

# 炭素過剰超金属欠乏星 と宇宙初期における 星・連星系形成史

山田志真子（北海道大学）

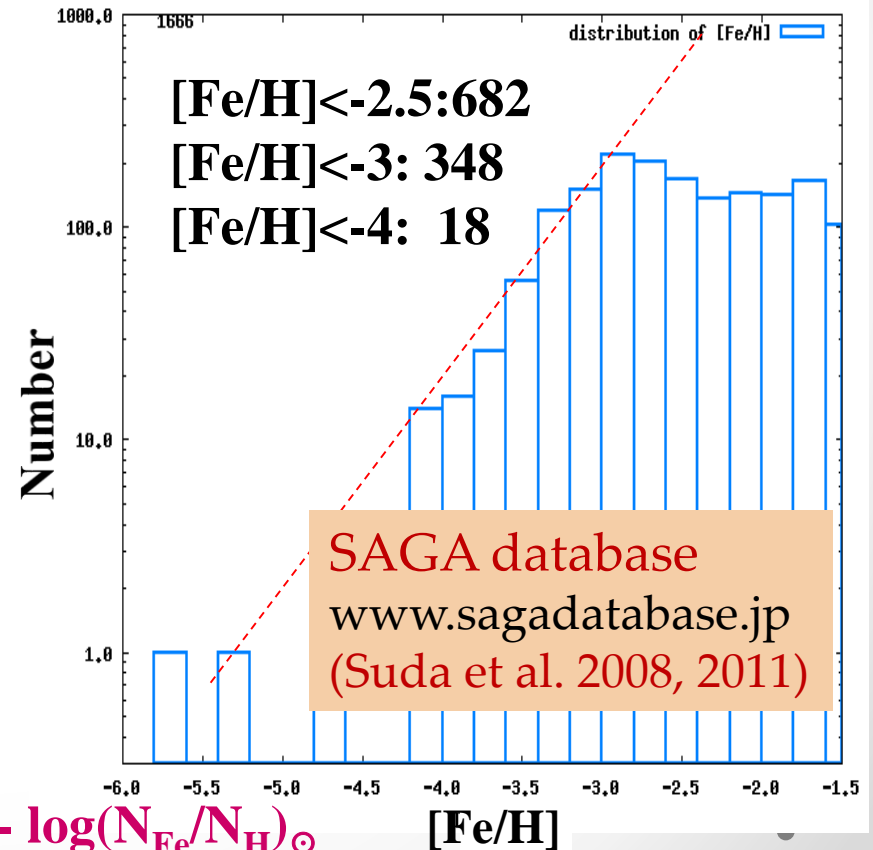
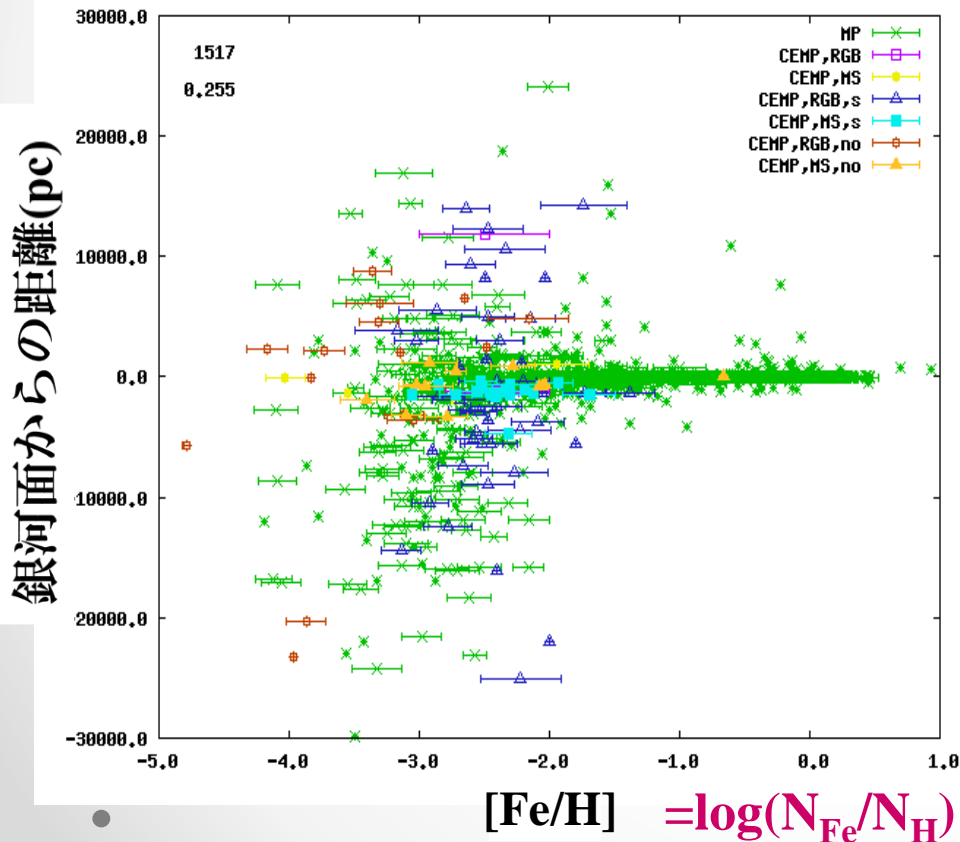
須田拓馬、小宮悠（東京大学RESCEU）

町田正博（九州大学）

藤本正行（北海学園、北海道大学）

# 銀河考古学 (Galactic Archeology)

銀河系ハローの超金属欠乏 (EMP) 星の表面組成等の解析を通して、銀河系の星形成史・化学進化を探る

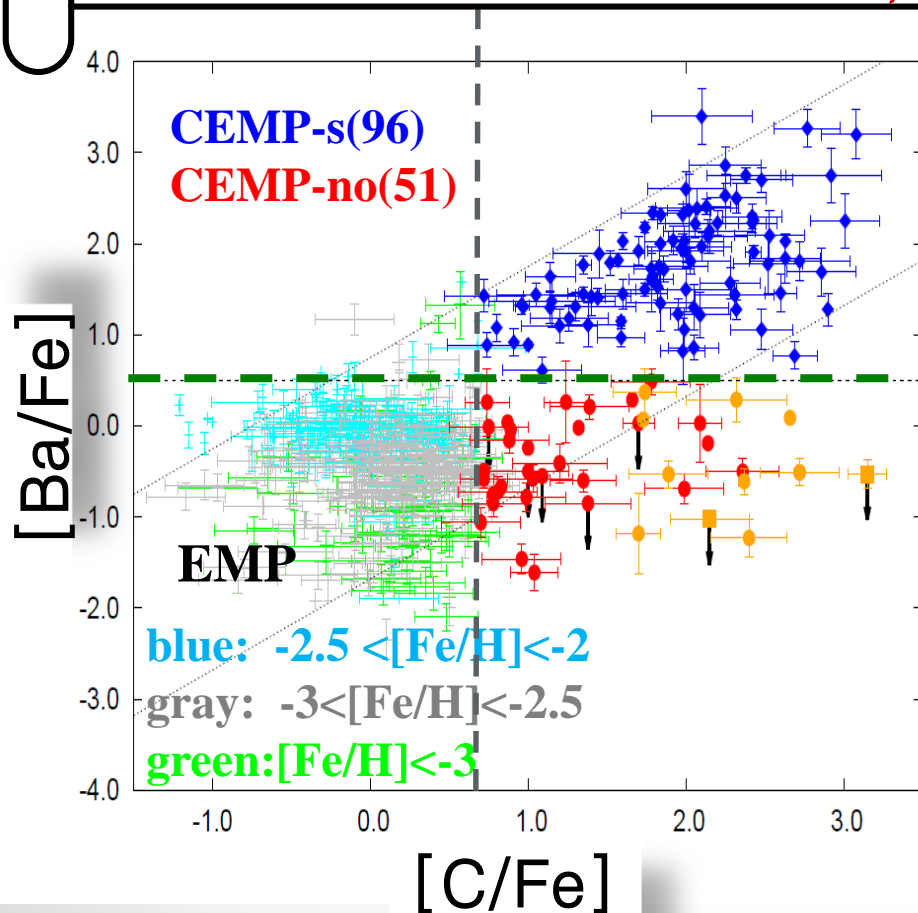


# 炭素過剰(CEMP)星

(Rossi+1999)

## 中性子捕獲重元素量の変動

Aoki, Norris + 2002, Aoki, Beers + 2007



CEMP stars:  $[C/Fe] > 0.7$

全EMP星の ~20-30%

Ba の組成で種別

(1) CEMP-s stars:

$[Ba/Fe] > 0.5$

⇒ AGB星での **s-process** 中性子捕獲元素が増強

(2) CEMP-no stars:

$[Ba/Fe] < 0.5$

⇒ Ba 組成は通常の金属欠乏 (EMP) 星と同じレベル

# CEMP-s vs. CEMP-no

Norris+ 2013, etc.

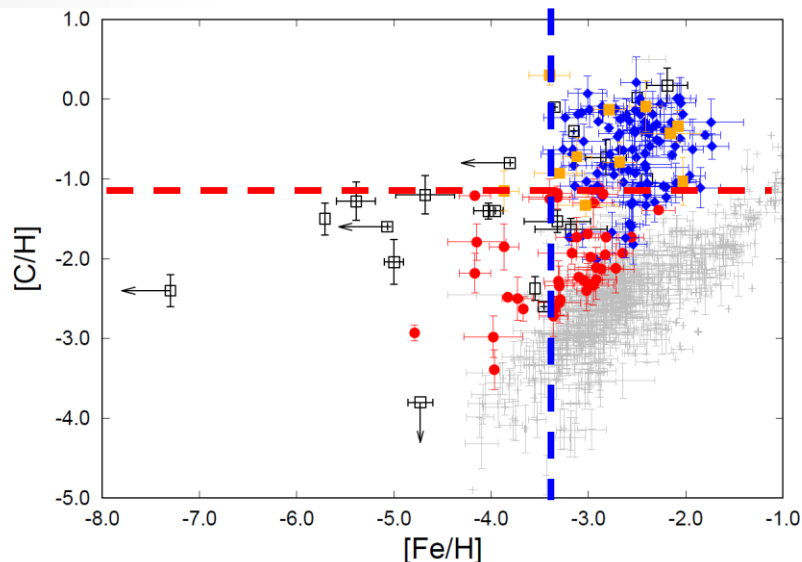
## I. 金属量[Fe/H]依存性:

### ○ CEMP-s stars:

[Fe/H] > -3.3にのみ観測

### ○ CEMP-no stars:

[Fe/H] ~ -5 ~ -2 で観測



## II. 連星系:

☆ CEMP-s stars: 殆ど全てが連星系に属する

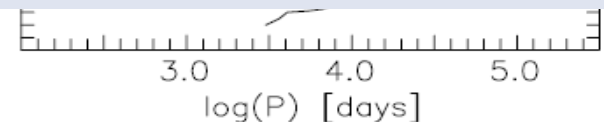
☆ CEMP-no stars: 軌道運動に依る速度変動が検出されず

binarity observed

## III. 炭素組成

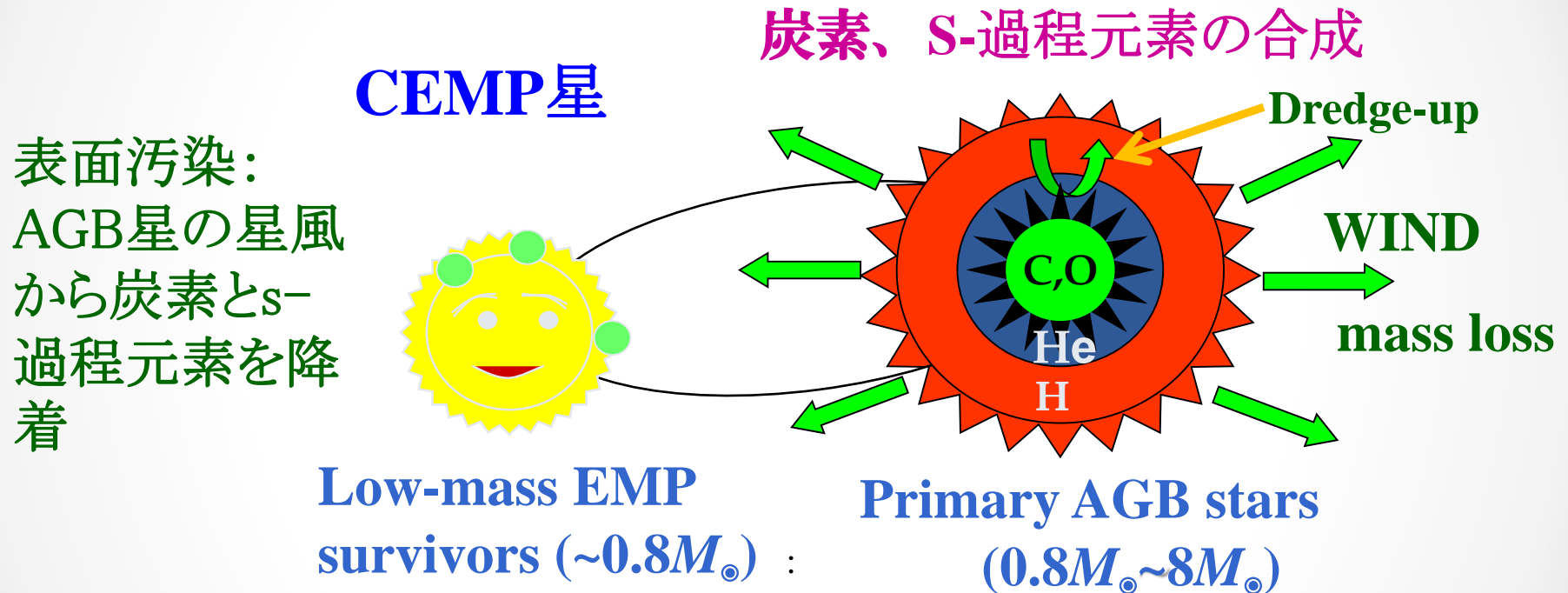
CEMP-s: [C/H] 大きい

Lo-CEMP-no: [C/H] 小さい



# CEMP stars の連星起源説

Suda et al. (2004), Komiya et al. (2007)



**AGB stars** = C and s-process 元素を生成  
へリウム 殻で燃焼 + 表面对流層による浚渫(dredge-up)

**CEMP stars** : AGB星からwind から降着:

CH stars (Pop. II) and Ba stars (Pop. I)と同様に。

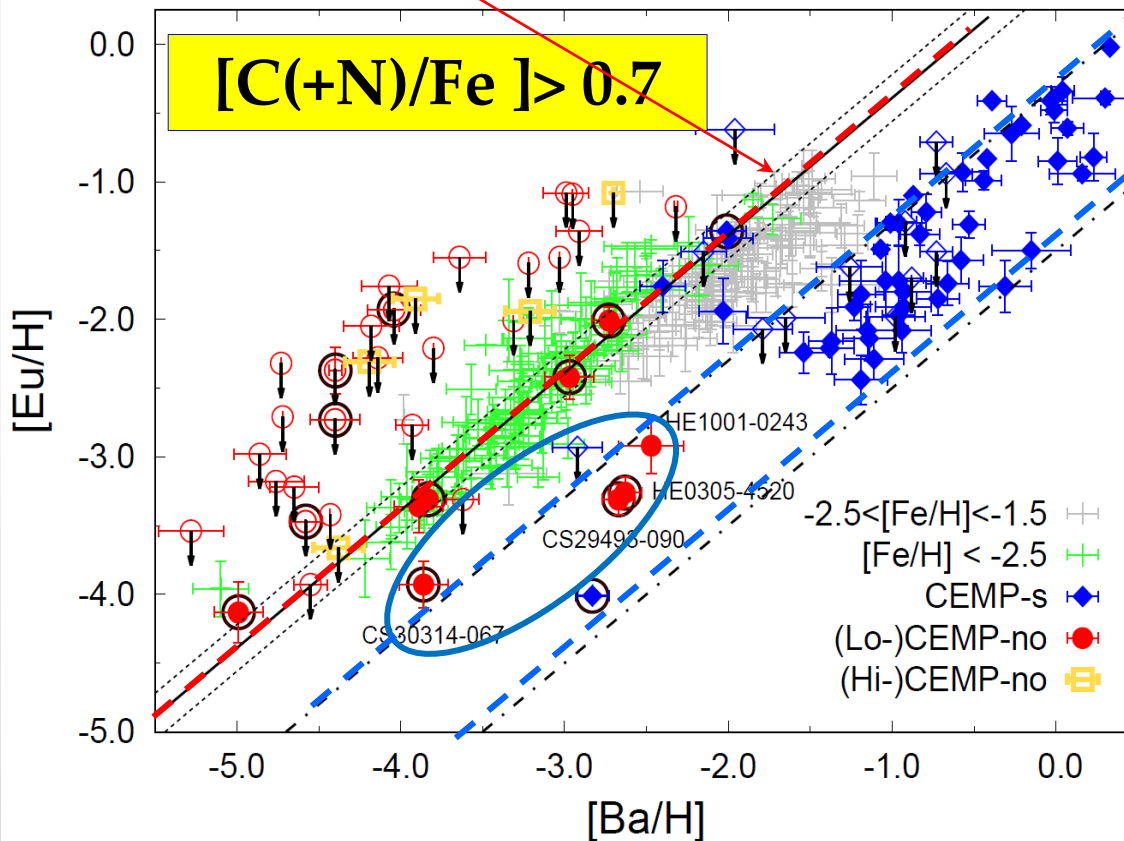
# 1. CEMP-no星の 連星系起源



# i) *s*-process vs. *r*-process

$[\text{Eu}/\text{Ba}] \cong 0.7$   
**r-process**

$-0.3 > [\text{Eu}/\text{Ba}] > -1.5$   
**s-process**



**CEMP-no:** Euの測定値持つ 4/9 stars は s-process 起源  
 $\Rightarrow$  連星系起源

**CEMP-s:** 3 stars は r-process 起源

# s-processの核種合成の特徴

AGB星の s-process 核種合成の効率  $\Leftrightarrow$   $[\text{Ba}/\text{Fe}/\text{C}] \equiv [\text{Ba}/\text{Fe}] - [\text{C}/\text{H}]$   
金属欠乏下 ( $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -2.5$ ) では、金属量 に依らない。

## CEMPの特徴

1. s-processの効率は大幅 (4ケタ)
2. 炭素組成も大きく変動 ( $[\text{C}/\text{H}]$ )  
 $\Rightarrow$  bimodal distri

### CEMP-s:

s-process の効率、炭素組成とも大  
( $[\text{Ba}/\text{Fe}/\text{C}] > 0.8$  &  $[\text{C}/\text{H}] \gtrsim 1$ )

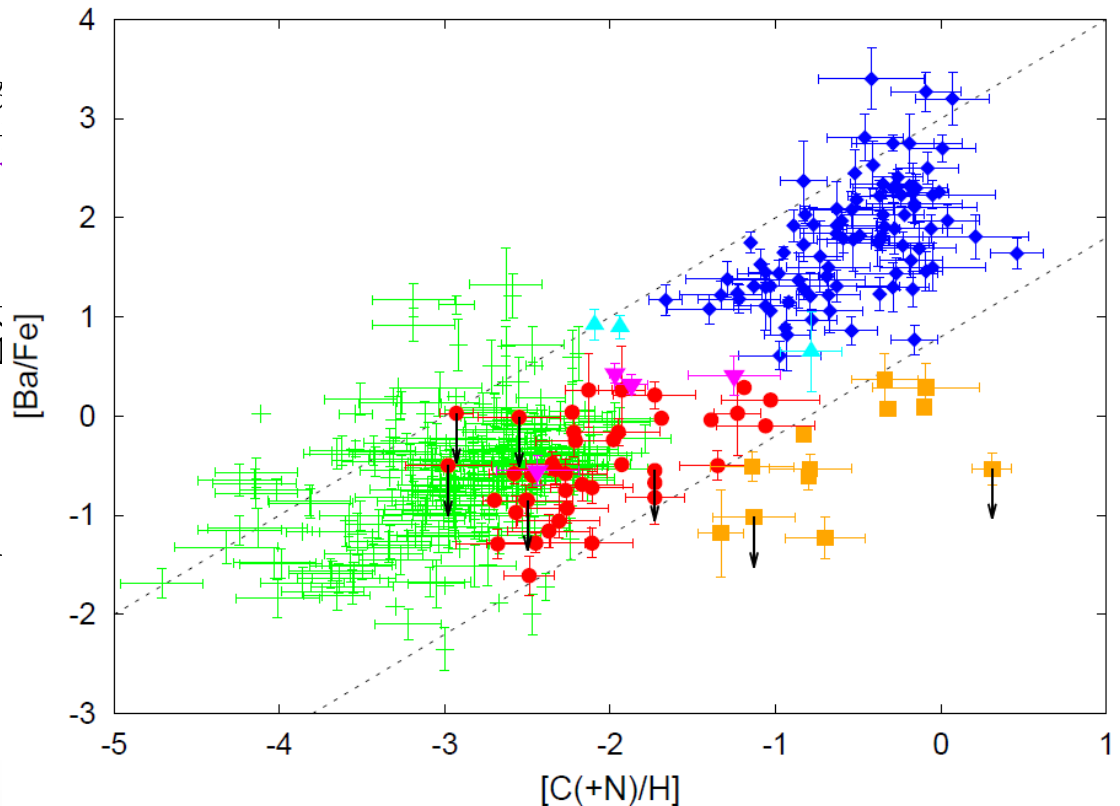
### CEMP-no:

#### Hi-CEMP-no:

s-process の効率が小さいが、  
炭素組成は大きい ( $[\text{C}/\text{H}] \gtrsim -1$ )

#### Lo-CEMP-no:

s-process の効率は大きいが、  
炭素組成は小さい

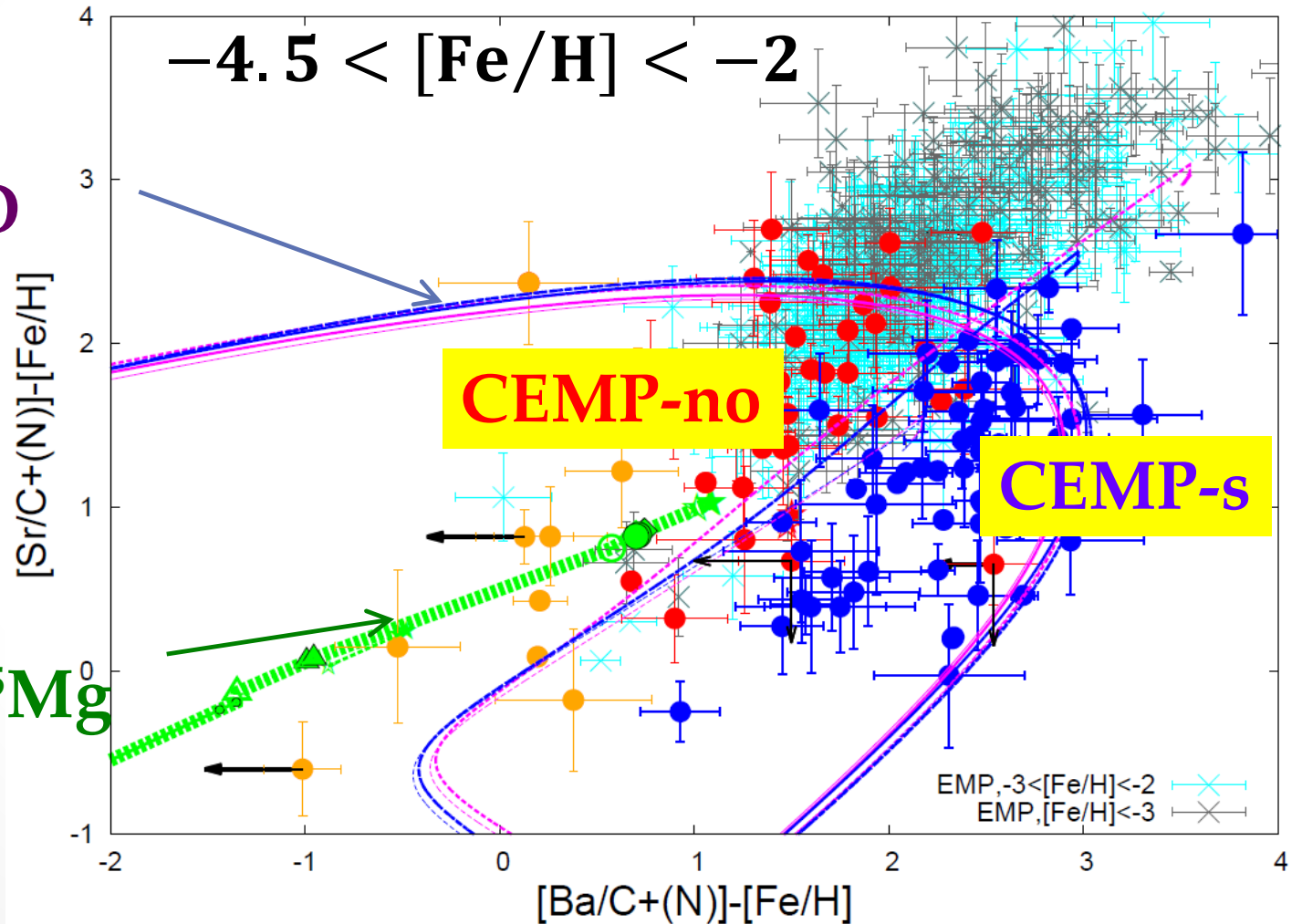




# モデル計算 vs. 観測

中性子源  
 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$

中性子源  
 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$



# s-processの核種合成の特徴

## AGB星の s-process 核種合成の効率

$$\Leftrightarrow [\text{Ba}/\text{Fe}/\text{C}] \equiv [\text{Ba}/\text{Fe}] - [\text{C}/\text{H}]$$

金属欠乏下 ( $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -2.5$ ) では、金属量に依らない。

## CEMPの特徴

1. s-processの効率は幅大きい(4ケタ以上)
2. 炭素組成も大きく変動 ( $[\text{C}/\text{H}] = 0 \sim -3$ )

$\Rightarrow$  bimodal distribution

## CEMP-s:

s-processの効率、炭素組成とも大きい  
( $[\text{Ba}/\text{Fe}/\text{C}] > 0.8$  &  $[\text{C}/\text{H}] \gtrsim 1.5$ )

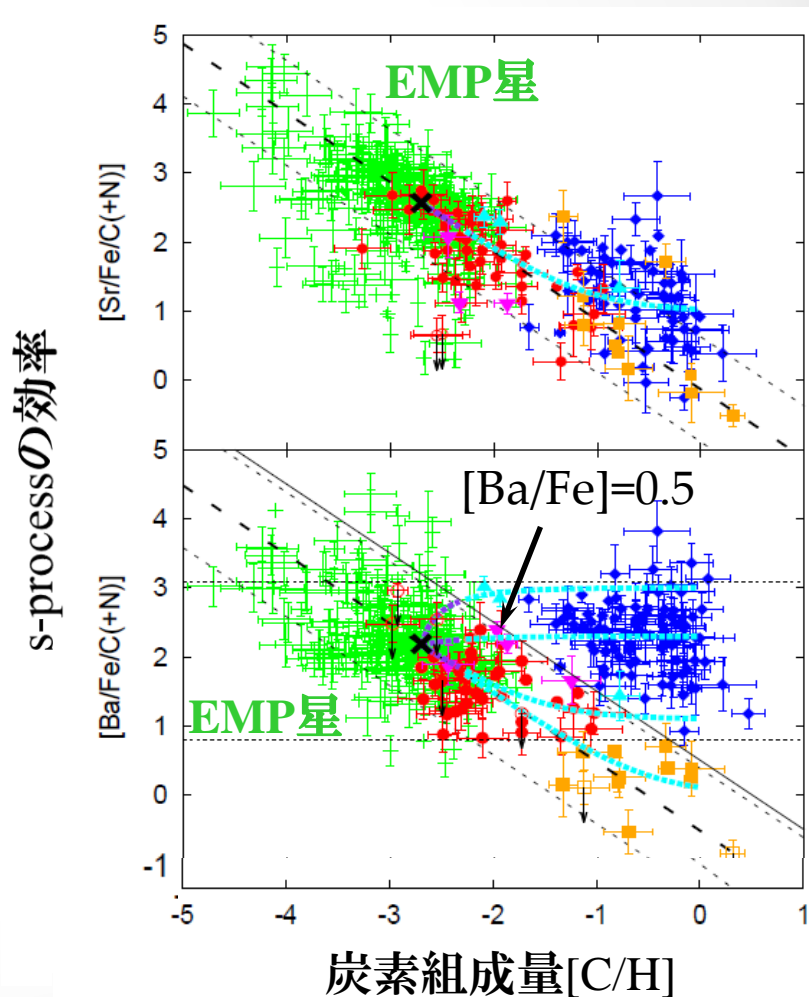
## CEMP-no:

### Hi-CEMP-no:

s-processの効率が小さいが、  
炭素組成は大きい ( $[\text{C}/\text{H}] \gtrsim -1.5$ )

### Lo-CEMP-no:

s-processの効率は大きいが、  
炭素組成は小さい



# s-process 元素

Lo-CEMP starsの組成:

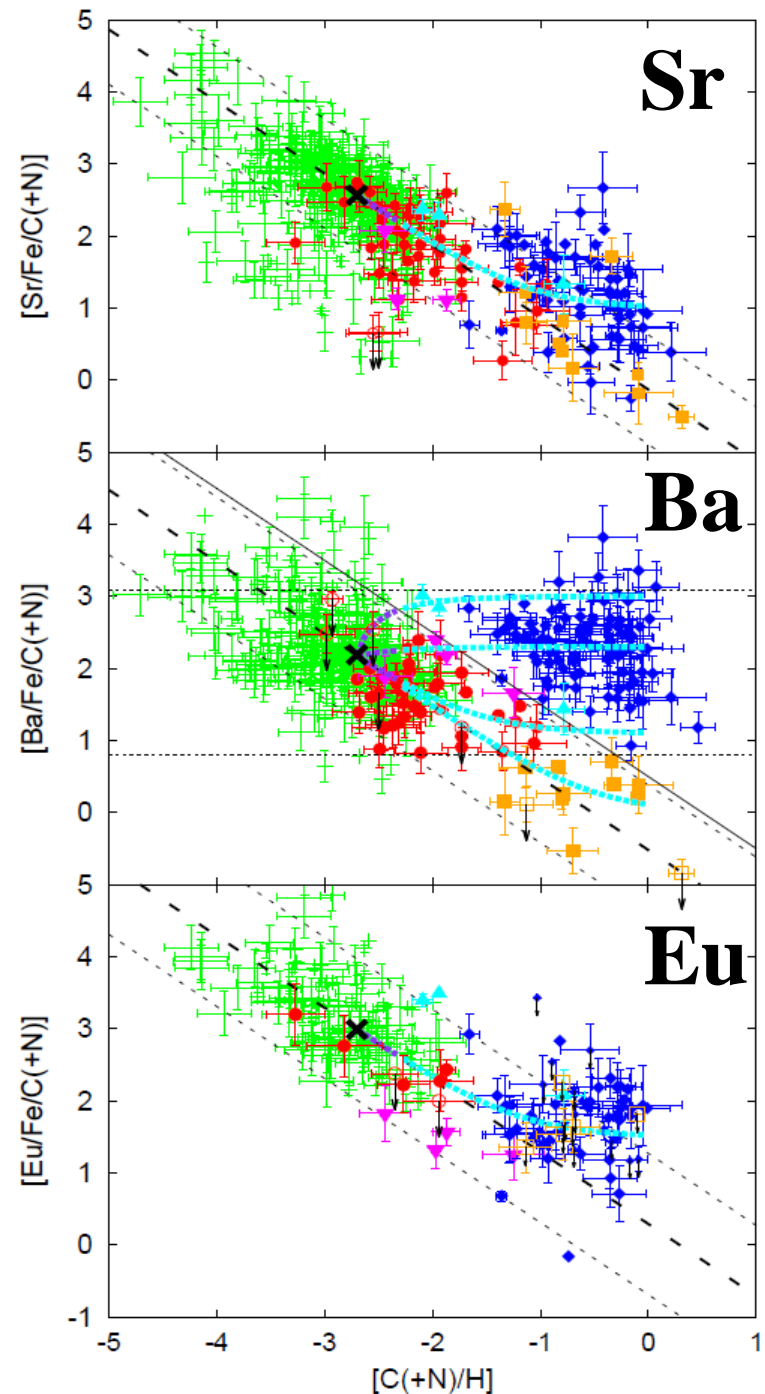
EMP星の組成(= CEMP星の形成時の組成)と異なる

⇒ 炭素の増加は s-process 元素の増加を伴う = **連星系起源**

[Ba/Fe]: flat な分布 (両側に突出し)

[Sr/Fe],[Eu/Fe]: 小さい側のみ突出し

⇒ 違いは、s-process の効率と EMP組成の違いの差



## 2. 炭素組成 $\Rightarrow$ 母連星の 二峰性周期(軌道)分布

# 初期周期分布

**Lo-CEMP-no** &  
**CEMP-s** : Bi-modal  
distribution of [C/H]



Bi-modal distribution  
of **binary separation**

仮定:

(1) Log normal  
distribution

(2) Bondi Accretion

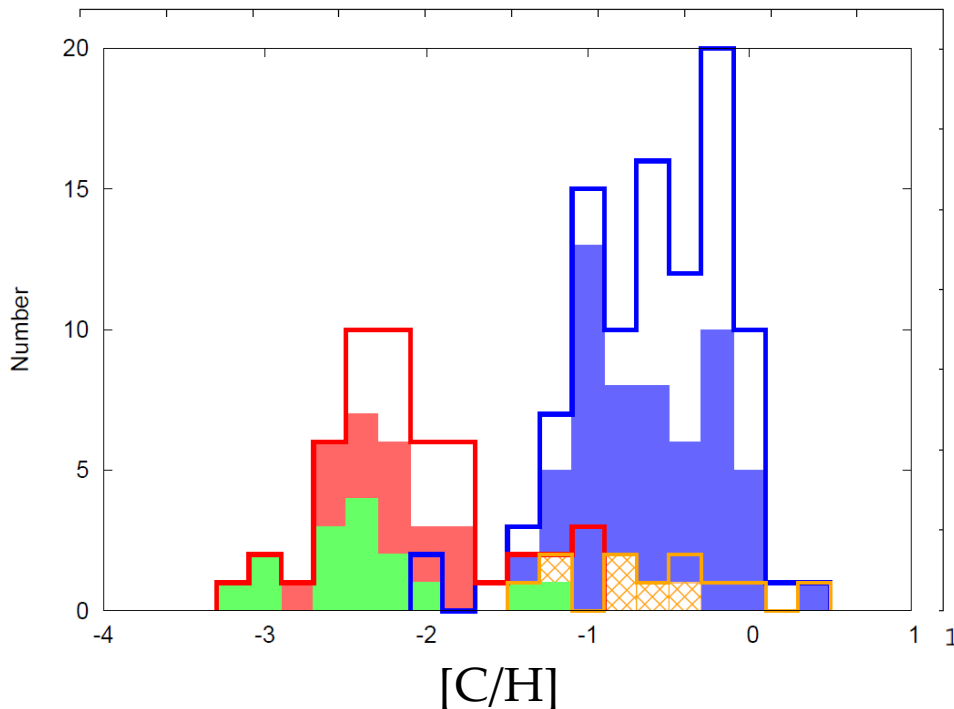
$$\frac{dM_2(t)}{dt} = - \frac{G^2 M_2^2(t)}{A(t)^2 v_{\text{rel}}^4(t)} \frac{v_{\text{rel}}(t)}{v_{\text{wind}}} \frac{dM_1(t)}{dt}$$

(3) Wind:

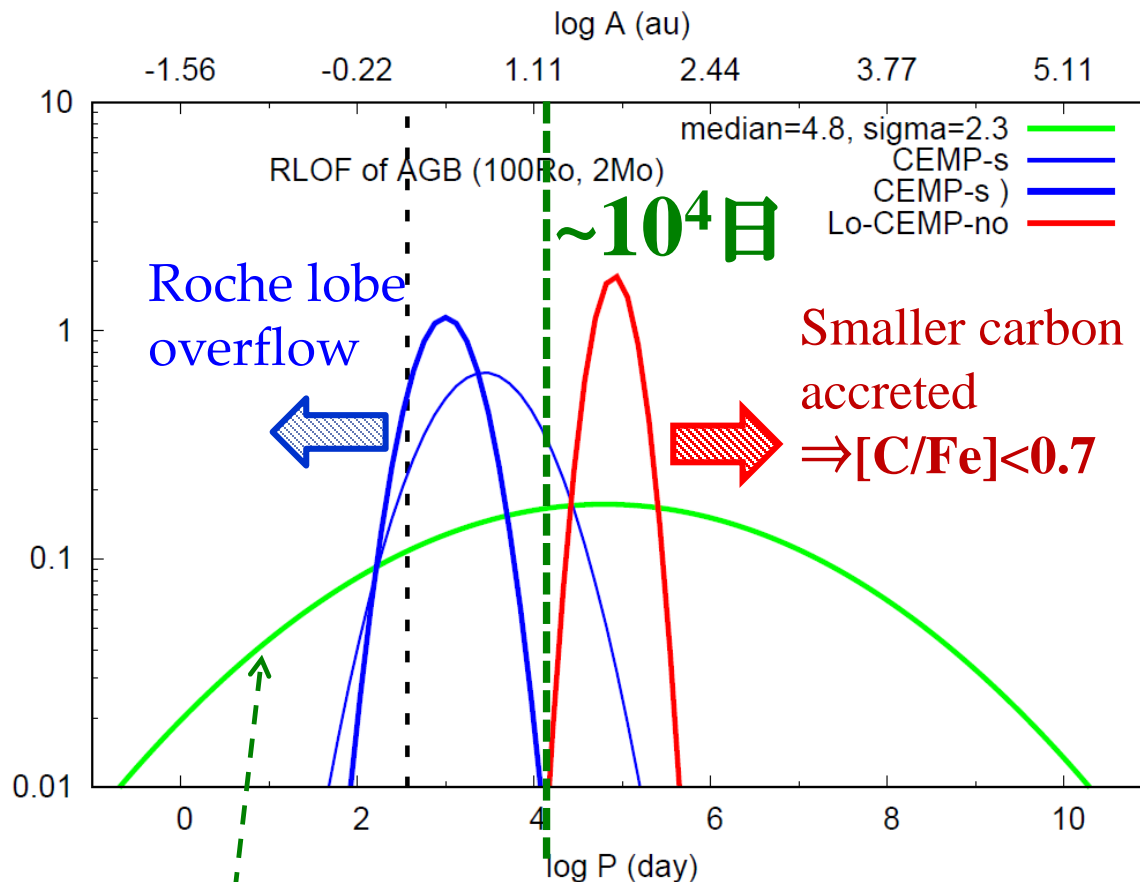
[C/H]=0

$v_{\text{wind}} = 20 \text{ km s}^{-1}$

(4) 混合層の深さ(Giants  
に限定) =  $0.2M_{\odot}$



# 二峰性分布



## 軌道パラメータ

### CEMP-s:

median = 3.44  
(3.0) (unit day),  
sigma = 0.61  
(0.35)

### Lo CEMP-no:

median = 4.91,  
sigma = 0.23  
**Both [Fe/H] > -3.3  
and < -3.3**

**Cf. Solar neighborhood** (Duquennoy & Mayer 1991)

# 観測との比較

CEMP-s:

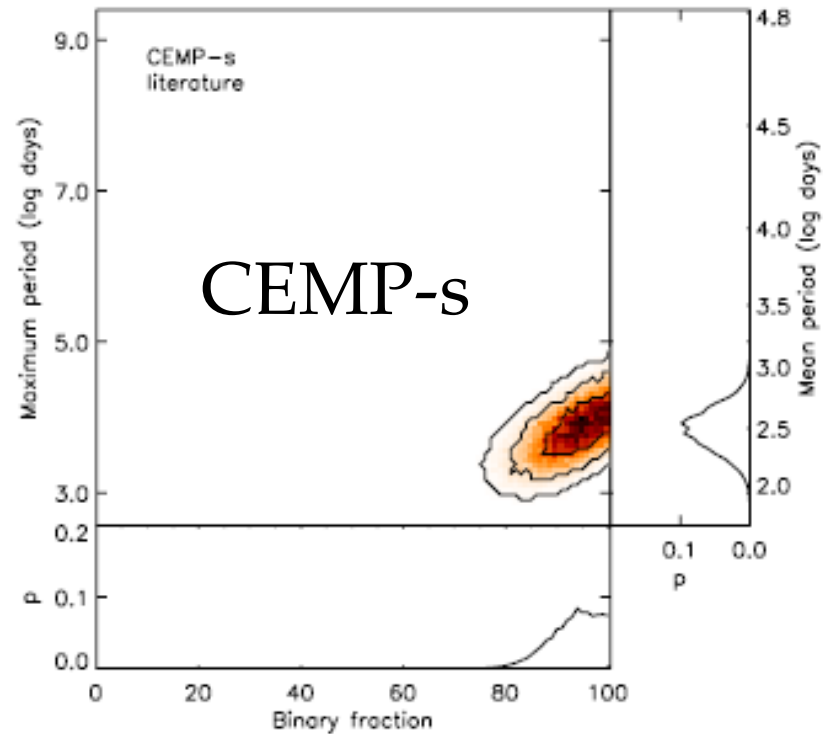
$$\text{Log } P_{\text{mean}} = 2.5$$

(Starkenburg+14)

⇔ 質量輸送後

→ Wind との相互作用で軌道半径が収縮する

Binary fraction: ~100%



Hi-CEMP-no: CEMP-s とほぼ同じ周期 (Hansen+2016)

Lo-CEMP-no: no radial velocity variations

⇔ 長周期 ( $>10^4$  日)

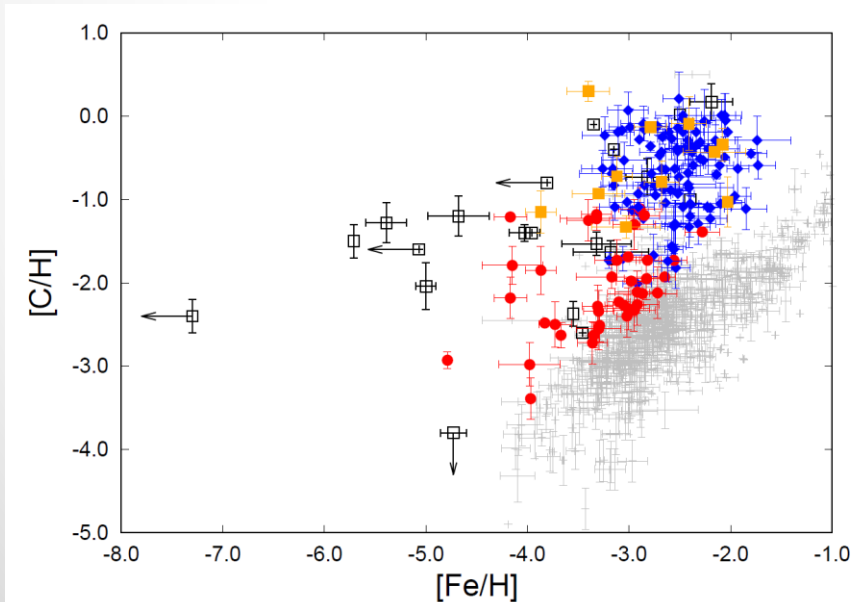
# 3. 宇宙初期の連星系の特性とその形成史



# CEMP 星の金属量分布

CEMP-s:  $[\text{Fe}/\text{H}] > -3.3$  でのみ観測

$\Rightarrow [\text{Fe}/\text{H}] < -3.3$  では、close binaries ( $P < 10^4\text{d}$ ) は存在しない ( $\leftarrow$  s-process の金属量に依らない)。



**Lo-CEMP-s:**  $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -5$   
(Ba の観測限界) から  
 $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -2$  (CEMPになる  
限界) まで観測

$\Rightarrow$  wide binaries ( $P > 10^4\text{d}$ )  
は金属量に依らず存在

# 連星系の形成史

**wide** binaries のみ形成



$[Fe/H] \approx -3.3:$

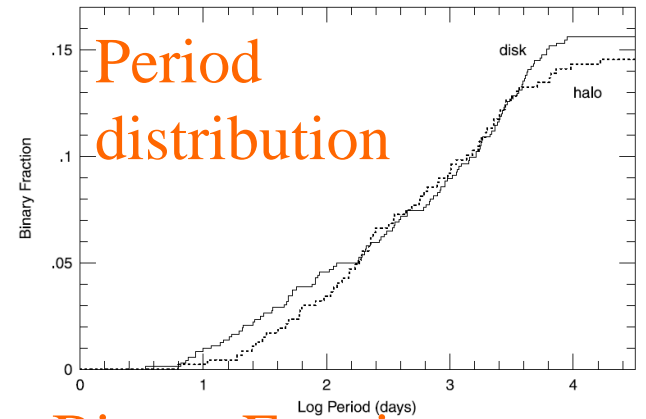
**wide** と **close** binary とも形成



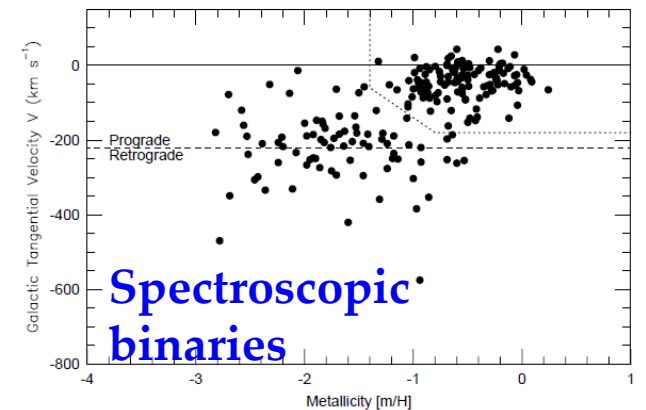
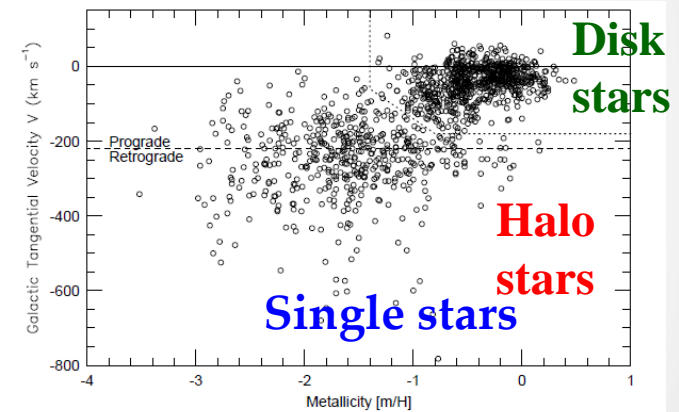
$[Fe/H] > -3:$

No obvious change between the Halo & Disk stars **Lathan + (2002)**

連星形成の  
金属量依存



Binary Fraction



# 4. 連星系の形成機構

# Present-day binaries の形成機構

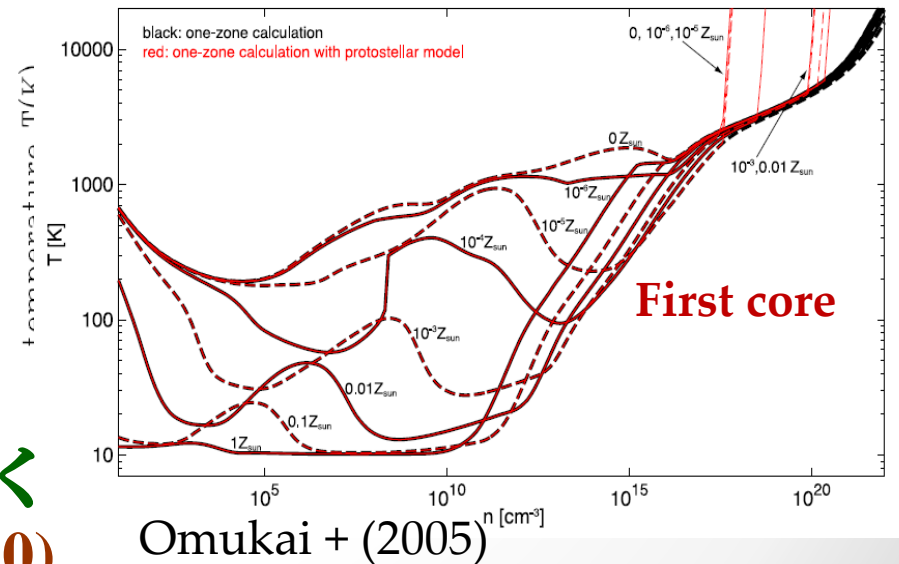
1. 乱流の支配するガスコアやフィラメントの大規模な分裂 (**wide binaries**)
2. 原始星の星周の質量の大きい円盤の重力不安定による分裂 (**close binaries**)

## 金属量依存性

⇒ first core の形成  
ダストの吸収による冷却  
[Fe/H] = -4 ~ -3 の間で効く

Machida et al. (2010),

Machida & Nakamura (2015)

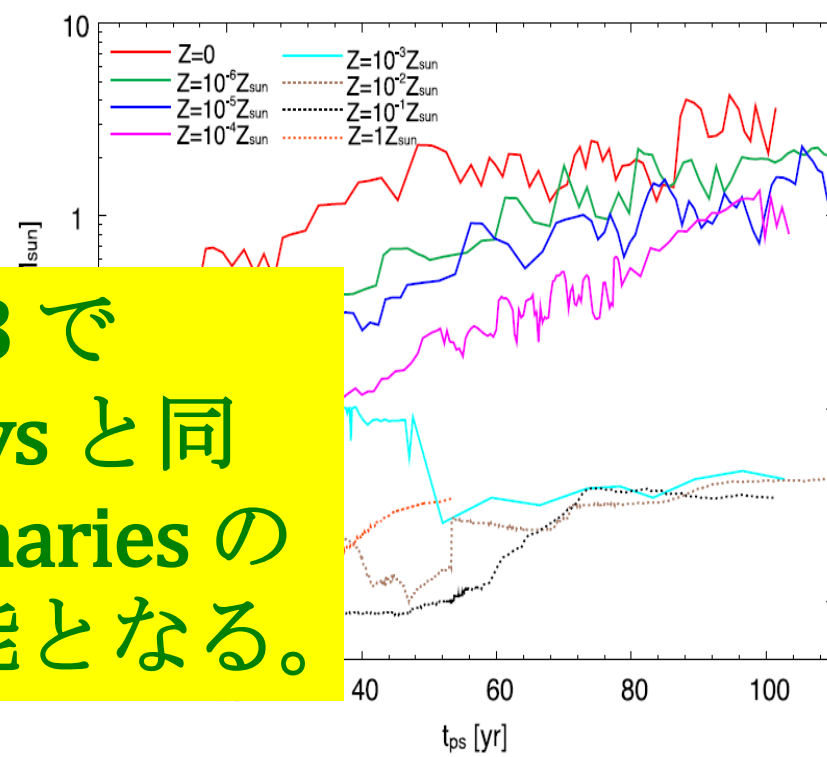
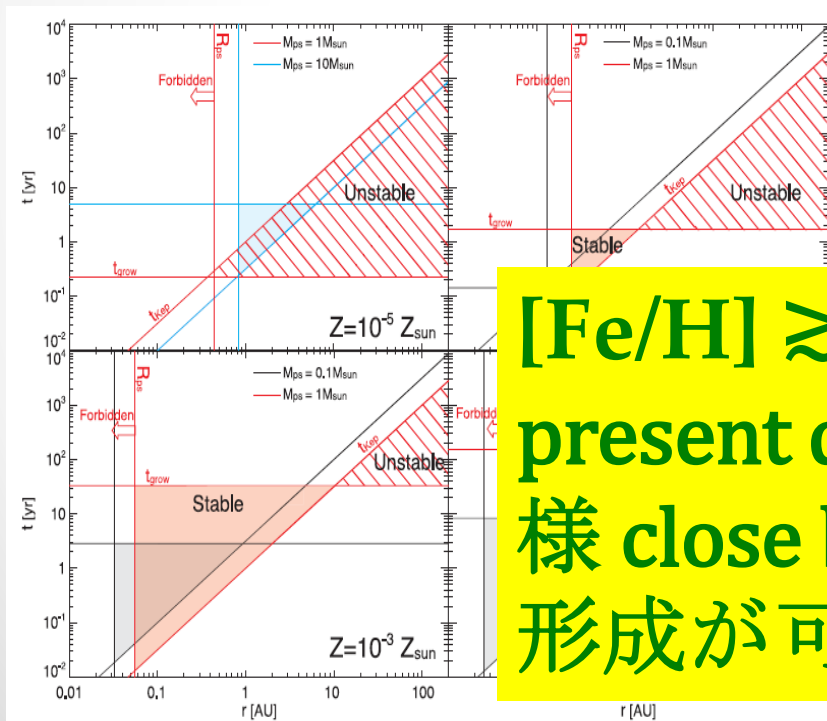


# 原始星の星周構造と質量

Machida & Nakamura (2015)

[Fe/H]  $\geq -3$  で  
安定な星周円盤の形成

最も massive な原始星の質量  
[Fe/H]  $\sim -4$  と  $-3$  で大きく違う



[Fe/H]  $\geq -3$  で  
present days と同  
様 close binaries の  
形成が可能となる。

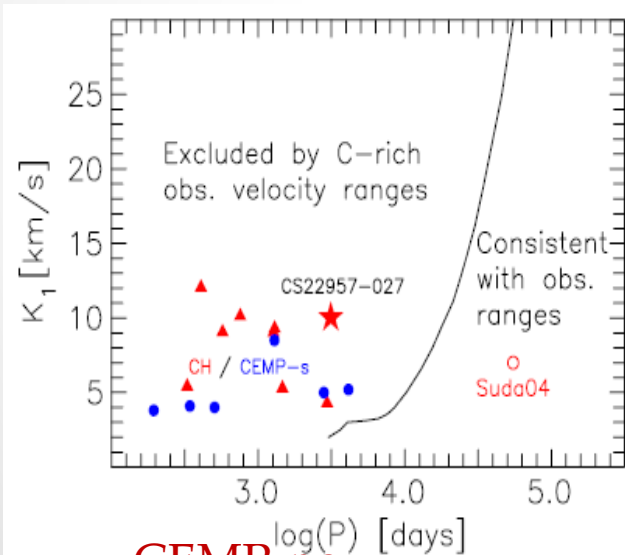
# まとめ

1. 炭素過剰金属欠乏(CEMP)星の炭素と中性子捕獲重元素の変動は連星系でAGB星からの質量輸送によって説明できる。
2. CEMP星の s-process の効率が4ケタ以上に及ぶ  
s-process in EMP, AGB stars
  - 対流  $^{13}\text{C}$  燃焼: ヘリウム殻flash時発生する対流に水素が取り込まれることによって起きる (低質量 AGB 星:  $M < 3.5 M_{\odot}$ )
  - 対流  $^{22}\text{Ne}$  燃焼: 高温度 ( $\log T \approx 8.5$ ) に達するヘリウム殻flashの対流層で(AGB 星:  $M > 3.5 M_{\odot}$ )
  - CEMP-s stars : 主星は低質量 AGB 星:  $M < 3 M_{\odot}$
  - Lo-CEMP-no stars: 主星は低質量 AGB 星:  $M \gtrsim 3 M_{\odot}$
3. CEMP星の炭素組成は3桁以上に及ぶ  
連星の軌道半径・周期のbi-modal 分布 (主星の質量の違い)
  - **CEMP-s stars** : close binaries ( $P < 10^4\text{d}$ )
  - **Lo-CEMP-no stars**: wide binaries ( $P > 10^4\text{d}$ )
4. 連星系の形成史:
  - **wide binaries**: 金属量に依らず形成
  - **close binaries**:  $[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -3.3$  で出現  $\Rightarrow$  現在 と同様の連星形成

# 連星系周期の観測

Radial velocity の  
変動の観測

⇒ 高分散分光



CEMP-no,

HE0107-5240 :  $V=15.2$  mag,  $T_{\text{eff}}=5100$  K ( $[\text{Fe}/\text{H}]=-5.3$ )

HE1327-2326:  $V=13.5$  mag,  $T_{\text{eff}}=6180$  K ( $[\text{Fe}/\text{H}]=-5.6$ )

