

銀河系における 種族III星の生き残り

Search for Pop III survivors around the Milky Way

小宮 悠 (東大RESCEU)

共同研究者:

須田拓馬 (東大RESCEU)

藤本正行 (北海学園大)



Low-mass Pop III stars

Greif+ (2011)

- ◆ Population III stars:
 $<0.8M_{\odot}$ なら現在まで生き残る
 \Rightarrow **Pop III survivors**

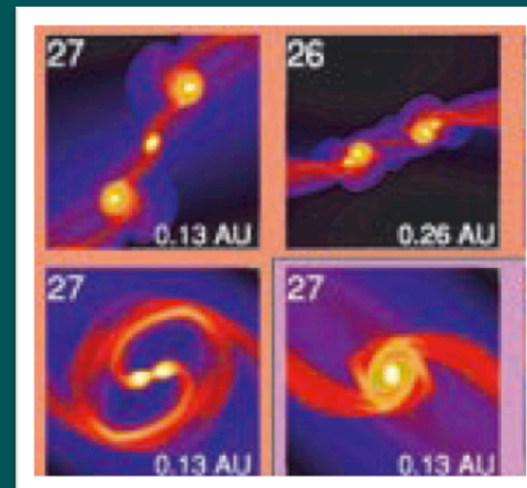
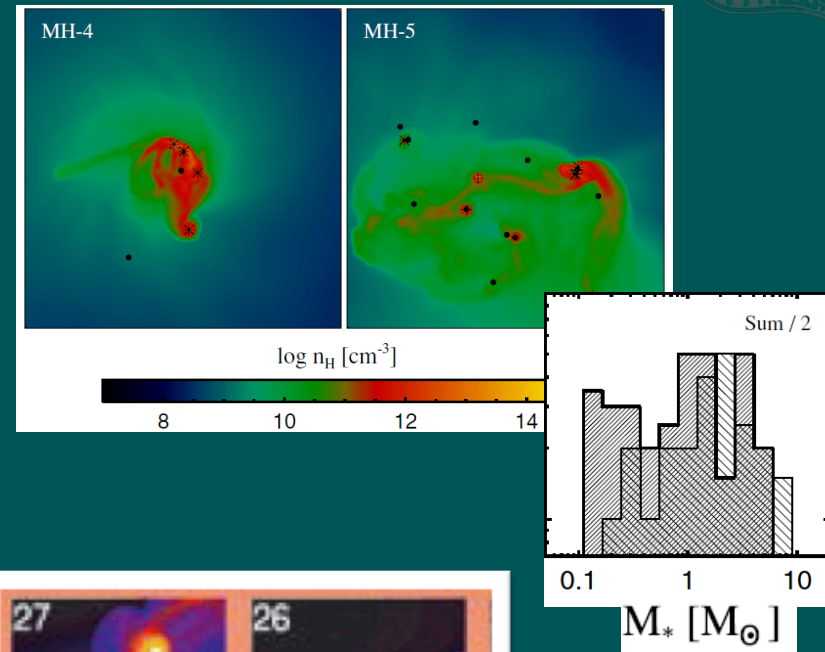
- ◆ Simulation (平野さん review)

- ◆ Cluster :

- ◆ Clark+ (2008, 2011)
- ◆ Greif+ (2011)
- ◆ Susa+ (2012)
- ◆ Dopcke+ (2013)
- ◆ ...

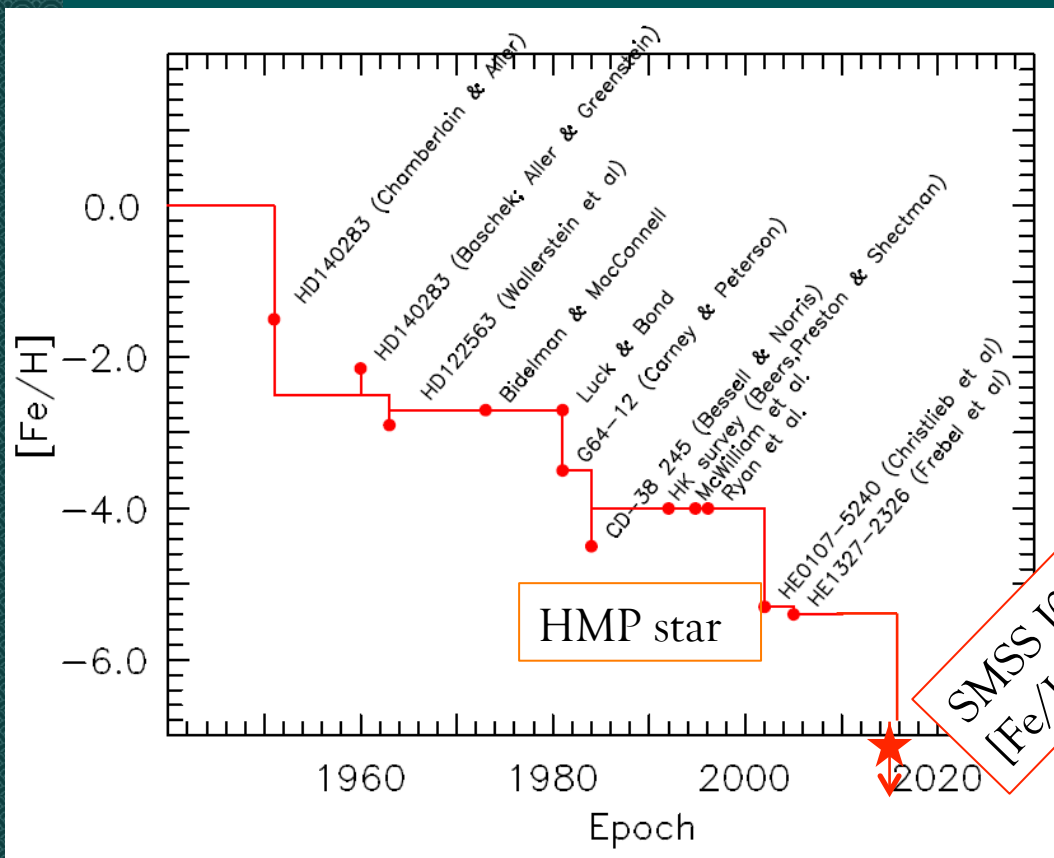
- ◆ Binary (multiple system):

- ◆ Machida+ (2008)
- ◆ Turk+ (2009)
- ◆ Stacy+ (2010)
- ◆ ...



Machida+ (2008)

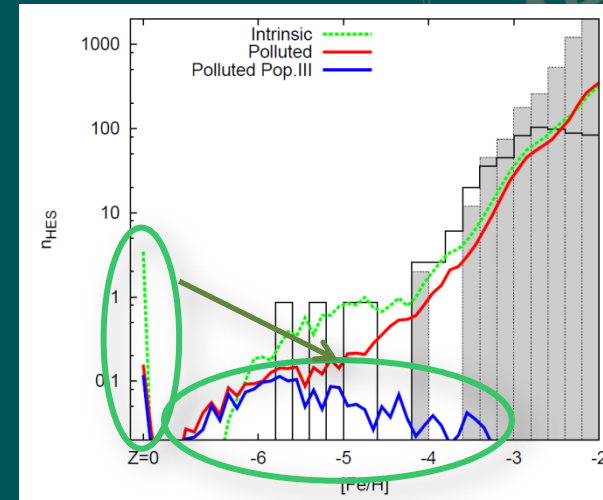
観測



SMSS J031300.36-670839.3 (Keller et al.)
 $[Fe/H] < -7.1$, $[Ca/H] = -7.0$, $[C/H] = -2.6$

Pop III survivors

- ◇ 銀河内にいれば、星間物質降着による表面汚染を受ける (須田さんtalk) (Polluted Pop III survivors)
 - ◇ $Z=0 \Rightarrow [Fe/H] \sim -5$ or -6 (e.g. Komiya+ 2009, Shigeyama+2003)
 - ◇ **Hyper Metal-Poor star** として観測される
 - ◇ HMP star が polluted Pop III survivor かどうかは決着がつかっていない (Umeda & Nomoto 2003, Meynet 2006)



銀河の外に飛び出す星もあったのではないか

- Pop III stars の生まれた mini-halo 質量は $\sim 10^6 M_{\odot}$ (Tegmark 1997, Yoshida+ 2003)

\Rightarrow Escaped Pop III survivors

- 通常の stellar halo より遠方に
- 表面汚染は関係ない \rightarrow $Z=0$ のまま
- Pop III を生んだ mini halo 質量にも制限がつかかも

Escaped Pop III survivors

◇ 脱出機構

◇ Cluster

星団内での重力多体相互作用

◇ Binary

主星の超新星爆発により脱出





◆ Escaped Pop III survivors

- ◆ Pop III survivorのうち飛び出す星はどれくらい？
- ◆ 全体では何個？
- ◆ 現在はどこに？
- ◆ 観測可能？

Escaped Pop III survivors

◇ 脱出率 (SN binary)

◇ Lognormal IMF ($M_{\text{md}} = 10, 40, 200M_{\odot}$, Komiya et al.2007)

◇ 連星パラメータの分布は、Pop I と同じと仮定

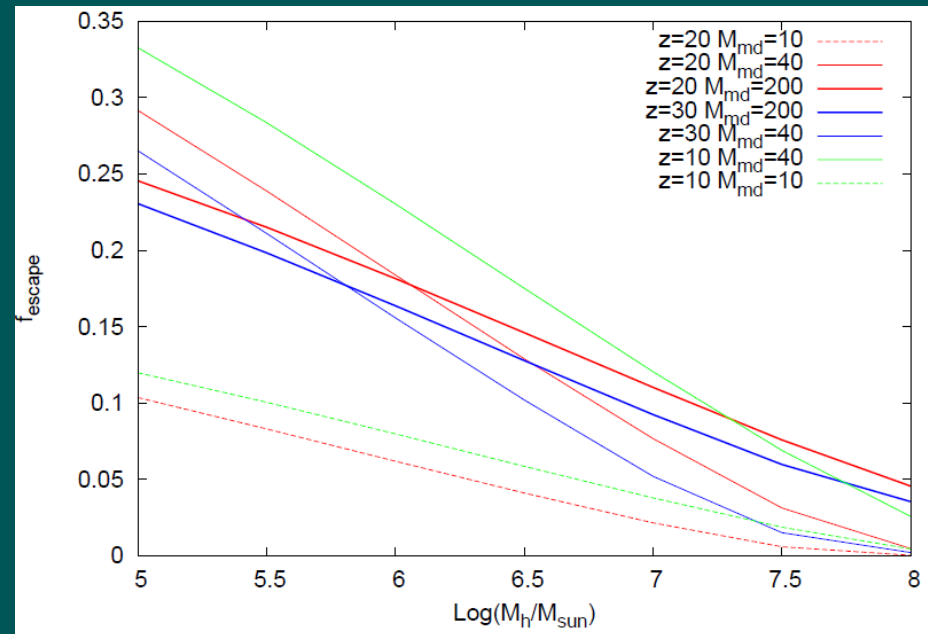
◇ $n(q) = 1$

◇ Period distribution:
Duquennoy & Mayer (1991)

◇ Circular orbit

◇ Remnant mass:
Woosley & Weaver (1995)

◇ Host mini-halos が $10^6 M_{\odot}$ なら、low-mass Pop III stars の 5 - 25 % が脱出



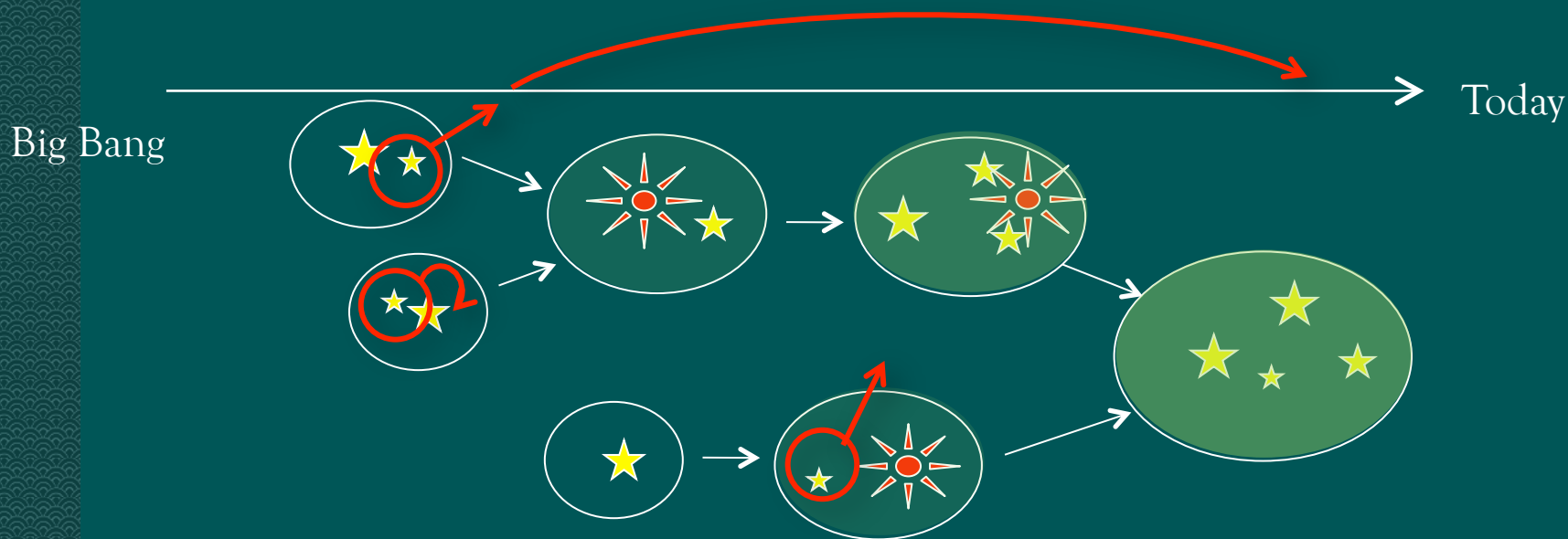
Mini-halo mass →

銀河系全体では



階層的な化学進化モデル

- ◆ Merger tree (extended Press-Schechter theory)
- ◆ 星形成史、化学進化
 - ◆ 個々の星を作っていく。
 - ◆ 星質量、連星軌道は分布関数に従い乱数で与える
- ◆ Pop III star, EMP star
 - ◆ 脱出するか？
 - ◆ 脱出した星については、軌道を追う



Model assumptions:

◆ Merger tree

- ◆ Somerville & Kollat (1999)
- ◆ $M_{\min} = M(T_{\text{vir}} = 10^3 \text{K})$

◆ Star formation

- ◆ Star Formation Rate: $M_{\text{gas}} \times 10^{-10} / \text{yr}$
- ◆ Lognormal IMF:
 - ◆ $M_{\text{md}} = 3 - 200 M_{\odot}$
- ◆ Binary fraction: 50%, Mass ratio distribution: $n(q) = 1 \text{ or } \propto q^{-1}$
- ◆ Period distribution: Duquennoy & Mayer (1991) or Rastegaev(2010)

◆ Radiation feedback

- ◆ Lyman-Werner radiation: stars are not formed in newly formed mini-halos with $T_{\text{vir}} < 10^4 \text{K}$ at $z < z_{\text{LW}} = 20$ (or 15, 30)
- ◆ Reionization: No gas infall at $T_{\text{vir}} < 10^4 \text{K}$ and $z < 10$

◆ Metal enrichment

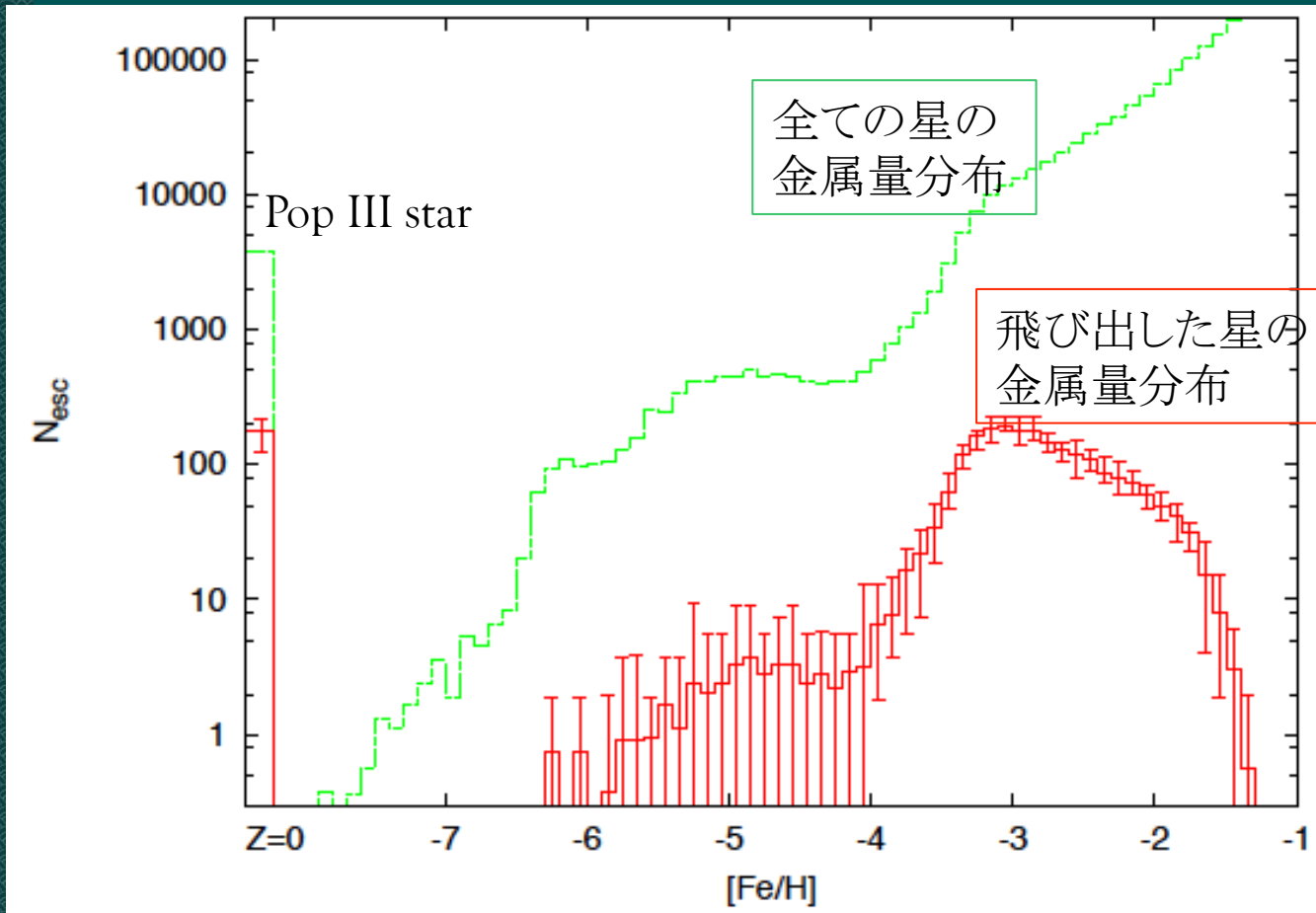
- ◆ Yield :Kobayashi et al.(2006, Type II SN), Umeda & Nomoto (2002, PISN)
- ◆ Instantaneous mixing inside each mini-halo.

◆ Gas outflow

- ◆ SN driven
- ◆ IGM pre-enrichment: Momentum conservation snowplow of galactic winds



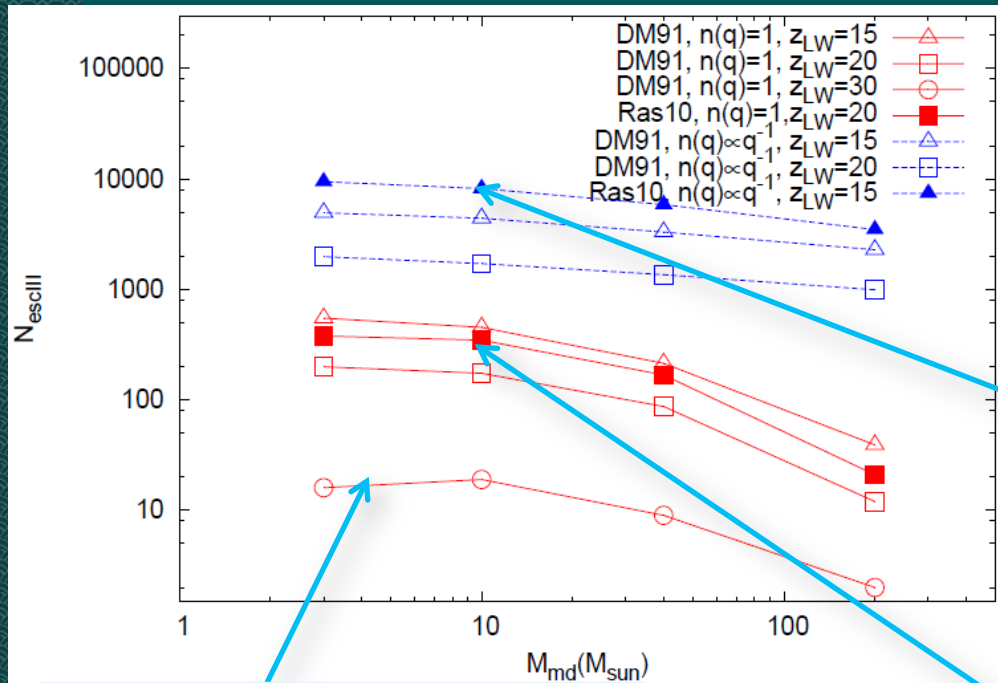
Escaped Pop III star, EMP star



$M_{\text{md}} = 10M_{\odot}$
 $n(q) \propto 1$
周期分布 Duquennoy
& Mayer (1991),
のモデルの結果

~200個のPop III star, ~5000個のmetal poor star
が、mini-haloから飛び出す

Parameter dependence



- 質量比分布 $n(q)$
- IMF M_{md}
- 連星周期分布 $f(P)$
- Lyman-Werner feedback z_{LW} などに依存

Escaped Pop.III stars 100 - 10,000 個

Optimistic model
 $n(q) \propto q^{-1}$, ($q=m2/m1$),
 $M_{md} = 10M_{\odot}$,
 $f(P)$ Rastegaev(2010),
 LW feedback at $z < 15$

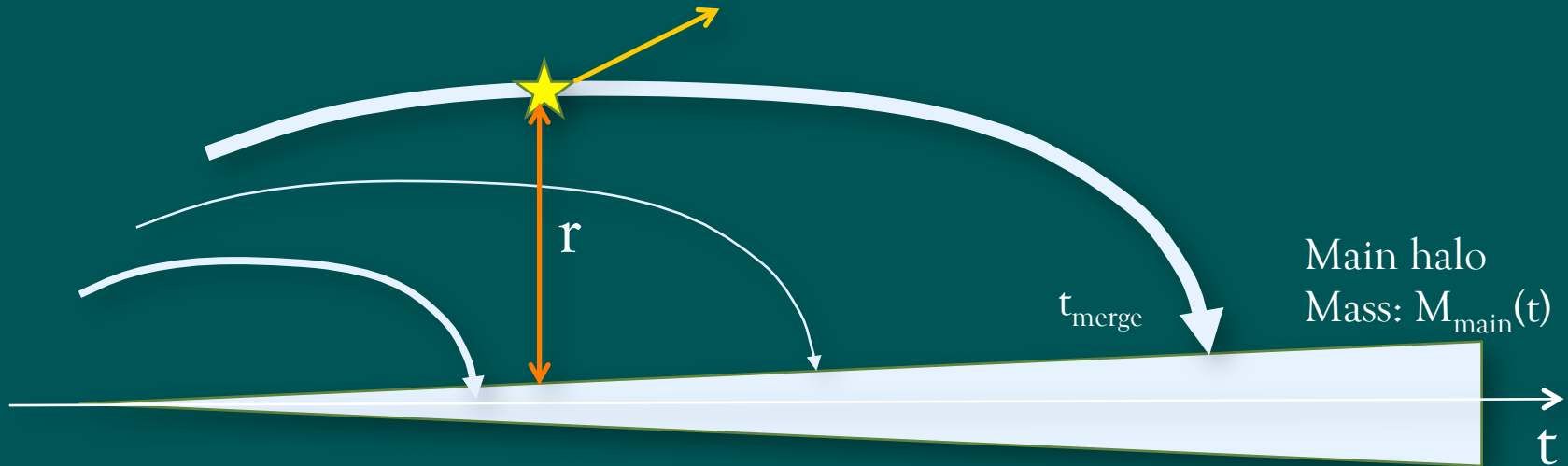
Conservative model
 $n(q) \propto 1$
 period distribution of Duquennoy & Mayer (1991),
 LW feedback at $z < 20$

Minimum halo mass
 $M(T_{vir} = 10^4 K)$

現在はどこにいる？

Model assumptions:

Mini-halo の分布、速度



- Merger tree の幹のhaloは、現在の銀河中心の場所にあり、他のmini-halo が合体してくると仮定
- extended Press-Schechter:
 - Halo形成: 密度超過領域の球対称なcollapse
 - “Merger” = 両haloを含む領域のcollapse
- “Distance” = 球の半径

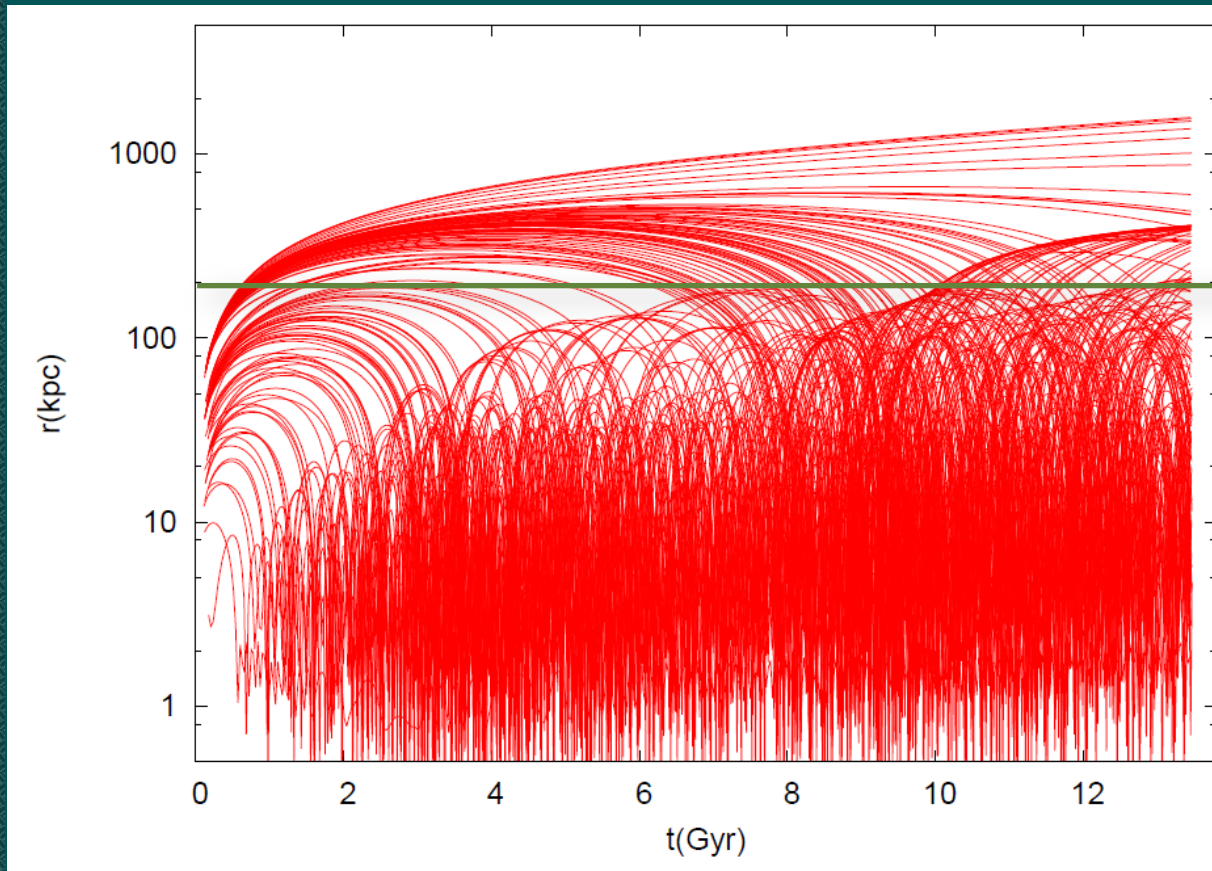
$$r = r(t_{\text{merge}}, M_{\text{main}}(t_{\text{merge}}))$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{GM}{r^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} r$$

Escaped Pop III star

Mini-haloから飛び出した後の運動を計算

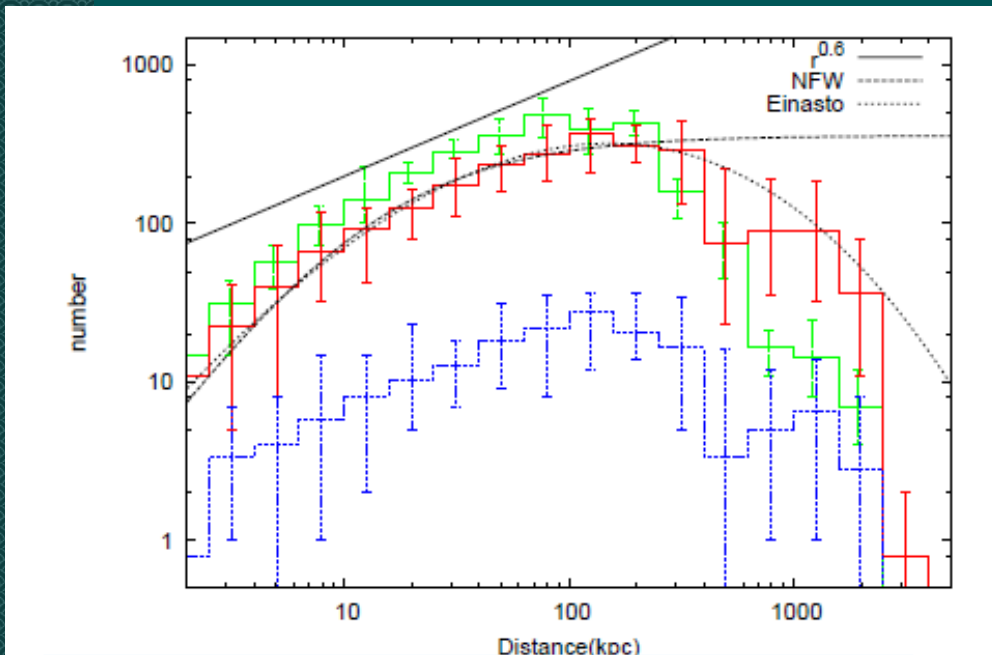
$$\frac{d^2 r_*}{dt^2} = -\frac{GM_{\text{in}}(r_*, t)}{r_*^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} r_* + \frac{l_*^2}{r_*^3}$$



Escaped stars の大半は、
MW haloに落ちてくる

一部の星は >1Mpcに

距離分布



典型的には、銀河系中心から
~100kpc 程度に
dark-matter halo の密度分布に近い

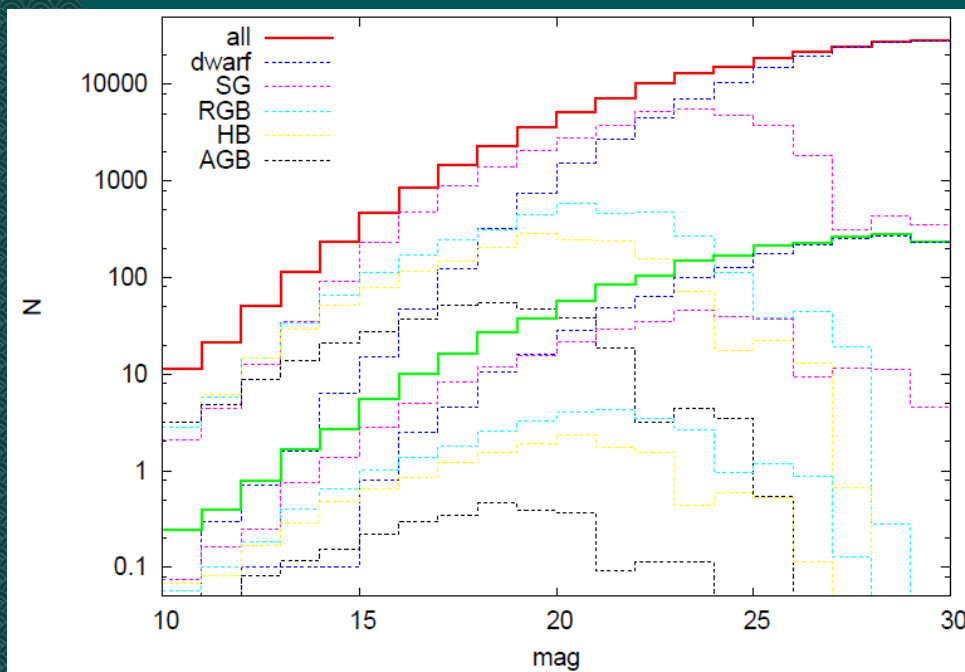
分布の形は、**IMF** や連星のパラ
メータにはよらない。

Major merger が少ない合体史の
銀河では、やや近い星が多くなる。

Red: all the escaped stars
Blue: escaped Pop.III stars
Green: “MW type” merger trees
($M_h(z=2) > 0.75 \times M_h(z=0)$)

等級分布

等方的な分布を仮定



Apparent magnitude distribution

Red: optimistic estimation

Green: conservative estimation

Dotted lines: dwarf, SG, RGB, HB, and AGB components

21等以上の星が全天で数十~数千個

SEGUE

$g < 19$, $1438 + 1317 \text{ deg}^2$

$240000 + 118151 \text{ stars}$

$R \sim 2000$

LAMOST:

4000 fibers

$R=500-1500$

20.5 mag for 1.5 hr

Subaru PFS

2400 fibers

$R=3000$

$V < 21 \text{ mag}$ (7200 sec)

高分散分光

TMT or E-ELT

Summary



- ◇ Pop III star の生き残り
 - ◇ Polluted Pop III survivors
⇒ 表面汚染を受け *HMP stars* として観測される
- ◇ Mini-halo から飛び出した星
Escaped Pop III survivors
 - ◇ $Z=0$ で残る
 - 超新星爆発時に飛び出すケースを考えると、
 - ◇ 銀河系に数百個±2桁 (EMP starは数十倍)
 - ◇ ~ 100kpc程度に分布
 - ◇ 観測: Subaru PFS + TMT ?