



初期銀河ハロー質量関数と 炭素過剰超金属欠乏星

小宮 悠 (北海道大学)

共同研究者

須田拓馬、藤本正行 (北海道大学)

茂山俊和、皆口裕樹 (東京大学)

青木和光 (国立天文台)



概要

- ◆ 超金属欠乏星(EMP star)
 - 銀河の初期を知る手がかり
 - 小質量星しか残っていない
- ◆ 炭素過剰超金属欠乏星(CEMP star)
 - 中質量星との連星だったと考えられる
 - 銀河初期の中質量星のprobe

•そのために...

– 中質量EMP starの進化計算

– EMP starの観測との比較

• 連星起源説の検証

• 初期ハローIMFの推定

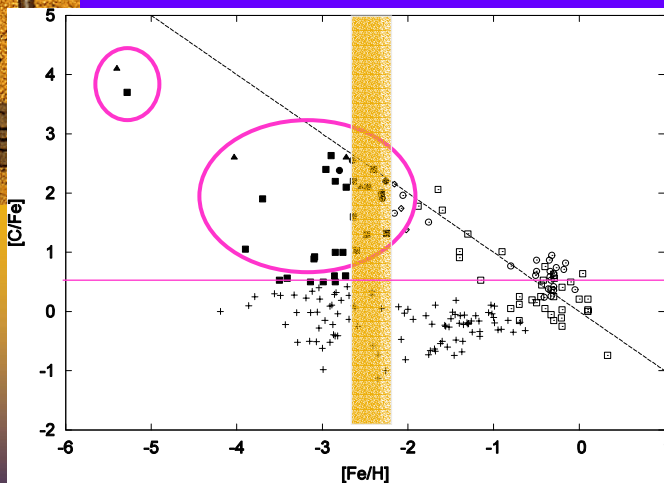


目次

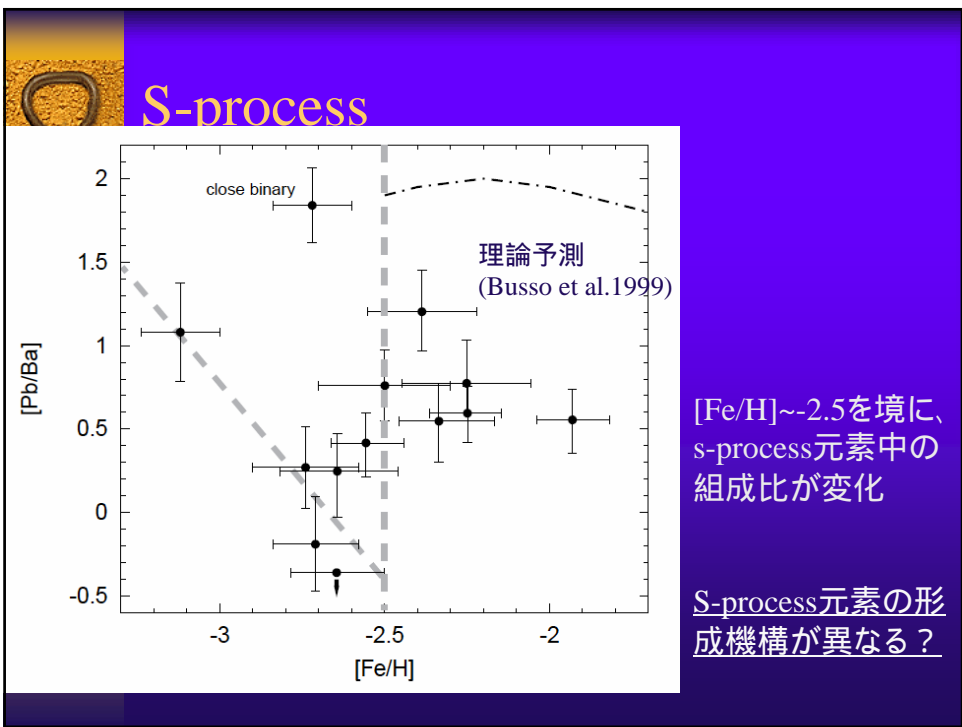
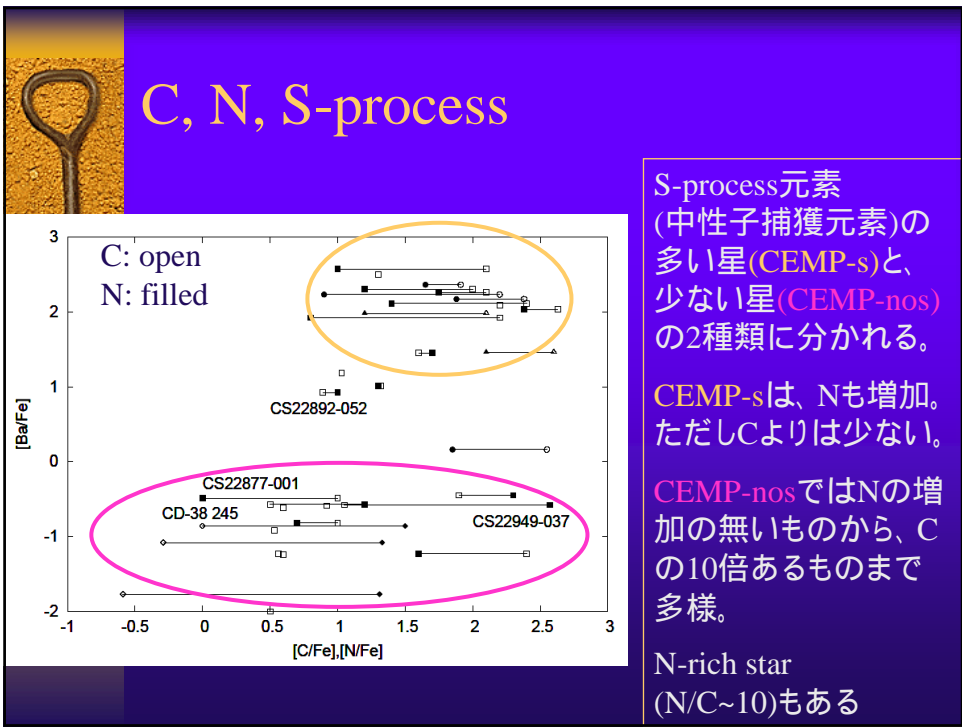
- ◆ CEMP starsのBinary Scenario
 1. CEMP stars、EMP starsの観測的特徴
 2. 超金属欠乏星の進化
 3. 比較・検証
- ◆ CEMP starsが描く初期銀河ハロー
 1. CEMP starsの統計
 2. 初期ハローIMFの推定
 3. 銀河ハローの進化

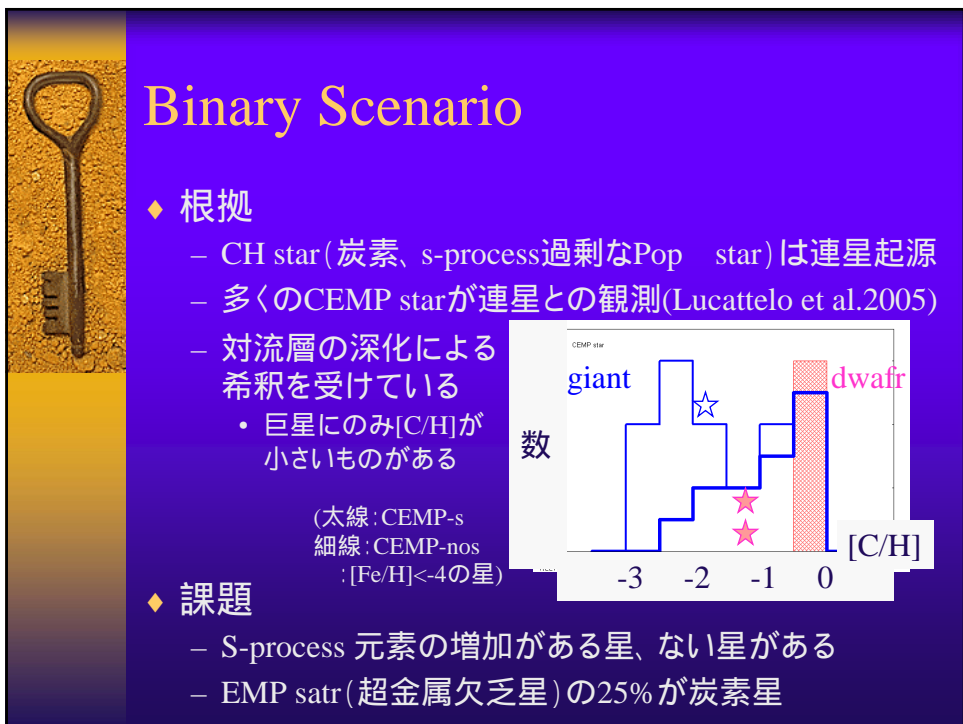
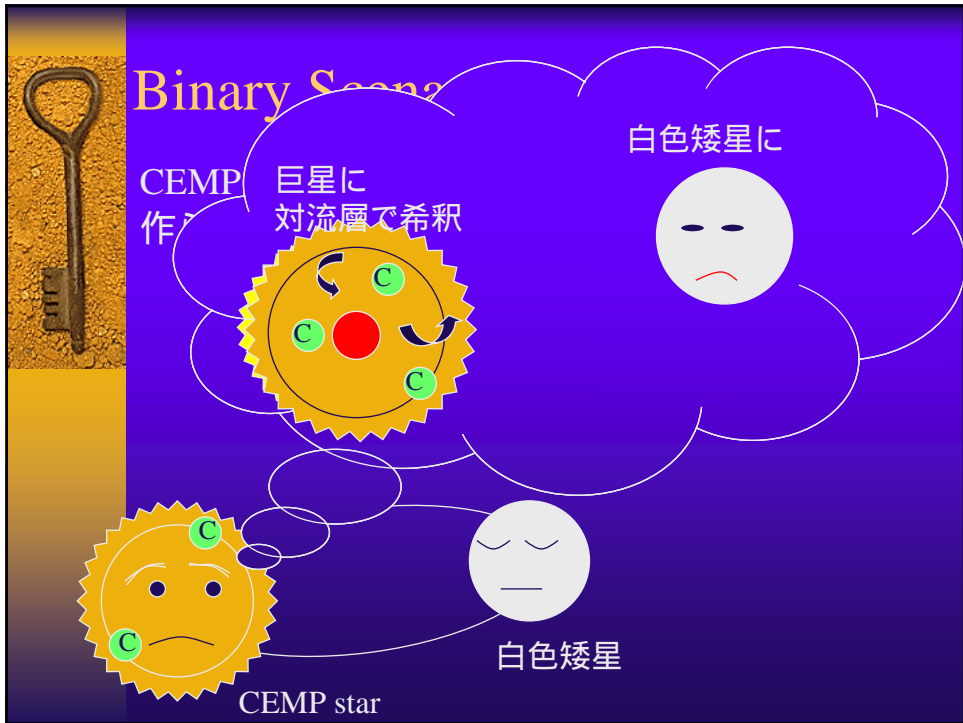


CEMP stars (炭素過剰超金属欠乏星)



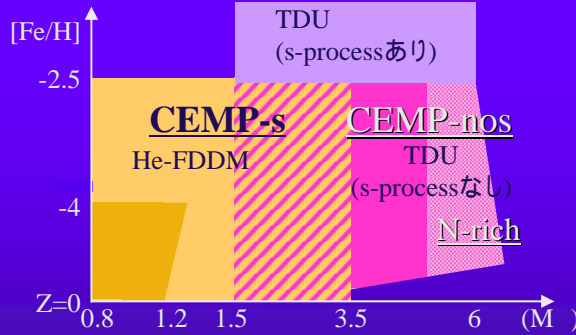
超金属欠乏星 ([Fe/H] < -2.5)は、進化していない星でも**炭素星**が多い。







EMP star の進化



0.8~3.5M の星 CEMP-s

- ◇ He-FDDMでC,Nとs-process元素が増加
- ◇ 1.5~3.5M ではTDUも発生してさらに炭素増加

3.5~6M の星 CEMP-nos

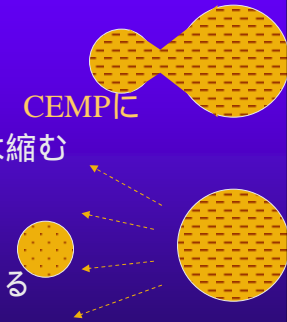
- ◇ Third Dredge UpでCのみ増加s-process元素は作られない
- ◇ 5M 以上では対流層でCNサイクルが回ってNが増加、C減少

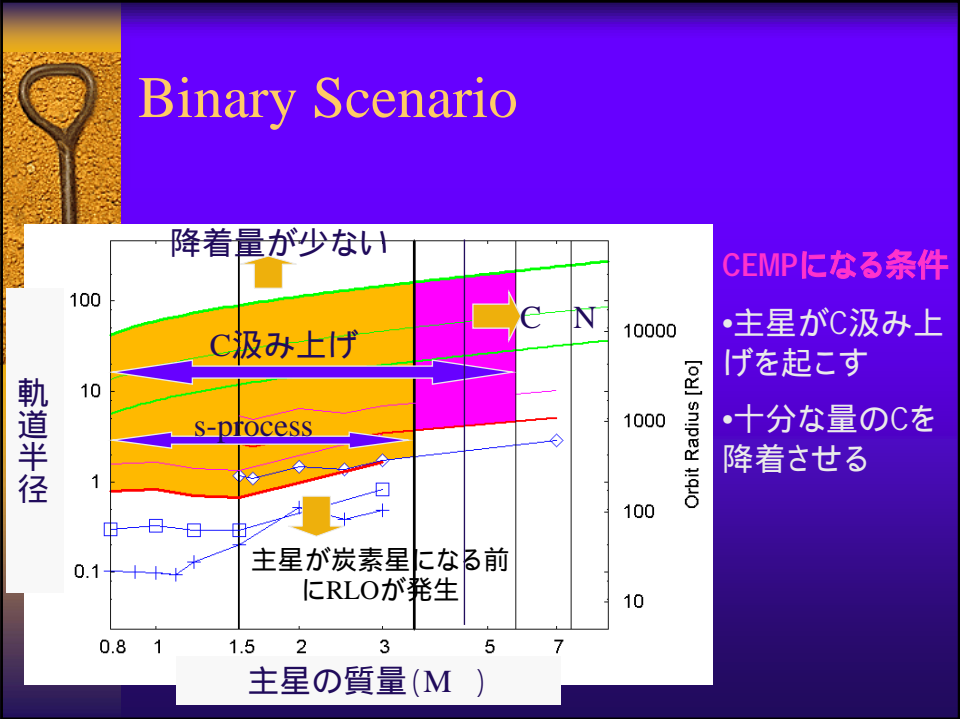
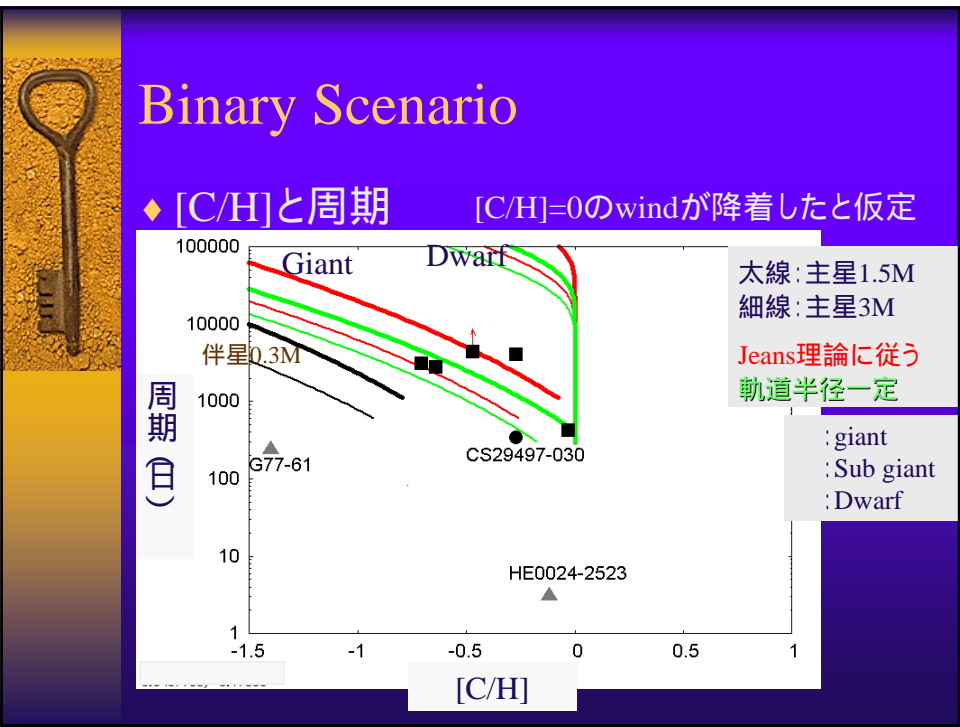


連星進化

主星との距離に依る進化の違い

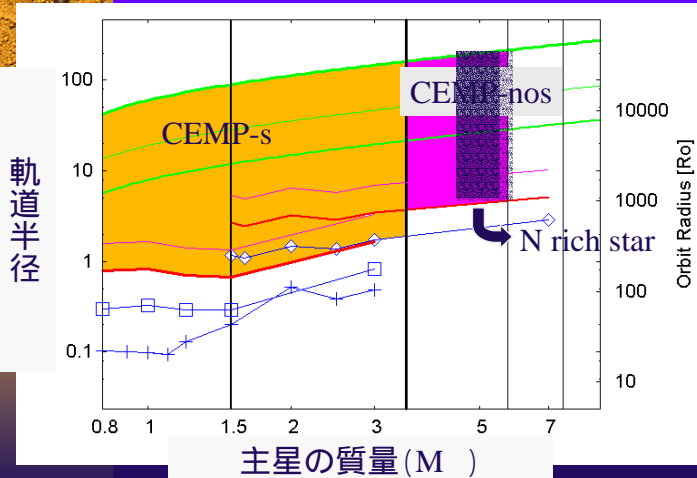
- ◇ <0.5AU
 - Cを汲み上げる前に主星がRoche lobe overflow CEMPにならない
- ◇ 0.5~2AU
 - Roche lobe overflowで質量輸送 CEMPに
 - Mass lossで角運動量を失い軌道は縮む
- ◇ 2~100AU
 - Windの降着 CEMPに
 - 軌道は縮む場合と広がる場合がある
 - 周期と降着量に相関
- ◇ 100AU<
 - 降着が少なすぎ CEMPにならない





Binary Scenario

Binary Scenarioで、連星のうちCEMPになるものの軌道半径、質量の範囲が決まる。



軌道半径
0.5~100AU

主星質量
0.8~6M
(<3.5:CEMP-s
>3.5:CEMP-nos
>5M :N rich)

CEMP starの統計

- ◆ 観測 (HK survey, HES survey)
 1. EMP starの総数は $\sim 3 \times 10^5$ 個
 2. そのうち20~25%がCEMP
 3. CEMPの1/3~1/4がCEMP-nos
 - ◆ N-rich な星がCEMP-nosと同数程度ある



CEMP starの統計

◆ 仮定

- 主星の質量分布 : (review by Chabrier et al.2003)

$$\xi(\log m) \propto m^{-1.35} \quad ; m > 0.8M$$

$$\propto \exp\left(-\frac{(\log m - \log 0.22)^2}{2 \times 0.33^2}\right) ; m < 0.8M$$

- 軌道半径分布 周期分布 (Duquennoy & Mayer 1991)

$$f(\log P(\text{day})) \propto \exp\left(-\frac{(\log P - 4.8)^2}{2 \times 2.3^2}\right)$$

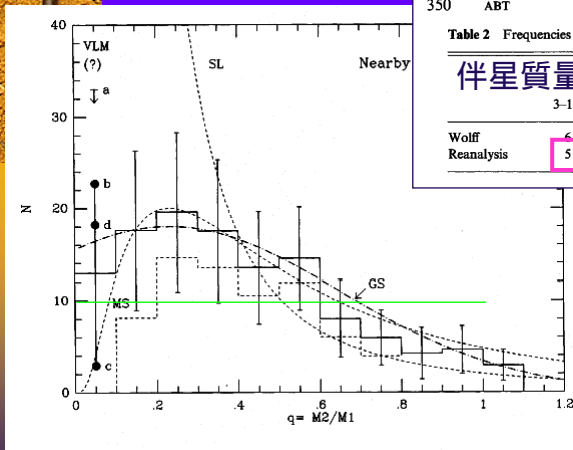
- 連星の質量比分布

$$n(q) = \text{const.} \quad (q = M_2/M_1)$$



Distribution of mass ratio

(Abt 1983)



350 ABT

Table 2 Frequencies of secondary masses for late B-type stars

伴星質量	$M_2 (M_\odot)$				
	3-1.5	1.5-0.75	0.75-0.37	0.37-0.19	0.19-0.09
Wolff	6	2	2	11	
Reanalysis	5	4	2	6	5

B-type star

G-dwarf (Duquennoy & Mayer 1991)



初期銀河ハローIMFの推定

◆ 種族 と同じIMFとすると、

CEMP-sの数

$$\Psi_{CEMP-s} = \int_{0.08}^{0.8} dM_2 N_s(L(M_2)) \int_{0.8}^{3.5} \xi(M_1) \frac{n(M_2/M_1)}{M_1} dM_1 \int_{A_{He-FDDM}(M_1)}^{A_M(M_1)} f(A) dA$$

連星のうちの14%

やや足りない

CEMP-nosの数

$$\Psi_{CEMP-nos} = \int_{0.08}^{0.8} dM_2 N_s(L(M_2)) \int_{3.5}^6 \xi(M_1) \frac{n(M_2/M_1)}{M_1} dM_1 \int_{A_{TDU}(M_1)}^{A_M(M_1)} f(A) dA$$

連星のうちの0.3%

全然足りない

➡ IMFが現在と異なっていたと考えられる

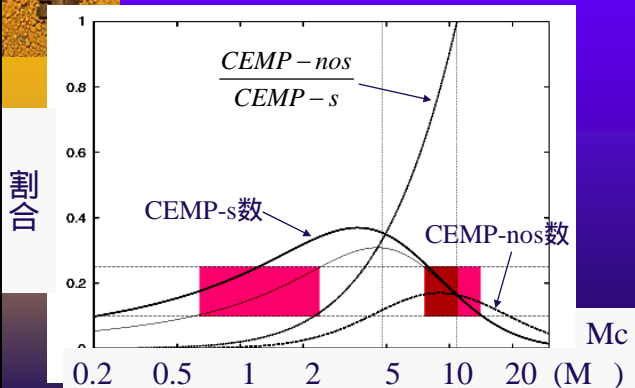


初期銀河ハローIMFの推定

- Log normal IMF

$$\xi(\log m) \propto \exp\left(-\frac{(\log m - \log M_c)^2}{2 \times \sigma^2}\right)$$

を仮定し、どのパラメータで観測と一致するか検討。



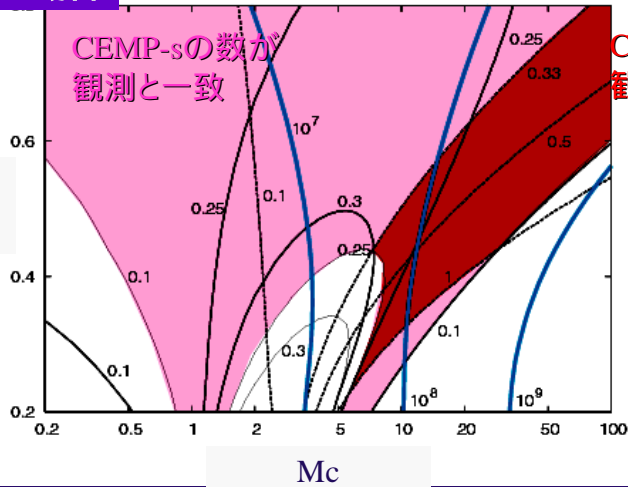
Mcを変えた場合

CEMP-sの数を説明できるのは~1M と ~10M の2箇所

うち10M のほうは CEMP star中の CEMP-nosの割合も観測と一致

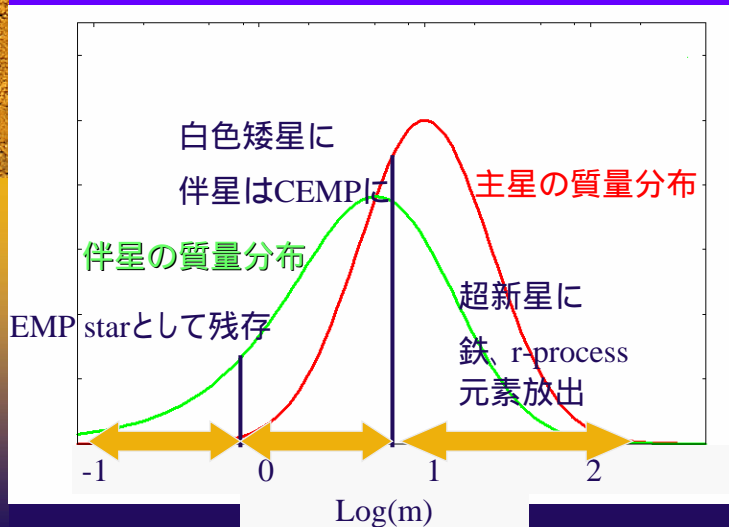
初期銀河ハロー-IMFの推定

も変えた場合

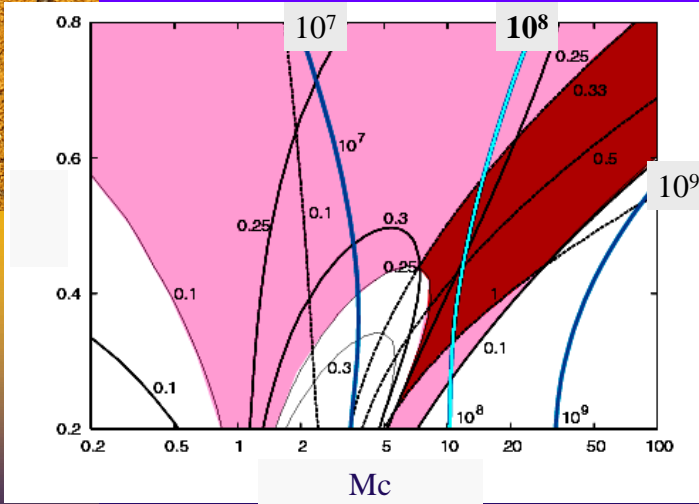


初期銀河ハロー

$M_c=10M_\odot$, $\alpha=0.4$ とすると、IMFは図のようになる



初期銀河ハロー



EMPハローの全体像

現在あるEMP starは 3×10^5 個

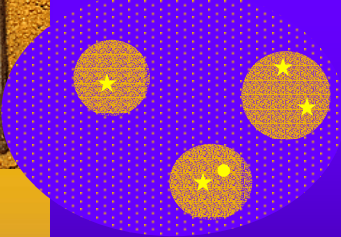


初期ハローには $\sim 10^8 M_{\odot}$ の星があったと考えられる

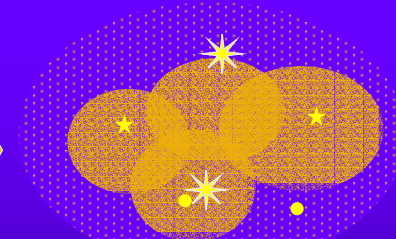
青線: 初期EMP starハロー総質量 = $10^7, 10^8, 10^9 M_{\odot}$

銀河進化

[Fe/H] ~ -3 のガス雲



10^7 個、 $10^8 M_{\odot}$ の星
中・大質量星が多い



$10^6 M_{\odot}$ の鉄を放出
[Fe/H] ~ -2 に



一部がEMPstarとして残存

多くは白色矮星、中性子星、Black Holeに



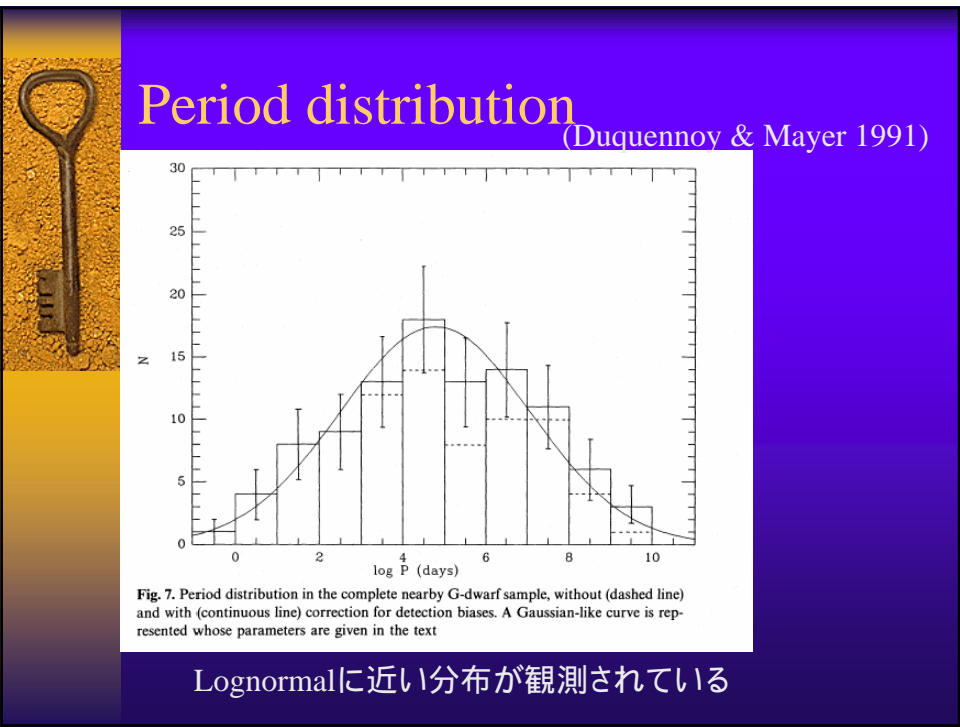
ハローの進化

- ◆ EMP はすべて連星で生まれた
 - 全連星の10%がEMPとして生き残る
 - CEMP-s, CEMP-nos: 22~40% (伴星WD)
 - SN連星: 60~40% (単独星)
個々の超新星についての情報を保存?
r-process元素の増加
- ◆ 全EMP数 $\sim 3 \times 10^5$ 個
10⁷ 個、全質量10⁸ M の連星が必要
- ◆ [Fe/H]~-2.5でIMFが変化
c.f., 球状星団はすべて [Fe/H] > -2.5



Conclusions

- ◆ CEMP star はBinary scenarioで説明できる
 - 数、組成、周期 を説明可能
- ◆ 超金属欠乏星は初期銀河ハローの探査に有用
 - 特に連星は、より重かった主星の情報も残している
 - 恒星進化、連星系進化の解明が条件
- ◆ 銀河初期([Fe/H]<-2.5)では10M 程度を中心としたIMFが示唆される



種族I & II 星の場合 -

- He-flash 中の 水素混入は起こらない
- Third dredge-up
- radiative $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ burning

水素の混入を仮定 (標準理論の枠内にはない) convective overshooting

seed核一個あたりの中性子捕獲数は金属量に反比例して多くなる

恒星進化:種族I & II星の場合

◆ Third dredge up

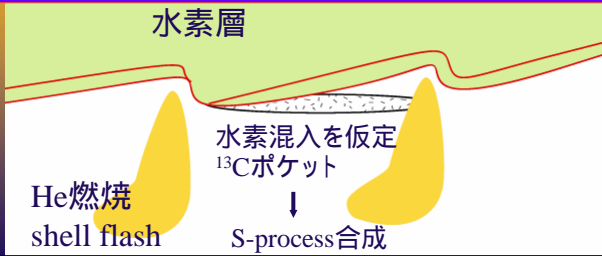
通常の星では、炭素の増加はThird dredge upで起きる

S-process元素

水素の混入を仮定 (標準理論の枠内にはない)
convective overshooting

radiative $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ burning

seed核一個あたりの中性子捕獲数は金属量に反比例して多くなる



結果

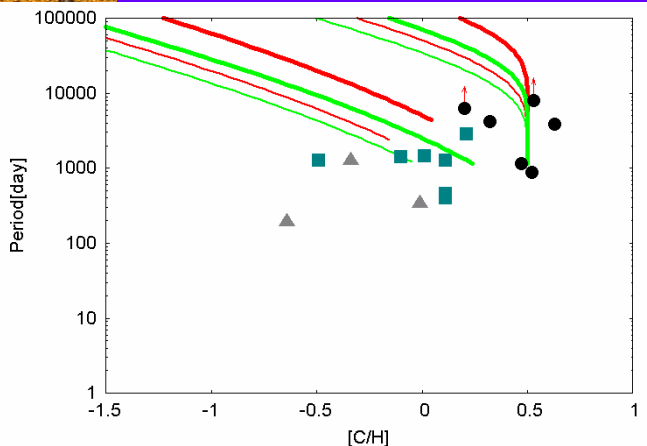
C(炭素)と
S-process元素が
増加

[C/H]と周期 : CH starの場合

[C/H]~0.5のwindが降着したと仮定

Giant

Dwarf



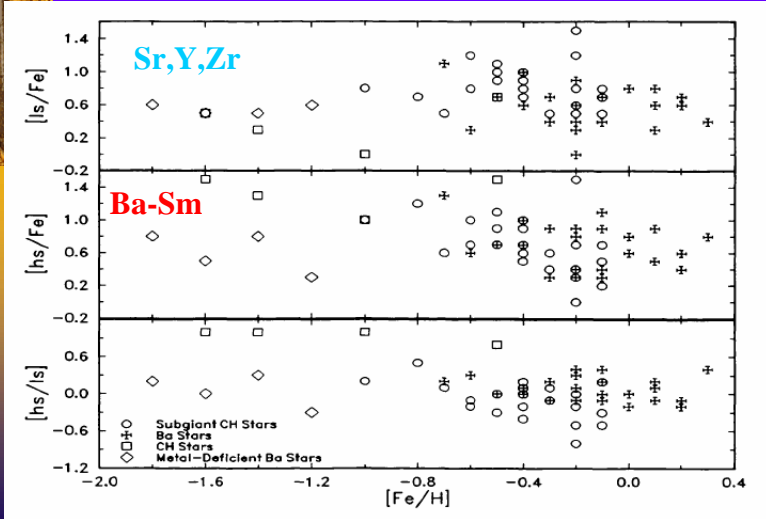
結果

CH stars の場合
は、すべて連星と
される。(周期の
観測の確率から)

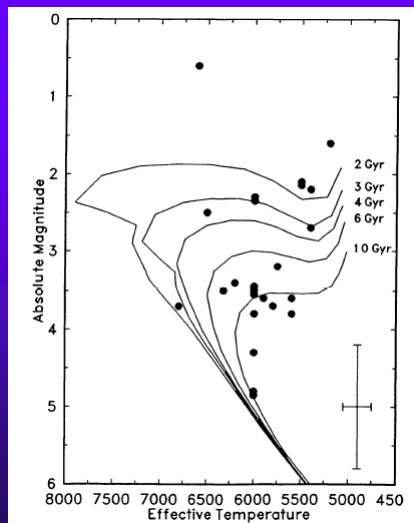
CEMPについても
長周期を除くと同
様の相関関係が
見られる

CH stars & s-process elements

S-process元素は必ず増加
CEMP-nos



CH-star



Low mass dwarf
が無い

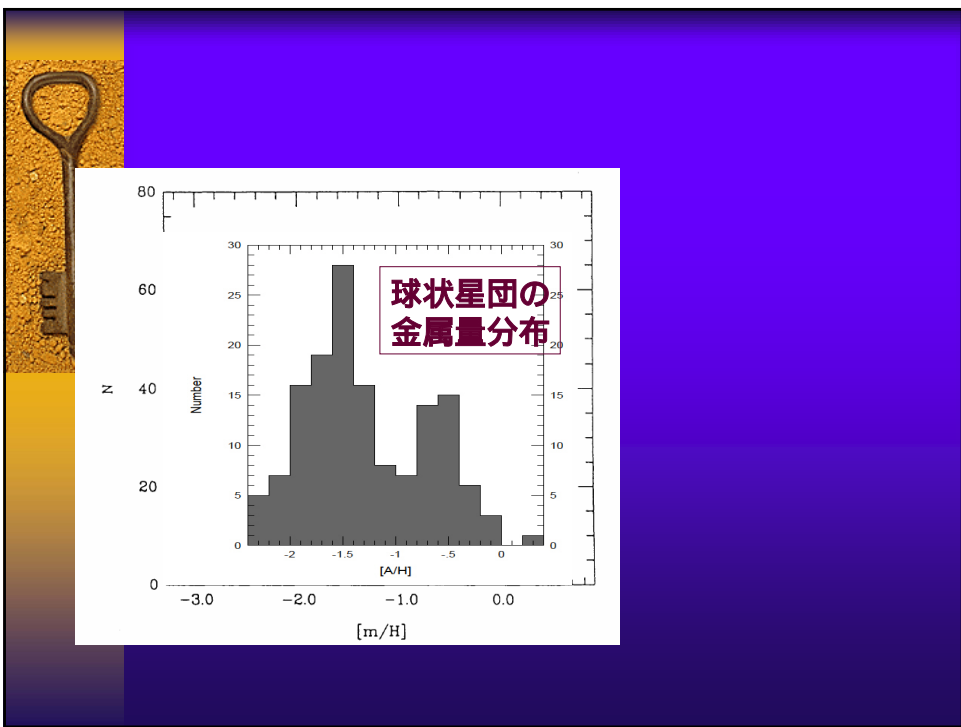
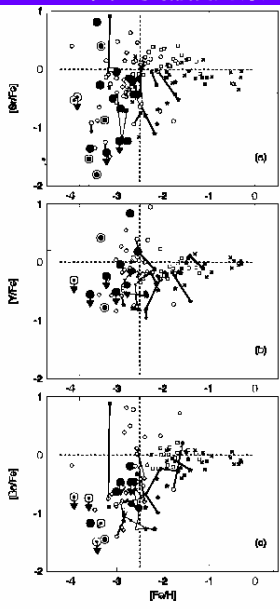
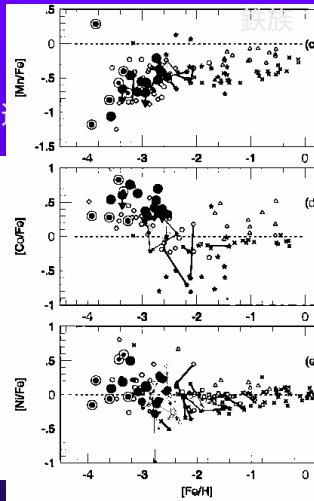
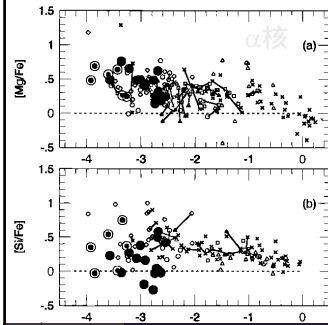
銀河系ハローの金属欠乏星

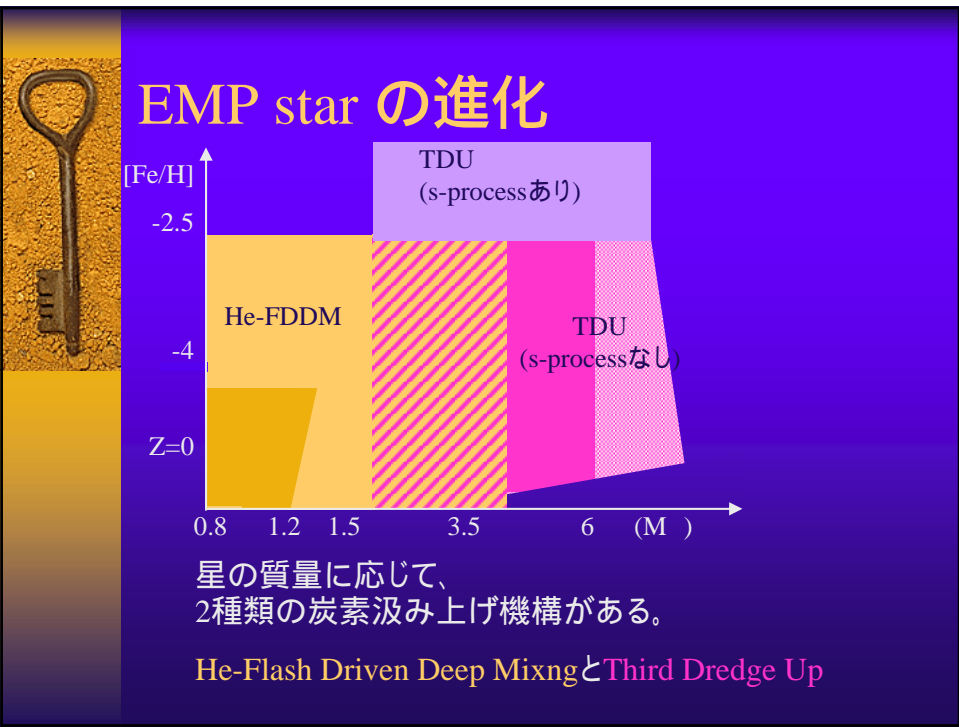
Various trends and scatters in the abundances with metallicity



銀河系の形成史, 化学

中性子捕獲元素







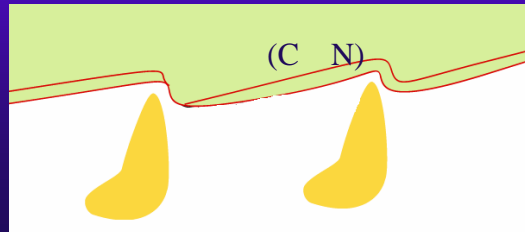
恒星進化:超金属欠乏星の場合(2)

- ◆ 3.5~6M の星:Third dredge up
EMPではs-process形成は起きない
- ◆ 5M 以上の星では
 - Third dredge upに加えて、hot bottom burningが発生
 - CNサイクルにより窒素が増加
 - 最大で N/C~10

結果

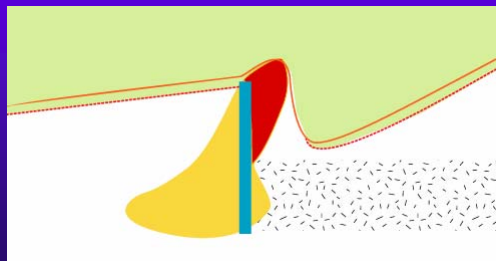
Cのみ増加

5M 以上ではN増加



EMP star(超金属欠乏星)の進化

- ◆ He flash driven deep mixing
 - He core flashが水素層まで到達
 - H shell flashが発生して汲み上げが起きる



結果

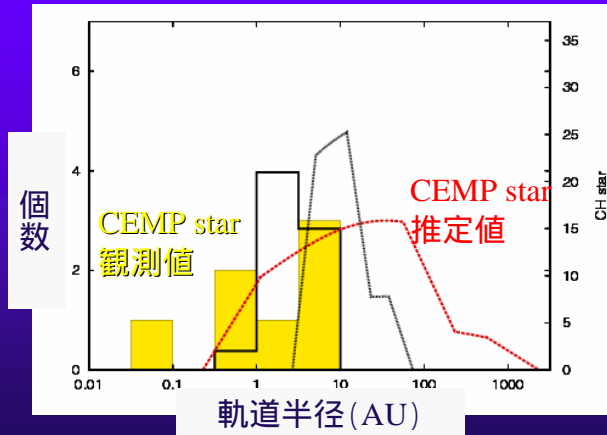
C(炭素)に加え、N
(窒素)も増加

S-process元素は
作られるが表面に
は出ない



CEMP starの統計

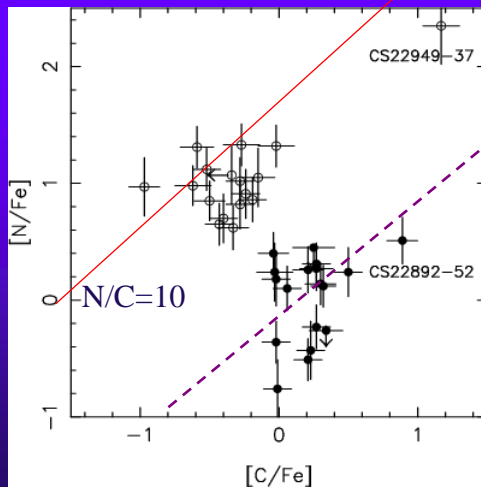
◆ 周期分布



視線速度
変化の見
えていない
CEMP star
も多くある



N rich stars

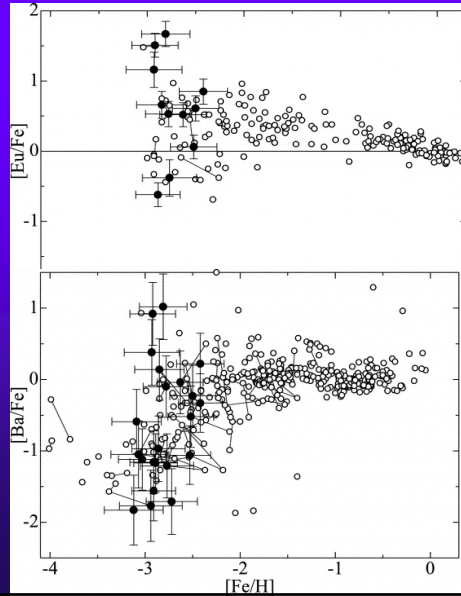


超金属欠乏星の
中には窒素過剰な
星がある



R-process元素

超金属欠乏星では
r-process元素
(超新星起源元素)
の組成に大きな
ばらつきがある。



CEMP starの統計

◆ 数

Pop の場合に比べて広いパラメータ
スペースでCEMPになれる。

$$\frac{N(\text{CEMP})}{N(\text{CHstar})} = \frac{\int_{0.8}^{3.5} \xi(M_1) \frac{n(M_2/M_1)}{M_1} dM_1 \int_{A_{\text{He-FDDM}}(M_1)}^{A_{\text{M,CEMP}}(M_1)} f(A) dA}{\int_{1.5}^5 \xi(M_1) \frac{n(M_2/M_1)}{M_1} dM_1 \int_{A_{\text{TDU}}(M_1)}^{A_{\text{M,CH}}(M_1)} f(A) dA} = 14$$

f(A) 軌道半径分布、
n(q) 質量比分布、
(m) IMF

EMP starのうち CEMP-sの割合は、
Pop starのうちのCH starの割合の14倍になる



CEMP starの統計

◆ GiantとDwarf

- CEMP starの質量分布は $n(q)$ で決まるため、通常のIMFと異なる
- GiantとDwarfの比率も変わってくる

Binary Sbenarioの推定

Giant : Sub giant : Dwarf
63% : 10% : 27%

観測

26個 : 4個 : 4個
(76% : 12% : 12%)