

初期世代星(低金属星)観測 からの研究の展開

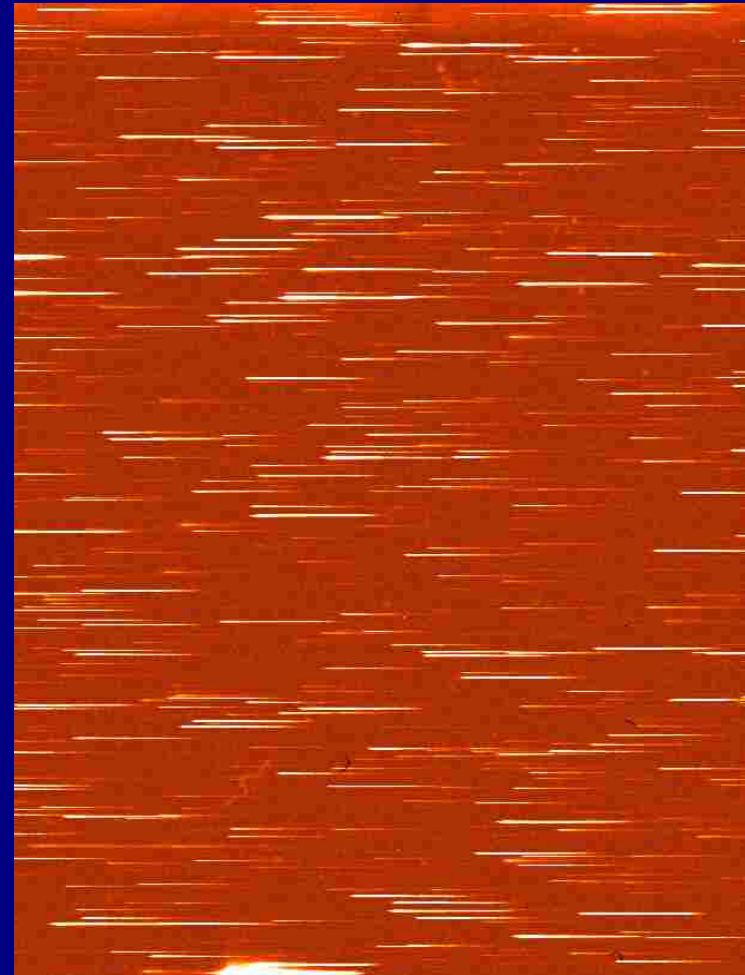
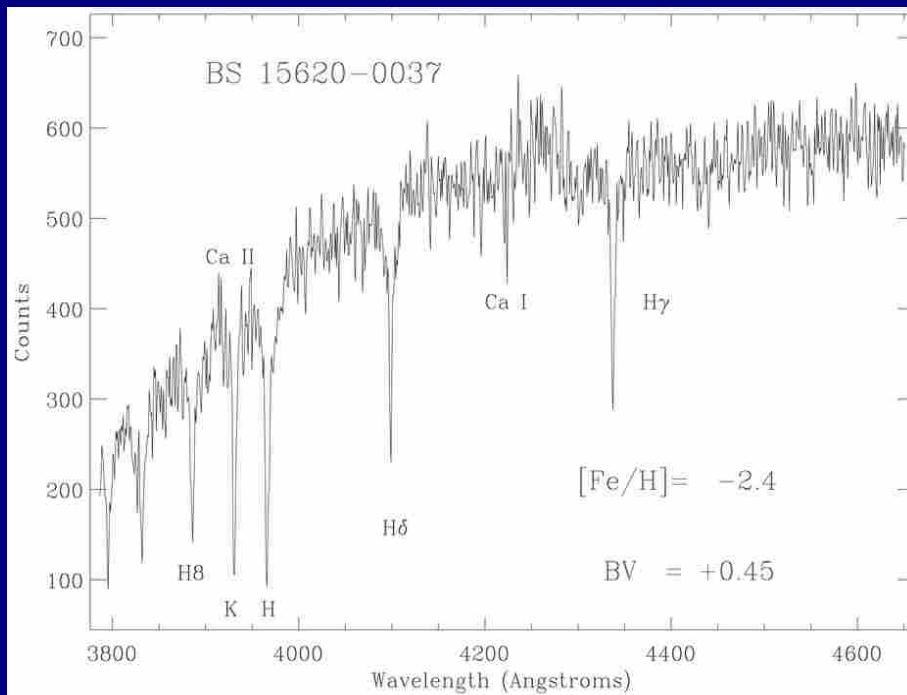
- (1) 個々の元素合成過程と対応天体の解明
ビッグバン、超新星、AGB星
- (2) 宇宙の初代星の解明
→最も低金属の星
- (3) 銀河系・局所銀河群形成の解明
→中性子捕獲元素の活用の可能性

低金属星の組成測定の進展の背景 (最近の10年)

- 観測対象となる星の探査の進展
- 8m級望遠鏡＋高分散分光器の登場
- モデル大気・解析ツールの確立、普及

低金属星の探査・組成解析(1)

- 1) 低分解能スペクトル
- 2) 中分解能スペクトル



e.g., Beers et al. 1992

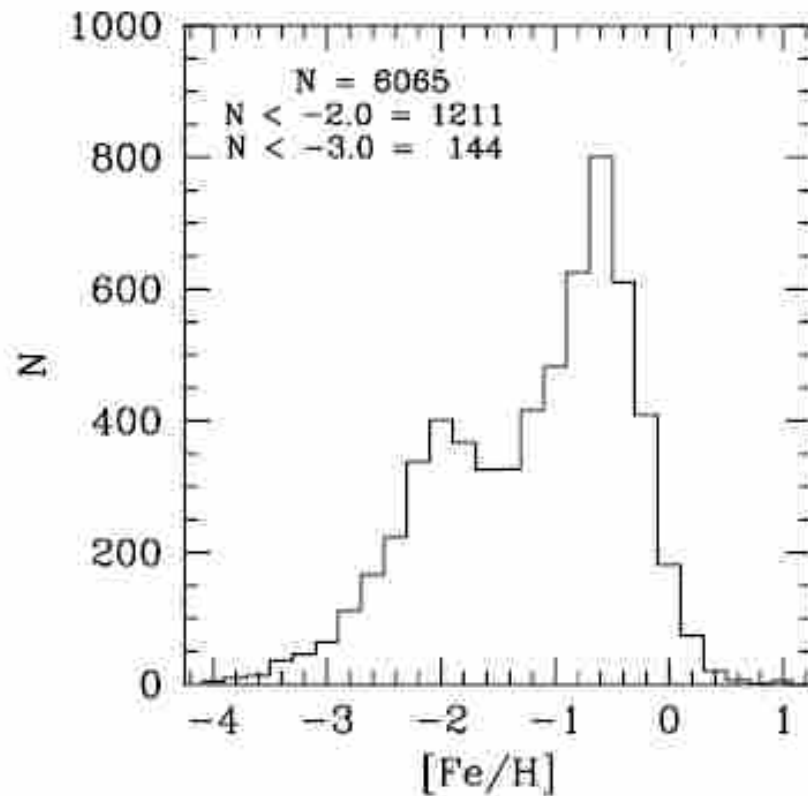
低金属星サーベイの進展

cf. *Beers & Christlieb (2005, ARAA)*

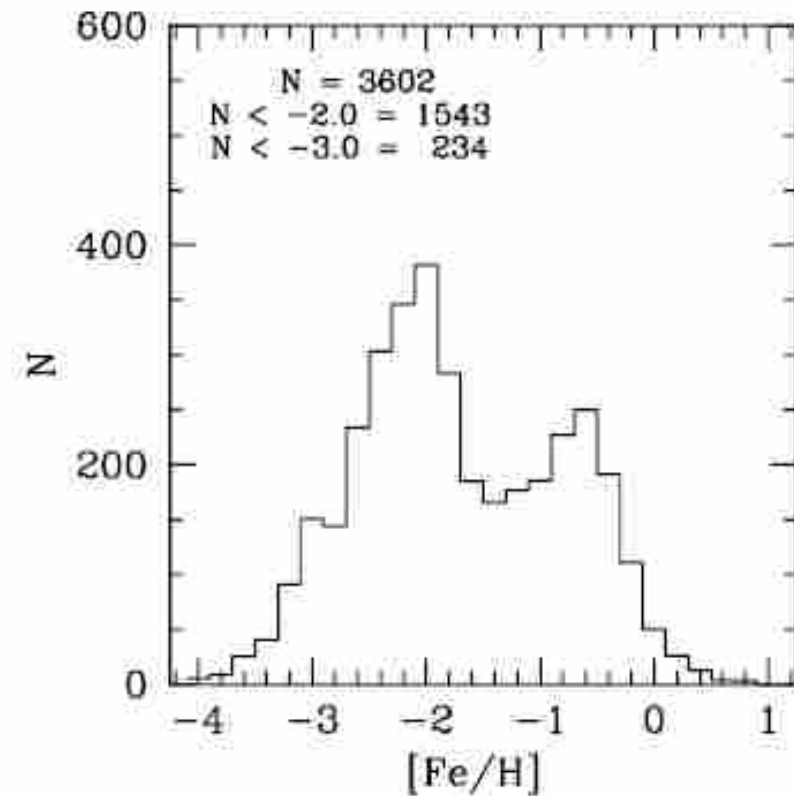
- **HK survey (1980s--)**
Beers et al. 1985, 1992, etc.
→ **BS**12345-678, **CS**23456-789 ...
- **Hamburg/ESO survey (1990s--)**
stellar content: *Christlieb et al. 2001* etc.
→ **HE**1234-5601
- **SDSS/SEGUE (2006 --)**

HK, HEサーベイで得られた「金属量分布」

HK Survey Observed MDF

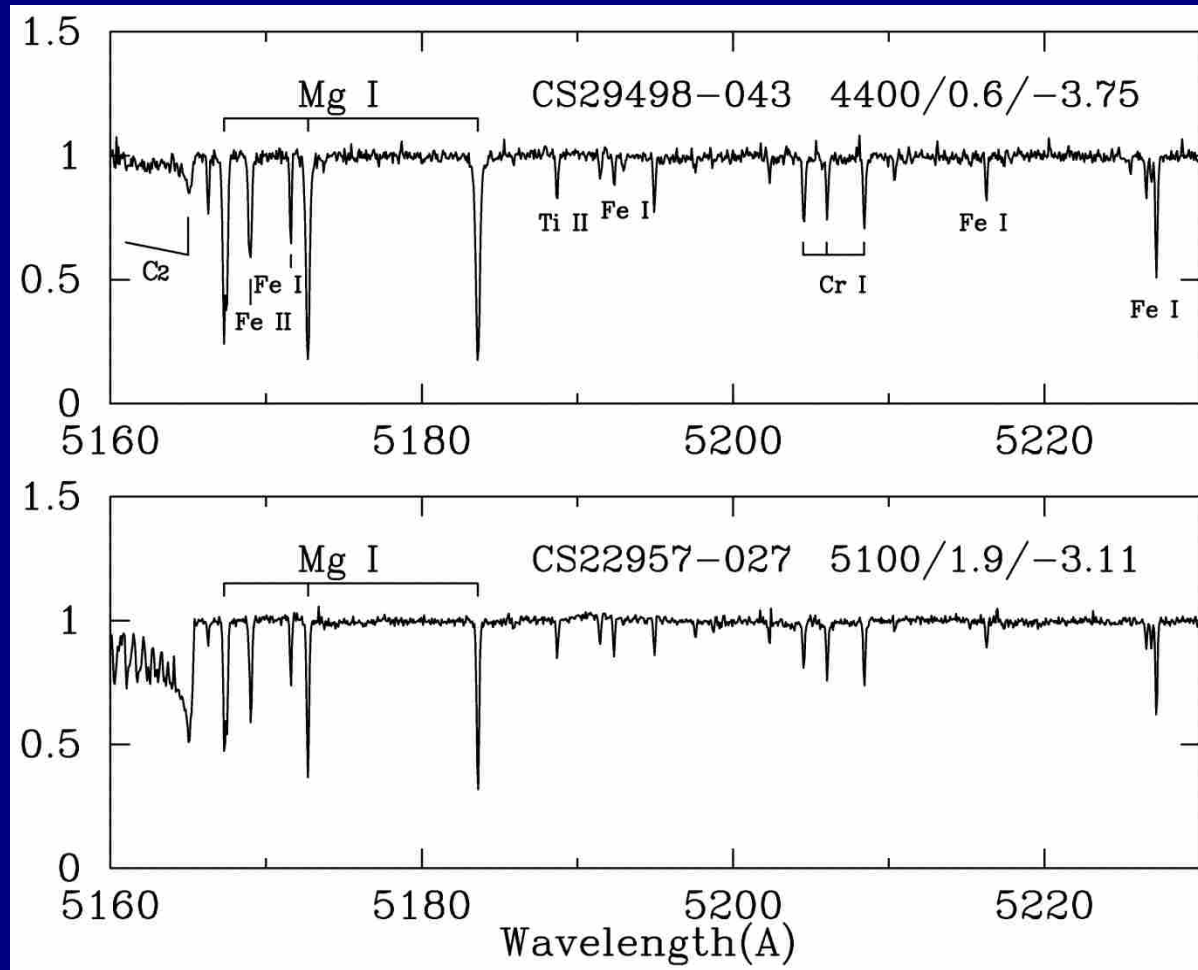


HES Observed MDF



低金属星の探査・組成解析(2)

3) 高分解能スペクトル → 個々の原子・分子線に分離



天体観測に必要／十分な波長分解能

$$R = \lambda / \delta \lambda$$

- 星間物質の吸収線: $R \geq 100,000$ (3km/s)
- 恒星の吸収線: $R \sim 50,000$ (6km/s)
- 銀河のスペクトル線: $R \leq 10,000$ (30km/s)

高分散分光には大集光力が必要
→地上大型望遠鏡に搭載するのが効率よい

初期世代星(低金属星)観測 からの研究の展開

- (1) 個々の元素合成過程と対応天体の解明
ビッグバン、超新星、AGB星
- (2) 宇宙の初代星の解明
→最も低金属の星
- (3) 銀河系・局所銀河群形成の解明
→中性子捕獲元素の活用の可能性

宇宙初期の元素合成と低金属星

約140億年前

ビッグバン

第1世代の星の誕生

小質量星？

金属量ゼロ
 $[Fe/H] = -\infty$

このころ
銀河の形成

超新星爆発

第2世代の星の誕生

超新星爆発

小質量星
(低金属星)

$[Fe/H]$
 $= -6 \sim -3?$

46億年前

太陽系の誕生

$[Fe/H] = 0$

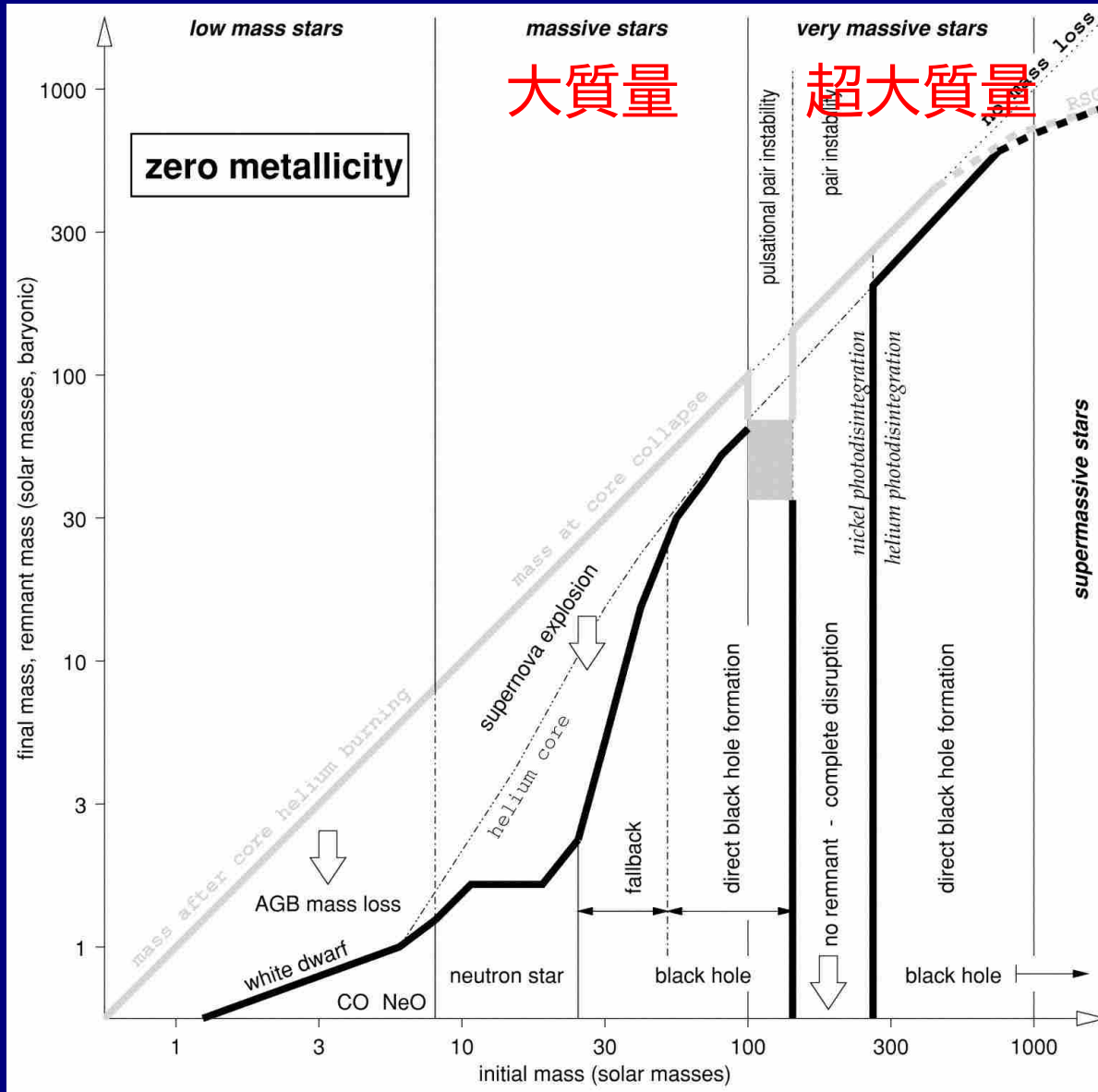
観測

最も金属量の低い領域 →宇宙の初代天体への制限

- 第一世代で小質量星は形成されたか？
←金属量ゼロの星の探査
- 超大質量星 (>100太陽質量) は形成されたか？
←pair-instability supernova の痕跡の探査
金属量分布
- 第一世代の大質量星による元素合成は？
←低金属星の組成パターン

金属量ゼロの星の進化と終末

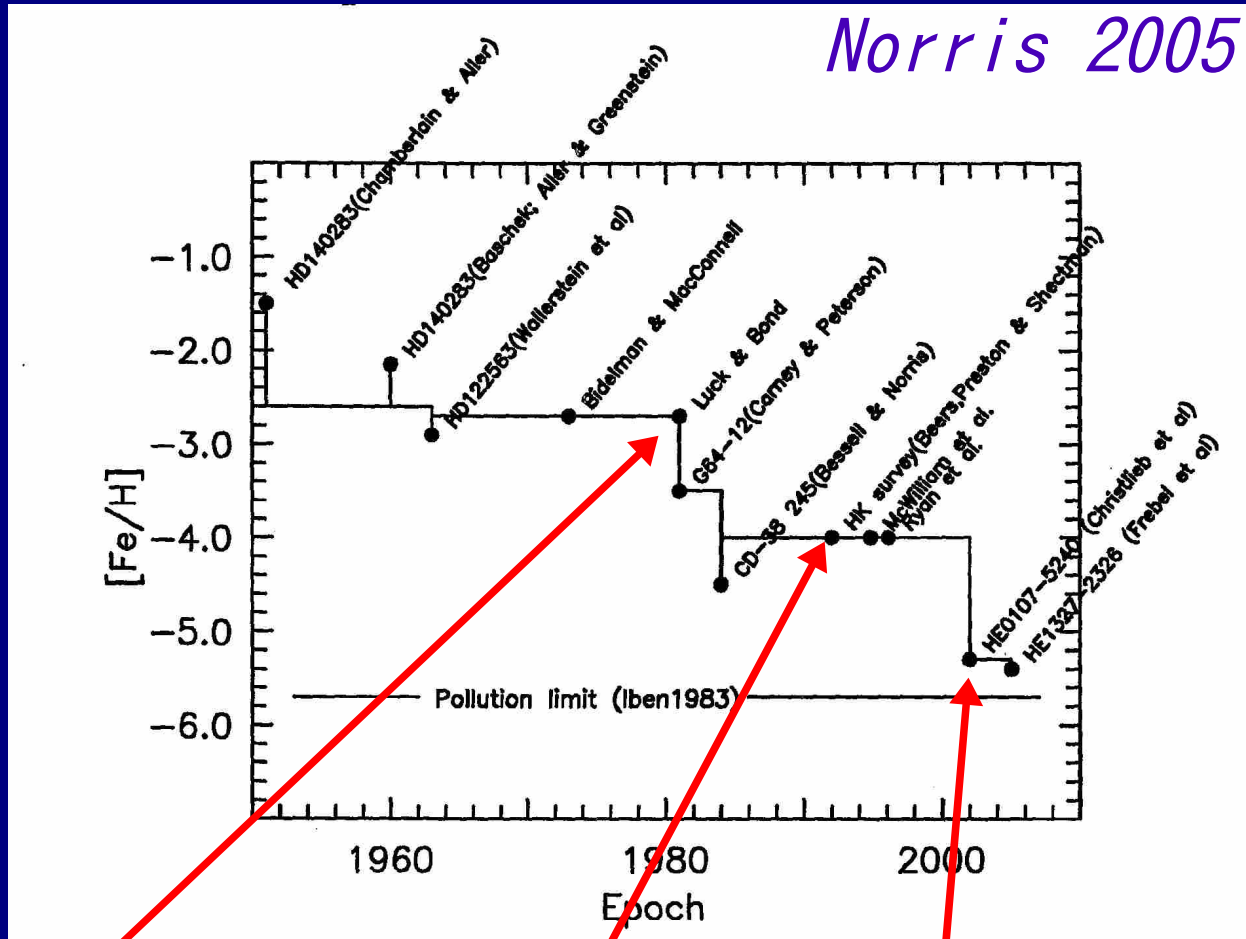
最終質量



初期質量

Heger et al.
(2002)

銀河ハローにおける金属欠乏星の探査

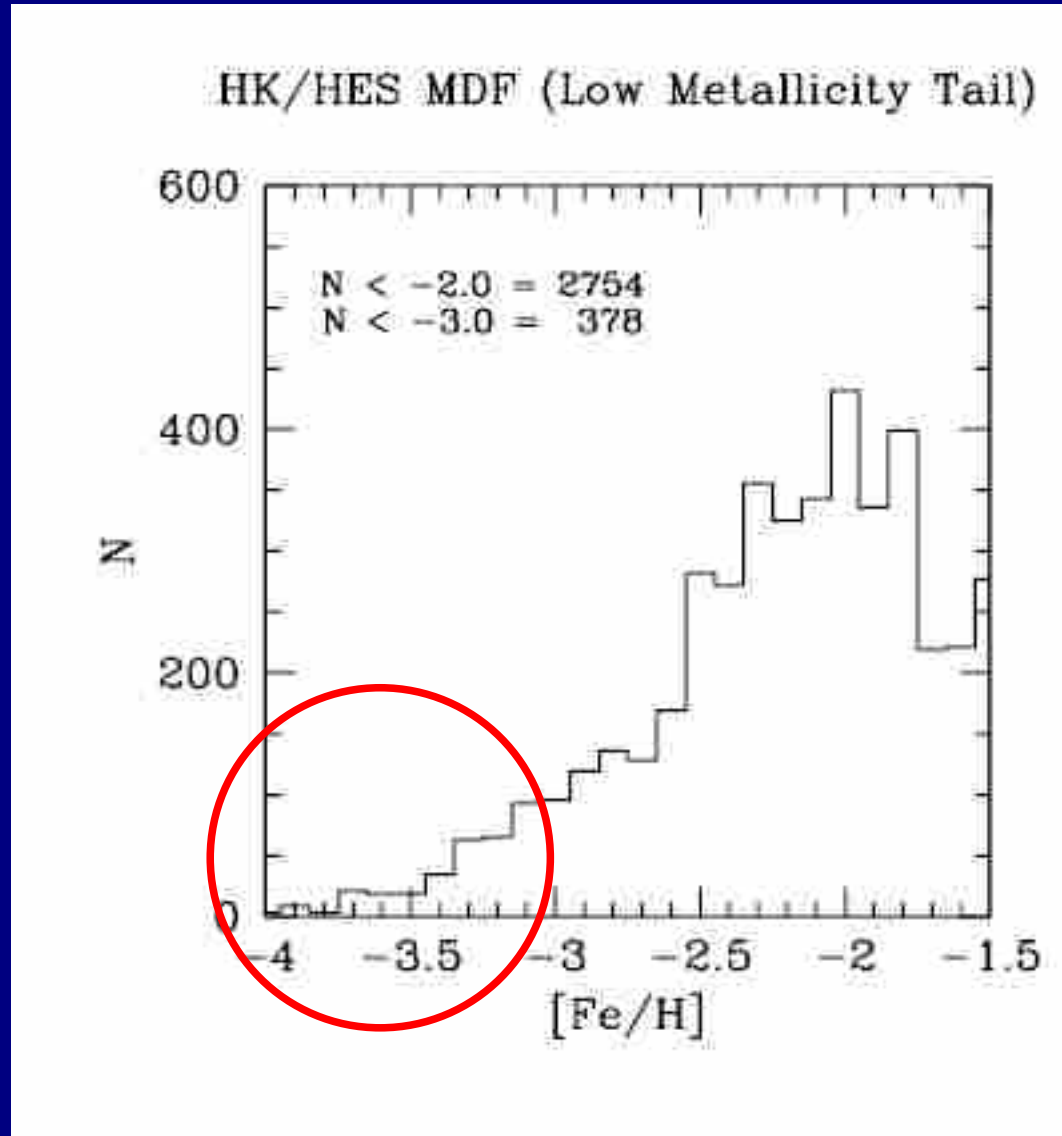


Bond (1981)
“Where is Population III”

HK survey

HE0107-5240の発見
([Fe/H]=-5.3)

金属量分布 (low metallicity tail)



すばるによる観測プログラム：
Chemical abundance patterns
of the first generations of stars

1) Sample selection:

HK-survey, Hamburg/ESO survey
Medium resolution follow-up
HERES (Barklem et al. 2005)

2) High resolution spectroscopy
Subaru/HDS (2003-2005)

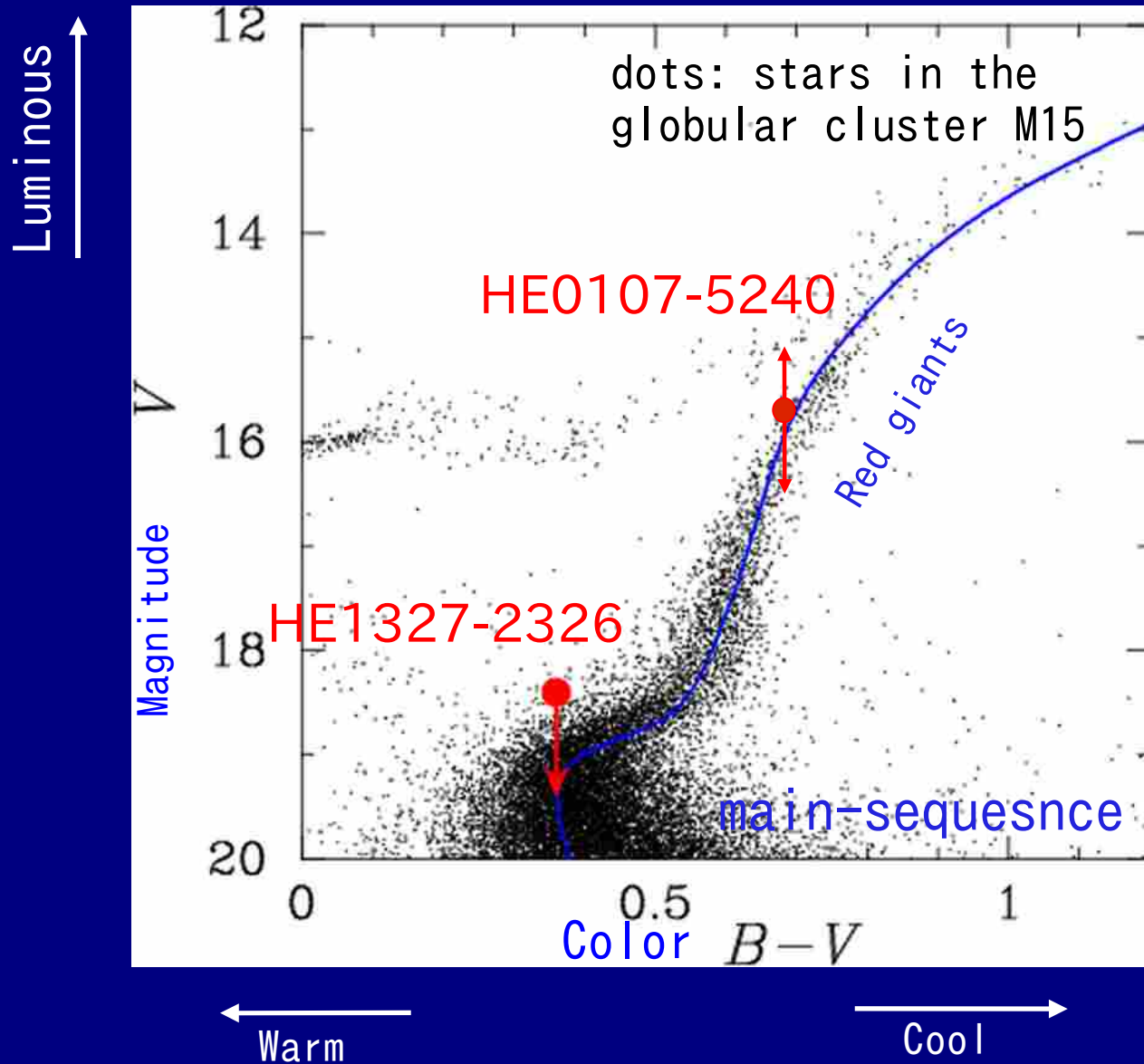


最も鉄組成の低い星 HE1327-2326 の発見



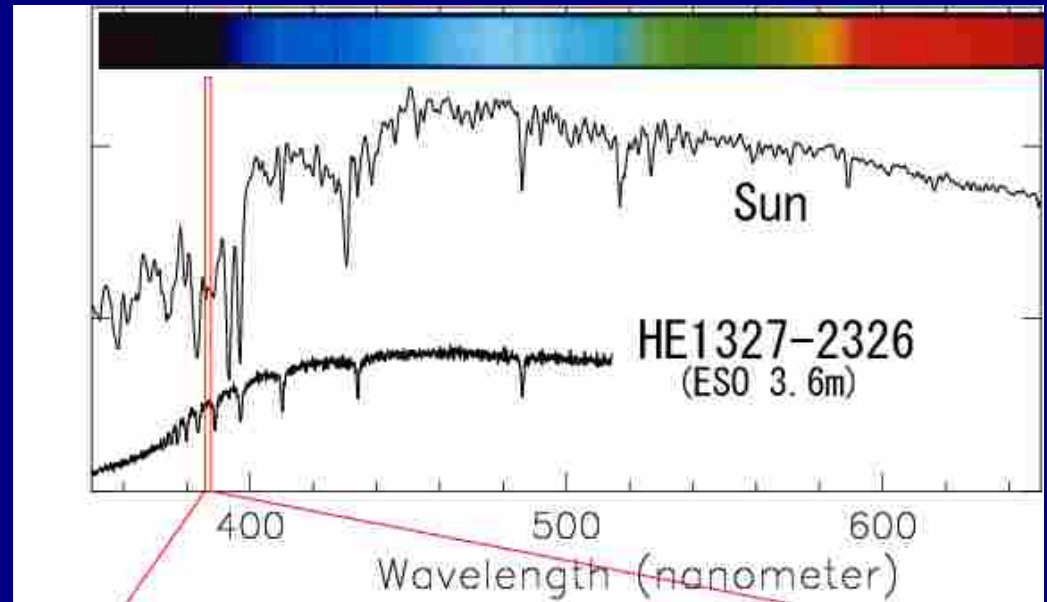
Frebel et al. 2005, Aoki et al. 2006

HE1327-2326 の進化段階 →主系列星または準巨星



鉄・炭素組成

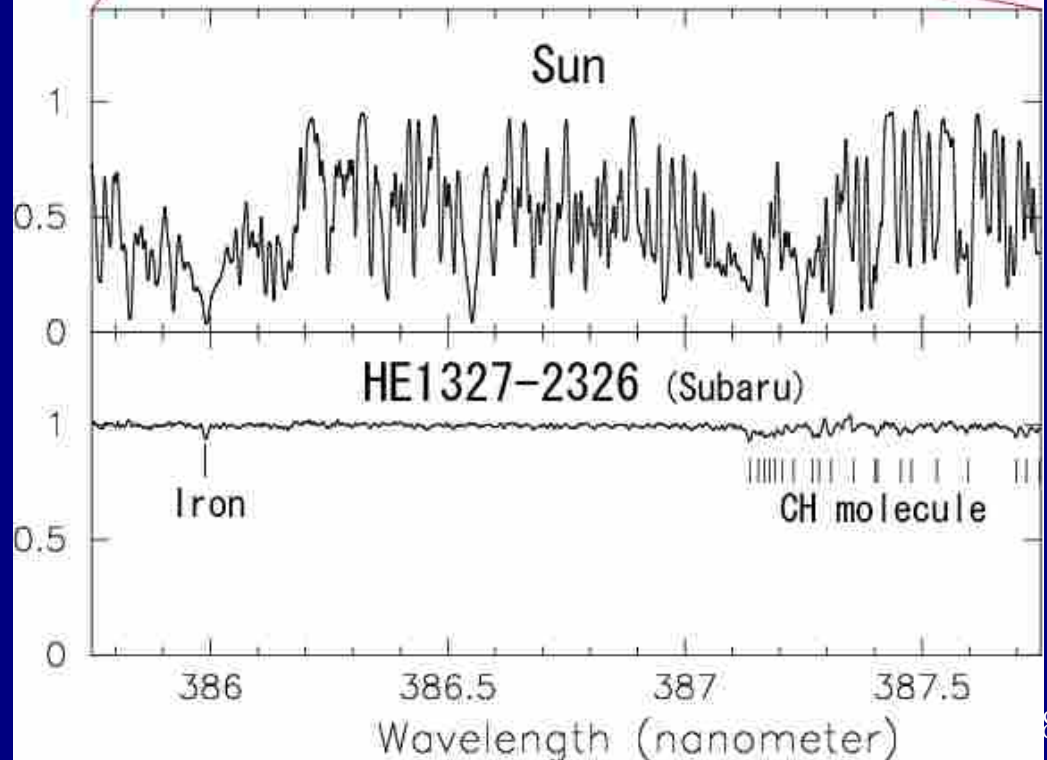
Medium resolution spectra →



High resolution spectra →

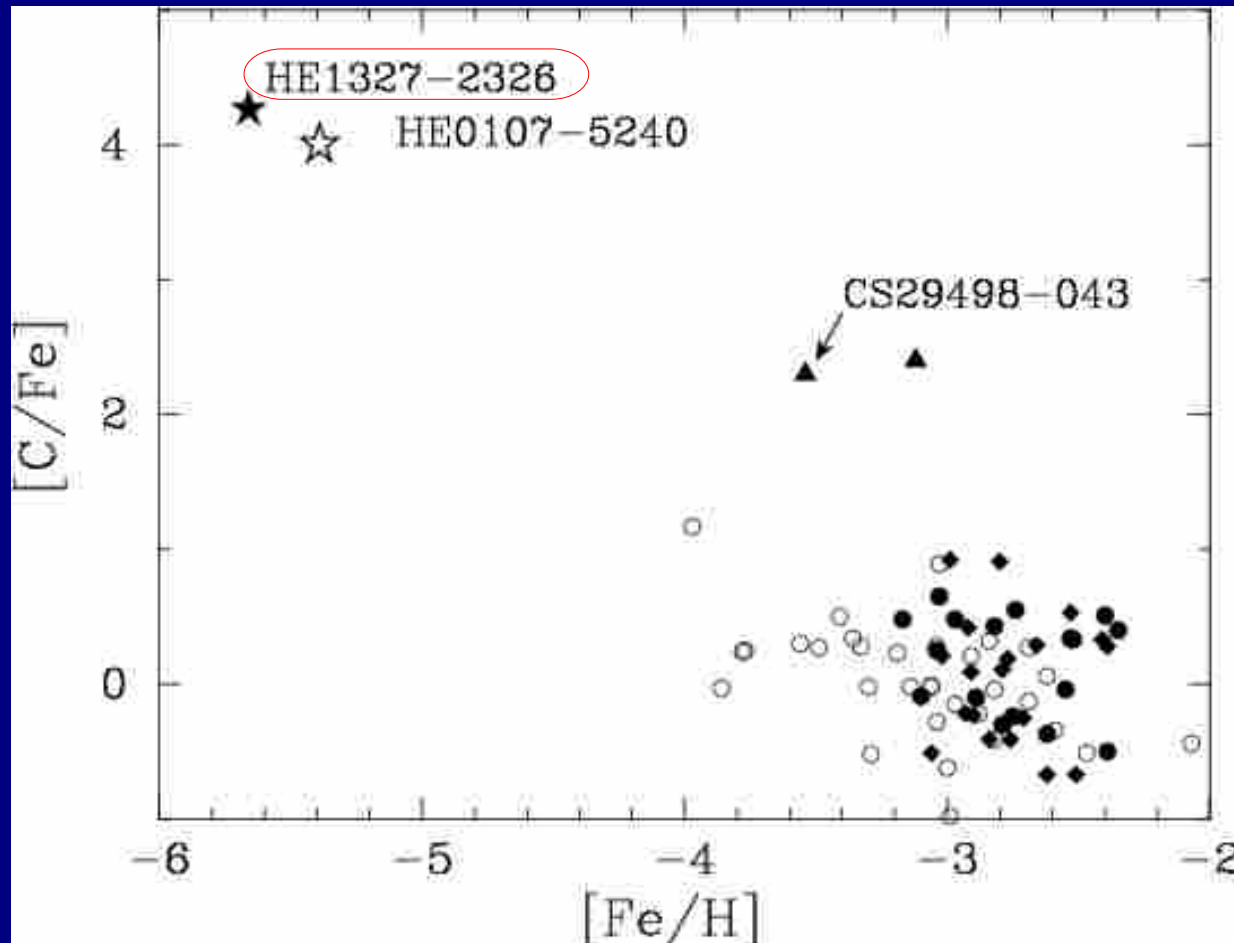
very weak Fe lines
→ $[Fe/H] = -5.4$

detection of CH molecular bands
→ excess of carbon



鉄・炭素組成

HE1327 and HE0107 have very high C/Fe ($[C/Fe] \sim +4$)
→ A common origin of the peculiar abundance pattern



- ★ This work
- Cayrel et al. 2004
Honda et al. 2004
- Aoki et al. 2005
- ▲ Aoki et al. 2004

[Fe/H]<-5の2天体(HE1327, HE0107) の形成(解釈)

- 種族III (=第一世代) シナリオ:

- 第一世代の小質量連星に
- 星間物質中の金属(鉄など)が降着
- 主星がAGBに進化した段階で炭素が伴星に降着
(現在は伴星のほうを観測される)
→ Suda et al. 2004など

- 種族II (第二世代以降) シナリオ:

- 第一世代の大質量星/超新星が炭素過剰物質を放出
- 第二世代の小質量星形成時にとりこまれた
→ Umeda & Nomoto 2003, Iwamoto et al. 2005
→ Meynet et al. 2006

ふたつの $[\text{Fe}/\text{H}] < -5$ の星の発見 (とくにHE1327-2326)が提起した問題

1. $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の金属量分布と炭素組成過剰
→ $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ ではすべて炭素過剰星か？
2. HE1327-2326(ターンオフ星)でビッグバン元素合成で作られたはずのLiがみつからない
→ 宇宙初期のLiに関する未知の過程？
3. HE1327-2326で中性子捕獲元素Srの過剰がみられる
→ 宇宙初期に軽い中性子捕獲元素を合成するプロセスが存在

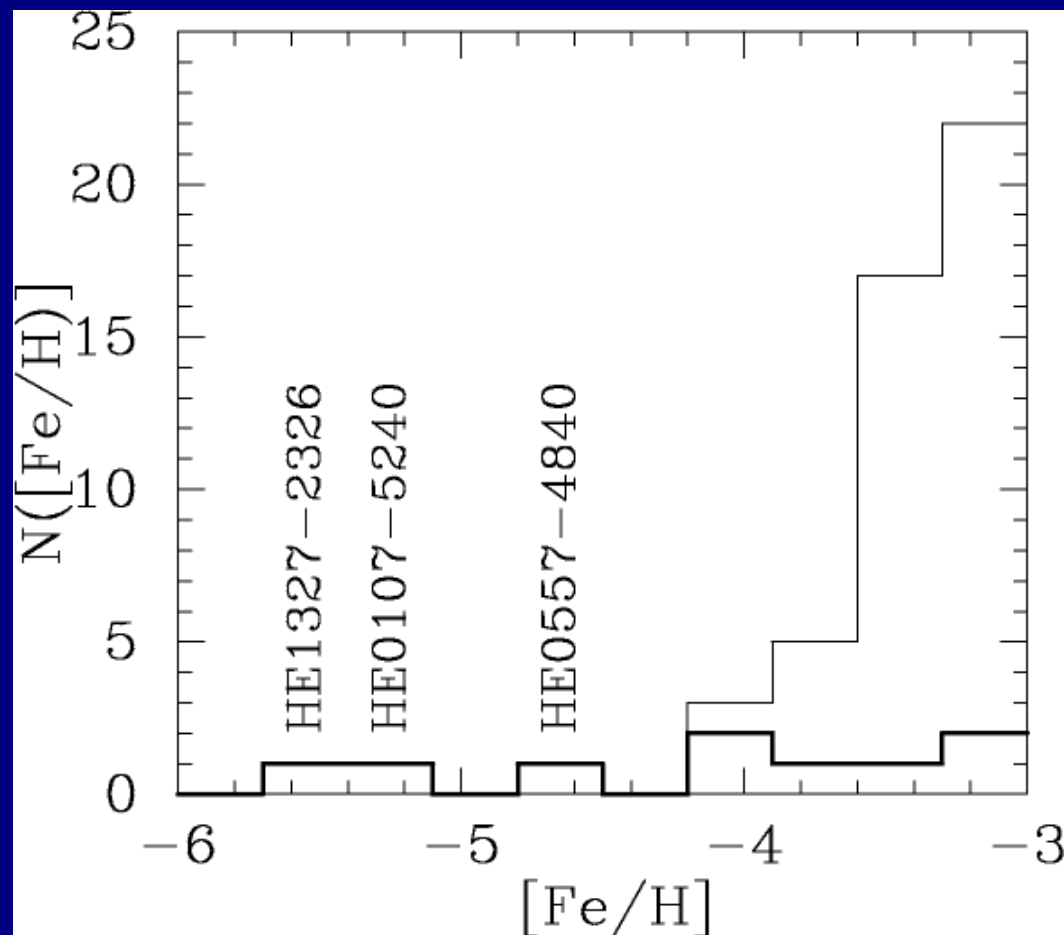
(1) $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の金属量分布と炭素組成

• $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ での金属量分布は？

「 $-5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -4$ のギャップ」
は否定された
(Norris et al. 2007)

• $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の星はすべて炭素過剰か？

→ 小質量星形成には（炭素を含めた）総金属量が重要か？



最も金属量の低い領域の研究（まとめ）

- 新たな探査と8m級望遠鏡の分光により、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の星が発見され、詳細に調べられるようになった。
- $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の星(3天体)はいずれも炭素過剰であり、特殊な超新星もしくは大質量星からの質量放出の影響を受けたものと考えられる。
 - 超大質量星は形成されなかったのか？
銀河系ハロー以外ではどうなのか？
- すばるで観測された HE1327-2326は、予想外のリチウムとストロンチウム組成をもち、初期宇宙でのリチウム破壊、未知の中性子捕獲過程の存在を示している。

今後の観測計画

新たな金属欠乏星サーベイが進行中

SDSSおよびその拡張プログラム(SEGUE; Beers et al.)

- 北半球から観測可能な候補天体を多数検出
金属量分布、Li組成の問題、中性子捕獲過程元素の起源
をさぐるのに重要なサンプルと期待される
- すばるをふくめた共同の分光観測を推進中
銀河系「外部ハロー」の本格的探査へ

ELT(30m望遠鏡)時代:
銀河系ハロー全域と近傍銀河の星
の高分散分光が本格化

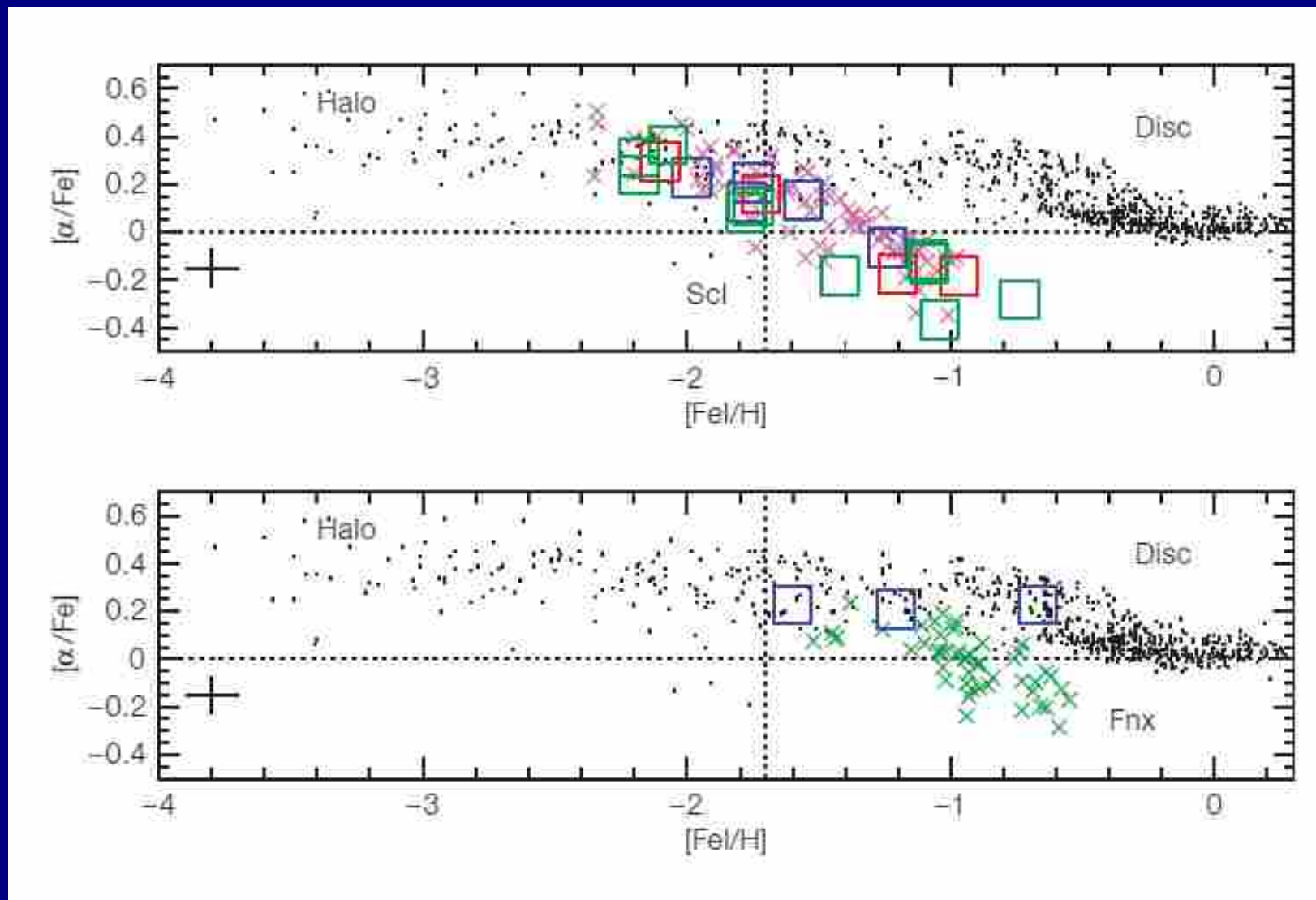
TMT(イラスト)



初期世代星(低金属星)観測 からの研究の展開

- (1) 個々の元素合成過程と対応天体の解明
ビッグバン、超新星、AGB星
- (2) 宇宙の初代星の解明
→最も低金属の星
- (3) 銀河系・局所銀河群形成の解明
→中性子捕獲元素の活用の可能性

α / Fe と星の種族・銀河系構造 - 可能性と限界

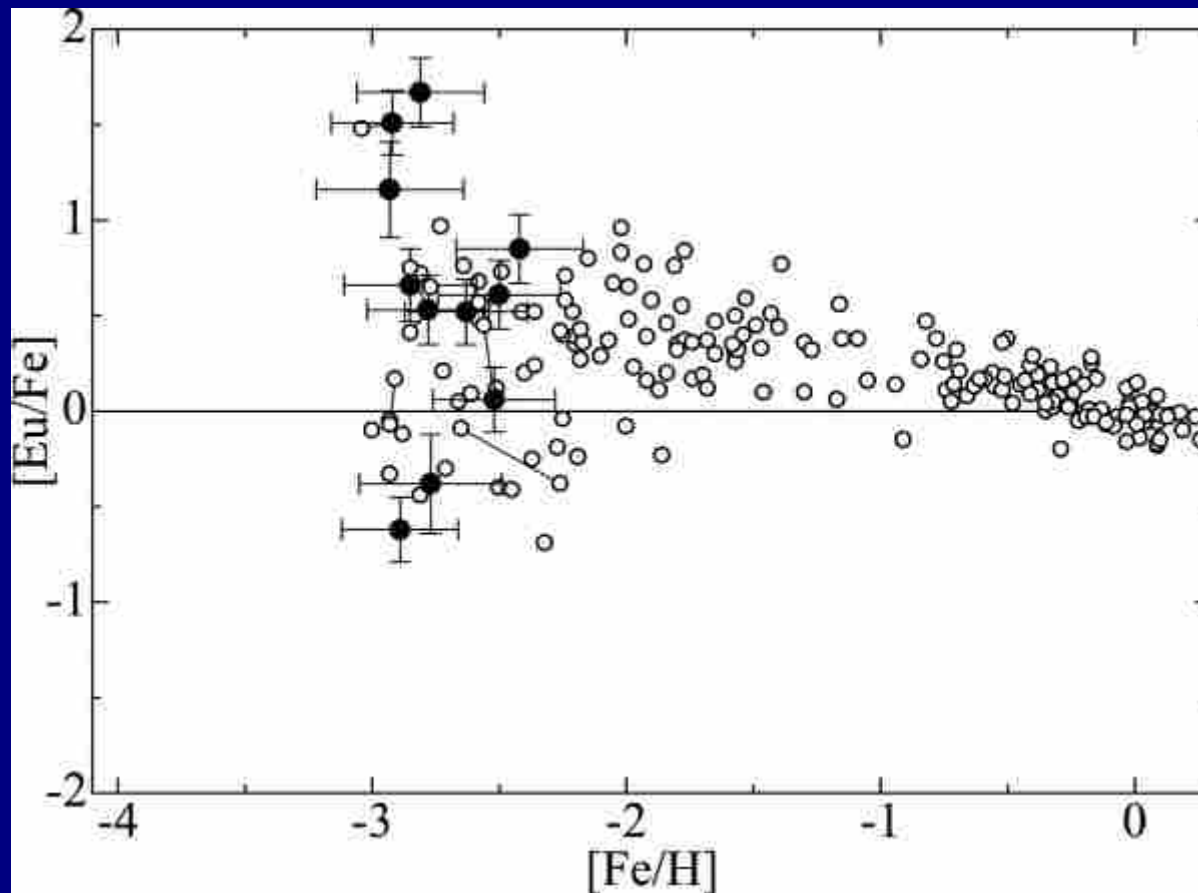


Tolstoy et al. (2006, ESO messenger)

中性子捕獲元素の活用の可能性

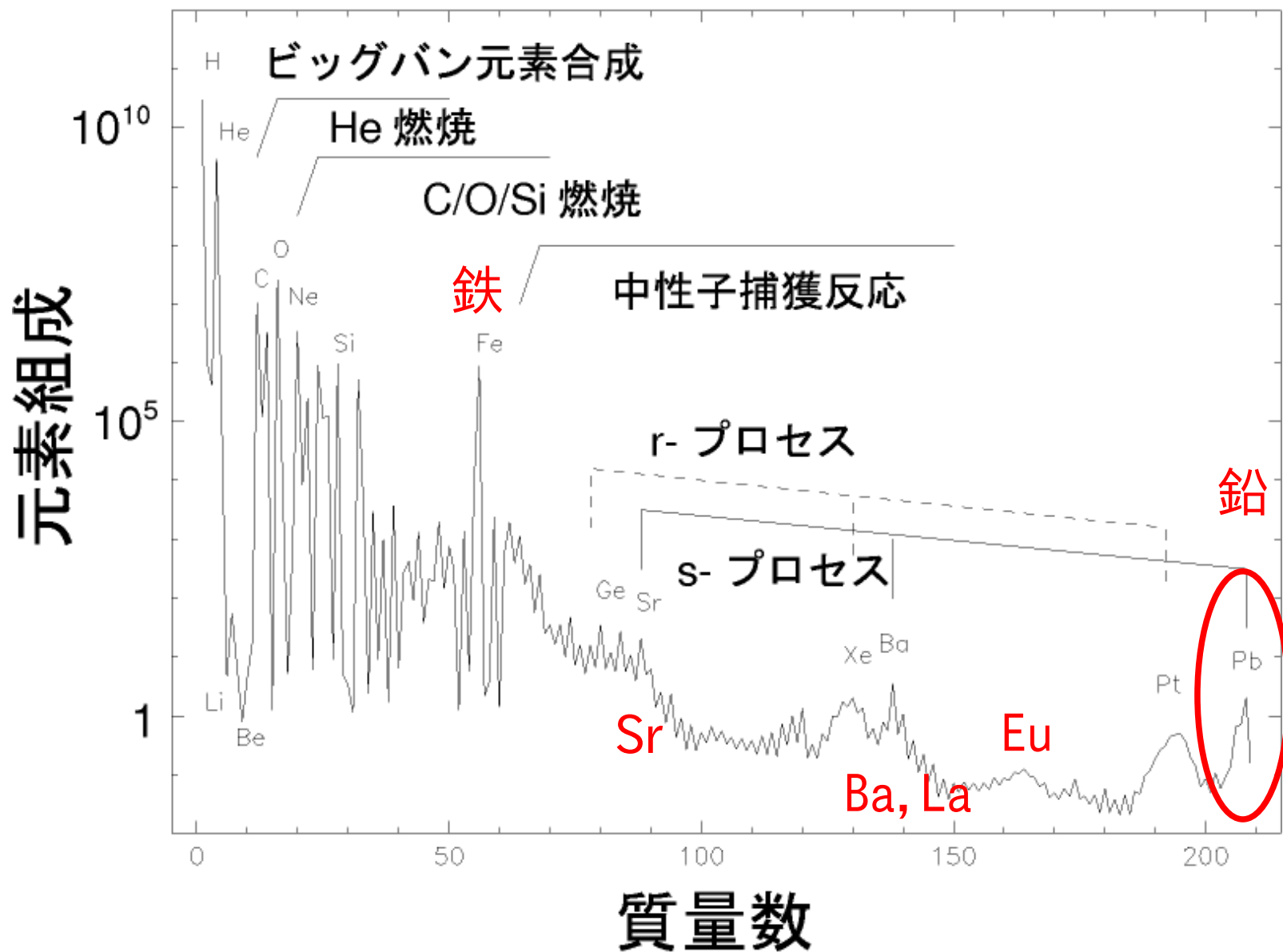
組成に大きな分散

→星が形成されるまでの歴史を反映



Honda et al. 2004

太陽系組成と中性子捕獲元素



鉄より重い元素の起源・中性子捕獲反応

●slow (s-) process:

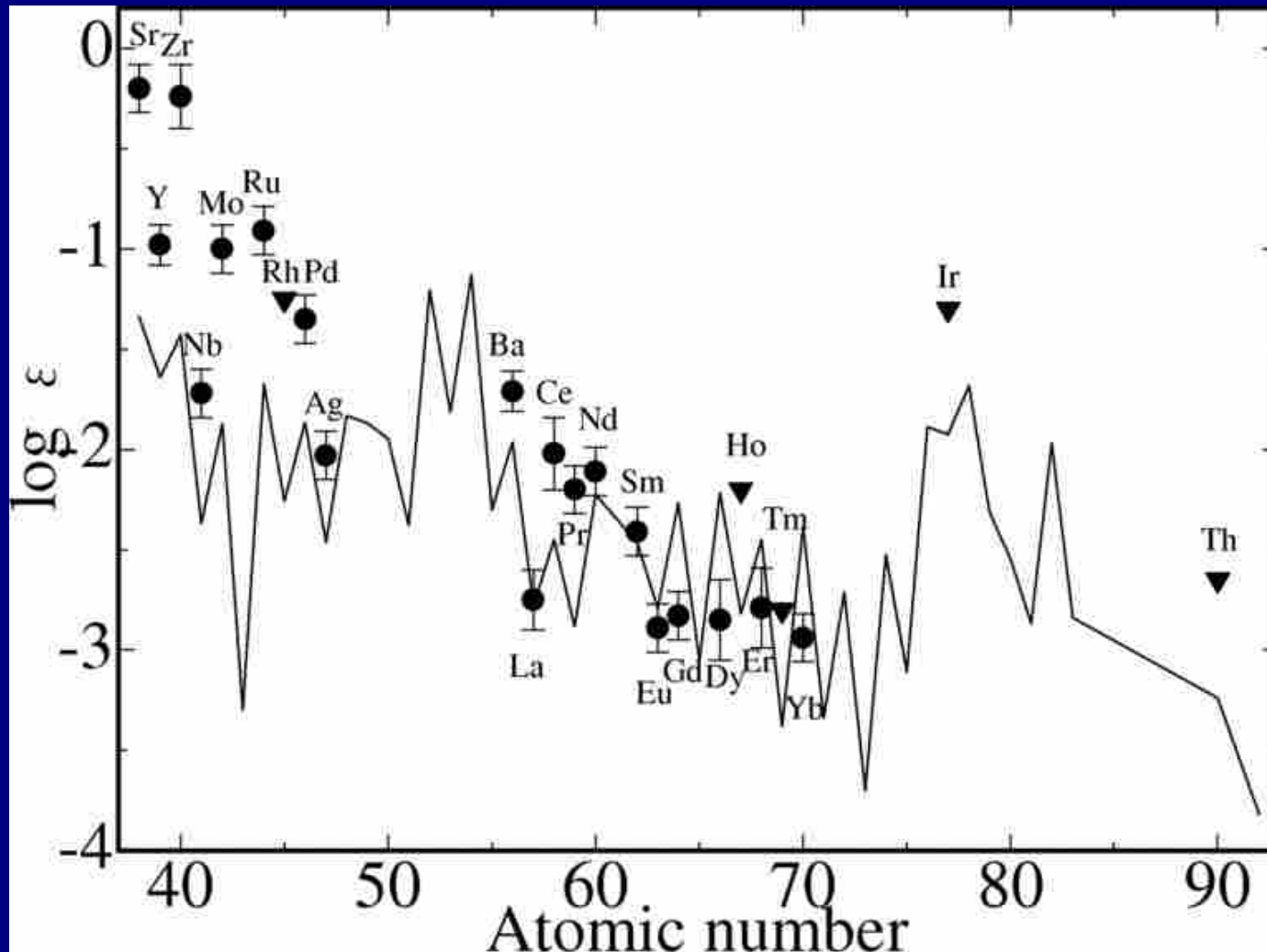
- **main component:** synthesis of heavy nuclei (up to Pb) in **AGB stars** (evolved intermediate-mass stars)
- **weak component:** synthesis of 'light' nuclei ($Z < 40$) in **massive stars** (not well studied by observations)

●rapid (r-) process

- Explosive synthesis of heavy nuclei up to Th and U in **supernovae (10Msun?)**.
→ main component

- Weak component? production of Sr, Y, Zr, ...Pd (very massive stars?)

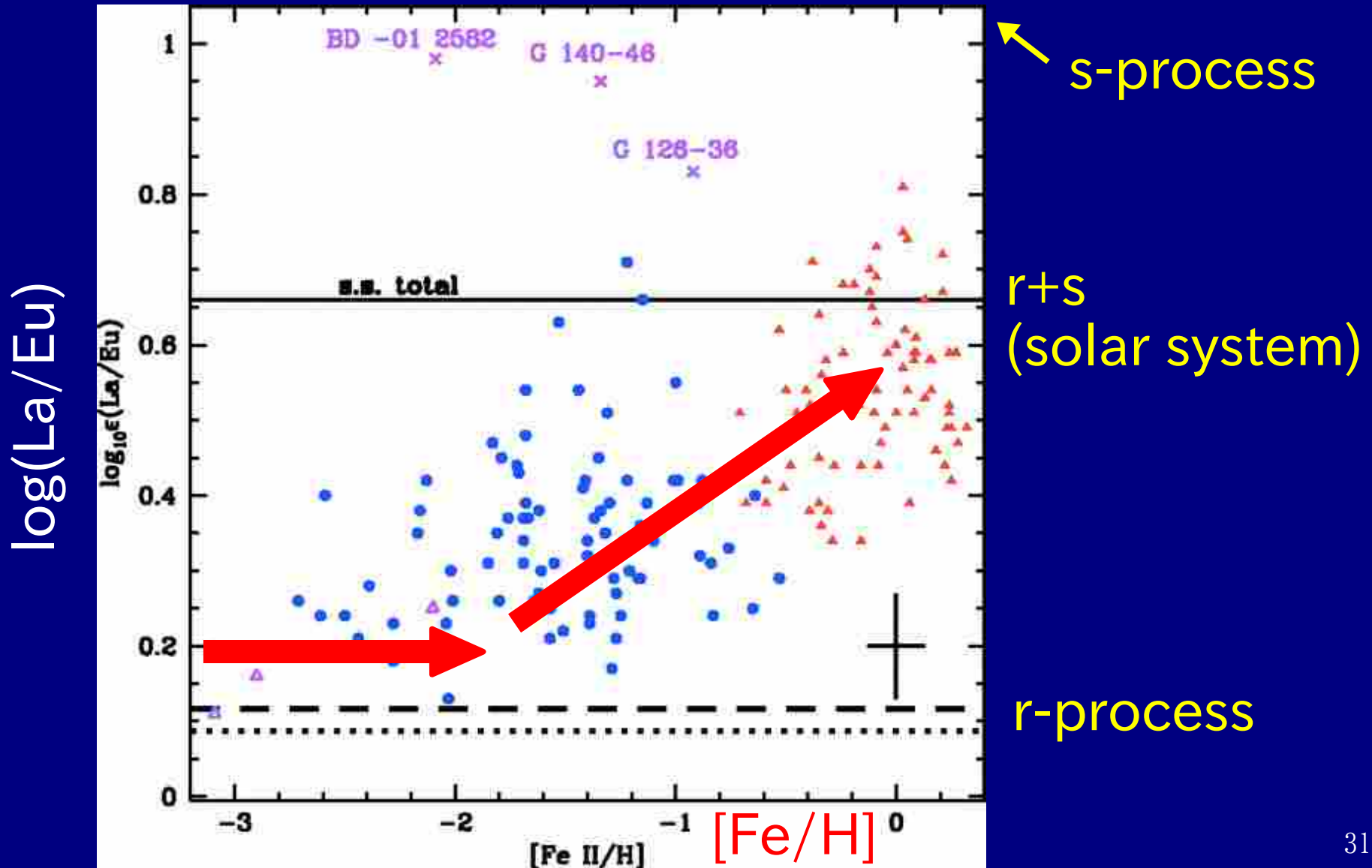
軽い中性子捕獲元素の過剰を示す星
→ weak r-process の組成パターン?



Honda et al. 2006

s-process/r-process ratio と星の種族

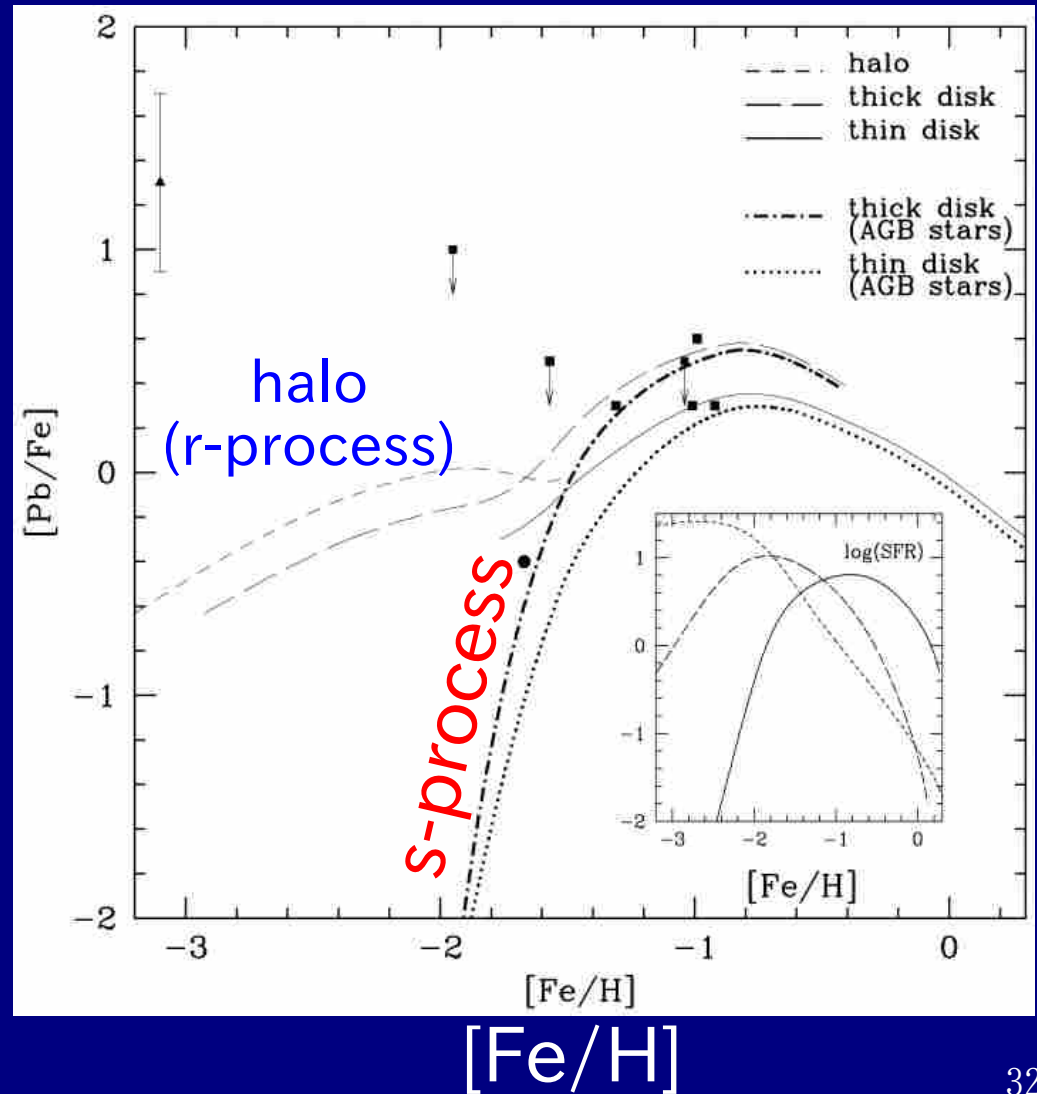
- Ba, La: s-process = AGB 星の指標 (100 Myr 以上)
- Eu : r-process = 超新星?の指標 (10 Myr 程度?)



s-process はどこで、いつごろから効き始めているのか？

→ 指標としての鉛 (Pb):
- 金属量の低い領域では、s-process に sensitive

[Pb/Fe]

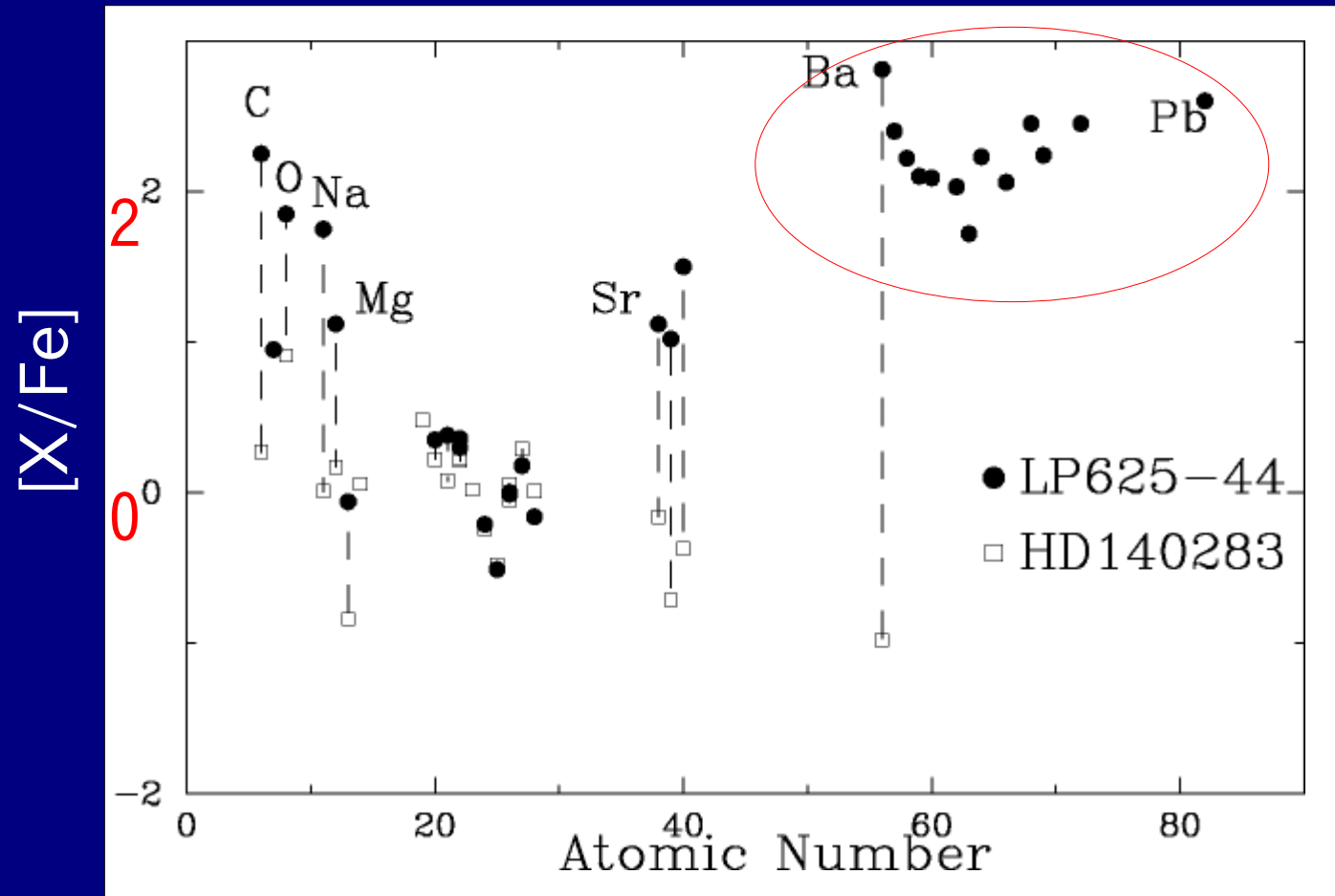


Travaglio et al. (2001)

問題点:r-/s-processでどの程度
Pbがつくられるか、よくわからない

- 太陽系組成からの制限
 - Pbの大半はs-process 起源とみられる
特に、金属量の低い AGB 星が重要らしい
 - r-process 成分は小さく、不定性大
(モデルから推測するくらいしかできない)
- s-process, r-process の卓越した低金属星の
組成からの制限

s-プロセス元素過剰のみられる 星の組成パターン

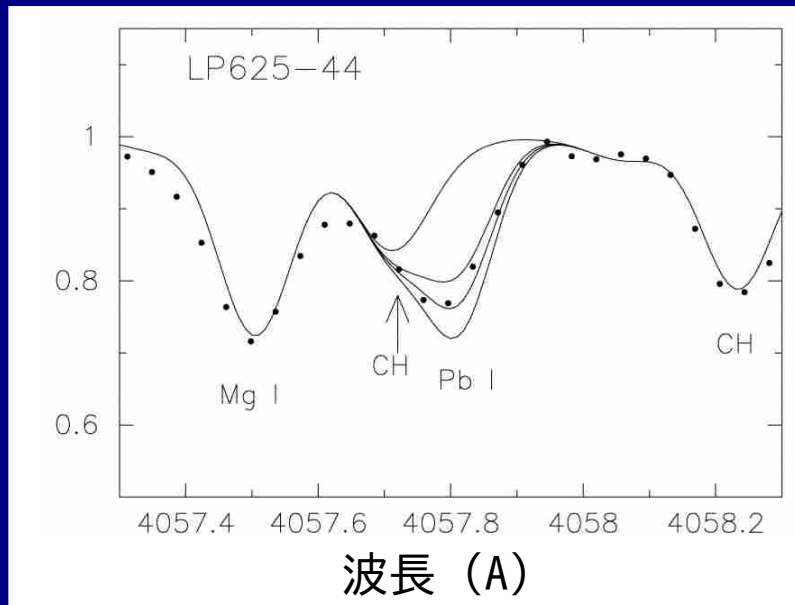


原子番号

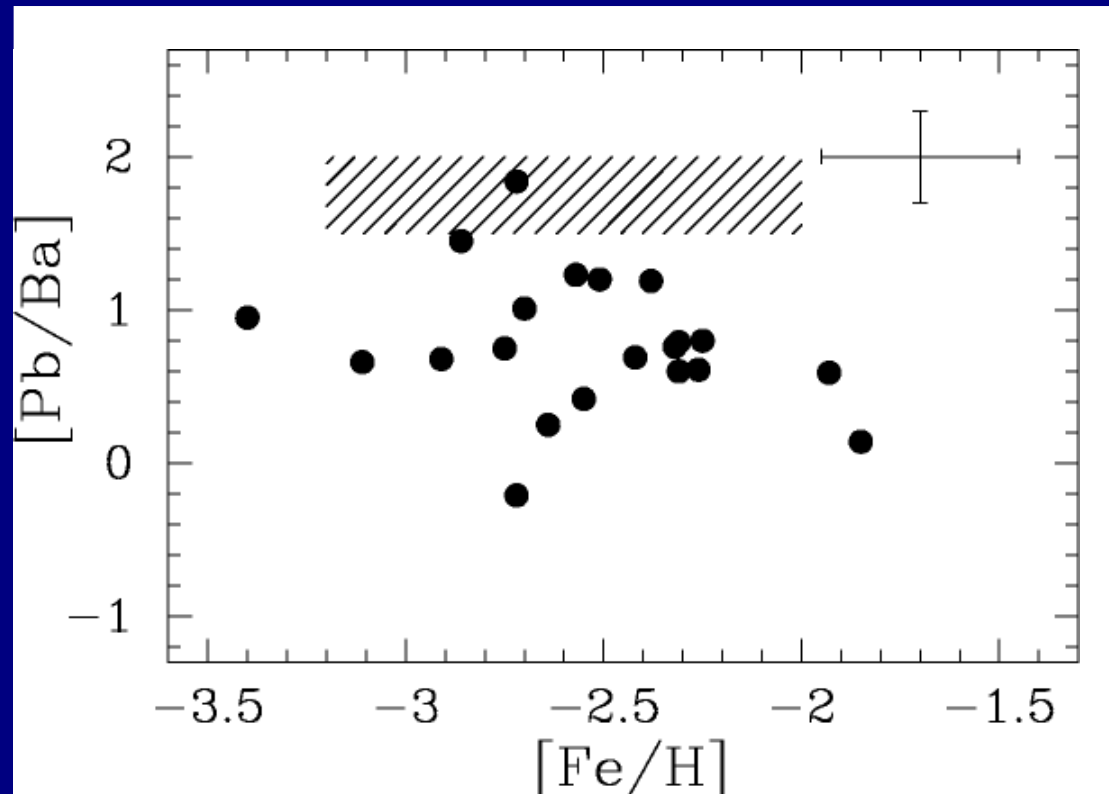
Aoki et al. (2002)

低金属量AGB星によるPb合成

- 鉛(^{208}Pb)はs-プロセス元素合成の終着点にあたる安定核
- s-プロセス過剰の金属欠乏星では2000年に初検出

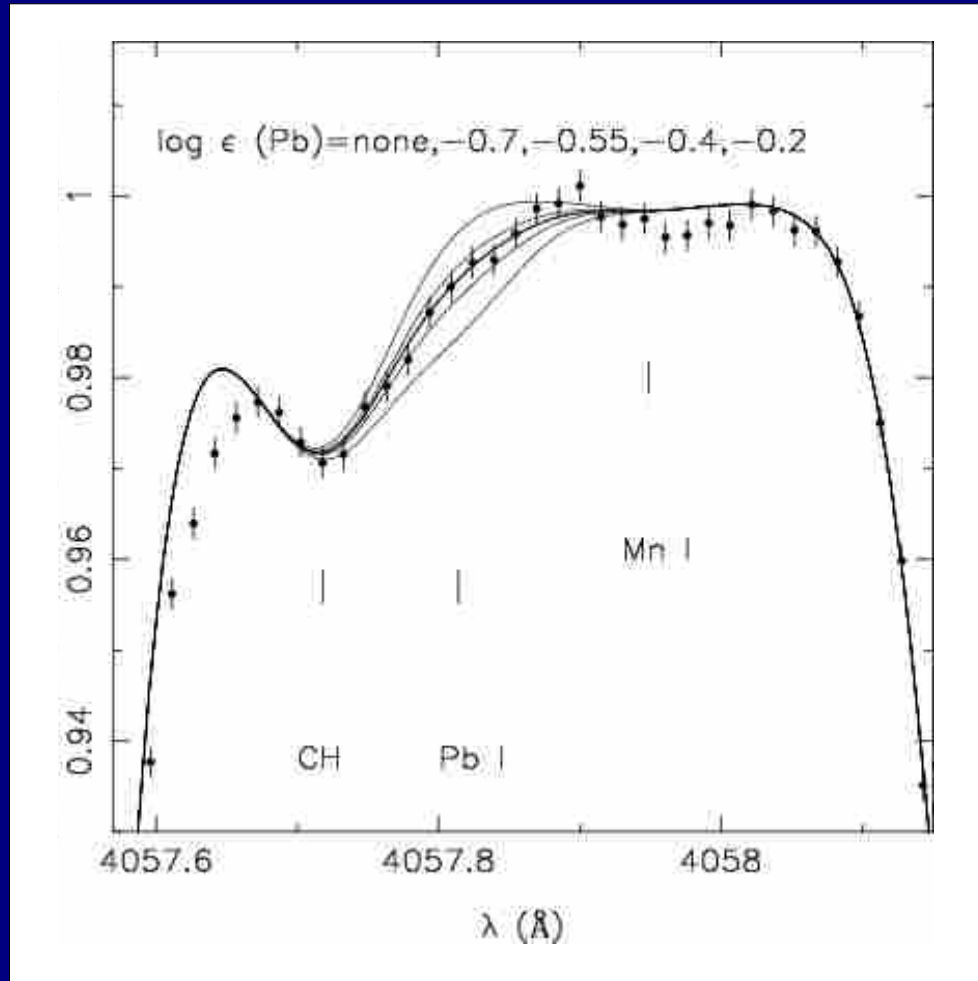


Aoki et al. (2000)



→標準的なモデルからは予測されない大きな組成比(Pb/Ba)のバラツキ・・・AGB星においてs-プロセスを制限しているものは?

r-process による鉛の合成 (謎だらけ)



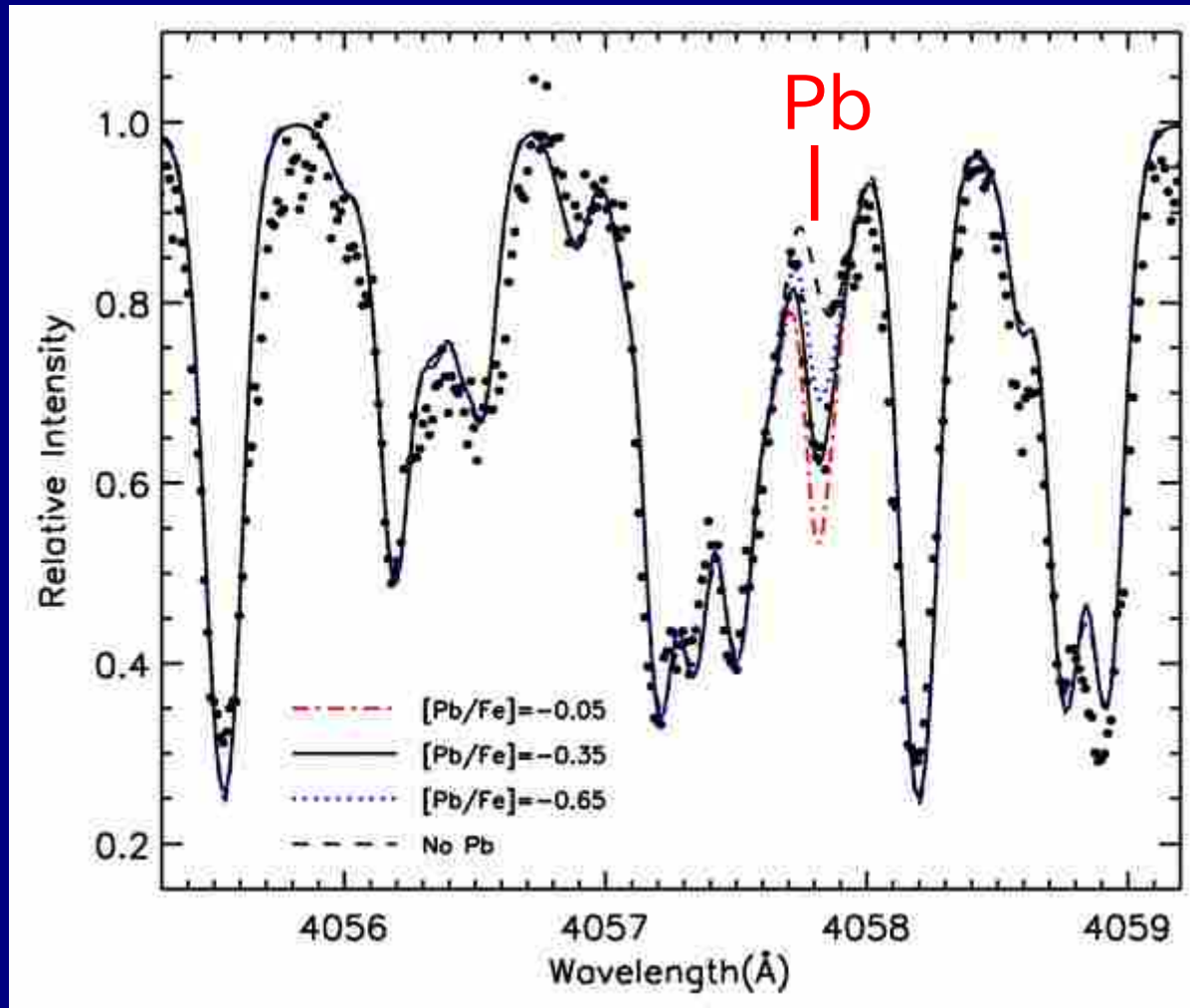
Plez et al. (2004)

r-process 元素の卓越
している星 CS31082-001
の鉛組成

→ 従来のモデルからの予
測よりかなり低い

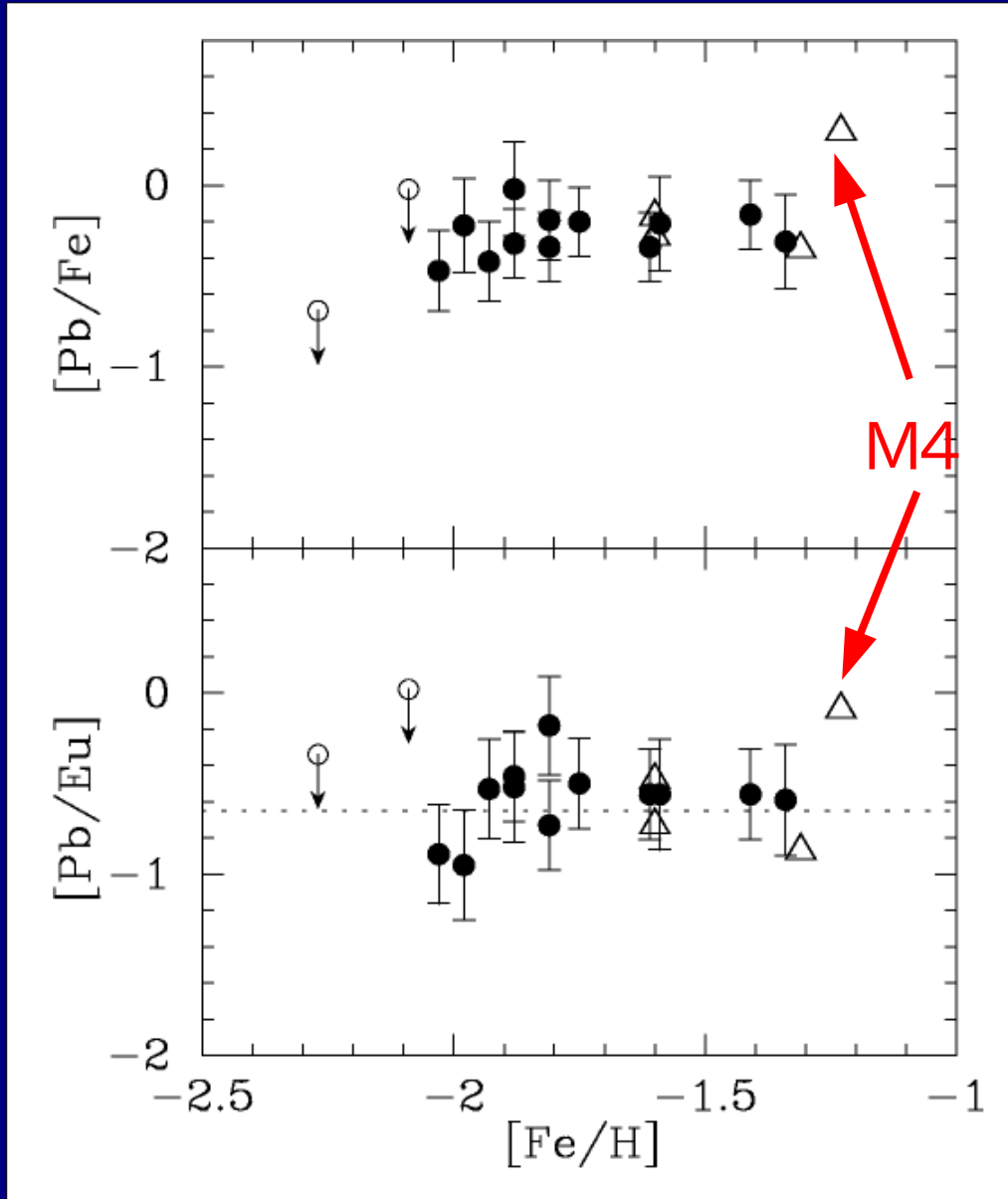
'cold r-process'
(Wanajo et al. 2007)
で説明可能か??

・・・という問題はあるが、とにかくPb組成を調べてみよう



Yong, Aoki et al. (2006) : 球状星団の星で測定
→低温星では、鉛の検出はさほど難しくない

銀河系ハロー／球状星団における鉛の蓄積



● *Aoki et al. (submitted)*

銀河系ハロー星では、
Pb/Fe、Pb/Euはほぼ一定

→s-process の寄与は
大きくない
(r-process によるPb 合成
への制限)

△ *Yong et al. (2006, 2008)*

球状星団M4ではs-process
の寄与がみられる

鉛(Pb)の合成過程と銀河系形成

- 太陽系のPbは主にs-process起源であり、低金属のAGB星が多くを担っていると見積もられている。
 - AGB星による Pb 合成は、連星に属する低金属星の観測から調べられている (→ AGB星モデルにはあまり合わない)
 - 超低金属星の観測から得られている r-process による Pb 合成は、従来のモデルに合わない。
-
- 銀河系ハローと球状星団における Pb 組成の変遷が最近調べられるようになってきている。ハローのPbは主に r-process 起源で、s-process の寄与は小さい
 - 短いタイムスケールでのハロー形成というシナリオを支持
 - thick/thin disk、inner/outer halo etc. は?
 - r-process での一般的な Pb 合成への制限

「銀河系考古学」の展望

星の化学組成・運動から銀河系・局所銀河群の構造形成をさぐる

WFMOS

wide-field, multi-object spectrograph

“Gemini” instrument designed for Subaru's prime focus

Operation: 2015??

