

初代星・初代銀河
～金属欠乏星の重元素組成
からの制限

青木和光
国立天文台

鉄より重い元素（中性子捕獲元素）から、初期世代星に関してどのような制限が得られるか

元素の周期表

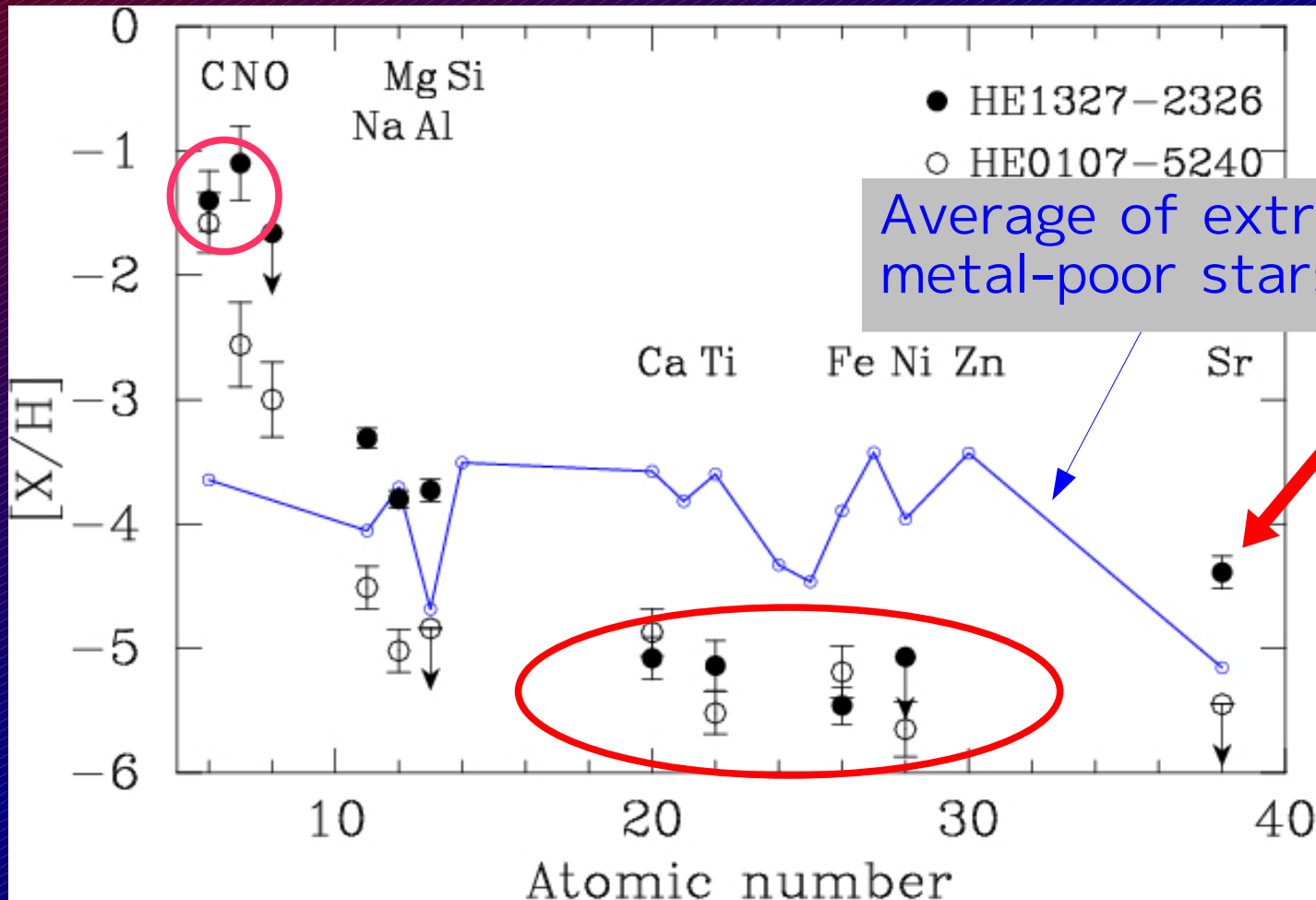
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 水素																	2 He ヘリウム
3 Li リチウム	4 Be ベリリウム											5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン
11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム											13 Al アルミニウム	14 Si 珪素	15 P リン	16 S 硫黄	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン
19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
37 Rb ルビウム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルテチウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	57-71 * ラランタイド	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングスタム	75 Re レニウム	76 Os オスマニウム	77 Ir イリジウム	78 Pt プラチナ	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマス	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89-103 ** アクチノイド	104 Rf ラファエル	105 Db ドブニウム	106 Sg シーボーグ	107 Bh ボーリウム	108 Hs ハッシウム	109 Mt マイタセリウム	110 Uun ウンウンニウム	111 Uuu ウンウンニウム	112 Uub ウンウンビウム						
* ランタノイド	57 La ランタン	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム	63 Eu ユーロピウム	64 Gd ガドリウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジスプロシウム	67 Ho ホルミウム	68 Er エルビウム	69 Tm テルミウム	70 Yb イットリウム	71 Lu ルテチウム		
** アクチノイド	89 Ac アクチン	90 Th トランサクトリウム	91 Pa プロトアクチン	92 U ウラン	93 Np ネプツウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm カリフォルニウム	97 Bk バークリウム	98 Cf カリフォルニウム	99 Es エイスンスタット	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデルレービウム	102 No ノーベリウム	103 Lr ローレンシウム		

Neutron-capture elements in the most iron-deficient star HE1327-2326 - A clue for the site of the weak r-process



$[\text{Fe}/\text{H}] = -5.4$
Frebel et al. (2005)
Aoki et al. (2006)

Chemical abundance pattern of HE1327-2326



Fe-peak elements are deficient, while C (and N, Na etc) show large excesses.

Proposed models to explain the abundance pattern of HE1327-2326

- **Population III (=1st generation star) scenario:**
HE1327 (as well as HE0107) formed from primordial (metal-free) clouds, but polluted by interstellar medium (Fe etc.) and AGB stars (C etc.).
- **Population II (>2nd generation star) scenario:**
HE1327 (as well as HE0107) formed from clouds polluted by 1st generation massive stars, that have provided C-rich material.
 - SNe with mixing & fallback
(Umeda & Nomoto 2003, Iwamoto et al. 2005)
 - Wind from rotating massive stars
(Meynet et al. 2006, Hirschi et al., this conference)

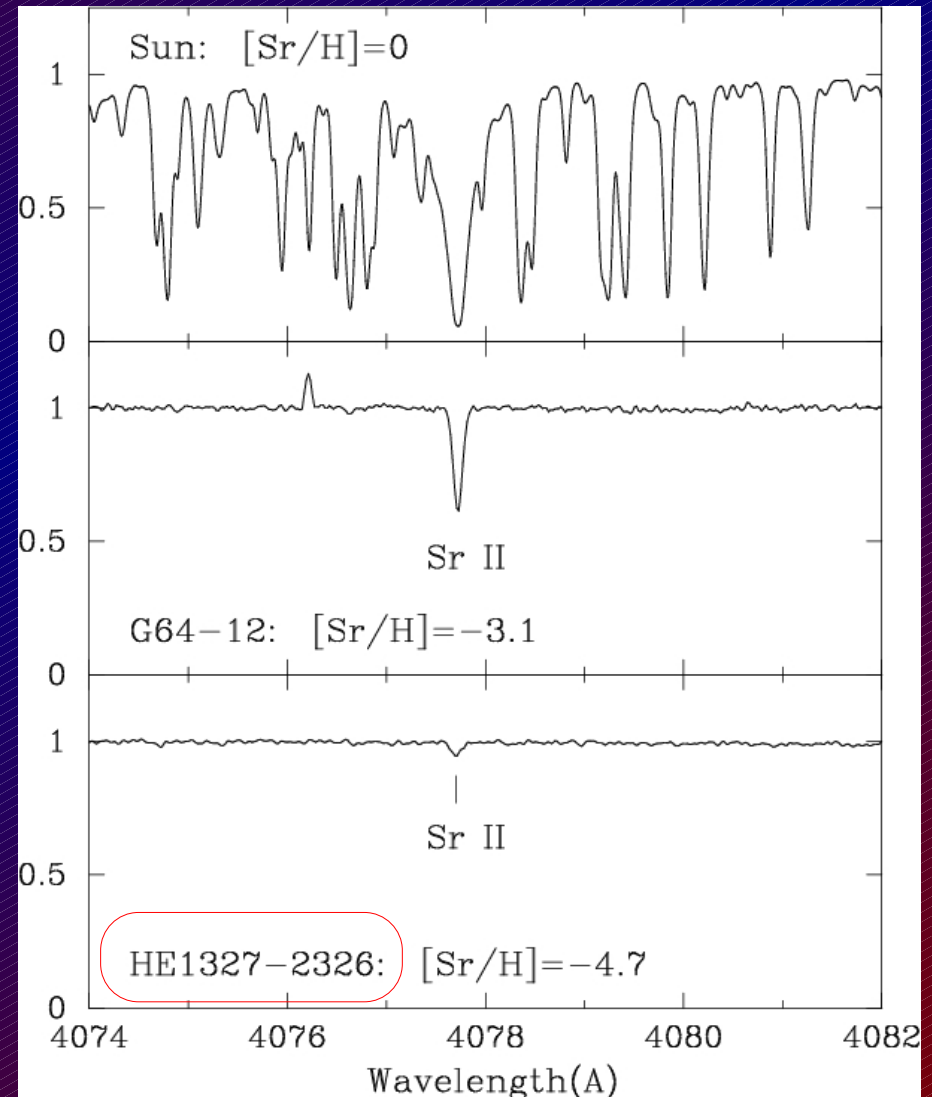
Sr overabundance in HE1327-2326

- Excess of Sr: $[\text{Sr}/\text{Fe}] \sim +1$
- Ba is not detected.

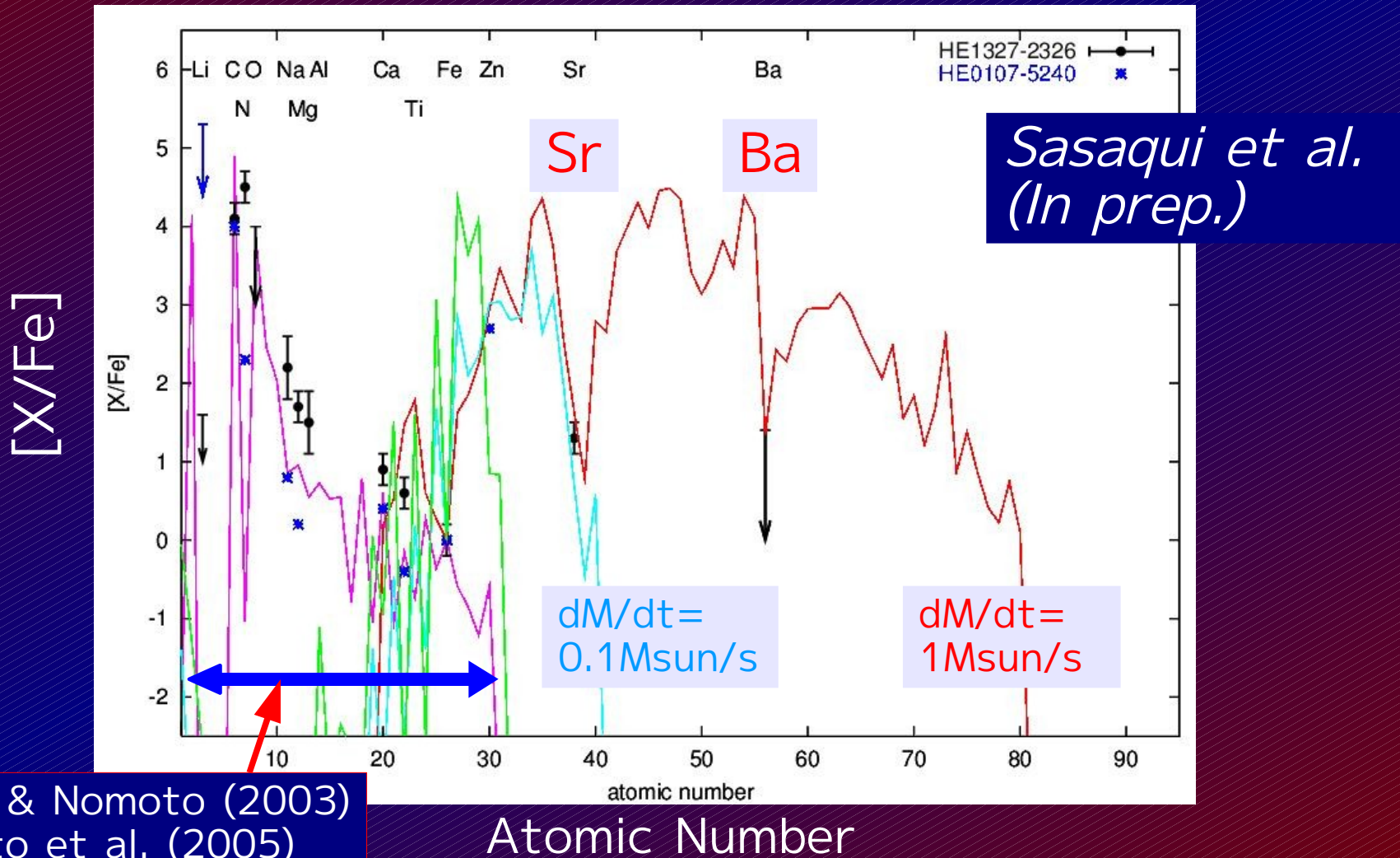
lower-limit of Sr/Ba
... $[\text{Sr}/\text{Ba}] > -0.4$

The main r-process is not excluded as a source of n-capture elements, but weak r-process would be preferable.

↓
Progenitor of HE1327 is the weak r-process site?



A possible scenario: neutron-capture in the jet component of a “collapsar”



(cf. Frohlich; Surman; Nagataki & Wanajo, Nuclei in the Cosmos IX)

金属欠乏星一般の中性子捕獲元素
から何がわかるか？

初期宇宙の中性子捕獲反応

- **r-process**

- supernovae (?) \Rightarrow early Galactic enrichment

- **s-process**

- main** component: intermediate-mass stars

- The effect appears more slowly than r-process

- (-**weak** component: massive stars, but effective at high metallicity)

-very metal-poor stars with excesses of light neutron-capture elements \Rightarrow 2nd component of r-process?

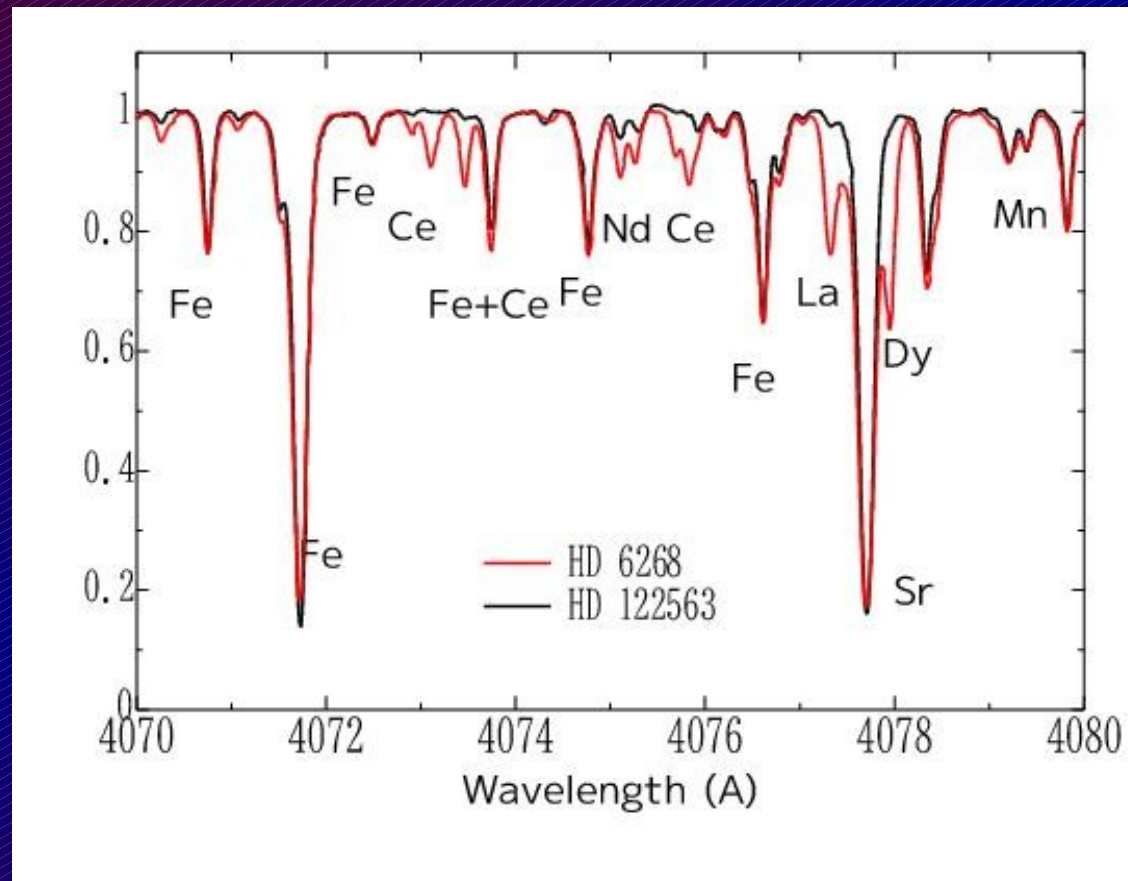
初期宇宙の中性子捕獲反応

軽い中性子捕獲元素合成プロセスの存在

- I. 超金属欠乏星における「軽い」中性子捕獲元素と「重い」中性子捕獲元素の組成分布
- II. 軽い中性子捕獲元素を合成するプロセスでつくられる組成パターン

Metal-deficient stars as probes of neutron-capture processes

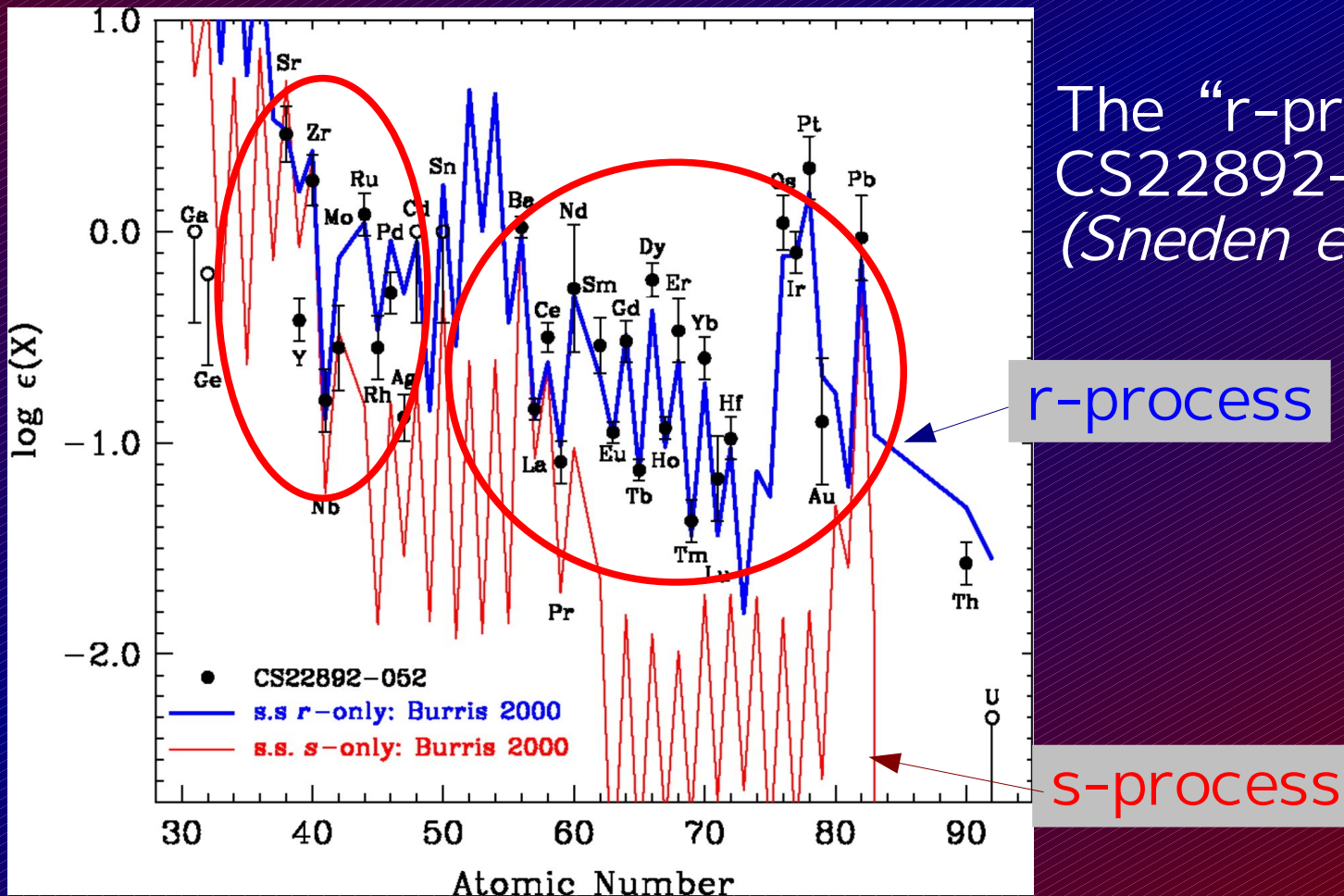
High-resolution spectroscopy for selected sample



Honda et al. (Nuclei in the cosmos IX)

Abundance pattern of r-process stars

- Universality of the abundance pattern of *heavy* n-capture elements
- Variation of the pattern of *light* n-capture elements



The “r-process star”
CS22892-052
(Snedden et al. 2003)

Multi-components of “r-process” elements in the solar system

The light neutron-capture elements of the Solar-System r-process component are not completely explained by the abundance pattern of r-process stars.



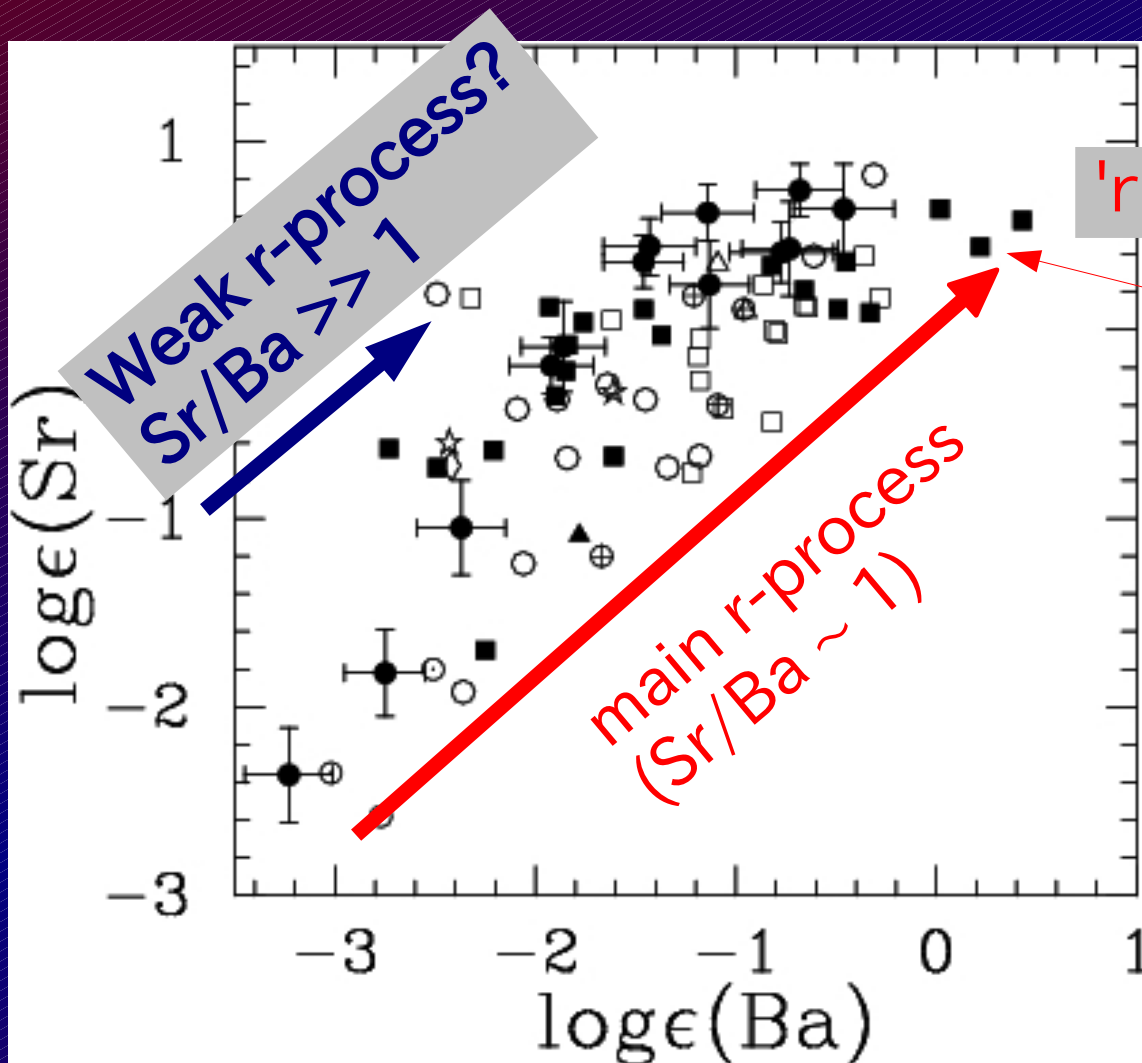
2nd component of r-process
 (“weak r-process”)

n.b. Uncertainties in the estimate of s- and r-process components in solar-system material are relatively large.

⇒ **Observations for metal-poor stars are important!**

I. Abundance distributions of *light* and *heavy* neutron-capture elements

(1) Sr and Ba in very metal-poor field stars



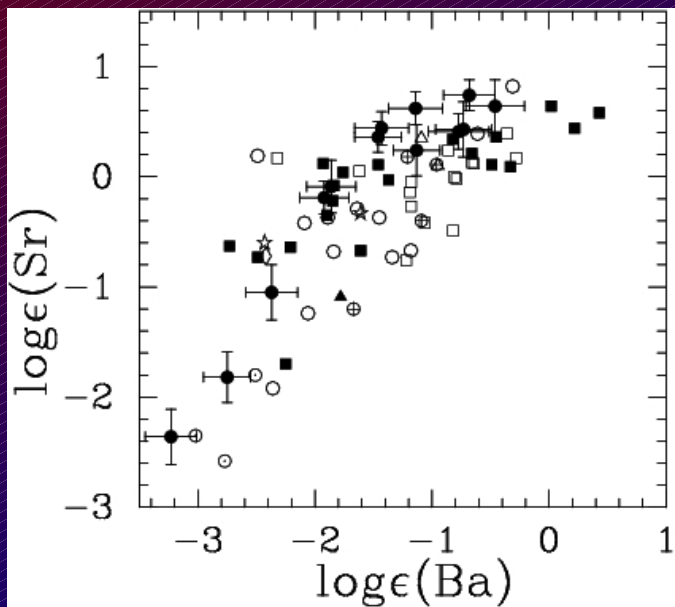
CS22892-052

Field halo stars with
[Fe/H] < -2.5

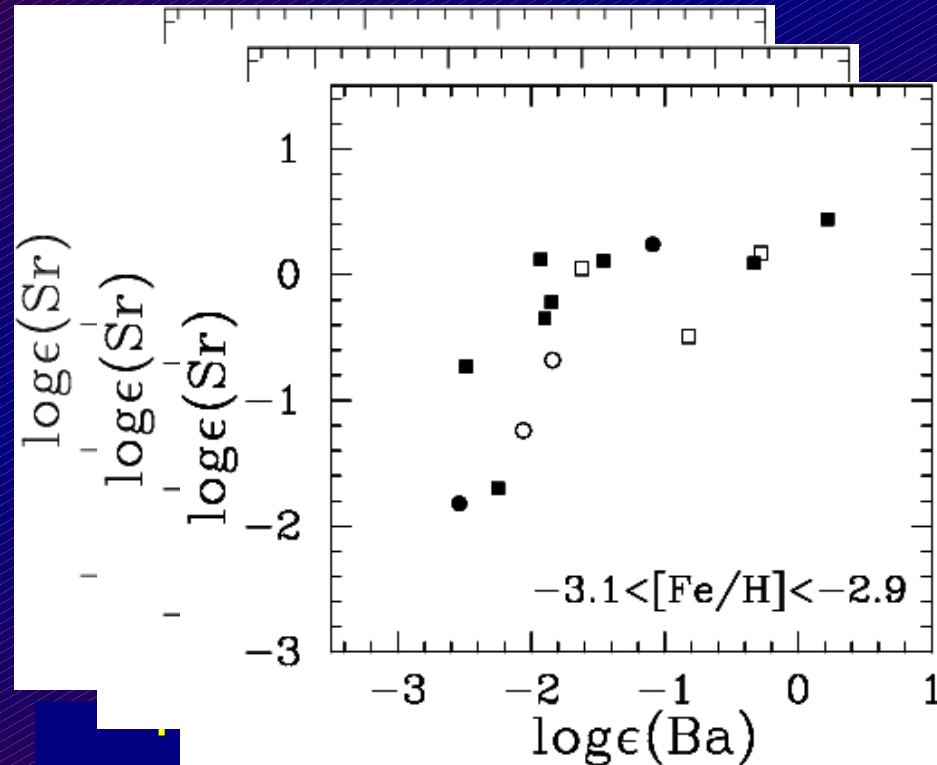
(s-process-enhanced
stars are excluded)

Aoki et al. 2005

I. Abundance distributions of *light* and *heavy* neutron-capture elements (2) metallicity dependence



$[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$



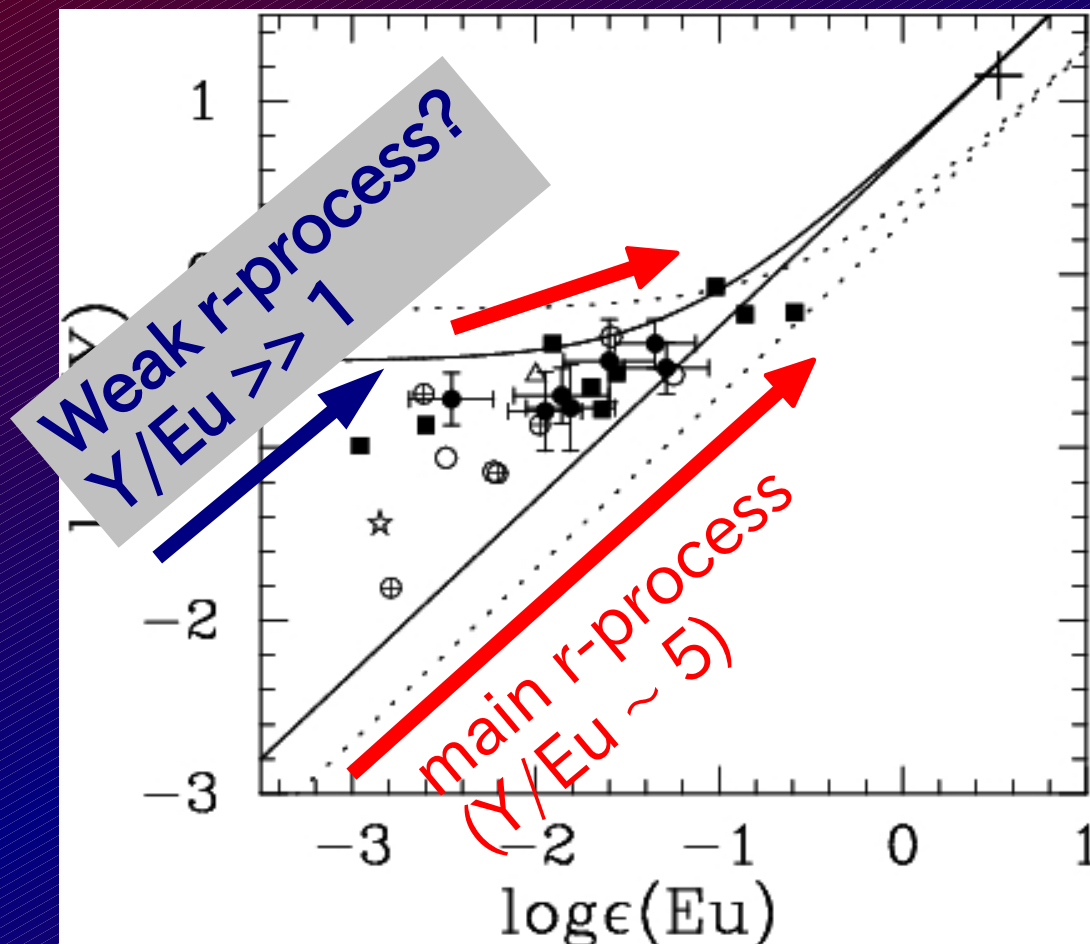
$-3.1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2.9$

$-3.1 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2.9$

- Ba enrichment is found in stars with $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -3$.
- Sr excess is found in some objects with $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$.

I. Abundance distributions of *light* and *heavy* neutron-capture elements

(3) Y and Eu in very metal-poor field stars



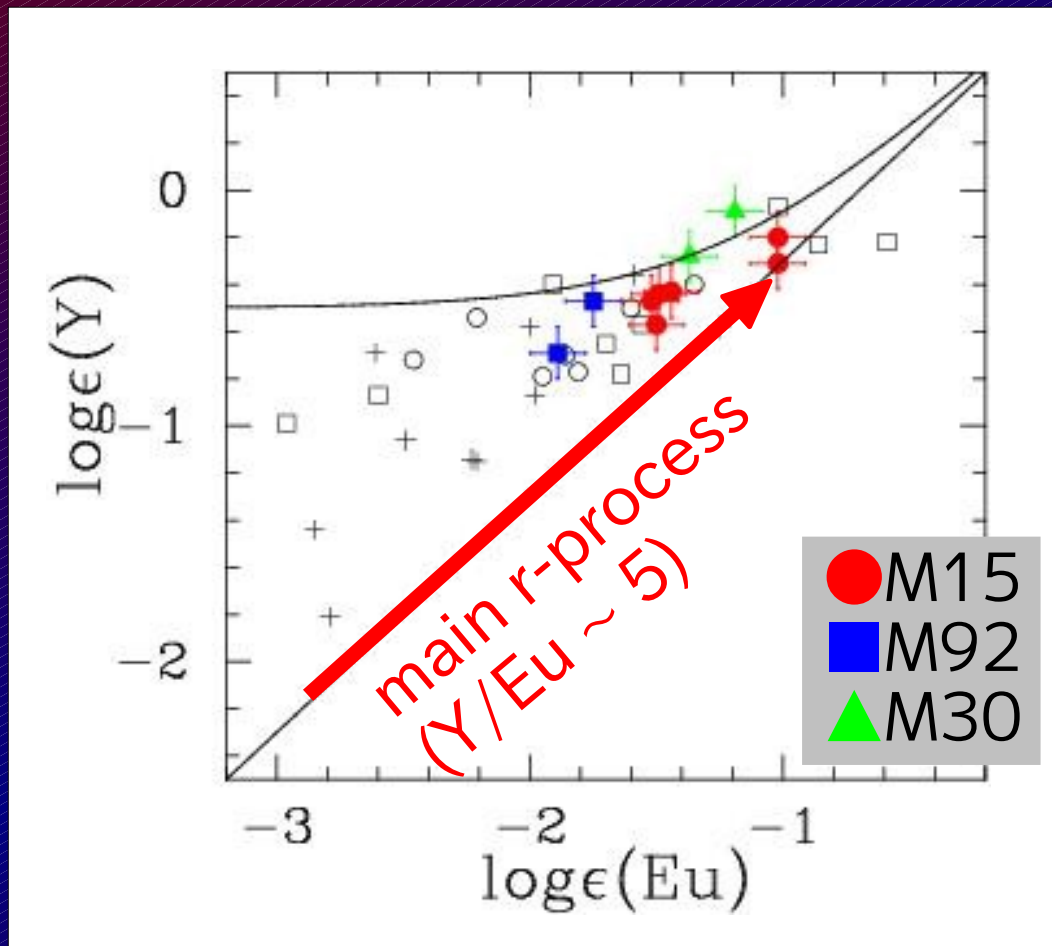
Y and Eu are measured only for neutron-capture enhanced stars, but the measurement accuracy is higher.

Field halo stars with $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$

(s-process-enhanced stars are excluded)

Aoki et al. 2005

I. Abundance distributions of *light* and *heavy* neutron-capture elements (4) metal-poor ($[Fe/H]=-2.3$) globular clusters



Contribution of the weak r-process is also found in metal-poor globular clusters.

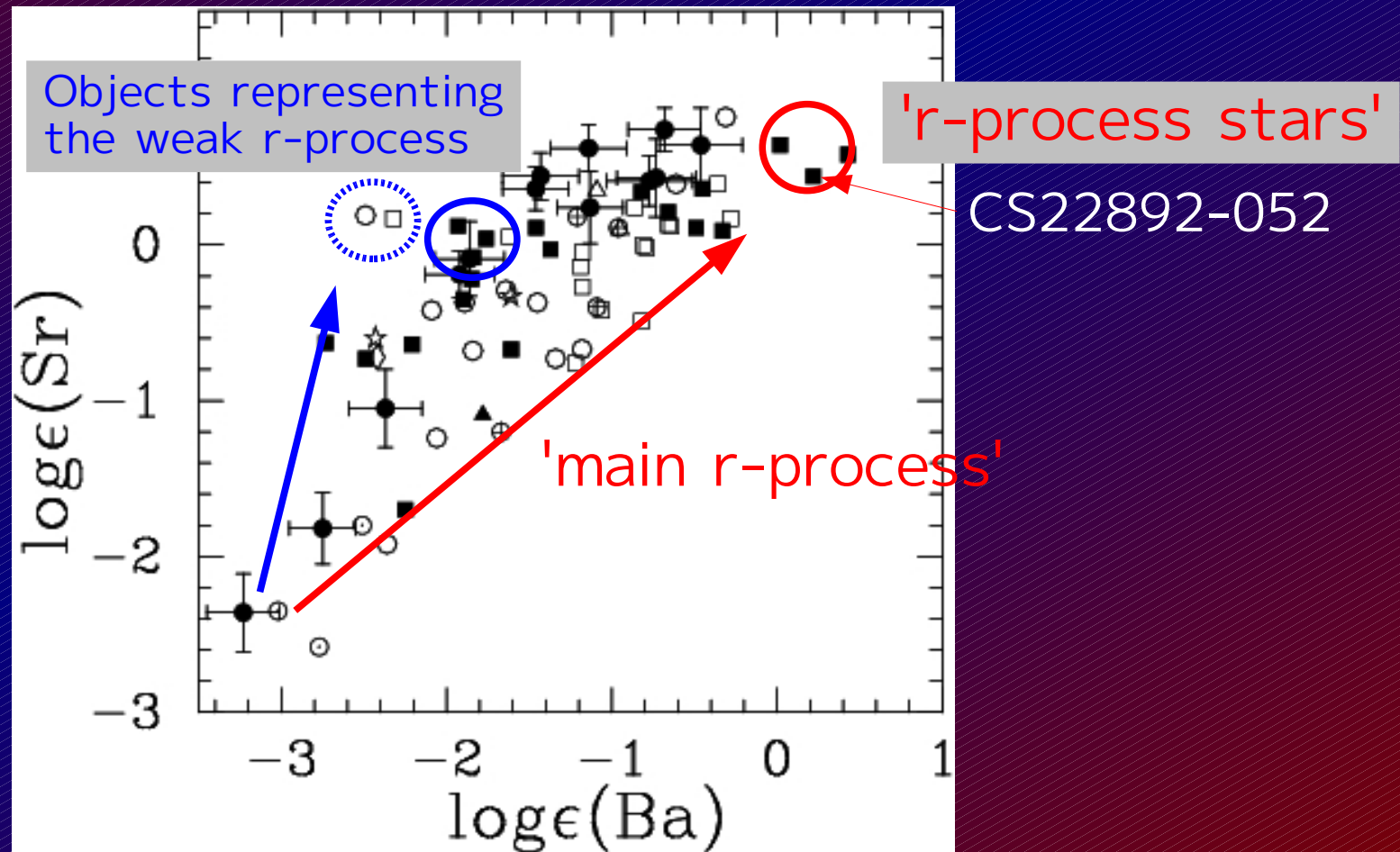
Otsuki et al. 2006

Contribution of the weak r-process at low metallicity

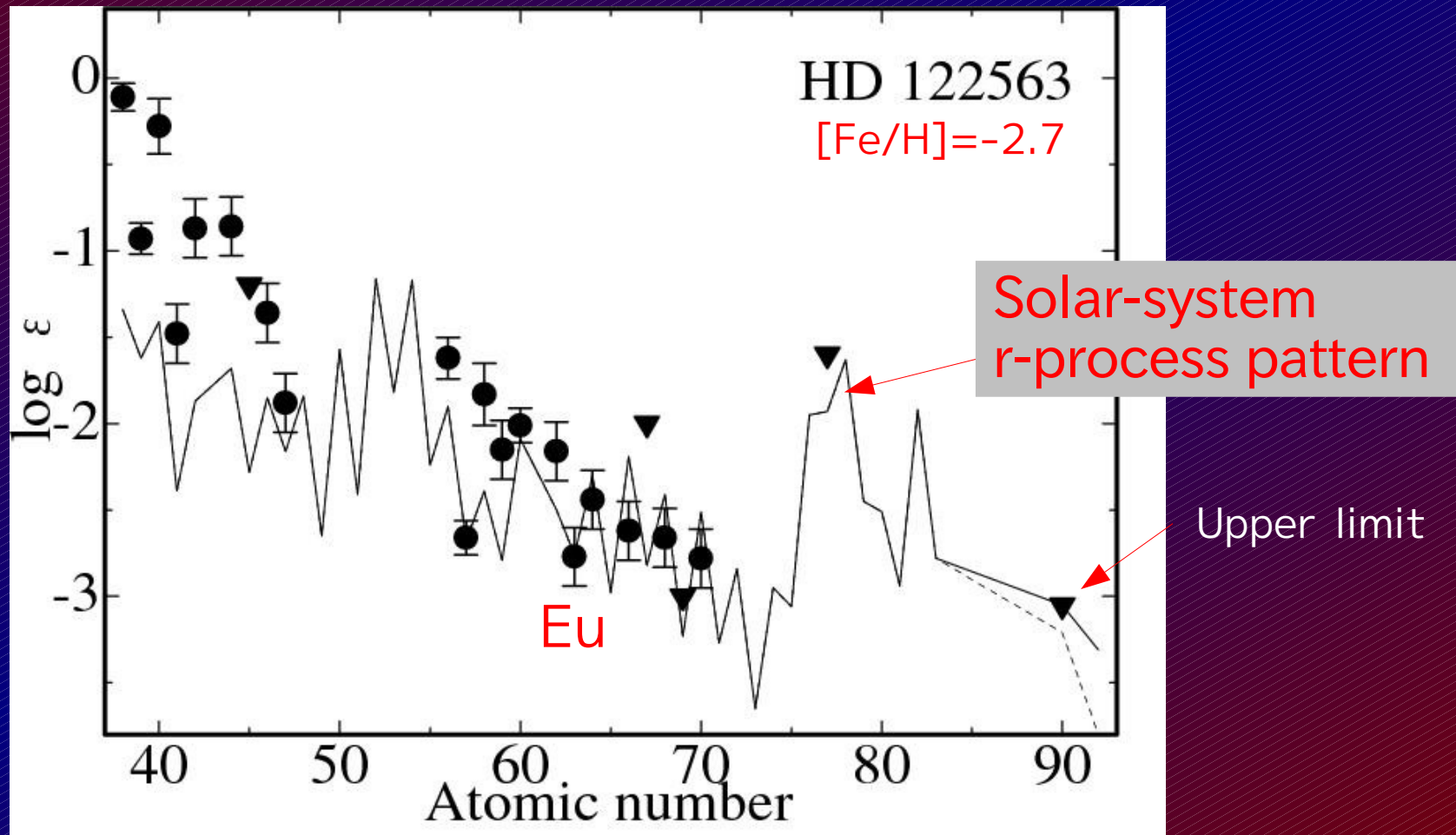
The effect of weak r-process is generally found in metal-poor stars, including globular cluster objects (though the contribution is *not* homogeneous).

- The weak r-process occurs even in the progenitors of extremely metal-poor stars ($[\text{Fe}/\text{H}] < -3$), while the effect of the main r-process appears in $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -3$.
 - the astrophysical sites are quite different

II. Abundance patterns of metal-poor stars having excesses of *light* neutron-capture elements



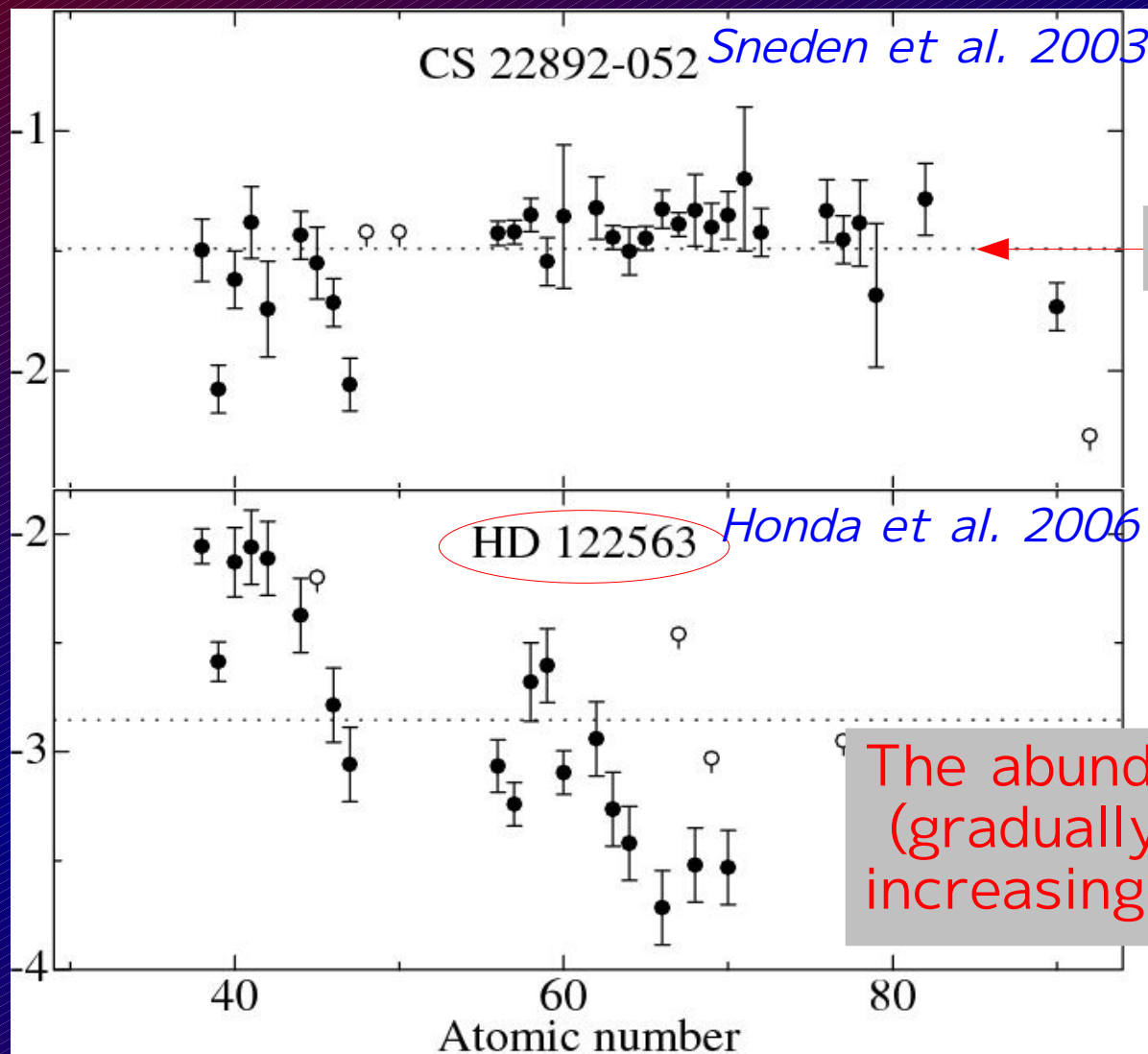
Abundance pattern of HD122563, a bright metal-poor red giant star representing the weak r-process



Honda et al. 2006

Abundance pattern of HD122563

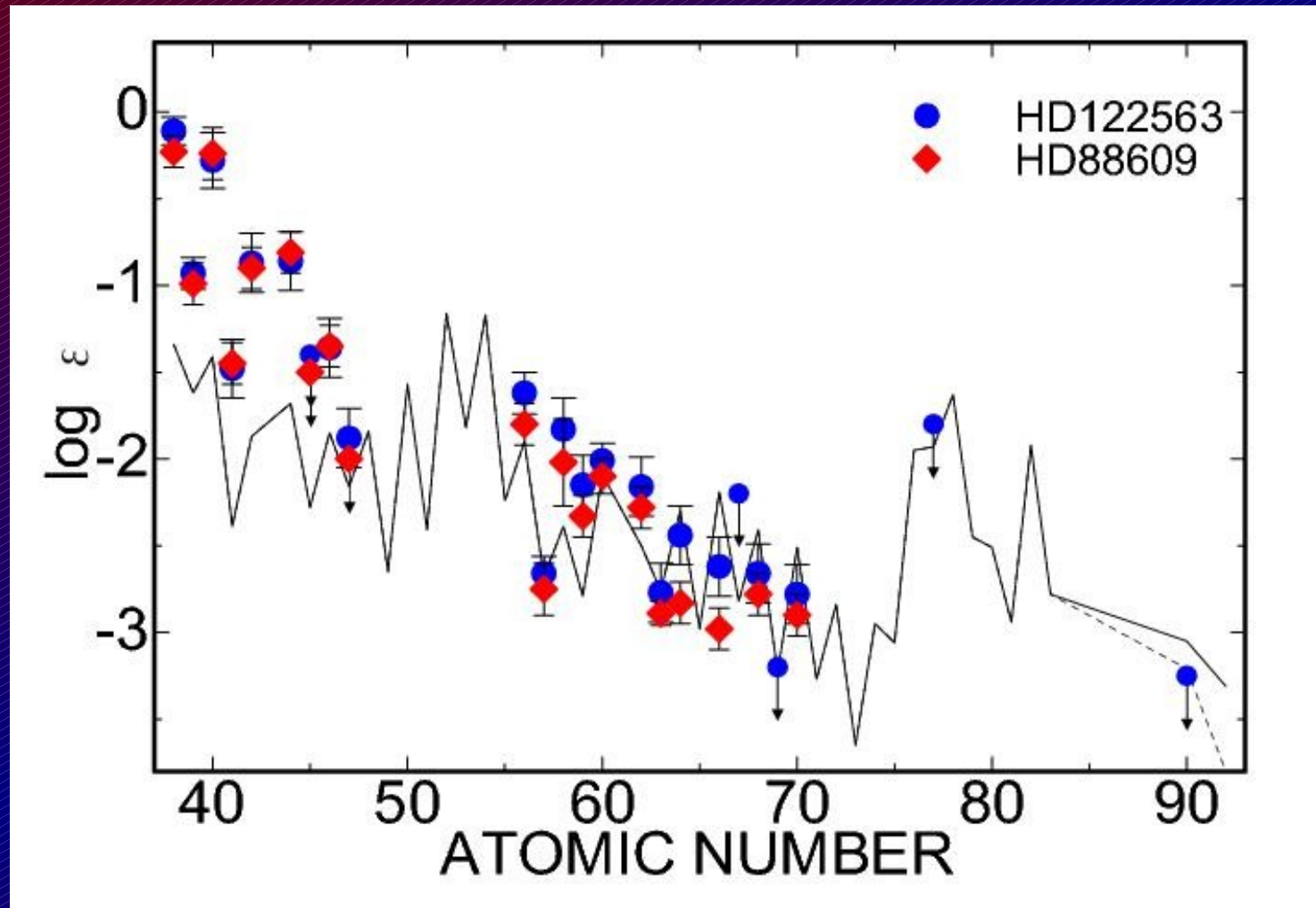
Logarithmic abundance differences from the solar-system r-process pattern



Main r-process

The abundance continuously (gradually) decreases with increasing atomic number

Abundance patterns of HD88609 ([Fe/H]=-3.0) and HD122563



Honda et al. (Nuclei in the Cosmos IX)

Which process is responsible for the abundance patterns of HD122563 and HD88609?

main r-process?



No, because of the excess of light n-capture elements

main s-process?



weak s-process?

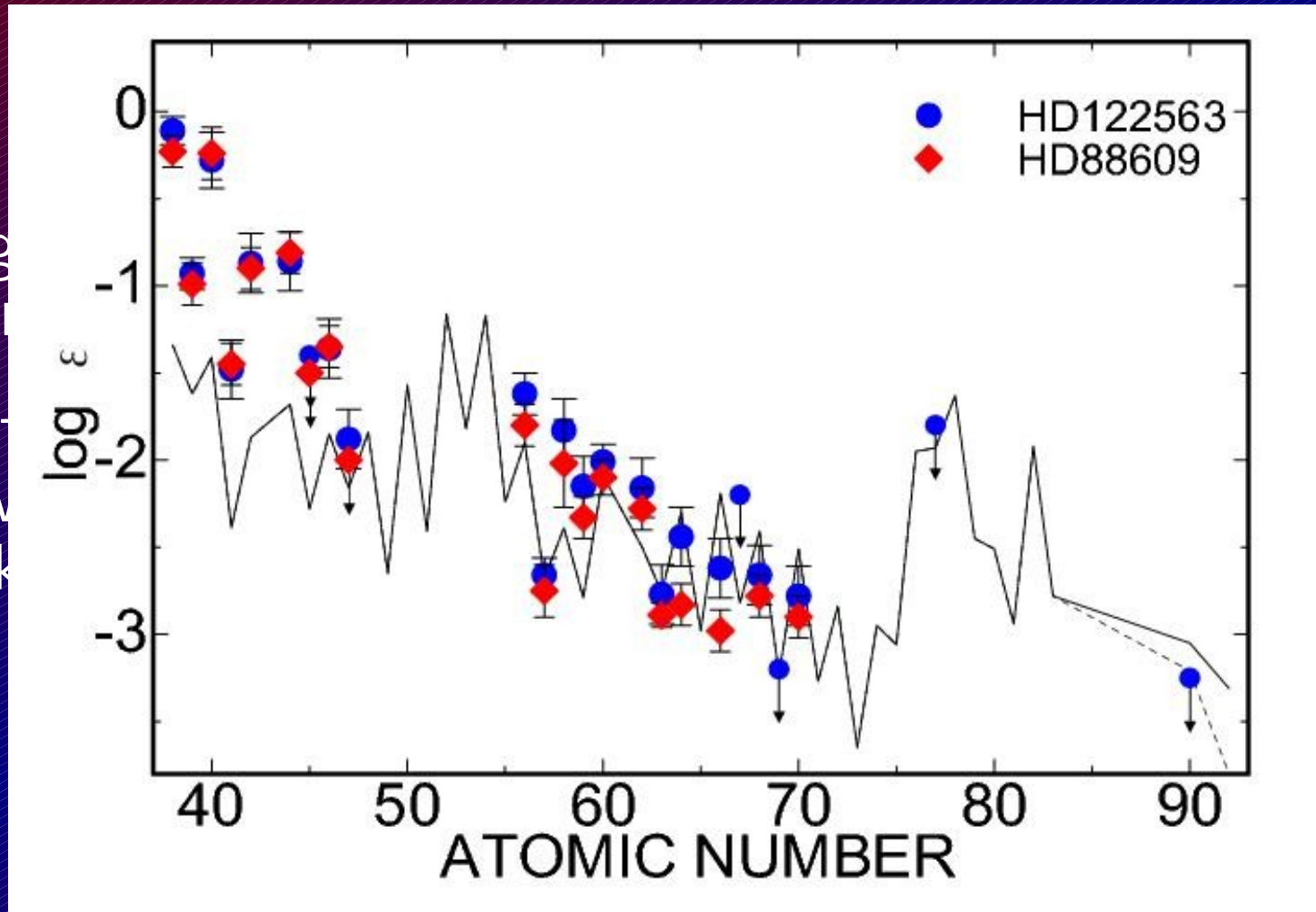


No, because of relatively high abundances of Pd etc.

HD122563 and HD88609 show the abundance pattern produced by the weak r-process

Observational constraints on the abundance pattern produced by the

- Large
([S]
- Con
betw
peak



Honda et al. (this conference)

「軽い中性子捕獲元素」をつくる プロセスに関する観測的制限

- I. 超低金属領域にも軽い中性子捕獲元素をつくるプロセスは一般的に効いている（ただし均一ではない）。
- II. このプロセスでつくられる組成パターンが詳細に決められつつある：原子番号をおって連続的に組成は減少していく。
- III. このプロセスはもっとも重元素組成の低い星にも効いているようである：初代の大質量星がその起源？