

# 超大規模シミュレーションで探る 矮小銀河問題

銀河形成研究の最前線：「自称」若手研究者のビジョン

2008年1月13-15日 国立天文台

石山智明 (国立天文台 / 東京大学総合文化 D1)

福重俊幸 (K & F Computing Research Co.)

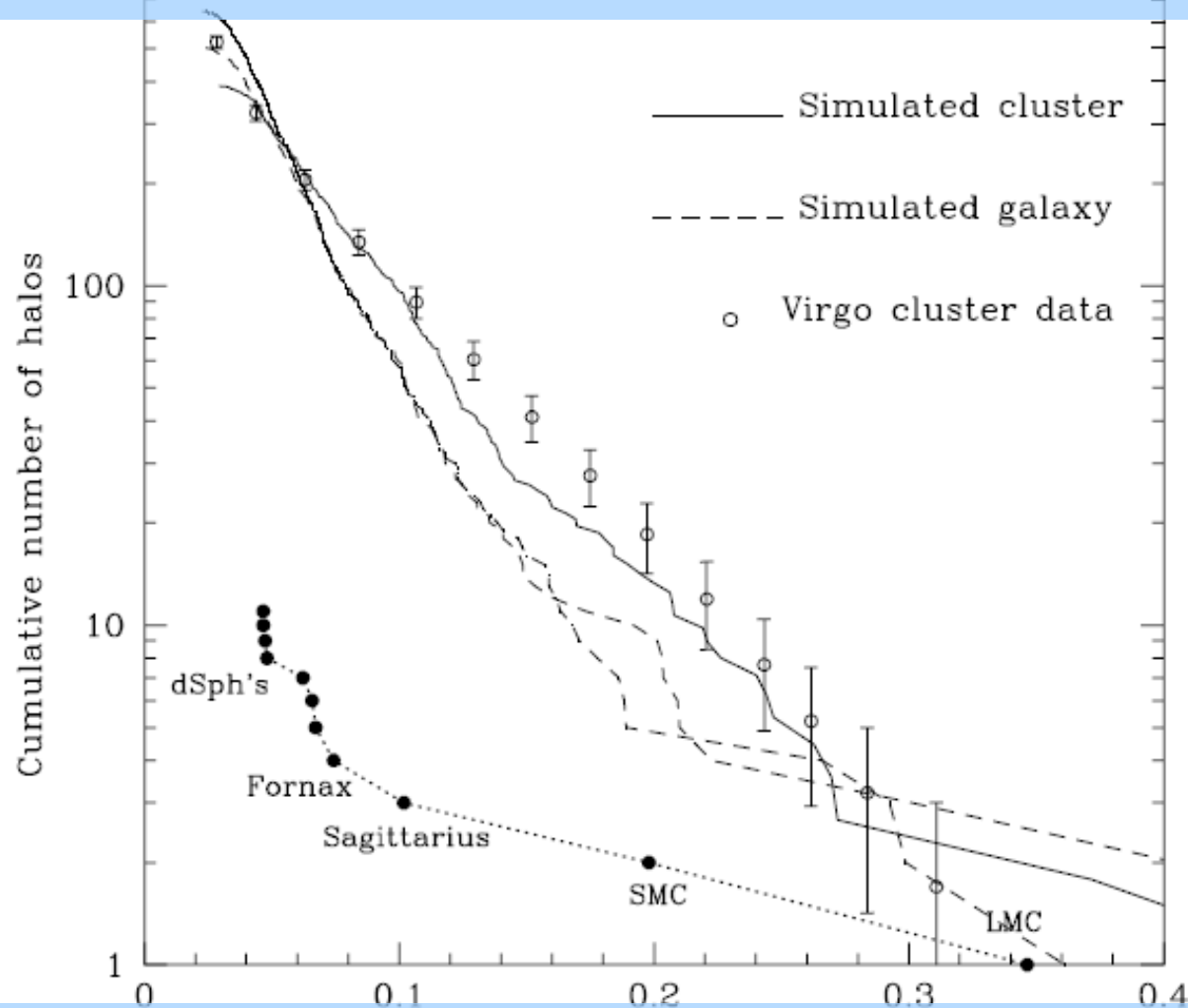
牧野淳一郎 (国立天文台)

# 現在の宇宙モデル

- $\Lambda$ CDMが主流
  - 階層的構造形成
  - 銀河団以上のスケールでは観測と一致している
- 銀河スケールでは？
  - 矮小銀河問題
  - 中心カスプ
  - 銀河形成

# 矮小銀河問題

## サブハローの累積個数



サブハローの回転速度 / 母ハローの回転速度

- CDMに基づいたダークマターハロー形成シミュレーションで得られるサブハローの個数が、我々の銀河系内に観測される矮小銀河の数より桁違いに多い  
(Klypin et al. 1999; Moore et al. 1999)

# 提案されている解決案

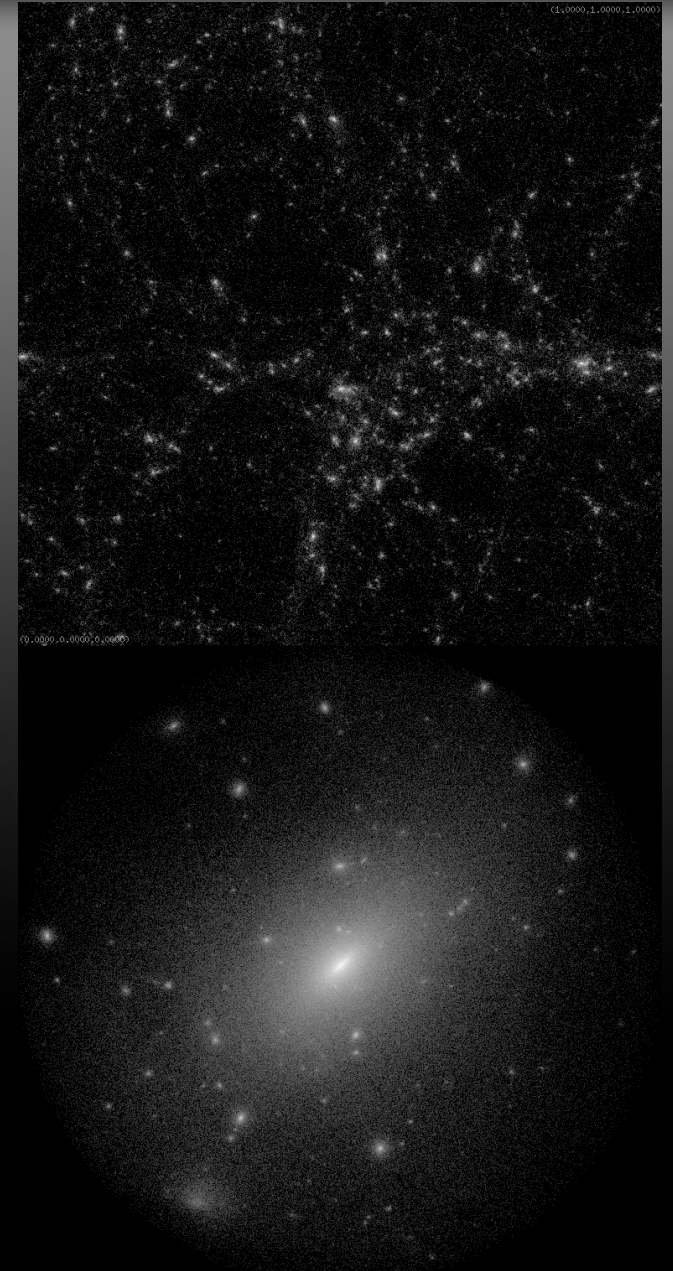
- 小スケールでのダークマターの性質の変更  
小さいハローができないようにする  
e.g. Self-Interacting Cold Dark Matter  
(Spergel and Steinhardt 2000.)
  - 小さいハローで星形成が抑制され矮小銀河とならない  
e.g. フィードバックによる星形成の抑制 (Stoehr et al. 2002)  
紫外線輻射による星形成の抑制 (Susa and Umemura 2004)
- 多くの案が提案されているが、広く受け入れられている解決案はない

# 先行研究の問題点

- 従来の研究
  - 低解像度で広い領域(100Mpcくらい)のハロー形成を追う。
  - $z=0$ のハローをどれか選ぶ
  - そのハローだけ高解像度で再シミュレーション

ハローを1個または数個しか見ていない  
(たくさんやるのは大変)

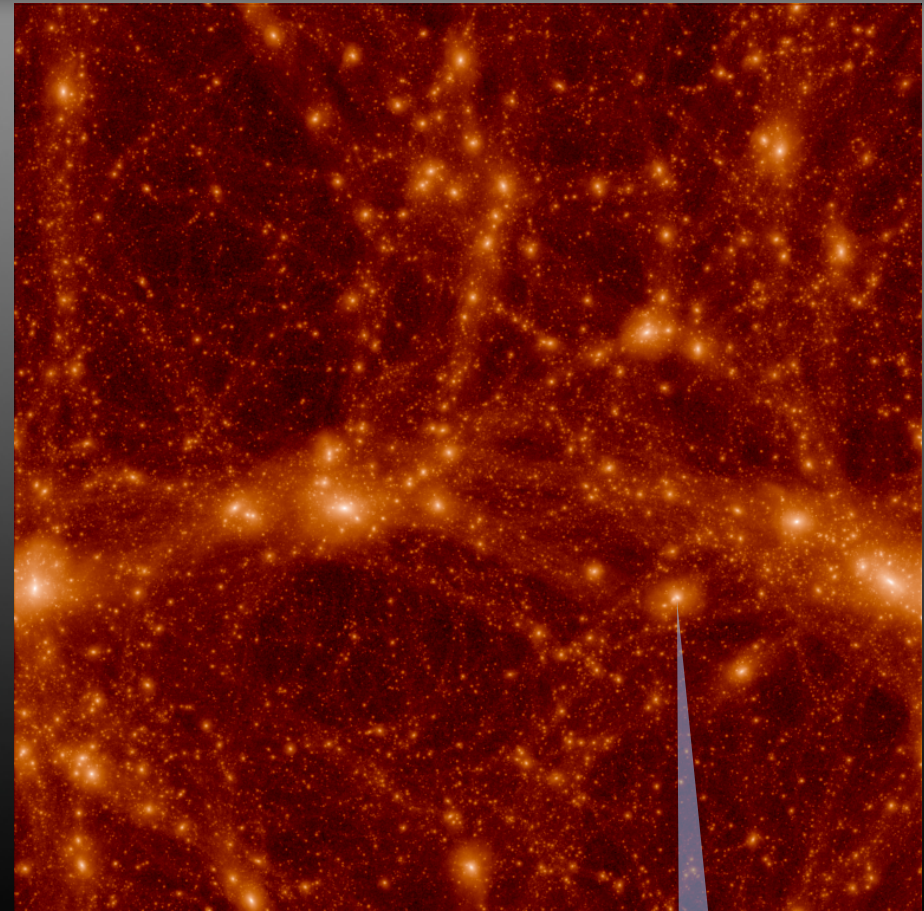
ハローごとに数に違いはないのか?  
(環境効果)





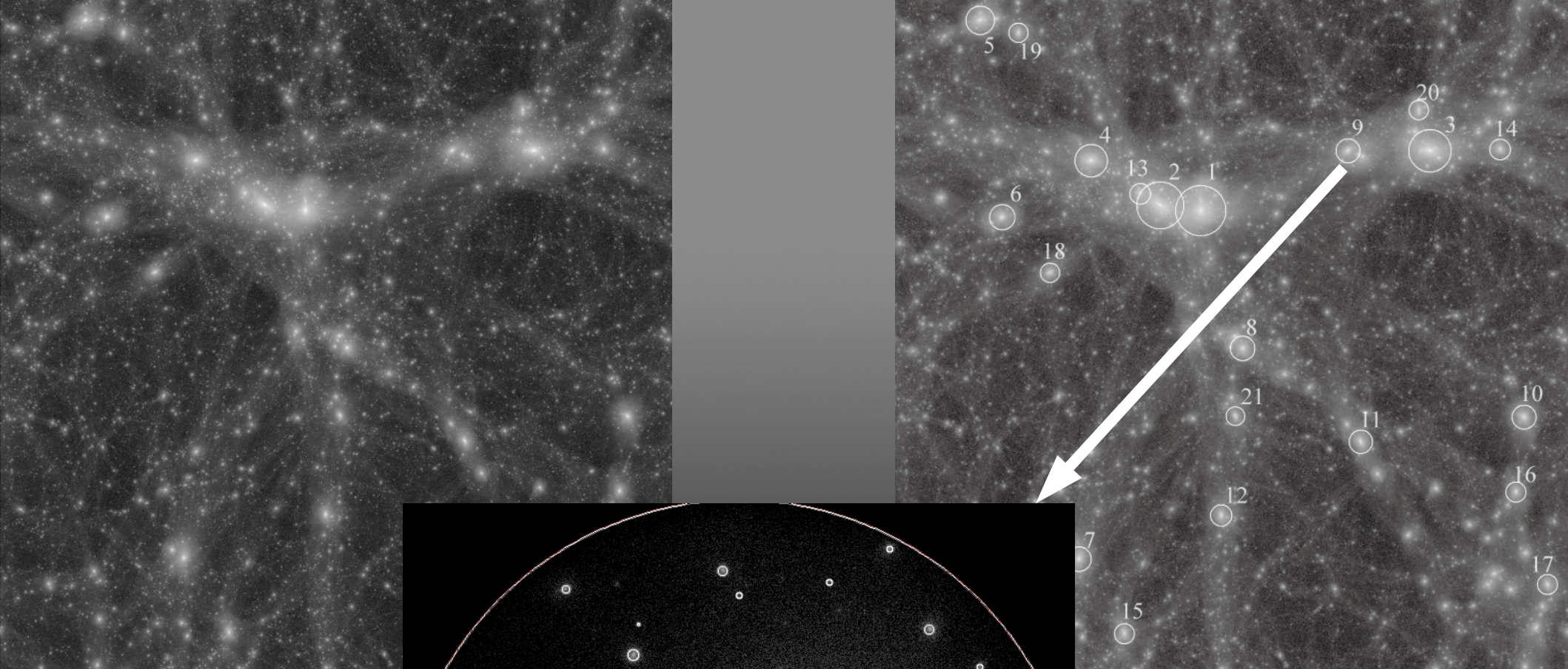
# シミュレーション1

- 広い領域を高解像度で追い、  
全ハローの累積個数分布を比較
  - $\Lambda$ CDMモデル ( $\Omega=0.3$ 、 $\Lambda=0.7$ 、  
 $h=0.7$ 、 $\sigma_8=1.0$ )
  - ダークマター粒子数 $512^3$ 、  
領域21.4Mpc立方
  - ソフトニング 1.8kpc  
質量分解能  $3.0 \times 10^6 M_\odot$
  - Parallel TreePM code  
(Yoshikawa and Fukushige 2005)
  - 12ノードのGRAPE-6Aクラスタ
  - 総ステップ数4930、総計算時間約380時間



moore et al. 1999  
100万粒子、 $\Omega=1.0$ 、 $h=0.5$

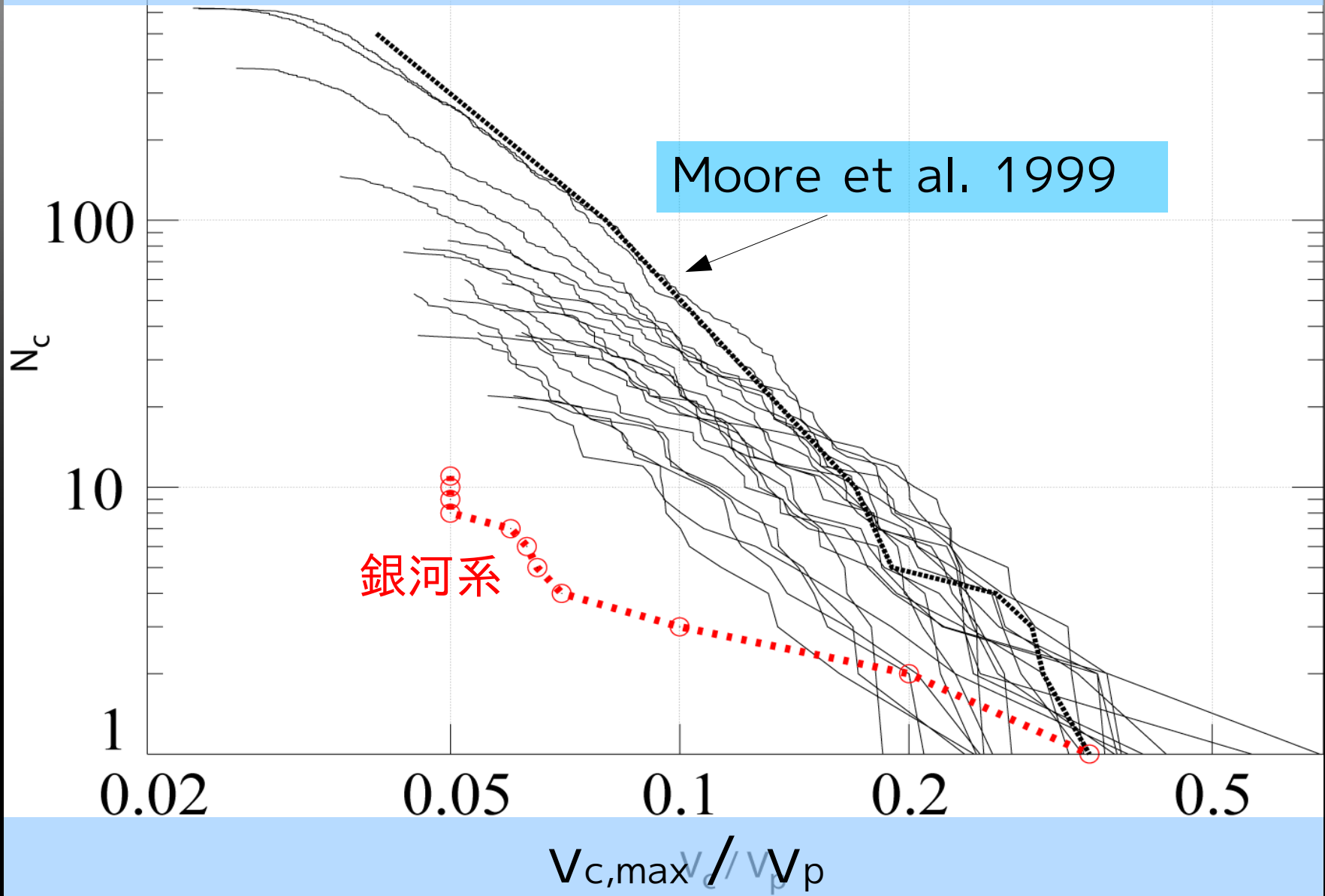




21のハロー  
(銀河系サイズは10個)  
のサブハロー分布を比較

# 累積個数分布

## サブハローの累積個数



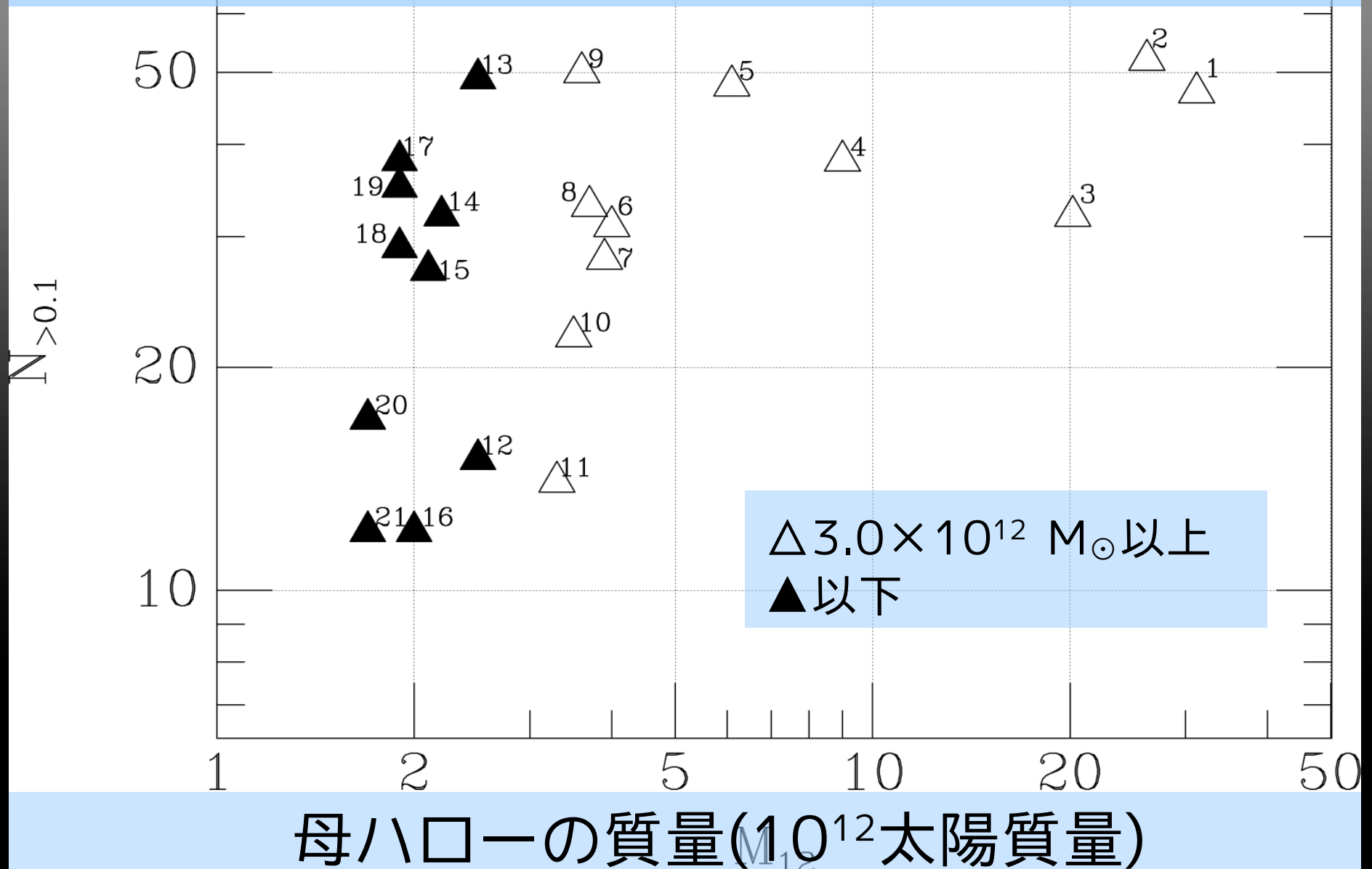


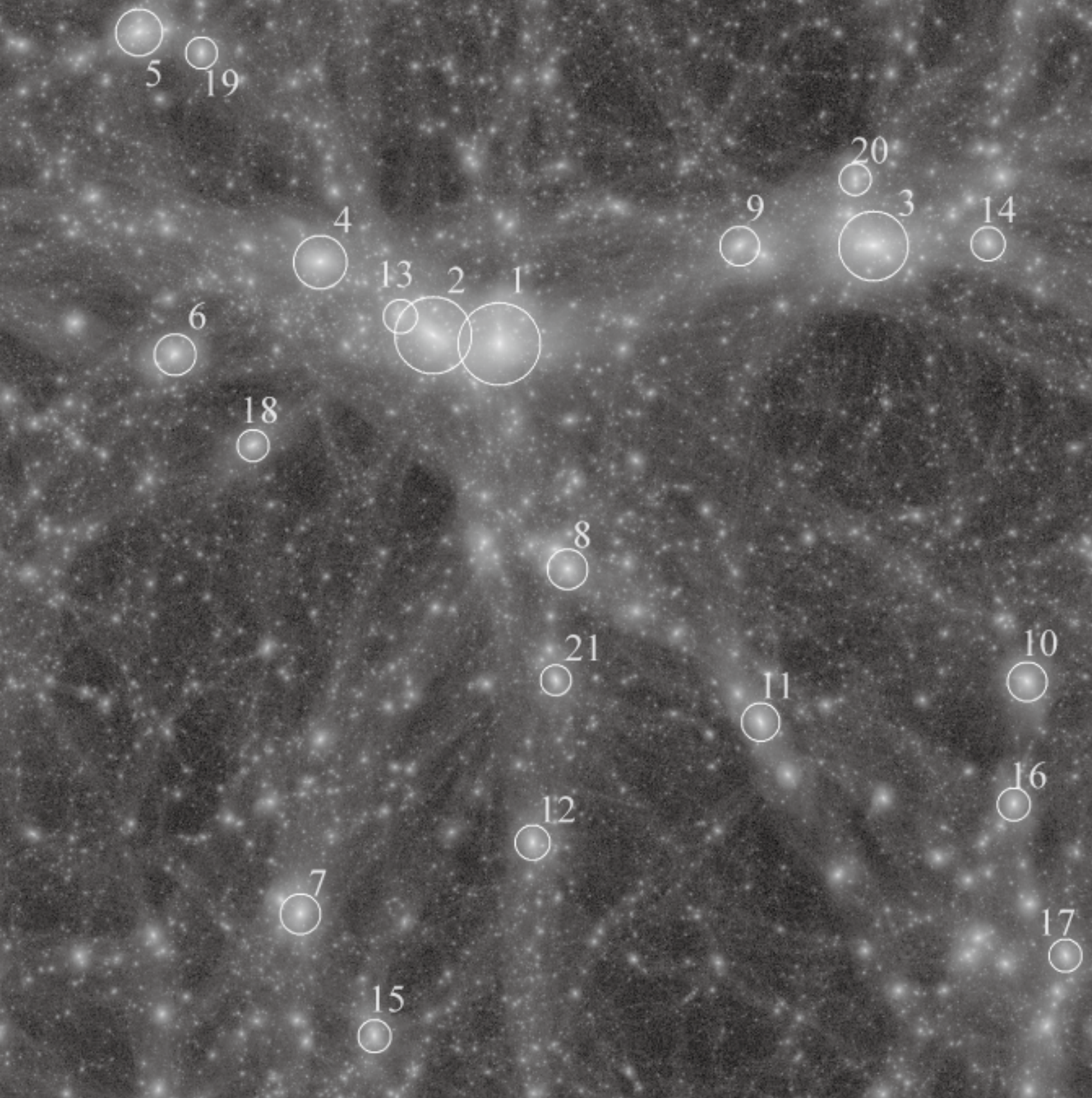
# シミュレーション2

- シミュレーション1の
  - サブハローが少ない銀河ハロー2つ
  - サブハローが多い銀河ハロー1つ を高解像度にして再シミュレーション
- ダークマター粒子数約1億8千万
- ソフトニング 890pc 質量分解能  $3.7 \times 10^5 M_{\odot}$
- 64cpuのPCクラスタ  
重力多体問題専用計算ライブラリ Phantom-GRAPE (Nitadori et al. in prep.)を使用
- 総ステップ数9869、総計算時間約180時間
- 高解像度にした銀河ハローにおけるサブハローの個数から、低解像度のサブハローの個数を補正

# 母ハロー質量との関係

回転速度が0.1より大きいサブハローの数



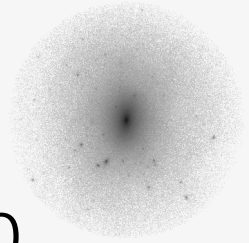


銀河ハローにおけるサブハローの数は分散が非常に大きい

サブハローが少ない  
12,16,20,21は比較的孤立している

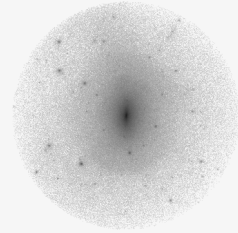


G16 少ない

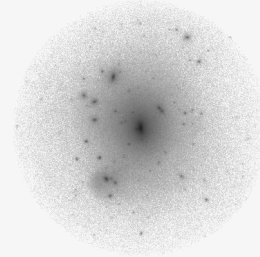


$z=0$

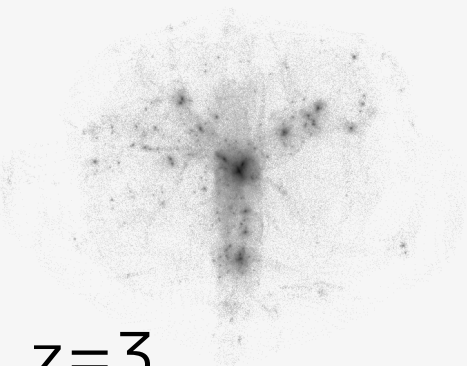
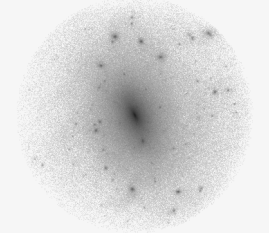
G20 少ない



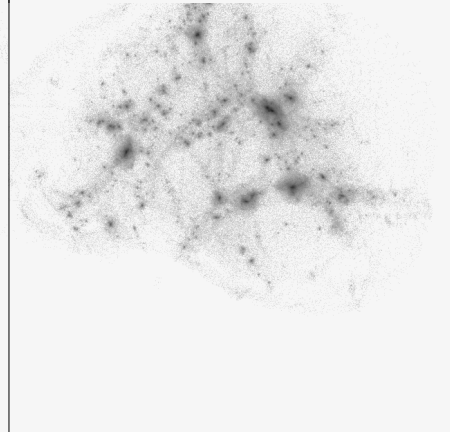
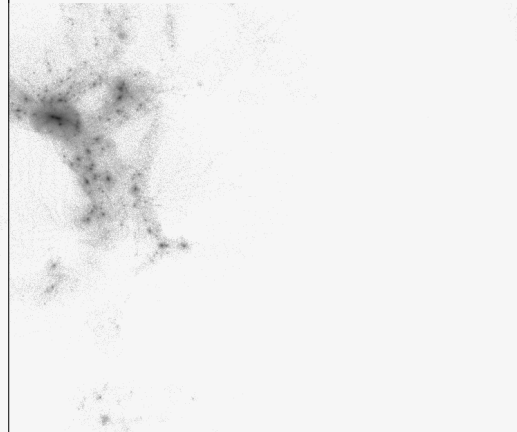
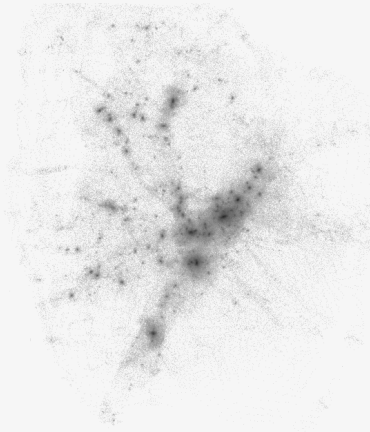
G13 多い



G17 多い



$z=3$

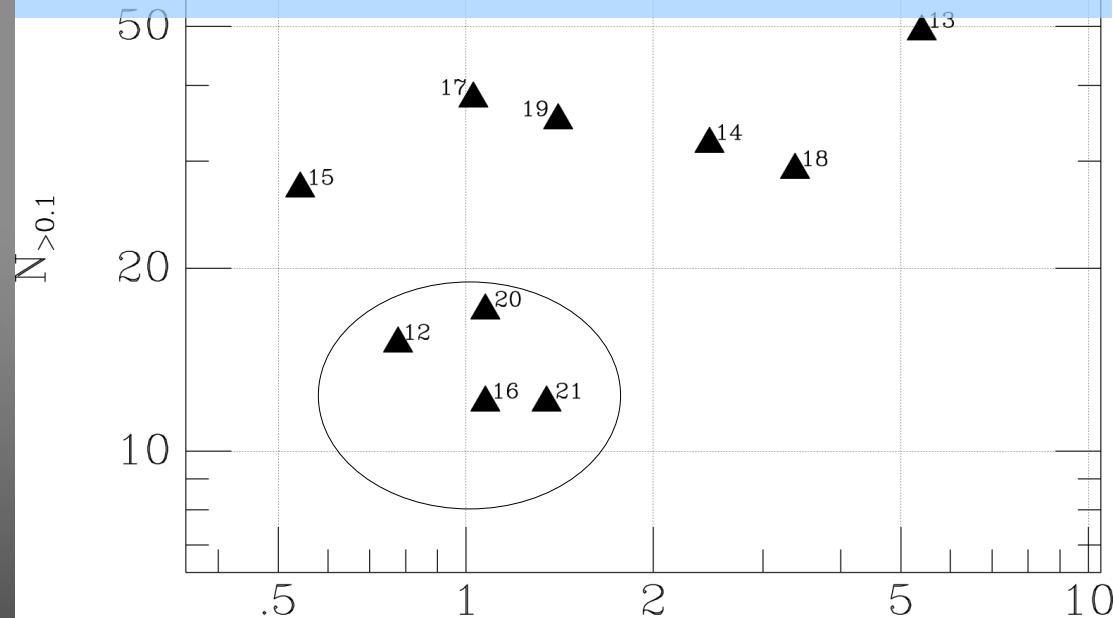


- 形成が早く外場の影響が少ないハローにサブハローが少ない?  
(孤立しているハロー、形成が早い)

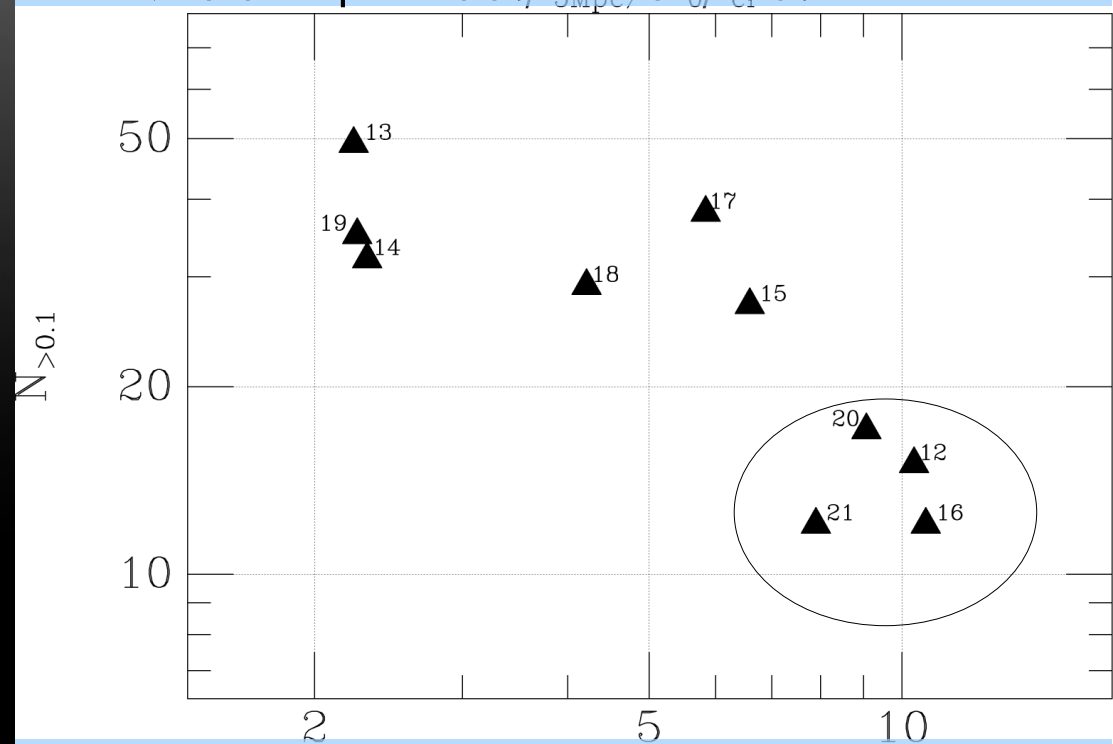
# 密度・近傍の重い母ハローとの関係

- サブハローが少ない  
12,16,20,21は低密度領域にあり、かつ近傍に重いハローがない。孤立している

## サブハローの数



## 周囲5Mpcの密度 / 平均密度



## 近傍のハローまでの距離(Mpc)

- 孤立領域で形成したハロー

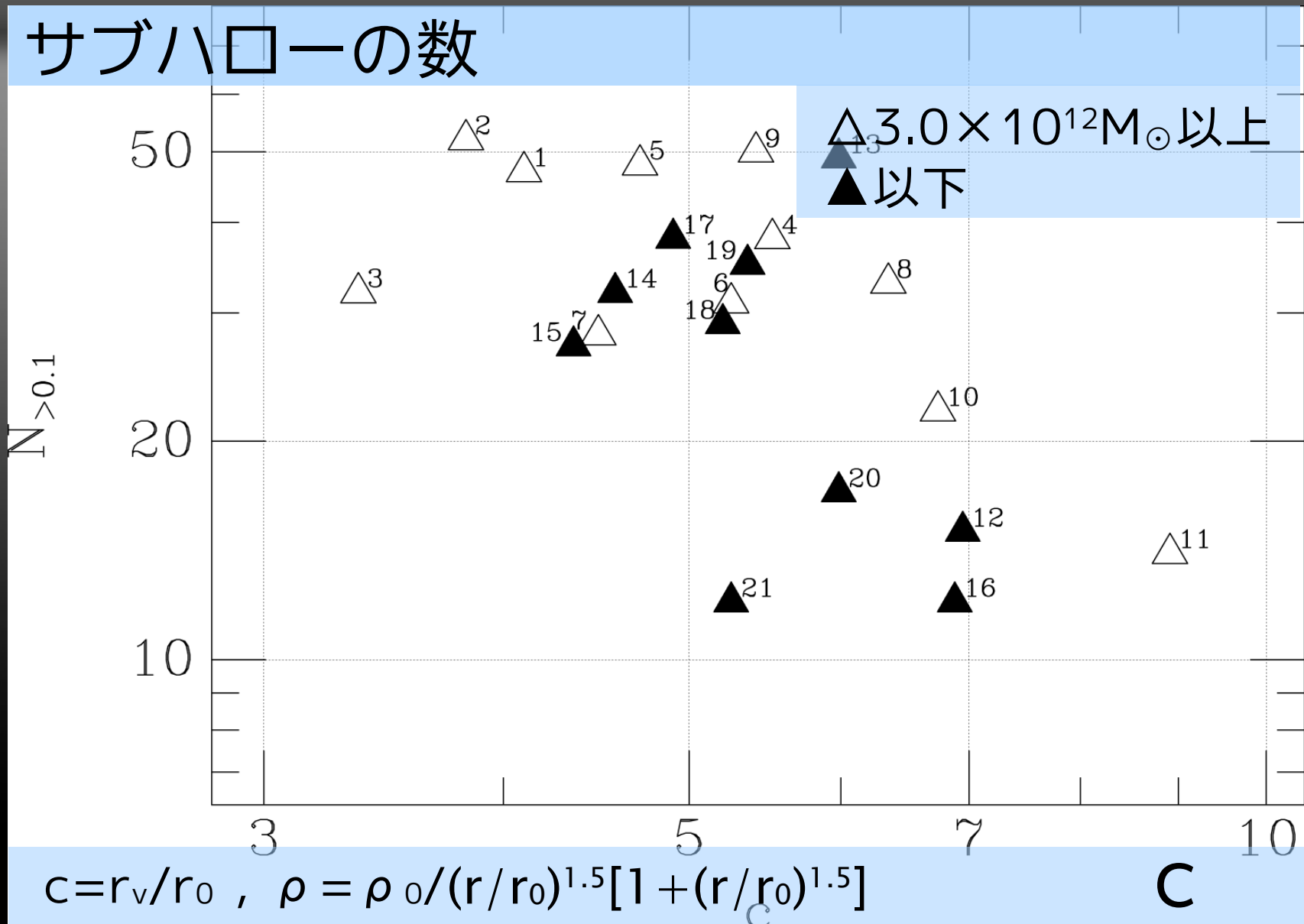
- 同じスケールのハローを作るためには、非孤立領域に比べ、相対的に早くに形成する必要がある  
→サブハローが受ける stripping も相対的に大きいのでサブハローが少ない

- 非孤立領域で形成したハロー

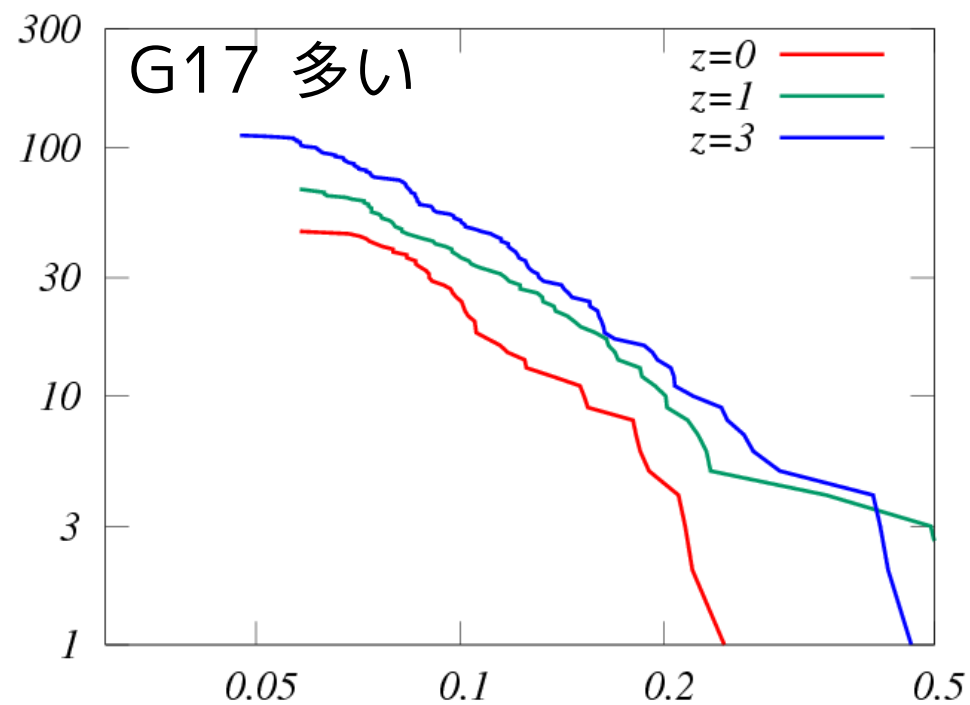
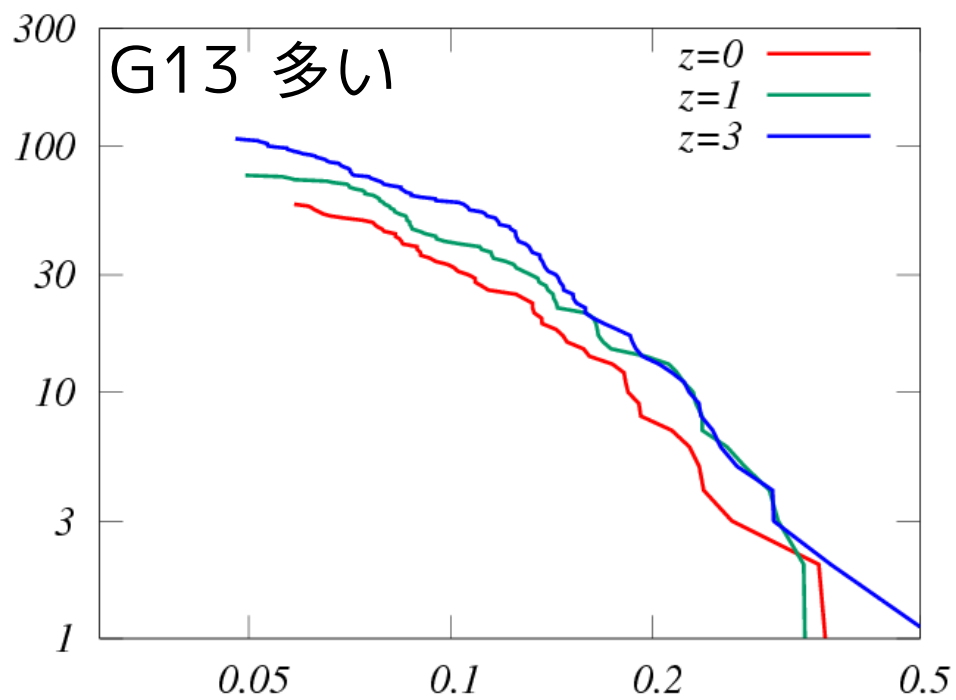
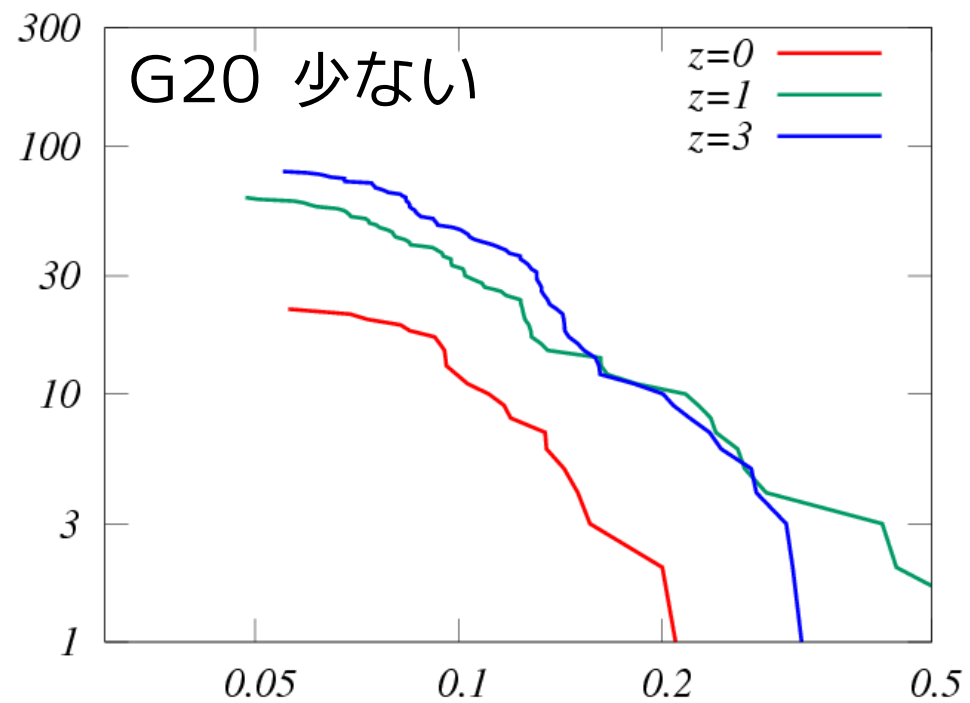
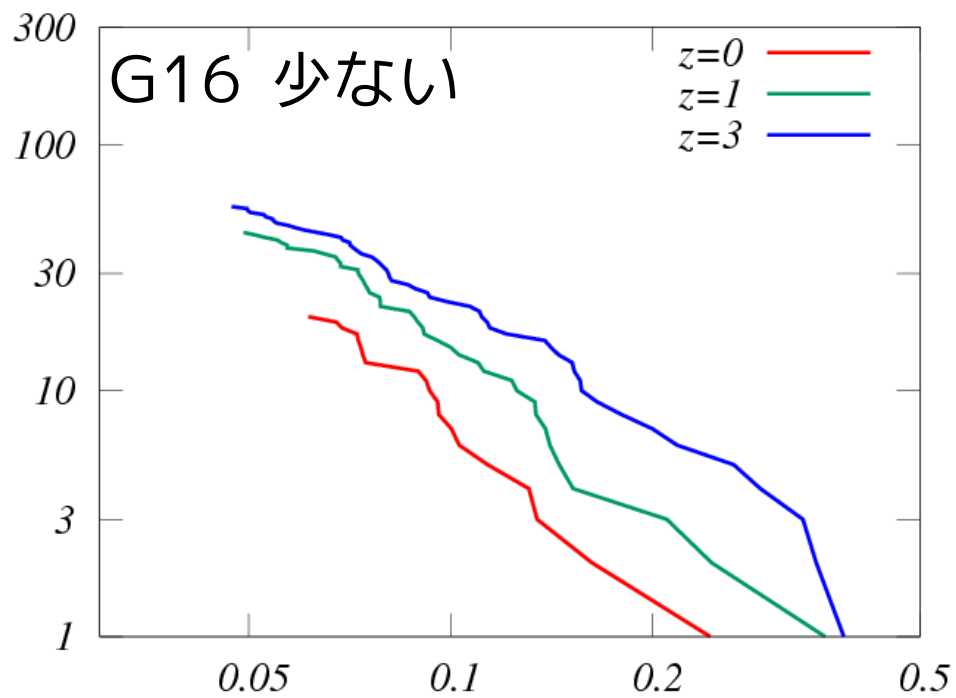
- サブハローが近傍の銀河・銀河群からエネルギーや角運動量を与えられる  
→ハロー中心に落ちにくい  
→サブハロー受ける stripping も相対的に小さいのでサブハローが多い



# 母ハローの中心集中度との関係

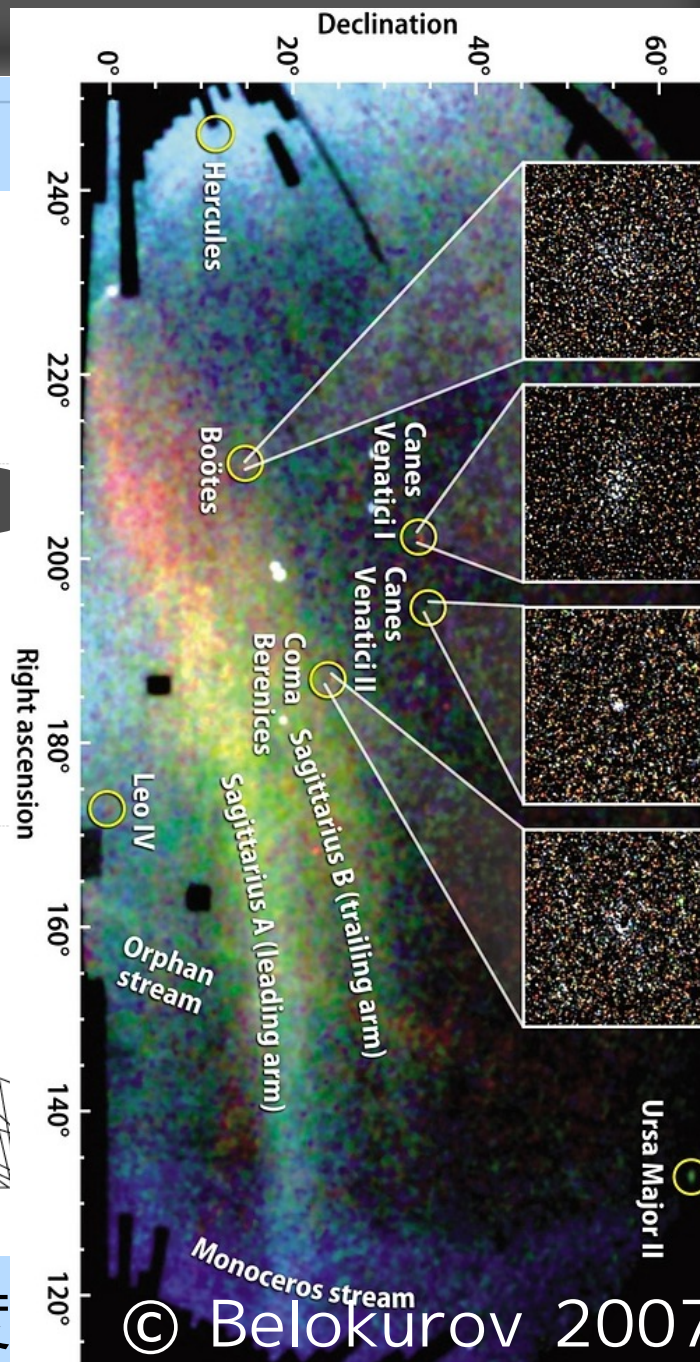
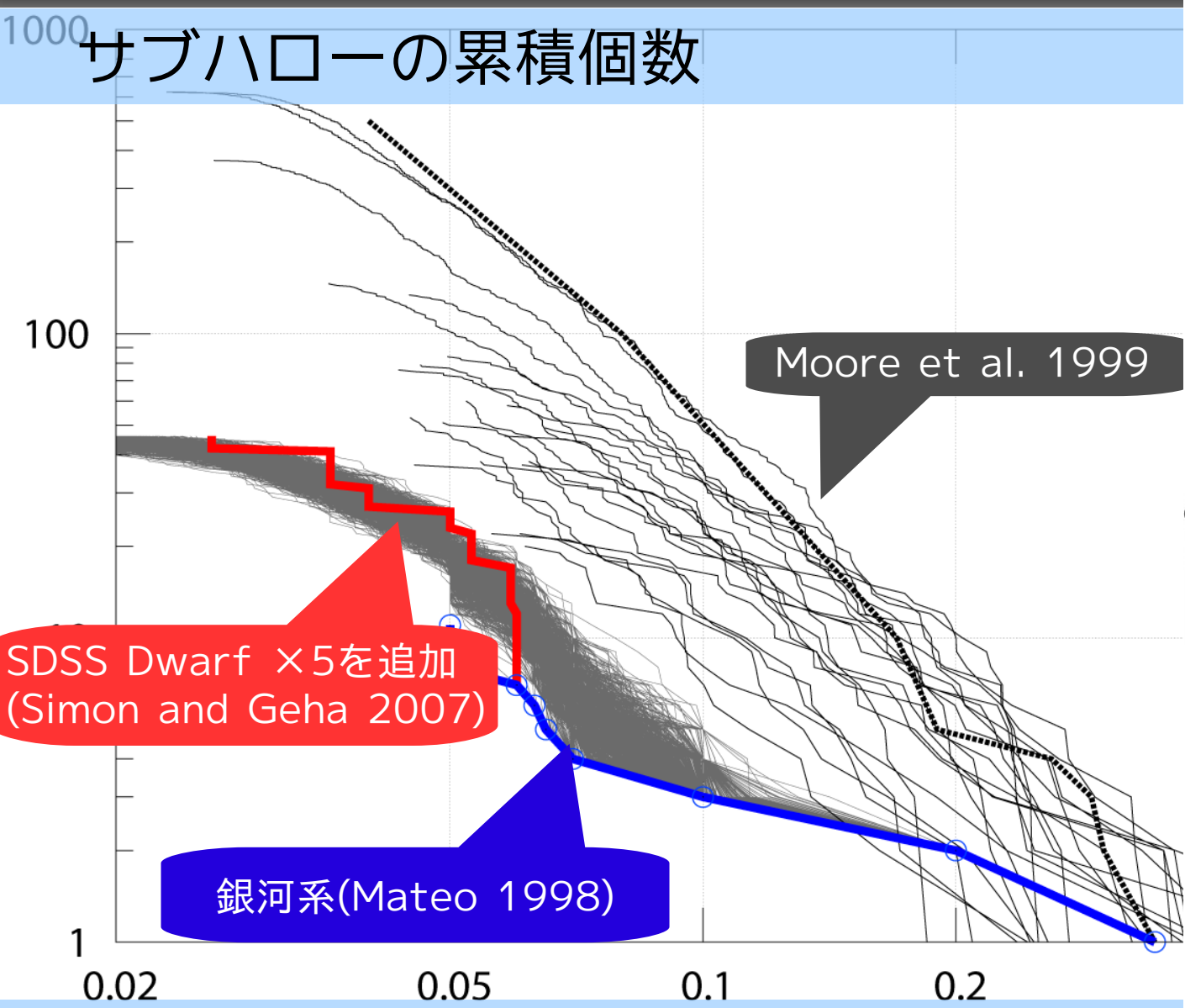


サブハローが少ないハローは中心集中度が大きい(形成が早い)



# SDSS Dwarf (×5)を追加

サブハローの累積個数



© Belokurov 2007

サブハローの回転速度 / 母ハローの回転速度



# 研究成果のまとめ

- 孤立領域においてはハロー形成が早く、サブハローが受けるstrippingも大きいいため、結果としてサブハローが少なくなる傾向がある（環境効果が重要）
- 銀河系は孤立しているので、矮小銀河が少ない銀河なのかもしれない
- 逆にサブハローの数から銀河の進化について制限をつけられるかもしれない
- 数の差はオーダーではなくファクターの問題