

# 銀河系外縁部に種族III星を探す

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)



金属欠乏星を用いた銀河系考古学は初期宇宙を探る有用な手法と考えられる。近年は、金属を全く持たない星(=種族III星, Pop III star)にも低質量星があり、現在まで生き残っている可能性が指摘されている。しかし、これまでの観測では金属量ゼロの星は発見できていない。初期宇宙で銀河は、小規模なmini-haloから合体成長を繰り返して階層的に形成され、金属欠乏星はmini-halo で形成された星と考えられる。我々は、階層的構造形成を取り入れた化学進化モデルを用いて、現在の宇宙に生き残ったPop III star の、組成や分布を推定した。mini-halo では、星間ガス降着が効率的におこり、Pop III star 表面は金属で汚染されると考えられる。また、mini-haloは重力が弱いので、一部の星は外に飛び出した可能性がある。その結果、以下のようなことがわかった。

- Pop III star のうち多くは、その形成後に、周囲の金属量が増えたガスが降着することにより、表面的にはPop III starではなくなっている。
  - 一部のPop III starは、mini-haloから脱出することで、表面汚染を受けない。こうした星は、主に銀河系ハローの外縁部に分布している。
- また、この結果をもとに、PFSなどを用いて汚染されていない種族III星が観測できる可能性を探った。

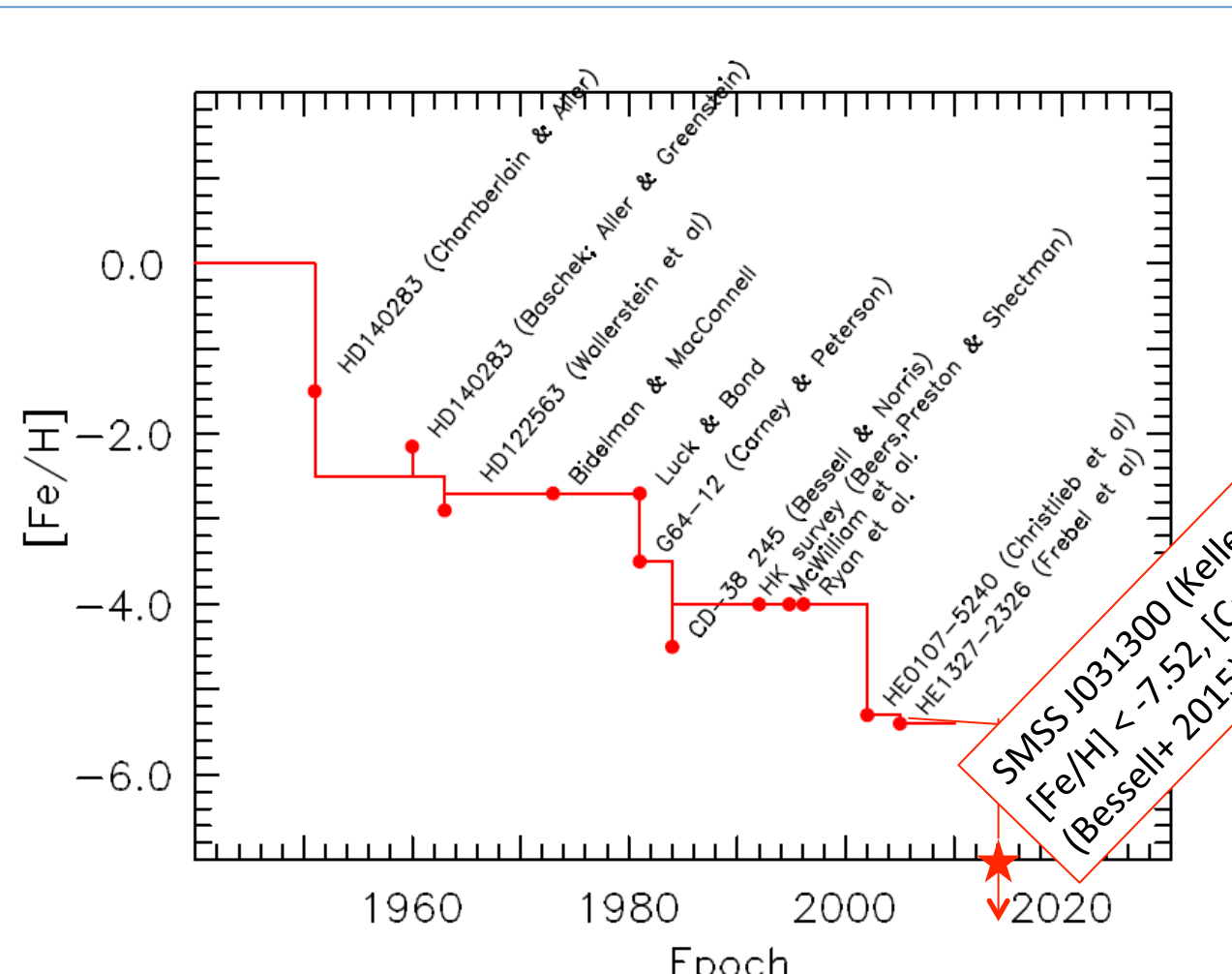
## Introduction

宇宙最初の星は、金属量ゼロで生まれたと考えられる。0.8M<sub>⊙</sub>以下の星の寿命は宇宙年齢より長いので、低質量の星は現在まで生き残っているはずである。

近年の初代星形成のシミュレーションでは、金属量ゼロでも低質量星が形成されるとの結果が出ており(e.g. Clark+ 2008, Greif+ 2011, Susa+ 2013)、近傍宇宙にもPop III starの生き残りがいることが示唆される。

一方観測的には、これまでの金属欠乏星探索により、金属量が太陽の1/1000以下の**超金属欠乏星(EMP star)**は多数観測されている。しかし、金属量がゼロの星(**種族III星, Pop III star**)は未だに発見されていない。

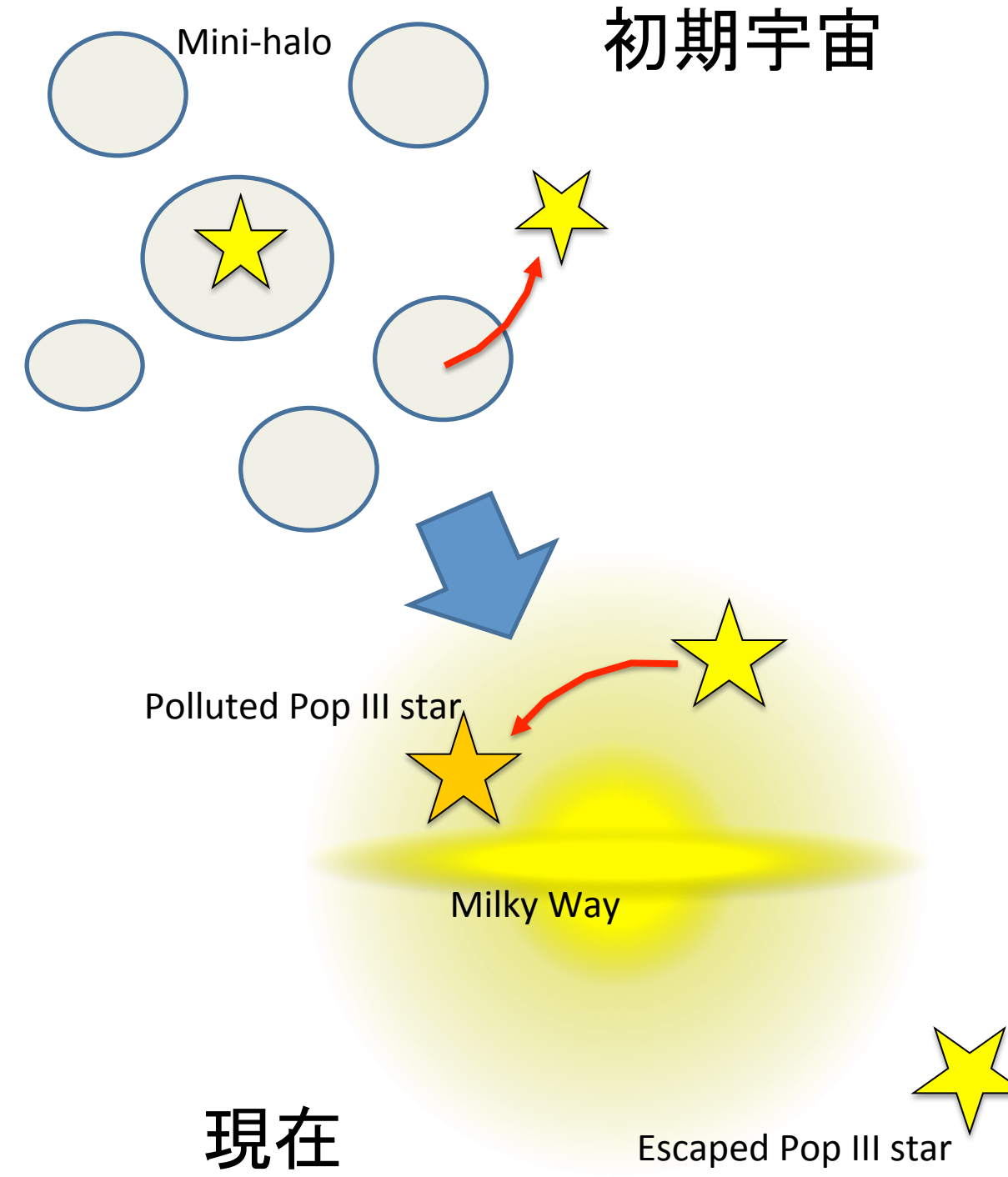
低質量Pop III starは、存在するのだろうか？  
もし存在するとしたら、どこへ行ったのだろうか？



観測された最も金属量の少ない星の記録。  
横軸: 観測年、縦軸: 金属量。[Fe/H]<-5の星はhyper metal poor-star (**HMP star**)と呼ばれ、3天体見つかった。昨年、[Fe/H]<-7.52という星が発見された。

Pop III starは、その形成以降、周囲のガスの金属量が増えていくと、星間物質の降着による表面汚染をうけると考えられる。だとすれば、現在の表面金属量はもはやゼロではなくなっている。これらを**polluted Pop III star**と呼ぶことにし、表面汚染を受けた現在の表面金属量を推定した。

一方で、表面汚染を受けなかったPop III star もいたと考えられる。現在の宇宙論によれば、Pop III star は10<sup>6</sup>M<sub>⊙</sub>程度の小さなdark matter haloの中で生まれたとされる(Tegmark+ 1997, Yoshida+ 2003)。こうしたmini-haloは重力ポテンシャルが小さいため、Pop III starの一部はmini-haloから飛び出し、銀河間空間に出て行った可能性がある。例えば、大質量星との連星で生まれた星の場合、主星の超新星爆発の際に、連星系から飛び出し、そのままmini-haloの外に出ることが考えられる。また、Pop III star が星団として生まれたならば、重力相互作用で軽い星が放出される場合がある。我々は、このようなmini-halo外に出たPop III star を **escaped Pop III star** と呼び、その数や分布を予測した。



## 階層的化学進化モデル (Komiya+ 2010, 2014)

銀河は、原始矮小銀河の合体により階層的に形成されてきた。我々は、準解析的に銀河の合体史を再現し、その中での星形成・元素組成進化を計算するモデルを構築してきた。このモデルにより、初期宇宙のmini-haloたちの化学進化史を追ひ、超金属欠乏星の金属量、組成分布などを再現できる。今回は、このモデル中で形成された低質量のPop III star について、その後の振る舞いを調べた。

**Merger tree** (Someville & Kollatt 1999)

Total mass: 10<sup>12</sup>M<sub>⊙</sub>, mass resolution: T<sub>vir</sub> > 1000K (T<sub>vir</sub>: virial temperature)

### Star formation

All the individual EMP stars are registered in the computation.

Star formation criterion: T<sub>vir</sub> > 10<sup>3</sup>K

(for mini-halos formed at z < z<sub>LW</sub>=20, T<sub>vir</sub> > 10<sup>4</sup>K due to Lyman-Werner radiation)

Star formation rate: M<sub>gas</sub> × 10<sup>-11</sup>/yr. (M<sub>gas</sub>: gas mass in the mini-halo)

Initial mass function: Lognormal IMF peaked at M<sub>md</sub> = 3 - 10M<sub>⊙</sub> for EMP star,

Mmd = 5 - 25M<sub>⊙</sub> for Pop III star

### Metal enrichment

Gas in each mini-halo is well mixed.

Supernova (SN) yield: Type II SN: Kobayashi et al.(2004)

Pair-instability SN (PISN): Umeda & Nomoto (2002)

### Outflow

$$E_w = E_k \frac{\epsilon + E_k/E_{bin}}{1 + E_k/E_{bin}} \quad M_w = M_{gas} \frac{E_w}{E_{bin} + E_w} \quad (E_k: \text{SN kinetic energy}, E_{bin}: \text{binding energy of halo gas}, \epsilon = 0.1)$$

## Polluted Pop III stars (arXiv:1507.01664)

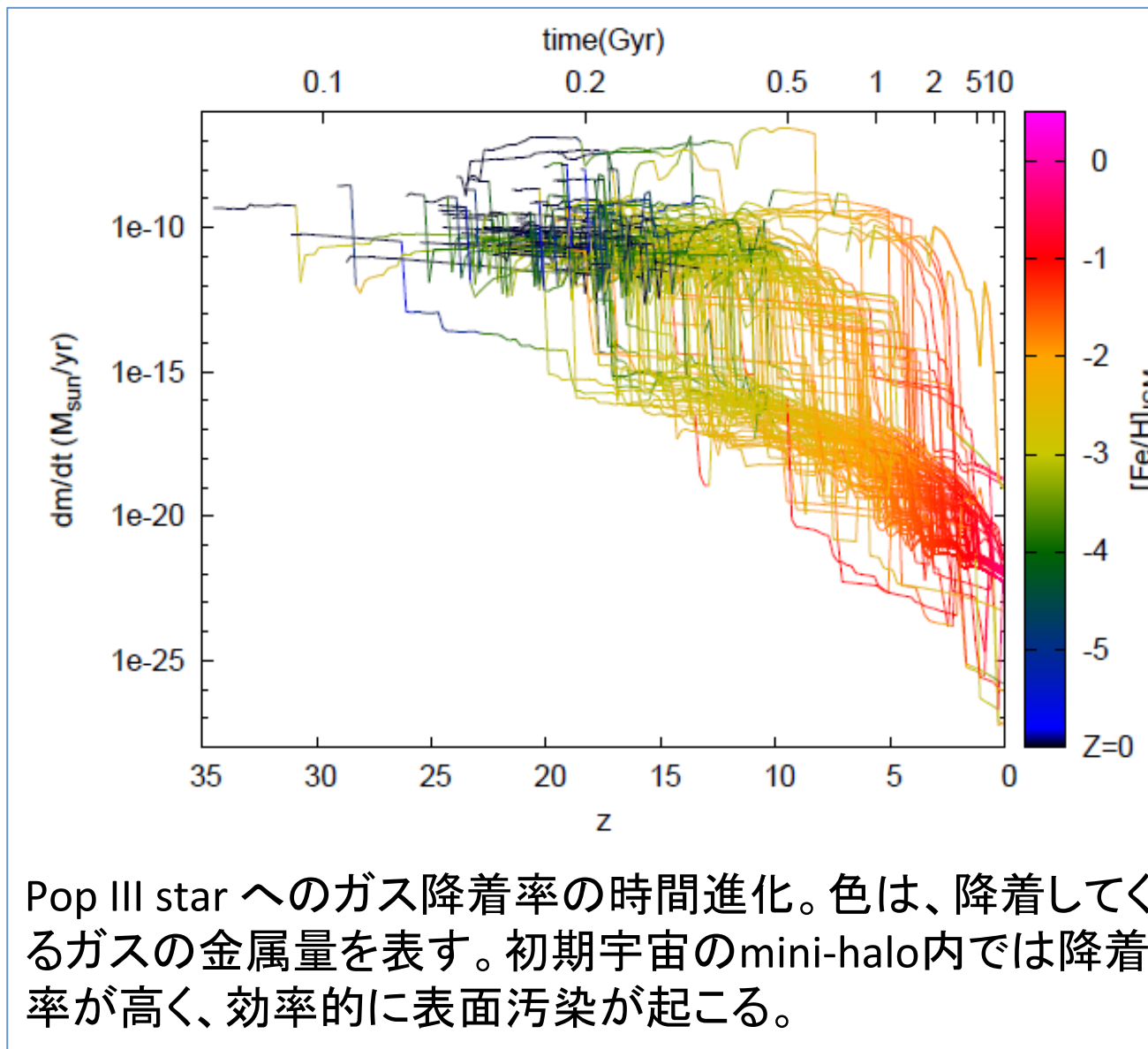
Mini-halo内にとどまったPop III star は、mini-haloの合体に伴い、銀河系ハローに取り込まれていく。

これらの星は、周囲のガスの化学進化に伴い、表面汚染をうける。階層的化学進化モデルの計算に従って、降着物質の組成と降着率の変化を追った。

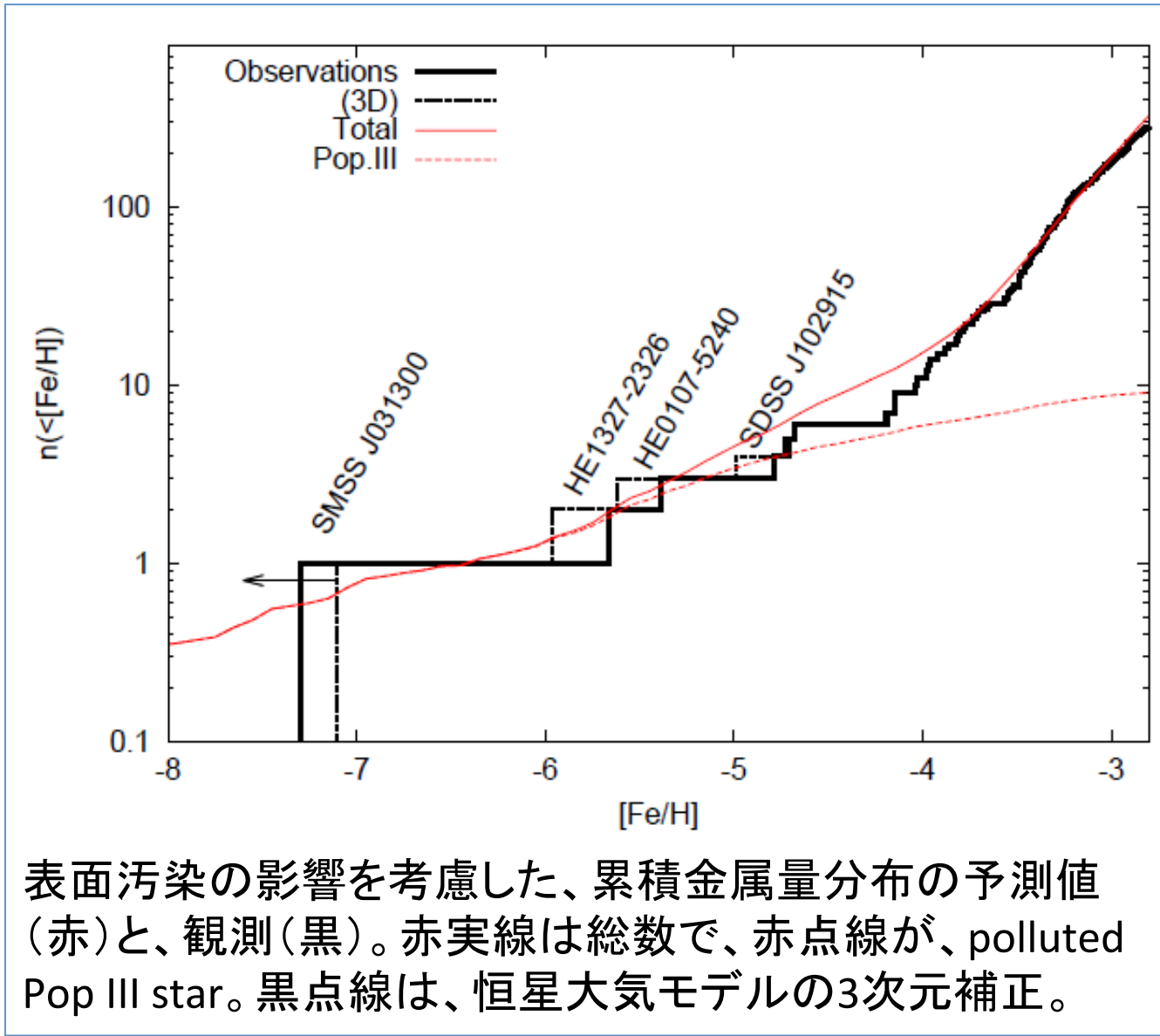
降着率: Bondi-Hoyle accretion

$$\dot{M} = 4\pi (GM)^2 \rho / (V_r^2 + c_s^2)^{3/2}$$

(c<sub>s</sub>: 宇宙背景放射の温度での音速)。降着した物質は、星の表面对流層(giantで~0.2M<sub>⊙</sub>)で一緒に混ざるとして、polluted Pop III star の金属量分布を予測した。



Pop III star へのガス降着率の時間進化。色は、降着してくるガスの金属量を表す。初期宇宙のmini-halo内では降着率が高く、効率的に表面汚染が起こる。



表面汚染の影響を考慮した、累積金属量分布の予測値(赤)と、観測(黒)。赤実線は総数で、赤点線が、polluted Pop III star。黒点線は、恒星大気モデルの3次元補正。

表面汚染は、主に宇宙初期の mini-halo 内で効率的に起こる。汚染後の表面組成は、典型的には [Fe/H] = -5 から -6 程度になると予測される。この計算で得られたpolluted Pop III star の金属量分布は、観測で得られた最も低金属量の星たちの組成分布とよく一致することから、観測されているHMP star の正体は、polluted Pop III star であると考えられる。また、これまでの探索で表面金属量ゼロの星が発見できなかった理由は、この表面汚染によるものと考えられる。

見つかっている**HMP star が polluted Pop III star である**とすると、Pop III star のうち、**5% 前後が low-mass star** であつたと推定される。

## Escaped Pop III star

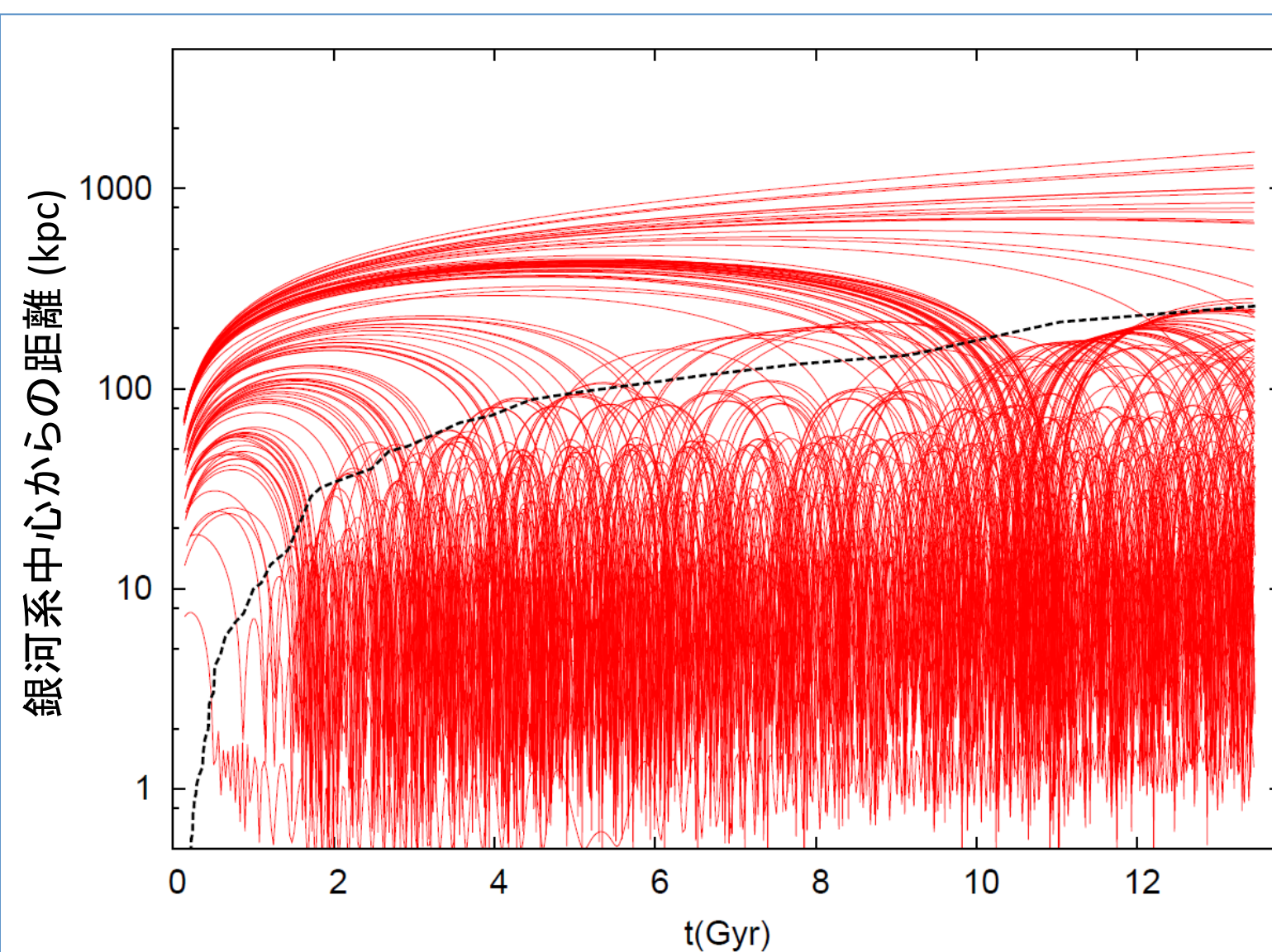
### 現在の分布

準解析的モデルで生まれた escaped Pop III star の軌道を計算し、現在の銀河系周囲における分布を求めた。

Merger tree の幹となるhaloは、常に現在の銀河系中心の位置にあると仮定し、他の mini-halo の空間分布については、Extended Press-Schechter 理論に基づいて、球対称collapseを仮定して距離を推定した

各 Pop III star の、mini-haloから出た後の銀河系中心からの距離は、右の運動方程式で書ける。(M<sub>in</sub>: 半径r<sub>s</sub>内の総質量、l<sub>s</sub>: 星の角運動量/質量)

$$\frac{d^2 r_s}{dt^2} = -\frac{GM_{in}(r_s, t)}{r_s^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} r_s + \frac{l_s^2}{r_s^3}$$



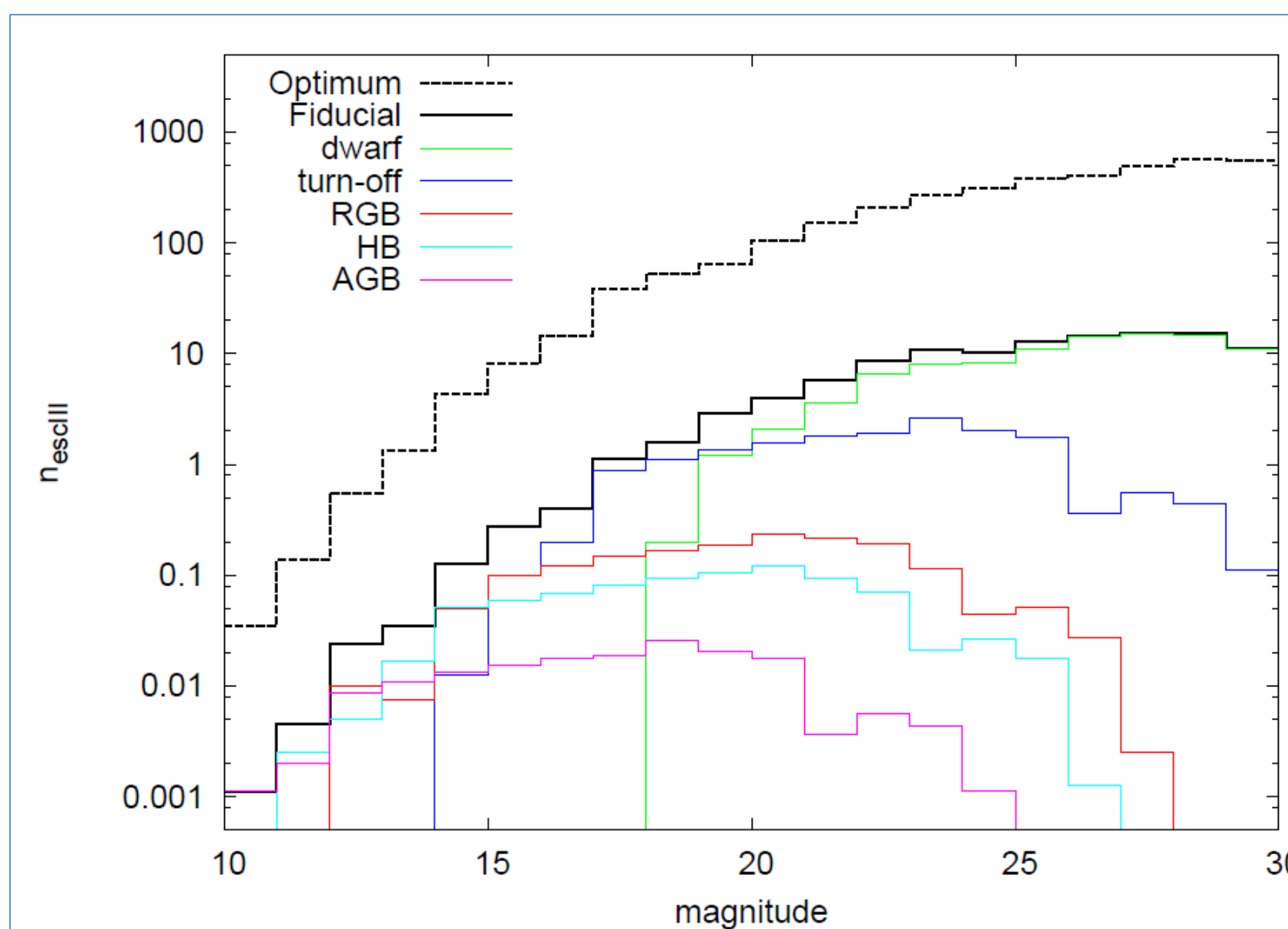
Mini-halo から出た後の、escaped Pop III star の軌道。銀河中心からの距離の、時間進化を示した。黒線は銀河系haloのvirial 半径

Escaped Pop III starは最初は宇宙膨張に乗って遠ざかるが、大半は再び銀河系ハローに落ちてきて、現在はダークハローの外縁部(r~100kpc)にいると予想される。その分布は、ダークマターハローの密度分布に近い。Escaped Pop III star の1割程度は、銀河系から1Mpc程度はなれた銀河間空間にいる。

Fiducial case (M<sub>md</sub>=10M<sub>⊙</sub>, n(q)=1, Duquennoy & Mayer 1991) の場合の Escaped Pop III star (青)と、escaped EMP star (赤)の銀河系中心からの距離分布。  
マゼンタ: Optimum case (M<sub>md</sub>=10M<sub>⊙</sub>, n(q) ∝ q<sup>-1</sup>, Rastegaev 2010) の escaped EMP star。  
緑: merger tree として、z<2 でmajor mergerの無いものを用いた場合。  
折れ線: stellar halo の分布。

Dark matter halo の密度分布と似た分布を示し、100kpc付近にいる星が多い。個数はIMFや連星のパラメータに依存するが、分布の形はほぼ変わらない。

### 観測可能性



予測されるescaped Pop III star の等級分布。黒の実線と破線は、Fiducial caseとOptimum case での全天における個数。球対称な空間分布を仮定した。色つきの線は、星の進化段階ごとに分けた場合(dwarf star, sub-giant, red giant, horizontal branch, asymptotic giant branch)のそれぞれの個数。

銀河系外縁部のescaped Pop III star は、主系列ならV~25等、巨星に進化した星なら20等程度の明るさを持つ。SDSS (I<21.3mag)やHyper Suprime-Cam survey (I<26mag) の画像にはこれらの星がとらえられていることが期待される。

Prime Focus Spectrograph では21 - 22等程度までR~3000の多天体分光が可能であり、Pop III star 候補星を探すうえで強力な手段となる。

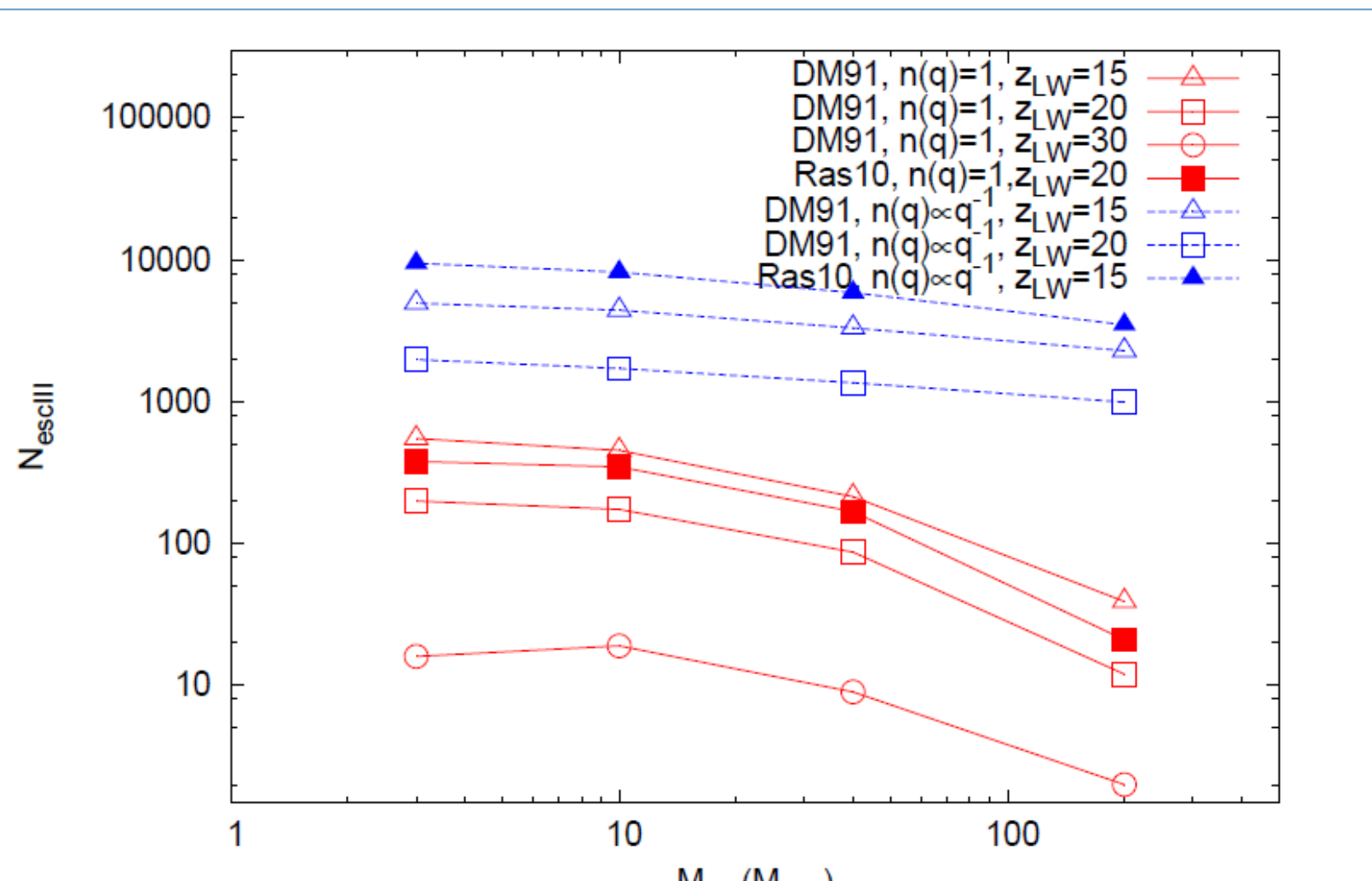
銀河系halo で**20等前後の巨星を観測すれば、10000個に1個程度の escaped Pop III star**があると予想される(個数は±1桁程の不定性がある)。また、主系列星でも、太陽系近傍を通りかかっている星なら20等程で観測できる。こうした星の運動は、銀河系外縁部まで達する軌道を持つと予想されるので、Gaiaの観測から候補星を絞ることができる。

Pop III star とEMP star をはっきり区別するには、高分散分光による追観測が必要となる。Thirty Meter Telescope での高分散分光観測が可能になれば、PFSで選んだPop III star 候補の数十天体を高分散観測することにより、Pop III star を発見できることが期待できる。



### 個数

連星質量比・軌道の分布が近傍の星と同程度であり、IMFは大質量星が多いとした場合、10<sup>6</sup>M<sub>⊙</sub>のmini-haloで生まれる低質量星の5~20%程度が、mini-haloの外へと飛び出す。この割合は、Pop III star のIMFや、連星の質量比・軌道分布、そしてPop III star が生まれるmini-haloの質量に依存する。



銀河系のbuilding blockとなったmini-haloから飛び出した、escaped Pop III star の数の推定値。横軸はPop III の典型的な質量M<sub>md</sub>、点種は連星の質量比分布 n(q), 周期分布(Duquennoy & Mayor 1991 or Rastegaev 2010), Lyman-Werner feedback が効き始める赤方偏移 z<sub>LW</sub>、といったパラメータへの依存性。

典型的には数百個、最大で一万個程度のescaped Pop III star が銀河系近傍にいることが期待される。

また、Pop III star の数十倍の数のEMP starも、同様にしてmini-haloから飛び出したと考えられる。