

# 銀河と活動銀河核の準解析的モデルと すばるHSCサーベイ

素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム

2019年1月10日

大木 平

カブリIPMU

共同研究者:

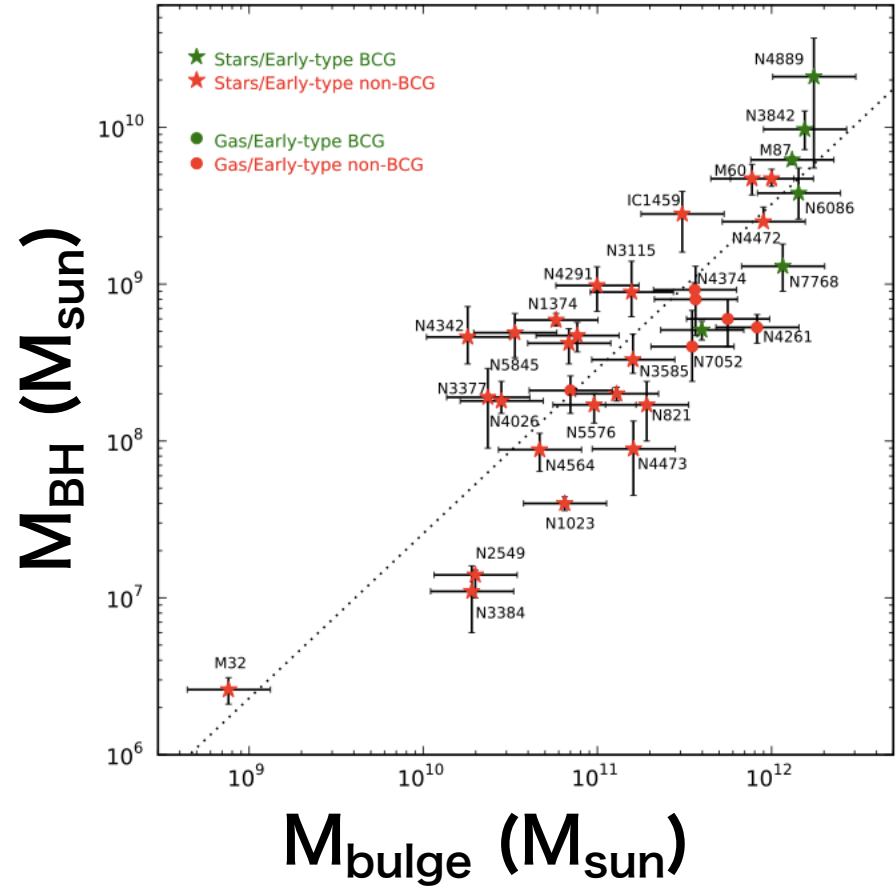
白方光 (北海道大学), 長島雅裕 (文教大学), 川口俊宏 (尾道市立大学),  
岡本崇 (北海道大学), 石山智明 (千葉大学), nu2GC team

# 序論

## 超巨大ブラックホール(SMBH)形成

SMBHの質量と銀河のバルジ質量の相関

McConnell & Ma 2013



QSO 3C273  
(ESA/Hubble & NASA)



- 超巨大ブラックホール (SMBH) と銀河の**共進化**の示唆
- 宇宙論的な枠組みのもとで、銀河とSMBHの形成・進化を統一的に理解したい
- AGN/QSO の統計的性質が、共進化を理解する手がかり

# QSO/AGN クラスタリング

二点相関関数

$$\xi_Q(r), \xi_{DM}(r)$$

$$\xi_Q(r) = \frac{QQ(r)}{QR(r)} - 1$$

QSOバイアス

$$b_Q = \sqrt{\xi_Q(r) / \xi_{DM}(r)}$$

ハローバイアス

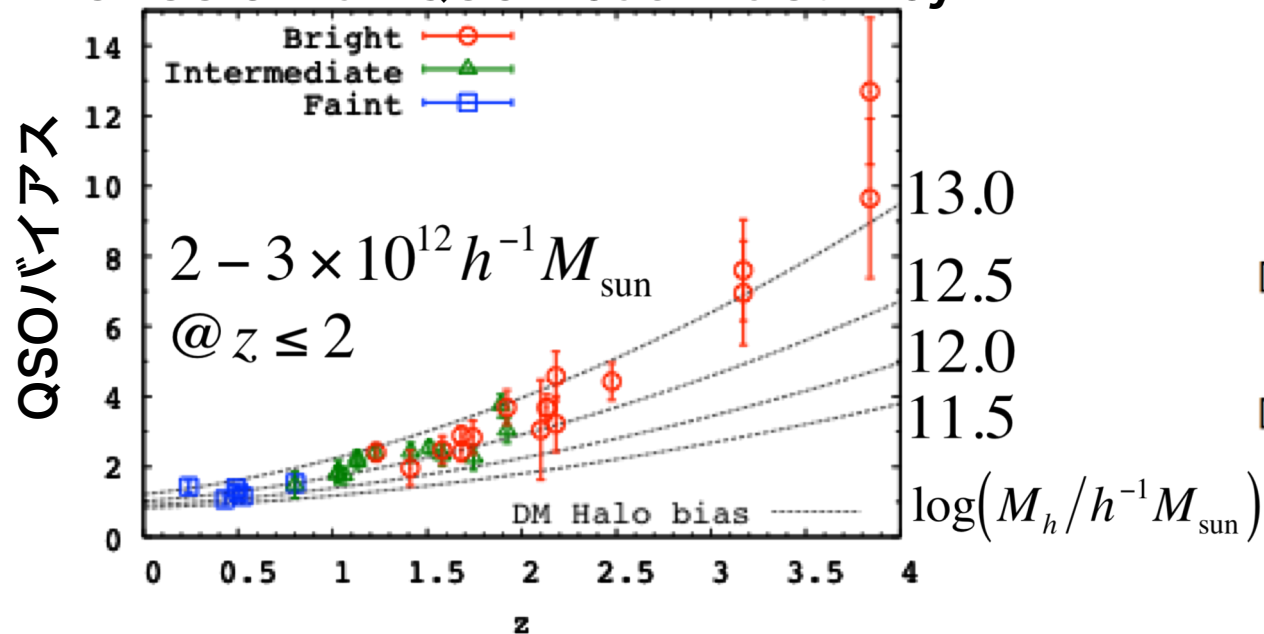
$$\xi_{halo}(r)$$

$$b_{halo}(M) = \sqrt{\xi_{halo}(M, r) / \xi_{DM}(r)}$$

$$b_Q = b_{halo}(M)$$

ホストハロー質量

SDSS & 2dF QSO Redshift Survey



Bright:

$$[M_B - \log(h) < -24.5]$$

Intermediate:

$$[-24.5 < M_B - \log(h) < -23]$$

Faint:

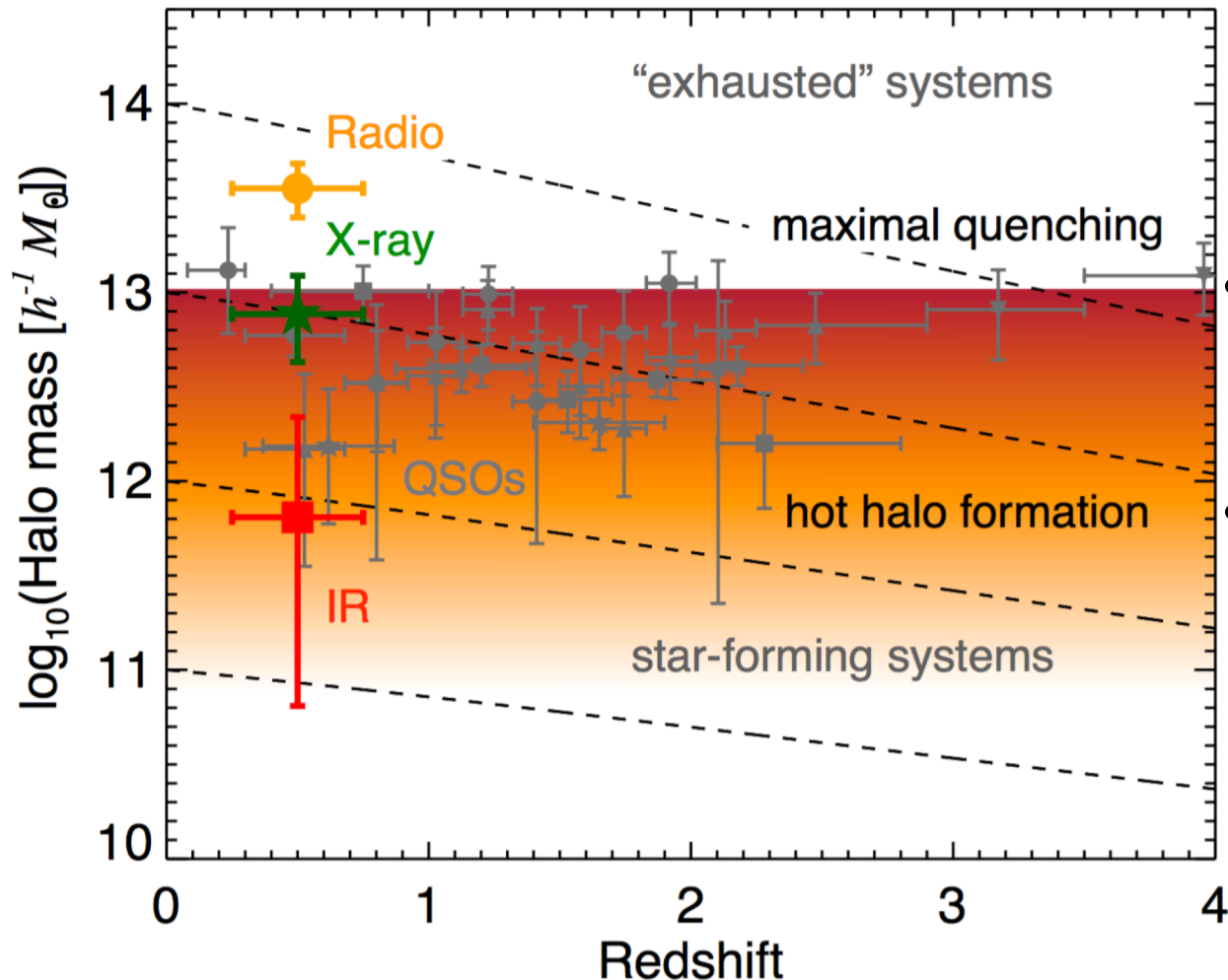
$$[-23.0 < M_B - \log(h) < -21]$$

- QSO/AGN のホストハロー質量

- SMBH 形成過程, QSO/AGN 放射過程, light curve に依存

# AGN クラスタリング

様々なタイプの AGN のホストダークマター (DM) ハロー質量の赤方偏移進化 (Alexander & Hickox 2012).



- 活動銀河核 (AGN) のクラスタリングは、SMBH の形成過程や AGN 発現過程の観測的制限の一つ
- ただし現状はまだ観測の不確定性大

# 目的

**AGN 形成モデルはクラスタリング観測によってどのように制限されるか？**

**－ 準解析的銀河・AGN形成モデルを用いた調査 －**

- **大規模宇宙論的N体シミュレーションに基づく準解析的銀河・AGN形成モデルを用いたAGNのクラスタリング解析**
- **観測との比較**

# 準解析的銀河形成モデル $\nu^2$ GC

## 1. 銀河形成モデル

- 宇宙論的N体シミュレーションに基づく DM ハローの merger tree (Ishiyama et al. 2015)
- バリオン物理：ガス cooling, 星形成, supernovae & AGNs からのフィードバック (Shirakata et al. 2019)

## 2. AGN 形成モデル

仮定: 銀河同士の **major/minor merger** 及び **disk instability** により、SMBH へのガス供給が起き、AGN が発現する

$$\dot{M}_{BH} = \frac{\Delta M_{acc}}{t_{acc}} \exp\left(\frac{t - t_{start}}{t_{acc}}\right)$$

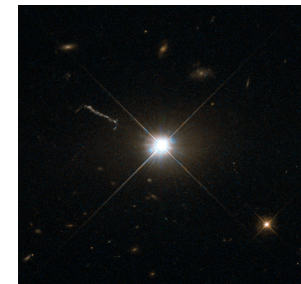
## 3. SMBH へのガス降着のタイムスケール

仮定: ガス降着によるBH成長のタイムスケールは、 $< 100$  pcスケールの **ガスの角運動量損失のタイムスケール**  $t_{loss}$  で制御される,  $t_{loss} \propto M_{BH}^{3.5} \Delta M_{acc}^{-4}$ .  
ここで、 $M_{BH}$  は SMBH 質量,  $\Delta M_{acc}$  は降着するガス質量を表す。

$t_{loss}$  の  $M_{BH}$ ,  $\Delta M_{acc}$  依存性は、降着円盤と circumnuclear disk のダイナミクスから導かれる結果と定性的に一致する。

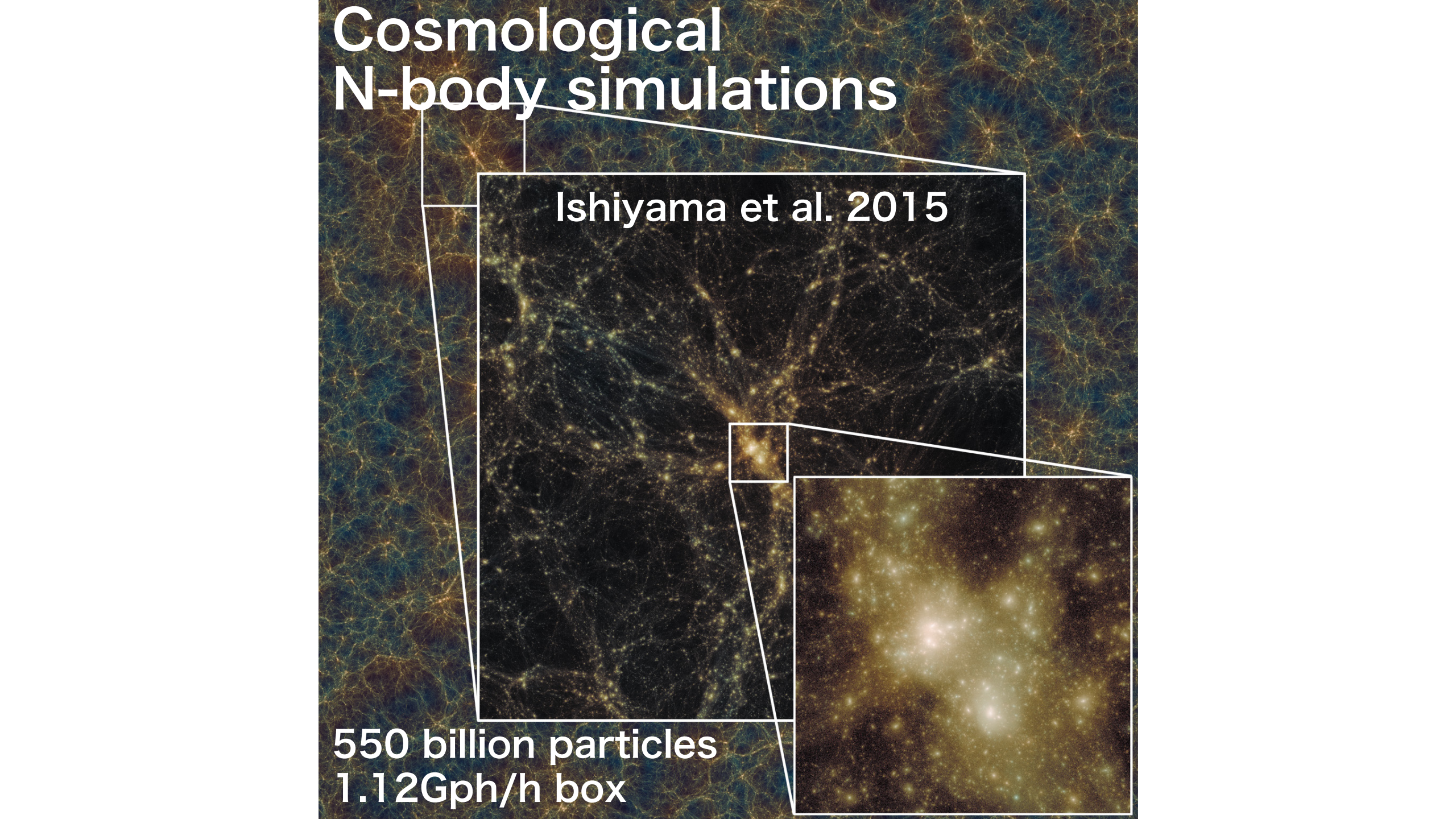


Image Credit: NASA, ESA, Hubble Heritage Team



QSO 3C273  
(ESA/Hubble & NASA)

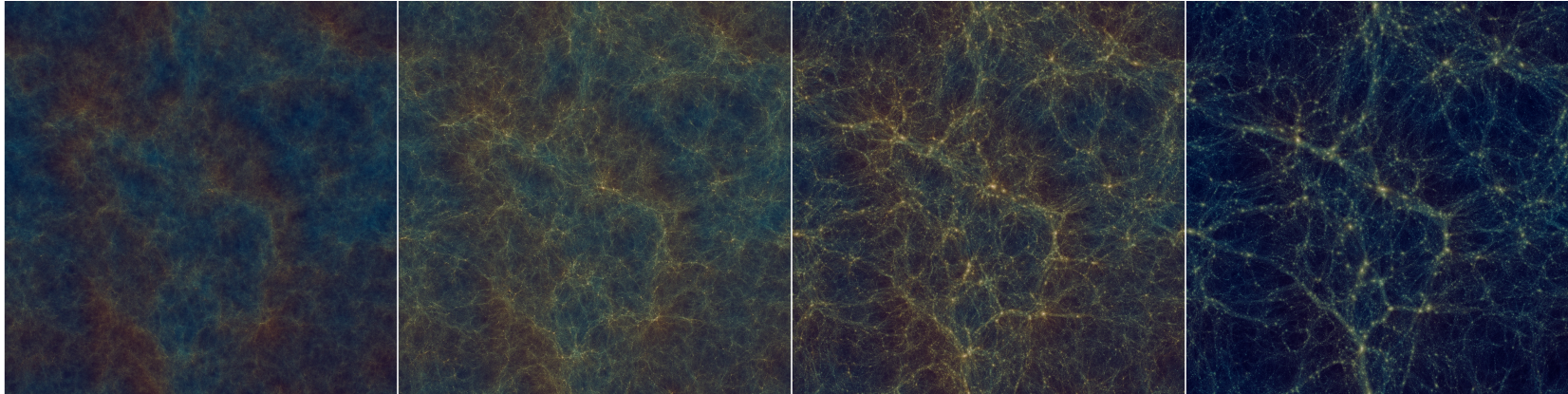
# Cosmological N-body simulations

The image displays a cosmological N-body simulation. The background is a dense field of particles, colored in shades of blue and green, forming a complex web of filaments and clusters. A large white box highlights a specific region, labeled 'Ishiyama et al. 2015'. Within this box, a smaller white box highlights a galaxy cluster, which is further magnified in a separate inset box at the bottom right. The inset shows a detailed view of the galaxy cluster, with numerous bright yellow and orange stars and a central bright core.

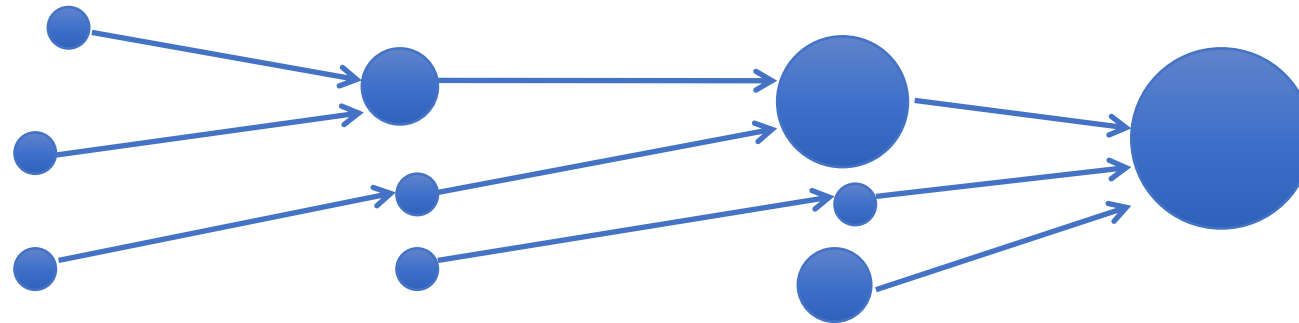
Ishiyama et al. 2015

550 billion particles  
1.12Gph/h box

# Merger trees of dark matter halos



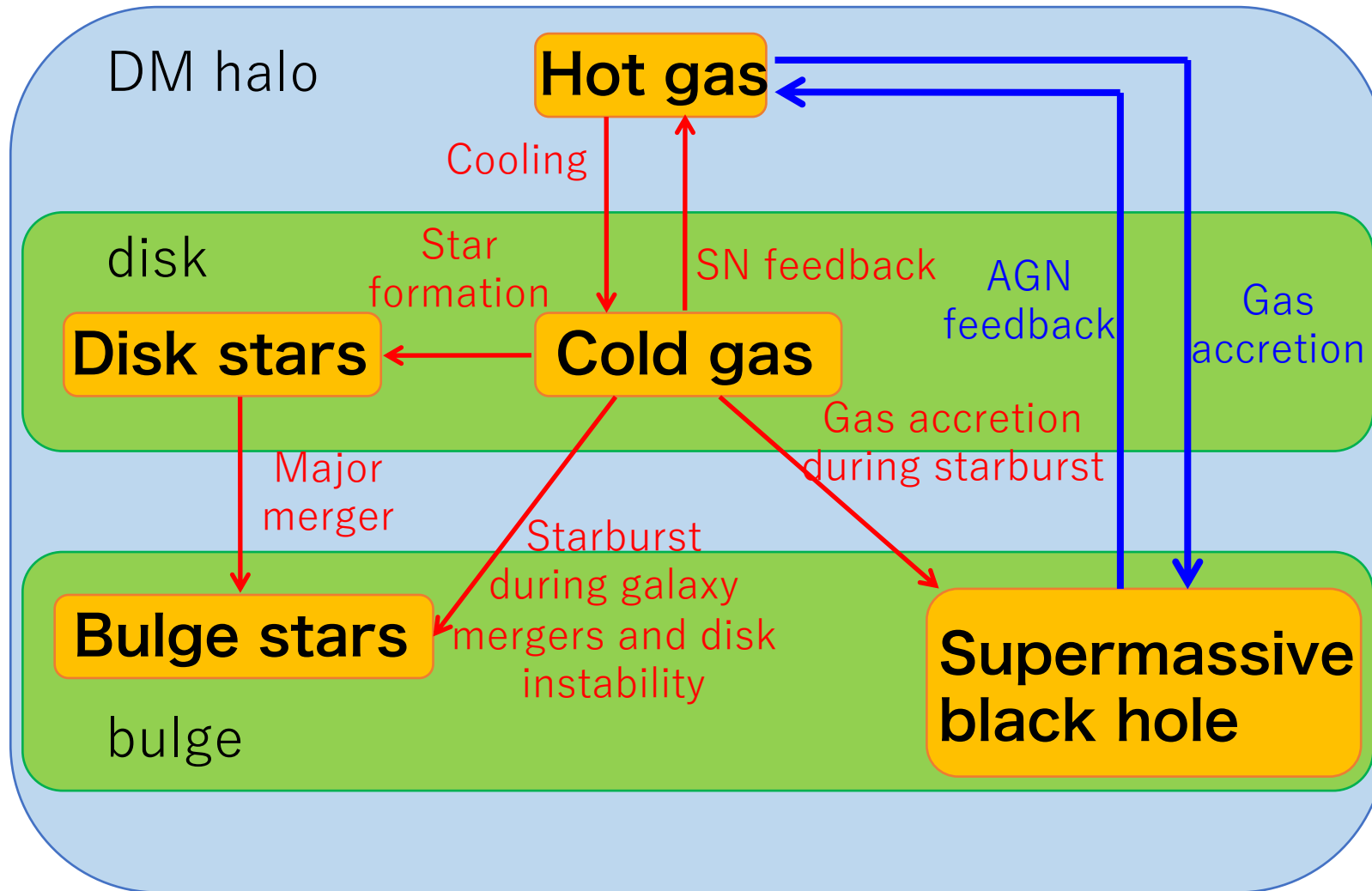
Merger history of dark matter halos



Boxsize (Mpc/h)	N	m ( $M_{\text{sun}}/h$ )	$\varepsilon$ (kpc/h)	$M_{\text{min}}$ ( $M_{\text{sun}}/h$ )	Cosmology
560.0	$4096^3$	$2.20 \times 10^8$	4.27	$8.79 \times 10^9$	Planck
<b>1120.0</b>	<b><math>8192^3</math></b>	$2.20 \times 10^8$	4.27	$8.79 \times 10^9$	Planck



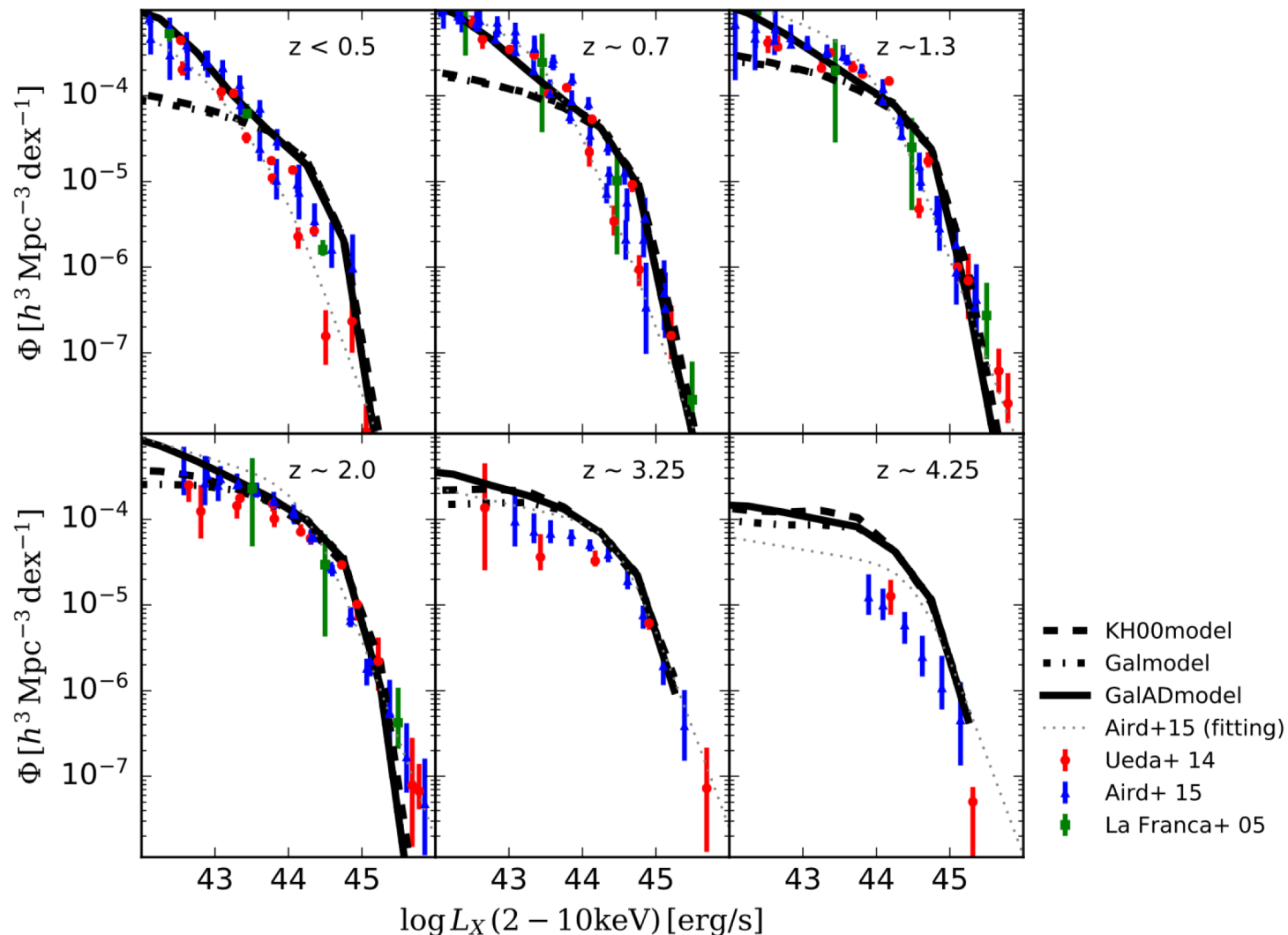
# バリオンの進化



Nagashima et al. 2005; Shirakata et al. 2019

# AGN luminosity functions

Shirakata et al. 2019



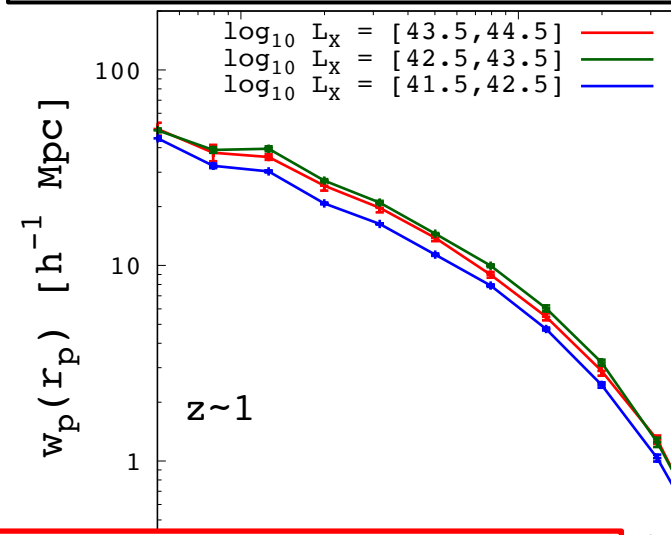
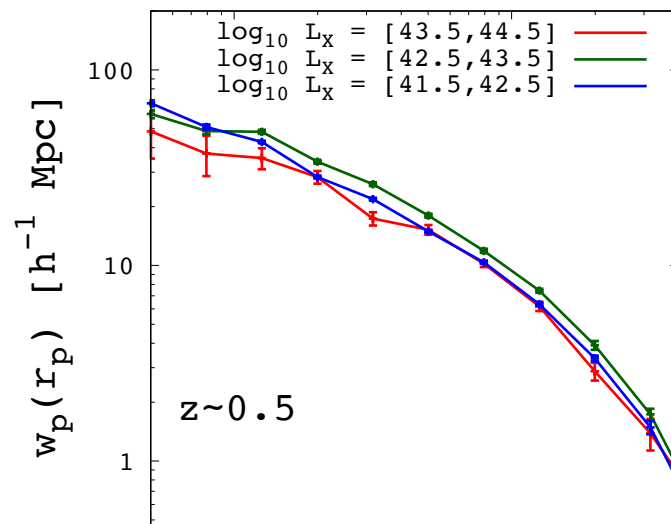
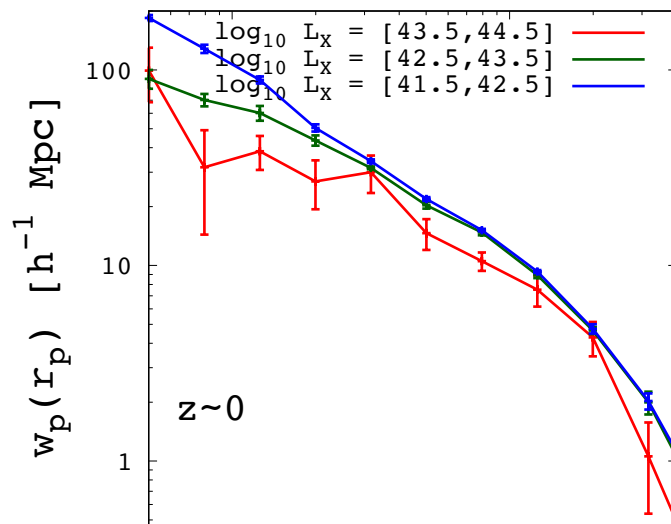
モデルは観測される AGN luminosity function を幅広い redshift で再現する

**結果**

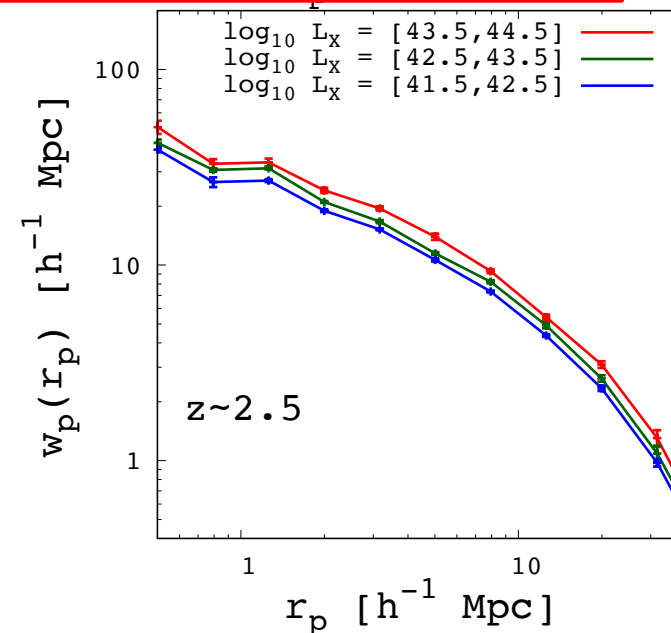
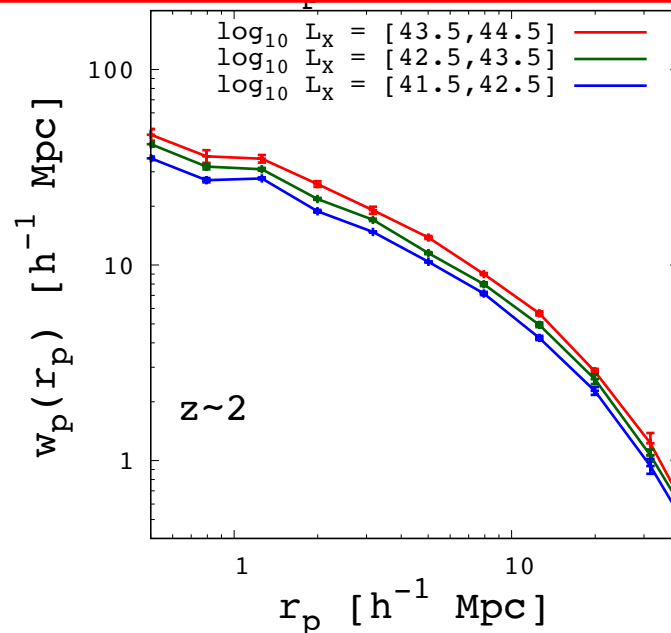
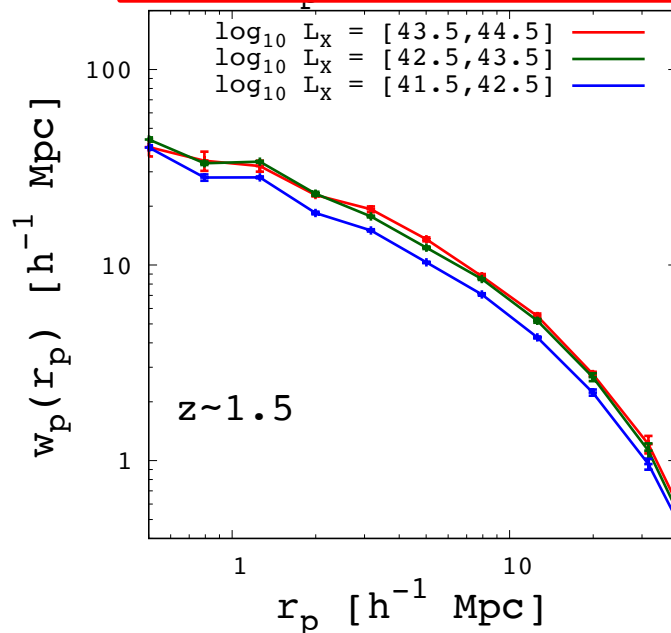
# X-ray AGN の2点相関

$$w_p(r_p) = 2 \int_0^{\pi_{\max}} \xi(r_p, \pi) d\pi.$$

$\log_{10} L_x = [43.5, 44.5]$	—
$\log_{10} L_x = [42.5, 43.5]$	—
$\log_{10} L_x = [41.5, 42.5]$	—



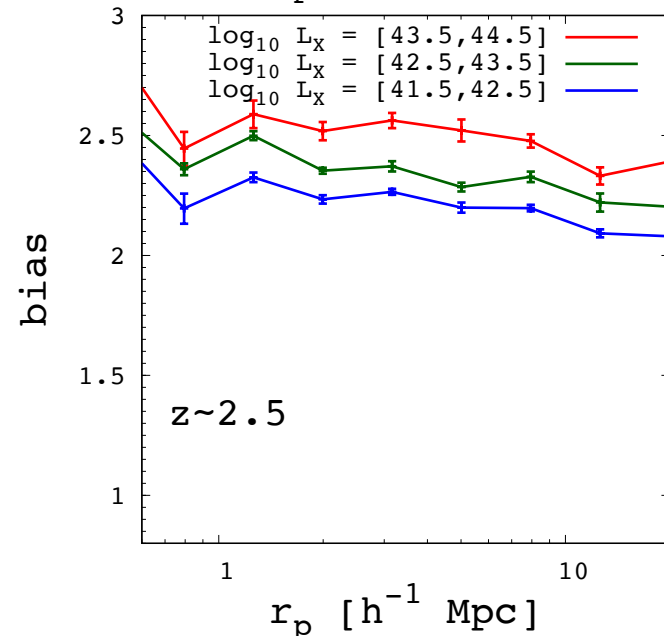
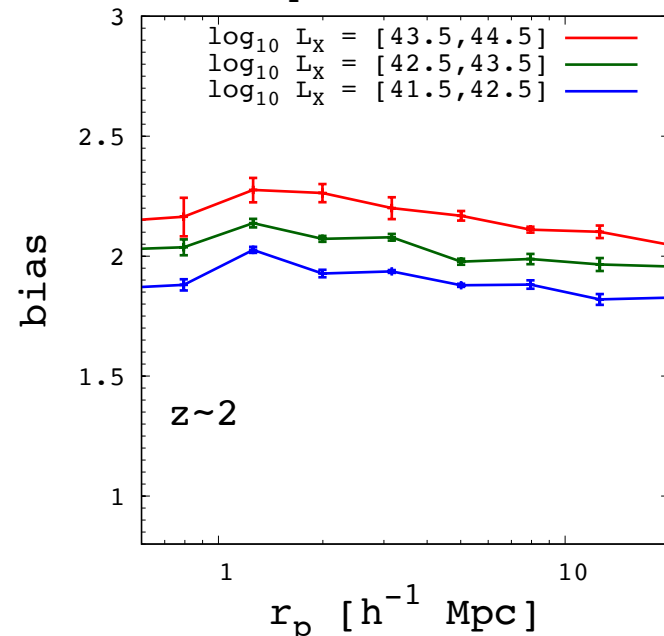
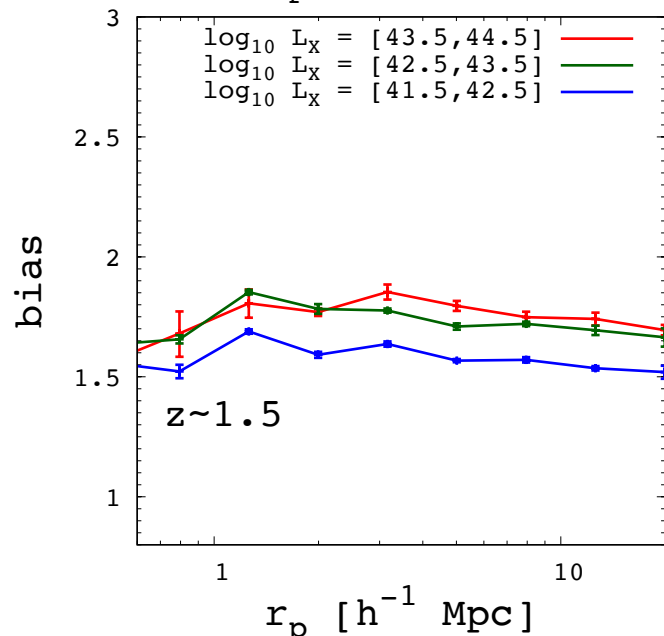
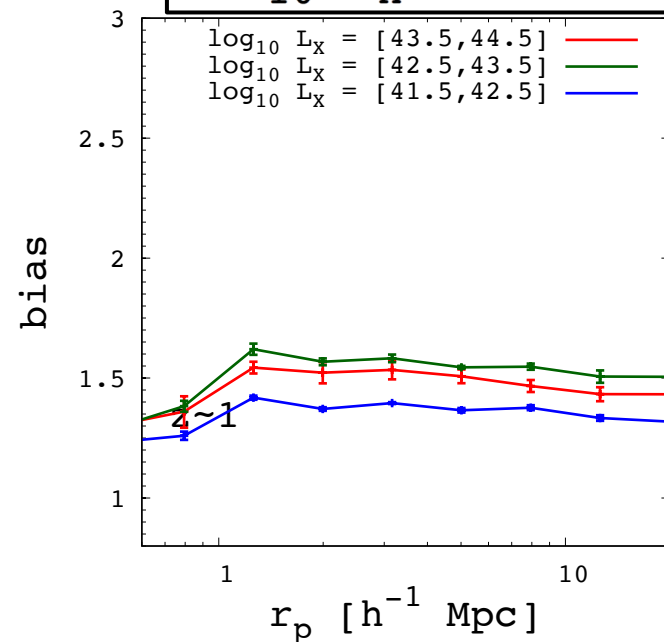
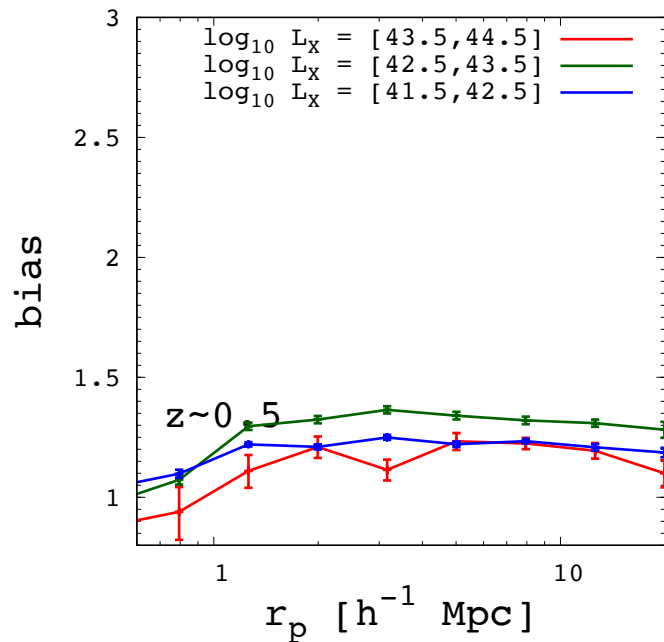
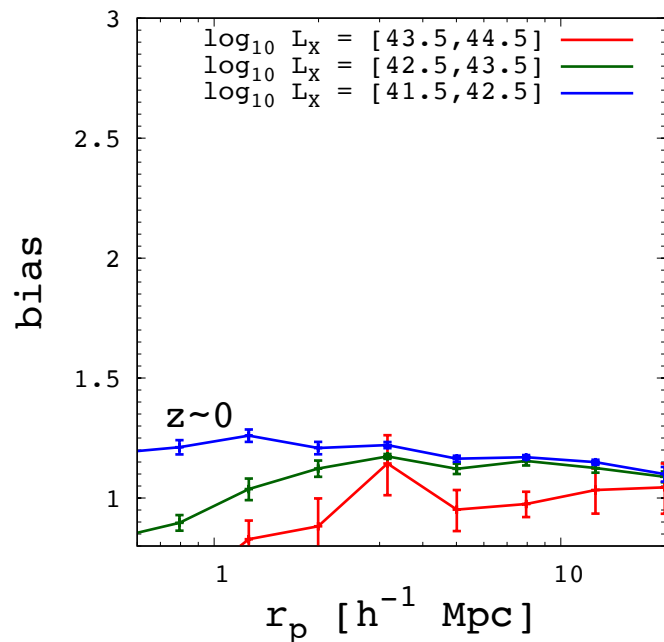
**$z < \sim 1$  では、明るいAGNより暗いAGNの amplitude の方が大きい**



# AGN バイアス

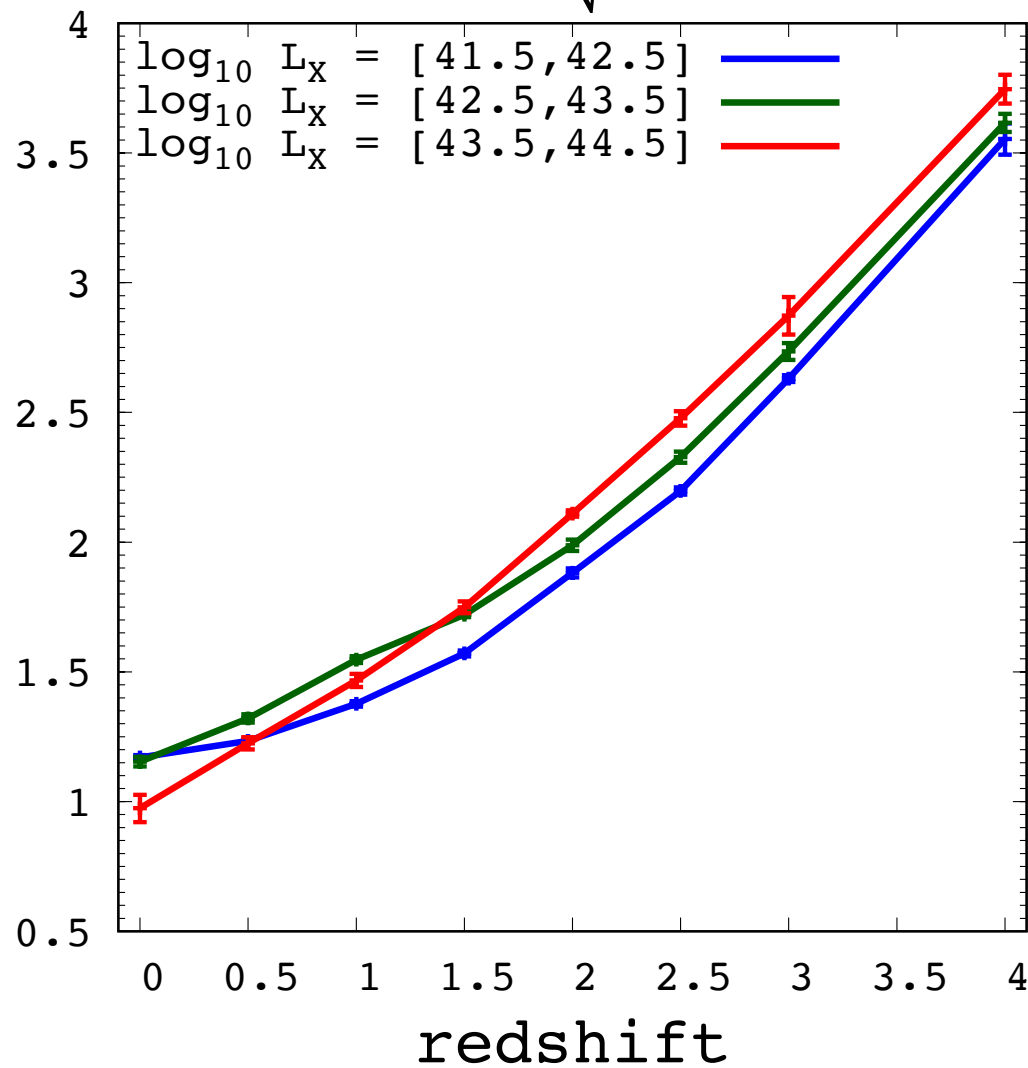
$$b = \sqrt{w_{p,AGN}/w_{p,DM}}$$

$\log_{10} L_X = [43.5, 44.5]$	—
$\log_{10} L_X = [42.5, 43.5]$	—
$\log_{10} L_X = [41.5, 42.5]$	—



# AGN バイアス

$$b(8 h^{-1}\text{Mpc}) = \sqrt{w_{p,AGN}/w_{p,DM}}$$

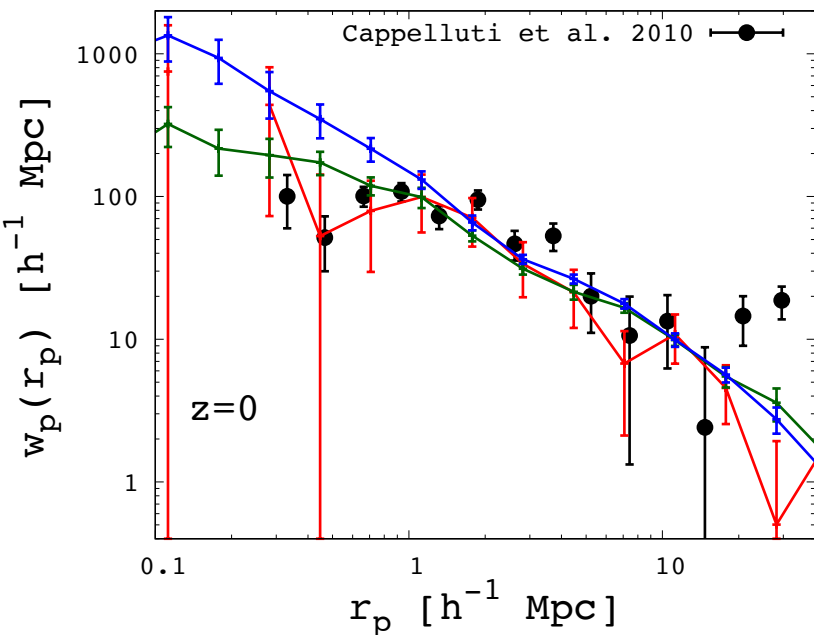


AGNバイアスは、high-z と low-z で luminosity dependence が逆転する

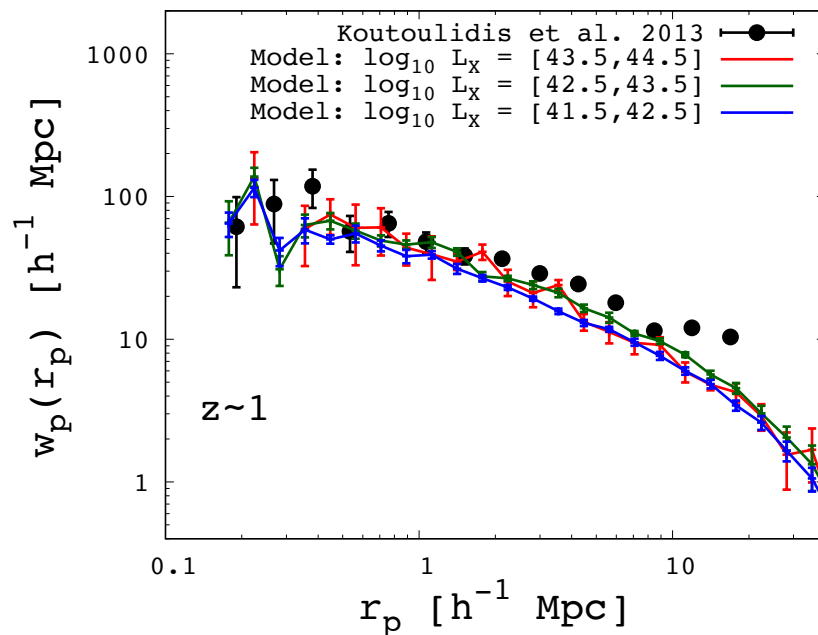
- high-z では明るいAGNの方がバイアス大
- low-z では暗いAGNの方がバイアス大

# X-ray AGN の2点相関: 観測との比較

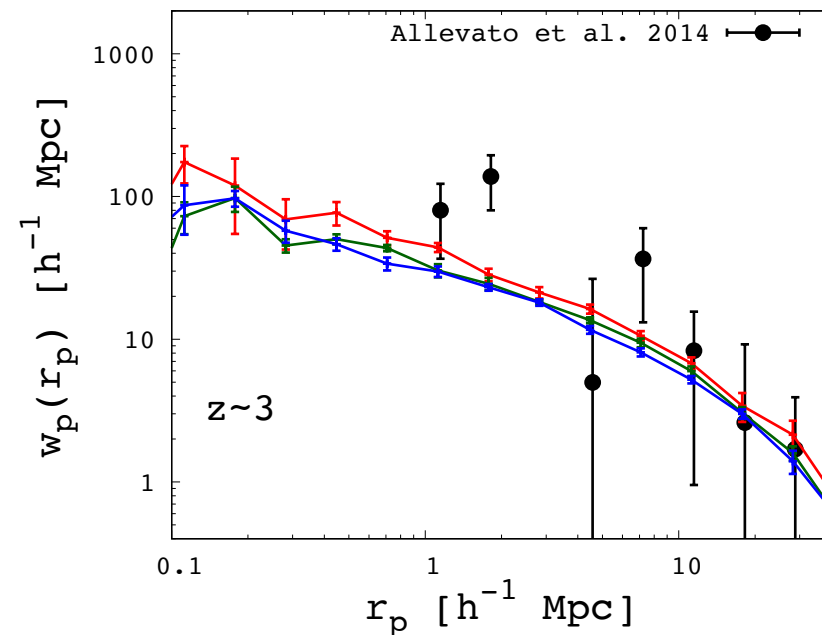
$z=0$



$z\sim 1$

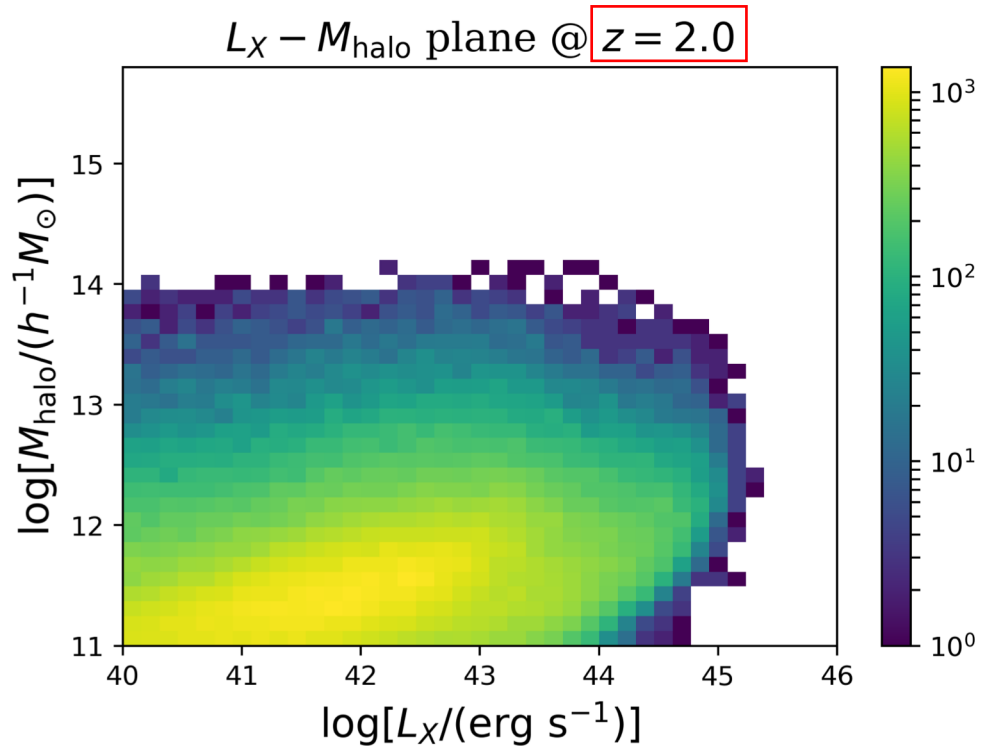


$z\sim 3$

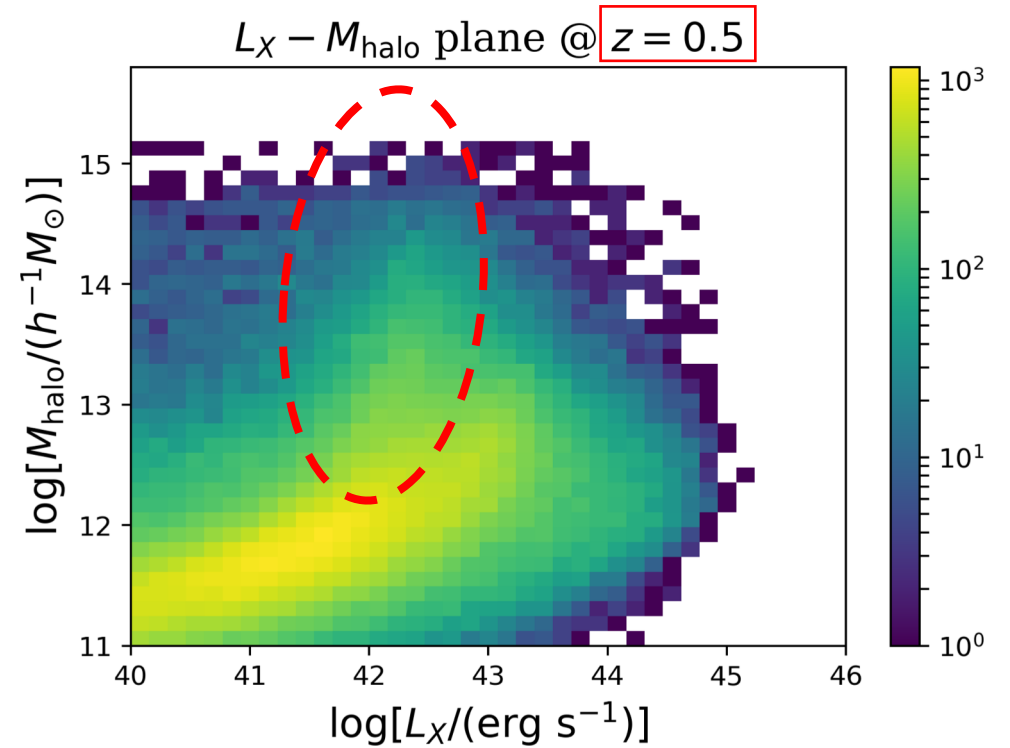


- モデルの AGN クラスタリングは観測をよく再現する
- $z=0$  では、比較的暗い AGN のクラスタリングの方が、明るい AGN のクラスタリングよりも強い。

# $L_X$ - $M_{\text{halo}}$ relation



$z=2$  では、ハロー質量は AGN luminosity とともに増加する傾向。

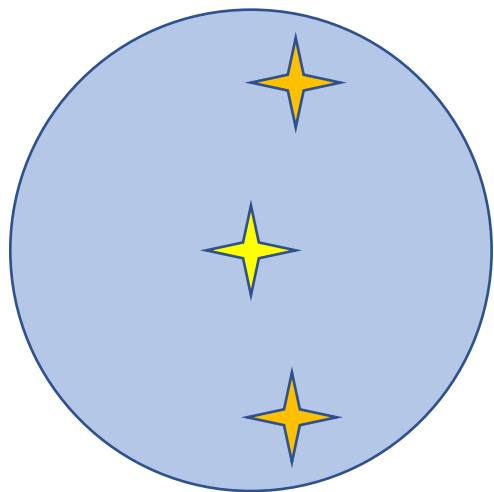


$z=0.5$  では、重い ( $M_{\text{halo}} \gtrsim 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$ ) ホストハローに属する暗い AGN が存在する (赤い波線の領域)。これらの AGN は長いガス降着タイムスケール  $t_{\text{loss}}$  を持つ。



# Central and satellite AGNs

DMハロー



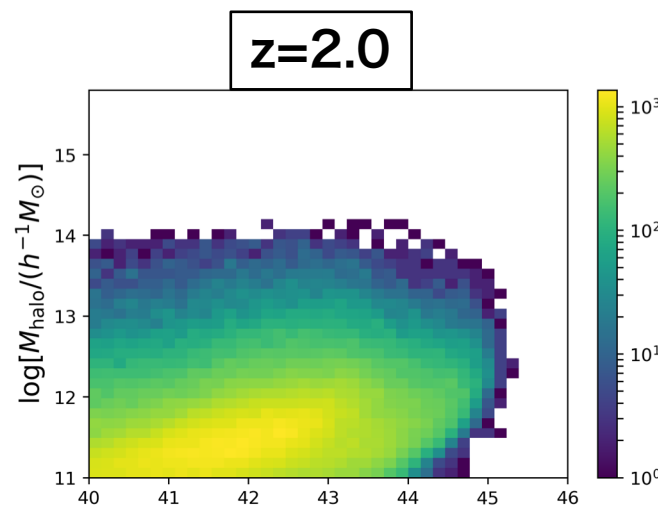
Central AGN



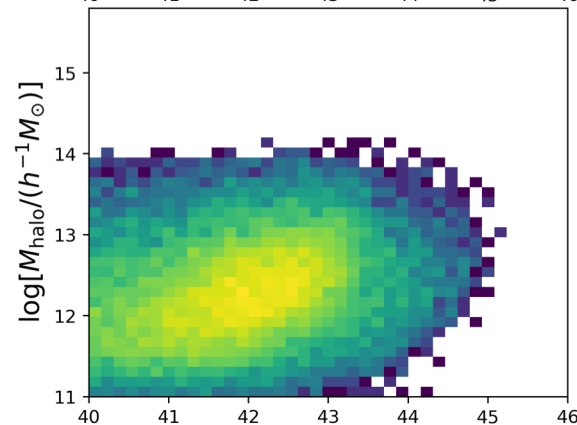
Satellite AGN

Satellite AGN は同程度の明るさの central AGN と比較してより重いハローに属する

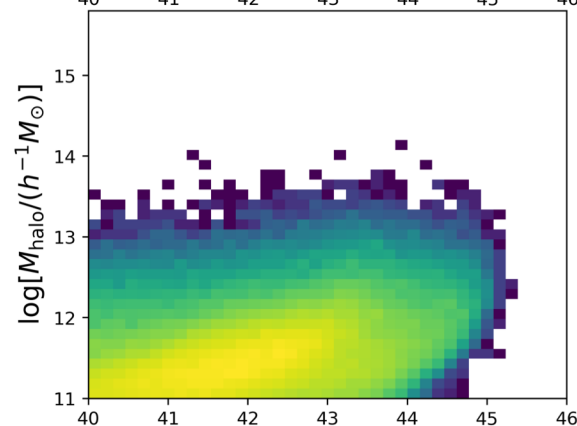
All AGNs



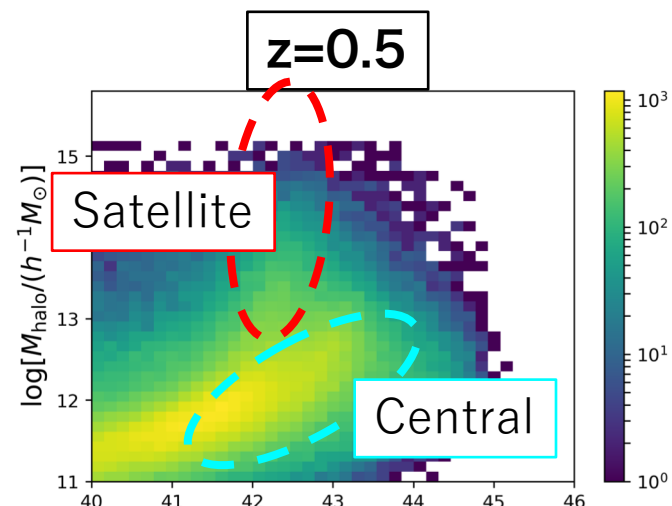
Satellites



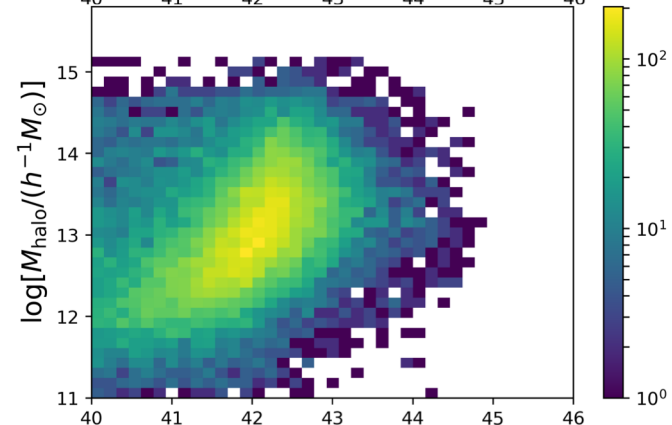
Centrals



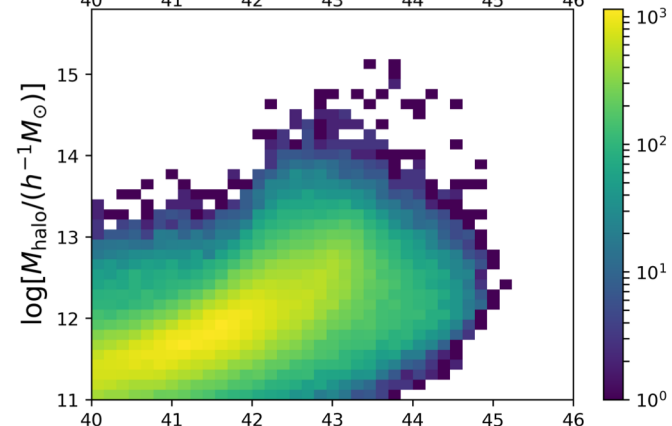
All AGNs



Satellites

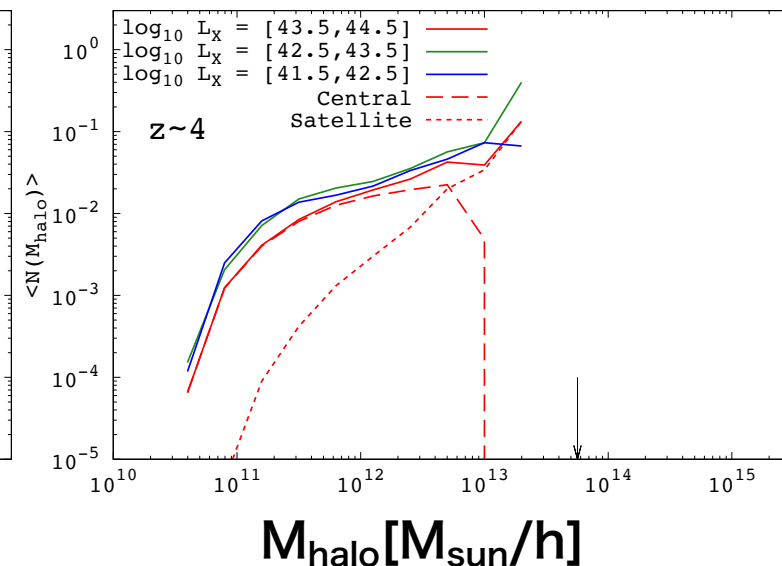
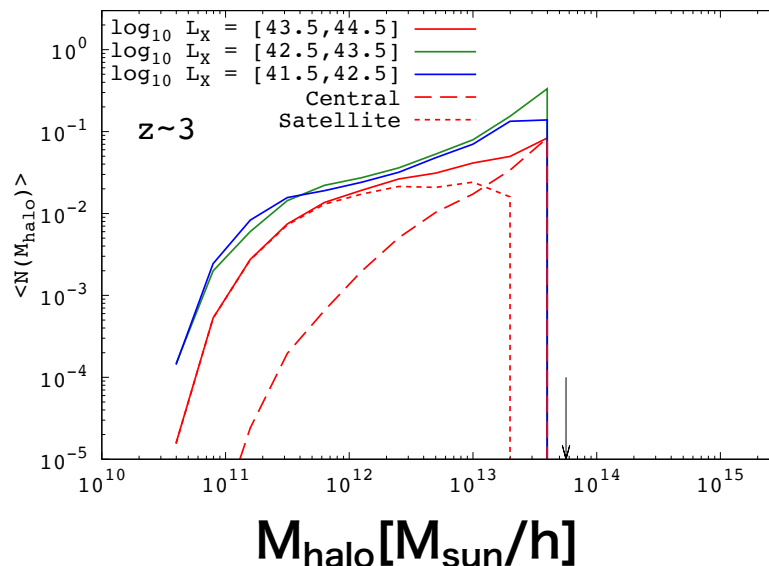
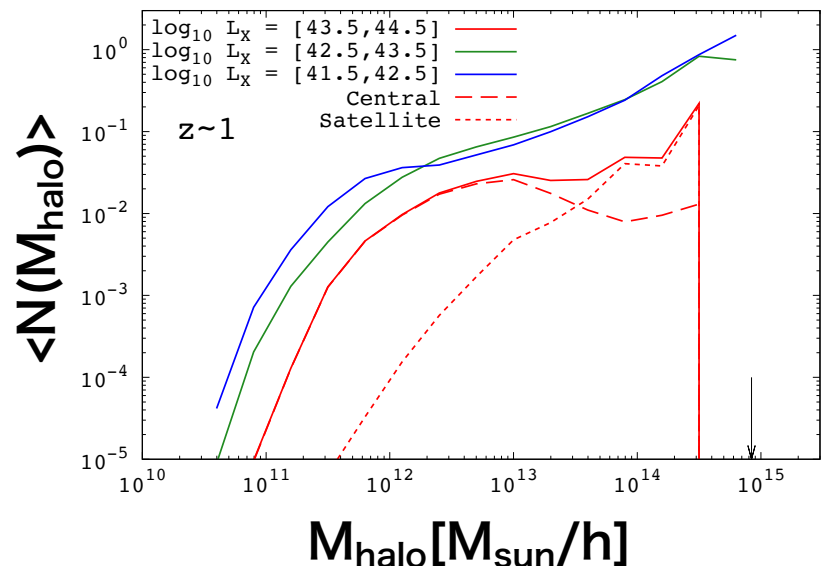


Centrals



# Halo occupation distribution (HOD)

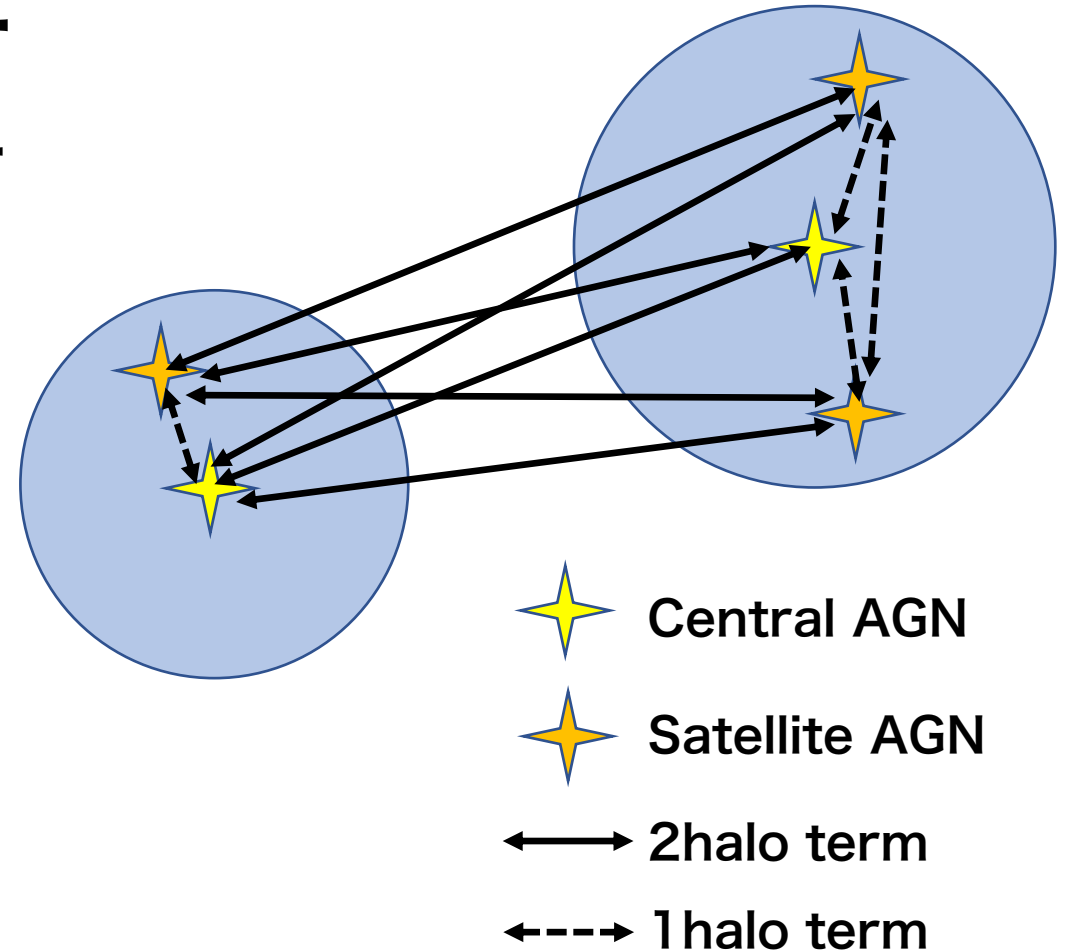
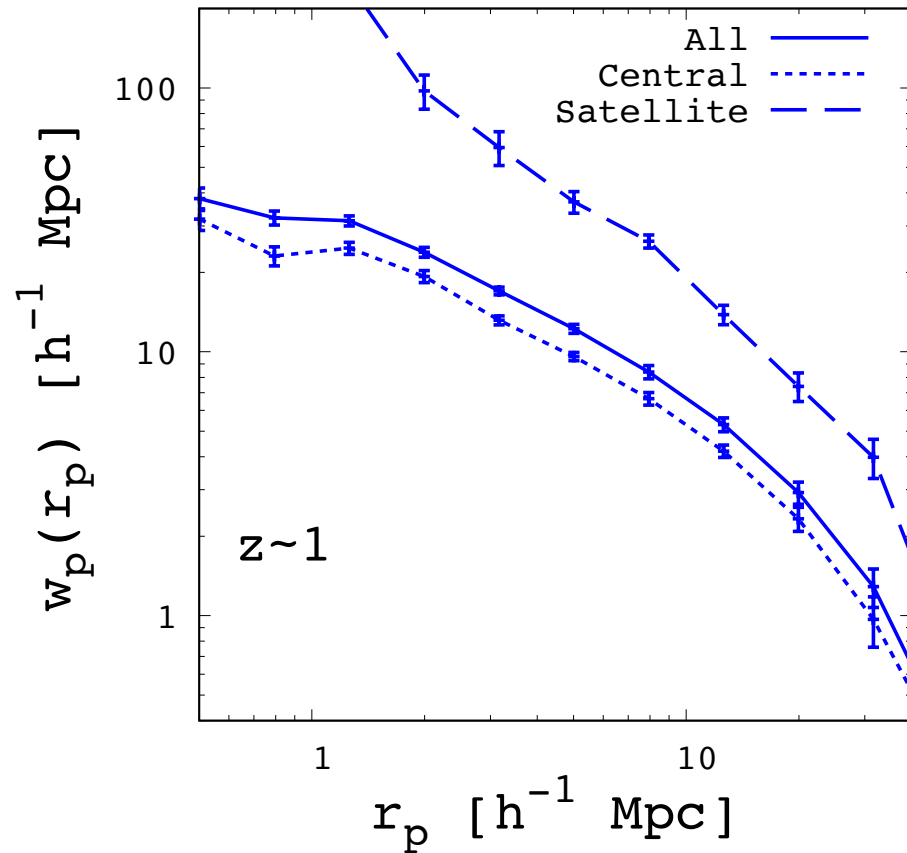
Mean occupation number  $\langle N(M_{\text{halo}}) \rangle$  : 質量  $M_{\text{halo}}$  のハローに含まれる AGN の平均個数



- Central AGN の mean occupation number  $\langle N(M_{\text{halo}}) \rangle$  は、 $M_{\text{halo}} \sim 10^{12.5} h^{-1} M_{\odot}$  からおおよそ flat.
- Satellite の  $\langle N(M_{\text{halo}}) \rangle$  はハロー質量とともに増加
- HOD は less massive end まで続いている -> small scale まで解くことが重要

# Satellite AGNs の重要性

## 2PCF への satellite AGNs の寄与

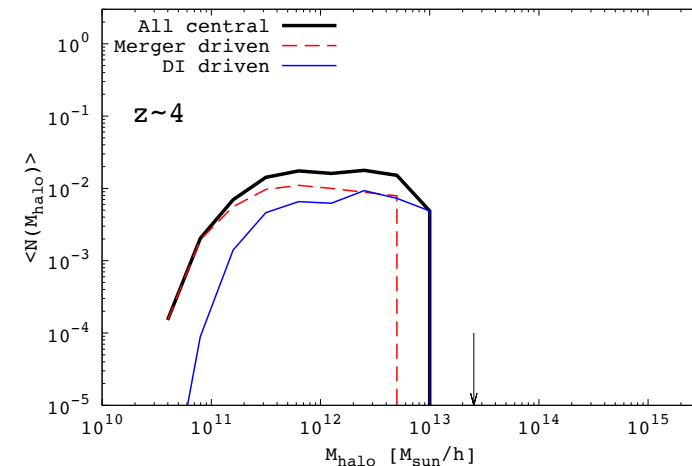
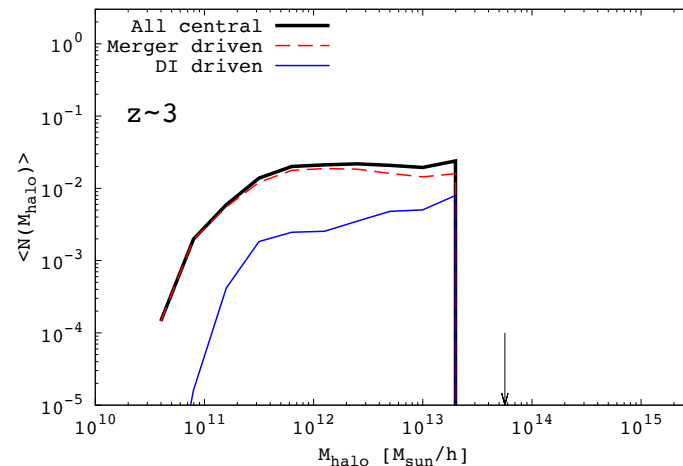
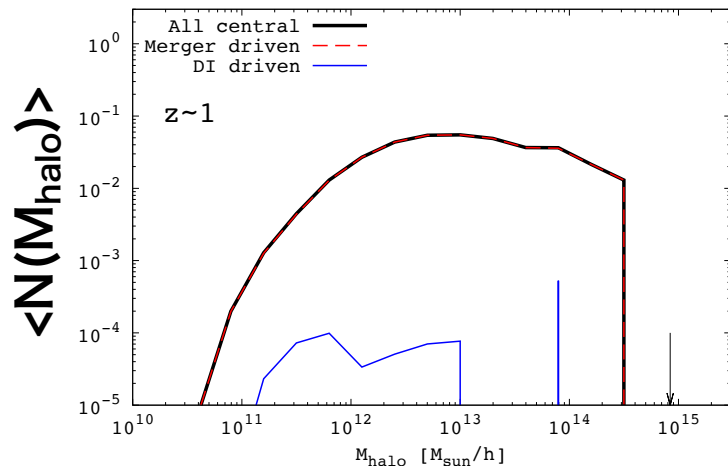


Satellite AGNs が 2点相関の 2halo term に寄与し、amplitude を増加させる

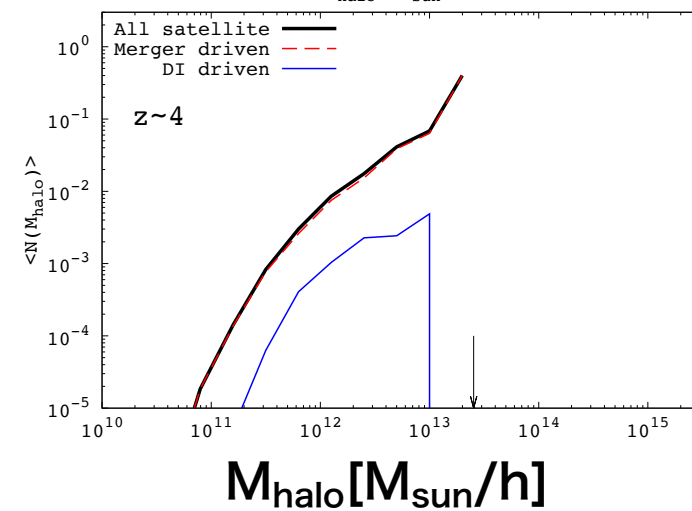
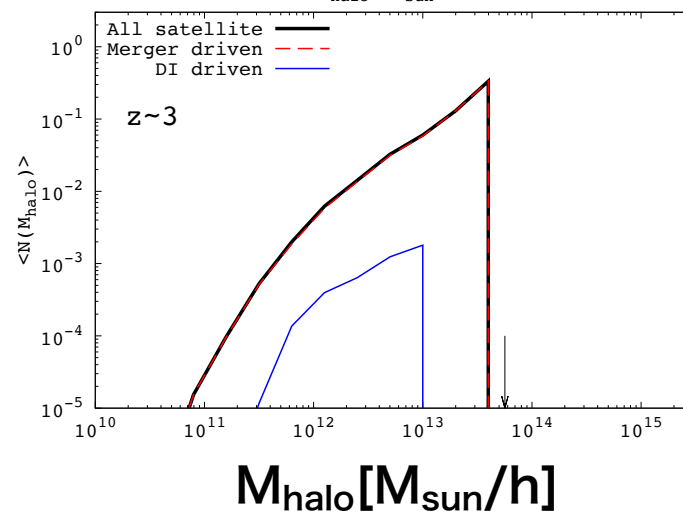
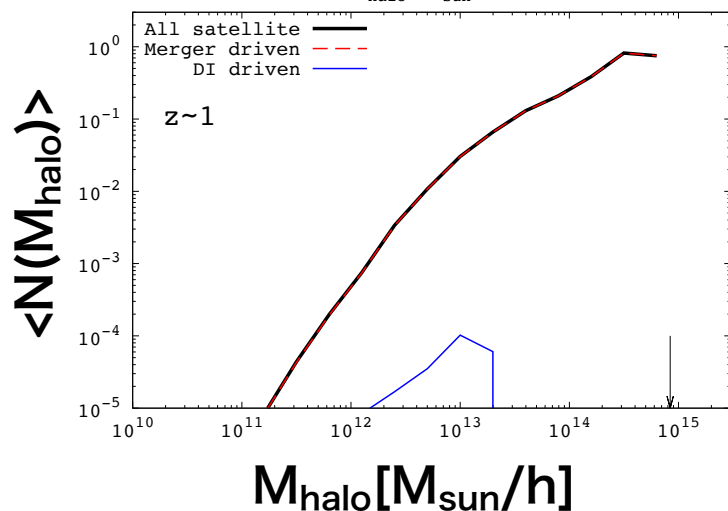
# トリガー機構ごとのHOD

X-ray AGNs with  $42.5 < \log(L_x / \text{erg s}^{-1}) < 43.5$

Central AGNs



Satellite AGNs

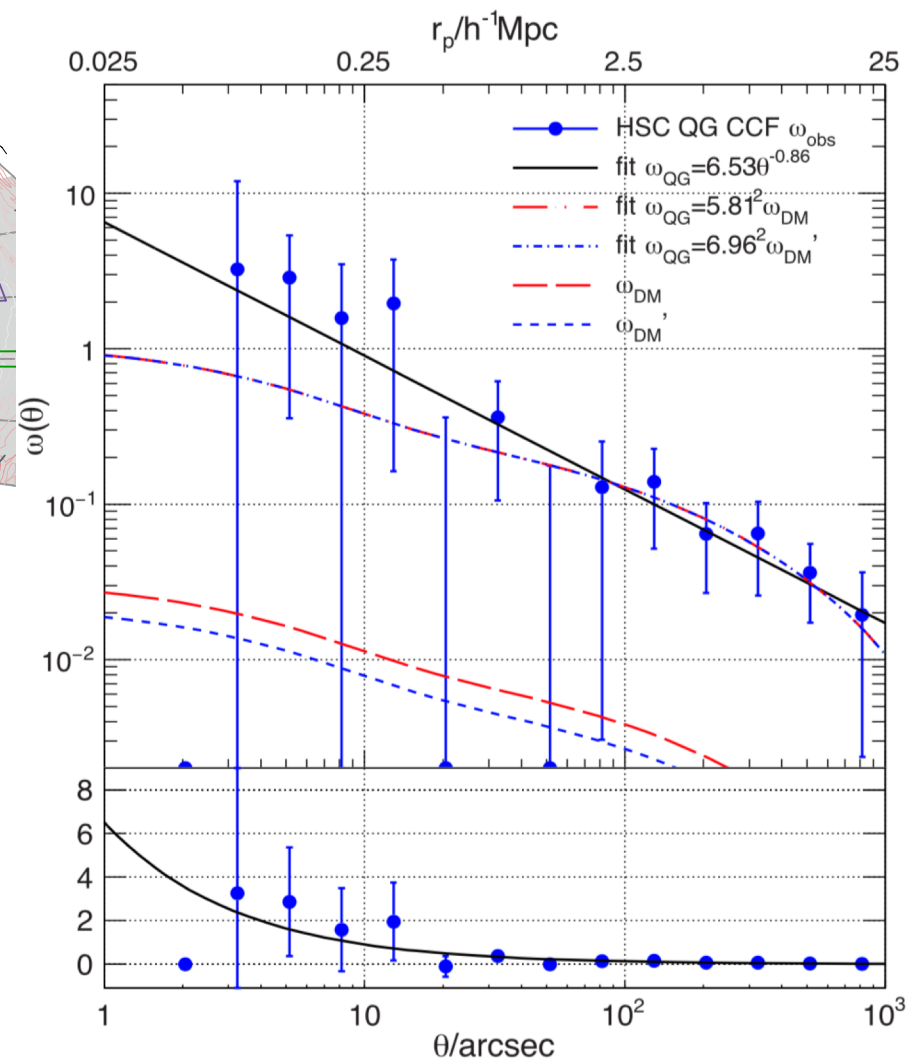
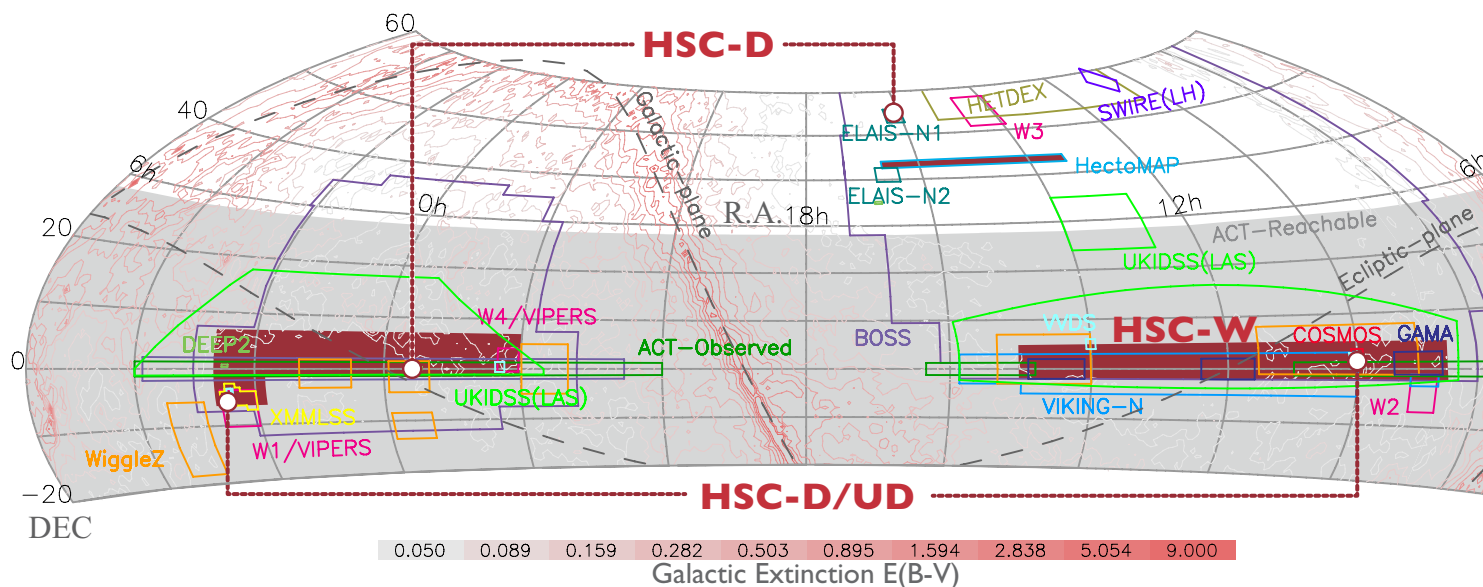


High-z ( $z \sim 4$ ) central AGNs を除いて merger driven AGNs が支配的

# すばるHSCサーベイ

## Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP)

He et al. 2018



- HSC-SSP

- Wide (~1400 deg<sup>2</sup>) and Deep (r~26) survey

# まとめ

- 大規模宇宙論的N体シミュレーションを用いることにより、AGNクラスタリングをより精密に予言可能になった
- AGNバイアスは、high-z と low-z で luminosity dependence が逆転する
  - high-z では明るいAGNの方がバイアス大
  - low-z では暗いAGNの方がバイアス大
- 大規模構造を解きつつ、小スケールのハローを解像できるシミュレーションが必要
- X-ray AGN クラスタリングにおいて、satellite AGN の果たす役割が大きいことが分かった
- 今後、すばるHSCサーベイ観測との直接比較を行なっていく