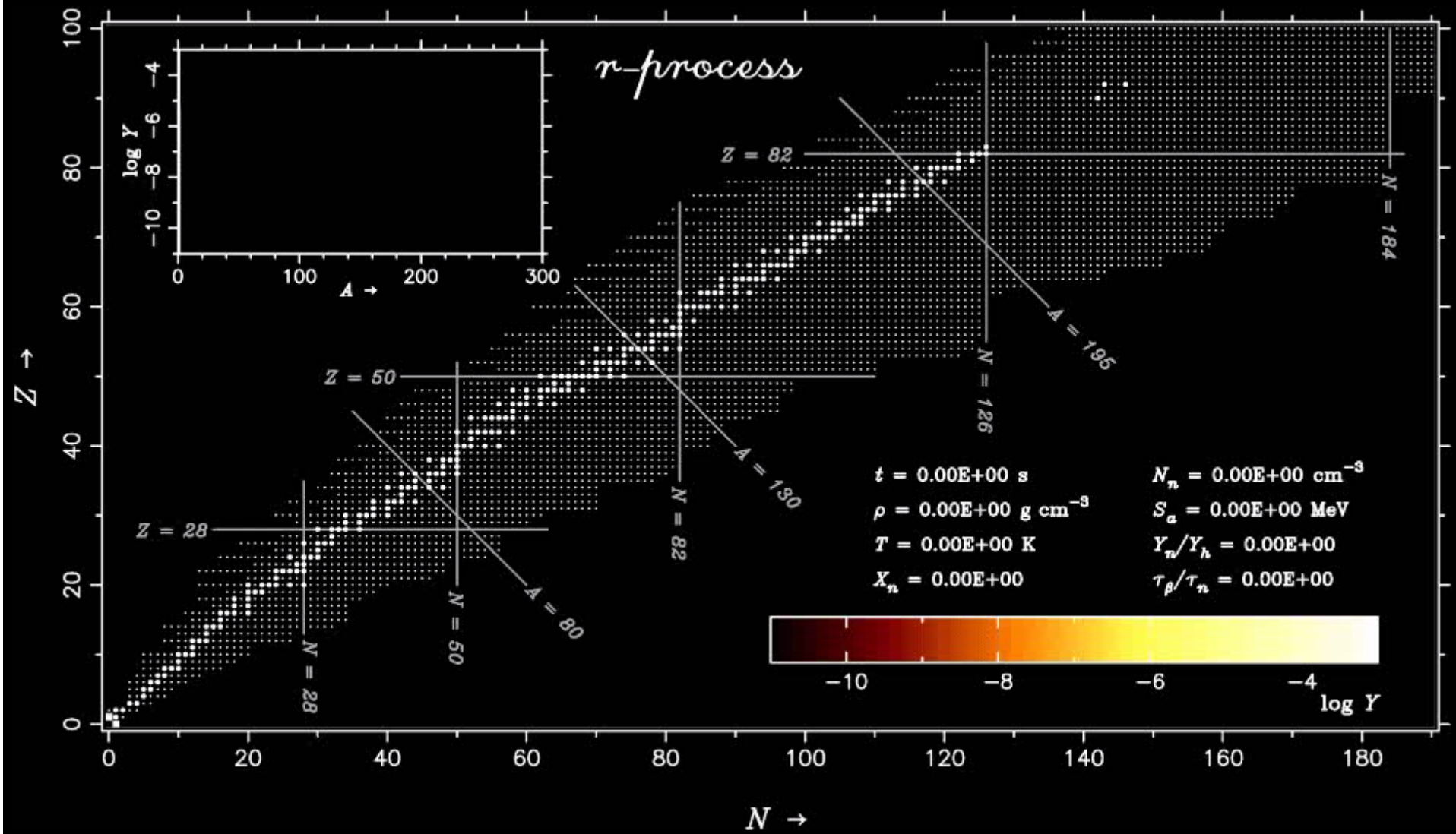


金属欠乏星で観測されている rプロセス元素とその起源

和南城伸也（東大IPMU）

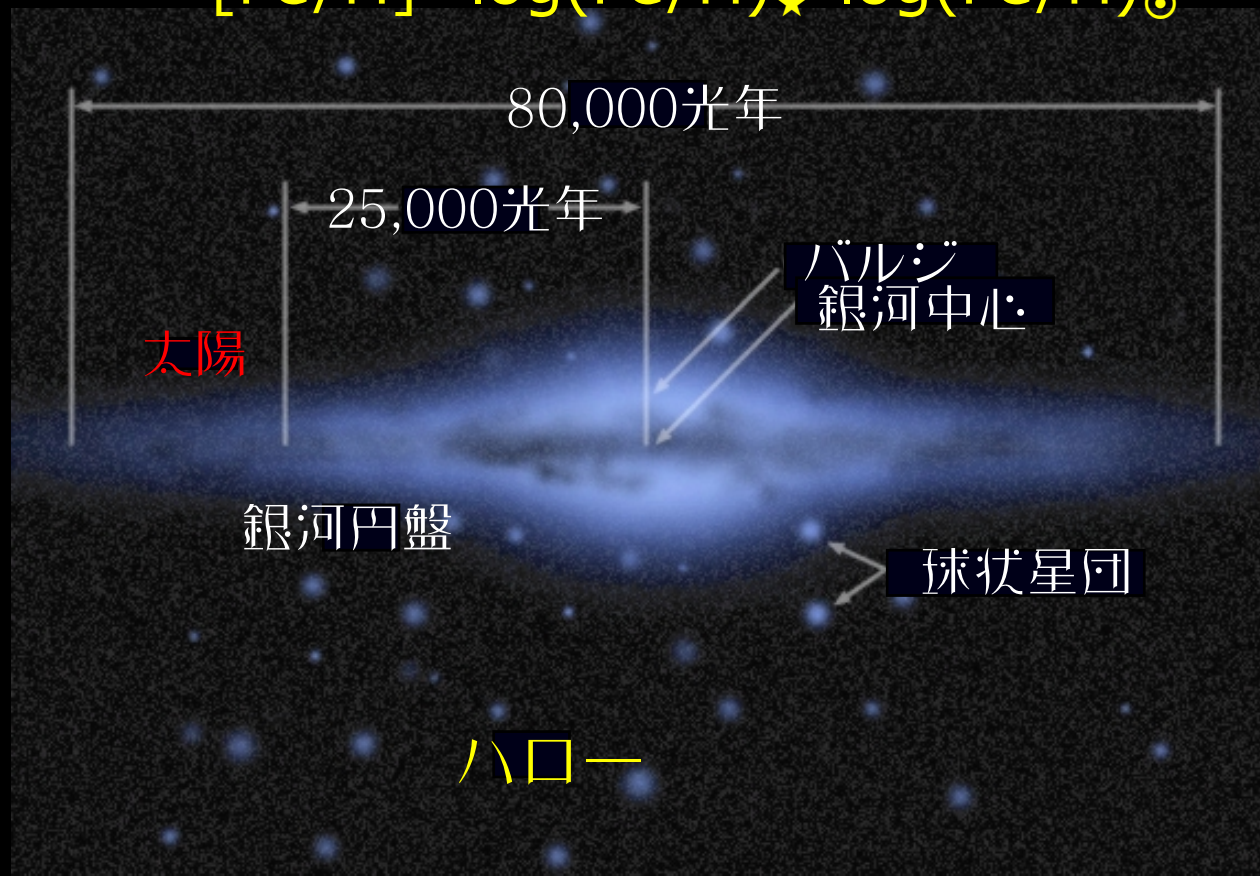
石丸友里（国際基督教大）, 野本憲一（東大IPMU）

1. main rプロセス : Ba~U の起源
2. weak rプロセス : Sr, Y, Zr の起源
3. もう一つの main rプロセス : hypernovae?



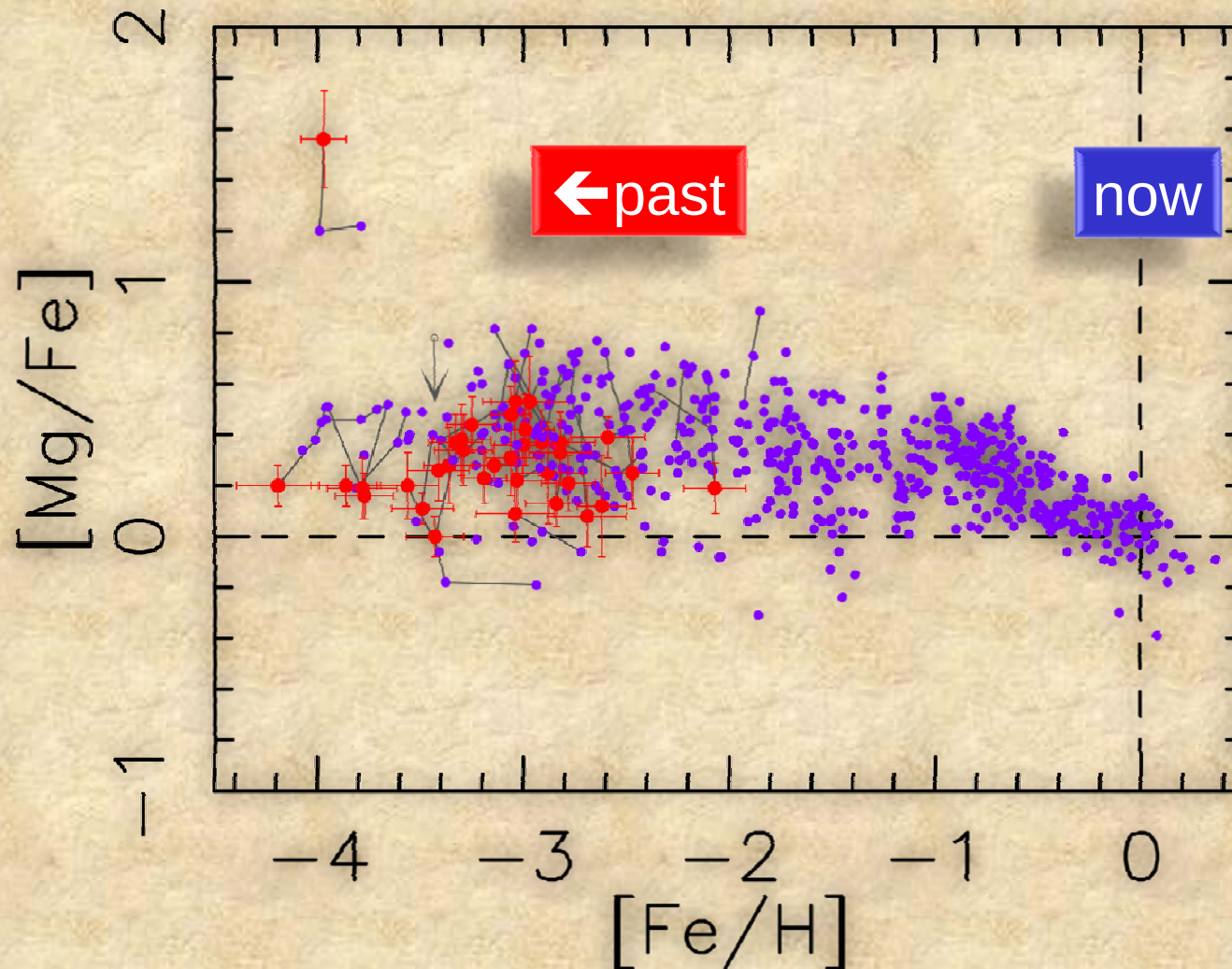
我々の銀河系

- ☉ 銀河ハロー：金属欠乏星 ($[Fe/H] = -4 \sim -1$) が希薄に分布
- ☉ 超金属欠乏星 ($[Fe/H] = -4 \sim -3$)：超新星元素合成の「化石」
 $[Fe/H] = \log(Fe/H)_\star - \log(Fe/H)_\odot$

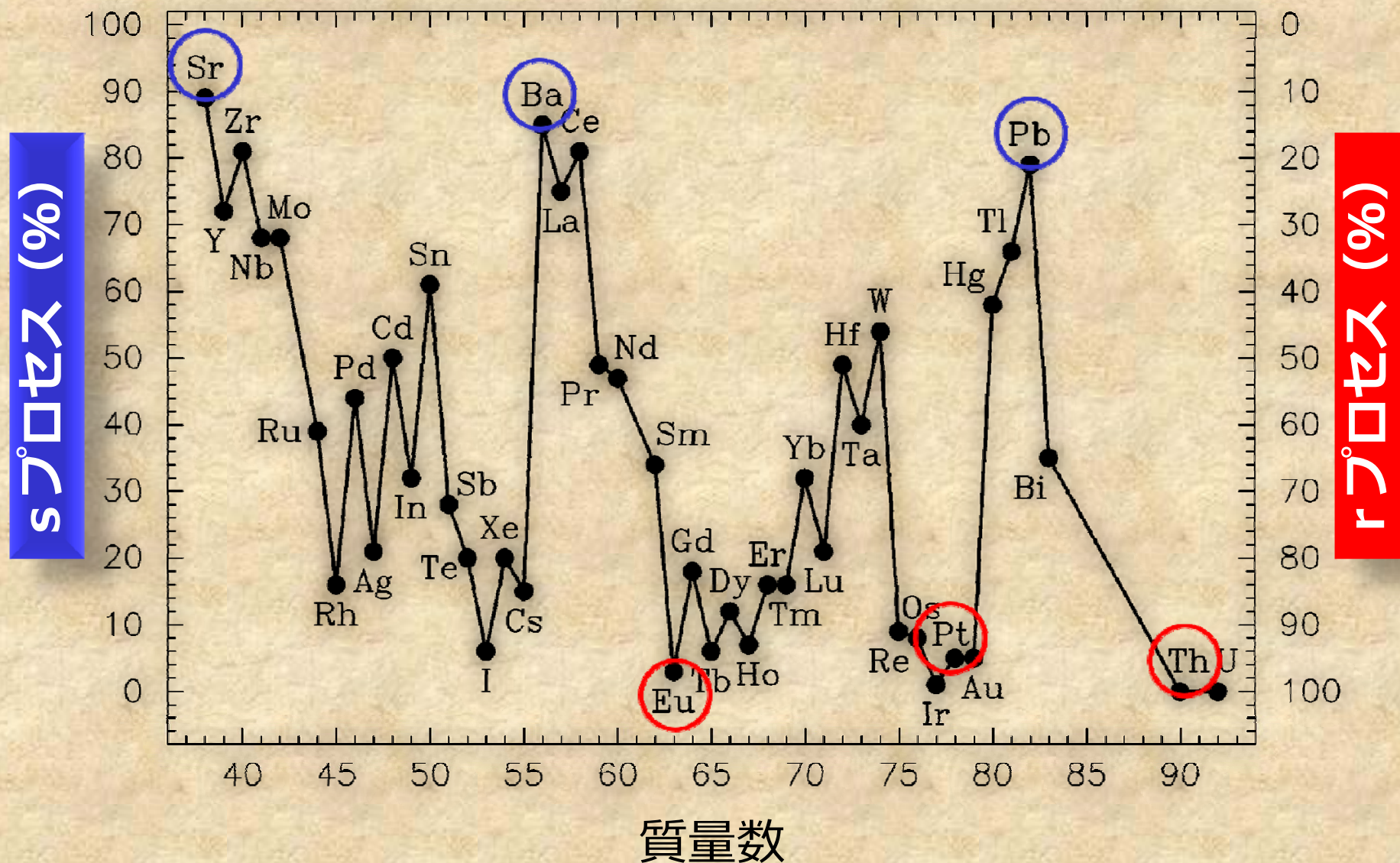


α 元素の化学進化

- ⇒ ハロー星の $[\alpha/\text{Fe}] (=0.4 \pm 0.4)$ は**ほぼ一定**
- ⇒ α 元素 (O, Mg, Si, ...) の起源は**全ての超新星爆発(II/Ibc)**



中性子捕獲元素の s/r プロセス比

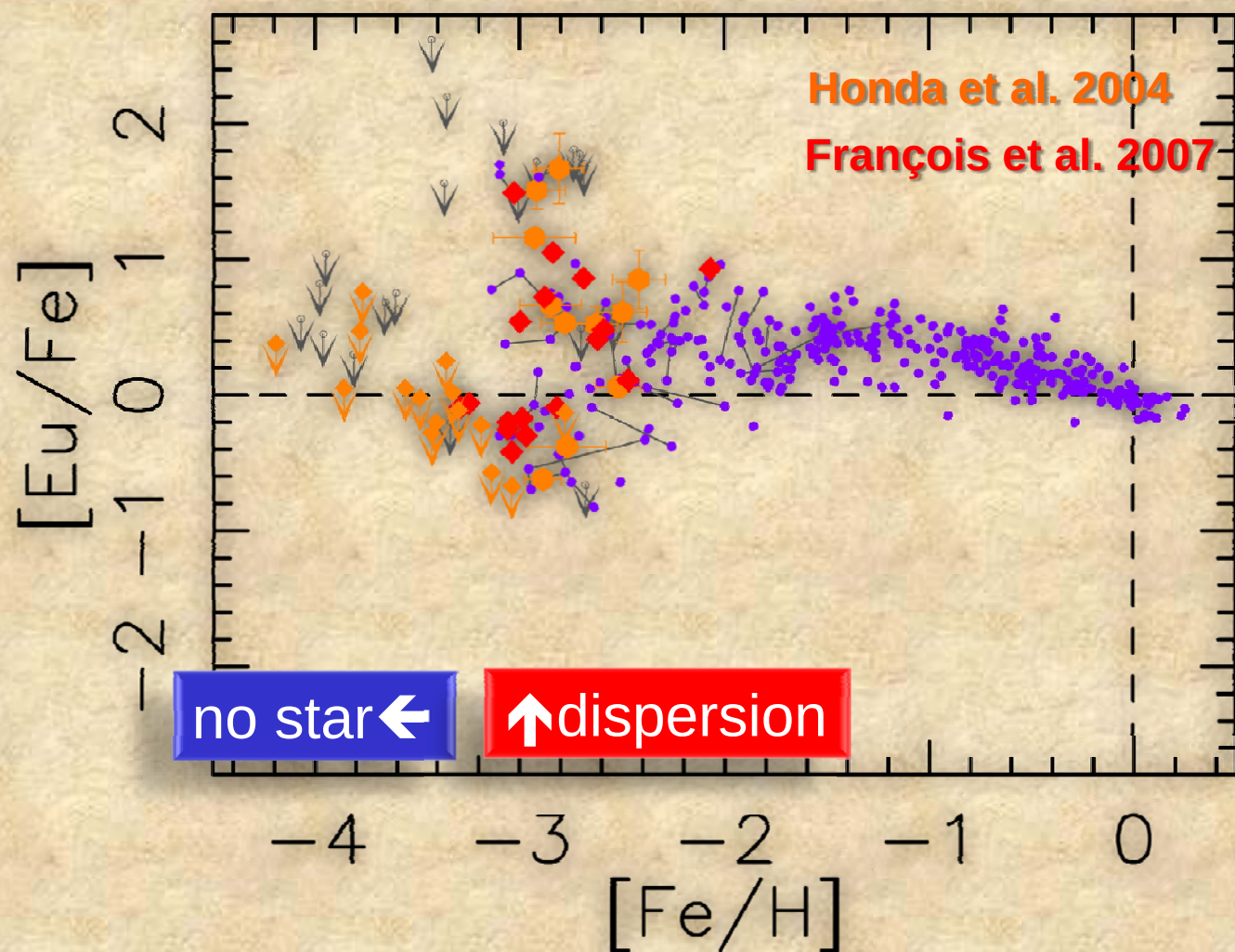


main r プロセス

Ba~U の起源

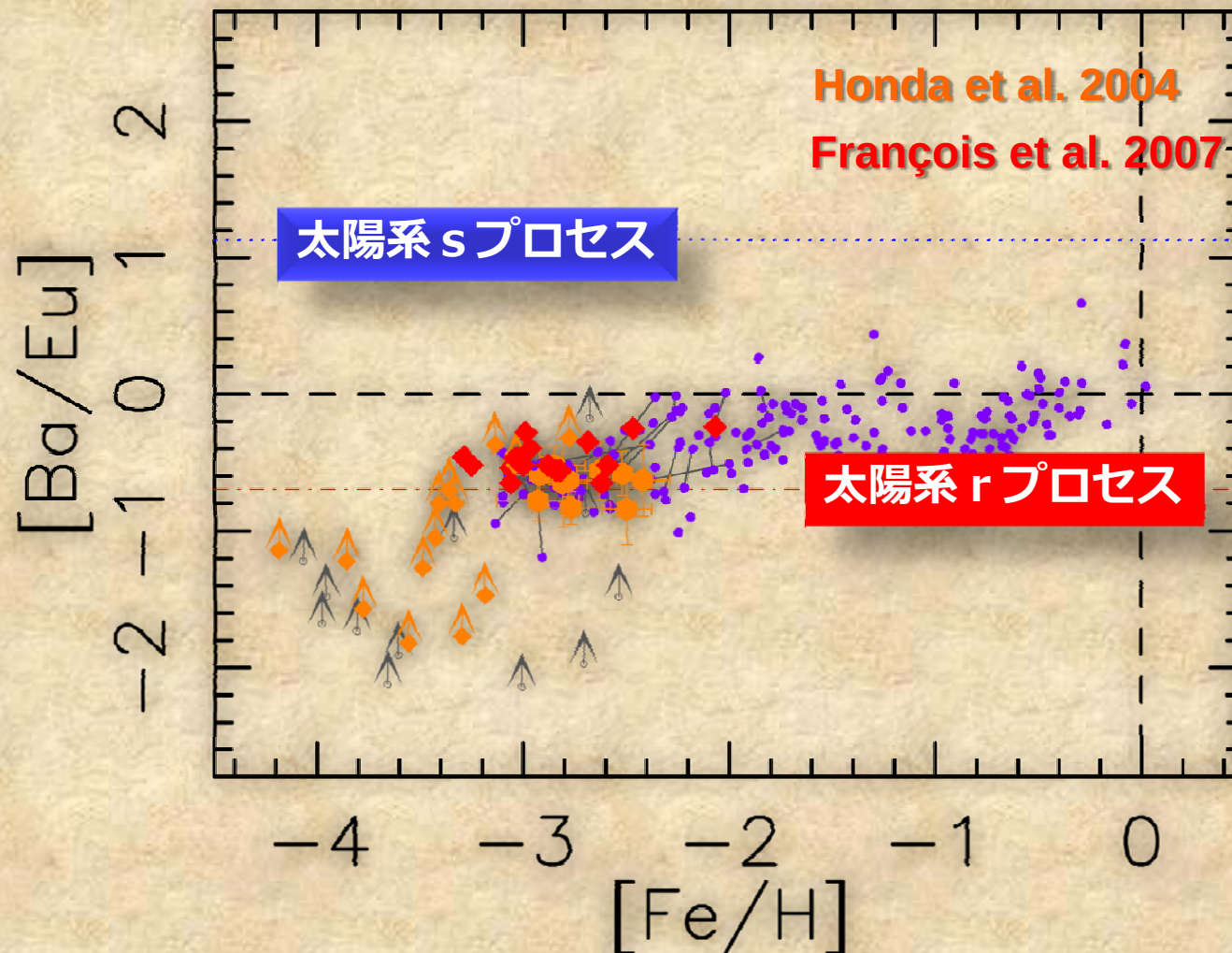
main r プロセス元素の化学進化

- ⇒ ハロー星の $[\text{Eu}/\text{Fe}] (=0.4 \pm 1.5)$ は $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3$ で大きく分散
- ⇒ r 元素 (Eu, Pt, U, ...) の起源は一部の超新星爆発 (II/Ibc)



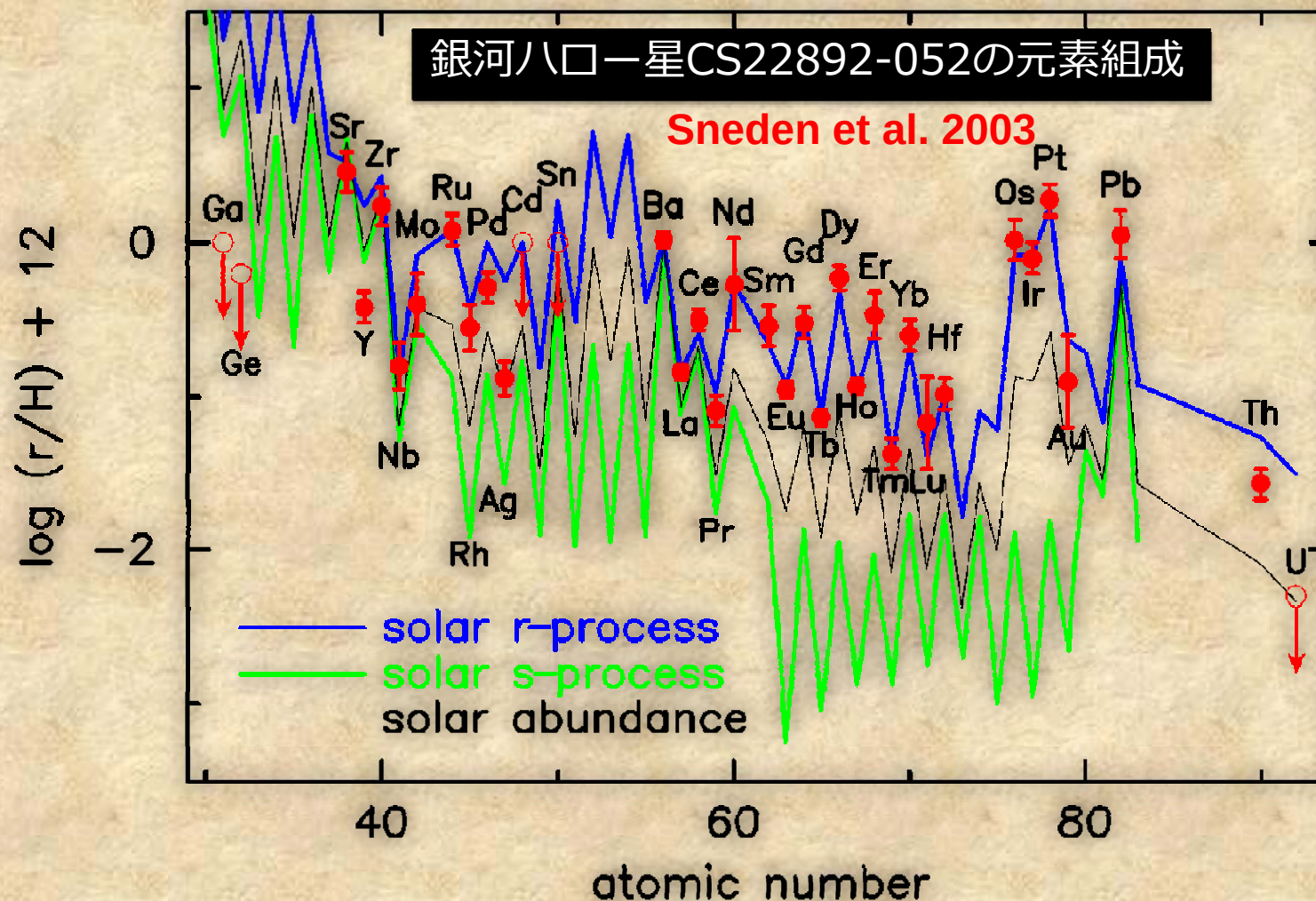
sプロセス(Ba) vs. rプロセス(Eu)

- ➡ 超金属欠乏星($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$) : Ba/Euは太陽系 r 組成に合致
- ➡ 銀河初期の中性子捕獲元素は **rプロセスのみ**



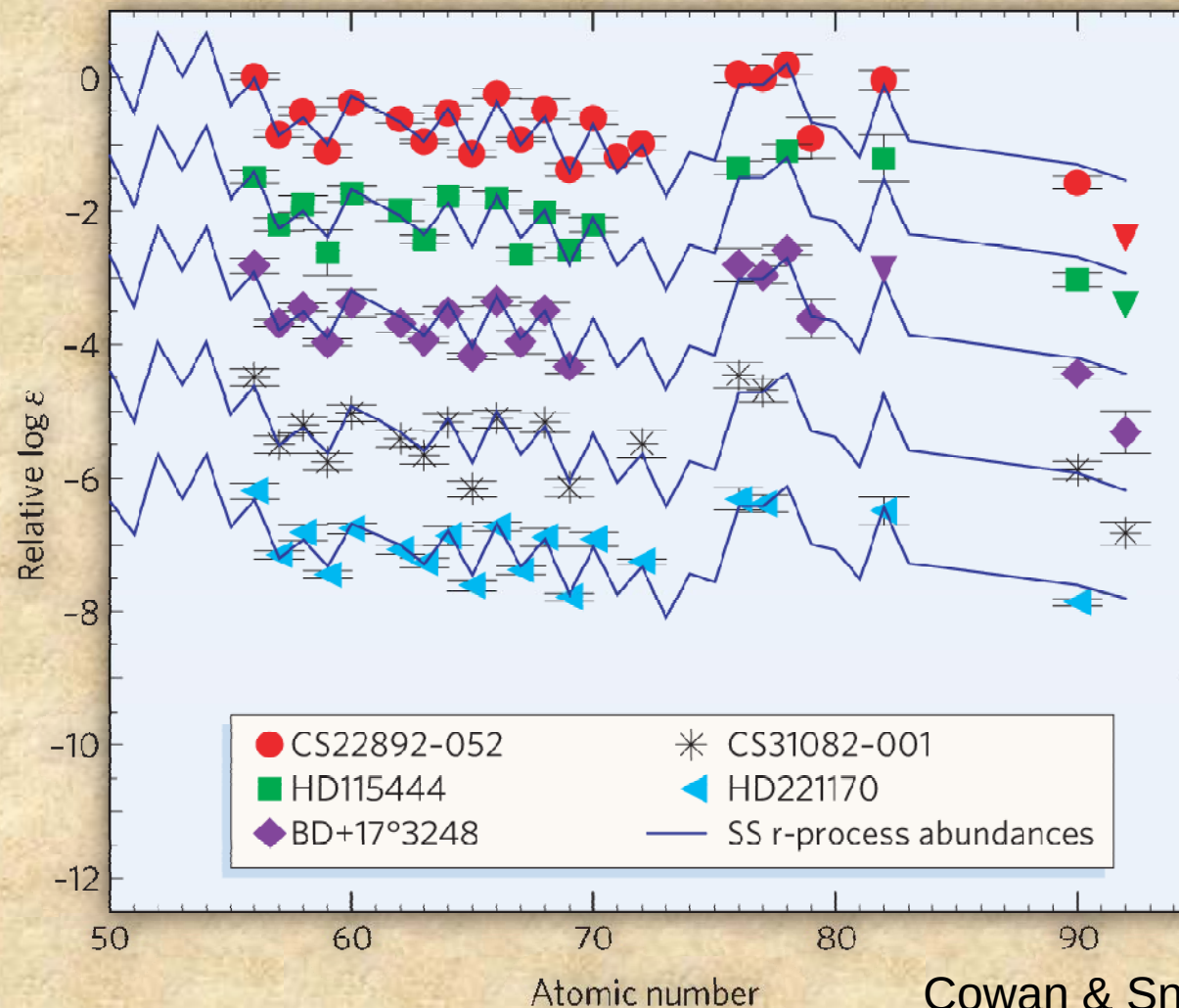
銀河ハロー星にみる(main) rプロセス

- ⇒ rプロセス星 ($[\text{Eu}/\text{Fe}] > 0.5$) : 太陽系 r 組成と合致
- ⇒ (main) r プロセス元素の起源は**超新星爆発(II/Ibc)**



rプロセス星の元素組成

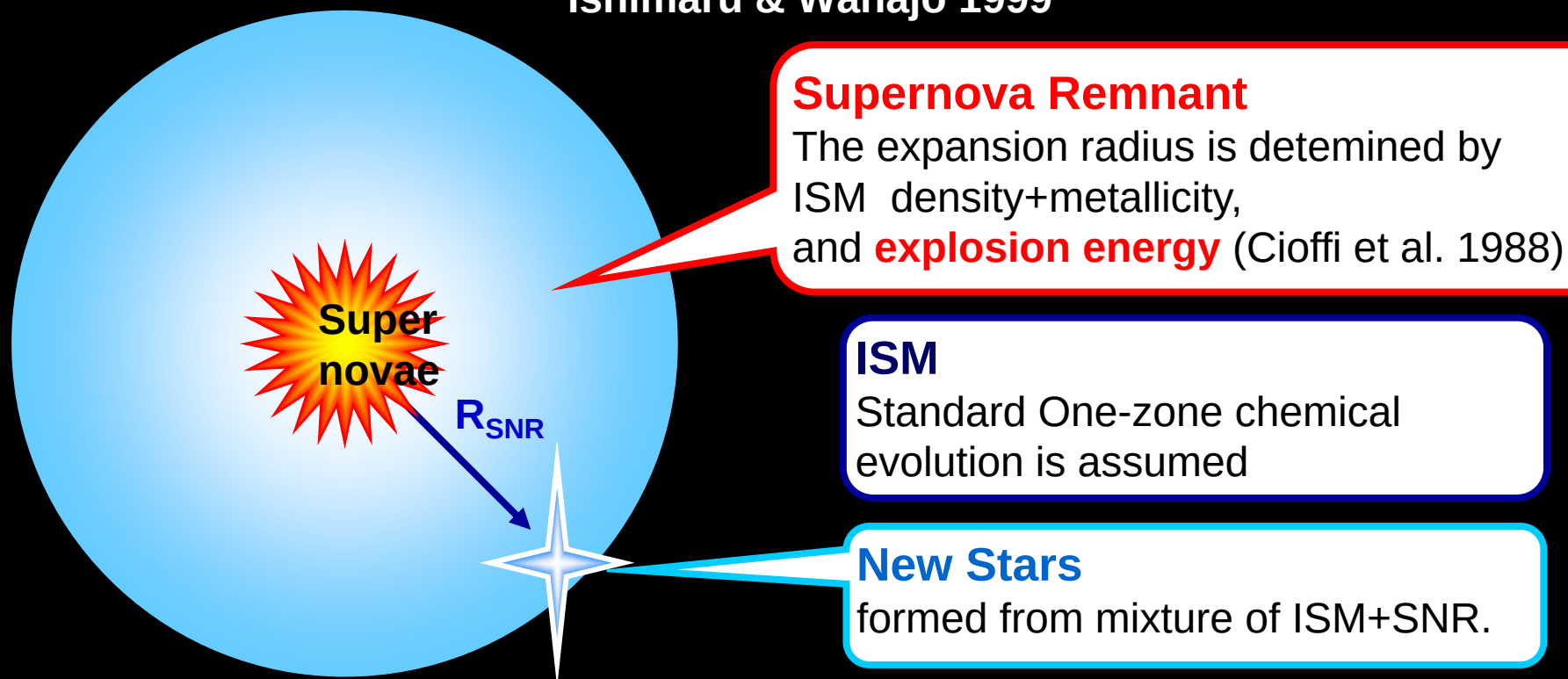
- ⇒ main rプロセス ($Z \geq 56$) 元素は全て太陽系 r 組成と合致
- ⇒ rプロセス元素の起源は**同一の（物理条件の）超新星爆発**



Cowan & Sneden 2006

Chemical Evolution Model

Ishimaru & Wanajo 1999

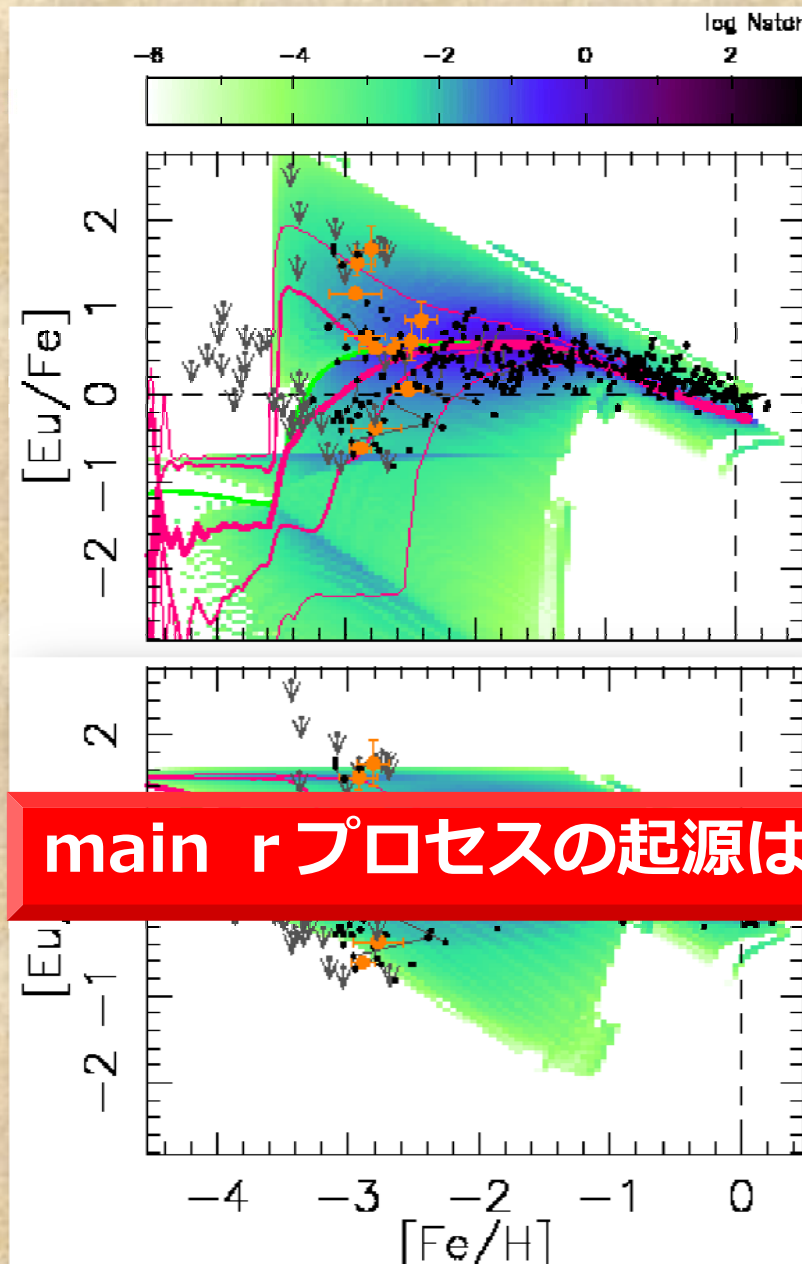


Supernova Nucleosynthesis

SNe II: **Woosley & Weaver '95** ($0 \sim Z_{\odot}$ stars),
Chieffi & Limongi '04 ($0 \sim Z_{\odot}$ stars),
Nomoto, Umeda, Tominaga '06 ($0 \sim Z_{\odot}$ stars: SNe+HNe)

r-process: Yield is assumed to be constant among given stellar mass range for r-process site, and the absolute value is determined to SS value.

Eu にみる main r プロセス元素の起源



銀河化学進化モデルより

r プロセスのサイトが

低質量($8\sim 10M_{\odot}$)超新星
にある場合

main r プロセスの起源は低質量($8\sim 10M_{\odot}$)超新星爆発

Ishimaru & Wanajo 1999

Ishimaru, Wanajo, Aoki, Ryan 2004

8~10 $M_{\odot}$ (ONeMg)超新星のrプロセス

“artificial” prompt explosion

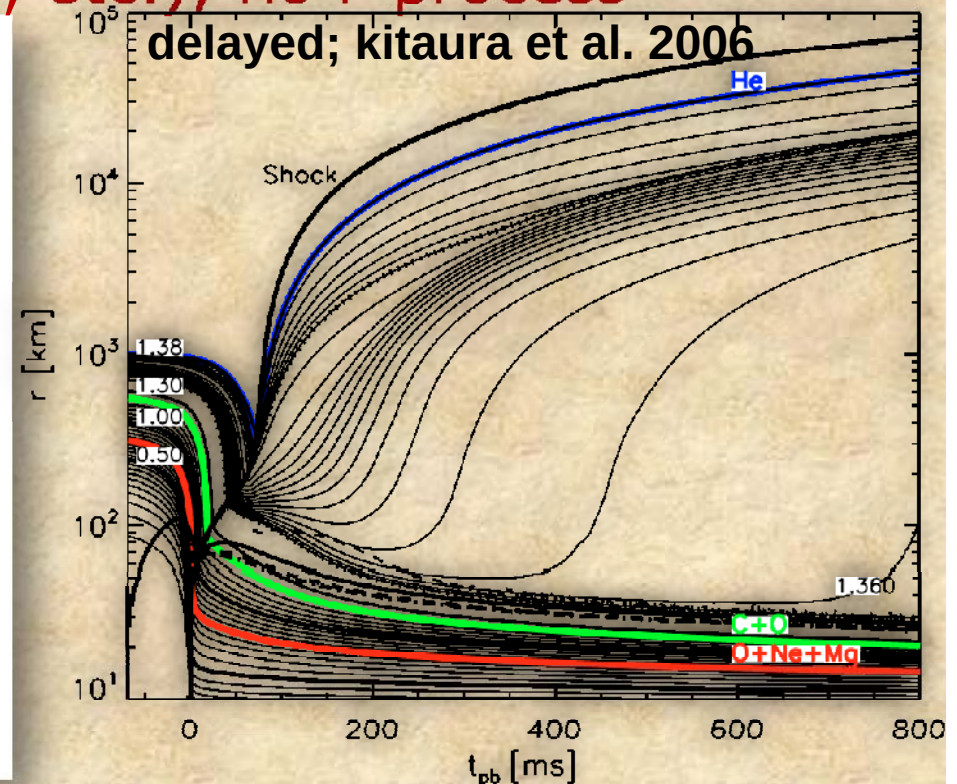
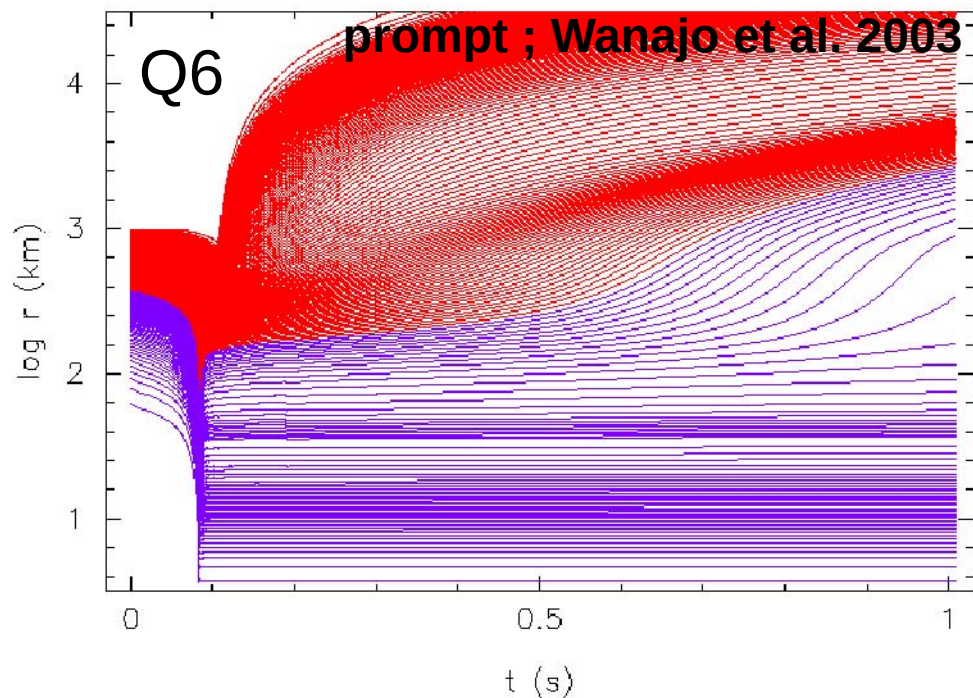
Wanajo et al. 2003 for ONeMg core; Sumiyoshi et al. 2001 for iron core similar to Schramm 1973; Sato 1974; Hillebrandt et al. 1974

⇒ (もし起これば) $A \sim 200$ まで合成可能

self-consistent (delayed) explosion

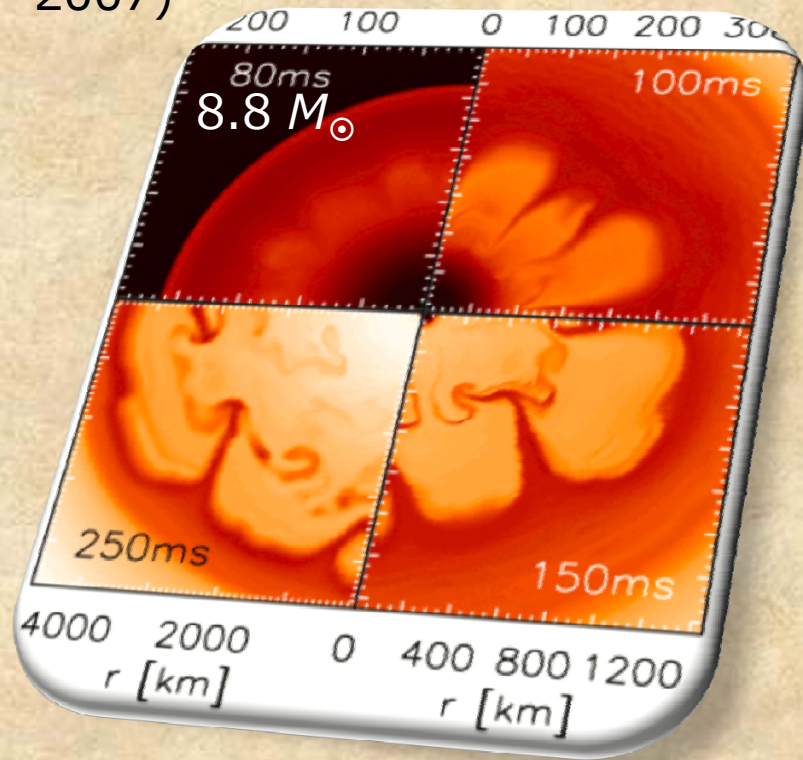
Kitaura et al. 2006; Hoffman et al. 2008; Wanajo et al. 2008

⇒ $A \sim 90$ まで (^{64}Zn , ^{90}Zr , ^{92}Mo , etc.); no r-process

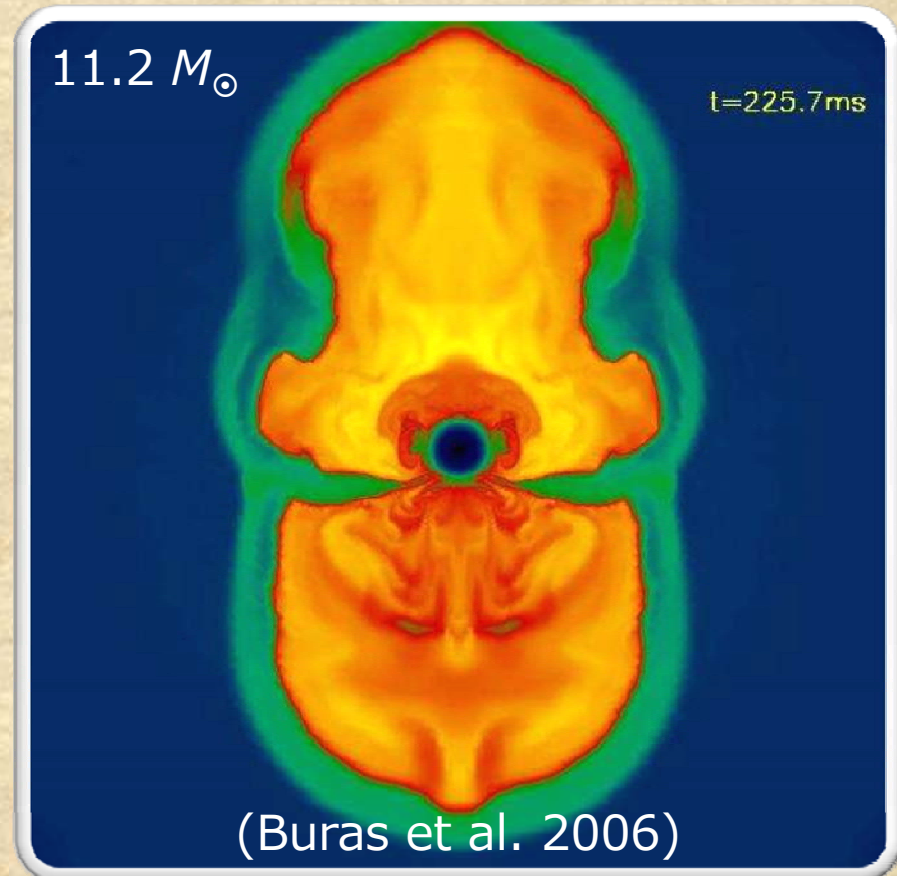


超新星, ついに「爆発」か？

- ⇒ ニュートリノ加熱と停在衝撃波不安定 (standing accretion shock instability, **SASI**) により爆発か？
(Buras et al. 2006; Marek & Janka 2007)



(Kitaura et al. 2006)



(Buras et al. 2006)

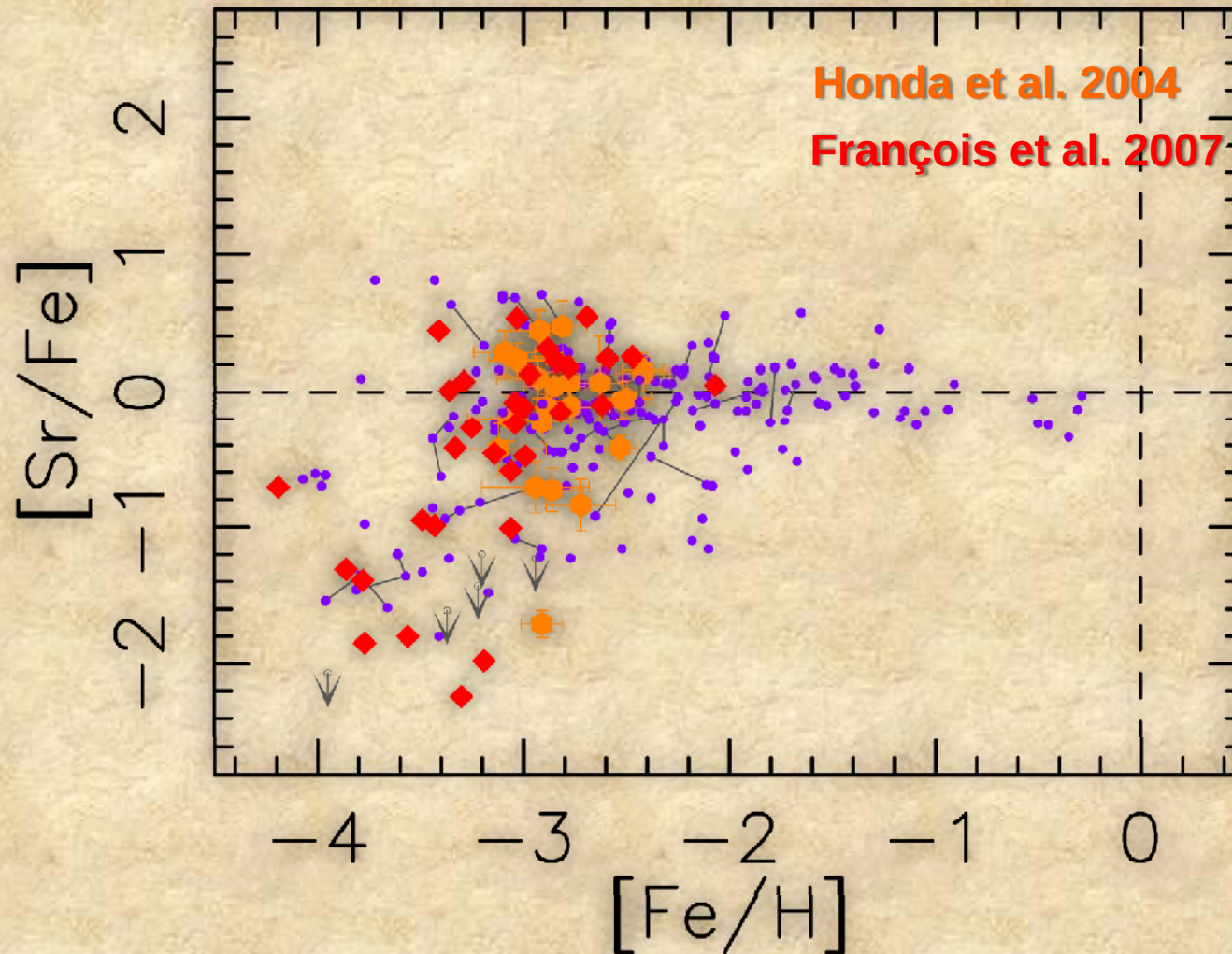
- ⇒ 2次元数値計算は, (今のところ) コアバウンス後の最初の1秒以下
- ⇒ r プロセスが起きるのは (おそらく) 数秒後

weak r プロセス

Sr, Y, Zr の起源

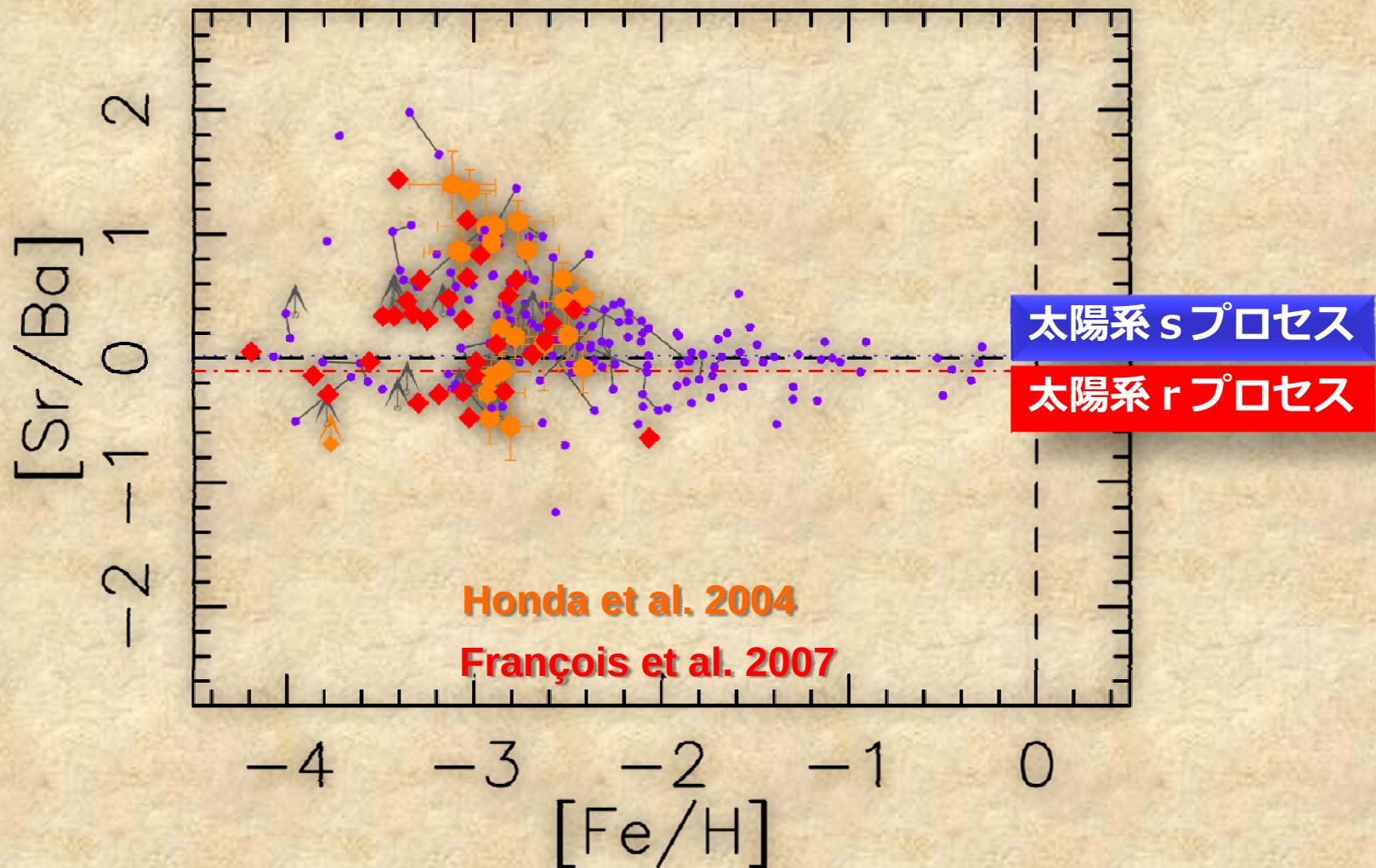
weak r プロセス元素の化学進化

- ⇒ ハロー星の $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ は $[\text{Fe}/\text{H}] = -4 \sim -3$ で大きく分散
- ⇒ weak r 元素 (Sr, Y, Zr, ...) の起源は中質量超新星爆発？



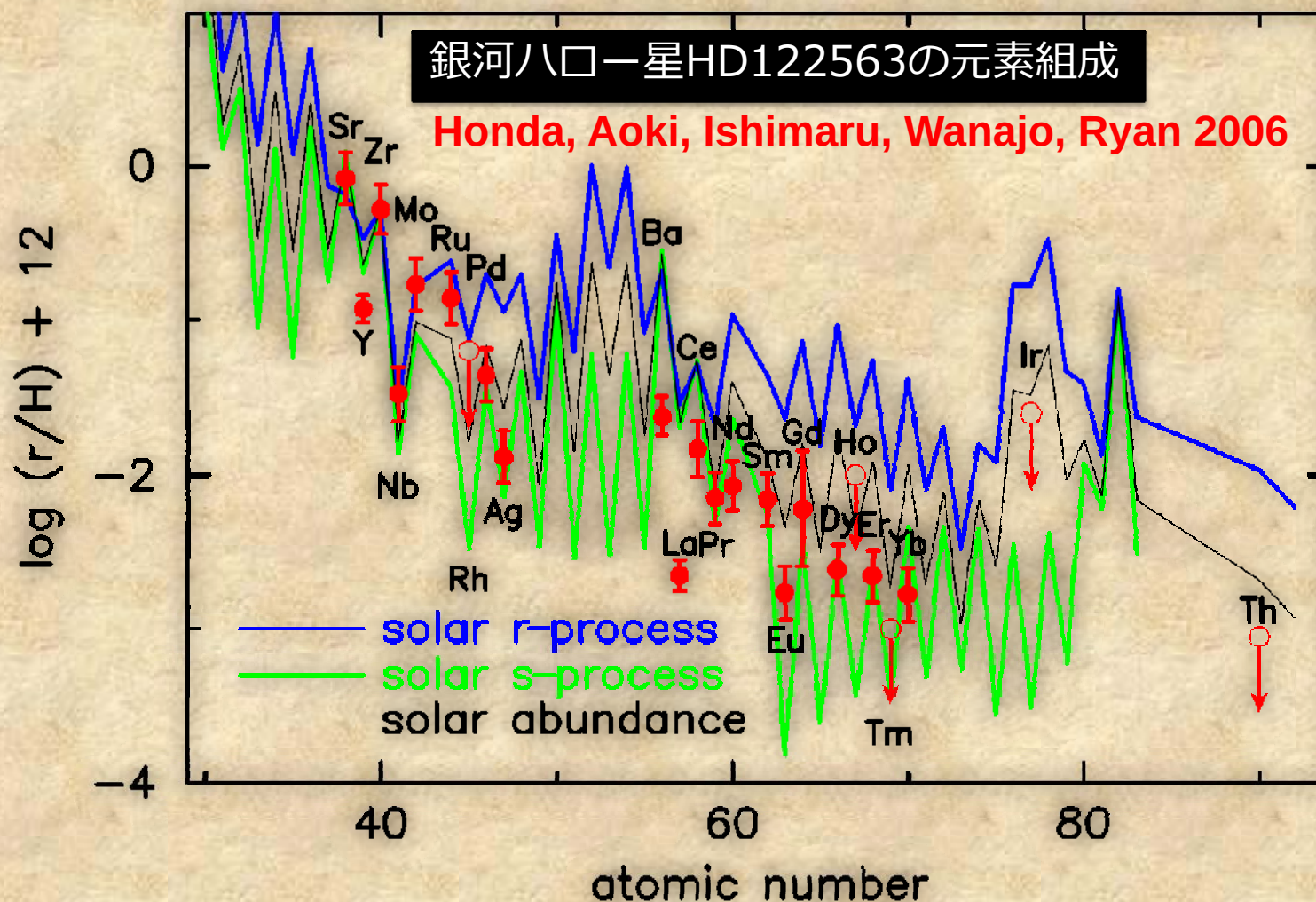
weak r (Sr) vs. main r (Ba)プロセス

- ☞ 超金属欠乏星($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3$) : その多くは $[\text{Sr}/\text{Ba}] > 0$
- ☞ 軽い中性子捕獲元素のみをつくる **weak r プロセス** の存在

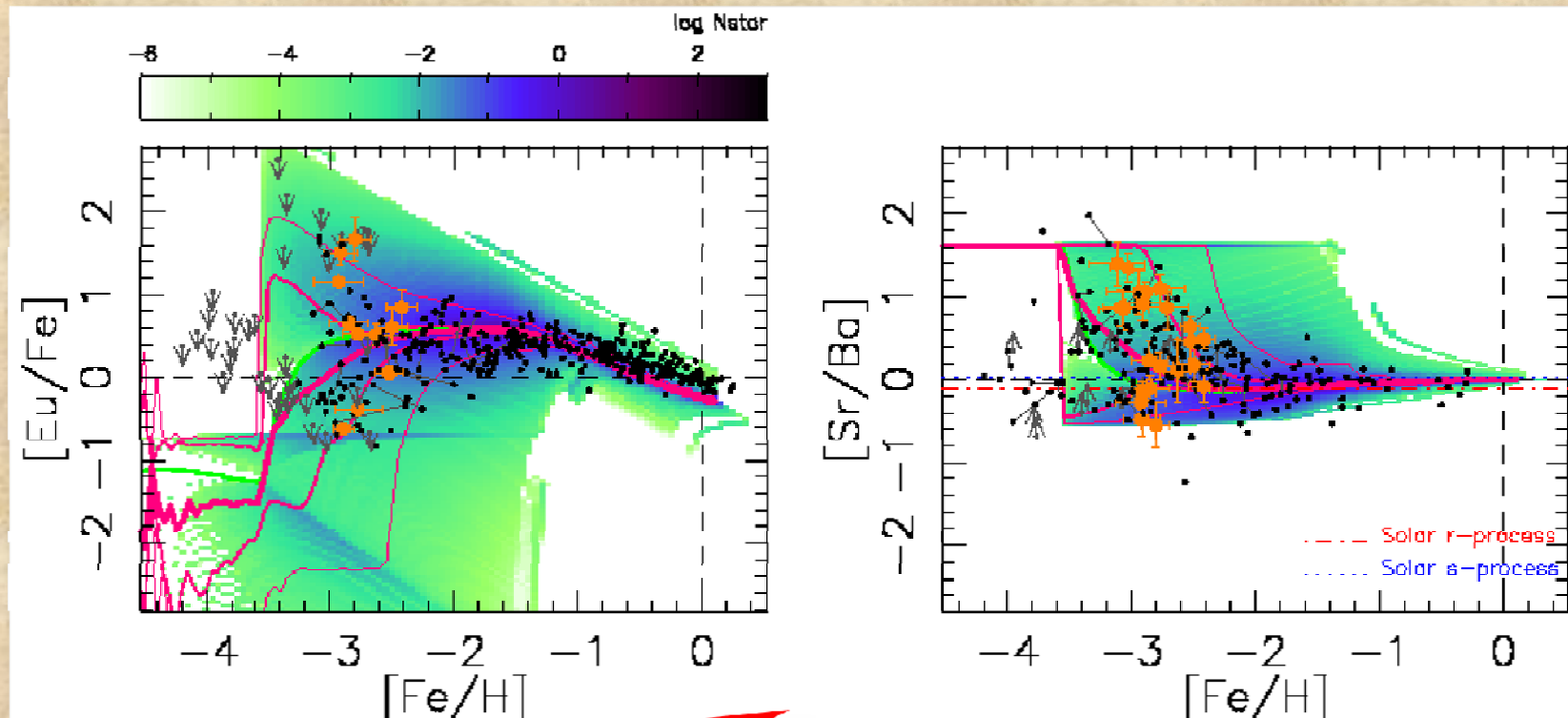


銀河ハロー星にみるweak rプロセス

- 普通星 ($[Eu/Fe] < 0.5$) : 太陽系 r 組成と合致しない
- weak r プロセス元素の起源はmainとは**別の超新星爆発**



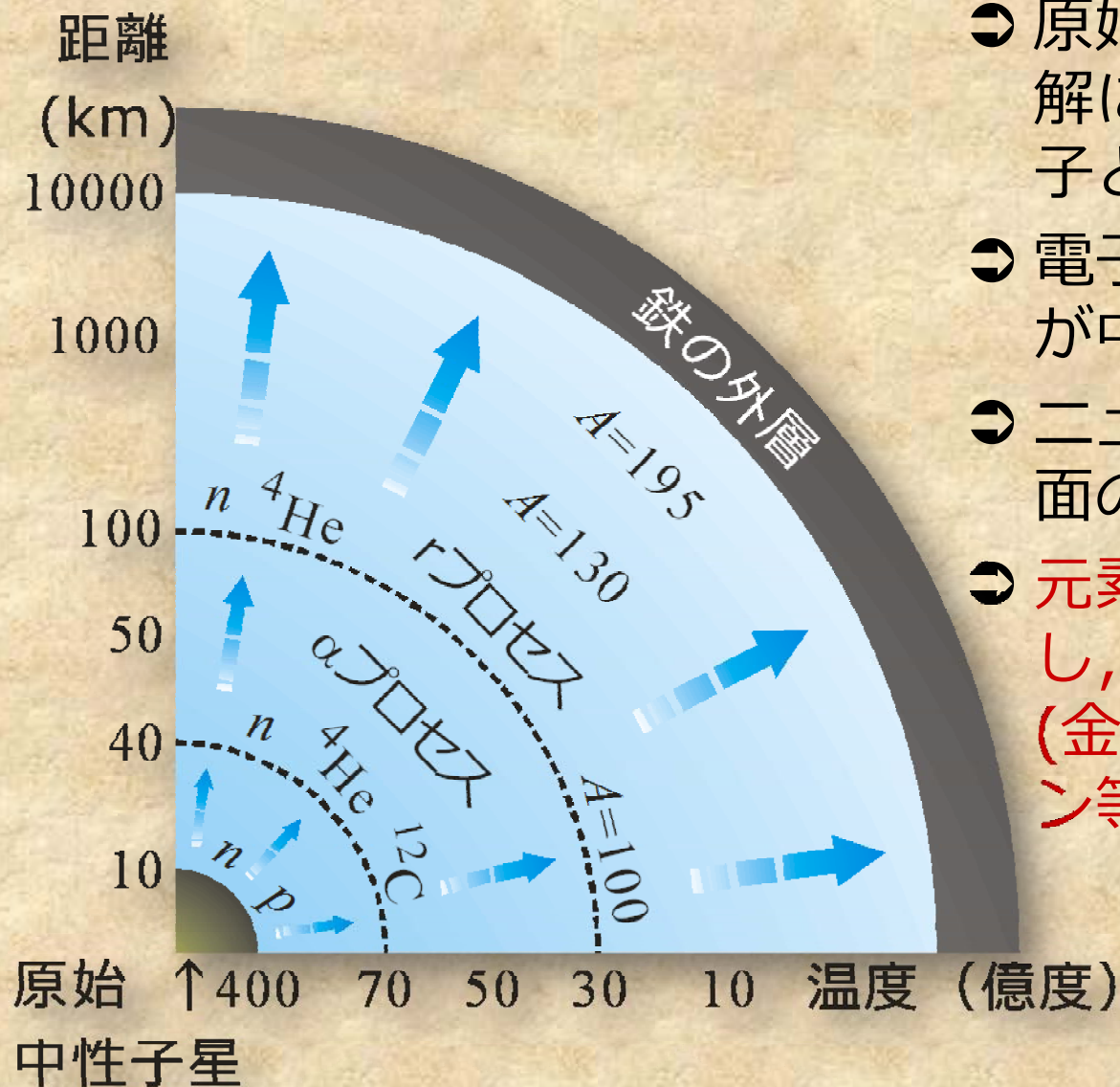
Sr, Ba にみるweak rプロセス元素の起源



main r: $8 \sim 10 M_{\odot}$; weak r: $20 \sim 30 M_{\odot}$ の場合

weak r 元素の起源は $> 10 M_{\odot}$ (e.g., $20 \sim 30 M_{\odot}$) の超新星

超新星の中の錬金術（ニュートリノ風）



- ➡ 原始中性子星付近では光分解により全ての元素が中性子と陽子に壊される
- ➡ 電子捕獲によりその大部分が中性子になる
- ➡ ニュートリノが中性子星表面の物質を吹き飛ばす
- ➡ 元素が次々と中性子を捕獲し、1秒くらいで重元素(金, 銀, プラチナ, ウラン等)が作られる!!

超新星ニュートリノ風の中のrプロセス

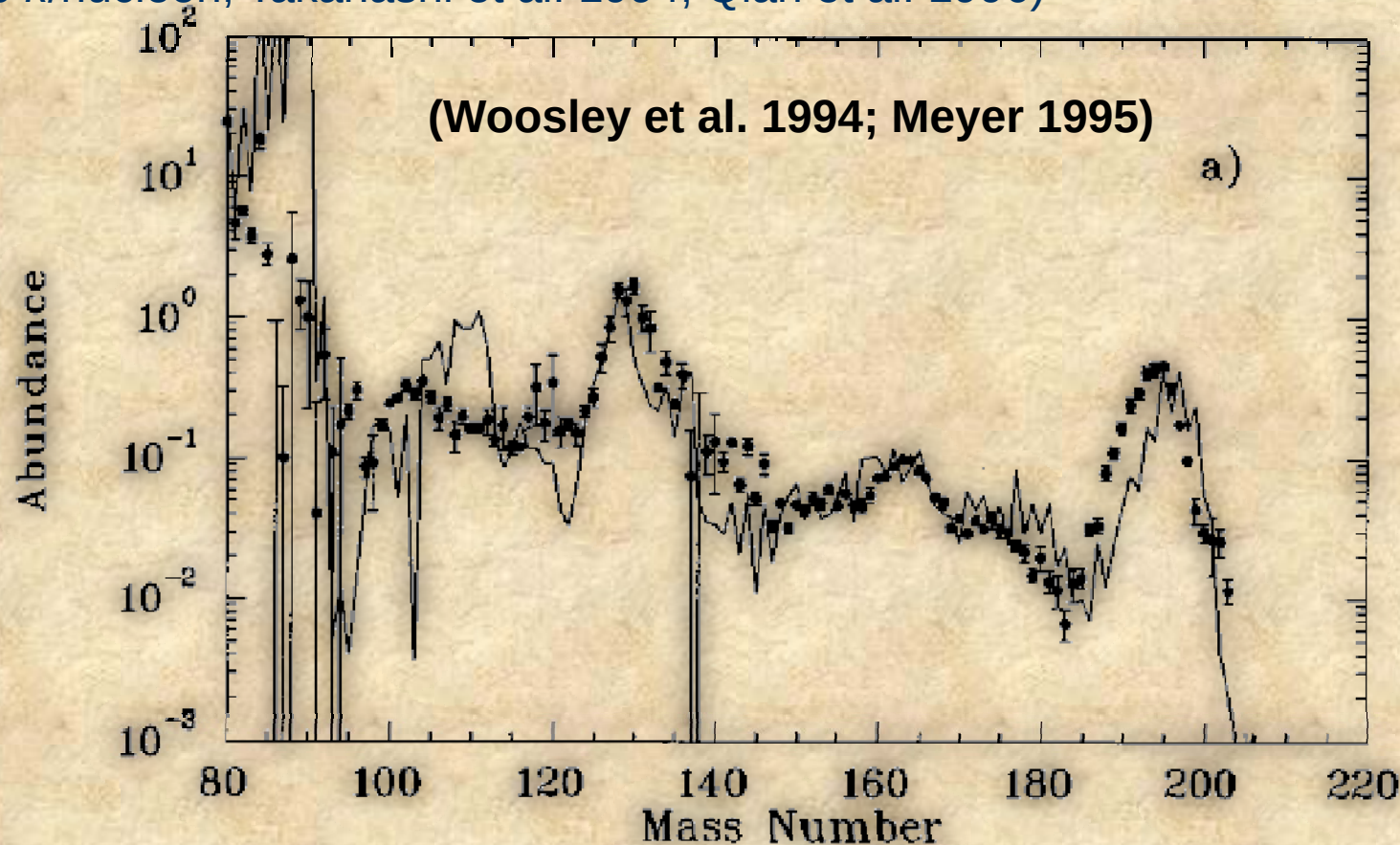
原始中性子星からの高エントロピー物質

(1D hydro, $20 M_{\odot}$ star, ~ 400 k/nucleon; Meyer et al. 1992; Woosley et al. 1994)

☞ 太陽系 r プロセス組成を再現, BUT

☞ such high entropy is unlikely

(~ 100 k/nucleon, Takahashi et al. 1994; Qian et al. 1996)



一般相対論的ニュートリノ風モデル

⇒ spherical steady flows in Schwarzschild geometry

Newtonian: Qian & Woosley 1996

General Relativity: Cardal & Fuller 1997; Otsuki et al. 2000

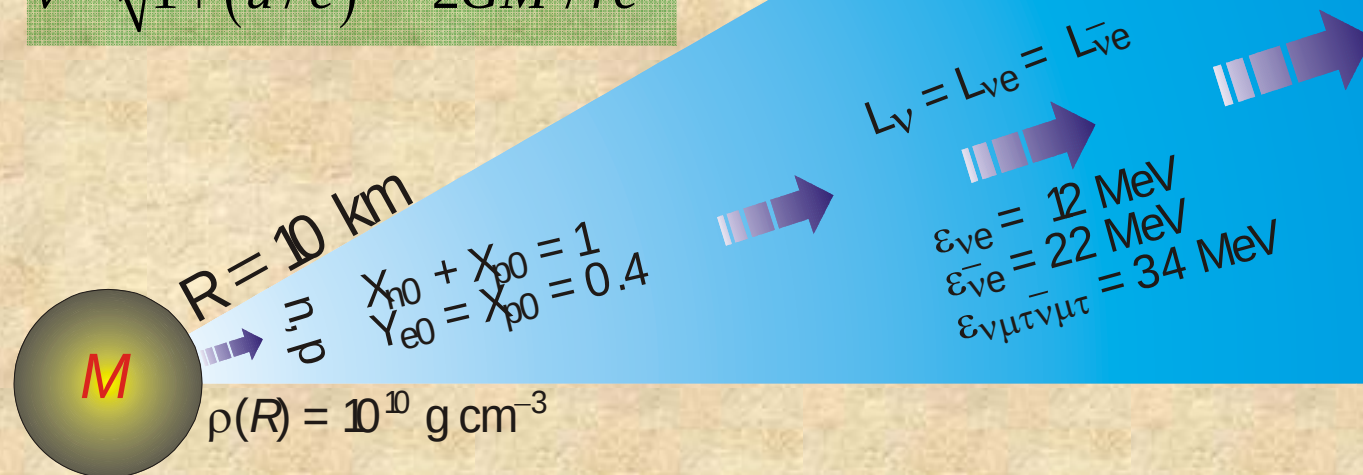
Wanajo et al. 2001, 2002; Thompson et al. 2001

$$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho u \quad : \text{mass ejection rate}$$

$$u \frac{du}{dr} = - \frac{1 + (u/c)^2 - 2GM/rc^2}{\rho(1 + \varepsilon/c^2) + P/c^2} \frac{dP}{dr} - \frac{GM}{r^2} \quad : \text{equation of motion}$$

$$\dot{q} = u \left(\frac{d\varepsilon}{dr} - \frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dr} \right) \quad : \text{heating (cooling) rate}$$

$$v = \sqrt{1 + (u/c)^2 - 2GM/rc^2}$$



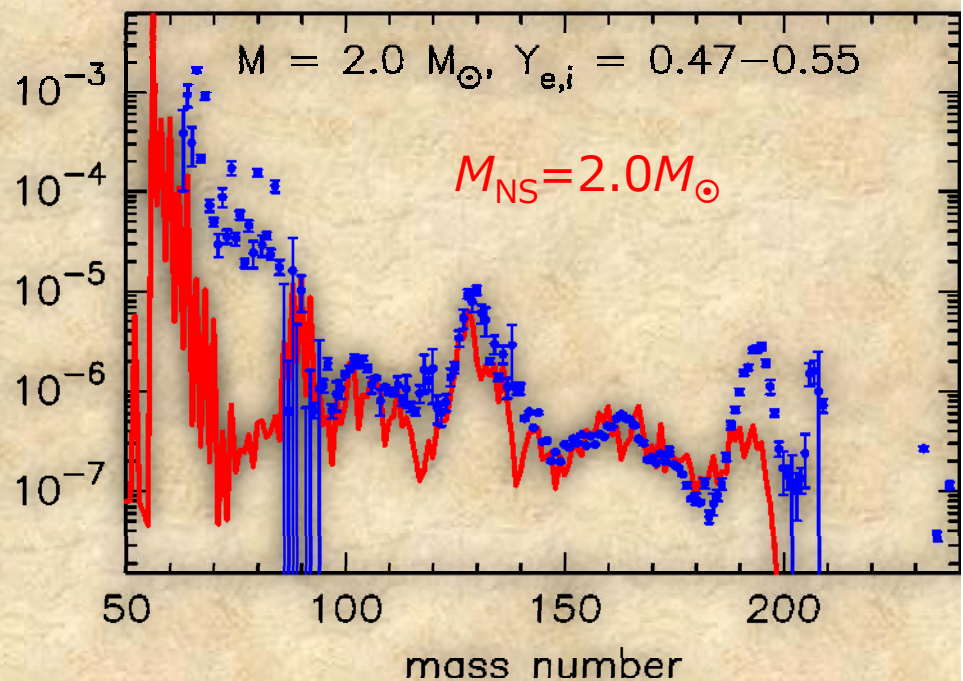
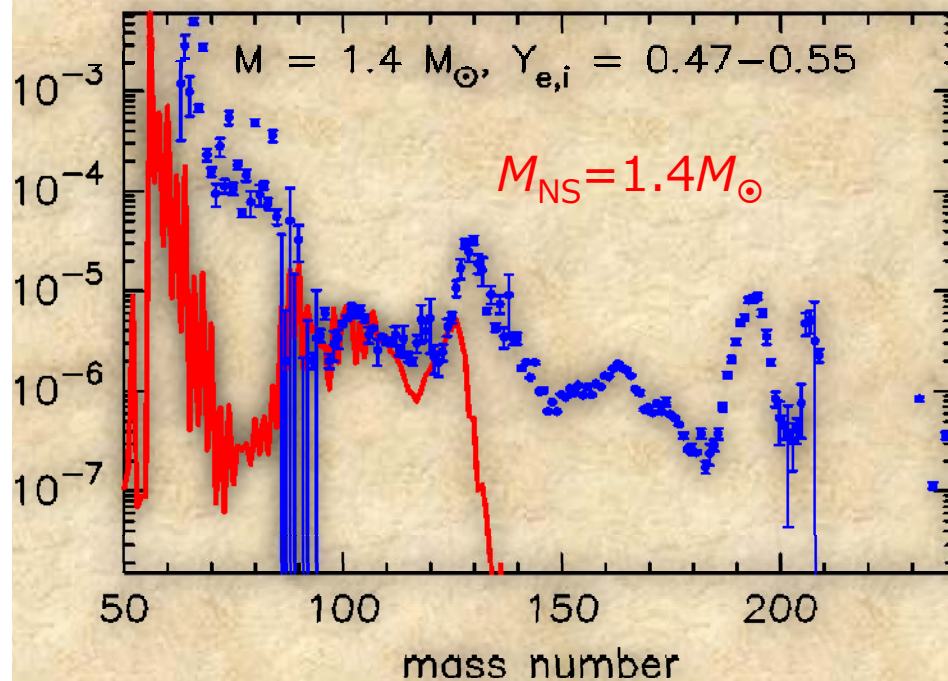
ニュートリノ風におけるrプロセス

普通の中性子星 ($M=1.4M_{\odot}$) : $A\sim 130$ くらいまで

➡ 普通の超新星 ($10\sim 30M_{\odot}$)

重い中性子星 ($M=2.0M_{\odot}$) : $A\sim 200$ まで合成可能

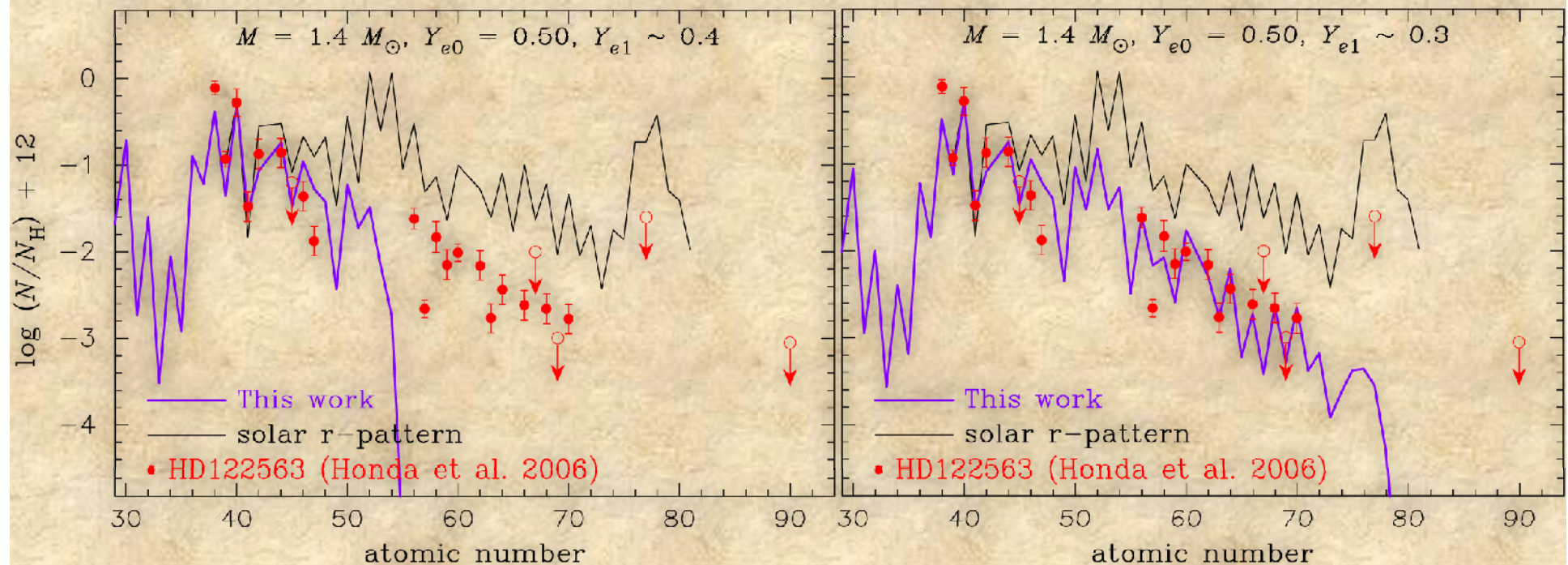
➡ 大質量超新星 ($>30M_{\odot}$) ?



Wanajo & Ishimaru 2006

ニュートリノ風におけるweak rプロセス

- ➡ 普通の中性子星 ($M=1.4M_{\odot}$) でも可能 ($Y_e \rightarrow \sim 0.3$ のとき)
- ➡ weak r プロセス元素の起源は**普通の超新星爆発**
(e.g., $20 \sim 30 M_{\odot}$)

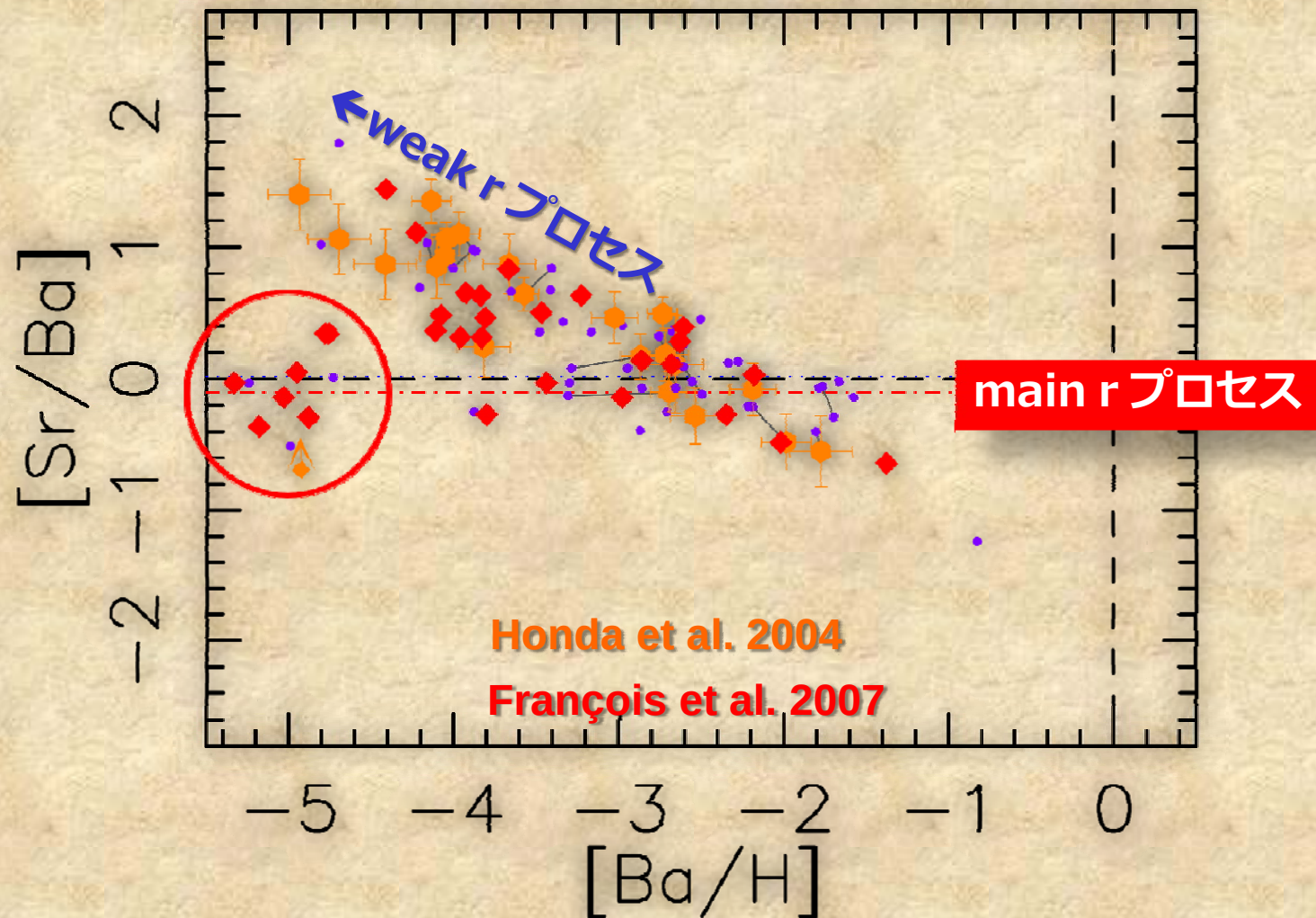


Wanajo et al. in prep.

もう一つの main r プロセス
hypernovae?

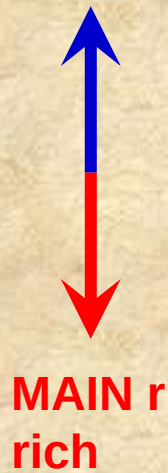
銀河ハロー星にみるもう一つのrプロセス

- ☉ 太陽系 r 組成をもつ r プロセス欠乏星 ($[\text{Ba}/\text{H}] \sim -5$)
- ☞ もう一つのmain r プロセスの起源が必要

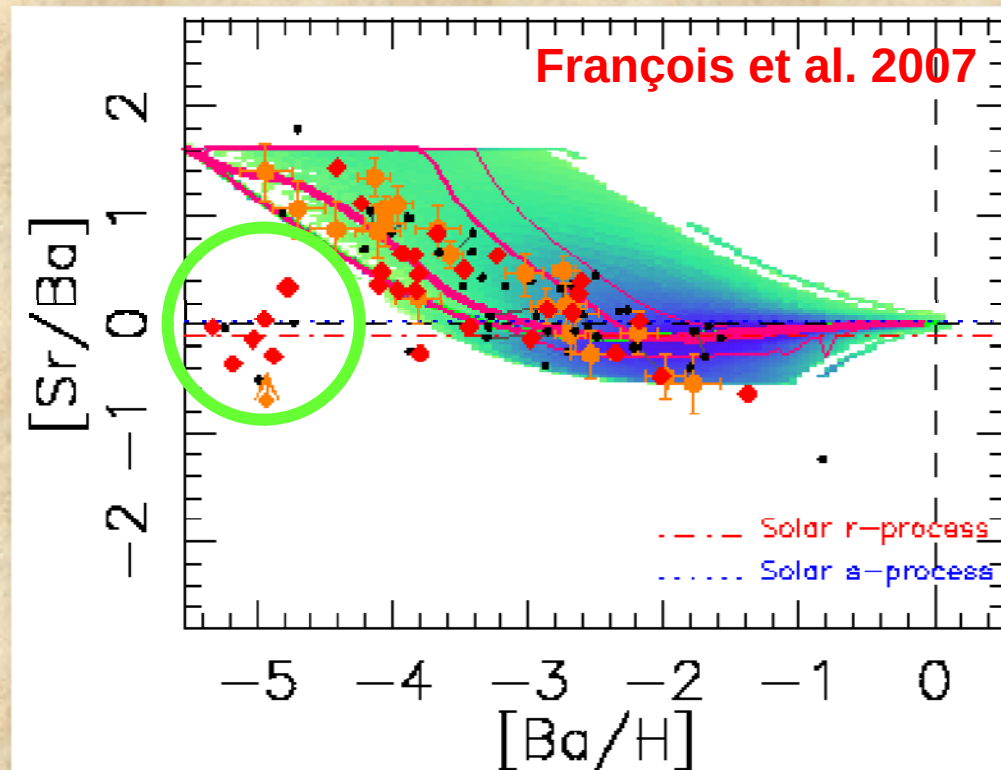


low Ba & low [Sr/Ba] 星の謎

WEAK r
rich



MAIN r
rich



WEAK r rich

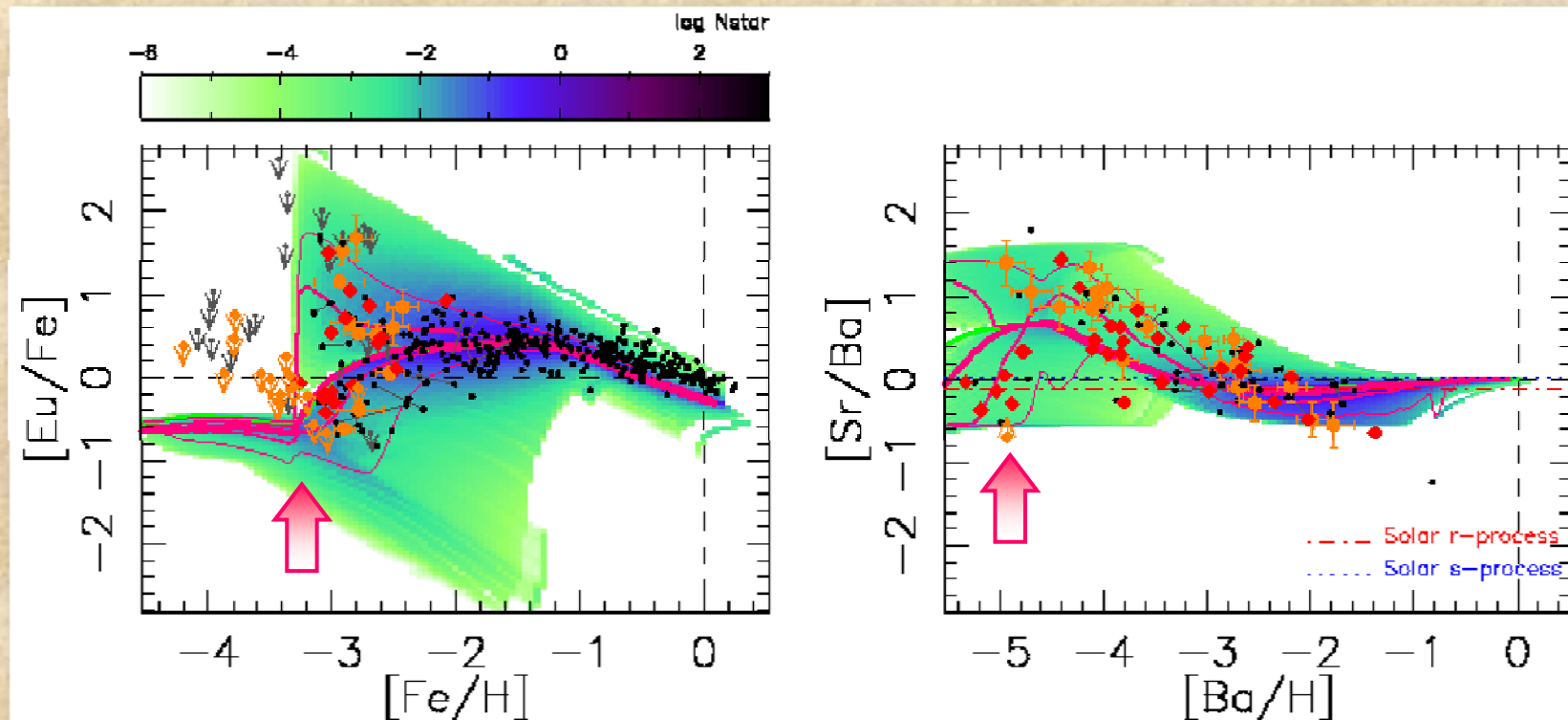


MAIN r rich

main r: $8 \sim 10 M_{\odot}$; weak r: $20 \sim 30 M_{\odot}$ の場合

もう一つのmain rプロセスの起源が必要

もう一つのmain rプロセス元素の起源



Main r: SNe II of $8\sim 10M_{\odot}$ **Weak r:** SNe II of $20\sim 30M_{\odot}$
Hypernovae: $>30M_{\odot}$ Stars, yield of r is 10% of Main r



hypernovaeもmain rプロセスの（一部の）起源？

Hypernova/GRBにおける r プロセス

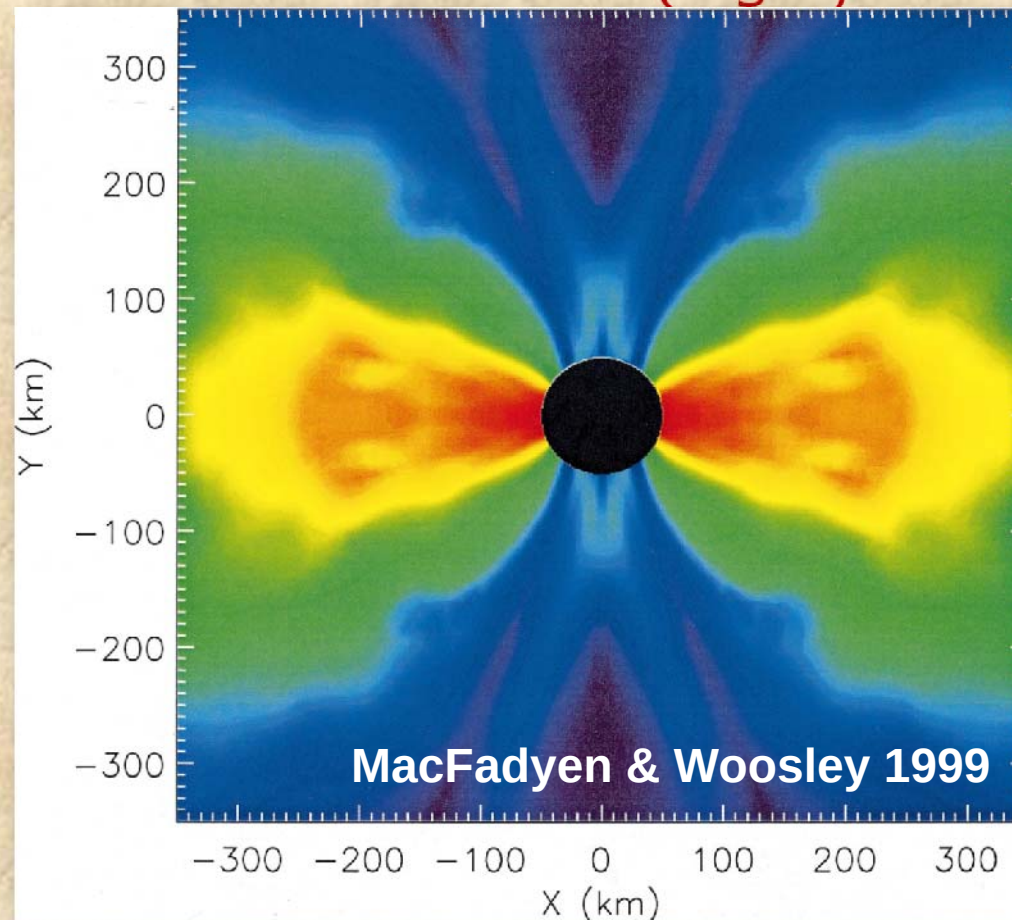
重い中性子星 ($M=2.0M_{\odot}$) のニュートリノ風 ($\sim 30M_{\odot}$) ?

delayed collapse to a blackhole; Wanajo et al. 2001

or GRB-jet/GRB-disk wind ($>30M_{\odot}$) ?

Pruet et al. 2004; Surman et al. 2000; Fujimoto et al. 2006

⇒ $A \sim 130$ まで ? or $A \sim 200$ まで ? (highly uncertain)



金属欠乏星の観測にみる r プロセスの起源

main r プロセス (Ba~U)

- ⇒ 低質量($8\sim 10M_{\odot}$)超新星の可能性が高い
- ⇒ 理論的には困難

weak r プロセス (Sr, Y, Zr, ...)

- ⇒ 普通の(e.g., $20\sim 30M_{\odot}$)超新星の可能性が高い
- ⇒ ニュートリノ風モデルで説明可能

もう一つのmain r プロセス (~10%)

- ⇒ hypernova/GRB($> 30M_{\odot}$)の可能性あり
- ⇒ 理論モデルの不定性が大きい