

銀河の中に生き残った 初代星の分布

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）

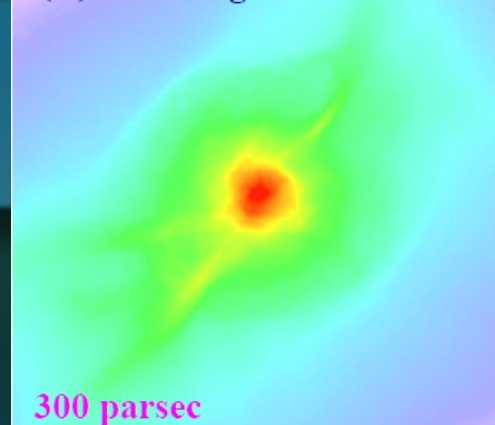
Ishiyama et al., ApJ, in press (arXiv:1602:00465)

初代星形成過程

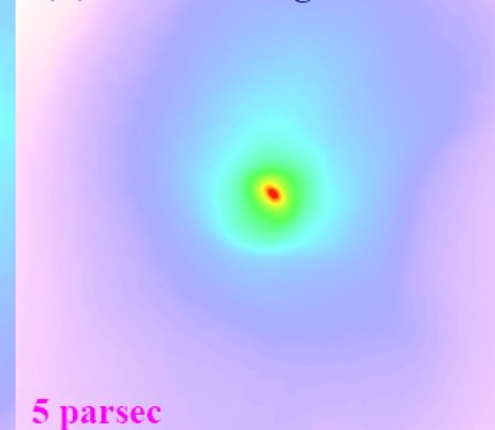
- ダークマター密度揺らぎの重力崩壊による、ダークマターハローの形成
- ある程度大きいハローでは ($10^5 \sim 10^7 M_{\text{sun}}$)、ビリアル温度が十分高く ($> \sim 3000 \text{ K}$)、水素分子冷却が効率よく働き、始原ガスが収縮 → 原始星の誕生
- 質量降着により主系列へ
- 星からの紫外線輻射による成長の自己抑制

さまざまな形成環境 & 複雑な物理過程
→ 多様な初代星質量？

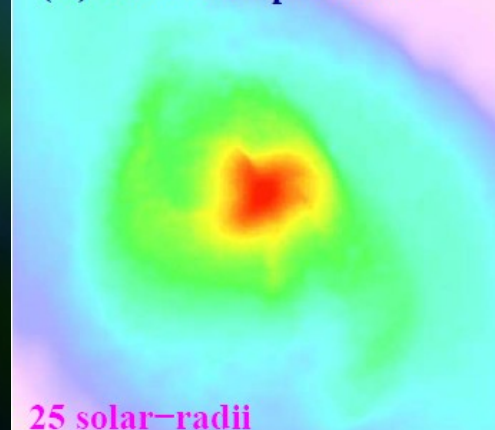
(A) cosmological halo



(B) star-forming cloud



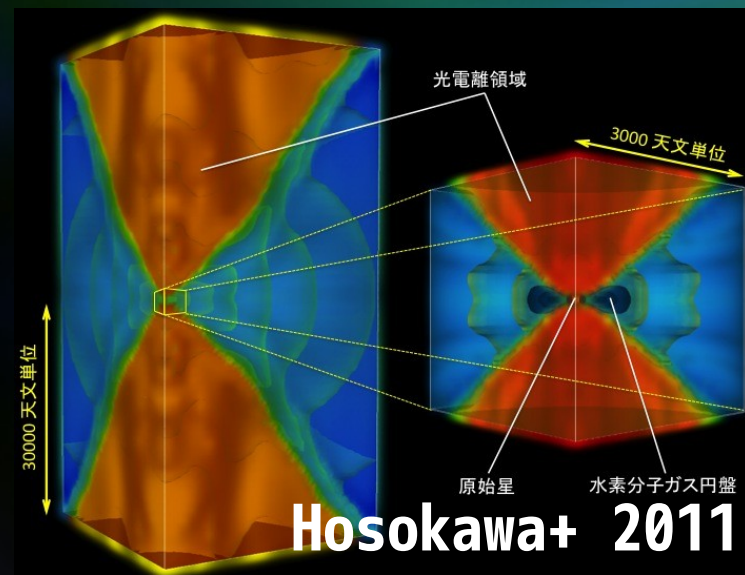
(D) new-born protostar



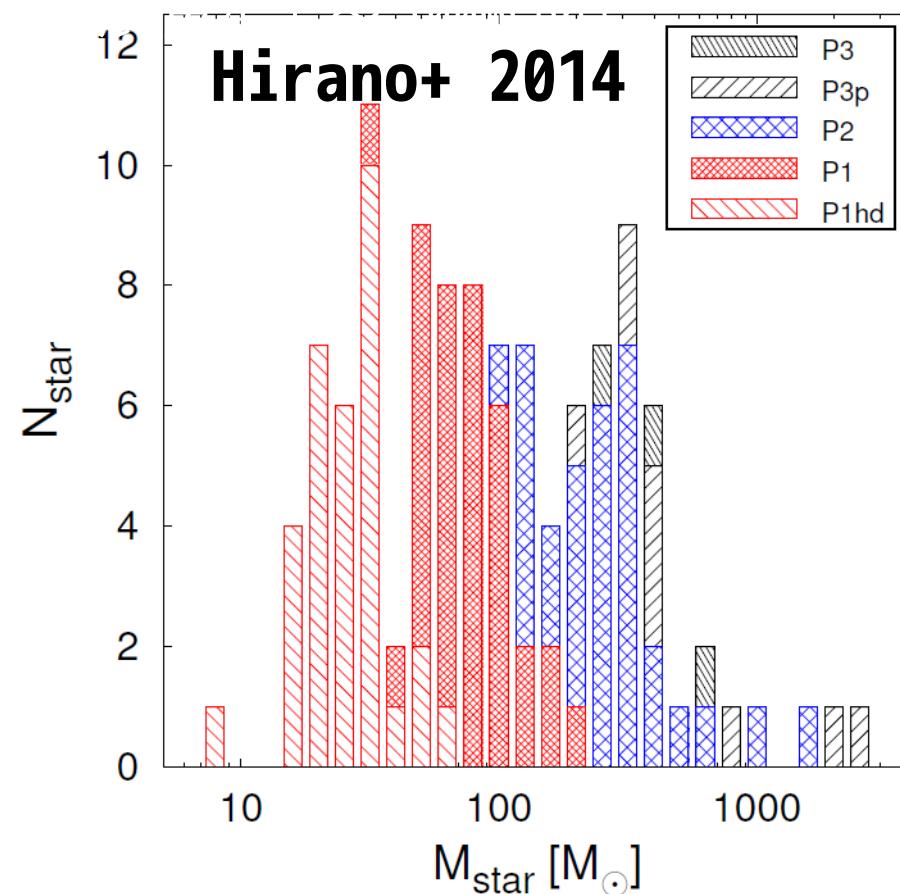
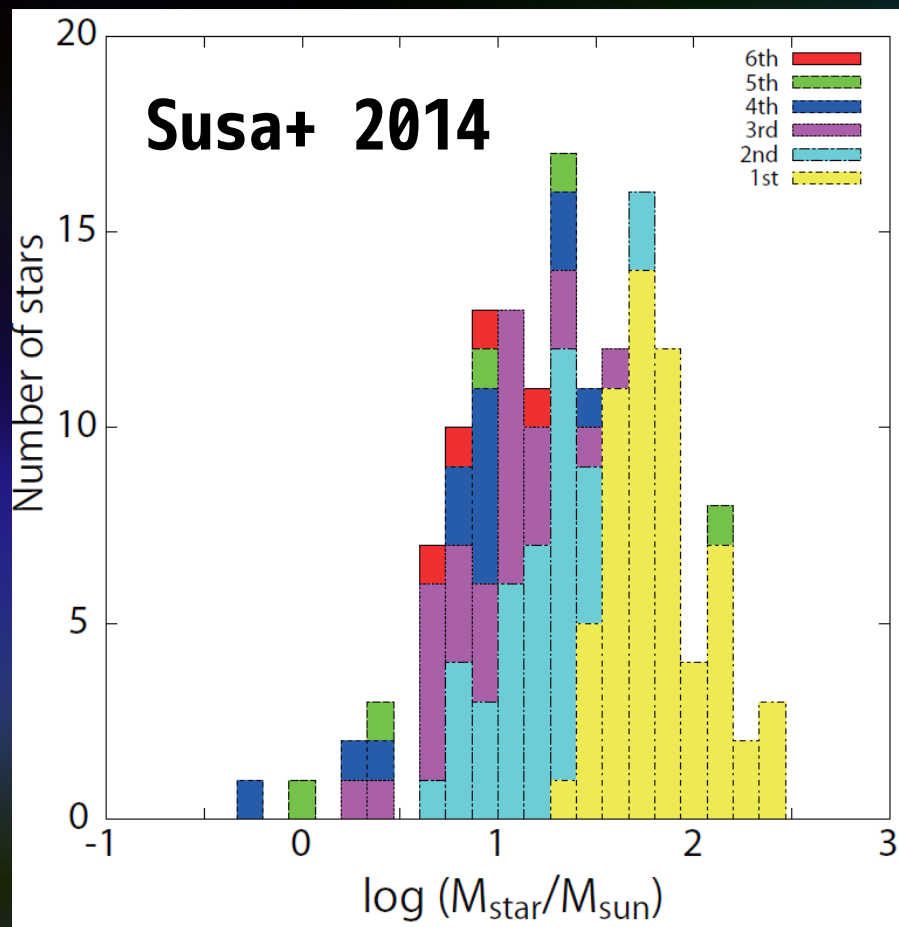
(C) fully molecular part



Yoshida+ 2008



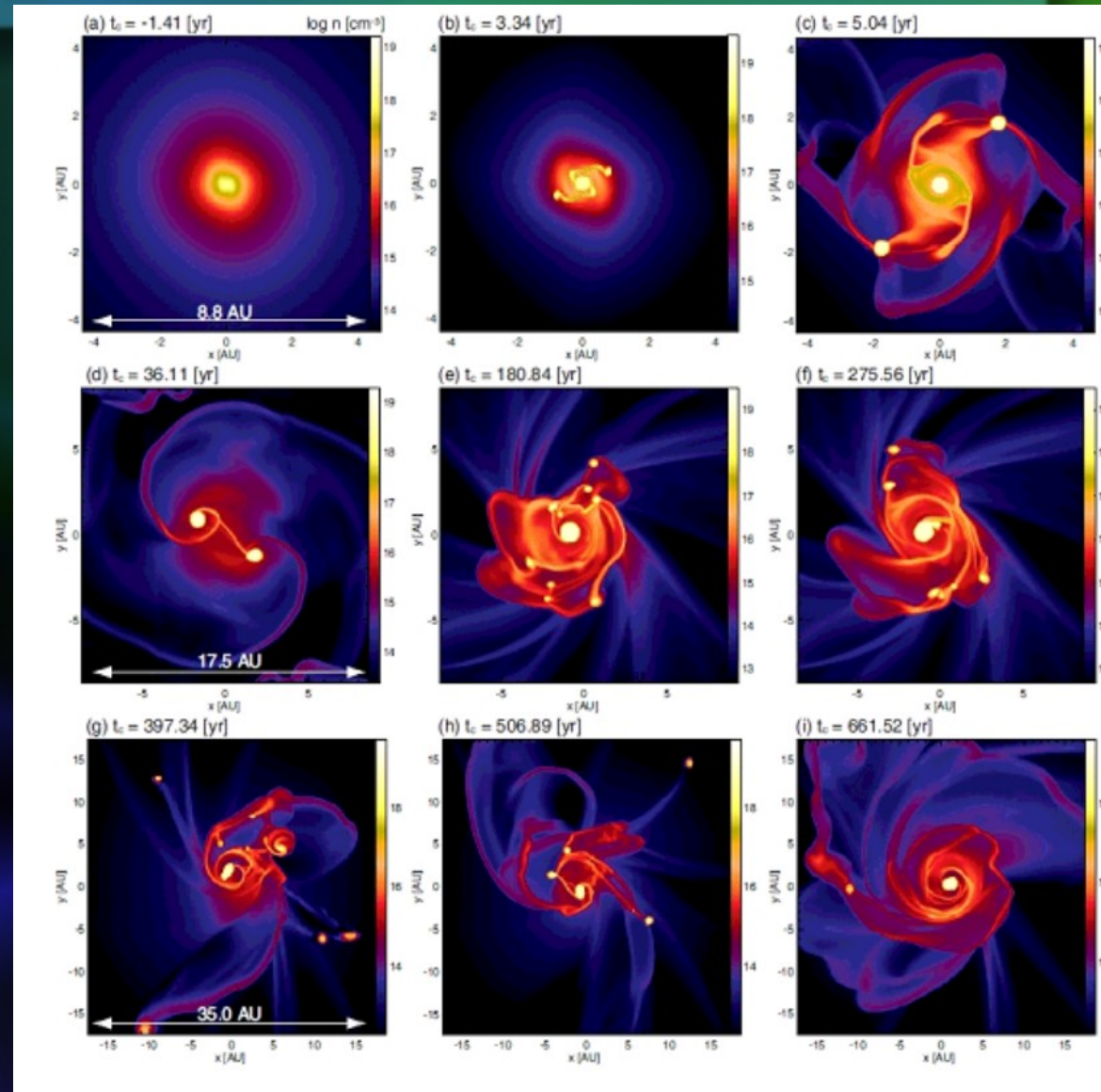
初代星 IMF



- 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 ($< \sim 0.8 \text{ Msun}$)
- 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？
- 初代星はダークマター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



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

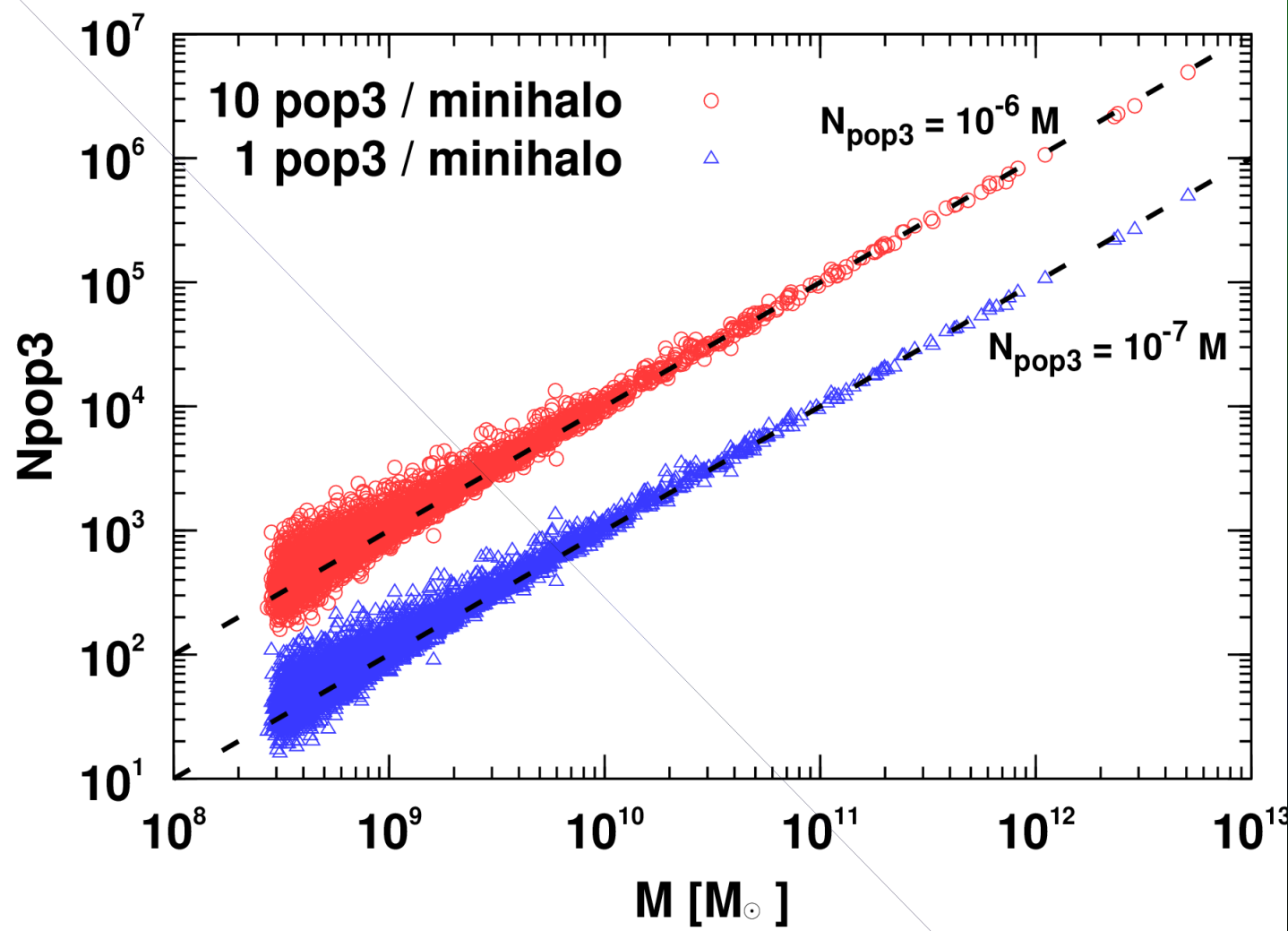
3. $z > 10$ でコラプス

- 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, $0.15 \sim 1.0 \text{ Msun}$



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

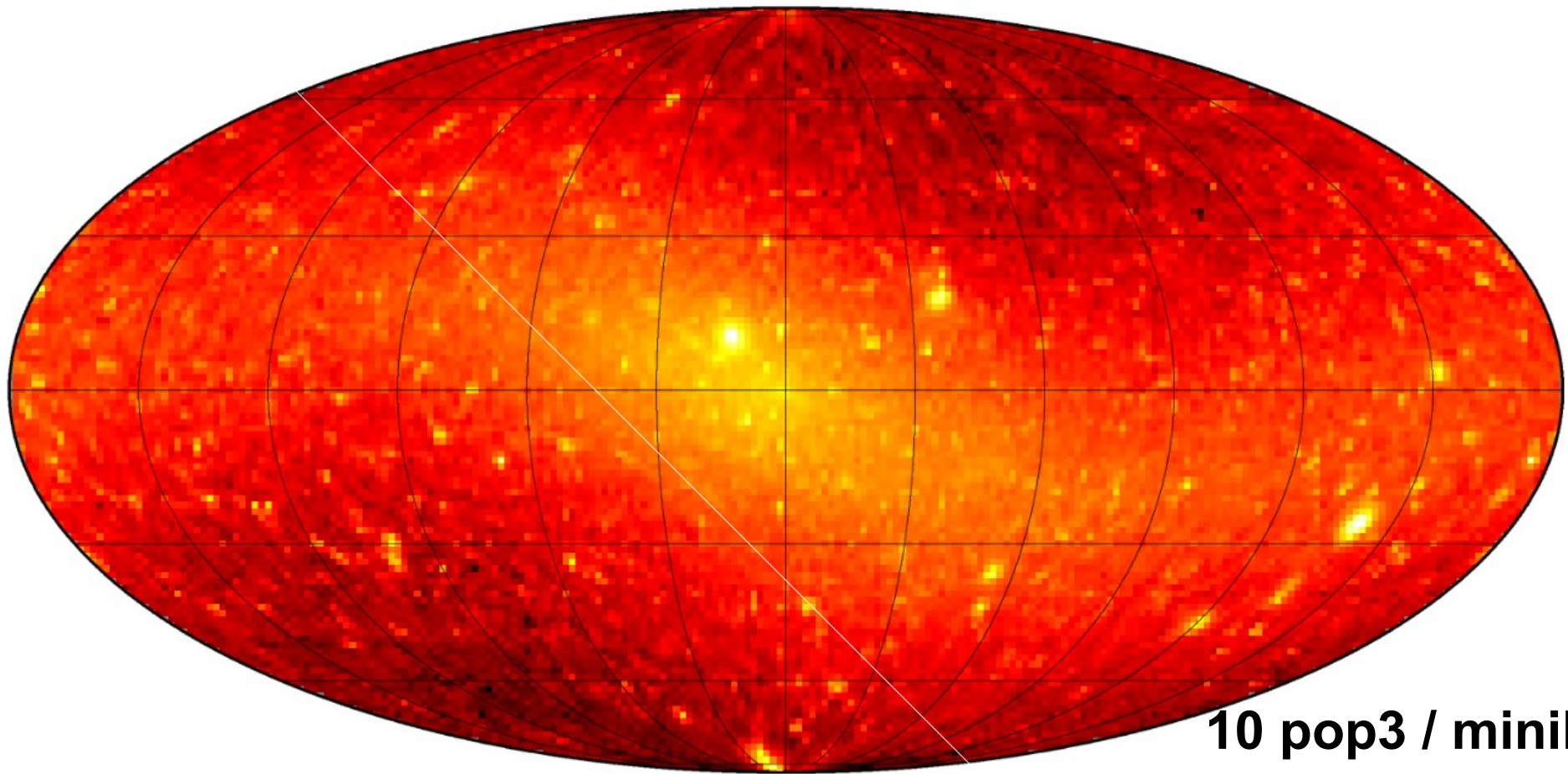
- ・ ハローあたりの
初代星の数は
ハロー質量に比例
- ・ ミニハローあたりの
初代星の数にも比例

空間分布（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（ $\sim 10^{12} \text{ Msun}$ ）の中心から 8.5kpc に観測者を置く



銀河中心とサブハロー
に初代星は集中する傾向

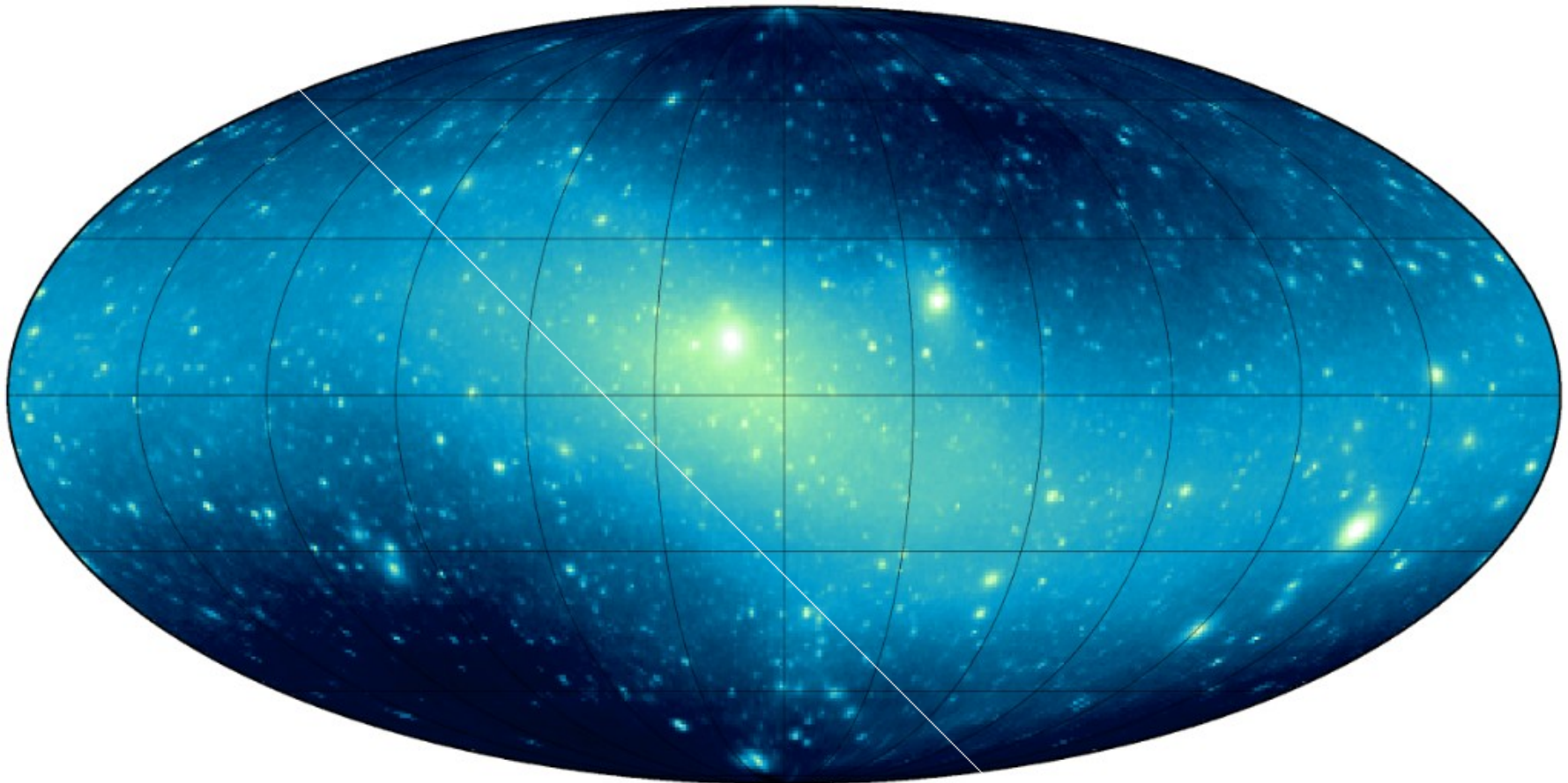


10 pop3 / minihalo

空間分布 (dark matter)



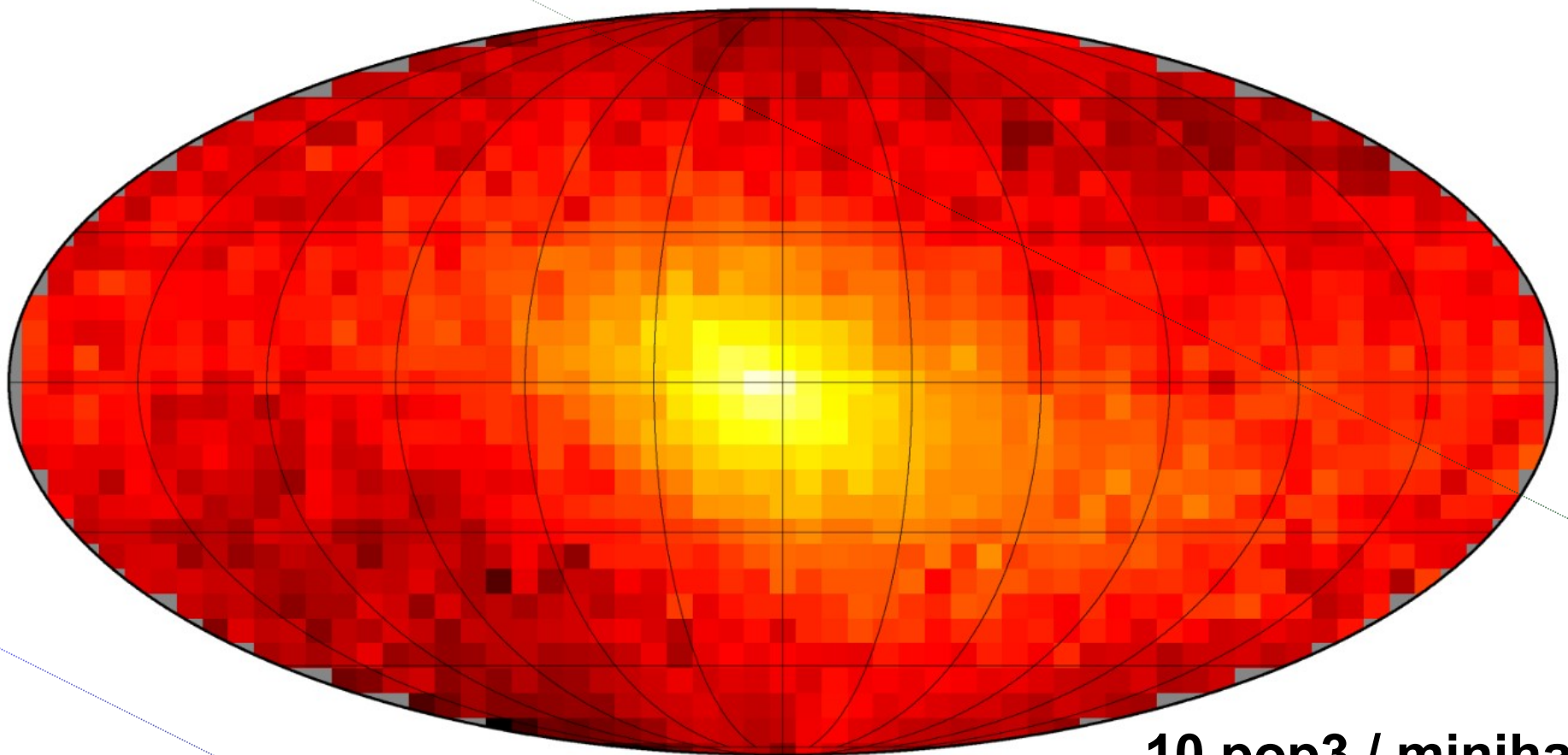
$\log \text{DM mass } [M_{\text{sun}} \text{ deg}^{-2}]$



空間分布 ($M_v < 22.5$ に限定)

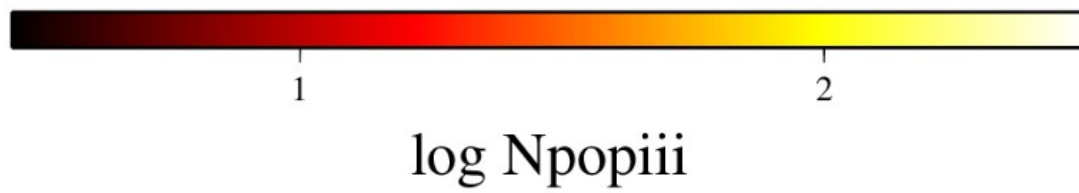


注：前の図とは
カラーのつけ方が異なる

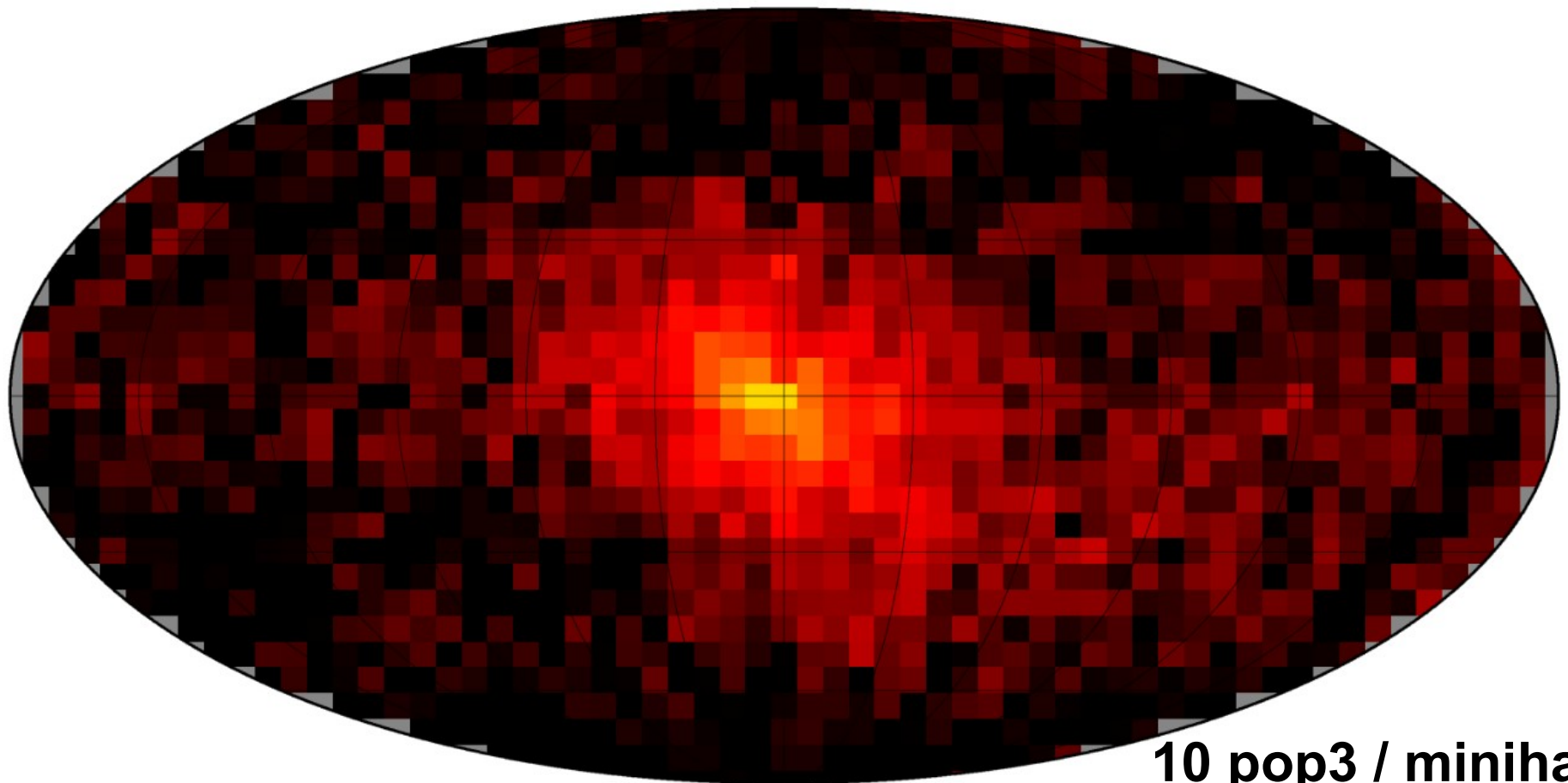


10 pop3 / minihalo

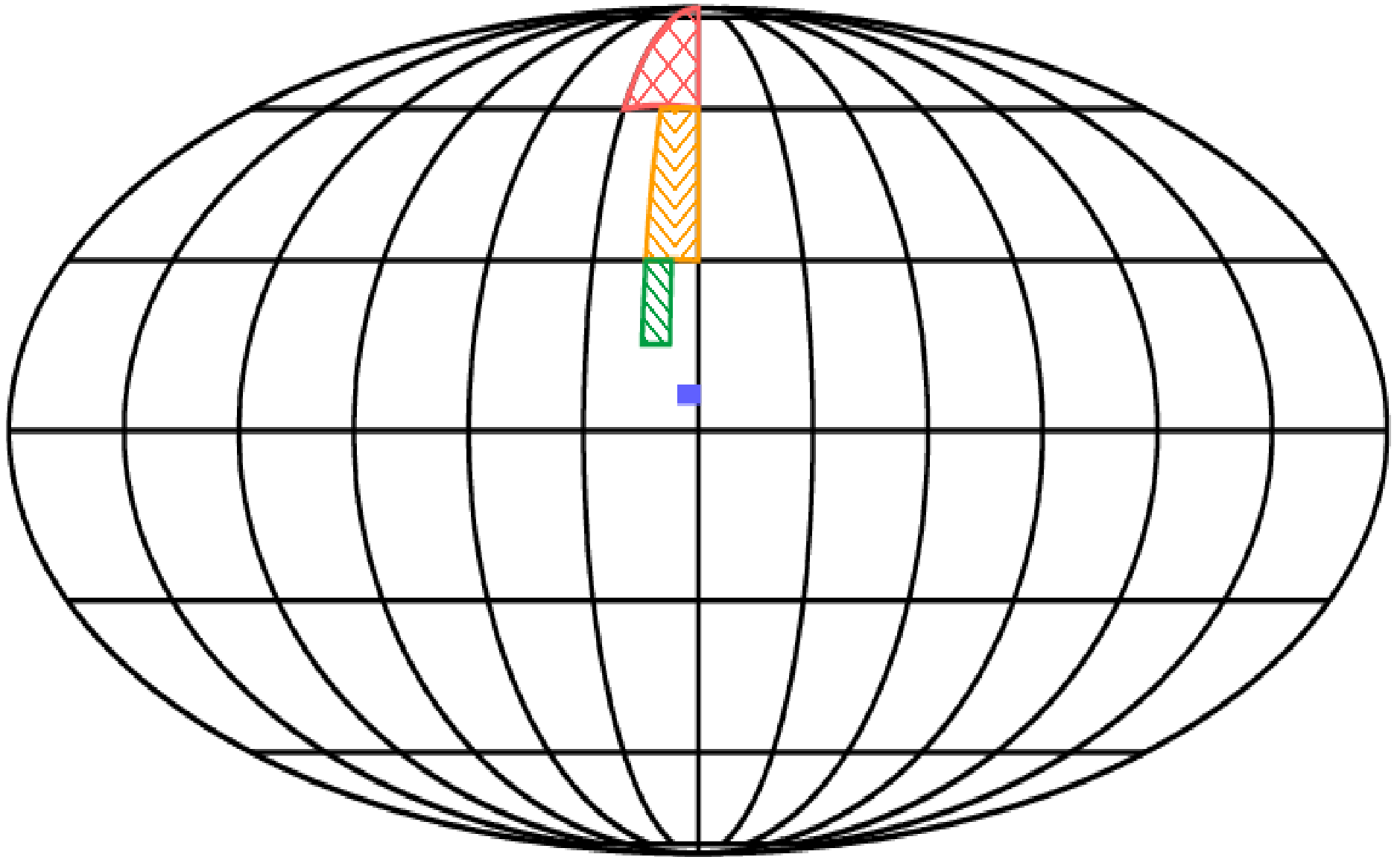
空間分布 ($M_v < 20$ に限定)



銀河中心方向に集中する傾向にあるが……

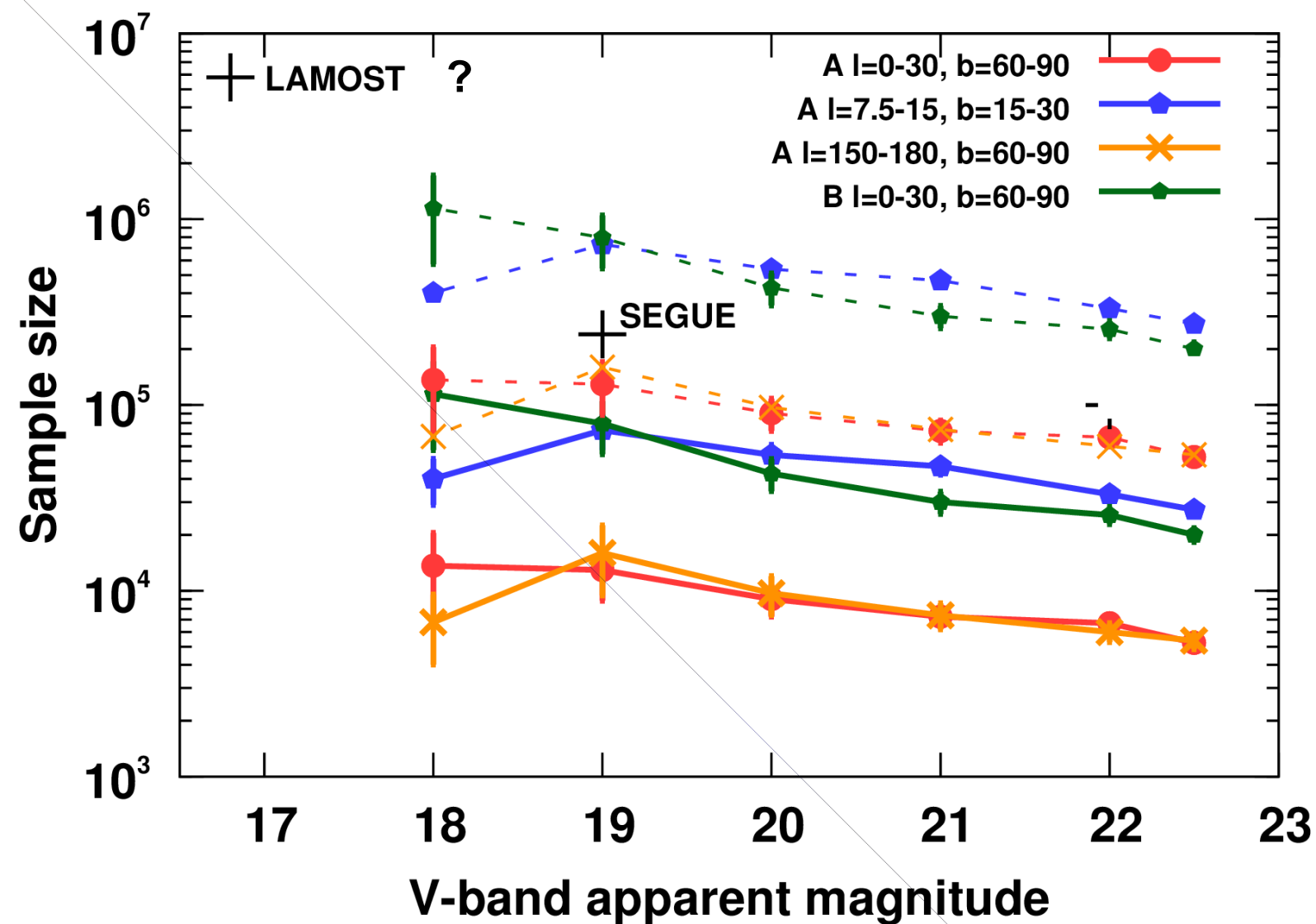


10 pop3 / minihalo



Stellar component は Besancon
(<http://model.obs-besancon.fr/>) で作成

銀河系の星の数 / 明るい初代星の数 (m_v より明るい)



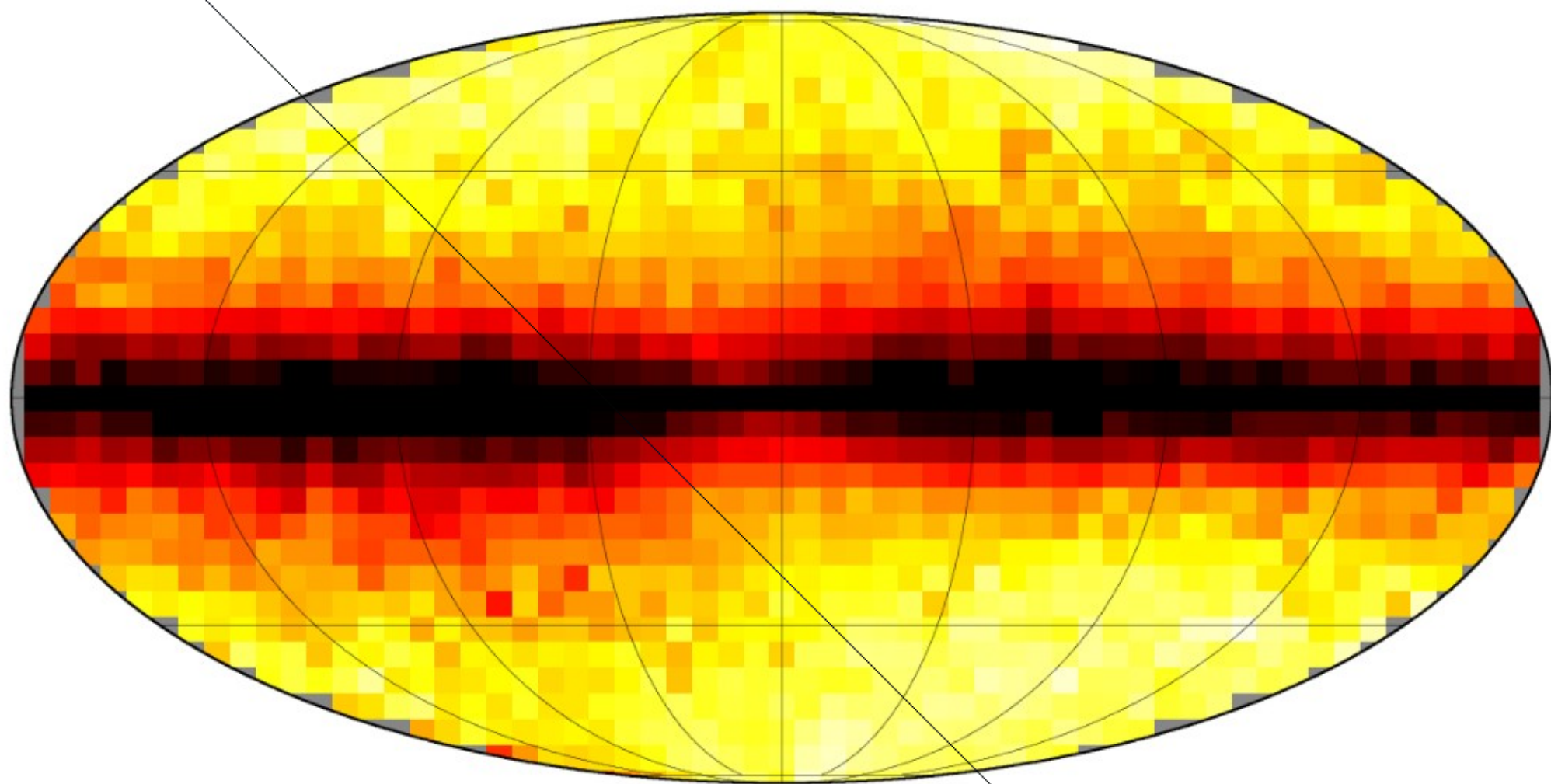
実線 :
10 pop3/
minihalo

破線 :
実線を 10 倍

- SEGUE で初代星が見つからないとすると、ミニハローあたり小質量の初代星が 10 個以上形成する IMF は既に棄却されている？



$\log N_{\text{popiii}}/N_{\text{star}} M_V < -22.5$



Sample size

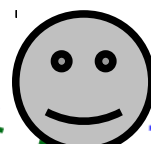
10^7
 10^6
 10^5
 10^4
 10^3

+ LAMOST ?

PFS ~ 10 nights ?

SEGUE

PFS ~ 1 night ?



17

18

19

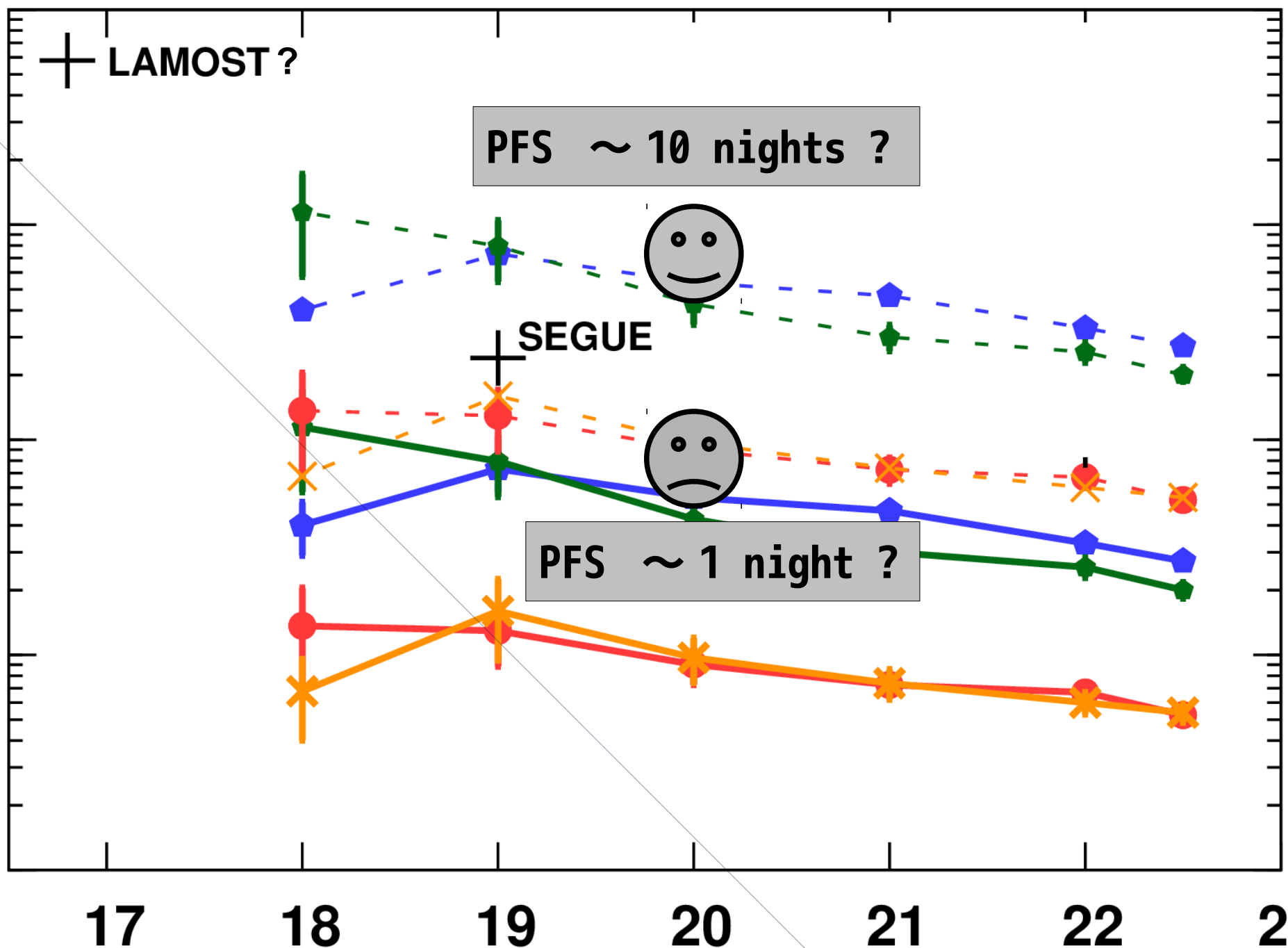
20

21

22

23

V-band apparent magnitude



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？
- metallicity に感度のあるフィルターを HSC に装着し、大量の金属欠乏星をリストアップ、分光でフォローアップ
 - 銀河中心は通常の星も多いが初代星も多い
 - $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.5$ の星を 95% 除けると仮定すると……
 - サンプルサイズを全体的に小さくできる
 - ディスクはハローより metallicity が大きいいためより効率的に星を取り除ける
 - 中緯度あたりの効率がよさそう

まとめ

Ishiyama et al., ApJ, in press (arXiv:1602:00465)

- 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 10 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 !!!**