

初代星は銀河系内のどこに生き残っているか？

石山智明（千葉大学）

須藤佳依、横井慎吾、富永望、須佐元（甲南大学）

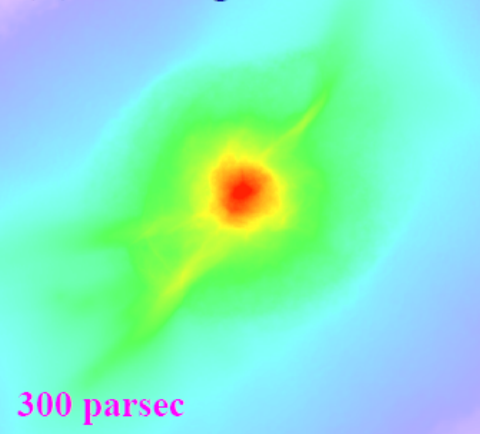
長谷川賢二（名古屋大学）

初代星形成過程

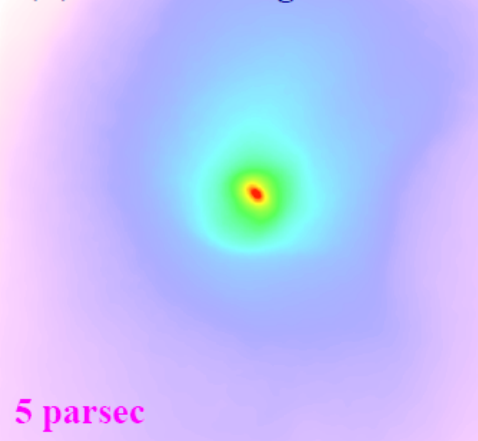
- ダークマター密度揺らぎの重力崩壊による、ダークマターハローの形成
- ある程度大きいハローでは ($10^5 \sim 10^7 M_{\text{sun}}$)、ビリアル温度が十分高く ($> \sim 3000 \text{ K}$)、水素分子冷却が効率よく働き、始原ガスが収縮 \rightarrow 原始星の誕生
- 質量降着により主系列へ
- 星からの紫外線輻射による成長の自己抑制

さまざまな形成環境 & 複雑な物理過程
 \rightarrow 多様な初代星質量 ?

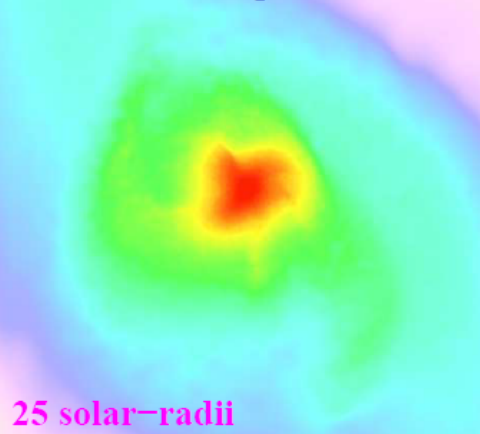
(A) cosmological halo



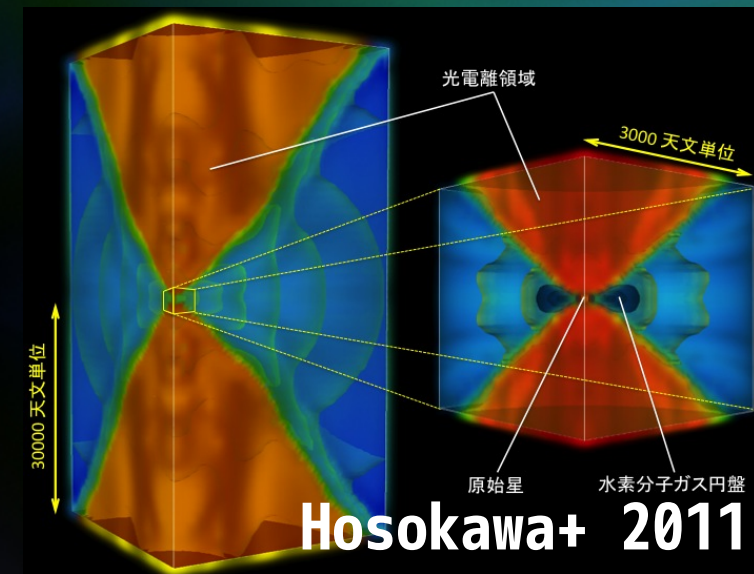
(B) star-forming cloud



(D) new-born protostar

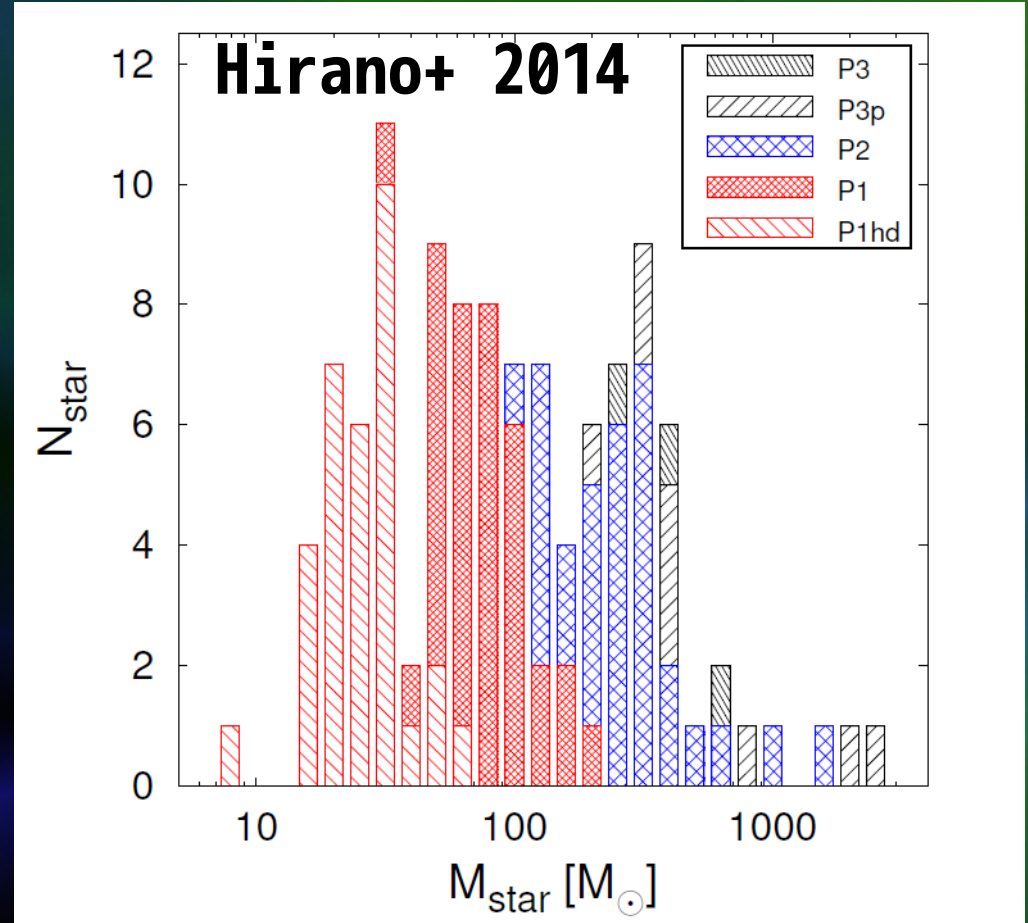
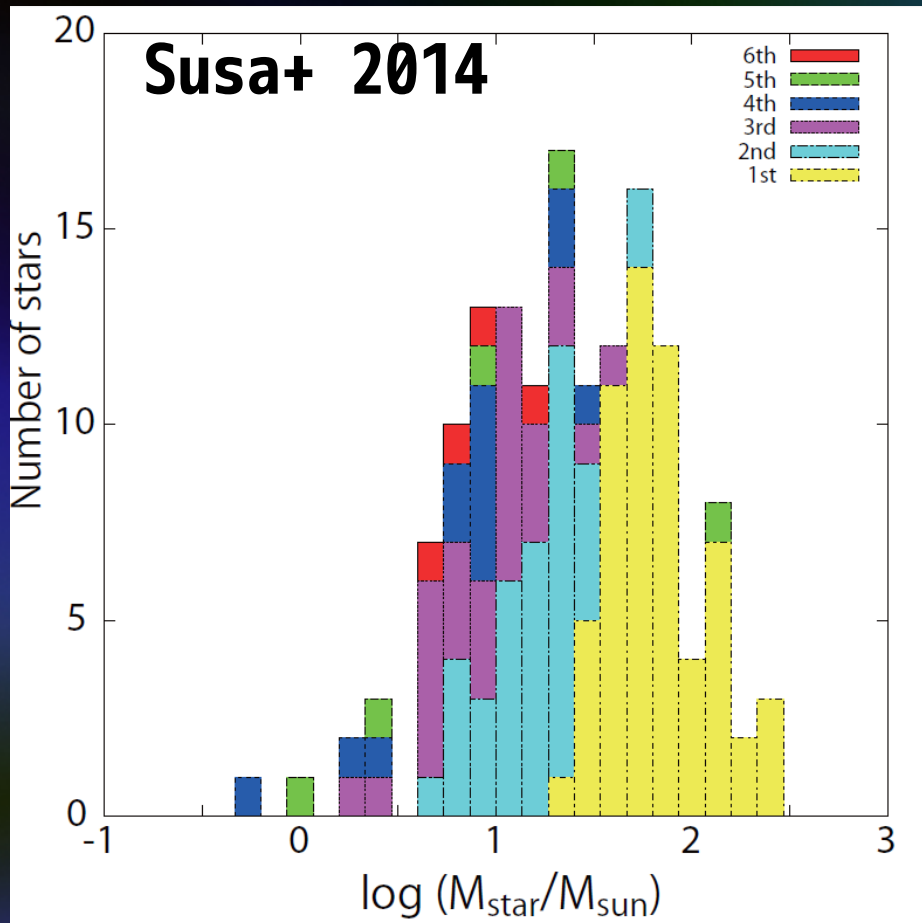


(C) fully molecular part



初代星 IMF

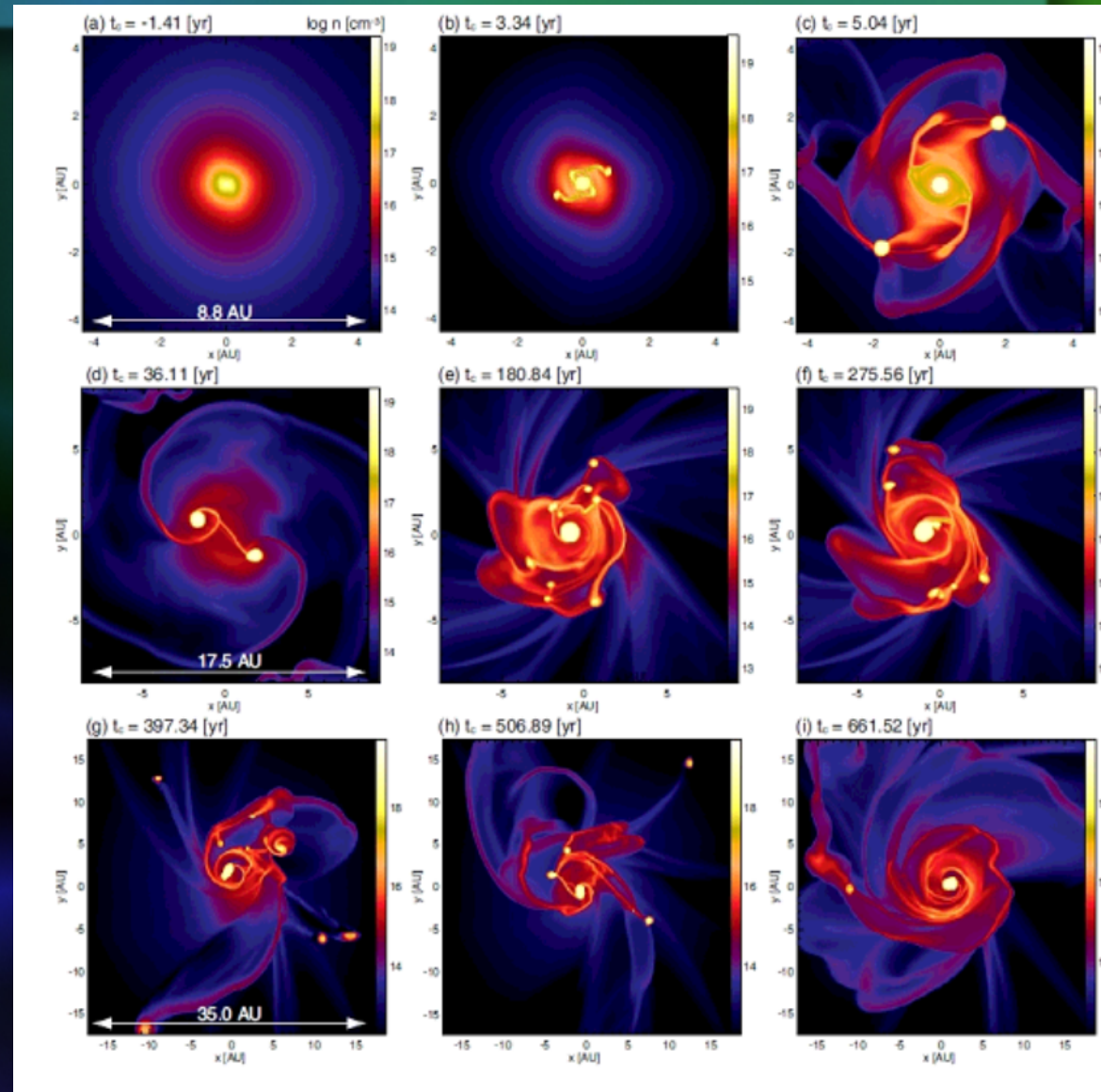
- 非効率な冷却 → ジーンズ質量大 → 大質量星 ($\sim 100M_{\text{sun}}$)



- とにかくさまざまな初代星の形成を、密度揺らぎから質量降着の段階まで輻射流体シミュレーションで追うと…… → **多様な星質量**
 - ただし fragmentation @ 20-30AU は追えていない

fragmentation の重要性

- Fragmentation @ $<20\text{AU}$
- 重力多体反応でいくらかはハローの外に放出される
- 中心星と合体する星もいるが、1/3程度は生き残る？ (Greif+ 2012)
- **0.8 Msun** より小さければ、現在まで生き残れるほど長寿命



Machida and Doi 2013, 高分解能
シミュレーション (積分時間は短い)

本研究

- 現在まで生き残ることが可能なほどの、低質量の初代星の存在が示唆されている ($< \sim 0.8 M_{\text{sun}}$)
- PFS 等による観測から初代星 IMF に制限をつけるために……
→ 銀河系内のどこにどれくらい生き残っているか？
- 初代星はミニハローの中で生まれる
→ $z=0$ の銀河ハローの中にミニハローがどう取り込まれているかが重要なヒントになりそうである
- ミニハローを分解しつつ、銀河ハローの成長を追うことができる規模の宇宙論シミュレーションが可能になってきた
 - 初代星の空間分布はシミュレーションから直接
 - 初代星の形成はハローの merger tree の上で簡単にモデル化

宇宙論的 N 体シミュレーション

$z=0$

- 2048^3 particles
- 8Mpc/h Box
- $m=5.13 \times 10^3$ Msun/h
- softening 120 pc/h
- Planck Cosmology
- $z=127$ to 0
- GreeM TreePM code (Ishiyama+ 2009, 2012)
- アテルイ @NAOJ



(c)CfCA,NAOJ

初代星ミニハローの選択

- friends-of-friends 法でハローを同定 ($b=0.15, 0.2$)、merger tree を作成 (Ishiyama+ 2015)
 - 最小ハロー質量は $1.64 \times 10^5 \text{ Msun}/h$ (32 粒子)
 - 10^{12} Msun 以上のハローは 5 つ形成

- 初代星ミニハローの条件

1. ビリアル温度 $> T_{\text{vir}}^{\text{crit}}$

$$\left(\frac{T_{\text{vir}}^{\text{crit}}}{1000}\right) \approx 0.36 \left[(\Omega_b h^2)^{-1} \left(\frac{F_{\text{LW}}}{10^{-21}}\right) \left(\frac{1+z}{20}\right)^{3/2} \right]^{0.22}$$

- Lyman-Werner 輻射場下におけるコラプス条件 (Machacek+ 2001)
- $F_{\text{LW}}(z)$ はシミュレーションの結果を用いる (Ahn+2012, 一様、 z 依存)

2. 上の条件を満たしたハローを progenitor にもたない

- Metal free

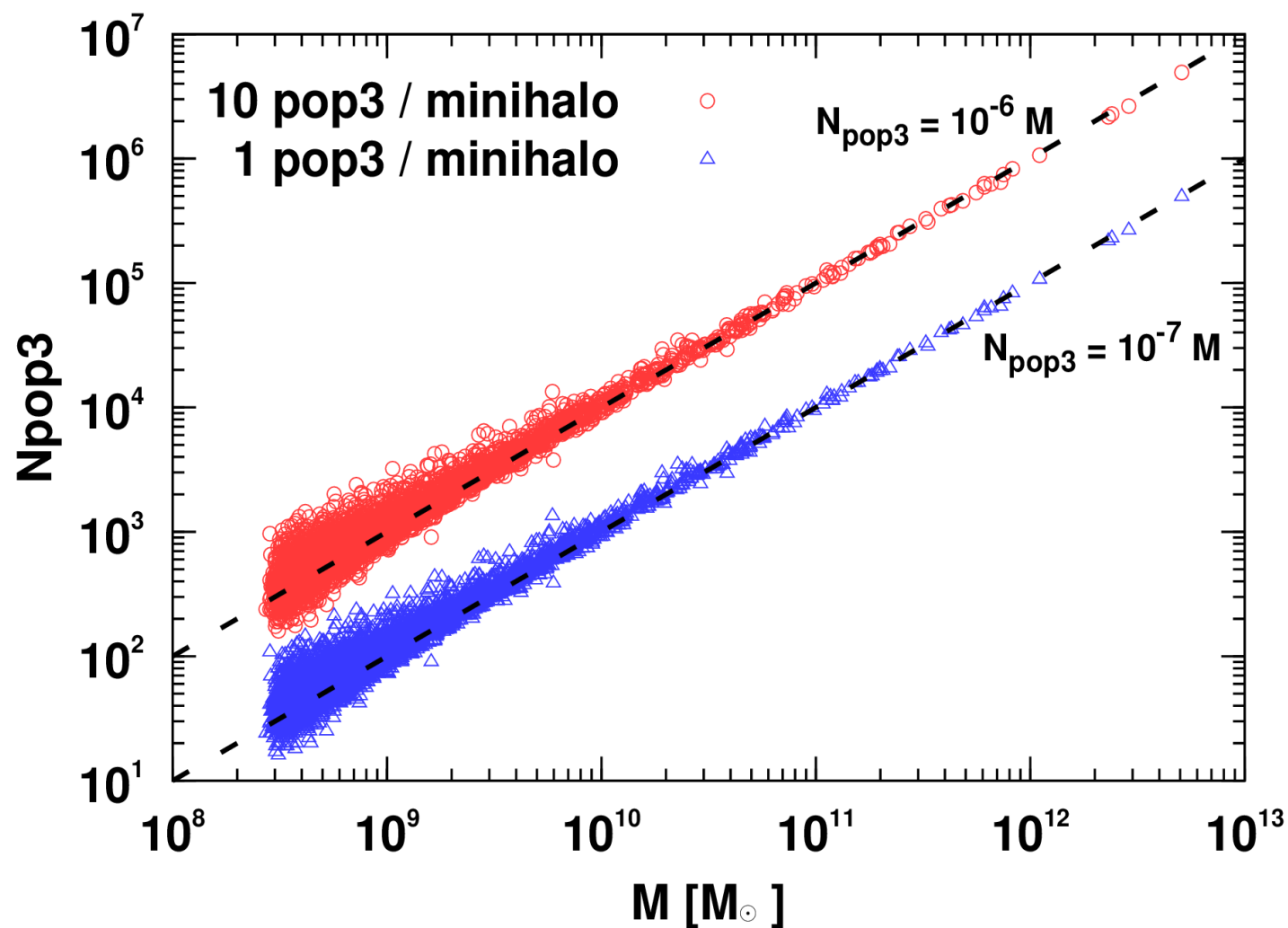
3. $z > 10$ でコラプス

- 再電離前

$z=0$ における、ハローあたりの初代星の数

1. ミニハローあたり 10 (1) 個の初代星ができると仮定する

・ Kroupa IMF, $0.15 \sim 1.0 M_{\text{sun}}$



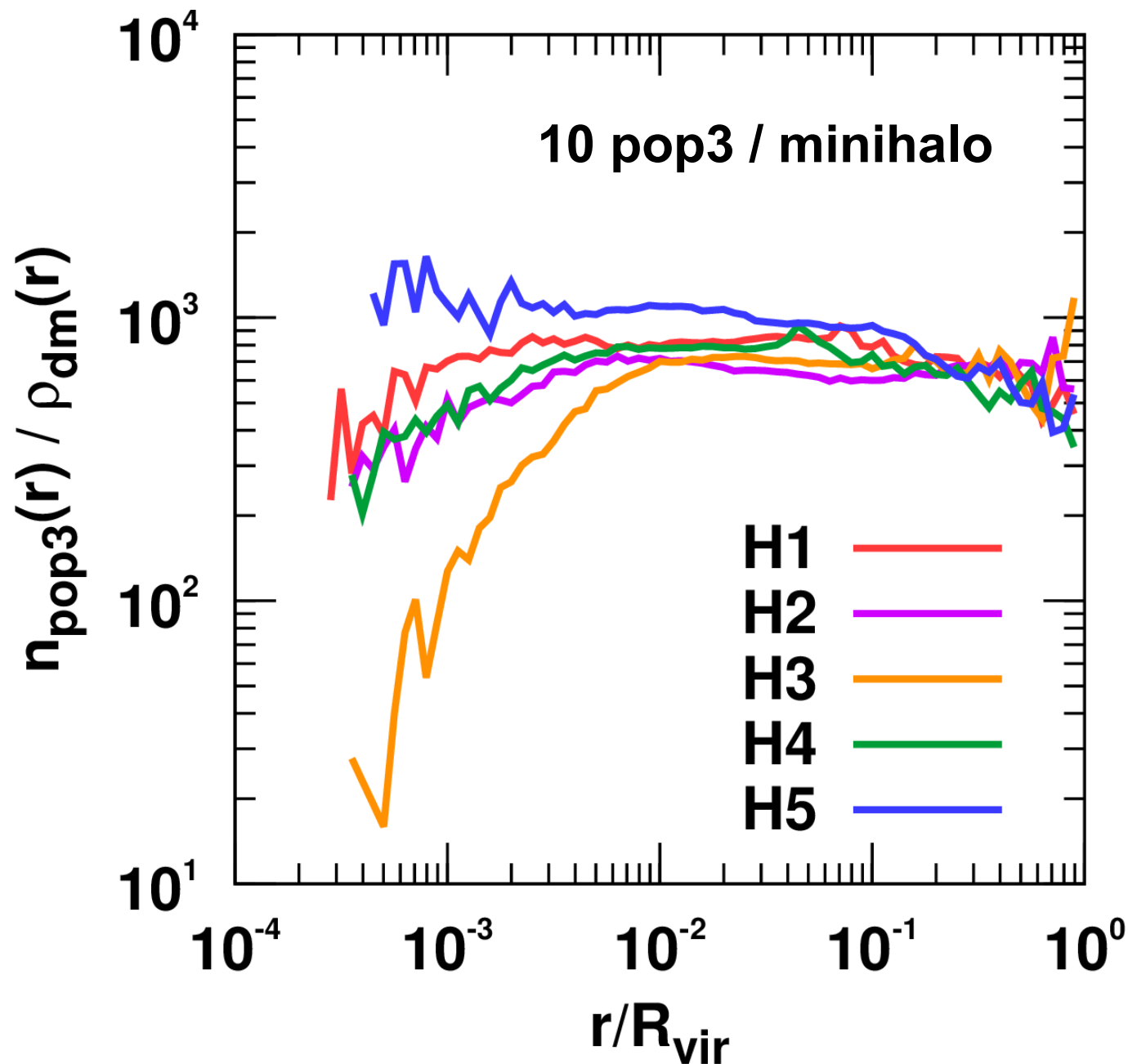
2. ミニハローを構成する
ダークマター粒子から
ランダムに 10(1) 個選
び、初代星の
トレーサーとする

3. $z=0$ でその粒子を
さがす

- ハローあたりの
初代星の数は
ハロー質量に比例
- ミニハローあたりの
初代星の数にも比例

空間分布 (radially averaged)

- 初代星は大雑把には、背景のダークマターと同じように分布する



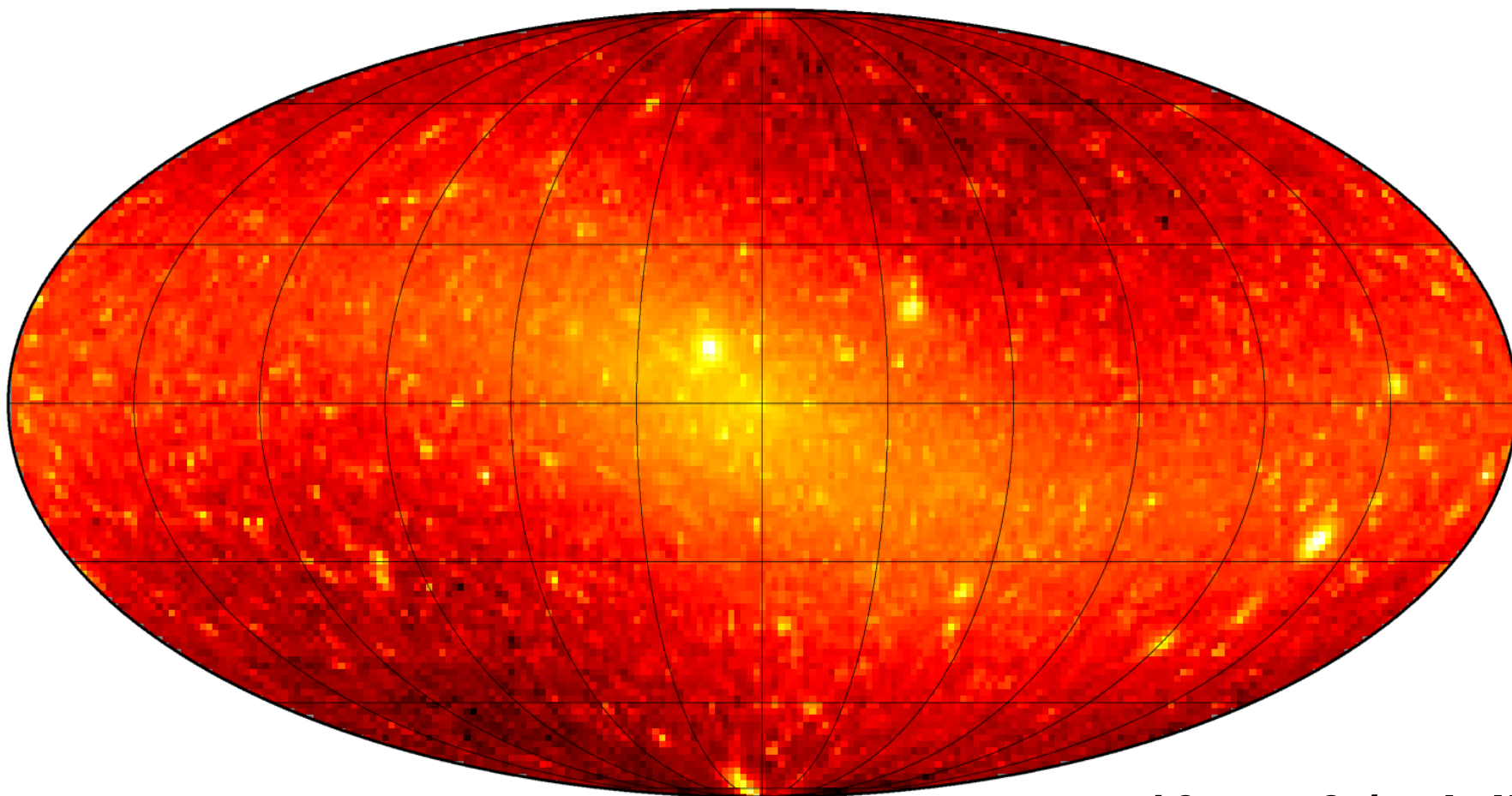
空間分布 (全初代星)

- 等時曲線を用いて、初代星の質量と形成時刻から、各バンドの現在の等級を計算
- あるひとつのハロー ($\sim 10^{12} M_{\text{sun}}$) の中心から 8.5kpc に観測者を置く



$\log N_{\text{popiii}}$

銀河中心とサブハロー
に初代星は集中する傾向



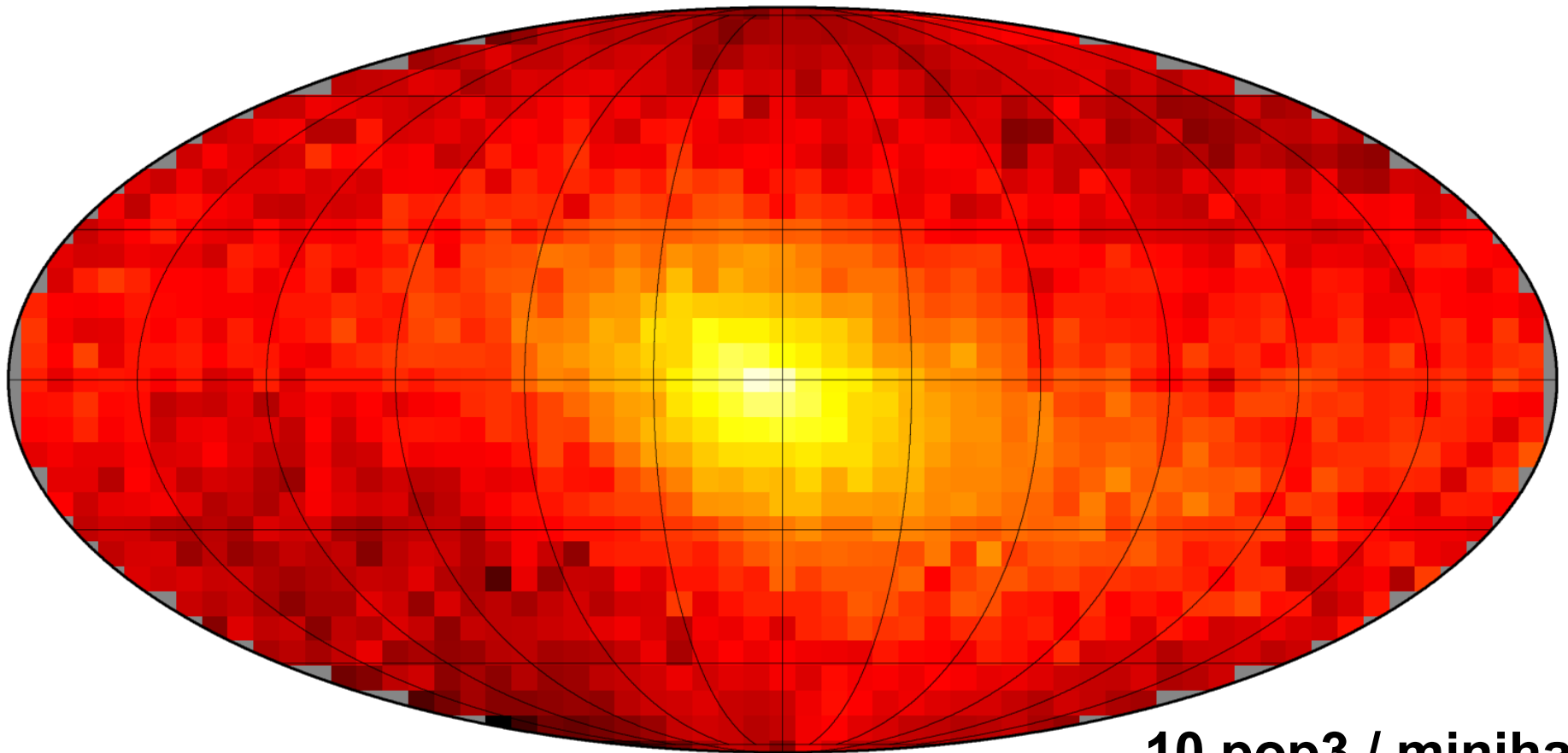
10 pop3 / minihalo

空間分布 (Mv < 22.5 に限定)



log Npopiii

注：一枚前の図とは
カラーのつけ方が異なる

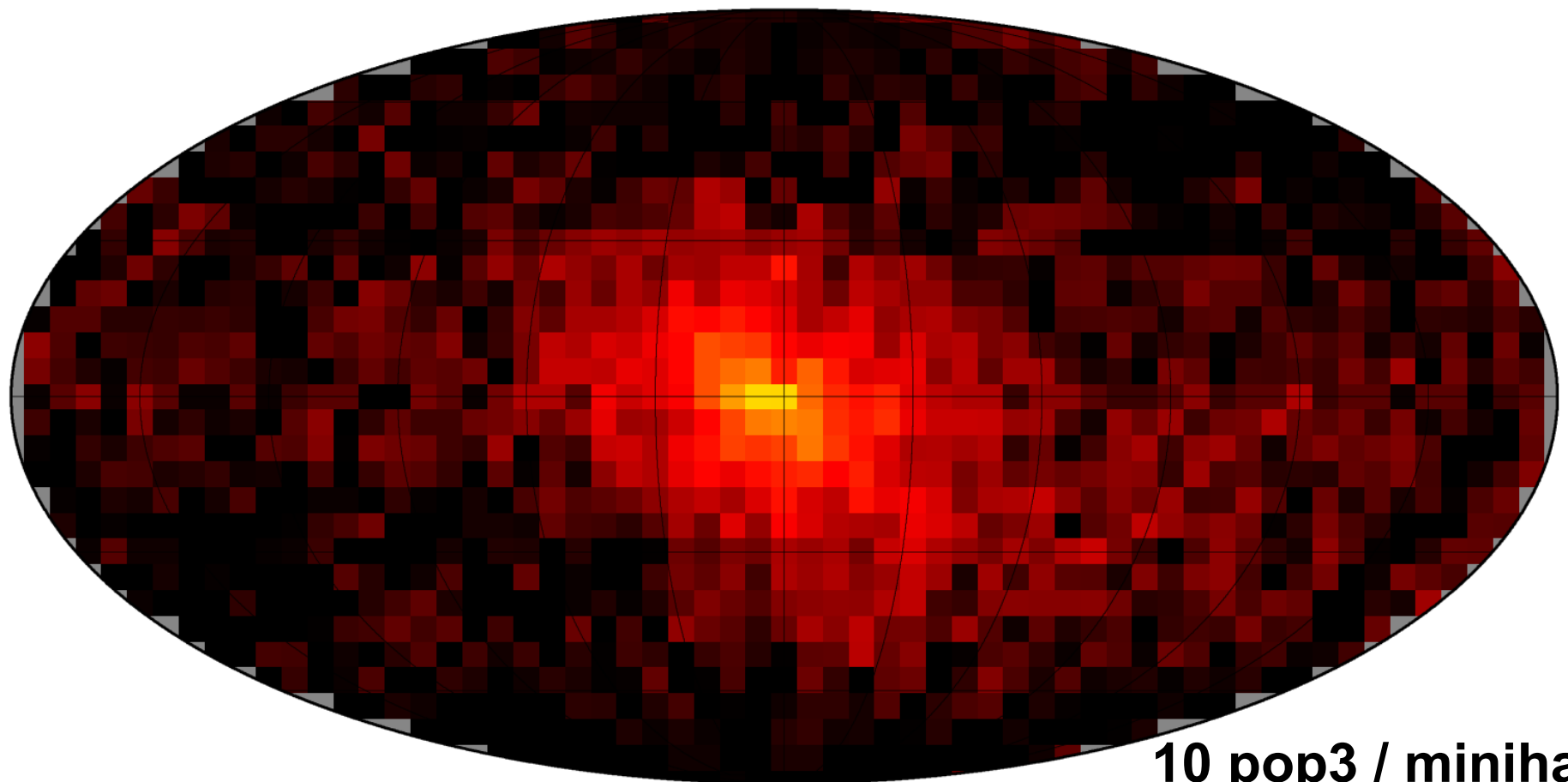


10 pop3 / minihalo

空間分布 (Mv < 20 に限定)



銀河中心方向に集中する傾向にあるが……



銀河系モデル

- **モデル A (Robin+ 2003)**

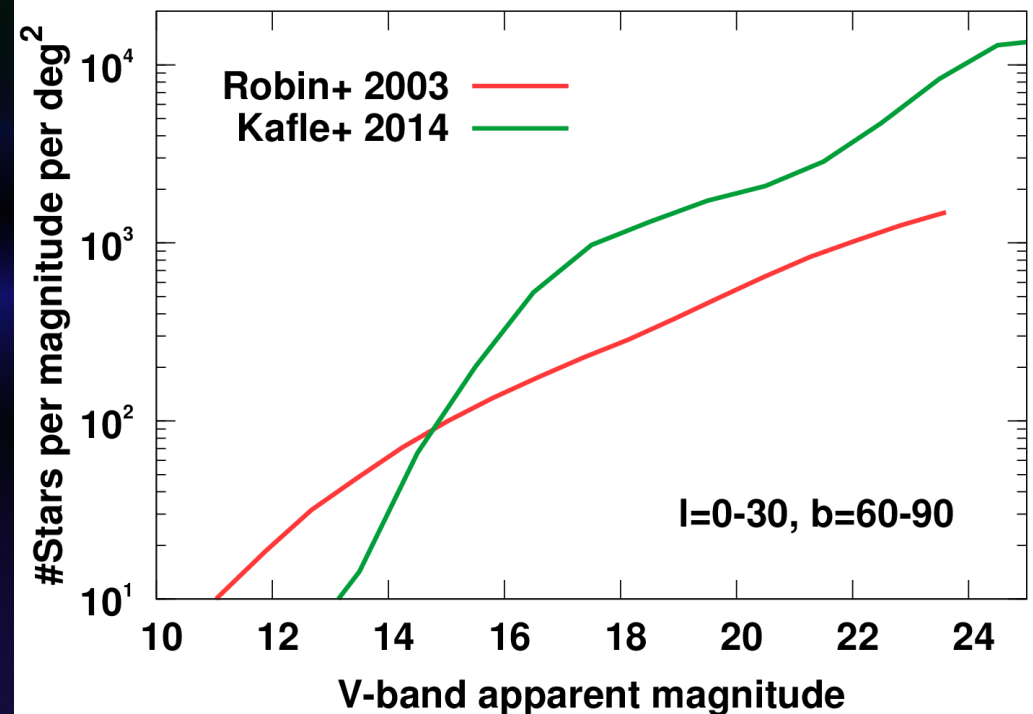
- 著者グループ作成の WEB form から (<http://model.obs-besancon.fr/>)、個々の星の空間分布と等級を得ることができる

- **モデル B (Kafle+ 2014 & McMillan 2011)**

- ディスク、バルジの密度プロファイルは Kafle+ 2014 のモデル
- ハローは McMillan 2011 のモデル

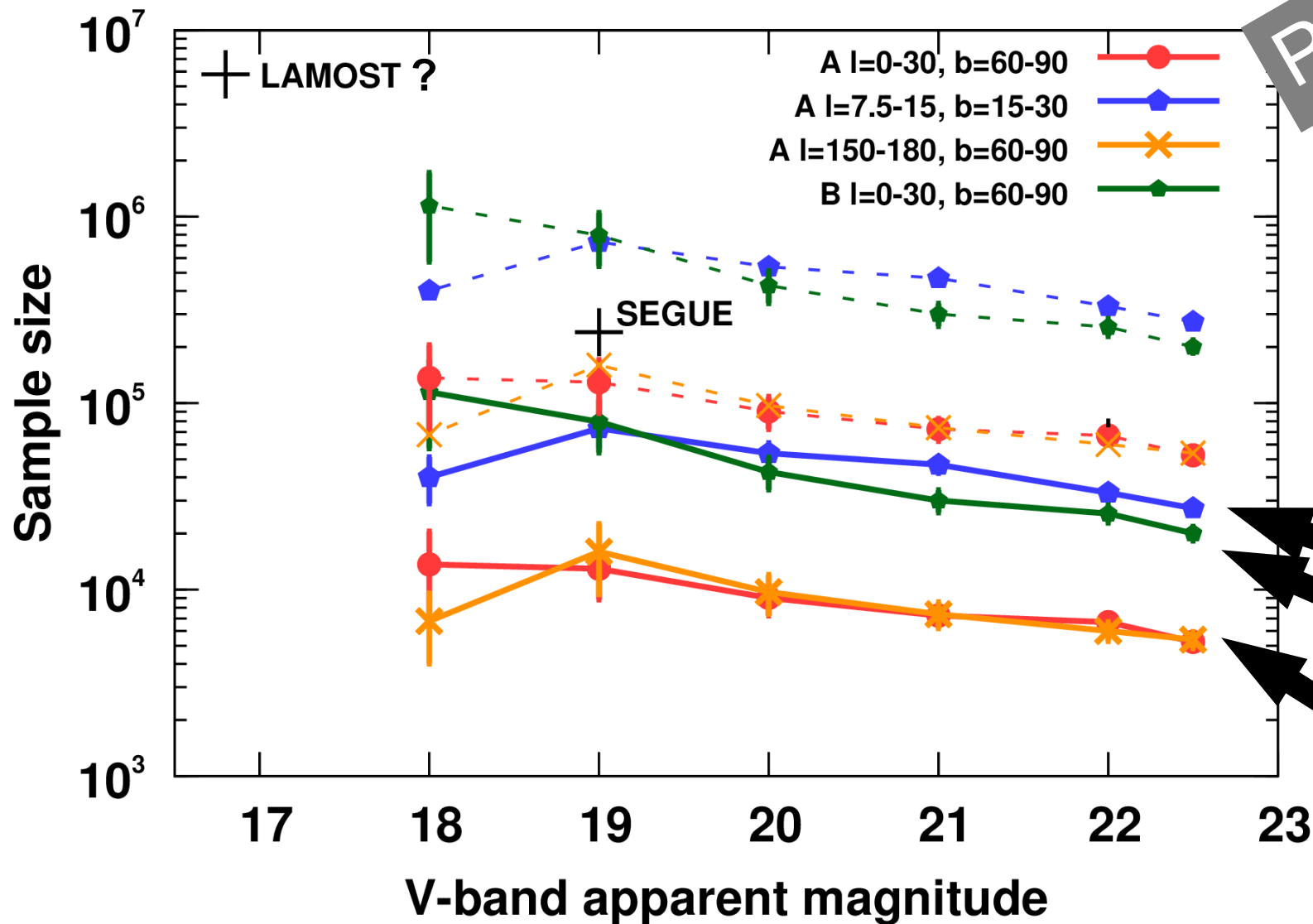
- モデルからは直接等級を得られないので簡単に全ての星を $0.36 M_{\text{sun}}$ (Kroupa IMF の characteristic mass) とし、mass-luminosity relation から等級を計算

3 ~ 4 倍の不定性



銀河系の星の数 / 明るい初代星の数 (Mv より明るい)

Preliminary



実線 :
10 pop3/
minihalo

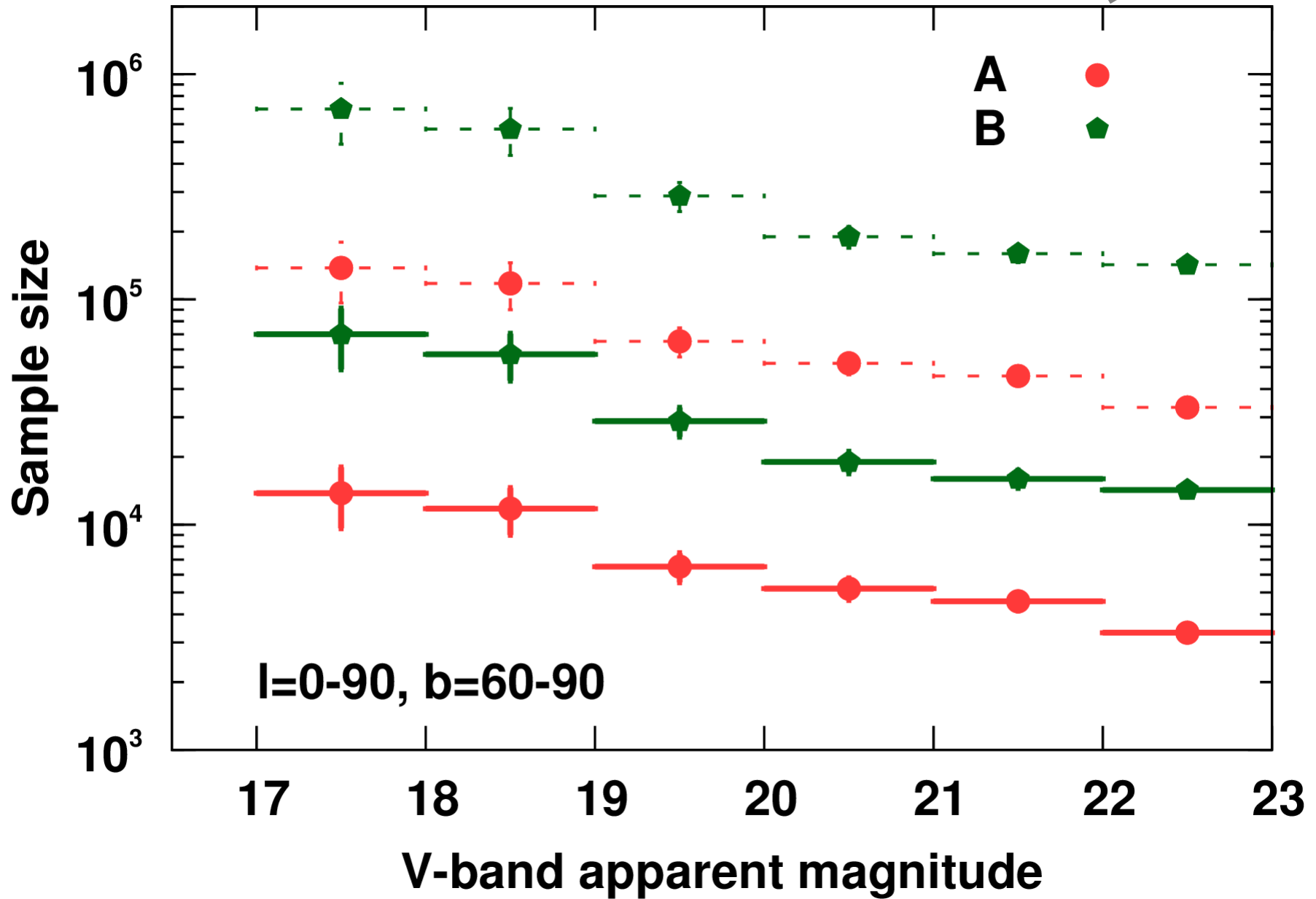
破線 :
実線を 10 倍

A: 銀河中心
B: 高銀緯
A: 高銀緯

- SEGUE で初代星が見つかっていないとすると、ミニハローあたり小質量の初代星が数個以上形成する IMF は既に棄却されている？

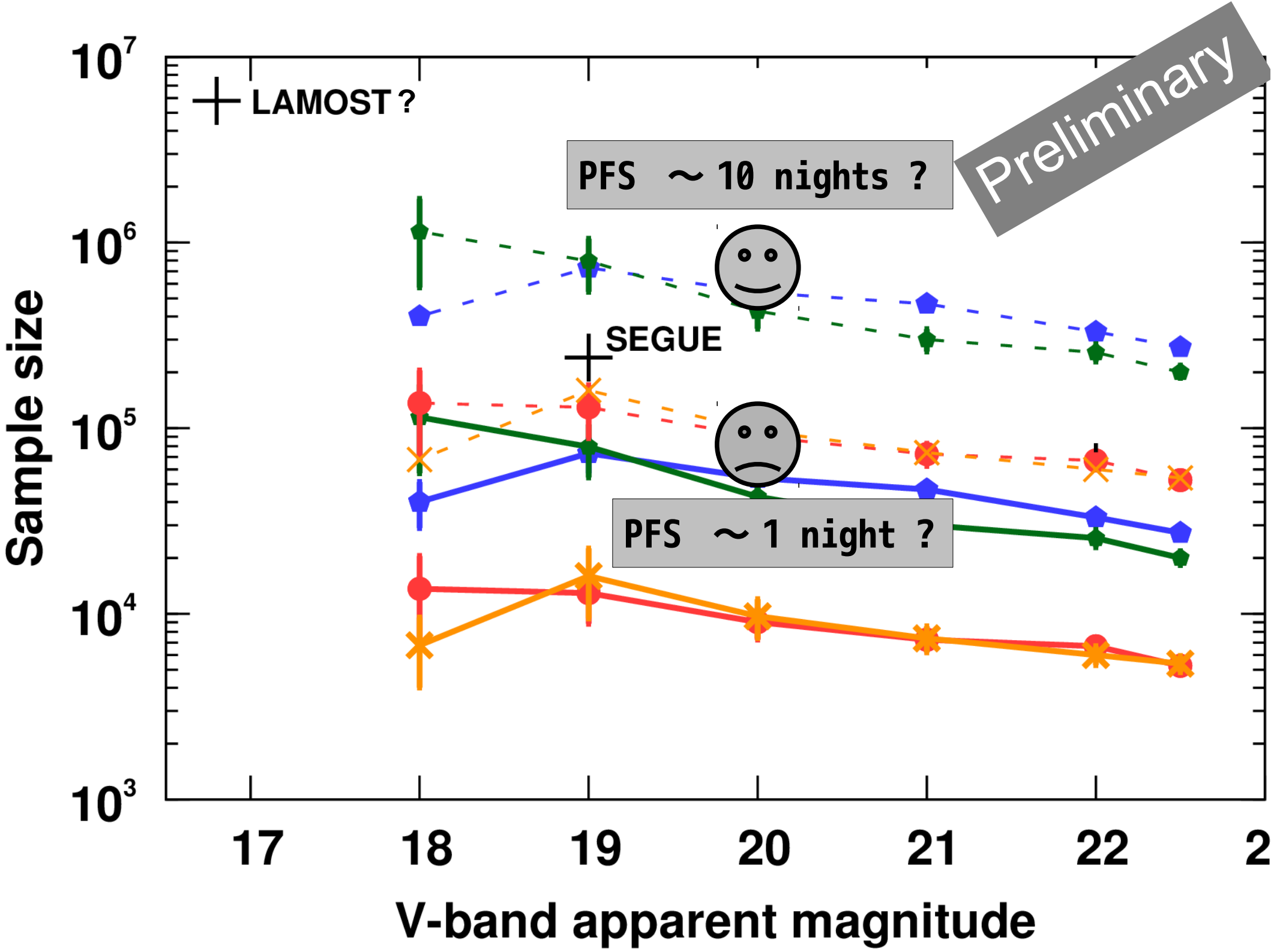
V-band 等級あたりの数

Preliminary



議論

- Sample size の M_v 依存性は弱いので、積分時間が短い
明るい星を観測するのがよさそう
- $\sim 1000 \text{ stars/deg}^2$ @ $M_v \sim 22$ 、 $l=0-30^\circ$ 、 $b=60-90^\circ$
 - ファイバー充填率がよい？
 - 撮像観測でターゲットを絞る必要がない？
- Future work
 - ダスト減光の効果
 - 初代星への質量降着によるメタル汚染
 - 初代星粒子のパスがわかるのでモデル化可能
 - Streaming velocity (Tseliakhovich & Hirata 2010)
 - 初代星の形成時期が遅れる (e.g. Greif+ 2011) ?
 - Halo-to-halo variation



まとめ

- 階層的構造形成に基づき、 $z=0$ における銀河ハロー内の初代星の分布を調べた
 - 空間分布は宇宙論的シミュレーションから直接
 - 初代星の形成はハローの merger tree の上で簡単にモデル化
- 初代星はダークマターと同じように分布する
- 銀河中心方向が一番多いが、通常の星が多すぎるため、高銀緯領域が観測に適している
- これまでの観測から、ミニハローあたり小質量の初代星が数個以上形成する IMF は既に棄却されている？
- **PFS で世界で初めて初代星の IMF に強い制限 !!!**
 - **Pop3 Finding Survey with PFS (PFS²)**
 - **Project For Searching (P) First Star with PFS (PFS³)**