

New Numerical Galaxy Catalog **(v^2 GC) Model における** **超大規模宇宙論的 N 体** **シミュレーション**

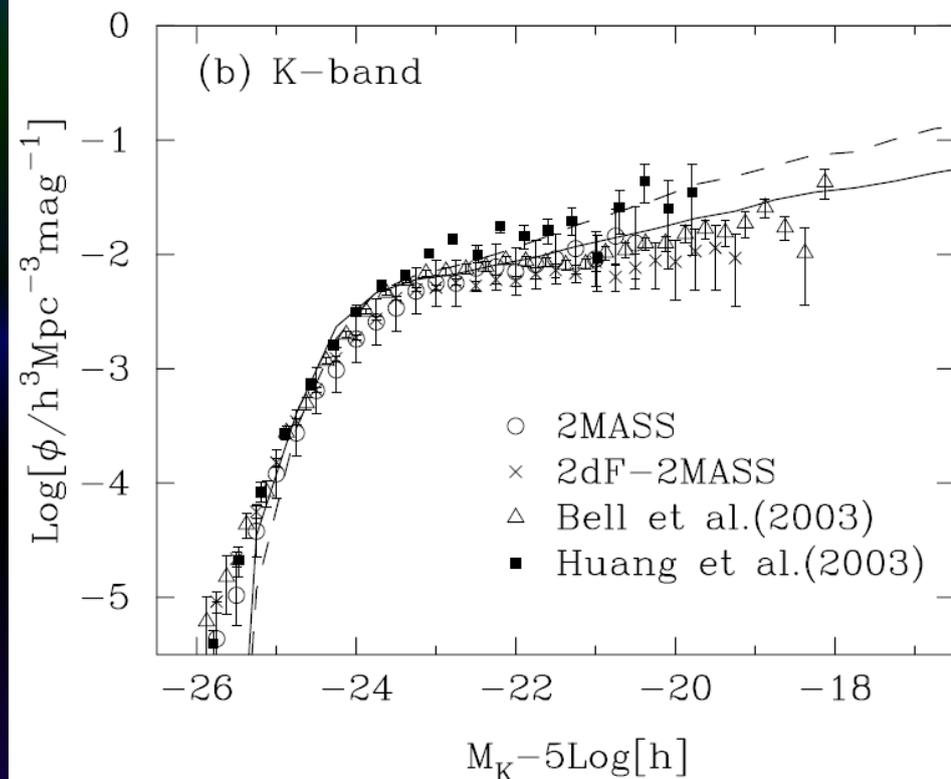
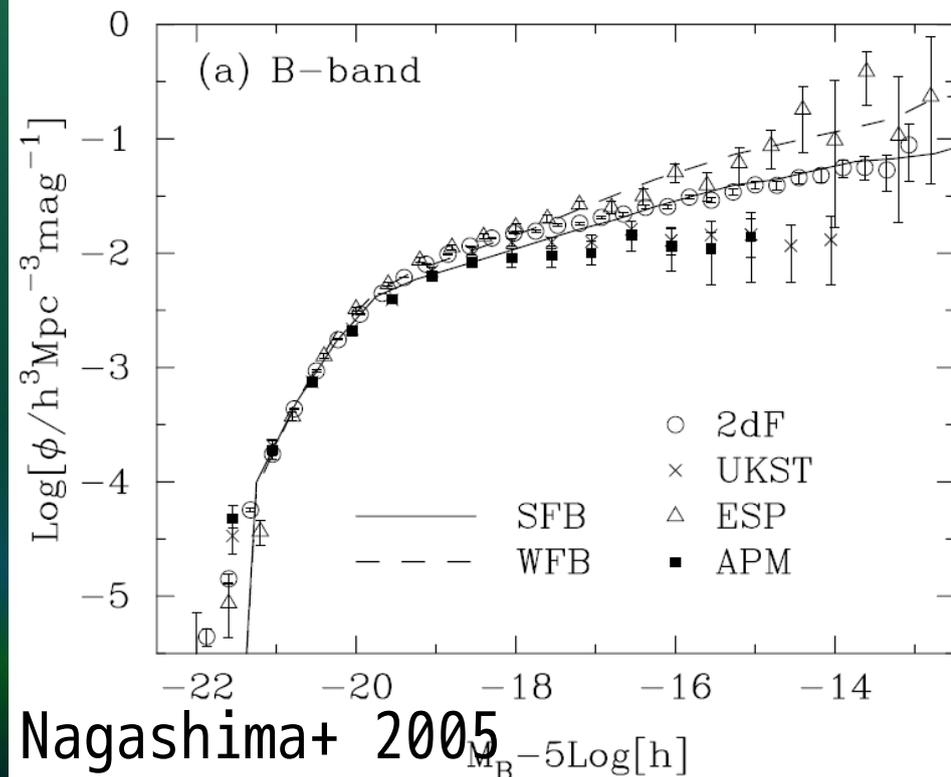
Ishiyama, Enoki, Kobayashi, Makiya,
Nagashima, Oogi, arXiv: 1412.2860

石山智明 (筑波大学)

榎基宏 (東京経済大学)、小林正和 (愛媛大学)、
真喜屋龍 (東京大学)、長島雅裕 (文教大学)、大木平 (文教大学)

New Numerical Galaxy Catalog (v^2GC)

- 準解析的銀河・AGN 形成モデル
 - 個々の銀河の SED、星形成史、ガス・星質量などが得られる
- vGC (Nagashima+ 2005) の後継 (Makiya+ in prep)
- SMBH 形成進化 + AGN feedback
- MCMC による parameter fitting
- **世界最大規模の N 体シミュレーション**

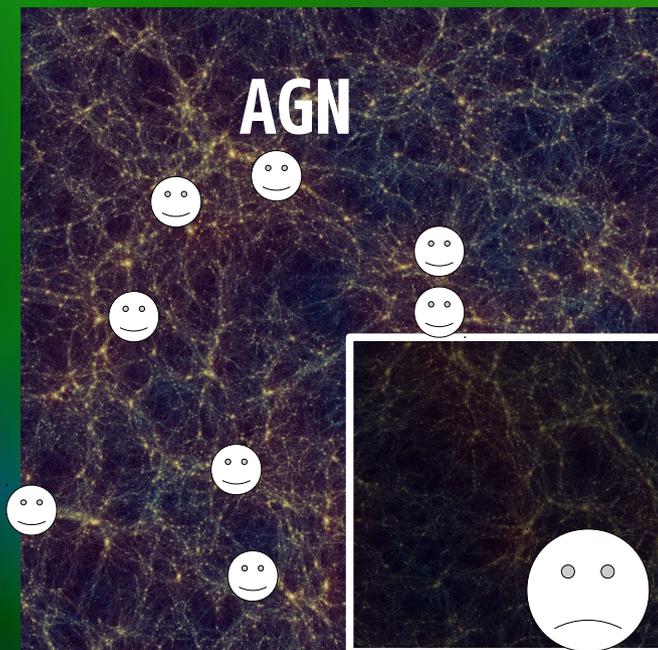


準解析的銀河形成・AGN モデルにおける 宇宙論的 N 体シミュレーション

- モデル上ではバリオンの進化を、ダークマターハローの合体による階層的構造形成史 (merger tree) の枠組みのなかで現象論的に解いていく
- Merger tree を得る方法は2つ
- Extended Press Shechter などの理論モデル
 - 低計算コスト
 - Merger rate などが N 体シミュレーションとは異なる
- 宇宙論的 N 体シミュレーション
 - 高計算コスト、莫大な人的コスト
 - **銀河・AGN の位置情報**が得られる (相関関数などが計算可能に)

HSC による AGN の観測と比較するためには

- High-z AGN の個数密度 $\sim 10^{-6} \text{ Mpc}^{-3}$!!!
- **数百 Mpc 立方以上の領域**をシミュレーションする必要有
- 銀河の階層的構造形成は追いたい
→ **必要な粒子数 4096^3 以上**



スパコンによる大規模シミュレーション



京 @ 理研

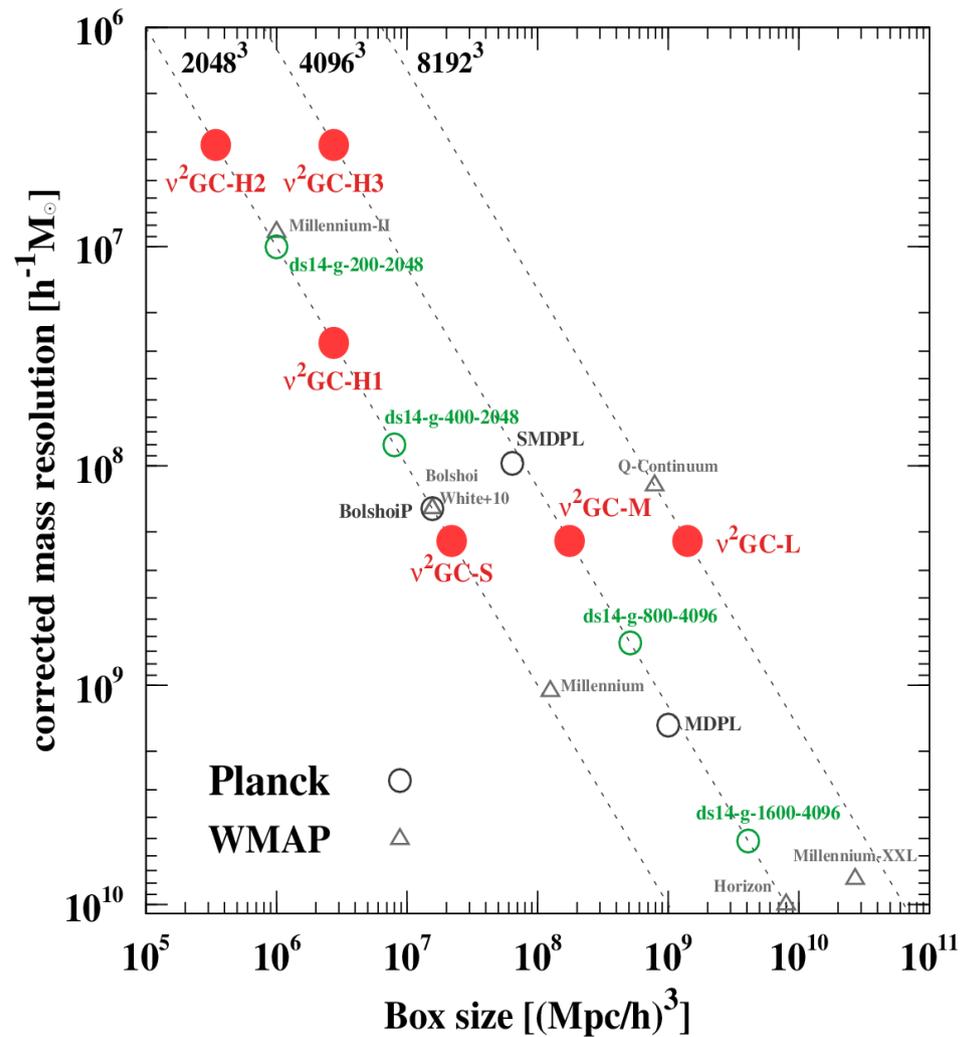


アテルイ @NAOJ

大規模スパコン向け
重力多体問題コード、
GreeM の開発
(Ishiyama+2009, 2012)

ν^2 GC simulation suite

- Millennium simulation (Springel+05) に比べ
 - **11 倍**大きい空間体積
 - **4 倍**良い質量分解能
- 宇宙論も最新 (Planck)
- 様々な空間体積、質量分解能のラン
→ **Low- and high-z 銀河・AGN**
を幅広くカバー



Name	N	$L(h^{-1}\text{Mpc})$	$m(h^{-1}M_{\odot})$	$\varepsilon(h^{-1}\text{kpc})$	$M_{\text{min}}(h^{-1}M_{\odot})$
ν^2 GC-L	$8192^3 = 549,755,813,888$	1120.0	2.20×10^8	4.27	8.79×10^9
ν^2 GC-M	$4096^3 = 68,719,476,736$	560.0	2.20×10^8	4.27	8.79×10^9
ν^2 GC-S	$2048^3 = 8,589,934,592$	280.0	2.20×10^8	4.27	8.79×10^9
ν^2 GC-H1	$2048^3 = 8,589,934,592$	140.0	2.75×10^7	2.14	1.10×10^9
ν^2 GC-H2	$2048^3 = 8,589,934,592$	70.0	3.44×10^6	1.07	1.37×10^8
ν^2 GC-H3	$4096^3 = 68,719,476,736$	140.0	3.44×10^6	1.07	1.37×10^8

z=7

1120Mpc/h
8192³

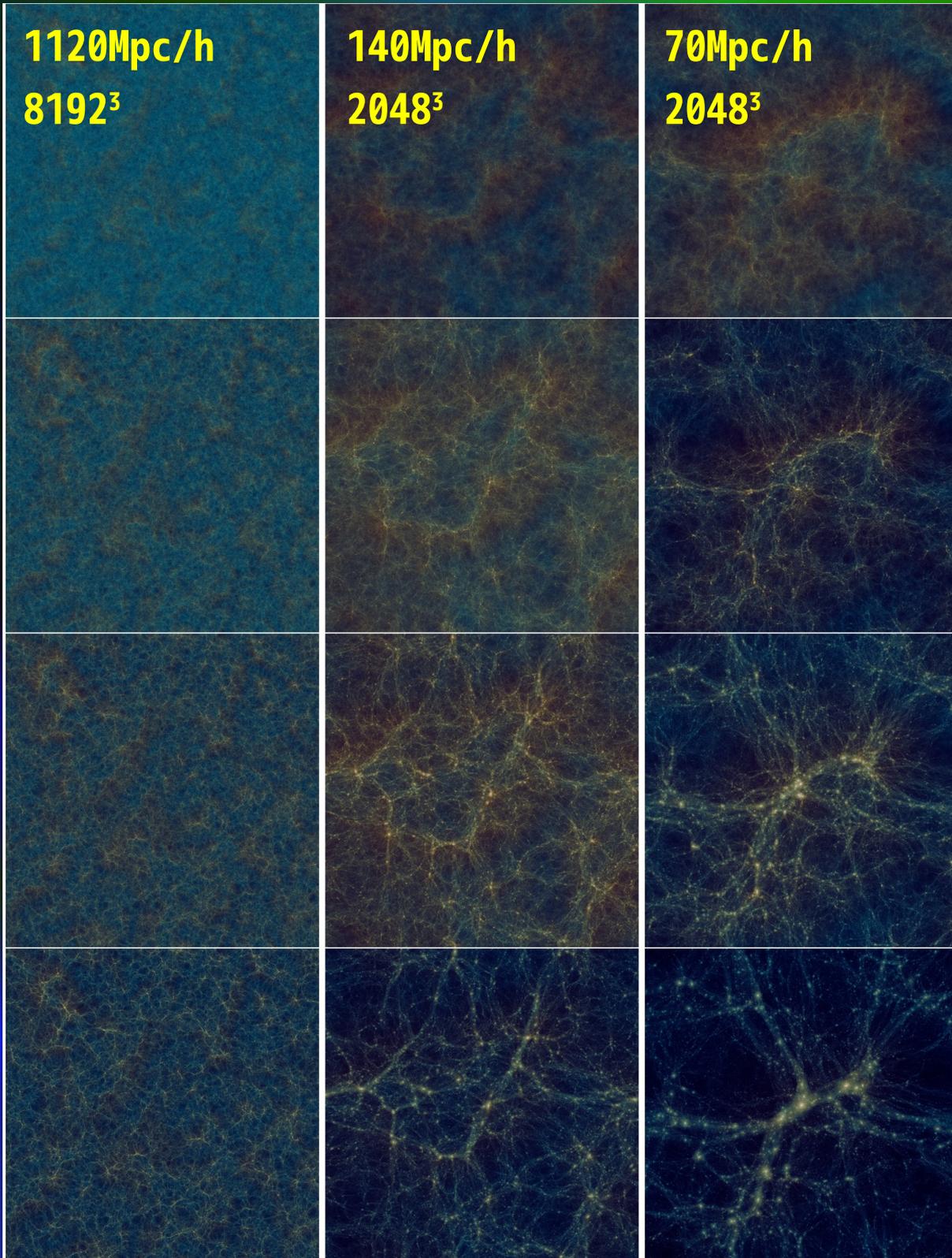
140Mpc/h
2048³

70Mpc/h
2048³

z=3

z=1

z=0



Ishiyama+,
arXiv:
1412.2860

$N = 8192^3 =$
549,755,813,888

$L = 1.12 \text{ Gpc}/h$
 $m = 2.2 \times 10^8 \text{ Msun}/h$

Planck Cosmology

スナップショットは

800TB!

→

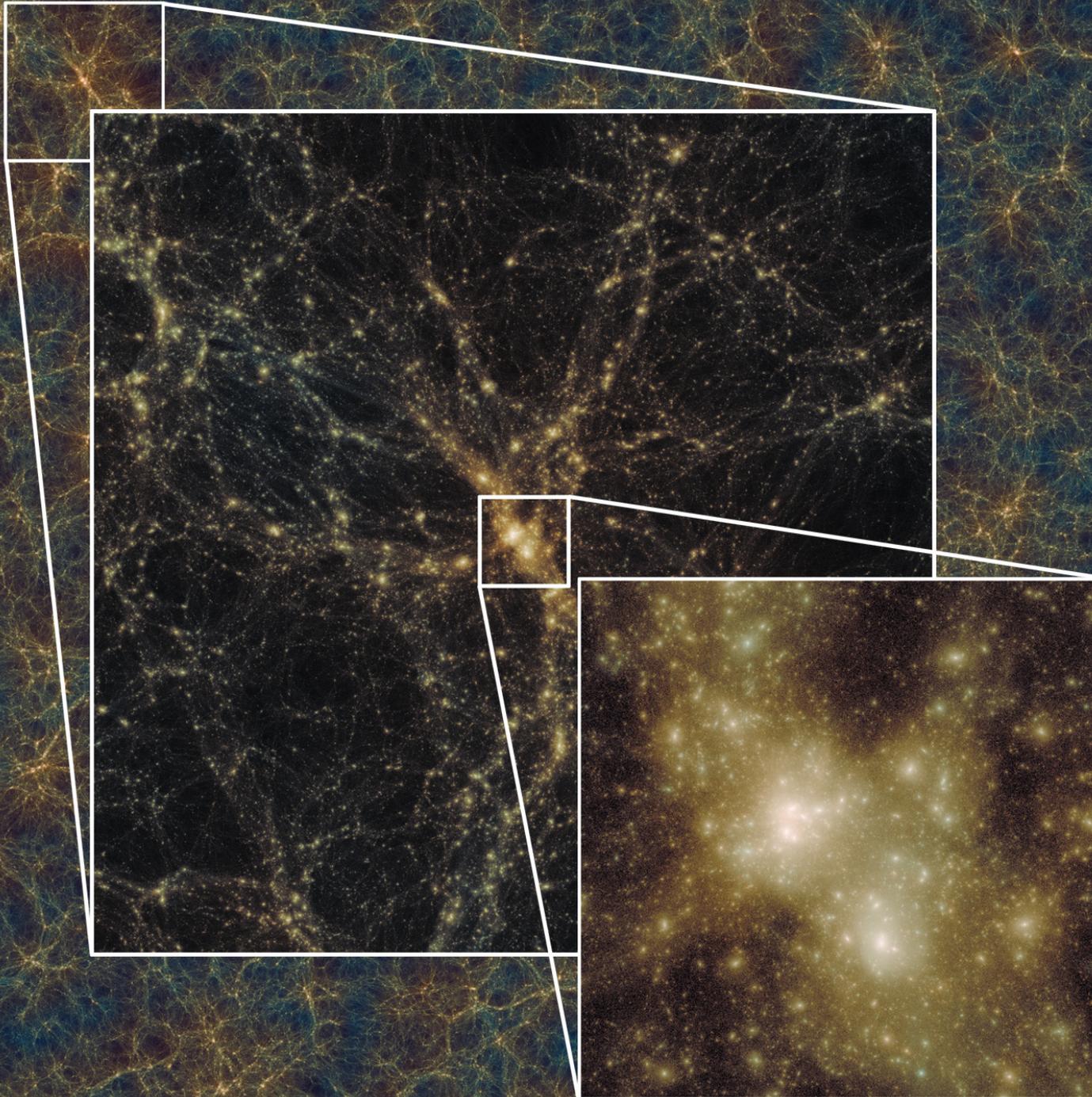
Merger tree

にすると **850GB**

Ishiyama+,

arXiv:

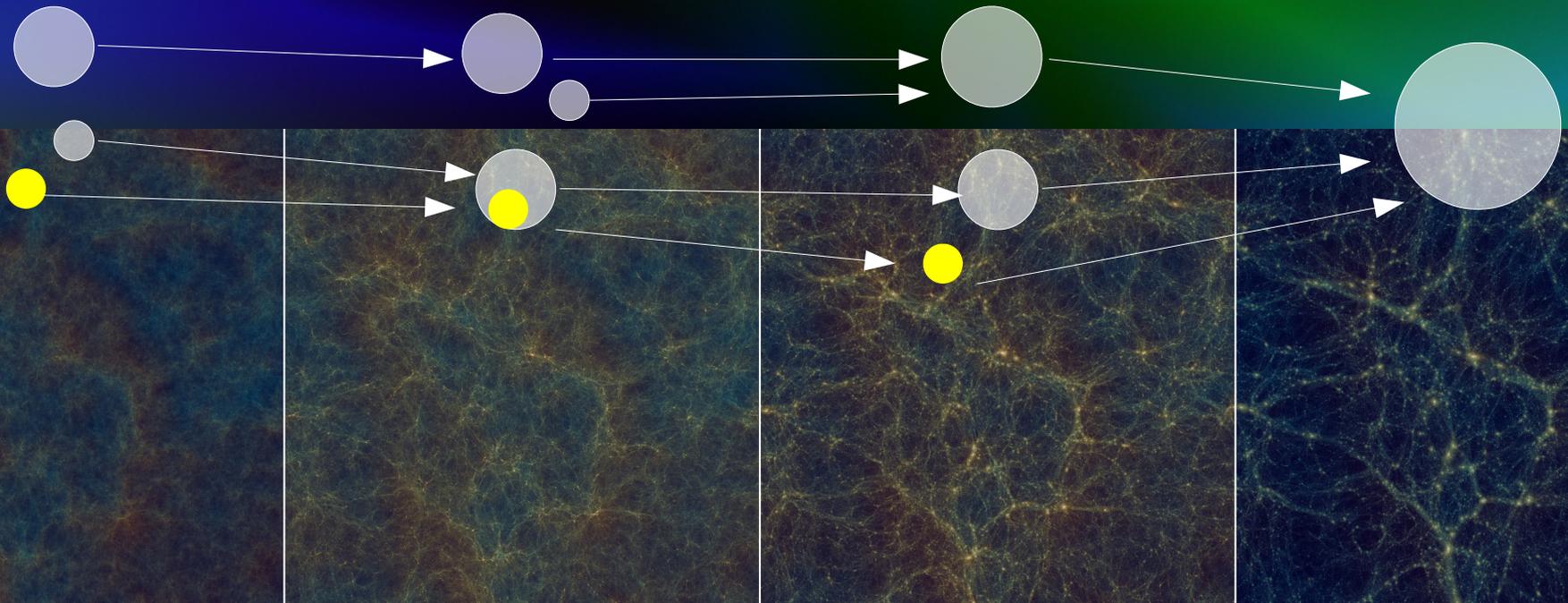
1412.2860



Merger tree generation

- redshift z_{i+1} のハローを構成する粒子を最も多く含む、 z_i ($z_{i+1} > z_i$) のハローをつなぐ
 - ハローを構成する粒子 ID をひたすら比較する
 - fragmentation したハローはツリーから除く

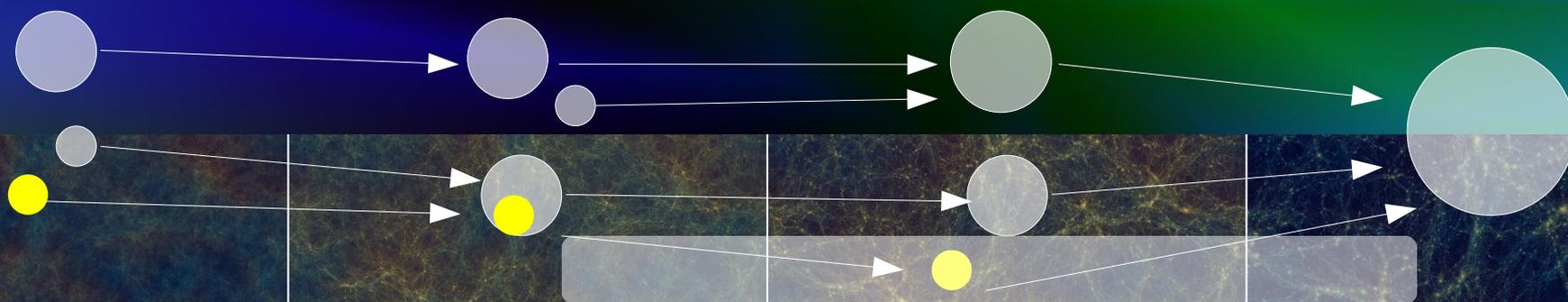
各タイムスライス
(全部で 50-60 枚)
でのハローは、
friends-of-friends
法 ($b=0.2$) で検出



Merger tree generation

- redshift z_{i+1} のハローを構成する粒子を最も多く含む、 z_i ($z_{i+1} > z_i$) のハローをつなぐ
 - ハローを構成する粒子 ID をひたすら比較する
 - fragmentation したハローはツリーから除く

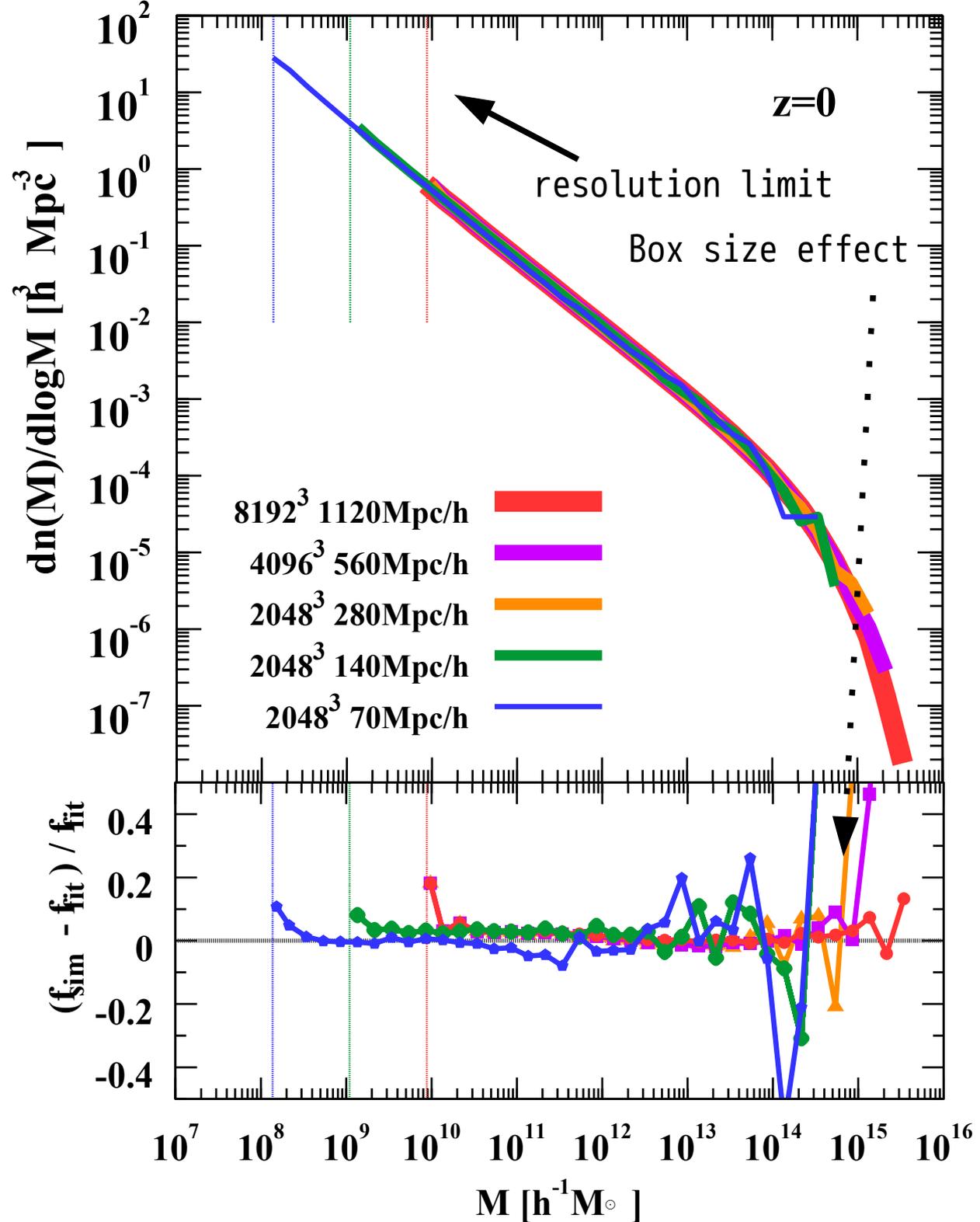
各タイムスライス
(全部で 50-60 枚)
でのハローは、
friends-of-friends
法 ($b=0.2$) で検出



fragmentation! ツリーから除く

Halo mass function

- (上) mass functions
(下) best fit からのずれ
- 全ての mass functions はおおよそ 10% レベルで収束

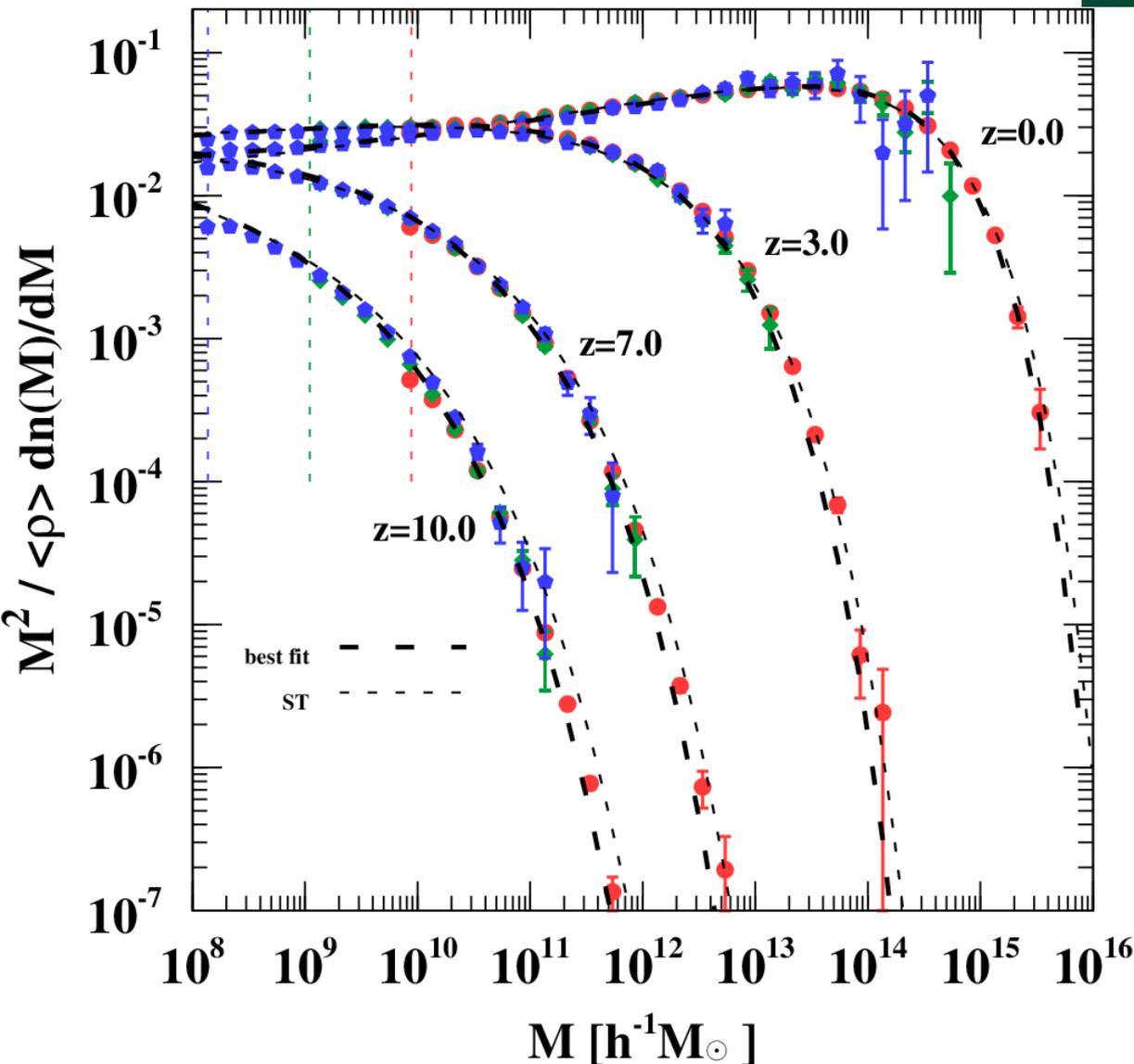


Multiplicity functions

$$\frac{dn}{dM} = \frac{\rho_0}{M} \frac{d \ln \sigma^{-1}}{dM} f(\sigma)$$

$$f(\sigma) = A \left[\left(\frac{B}{\sigma} \right)^C + 1 \right] \exp \left(\frac{-D}{\sigma^2} \right)$$

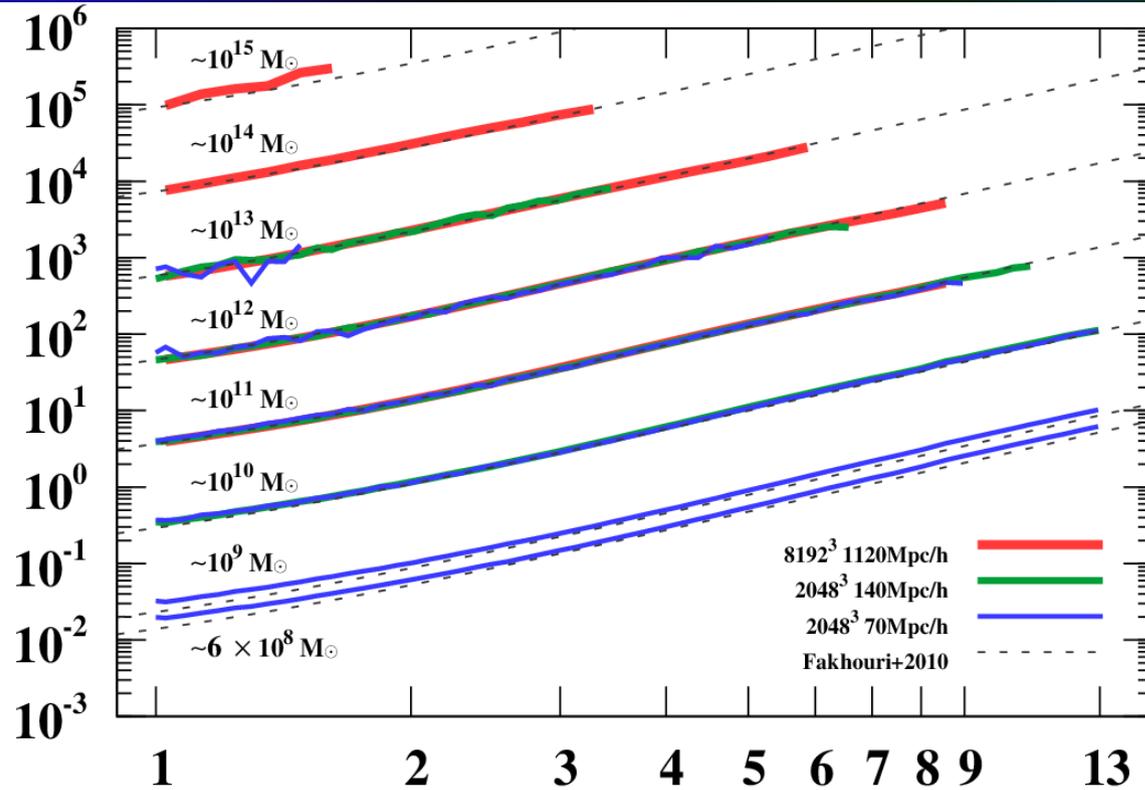
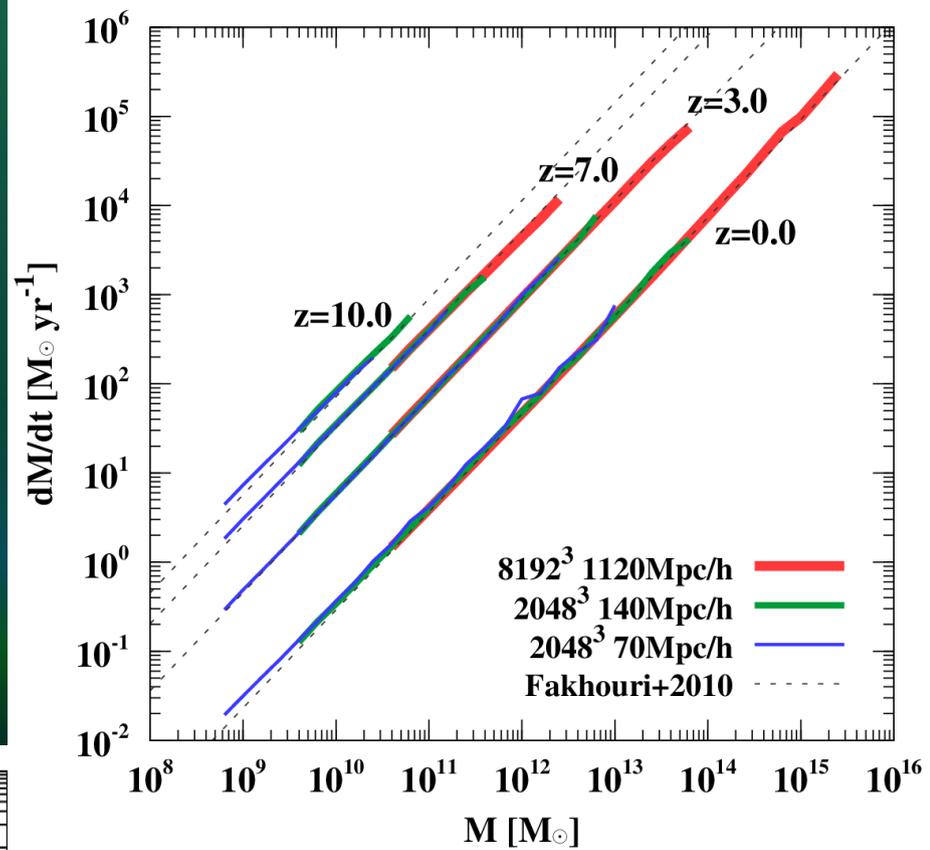
$$A = 0.193, B = 2.184, C = 1.550, D = -1.186$$



- 幅広い redshift range にわたって良くフィットできる
- Sheth and Tormen のものより、high-z でややハロー数が少ない

Mass accretion rate

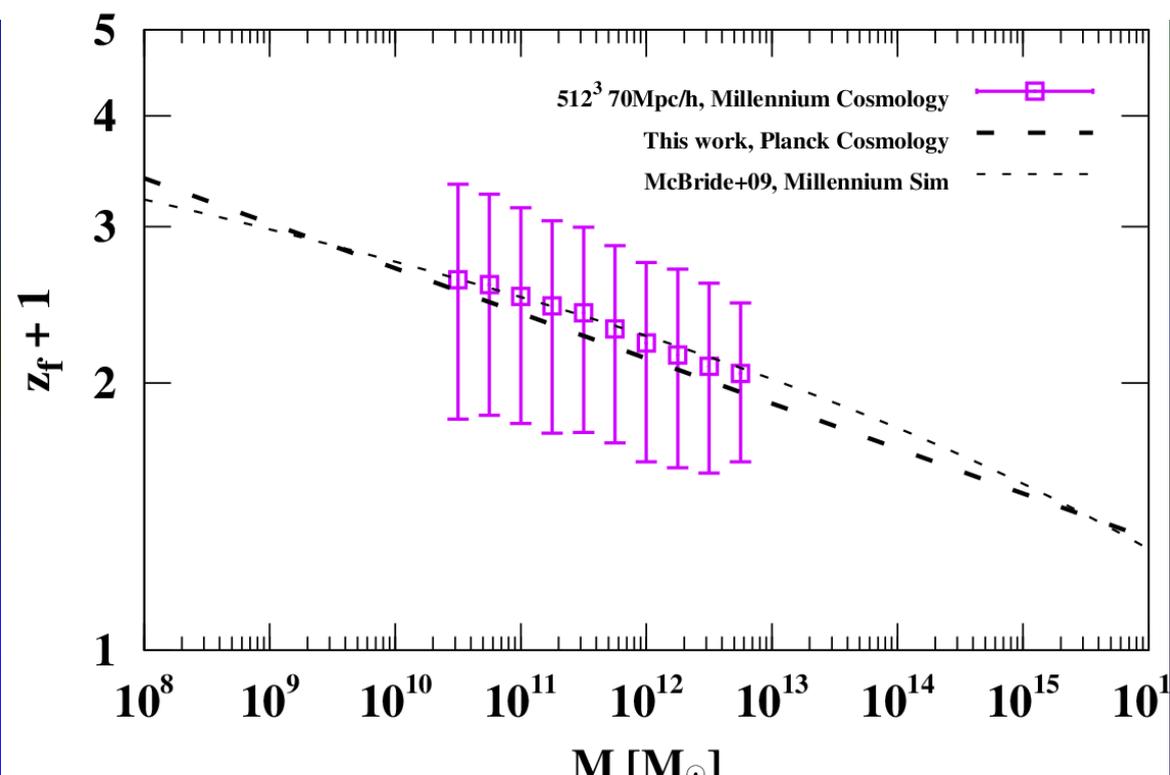
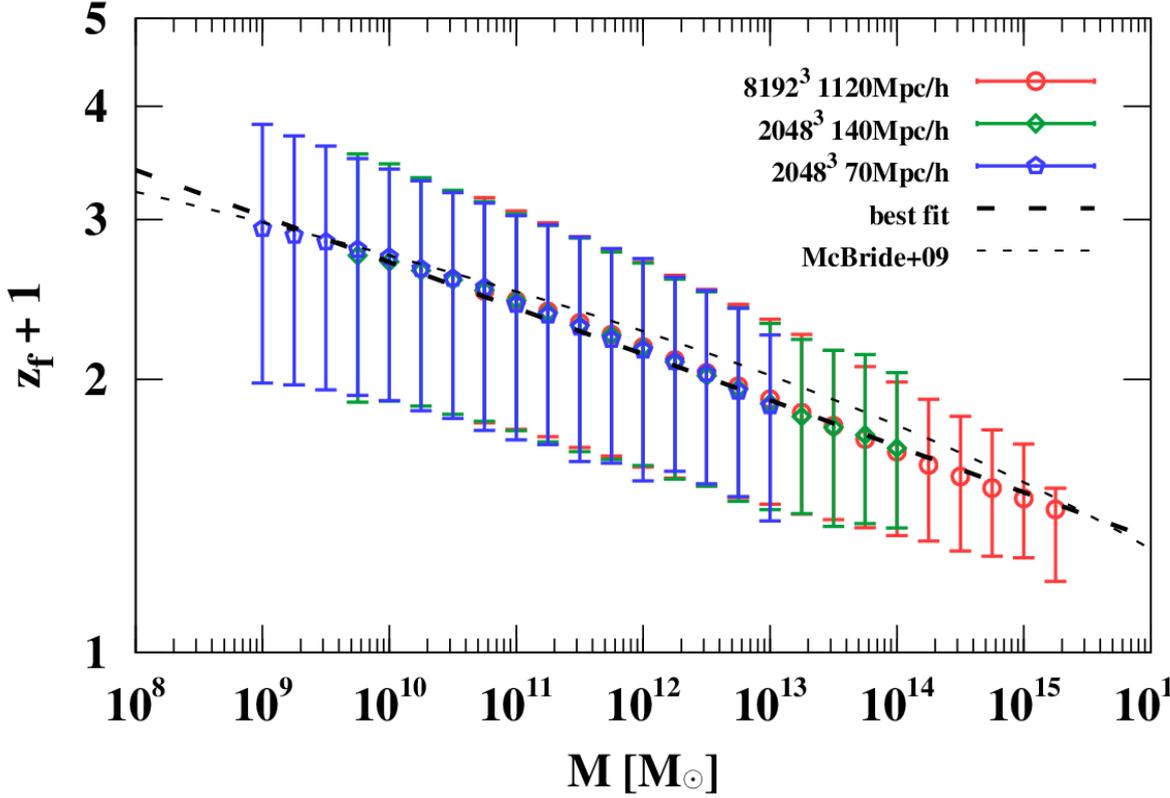
- 質量依存性も、redshift 依存性も、Millennium Simulation の結果 (Fakhouri+10) と consistent



$$\left\langle \frac{dM}{dt} \right\rangle = 46.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left(\frac{M}{10^{12} M_{\odot}} \right)^{1.1} \times (1 + 1.11z) \sqrt{\Omega_0 (1+z)^3 + \lambda_0}$$

Fakhouri+ 2010

Half mass formation redshift

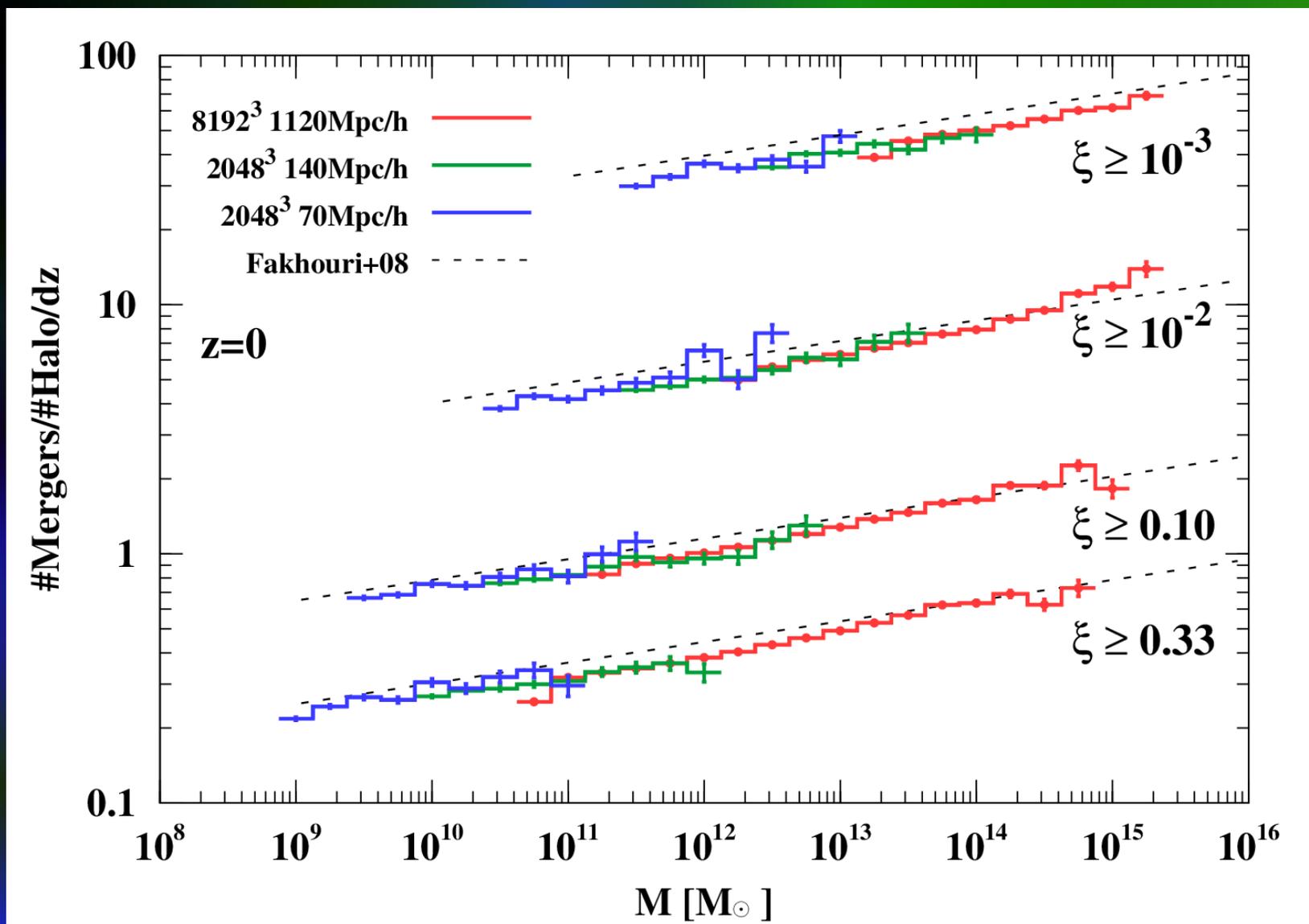


- 典型的なハロ－形成時刻は、Millennium simulation より、やや low- z

- Cosmological parameter の違いが効いている

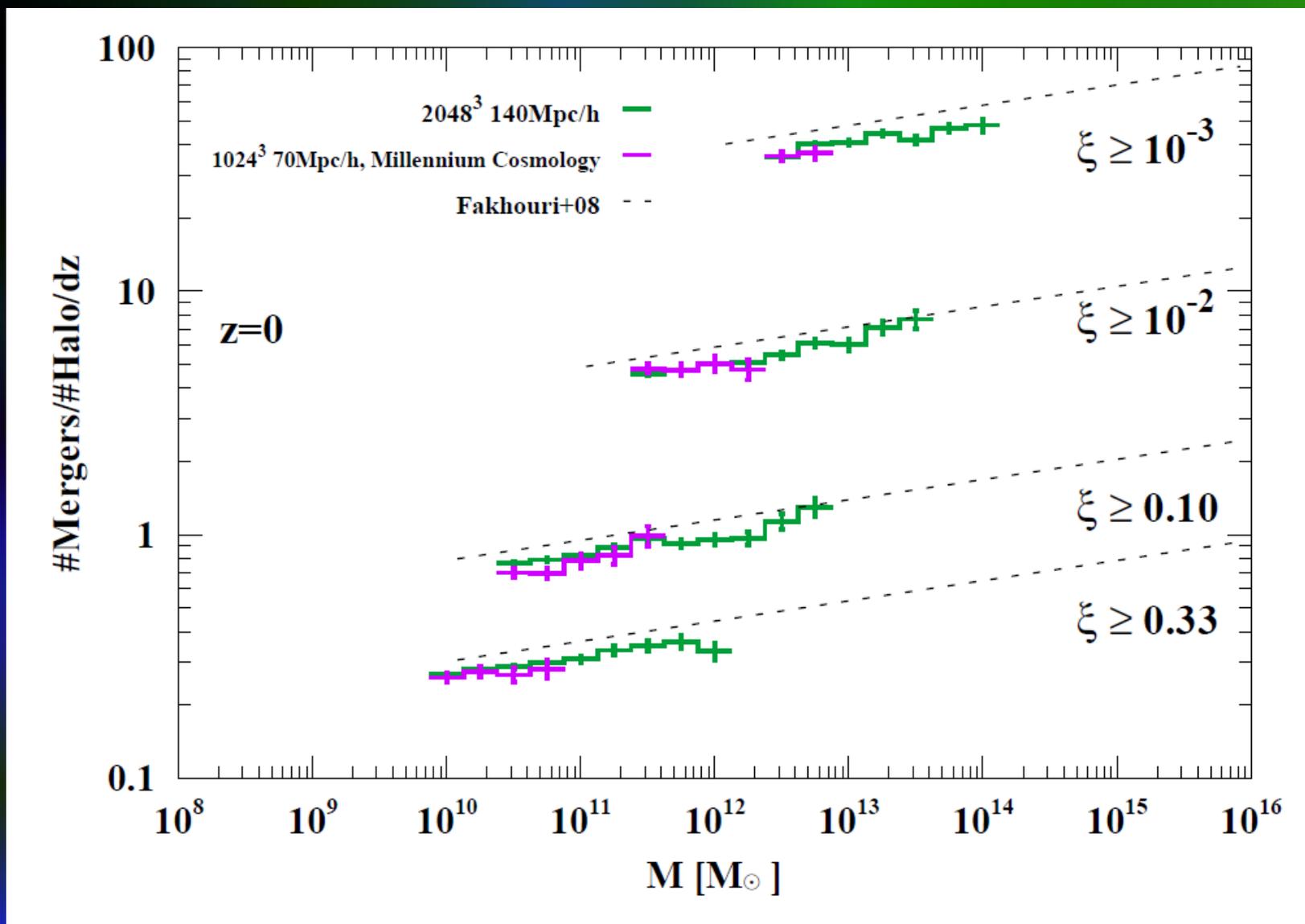
$$1 + z_f = 2.69 \left(\frac{M}{10^{10} M_\odot} \right)^{-0.0508}$$

Mean merger rate



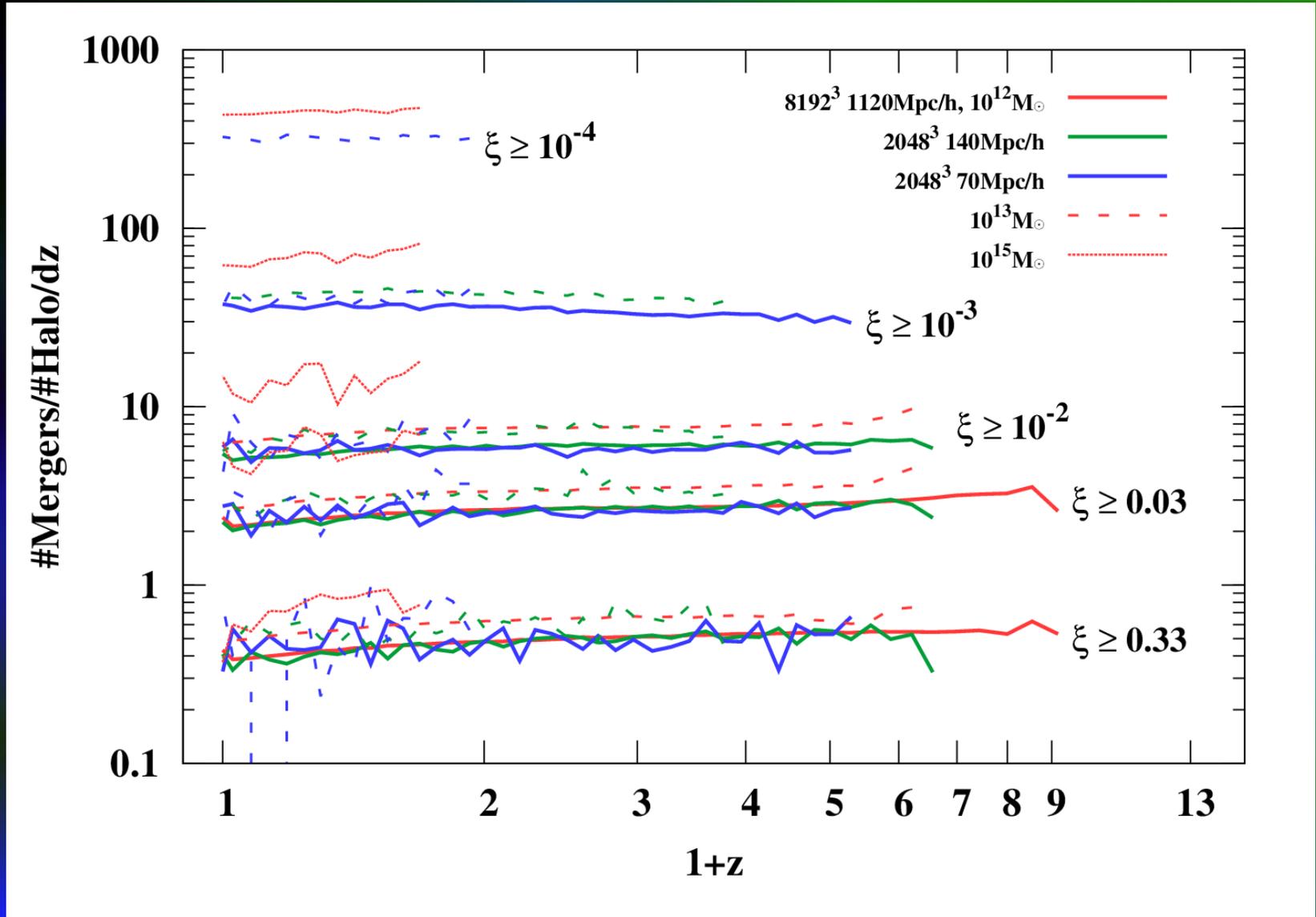
- ハロー質量への弱い依存性
- Millennium simulation を解析してえられた fitting (Fakhouri+08) は merger の回数を少し多めに見積もる

Mean merger rate



- Half mass formation redshift とは異なり cosmology 依存性はなさそうである
 - Merger tree 作成方法の違い? resolution?

Redshift Evolution

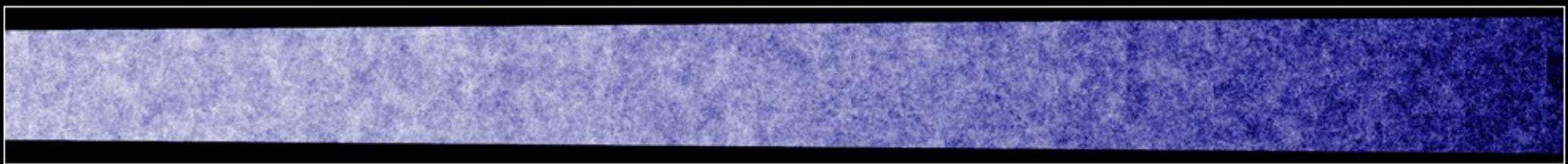
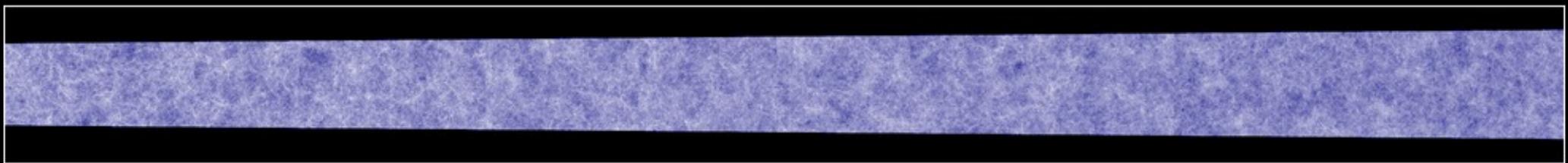
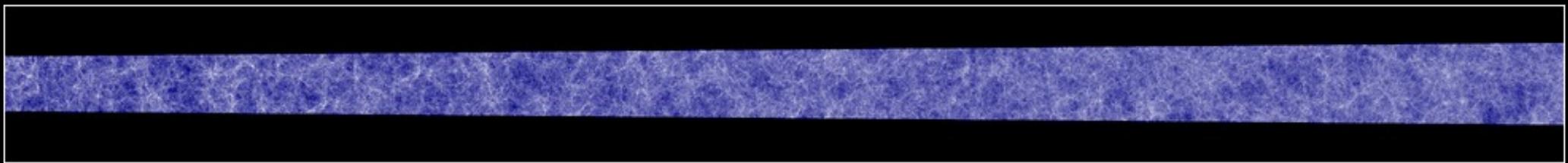
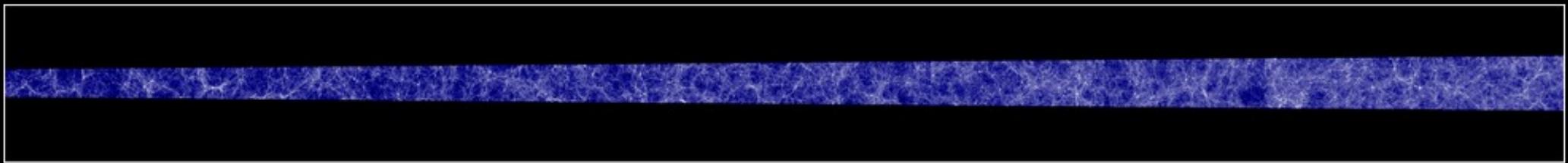


- Redshift 依存性はほとんどない
- Redshift に関係なく、mass 比依存性と、弱い質量依存性は常に存在

- 新しい準解析的銀河形成モデル ,
v²GC (New Numerical Galaxy Catalog: Makiya+ in prep) と
組み合わせ、銀河、AGN の疑似カタログを作成中
 - カタログはそのうち公開
 - lightcone も生成可能
- 一部ハロー、サブハローカタログは公開済
 - 2048³、280Mpc/h、140Mpc/h、70Mpc/h のシミュレーション
 - $z=0, 1, 3, 7$
 - 4096³、560Mpc/h のデータももうすぐ
 - 要望があれば他のデータも……

<http://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/ishiyama/nngc/>

- 個人で扱えるデータ量に限界を感じてきた……





The v^2GC simulations

Home

Simulations

Gallery

Public Data

Adventure

Public Data

Friend-of-Friends (Davis et al. 1985) halo catalogs and Rockstar (Behroozi et al. 2013) halo/subhalo catalogs are available. Other data can be available upon request (ishiyama - at - ccs.tsukuba.ac.jp)

v^2GC -S (2048³, 280Mpc/h)

FoF z=0	Rockstar z=0
FoF z=1	Rockstar z=1
FoF z=3	Rockstar z=3
FoF z=7	Rockstar z=7

[http://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/
Astro/Members/ishiyama/nngc/](http://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/ishiyama/nngc/)

まとめ

- 世界最大かつ世界最高分解能のギガパーセクスケール宇宙論的 N 体シミュレーションを実行し、merger tree を作成した
- 空間体積は小さいが、質量分解能が高いものも作成した
 - Low- and high-z 銀河・AGN の形成、進化をカバー
 - 世界ではじめて high-z AGN の空間相関が計算可能に
- Mass function, accretion rate, formation redshift, merger rate の新しい fitting 関数を提供
 - これまで使われてきたものとは比べ大きく異なるわけではない
 - Half mass formation redshift は一番 cosmology に敏感
- 銀河カタログ作成中。ハローデータは一部公開済