

ダークマターハローの 中のサブハロー分布

石山 智明

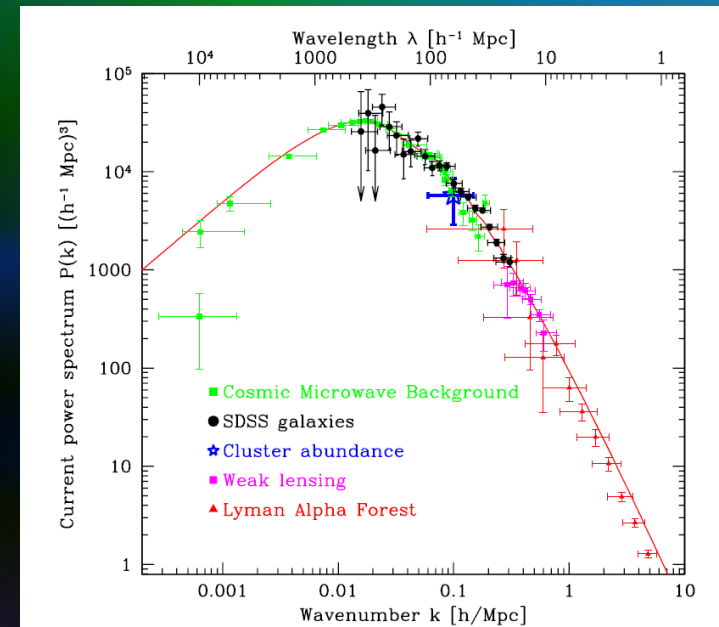
(筑波大学計算科学研究センター 神戸分室)

冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter) 理論

- ビッグバン直後はほとんど一様で、わずかな物質のむら（密度揺らぎ）が存在した

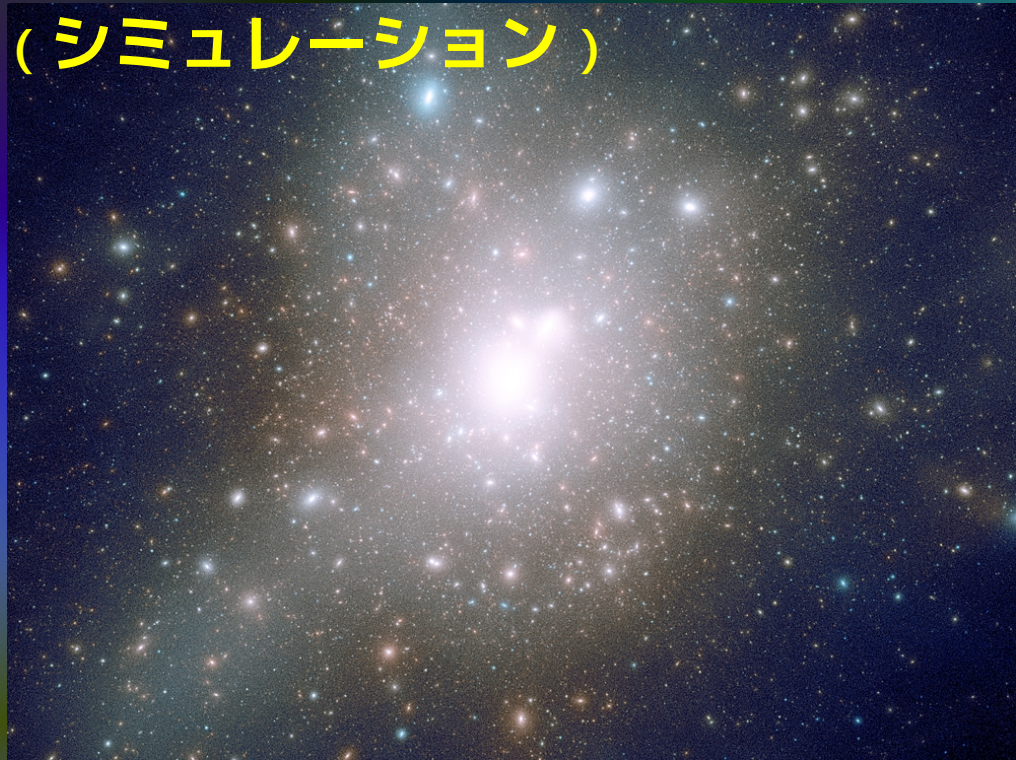


- 高密度領域はやがて重力収縮し、**ダークマターハロー**と呼ばれる楕円形で広がった高密度領域を、いたるところに形成する
- ハローが合体して大きいハロー形成し（**階層的構造形成**）、その中でガスが集って収縮し、星や銀河が生まれた

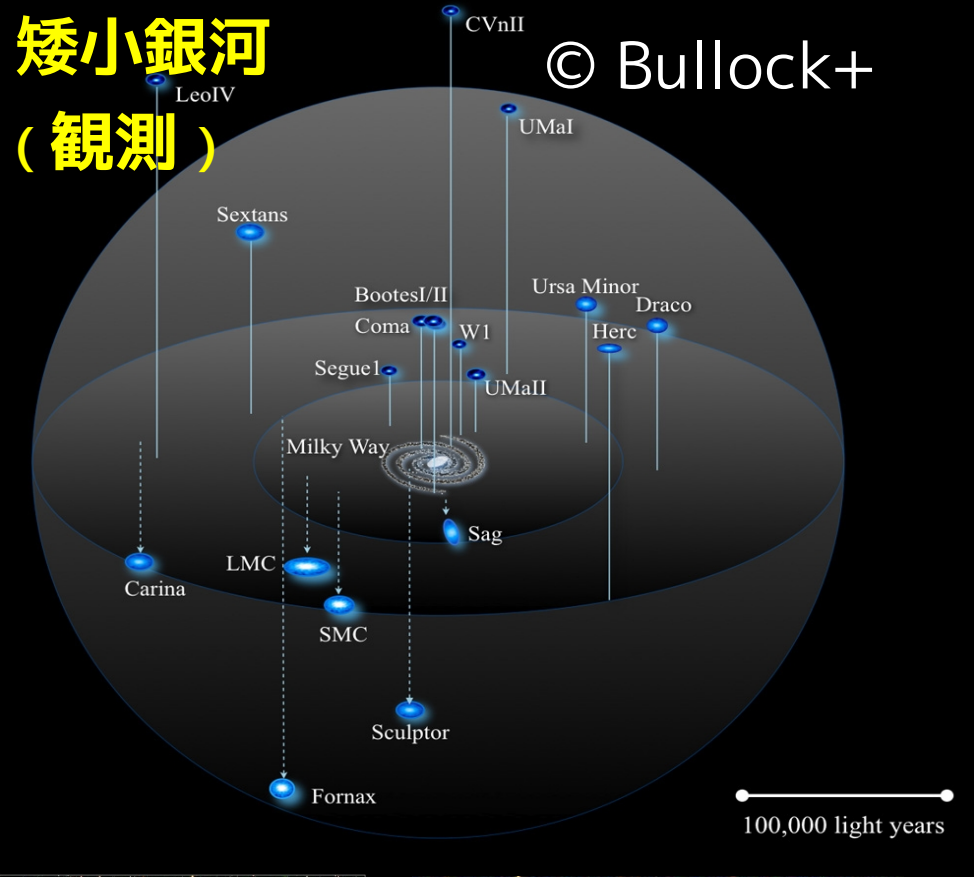


サブハローと矮小銀河

ハローとサブハロー (シミュレーション)



矮小銀河 (観測)



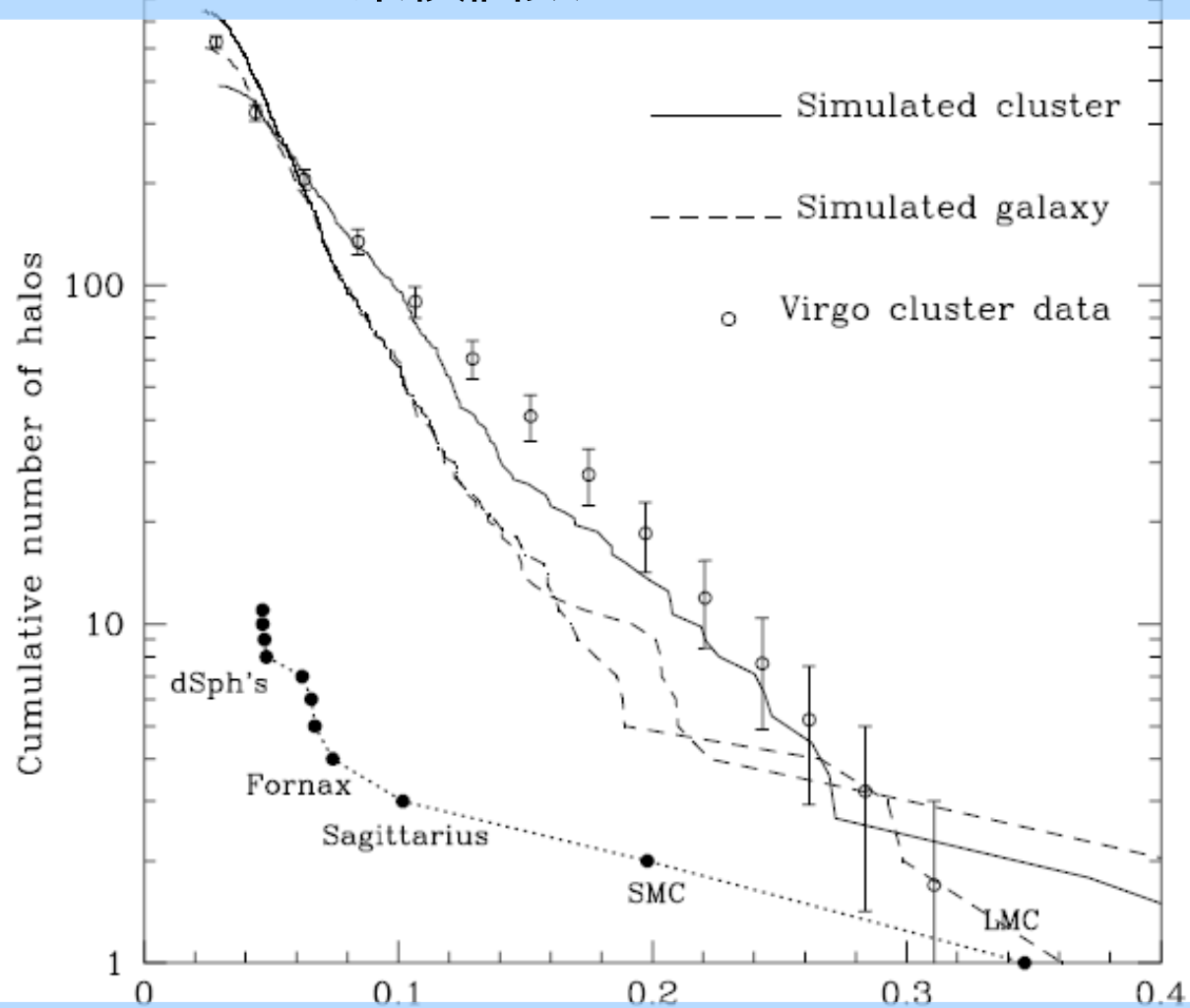
Dwarf Irregular Galaxy Leo A
Suprime-Cam (B, R, z)
August 5, 2004
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan
Copyright © 2004 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.



© NASA

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)
↓
CDM 理論の危機？

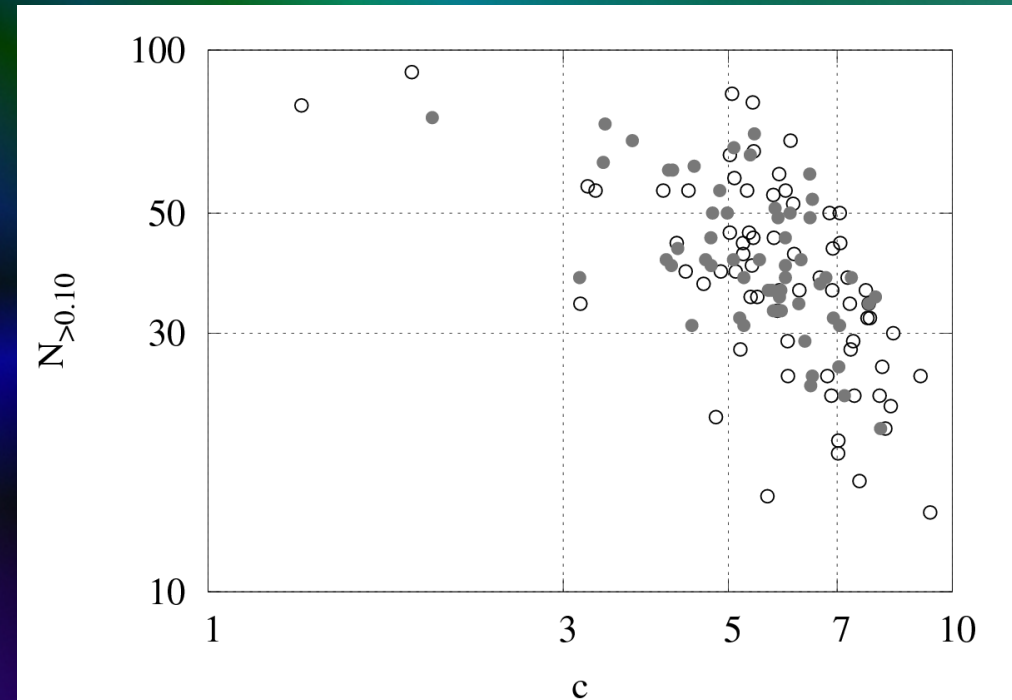
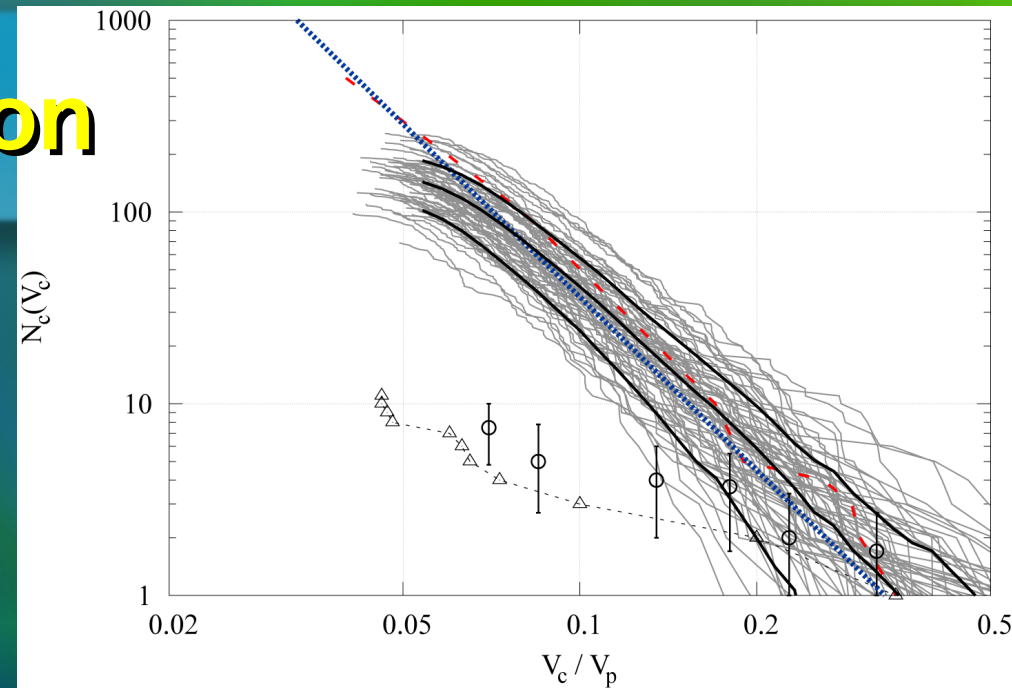
そんなに危機でないかもしれない

- バリオン等による様々なフィードバック
 - 超新星爆発 (Benson+ 2003、Okamoto+2010 など)
 - ハローの内をガス加熱
 - 銀河風
 - 再電離加熱 (Efstathiou 1992, Gnedin 2000, Susa+ 2004, Okamoto+2010 など)
 - High-z で小さいハローでのガスの冷却の抑制
 - その他：AGN、Cosmic Ray フィードバックなど (Wadpuhl+ 2011 など)

これらの組み合わせで矮小銀河の光度関数や金属分布等が再現できると考えられている

halo-to-halo variation

- サブハローの数は、ハロー間差異が大きく、4~5 倍程度差がある
- 一番サブハローが少ないハローと銀河系の矮小銀河の数の差はオーダーではなく 2~3 倍程度
- ハローの中心集中度とサブハローの数は相関がある
 - 中心集中度が大きい → 形成が早い → サブハローが少ない

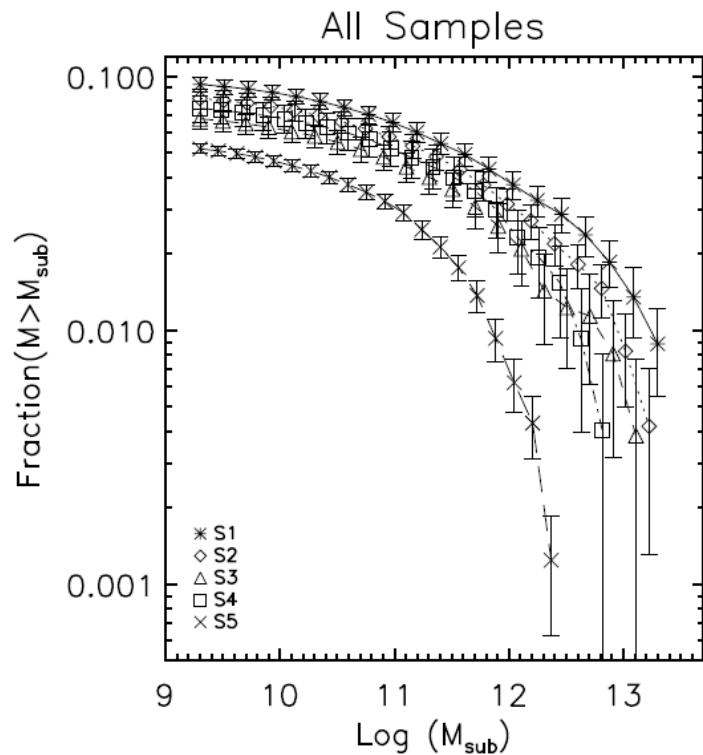


未解決問題と本研究の内容

- サブハローの数はハロー間差異が大きく、ハローの構造に依存していることがわかっている
- 調べられているのは主に銀河スケール
 - 計算機パワーの不足
 - みんな MW に興味がある
- その他のスケールではどうか？
- ハローの質量に依存してないか？
 - 銀河団 ~ 銀河、矮小銀河スケールでの違い
- 数だけでなく空間分布や力学はどうか？
- ダークマター対消滅シグナルへの影響

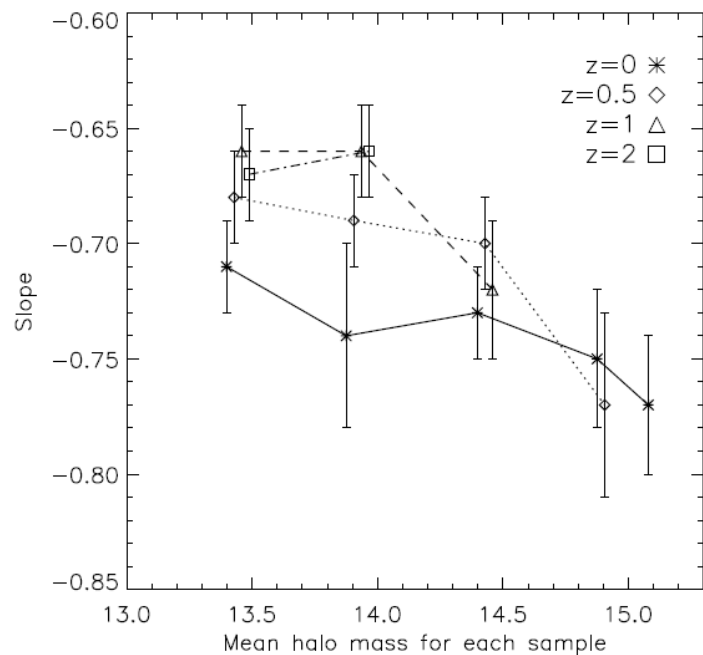
先行研究

Contini et al. 2011, arxiv 1111.1911



- ハロー質量が大きいほどサブハローが占める質量の割合も大きい

- $10^{13} M_{\text{sun}}$ のハローで $\sim 5\%$
- $10^{15} M_{\text{sun}}$ のハローで $\sim 10\%$



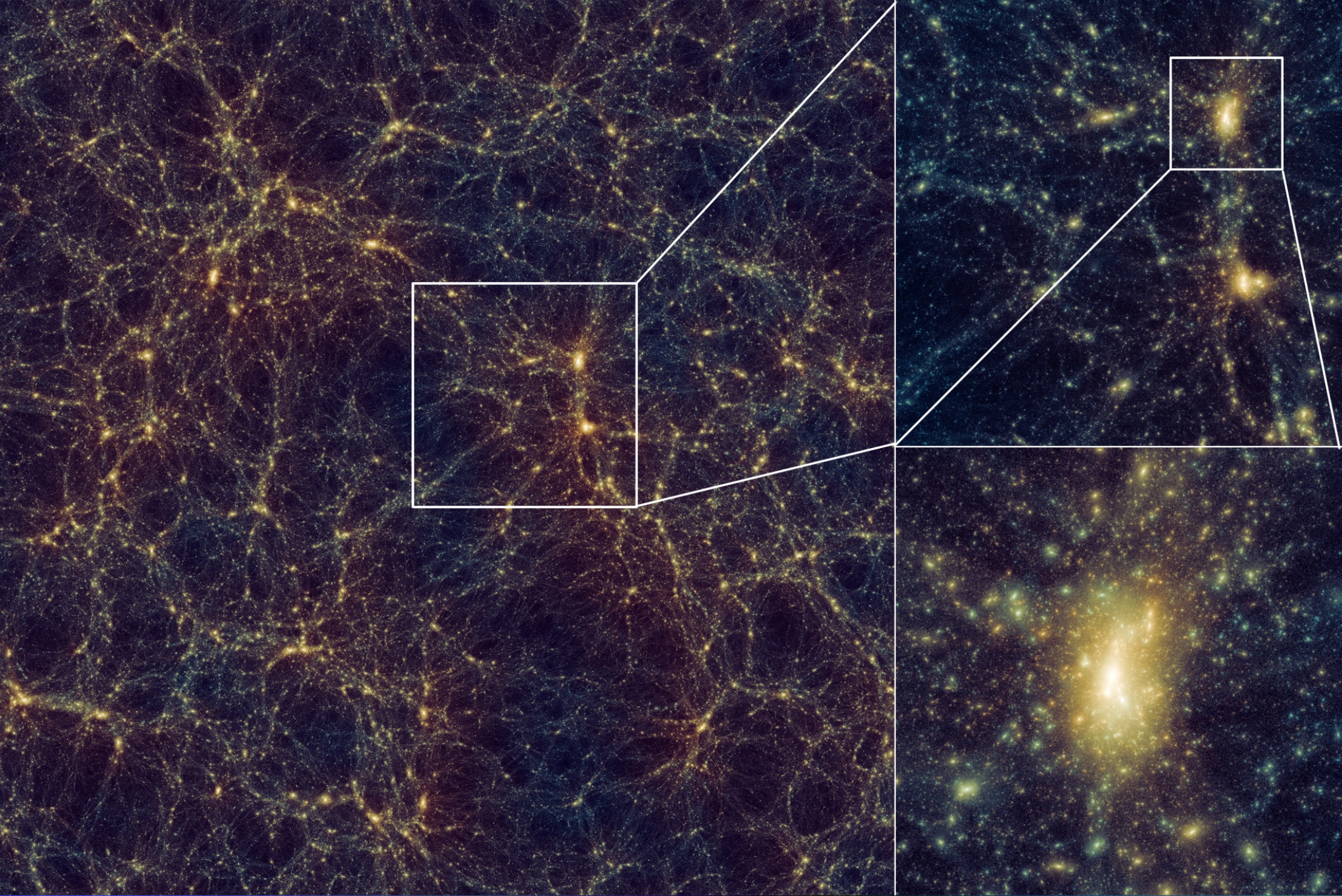
- 銀河団領域を re-simulation して、その中の group~cluster サイズのハローを見ている

- ハロー選択方法にバイアス
- それぞれのスケールで分解能が異なる

- Group サイズのハローの構成粒子数は 100000
- Overmerging が起きている可能性

サブハローは難しい

- 親ハローの $1/$ 数千 $\sim 1/10000$ の質量を持つサブハロー（矮小銀河に対応する）を分解したいと考える
- サブハローを 1000 粒子で分解したければ親ハローを最低数百万粒子で表現する必要がある
- さらに無バイアスサンプルを得るために、数十のハローを見る必要がある
 - 一つの大規模宇宙論的 N 体シミュレーション (1000^3 - 2000^3) で得られるハローサンプルは、質量幅で一桁に満たない
 - 複数のシミュレーションを組み合わせる



シミュレーションセット

Preliminary

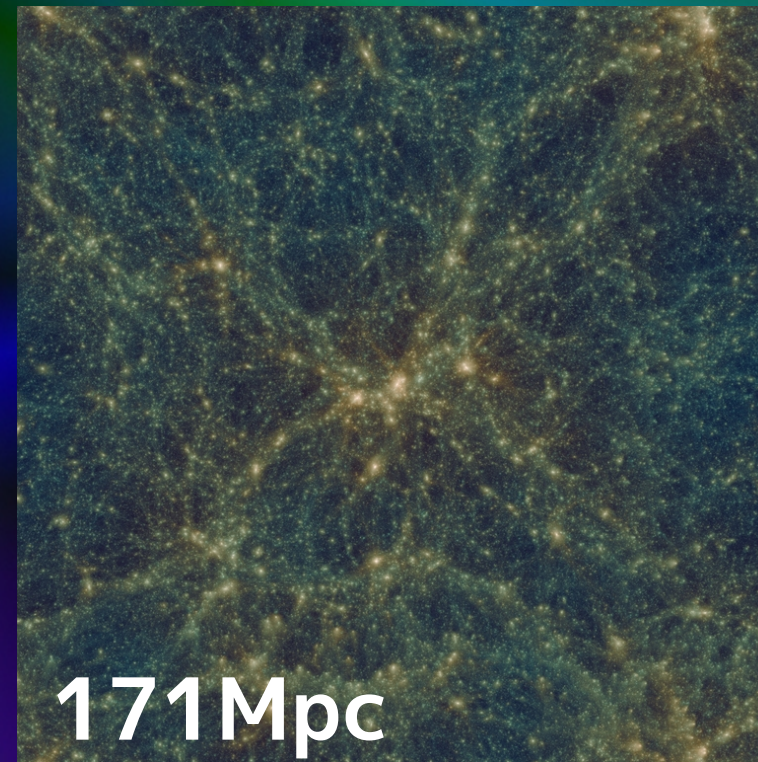
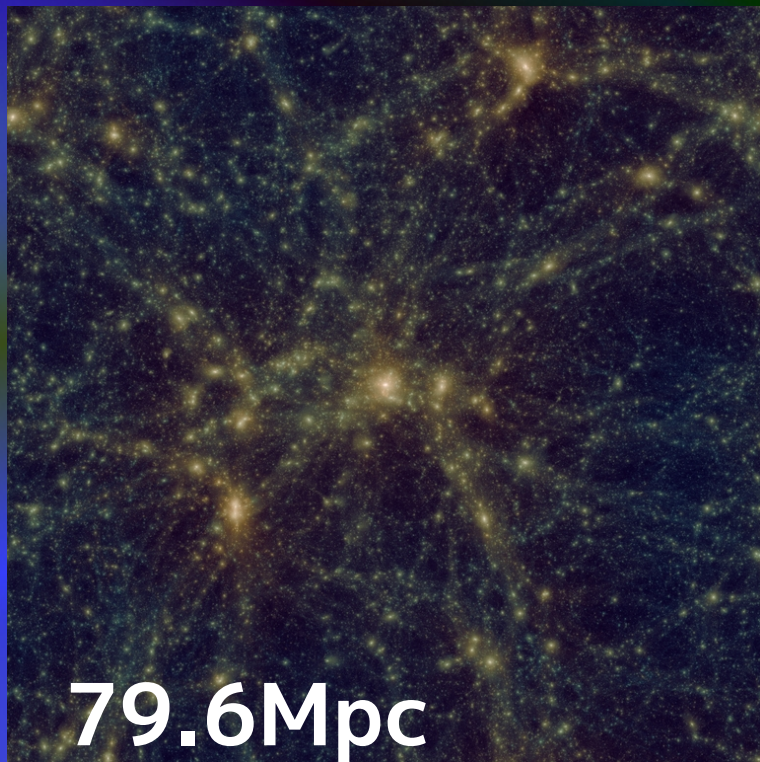
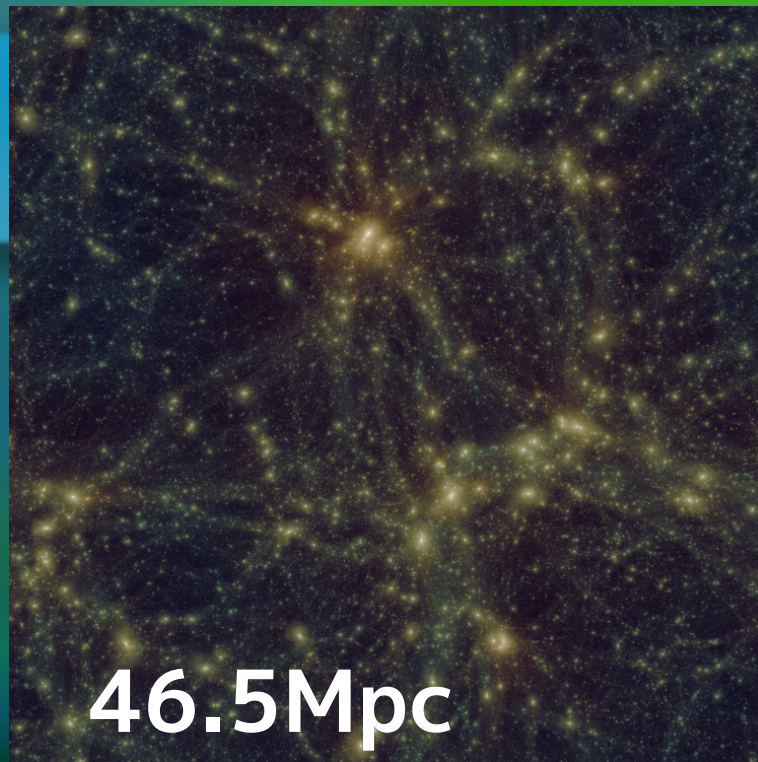
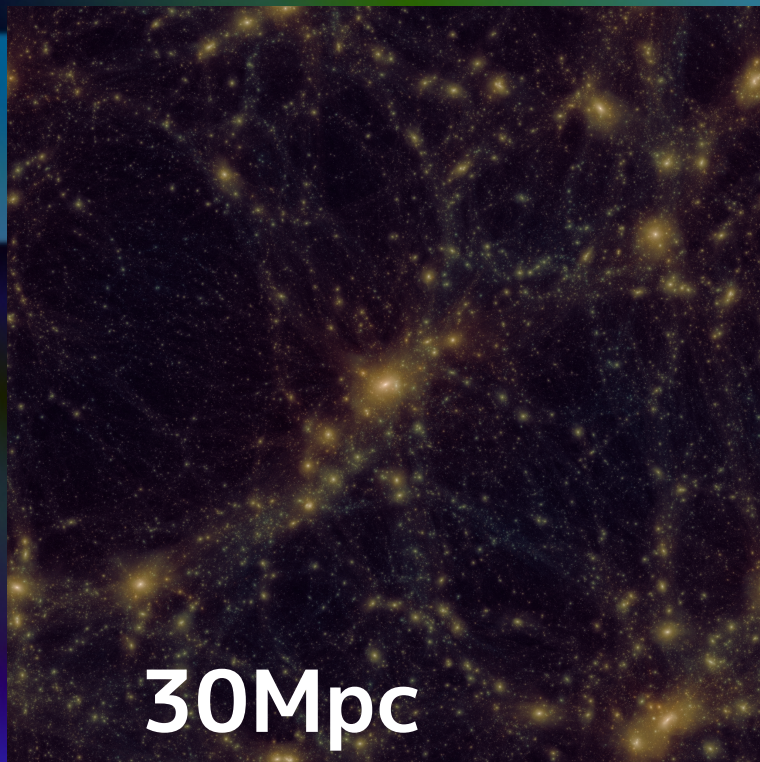
- Cosmology: 全て $\Omega=0.3$ 、 $\Lambda=0.7$ 、 $h=0.7$ 、 $\sigma_8=0.8$
- TreePM Poisson Solver (Ishiyama et al. 2009)
- SML1600、CG1024 は $\epsilon/L/N^{1/3}$ が一定で比較しやすい

Name	N	$L(\text{Mpc})$	$\epsilon(\text{kpc})$	$m(M_\odot)$
CG2048	2048^3	30.0	0.175	1.28×10^5
CG1024	1024^3	30.0	0.350	1.03×10^6
CG512	512^3	30.0	0.700	8.21×10^6
S1600	1600^3	46.5	0.700	1.00×10^6
M1600	1600^3	79.6	1.198	5.00×10^6
L1600	1600^3	171.4	2.582	5.00×10^7

M1600のみ京を
使って計算。残りは
Cray-XT4



京
K computer
TOP500リストで世界No.1獲得



どんなハローを対象にするか

- それぞれのハローカタログの中から、
 - 300 万粒子以上で分解
 - 数十個のハローがある

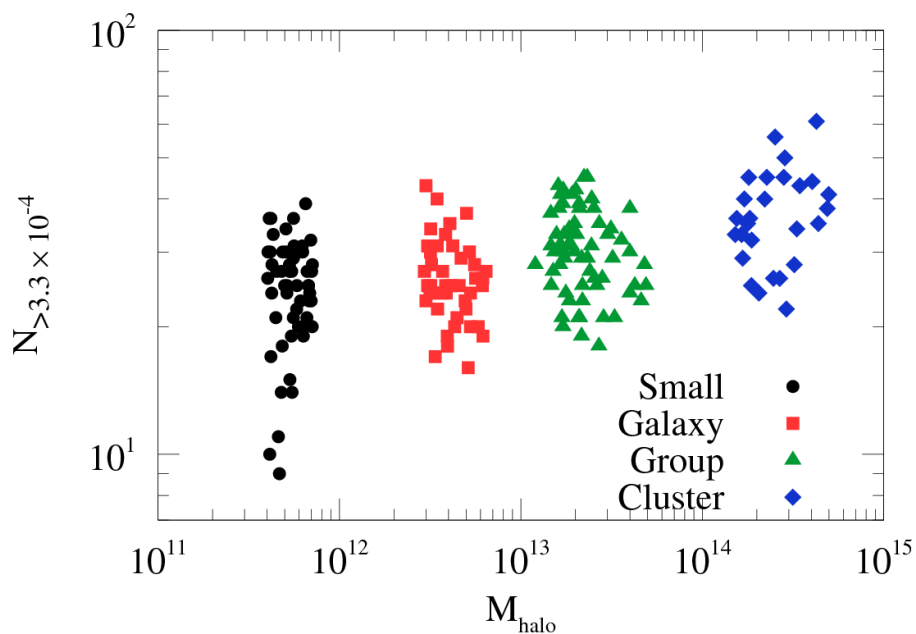
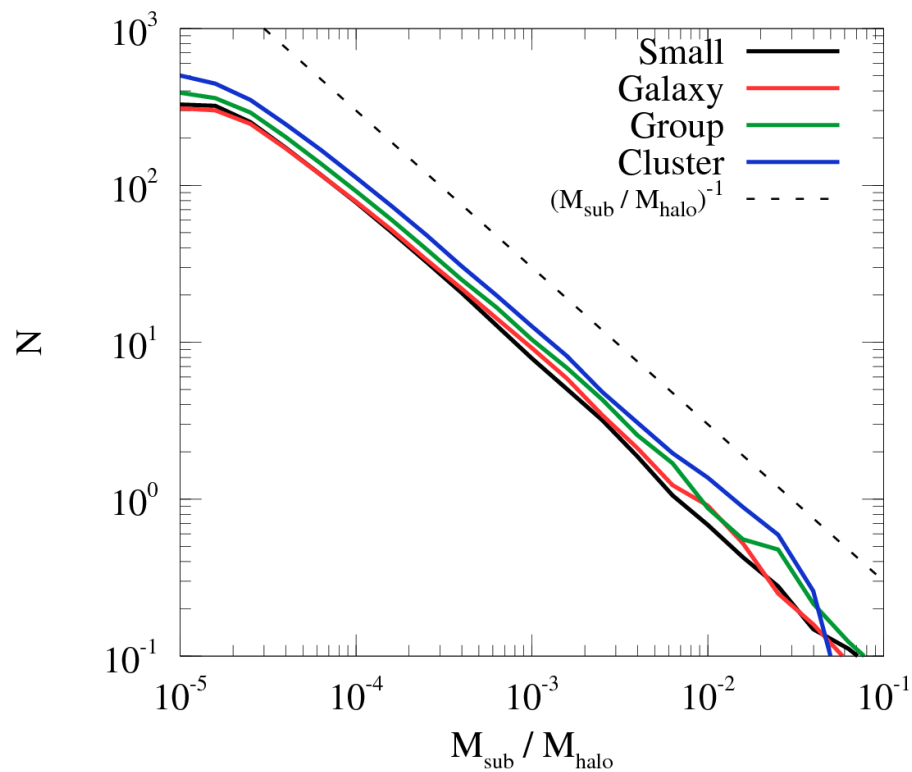
を満たす質量幅の中のハローを無バイアスに扱う



- 数千万粒子 ~ 数億粒子で構成されるハローも形成するが、数が少なく、統計的な議論をするのには向かないため、今回は扱わない

Name	Mass range(M_{\odot})	N_{halo}
CG2048	$4.0 - 7.5 \times 10^{11}$	54
S1600	$3.0 - 6.5 \times 10^{12}$	44
M1600	$1.5 - 5.0 \times 10^{13}$	65
L1600	$1.5 - 5.0 \times 10^{14}$	27

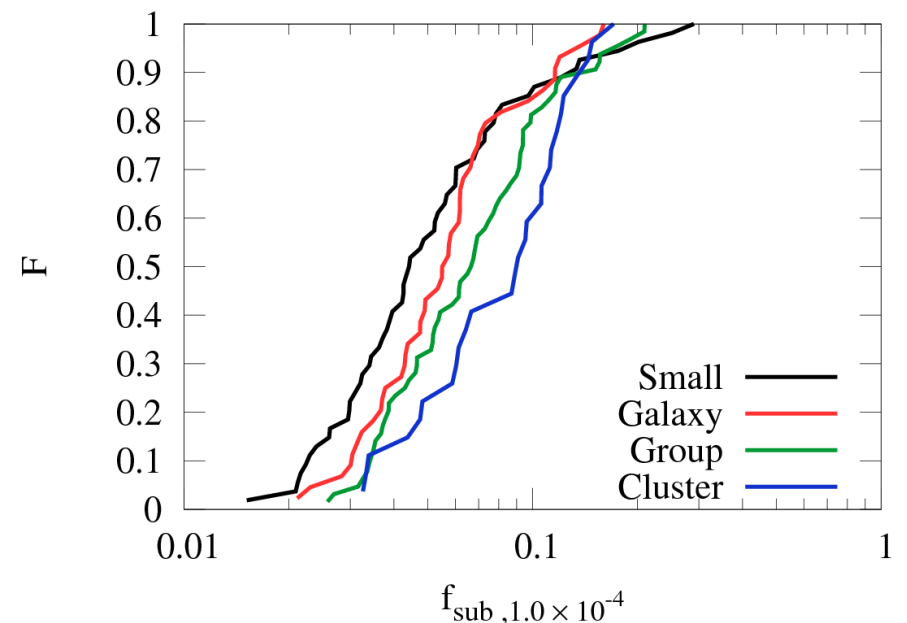
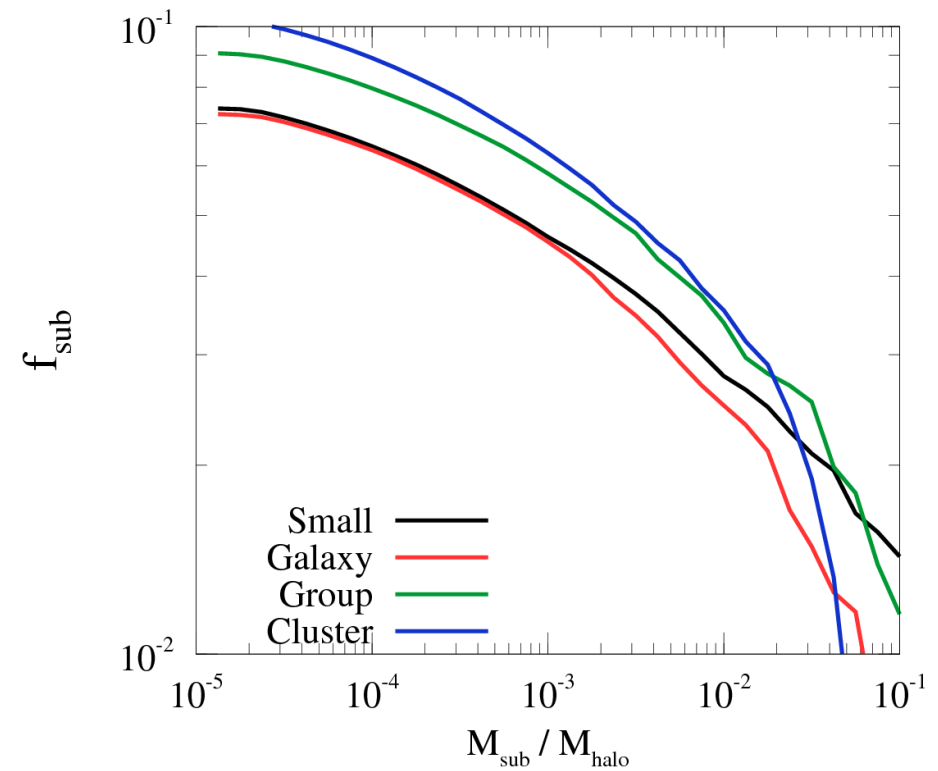
累積個数



- (上) ハロー間差異が大きいので、それぞれのスケール内で平均操作した累積個数分布
- 質量が大きいハロー程サブハローが多い
- 銀河団スケールと銀河スケールとでは 1.5 倍程度異なる
- (下) 親ハローの質量の $1/3000$ (1000 粒子以上) より大きいサブハローの個数
- ハロー間差異は質量にあまり依存しない
 - 4 ~ 5 倍の差

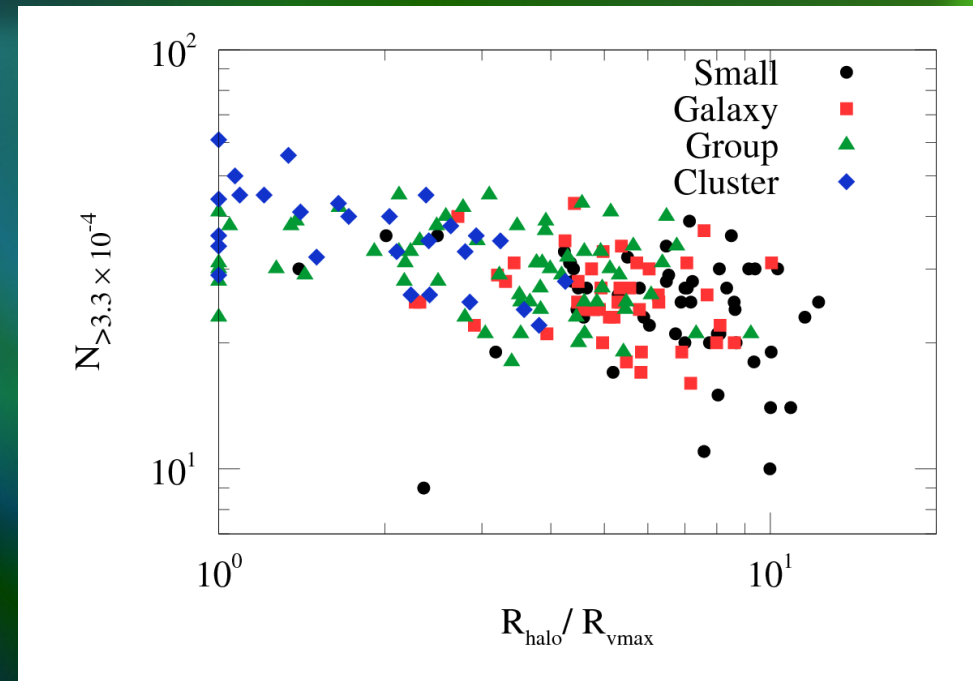
累積質量

- 質量が大きいハロー程、サブハローにある質量の割合が大きい
 - 10^{-4} より大きいサブハローで
 - Cluster: $\sim 9\%$
 - Group: $\sim 8\%$
 - Galaxy: $5\sim 6\%$
- 質量を占める
- Contini et al. 2011 より差が小さい

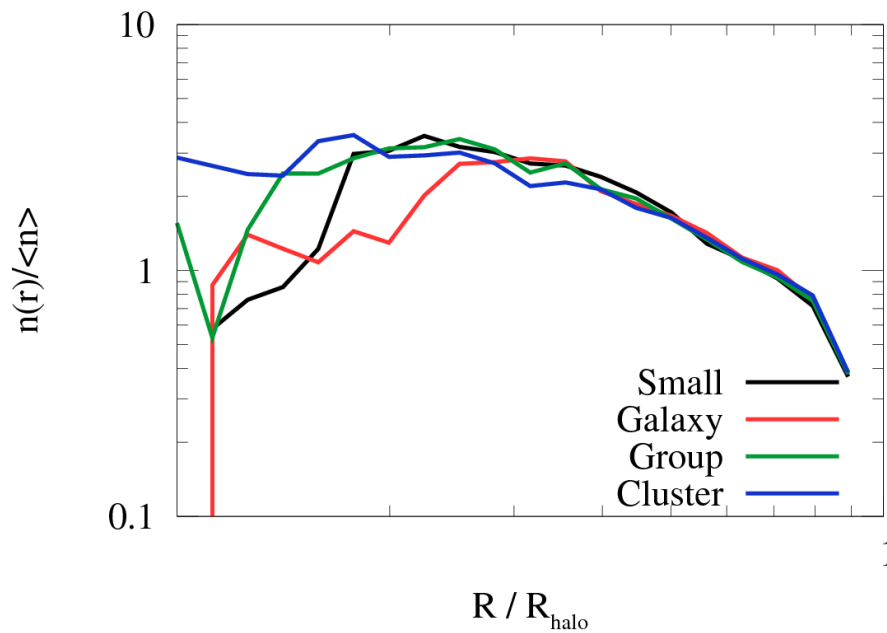


中心集中度との関係

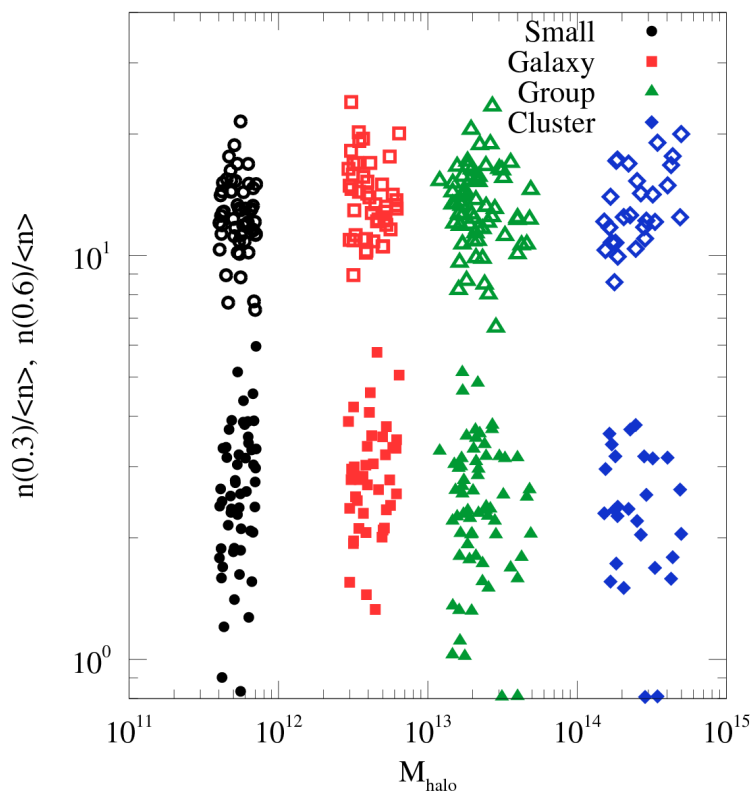
- どのスケールにおいても
中心集中度が大きい（ハロー
形成が早い）→ サブハローが
少ないという傾向が見られる
- 質量が大きいハロー程中心集中
度が小さい、という事実がその
ままサブハローの個数に反映さ
れている



空間分布



- 3.3×10^{-5} より大きいサブハローの個数密度
 - サイズが大きいハローは中心部により多くのサブハローを持つ
 - ハローの内側ほどハロー間差異が大きい
 - 半径の 0.3 倍 ~4 倍
 - 半径の 0.6 倍 ~2 倍
- 程度の幅がある。



$R/R_{\text{halo}} =$
0.6 (x10)

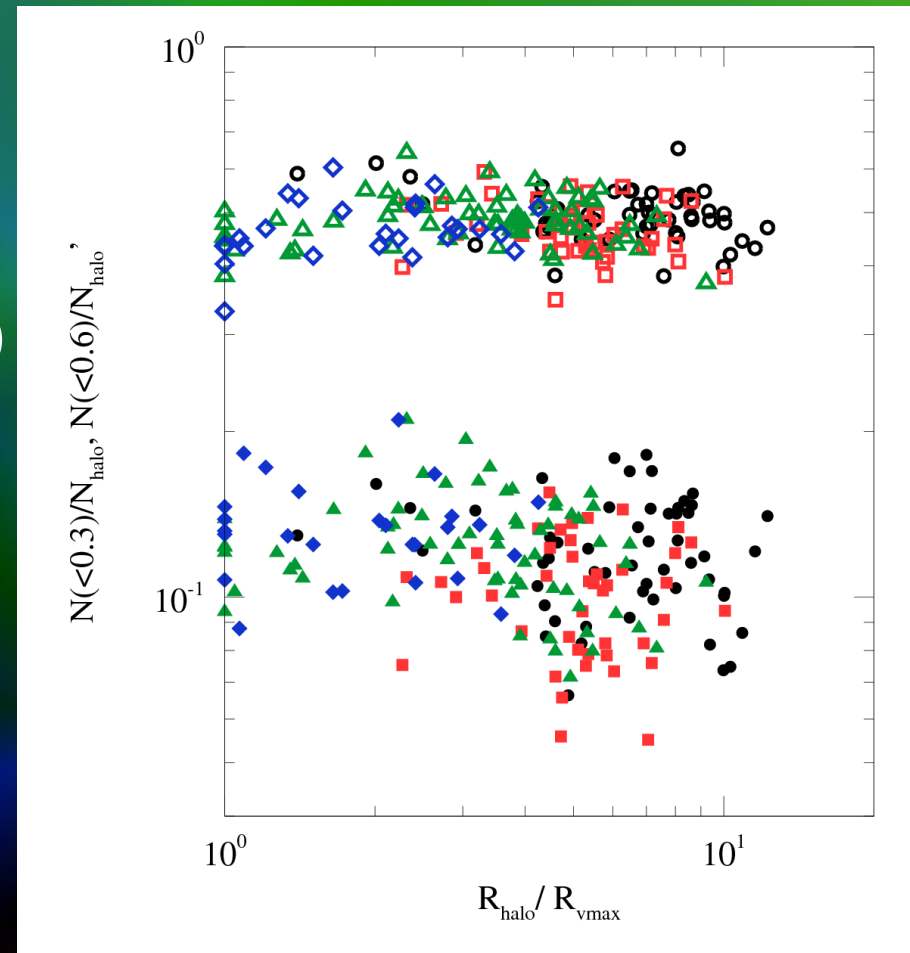
$R/R_{\text{halo}} =$
0.3

空間分布とハローの中心集中度

- ハローの内側に入っているサブハローの個数が、ハローの構造に影響を受ける
- 形成が早いハロー
→サブハローが中心に落ちるのが早い
→効果的に質量を剥ぎ取られる
→数が少なくなる

$$R/R_{\text{halo}} = 0.6 \text{ (x10)}$$

$$R/R_{\text{halo}} = 0.3$$



まとめ

- 高分解能の宇宙論的 N 体シミュレーションセットを用いて、小銀河 ~ 銀河団スケールのハロー内のサブハローの分布を調べた
- 質量が大きいハロー程、サブハローが多く、銀河団スケールと銀河スケールとでは 1.5 倍程度異なる
 - 中心部でより多くのサブハローを持つ
- 質量が大きいハロー程、質量のうちサブハローが占める質量の割合が大きい。ただし先行研究よりその差は小さい
- サブハローの個数はハロー間差異が大きく、ハロー中心部程差が大きい
- 中心集中度が大きいハロー程、中心部でサブハローが少なくなる傾向がある（効果的な潮汐剥ぎ取り）