

# 京による構造形成 シミュレーション

石山 智明

千葉大学

ポスト京重点課題9 「宇宙の基本法則と進化の解明」

**1. 最小スケールからの階層的  
構造形成とサブハロー**

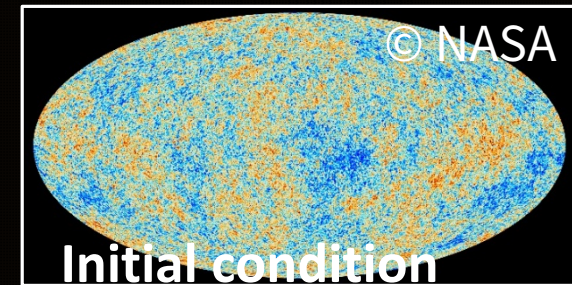
**2. 大規模シミュレーション  
データの公開**

# 最小スケールからの階層的構造形成とサブハロー

- スーパーコンピュータによる大規模構造形成シミュレーションを用い、ダークマターハローの暗黒物質位相空間分布を従来よりも良い精度で明らかにし、ダークマター検出のための手がかりを得る
  - 間接検出実験
  - 直接検出実験
  - 構造形成理論

# 宇宙論的構造形成シミュレーション (ダークマターのみ)

© 4D2U @ NAOJ  
4D2U



360 degree panoramic video for head mounted display  
is available on <http://4d2u.nao.ac.jp/English/>

# ハロースの構造

- **Central Cusp**

- Einasto profile
- NFW profile

$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{(r/r_s)[1 + (r/r_s)]^2}$$

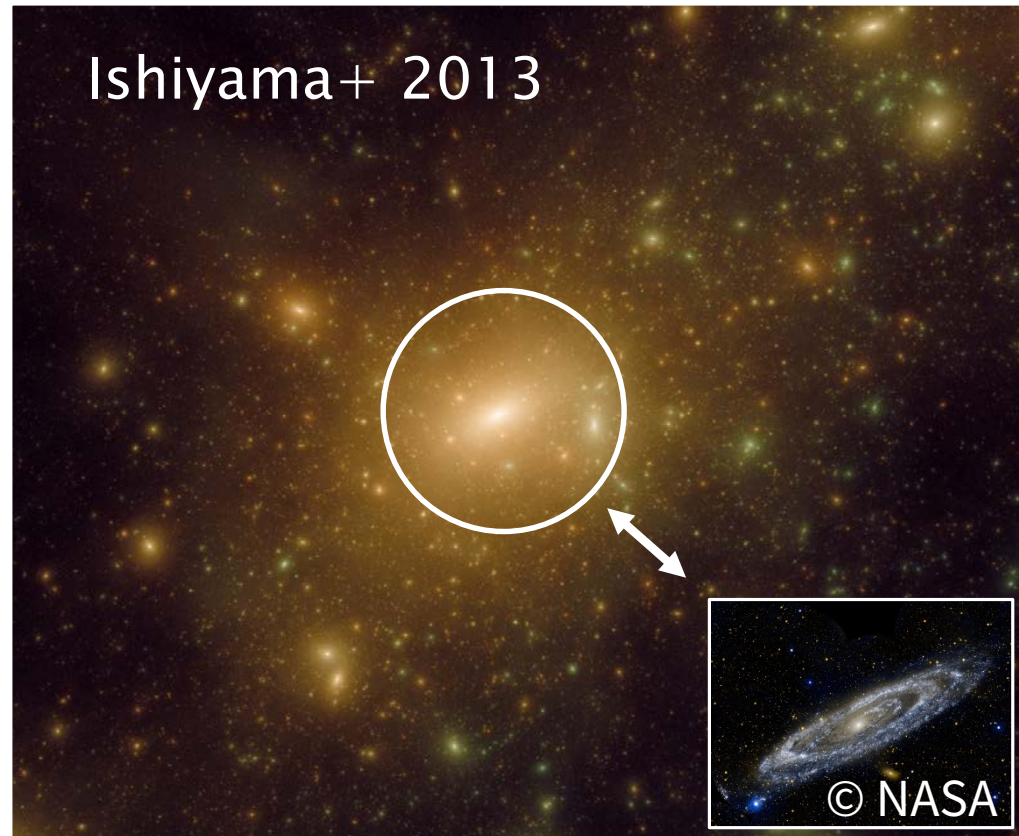
- **Numerous subhalo**

- $dn/dm \sim m^{-(1.8 \sim 2)}$

- **Triaxial**

- **Non Universality**

- Weak dependence on the halo mass
- halo to halo variation

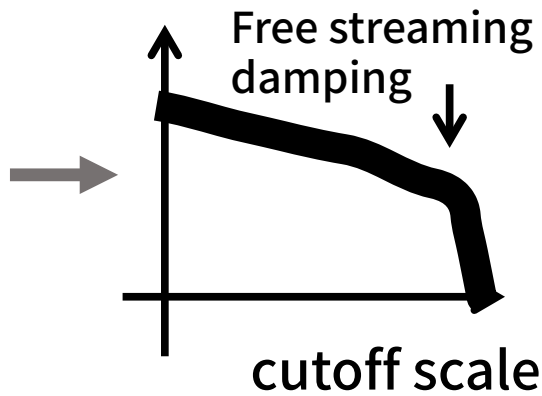
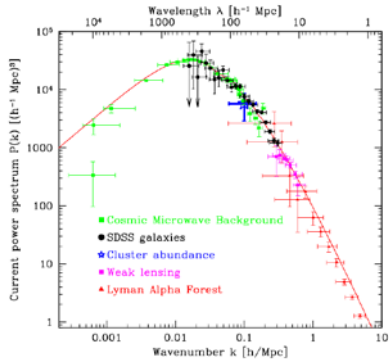


**Impact on the galaxy formation,  
Dark matter detection experiment**

従来のシミュレーションは主に比較的大きいハロー ( $> 10^{10} M_{\text{sun}}$ ) を対象としてきた

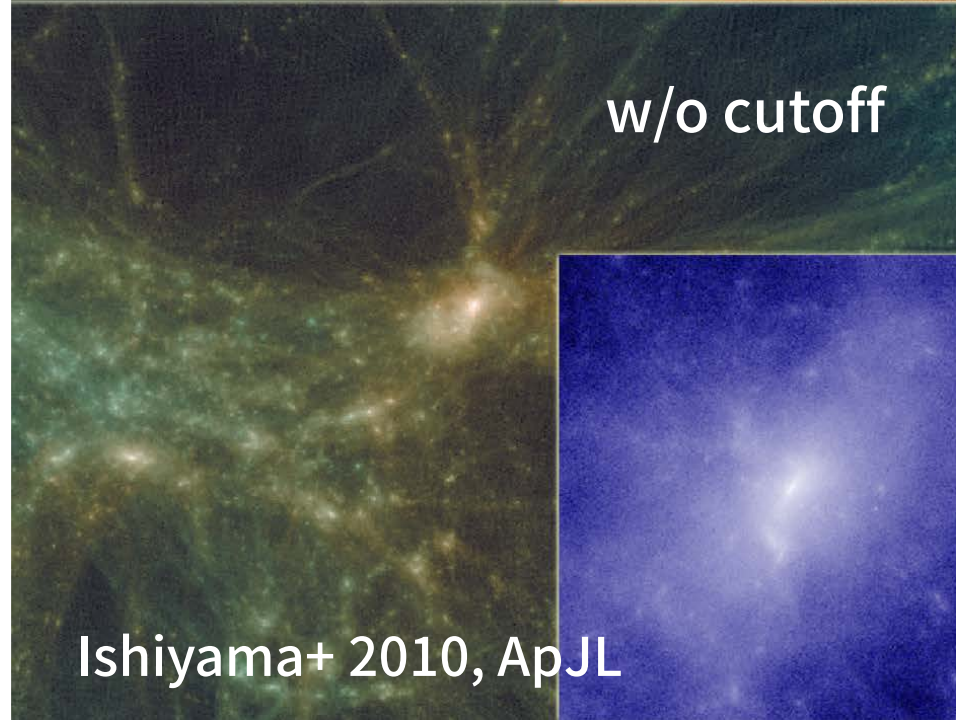
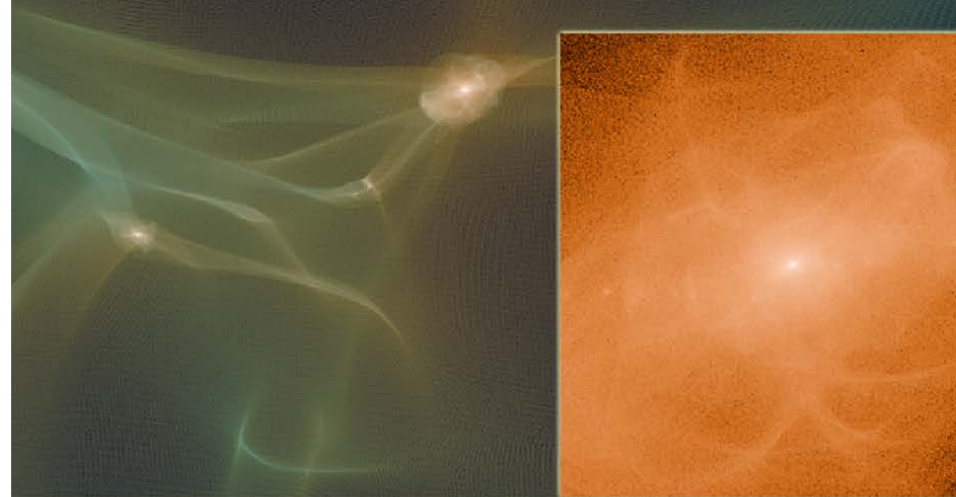
# 最小スケール

- Free streaming motion of dark matter particle  
→ cutoff on power spectrum  
→ Steeper cusps emerge



Anderhalden and Diemand 2013,  
Angulo+ 2016 give similar results

100 GeV neutralino as dark matter particle  
cutoff scale :  $\sim 10^{-6} M_{\text{sun}}$

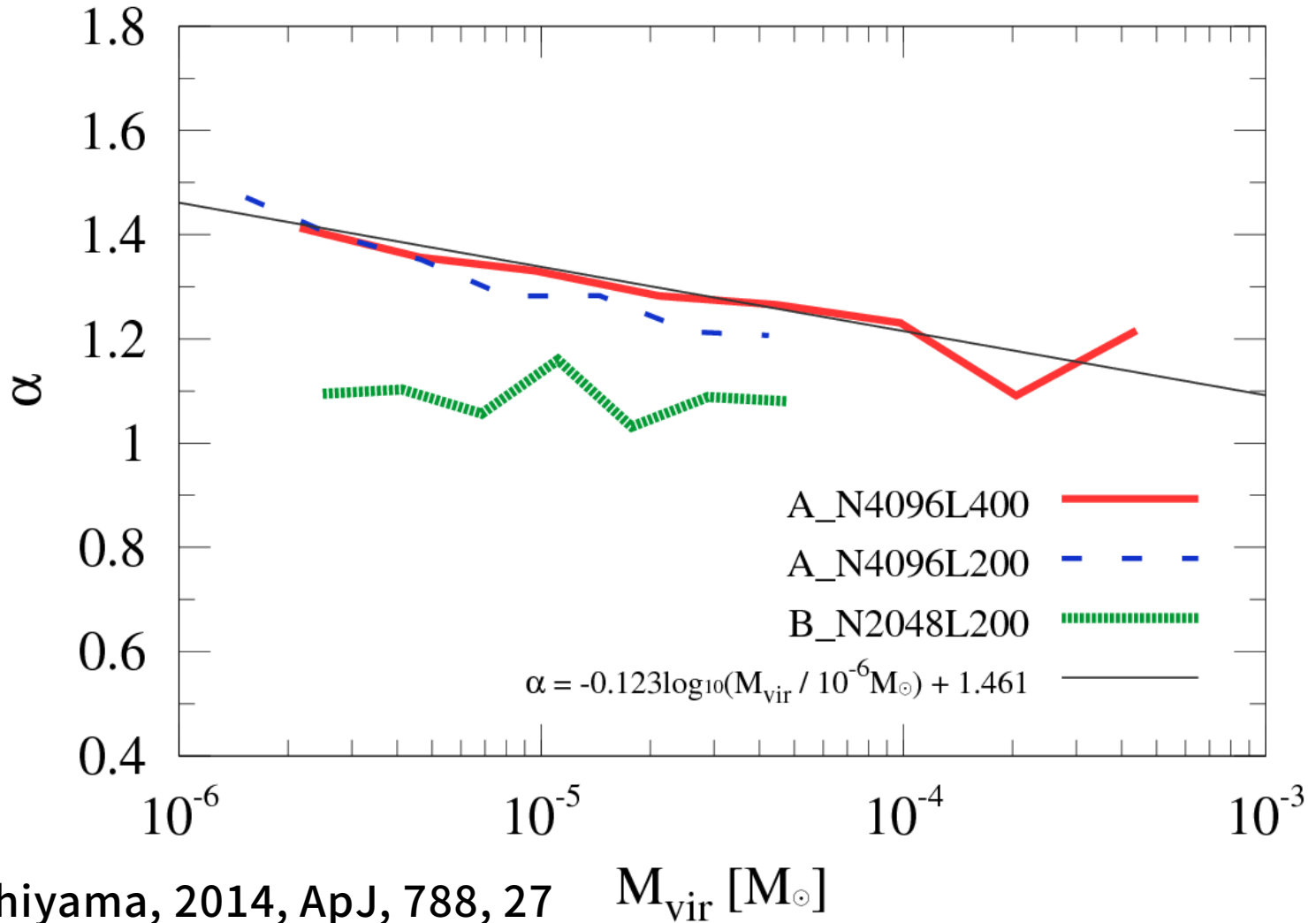


Ishiyama+ 2010, ApJL



# 最小スケール

- Fre
- dar
- 
- 



Ishiyama, 2014, ApJ, 788, 27

Ander  
 Angul

# 本研究の目的

- ハローの構造は質量スケールによって大きく異なり、最小スケール付近では大スケールに比べ鋭い中心カuspをもつ
- サブハローの数は典型的には質量の  $-1$  乗程度に比例

**小スケールハローのハロー内での構造と数は、銀河系ハローのダークマター位相空間分布に多大な影響を及ぼし得る**

- 銀河系サイズのハロー ( $10^{12}$  Msun) と、最小のハロー ( $10^{-6}$  Msun) を同時にシミュレーションすることは不可能
  - 大スケールの高分解能シミュレーション (Ishiyama+ 2016) と小スケールのものに基づいて、中間スケールをモデル化する
- 究極目標: 銀河系内のサブハロー質量関数、構造を全スケール (質量で20桁程度) にわたって解き明かす



# Cosmological N-body simulations

最大  $N = 8192^3 = 549,755,813,888$

$L = 800 \text{ pc}$   
 $m = 3.4 \times 10^{-11} \text{ Msun}$

Analyze  
 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ Msun halos}$

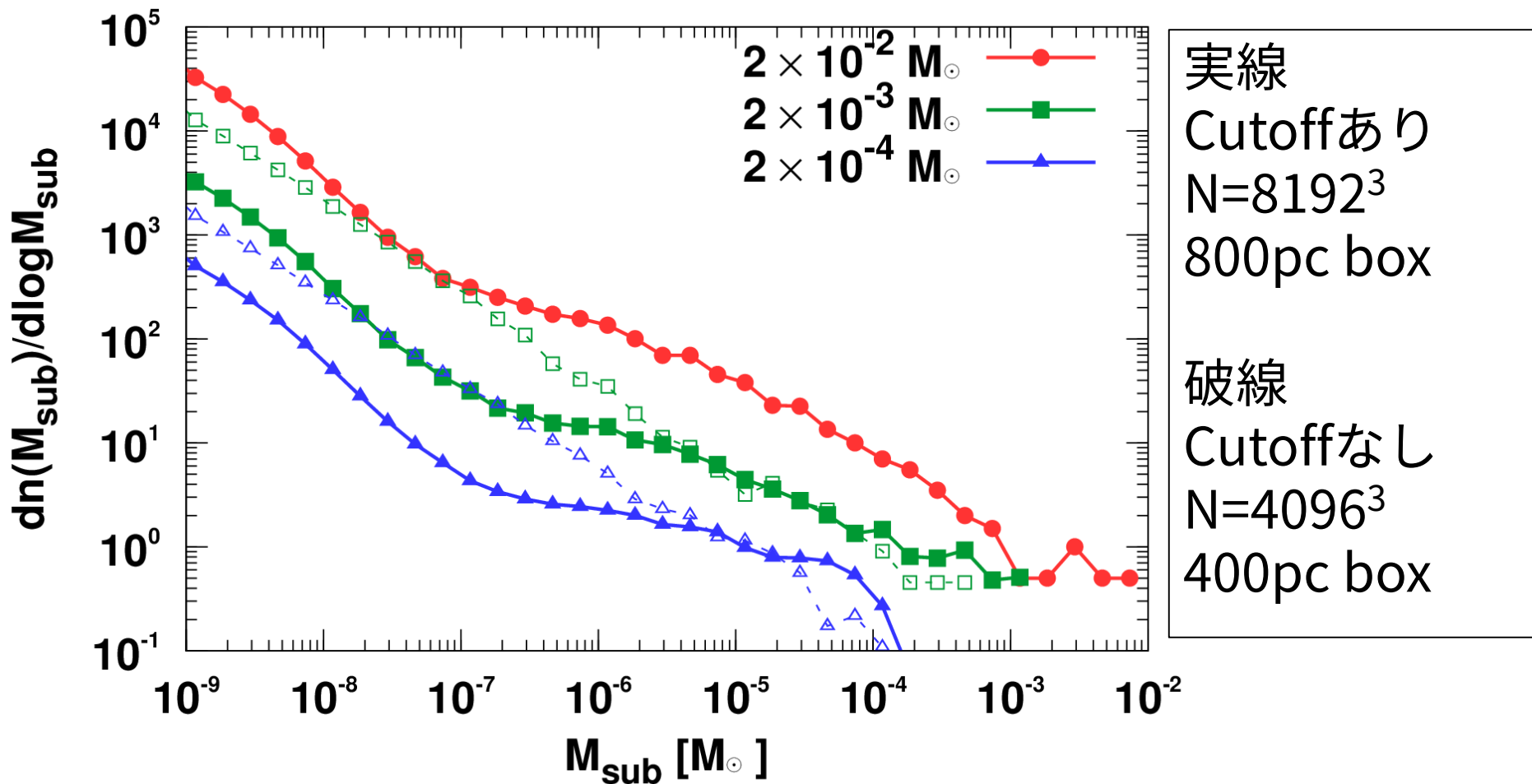
131,072 CPU cores  
on K computer

$z = 32$

これは  $N = 4096^3$  の run  
のスナップショット



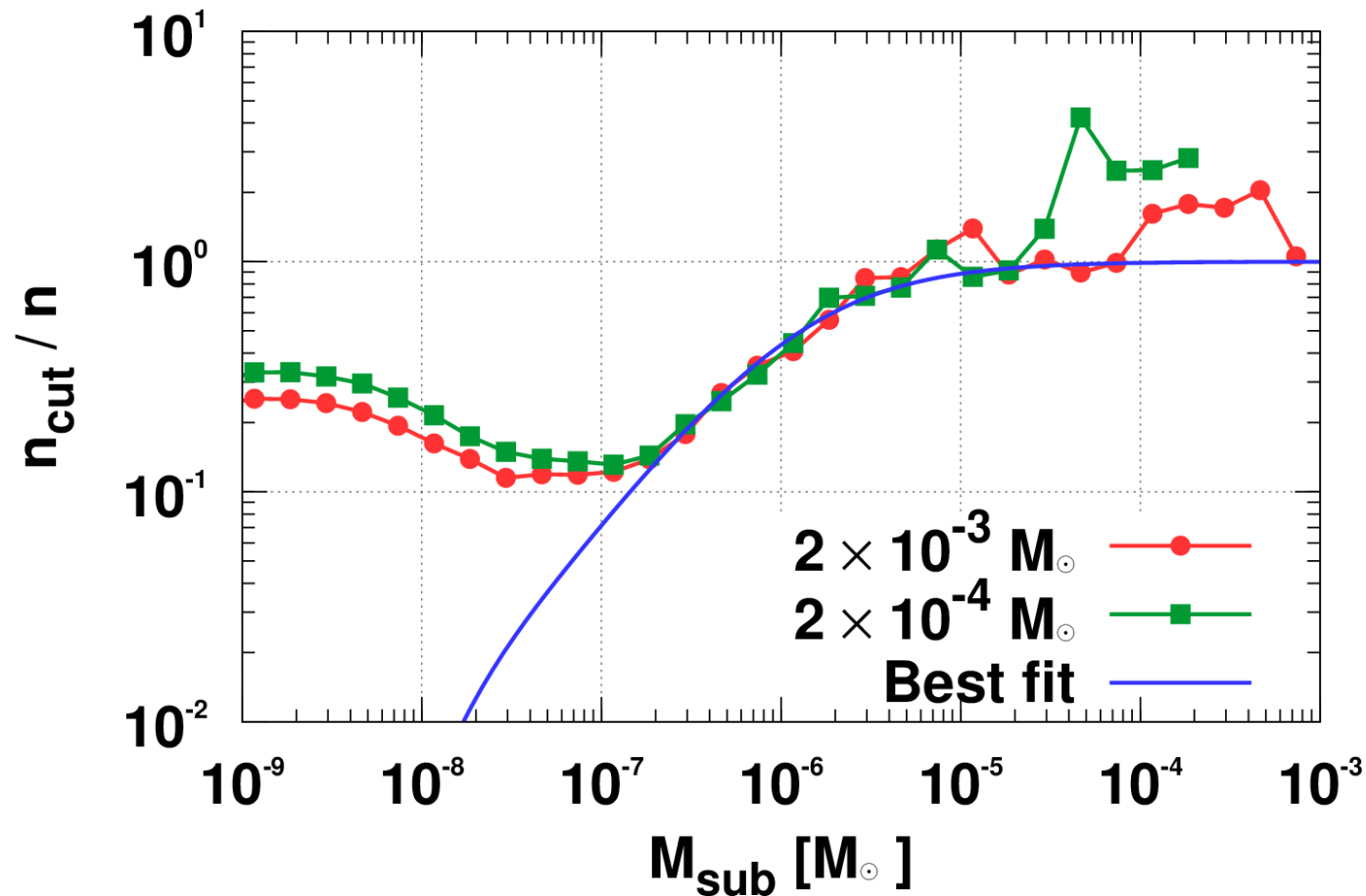
# Stacked subhalo mass function (z=32)



- 各質量範囲のハローでスタックしている

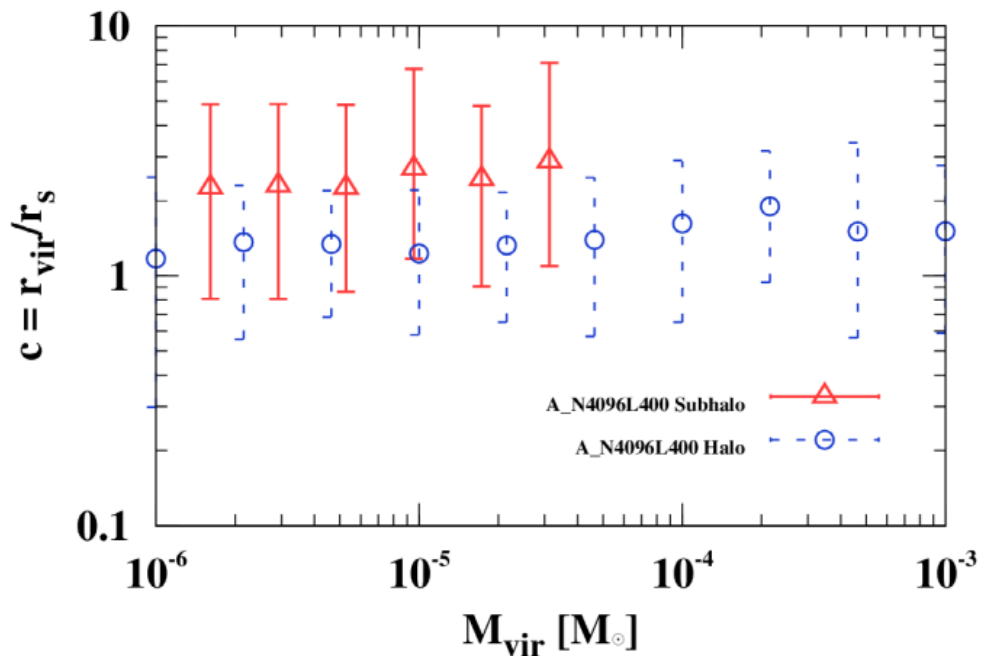
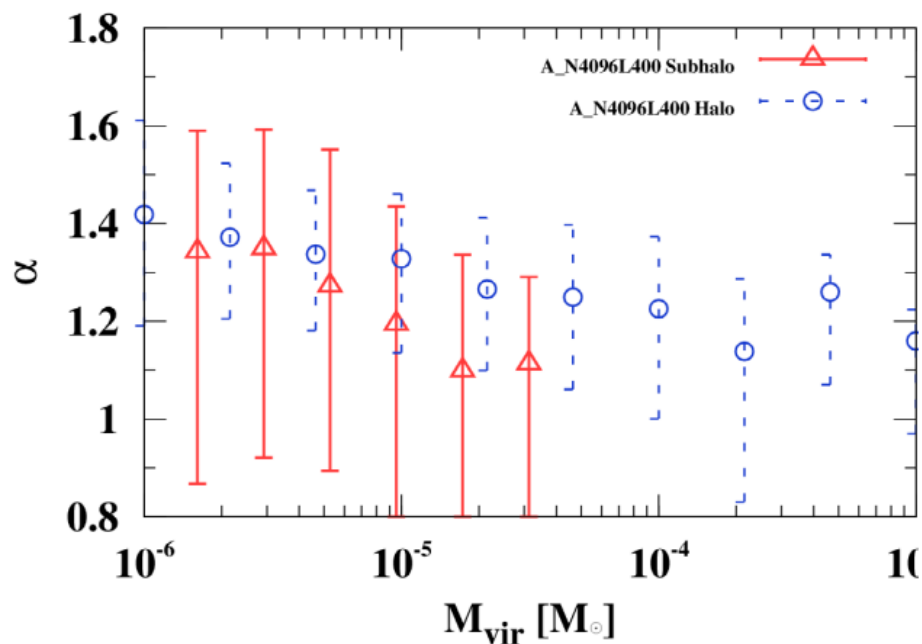
# Correction function

cutoff ありなしの  
mass function の比



- Best fit を、 $z=0$  の銀河スケールハローの高分解能シミュレーションで得られた subhalo mass function とかけあわせる

# サブハローの構造 ( カットオフあり、 $z=32$ )



- コンセントレーションは 1.5 倍程度となっている。
- 中心の冪  $\alpha$  は、 $10^{-5} M_{\text{sun}}$  付近から減少
  - 分布も広がっている
  - ハローより早く NFW に漸近？

Cutoff あり  
 $N=4096^3$  400pc box

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)^\alpha (1 + r/r_s)^{(3-\alpha)}}$$



# Impact on indirect detection

- Gamma-ray luminosity of a halo by neutralino self-annihilation seen from a distant observer

Subhalo mass function

$$dn/dm = A/M(m/M)^{-\zeta}$$

- NFW case (green)**

- Based on this work**

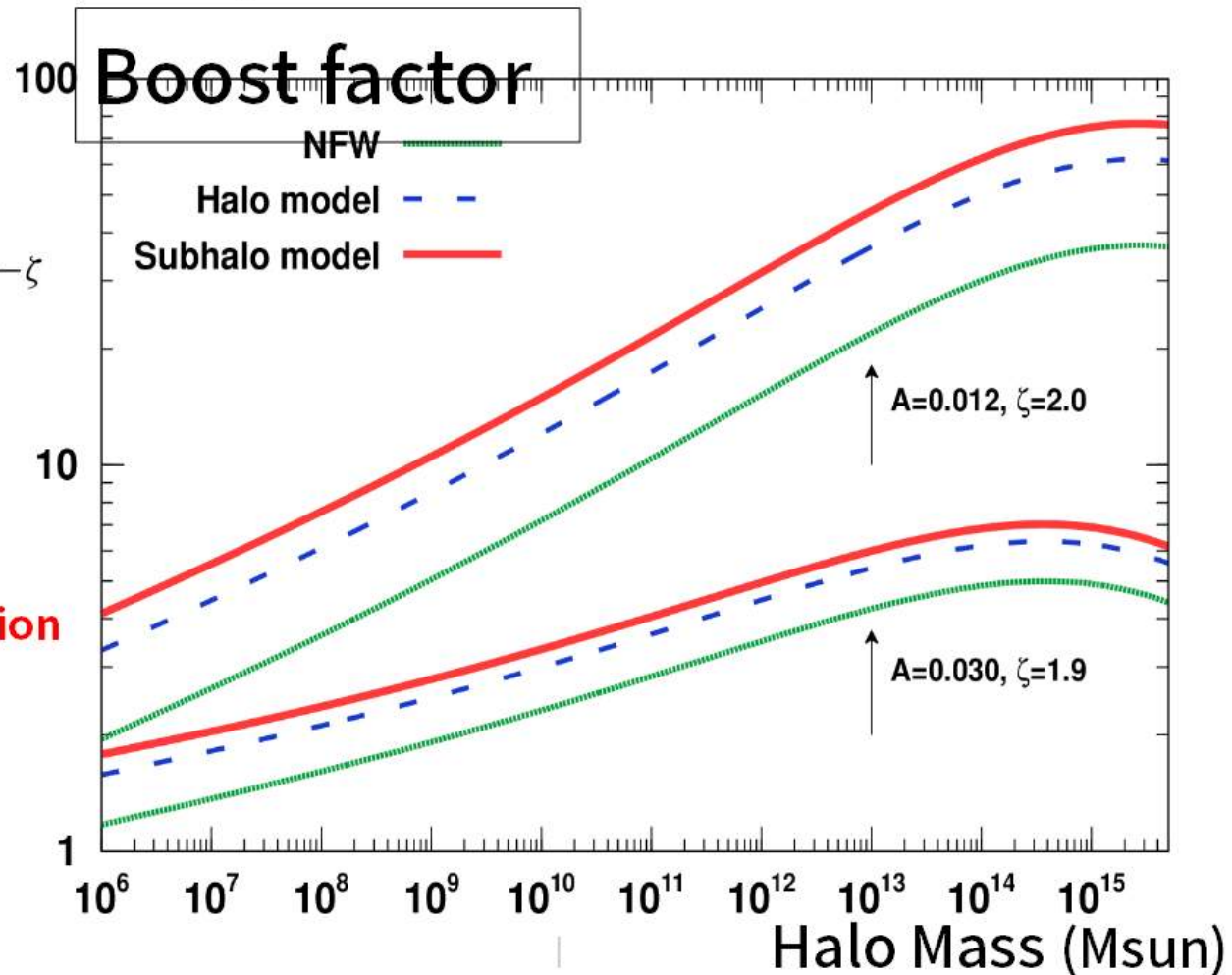
- **Subhalo model (red)**

- mass function correction

- subhalo profile

- **Halo model (blue)**

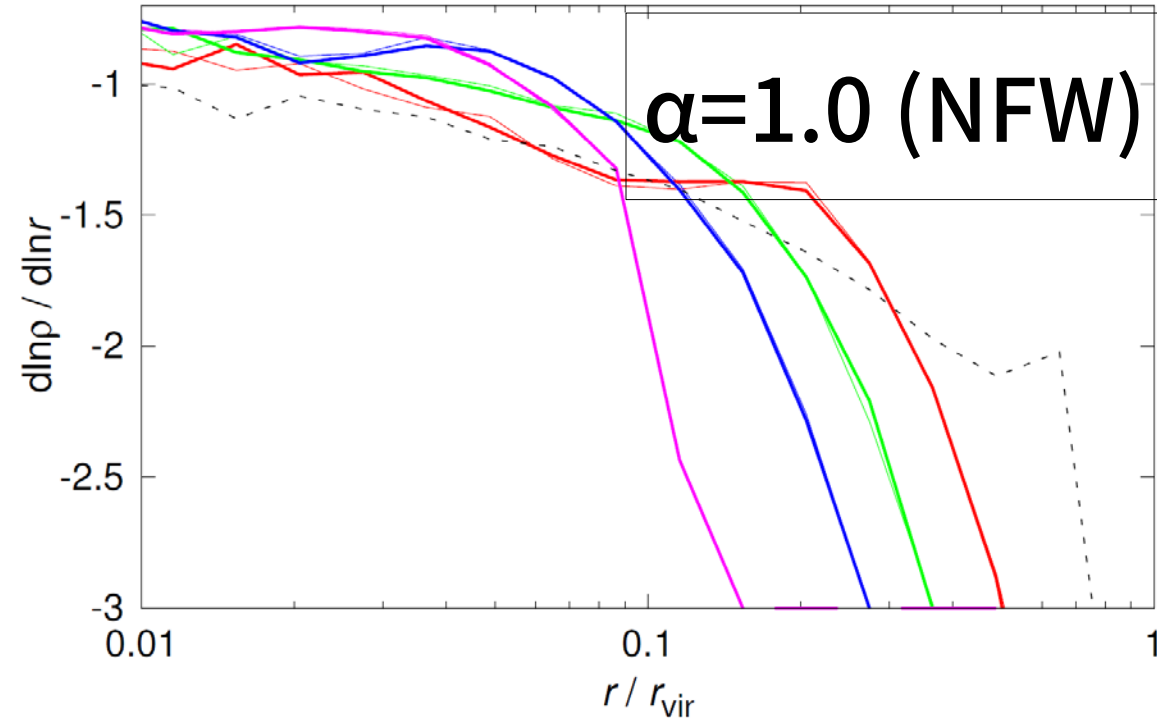
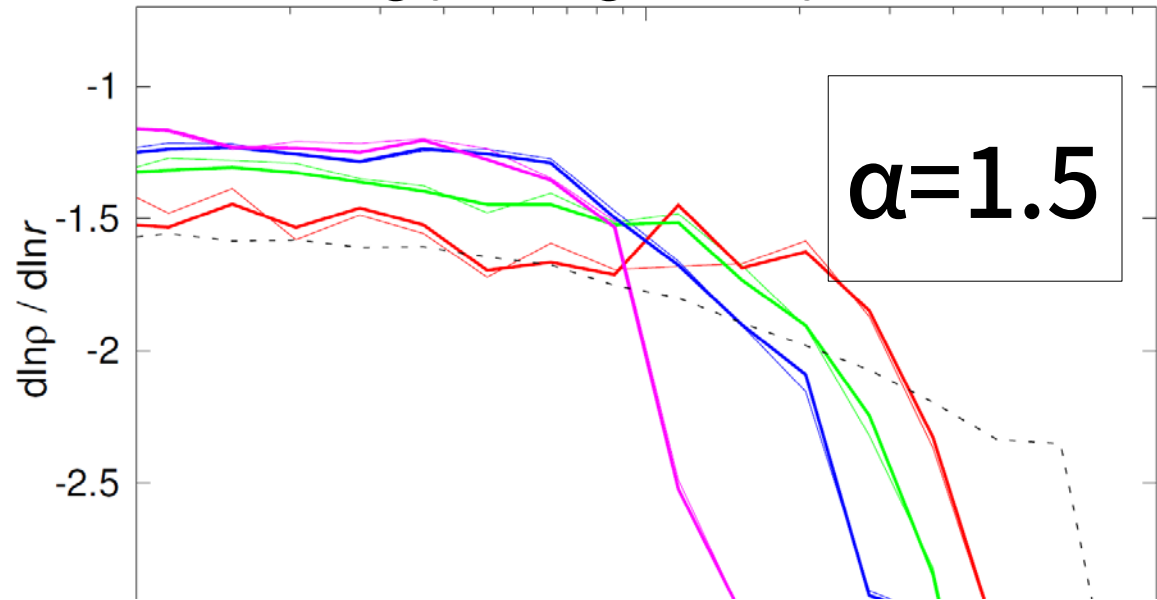
- halo profile



- The steeper inner cusps of halos near the free streaming scale enhance the annihilation luminosity of a Milky Way sized halo between **42 to 107%** (12 to 67)

# ハロー質量に依存するカスプの起源

- concentration の小さい原始ハロー同士の合体  
→  
カスプの冪が  $-1$  程度に漸近
- 初期により鋭いカスプ  
→  
合体による冪の変化がより大きい
- concentration (質量) が成長したハローでは冪が保存される傾向にある



# まとめと今後の展望

- 大規模高分解能シミュレーションに基づき、最小スケール付近のハローの中に存在するサブハローの分布、構造を調べた
- これらサブハローの影響を正しく評価すると、銀河系ハローのダークマター対消滅ガンマ線シグナルを古典的な見積りに比べ最大倍程度増大させ得る
- 今後の展望:  
シミュレーションとハローの進化モデルを組み合わせ、太陽系近傍のダークマター位相空間分布を見積り、直接検出へのインパクト等を評価する



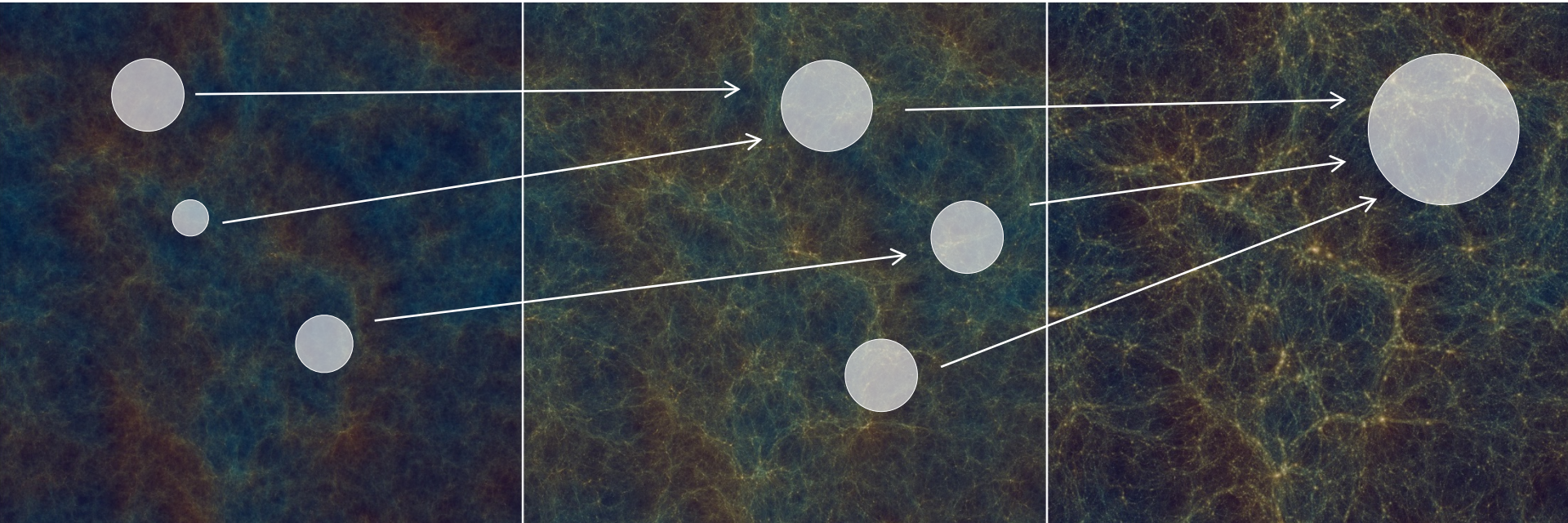
# 大規模シミュレーションデータの公開

- 限られた redshift でのみデータを公開していたのを、S, H1, H2 については全 redshift で以下を公開した (<http://hpc.imit.chiba-u.jp/~nngc/>)
  - Rockstar による halo/subhalo カタログ
  - Consistent tree による merger tree
- 準解析的銀河形成モデルによって生成した銀河カタログも公開
  - <http://cdsarc.u-strasbg.fr/cgi-bin/VizieR?-source=J/PASJ/68/25>

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

# Merger tree

- 各 redshifts で検出した halo/subhalo を時間方向につなげたもの
- 各ハローの合体形成史を数値化している
- データサイズが元シミュレーションの 100~1000 分の1
  - データの再利用性が極めて高い





The background of the entire page is a complex, multi-colored simulation of the cosmic web, showing a dense network of filaments and nodes in shades of blue, green, and yellow against a dark background.

# The $\nu^2$ GC simulations

[Home](#)[Simulations](#)[Gallery](#)[Public Data](#)[Adventure](#)[Movie](#)

## Mock galaxy catalogs and full Rockstar catalogs are released

---

Mock galaxy catalogs using  $\nu^2$ GC simulations are now released.

[link to mock catalogs](#)

Full Rockstar catalogs for 58 snapshots of  $\nu^2$ GC-H1 and  $\nu^2$ GC-H2 are now released. Consistent merger trees are available upon request (ishiyama - at - chiba-u.jp)

$\nu^2$ GC-H1 (2048<sup>3</sup>, 140Mpc/h)

$\nu^2$ GC-H2 (2048<sup>3</sup>, 70Mpc/h)

When you write papers using these catalogs, we would be very grateful if you could refer the simulation paper (Ishiyama et al., 2015) and its companion (Makiya et al., 2016) shown below.

## The New Numerical Galaxy Catalog ( $\nu^2$ GC) :

### An Updated Semi-analytic Model of Galaxy and AGN with Large Cosmological N-body

<http://hpc.imit.chiba-u.jp/~nngc/>

# Index of /~nngc/Data/n2gc-h1

<a href="#">[ICO]</a>	<a href="#">Name</a>	<a href="#">Last modified</a>	<a href="#">Size</a>	<a href="#">Description</a>
<a href="#">[PARENTDIR]</a>	<a href="#">Parent Directory</a>		-	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1.md5sum</a>	2016-10-12 11:31	3.3K	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1.redshift</a>	2016-10-12 11:31	637	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_1.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	32K	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_2.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.5M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_3.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	32M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_4.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	49M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_5.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	74M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_6.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	105M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_7.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	145M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_8.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	195M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_9.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	255M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_10.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	324M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_11.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	405M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_12.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	493M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_13.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	588M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_14.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	739M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_15.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	911M	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_16.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.0G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_17.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.2G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_18.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.3G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_19.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.4G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_20.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.5G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_21.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.6G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_22.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.7G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_23.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.7G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_24.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.8G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_25.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.9G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_26.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.9G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_27.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	1.9G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_28.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	2.0G	
<a href="#">[ ]</a>	<a href="#">n2gc-h1_29.rockstar.bz2</a>	2016-10-12 11:31	2.0G	

<http://hpc.imit.chiba-u.jp/~nngc/>