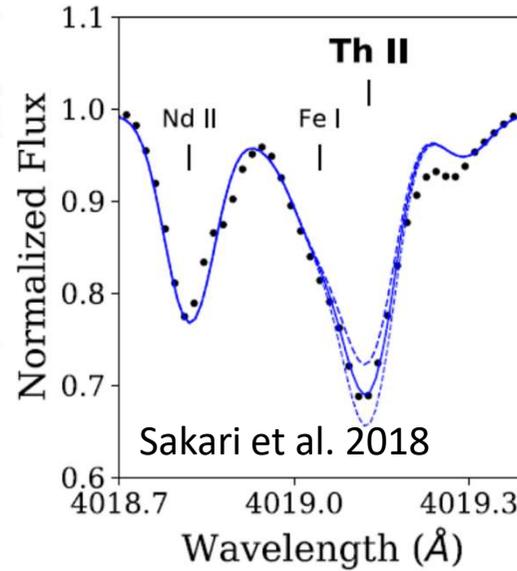
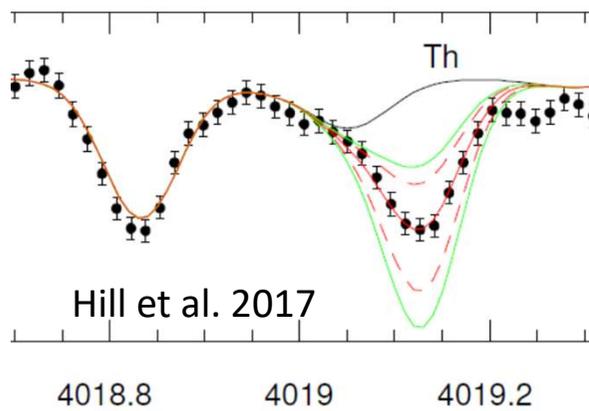
Schlaufman et al. 2018

r-II星の探査 (The R-process Alliance)



Hansen et al. 2018

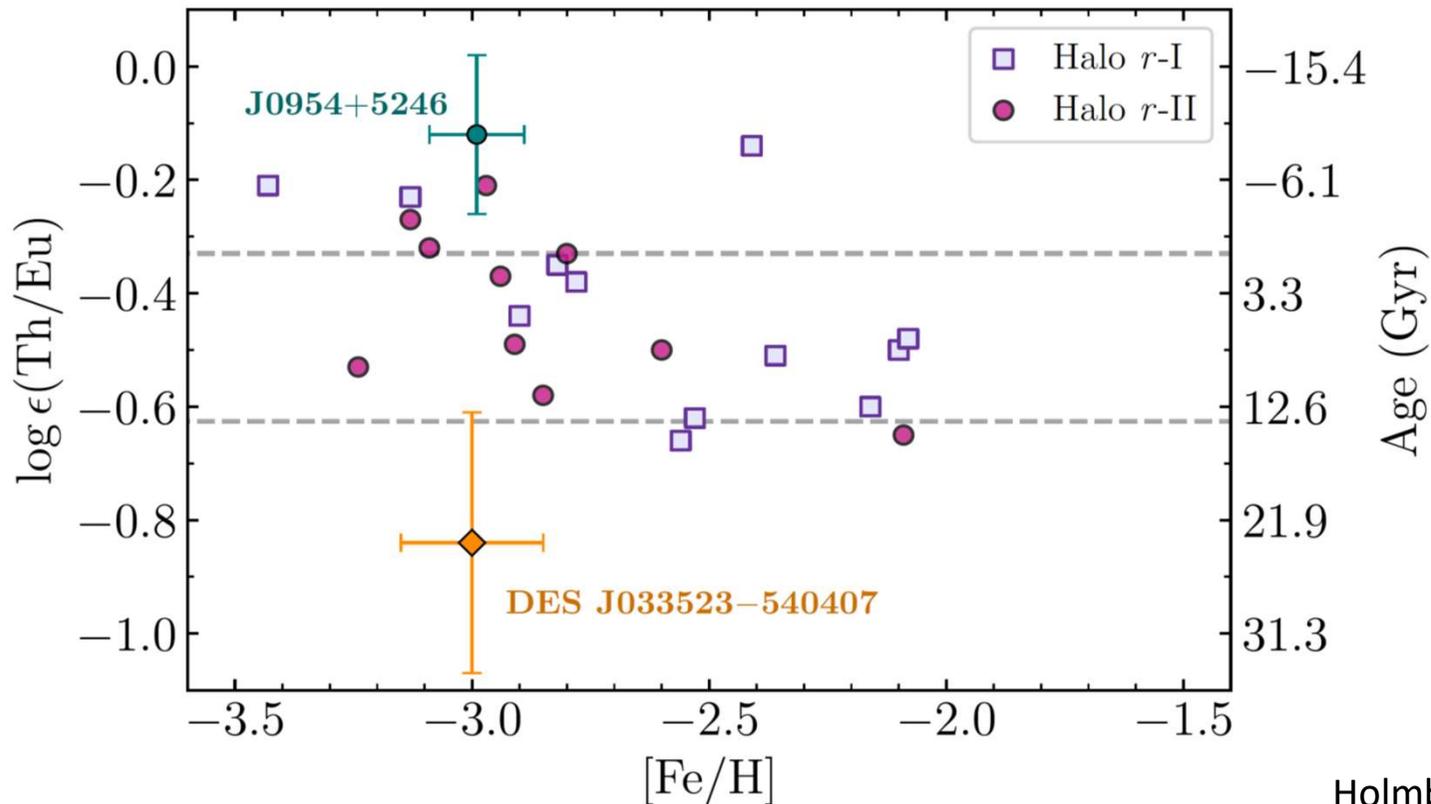
Recent observations of Th in r-process stars



Holmbeck et al. 2018

Cain et al. 2018

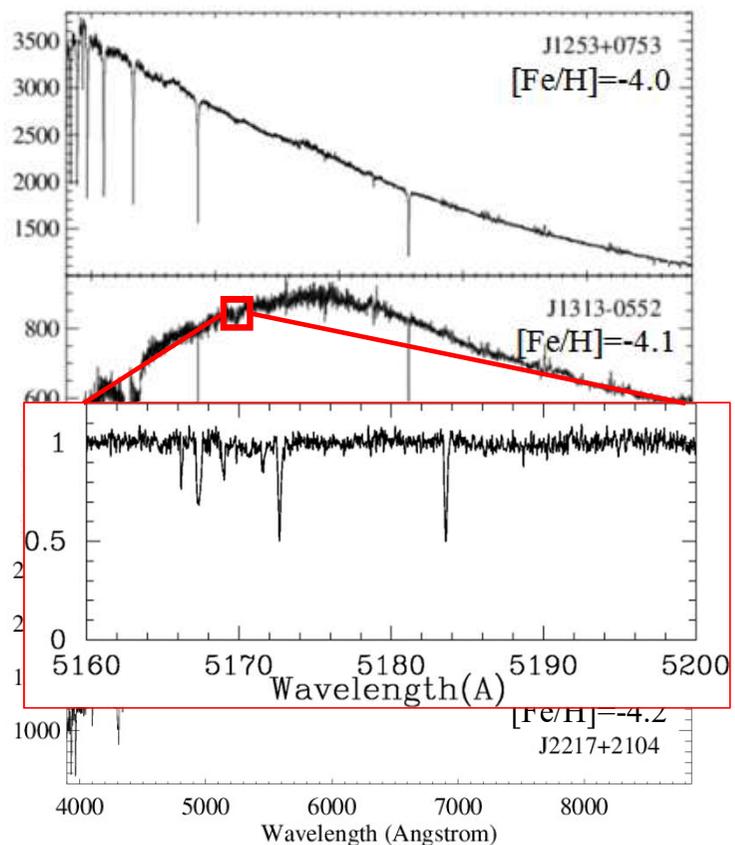
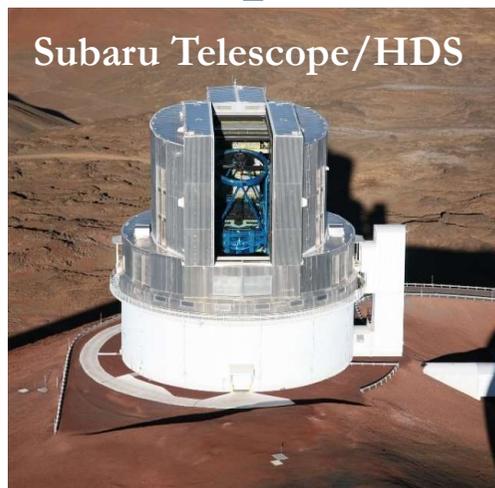
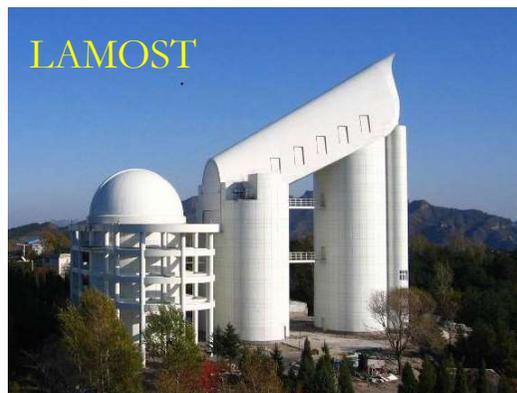
Th/Eu in r-process enhanced stars



The Th/Eu chronometer is used to derive ages by comparing to a set of initial production ratios from r-process simulations

However, in actinide-boost stars, using the Th/Eu ratio leads to unphysical values, since the measured Th/Eu ratio may be higher than the theoretical initial production ratio.

Subaru/HDS follow-up spectroscopy for a large sample of candidate EMP stars found with LAMOST (Aoki, Zhao, et al.)



- More than 500 metal-poor candidates have been selected from LAMOST

medium resolution spectra

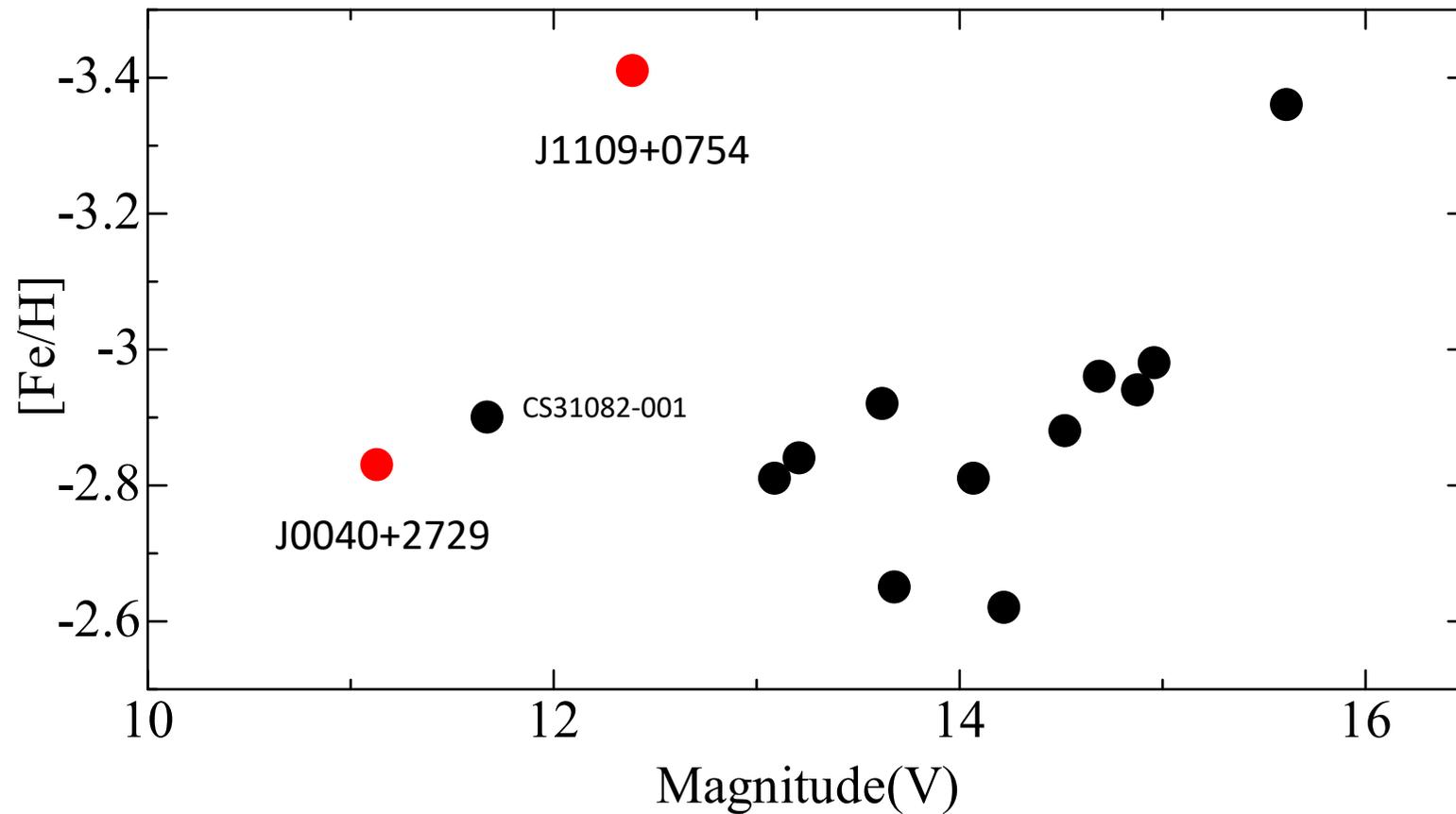


high-resolution spectroscopy

- Follow-up for ~500 stars with three Subaru/HDS runs.

Target selection random selection for a given magnitude/temperature range.

LAMOST and Subaru survey found r-II stars

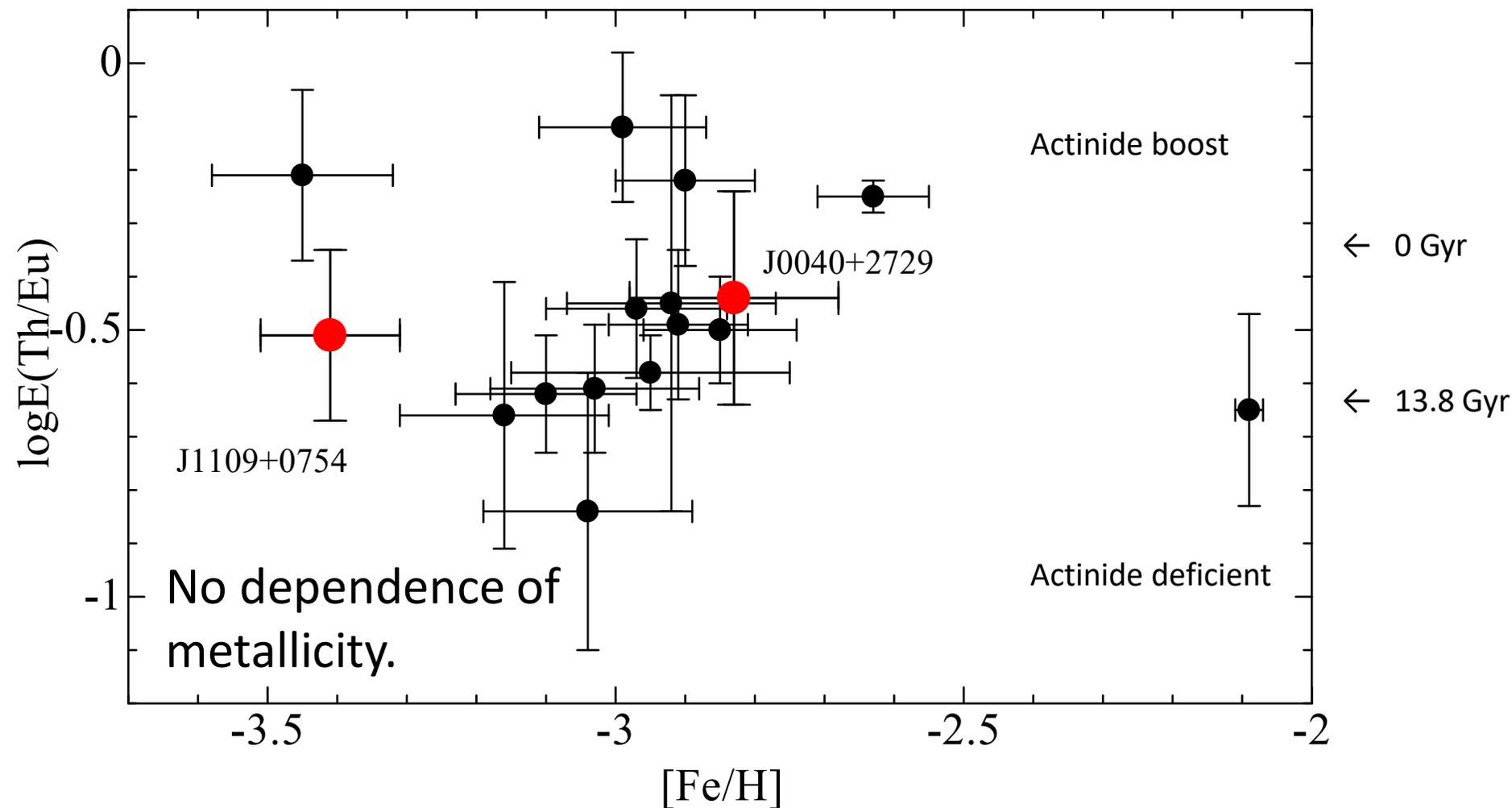


J1109+0754
[Fe/H] = -3.41
[Eu/Fe] = +1.16
(Li et al. 2015)

J0040+2729
[Fe/H] = -2.8
[Eu/Fe] = +1.1

Th/Eu in r-process enhanced stars

銀河系ハロの星



今後期待される観測

- 新たな金属欠乏星のサーベイ観測による明るいr-IIなどの発見。
- HSTによるUV域の観測(HSTがいつまで使えるか不明)。
- すばる/PFSなど多天体分光器の開発によって球状星団や矮小銀河の大規模観測。
- 惑星探査の近赤外線分光観測によって、M型矮星など低質量星の化学組成が得られる。
- TMTなどによって球状星団の主系列星、暗い矮小銀河の金属欠乏星など、より暗い星の観測。
- GAIA衛星による距離や運動の観測は銀河系の形成に重要な情報を与えられる。
- 超新星(残骸)、中性子星合体イベントでの重元素の観測。

まとめ

- 矮小銀河の観測などからrプロセスは中性子星合体が起源であることを示す。
- rプロセス元素は2つ以上の起源をもつ可能性が高い。
- 重力崩壊型超新星爆発も起源である可能性がある。
- ($[\text{Fe}/\text{H}] < -3.5$) の金属欠乏星でのEuの振る舞いが鍵。
- rプロセス過剰星の約1/3はActinide boostを示すが、起源は不明。
- 現在rプロセス過剰星のサーベイ観測が進んでいる。

