



# ○ 準解析的モデルで探る AGN のクラスタリング

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

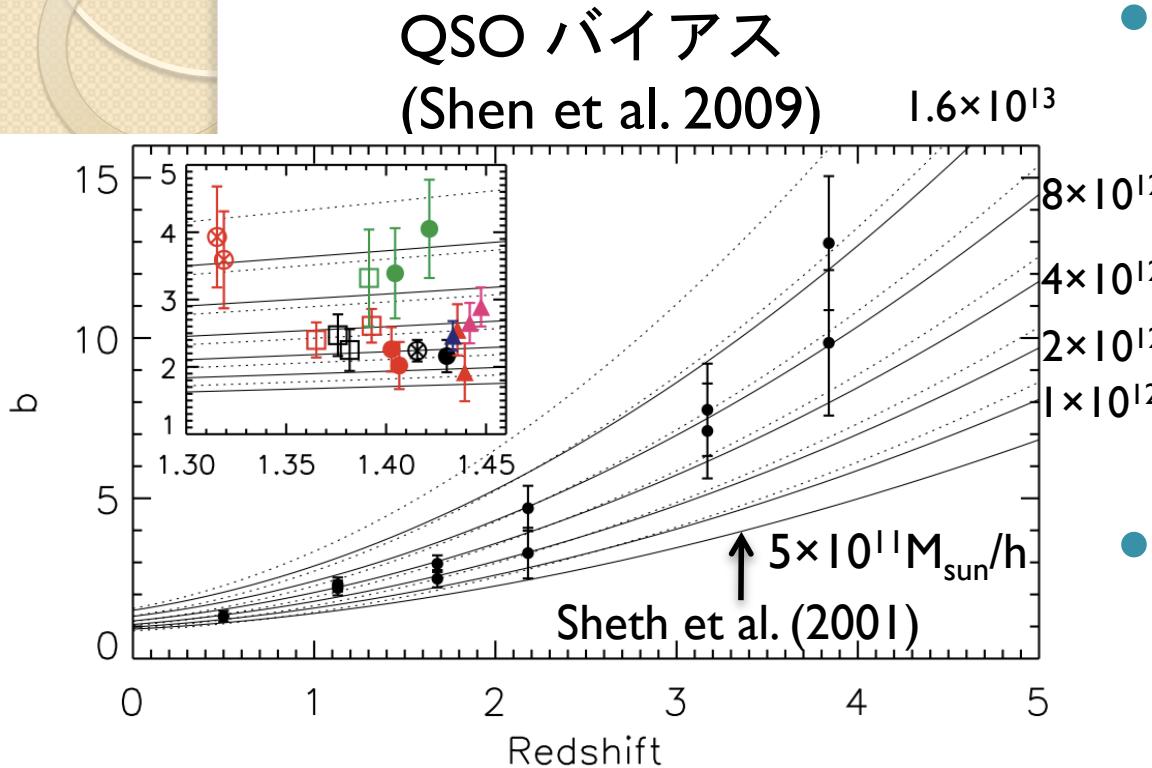
# Introduction

## Spatial clustering of QSO/AGN

- QSO/AGN の空間相関から何が分かるか
    - 2体相関関数 → QSO バイアス ハローバイアス
$$\xi_Q(r) \quad b_Q = \sqrt{\frac{\xi_Q(r)}{\xi_{DM}(r)}} \longleftrightarrow b_h(M) = \sqrt{\frac{\xi_h(M,r)}{\xi_{DM}(r)}}$$
    - ハローバイアスとの比較により、QSO/AGN host halo の質量を推定できる！
  - QSO/AGN host halo の質量
    - SMBH 形成過程に依存
    - QSO/AGN 放射過程, light curve model に依存
- QSO バイアス, QSO/AGN host halo の観測結果を理論モデルと比較することで、SMBH 形成過程, QSO/AGN 放射過程を明らかにすることができる！

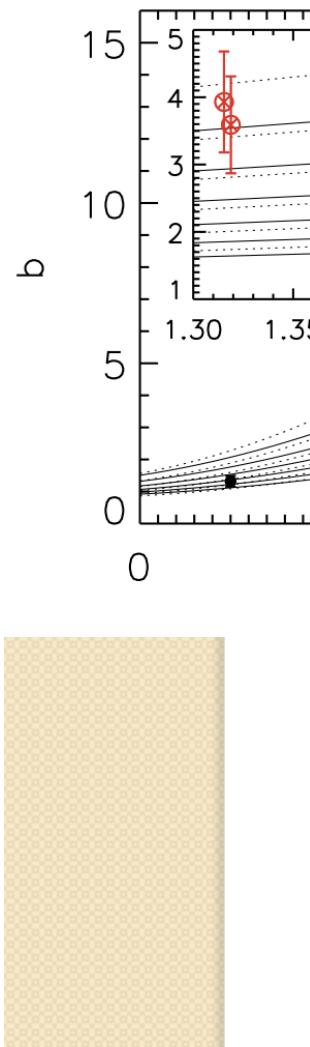
# Introduction

## Spatial clustering of QSO/AGN



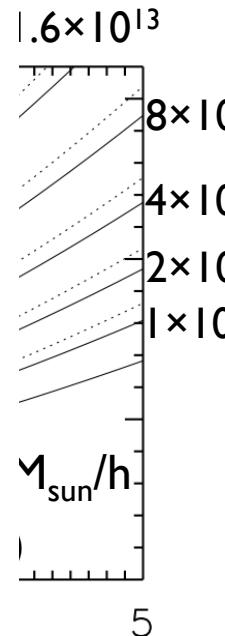
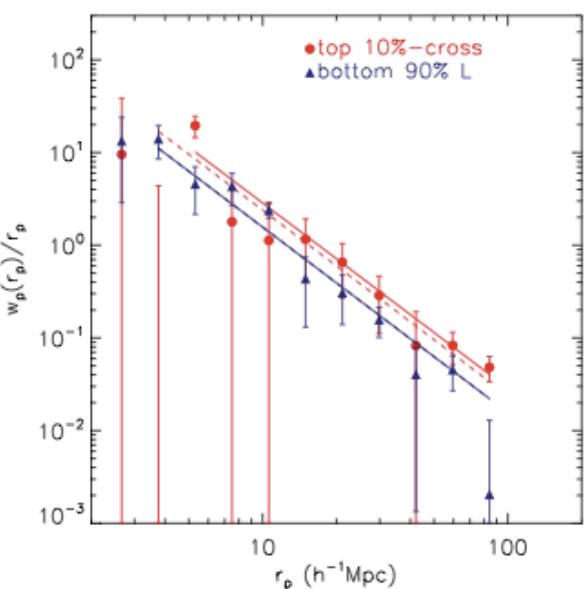
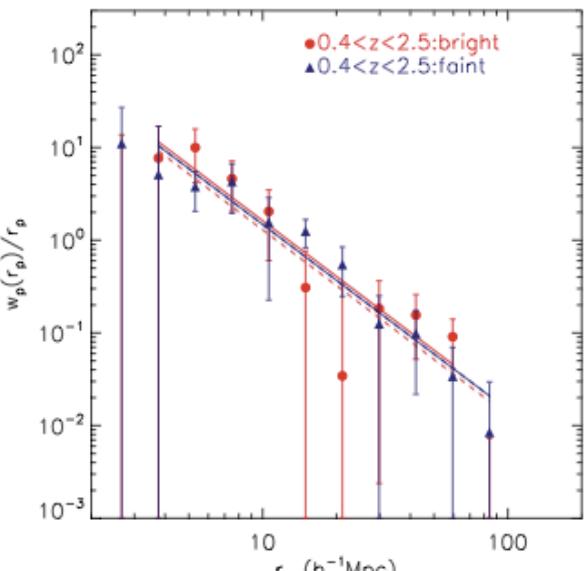
- redshift dependence
  - high-z にいくほど QSO バイアスが大きくなる
  - Shen+2009: high-z にいくほど QSO host halo の mass は増加する?
- Luminosity dependence
  - Bright QSO ほどクラス タリングが強い?

$z > \sim 3$  の redshift dependence, luminosity dependence はよく分かっていない



# Introduction

## Spatial clustering of QSO/AGN



- redshift dependence
  - high-z にいくほど QSO バイアスが大きくなる
  - Shen+2009: high-z にいくほど QSO host halo の mass は増加する?
- Luminosity dependence
  - Bright QSO ほどクラス タリングが強い?

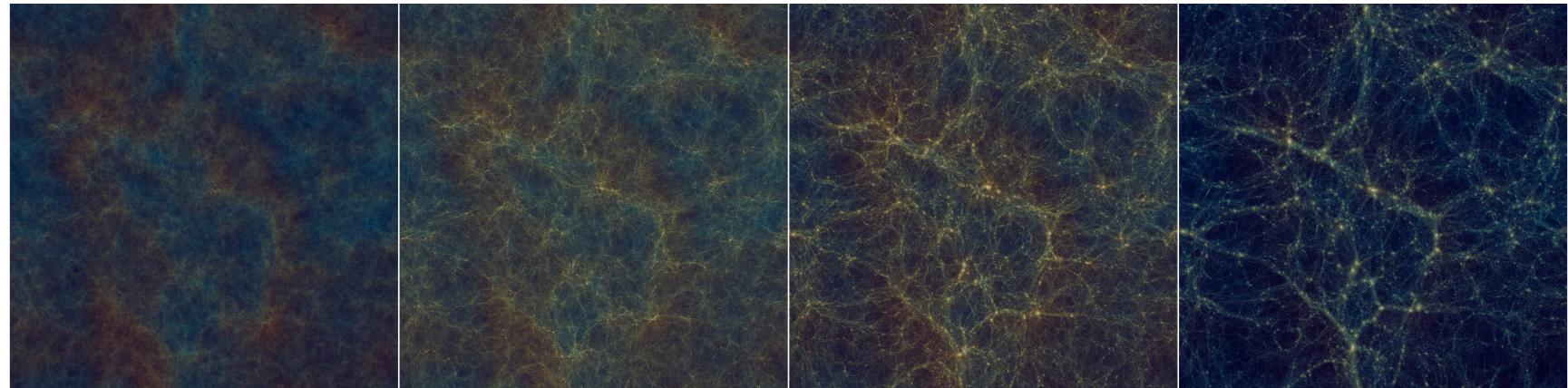
$z > \sim 3$  の redshift dependence, luminosity dependence はよく分かっていない

# Motivation

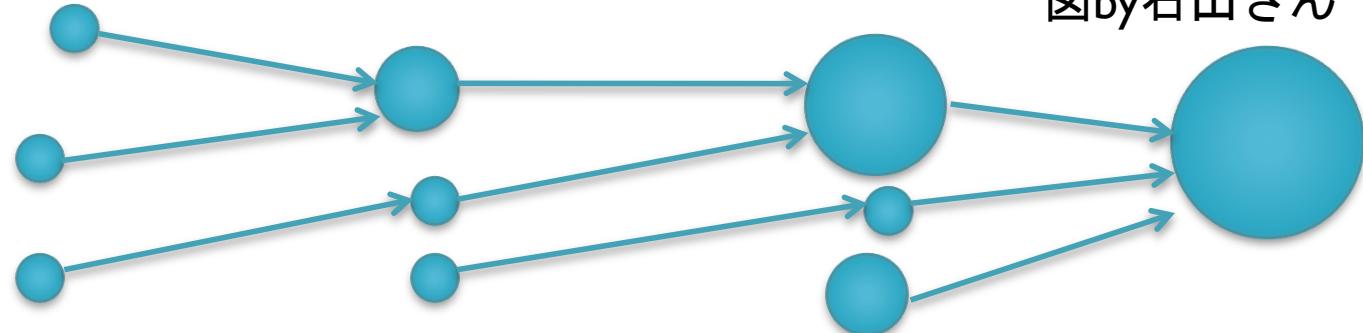
- 我々の銀河-AGN 形成モデル Numerical Galaxy Catalog ( $\nu$ GC) を用いて、QSO/AGN クラスタリングを予言する
  - QSO host halo の質量分布
  - QSO-銀河相互通関関数
  - QSO バイアス
- 結果の Boxsize 依存性を調べる

# Numerical Galaxy Catalog ( $\nu$ GC)

## I. 宇宙論的N体シミュレーション



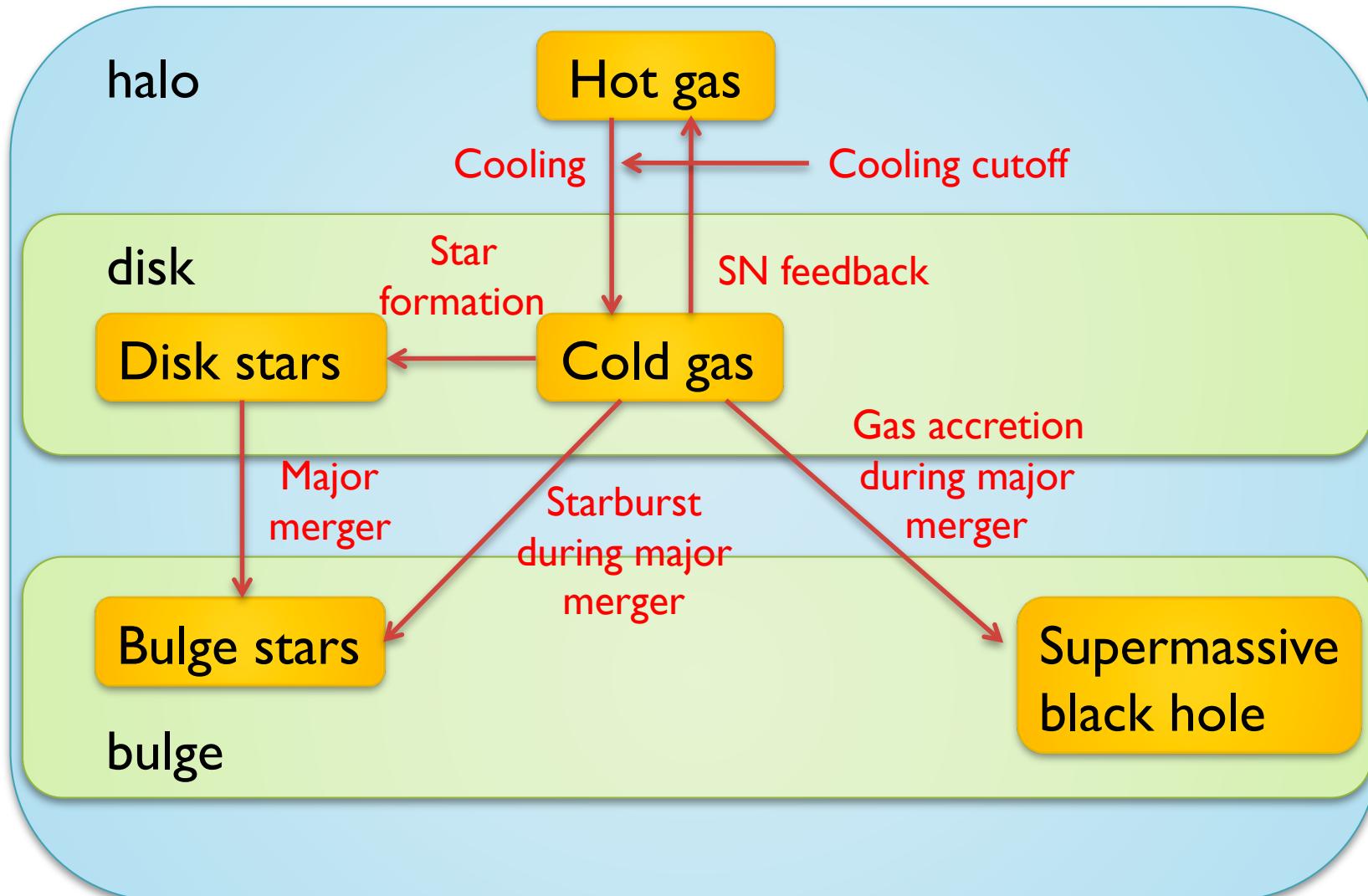
図by石山さん



| Boxsize<br>(Mpc/h) | N        | m<br>( $M_{\text{sun}}$ /h) | $\varepsilon$<br>(kpc/h) | $M_{\text{min}}$<br>( $M_{\text{sun}}$ /h) | Cosmology |
|--------------------|----------|-----------------------------|--------------------------|--|-----------|
| 280.0              | $2048^3$ | $2.20 \times 10^8$          | 4.27                     | $8.79 \times 10^9$                         | Planck    |
| 560.0              | $4096^3$ | $2.20 \times 10^8$          | 4.27                     | $8.79 \times 10^9$                         | Planck    |

# Numerical Galaxy Catalog ( $\nu$ GC)

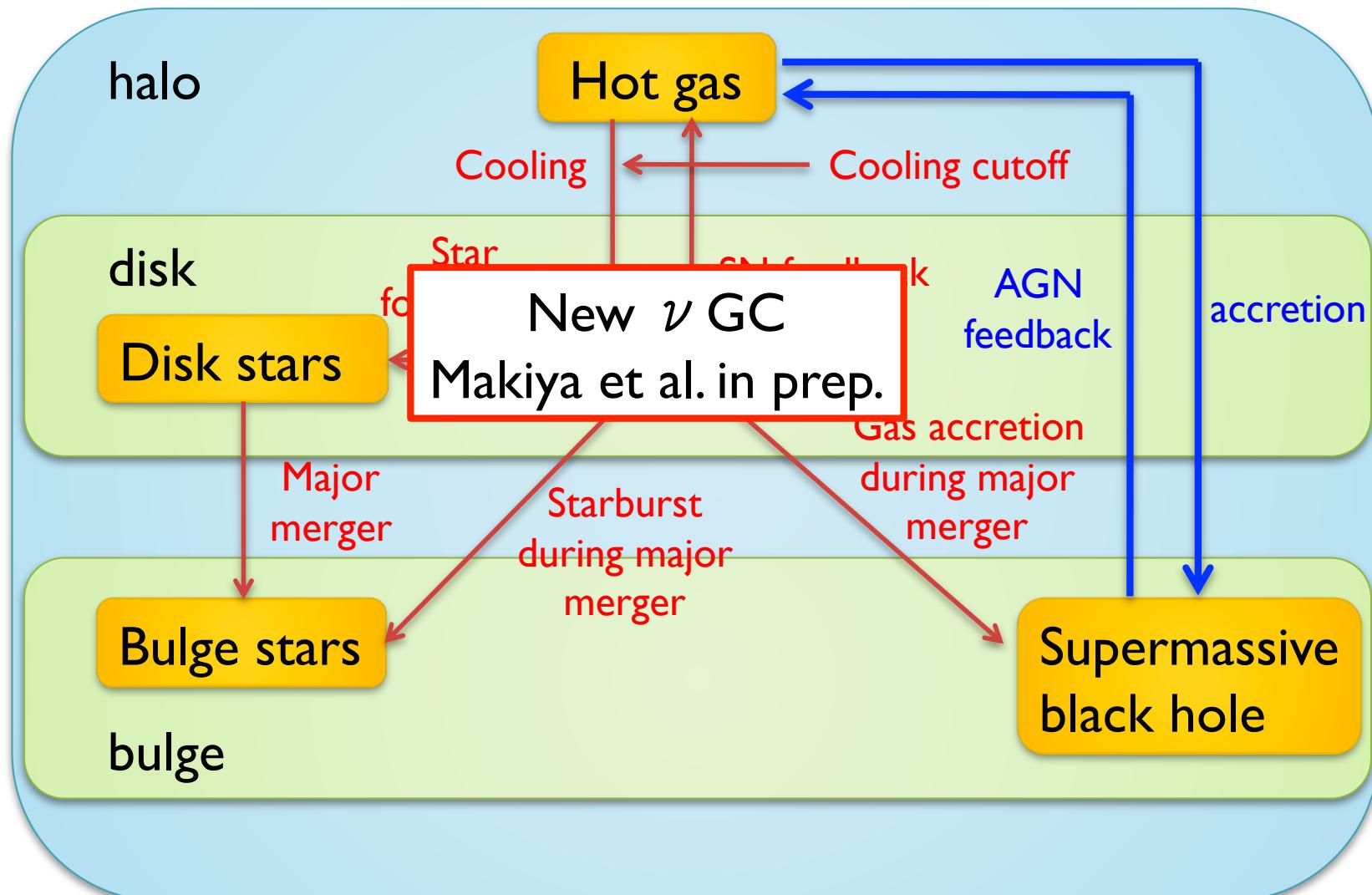
## II. バリオンの進化



Nagashima et al. 2005, Enoki et al. 2003, 2014

# Numerical Galaxy Catalog ( $\nu$ GC)

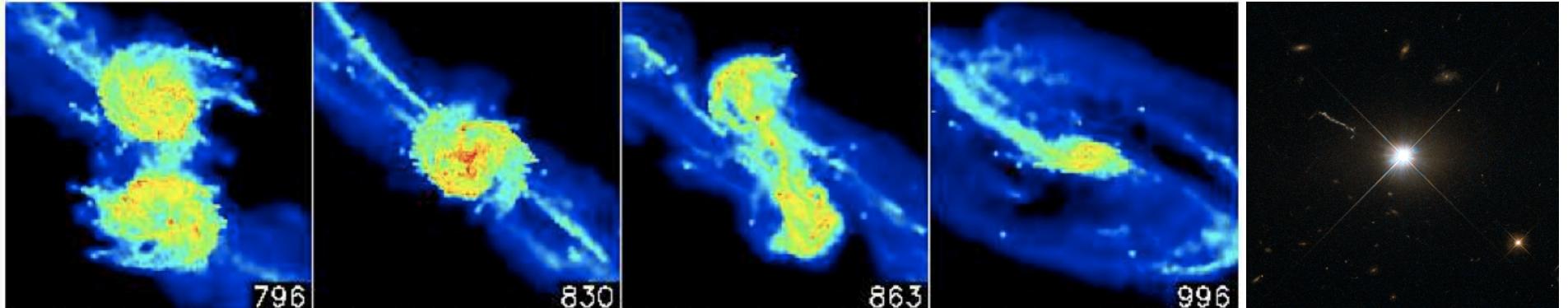
## II. バリオンの進化



Nagashima et al. 2005, Enoki et al. 2003, 2014

# SMBH/AGN formation model (Enoki et al. 2003, 2014)

- I. Major merger の際の、銀河中心部へのガス降着



Merger simulation (Matsui et al. 2012)

QSO 3C273  
(ESA/Hubble  
& NASA)

2. 降着するガスの質量は、major merger の際に起きたスタークエストによって起きる星質量に比例すると仮定

$$M_{\text{acc}} = f_{\text{BH}} M_{*, \text{burst}}, f_{\text{BH}} = 0.0067$$

$f_{\text{BH}}$  は、 $z=0$  の  $M_{\text{bulge}} - M_{\text{BH}}$  関係を再現するように与える

# QSO/AGN light curve model

## QSO B-band luminosity

$$L_B(t) = \frac{\varepsilon_B M_{\text{acc}} c^2}{t_{\text{life}}} \exp\left(-\frac{t}{t_{\text{life}}}\right)$$

$\varepsilon_B$  : the radiative efficiency in the B-band

$t_{\text{life}}$  : QSO lifetime scale

$t_{\text{life}}$  scales with the dynamical time scale of the host halo,

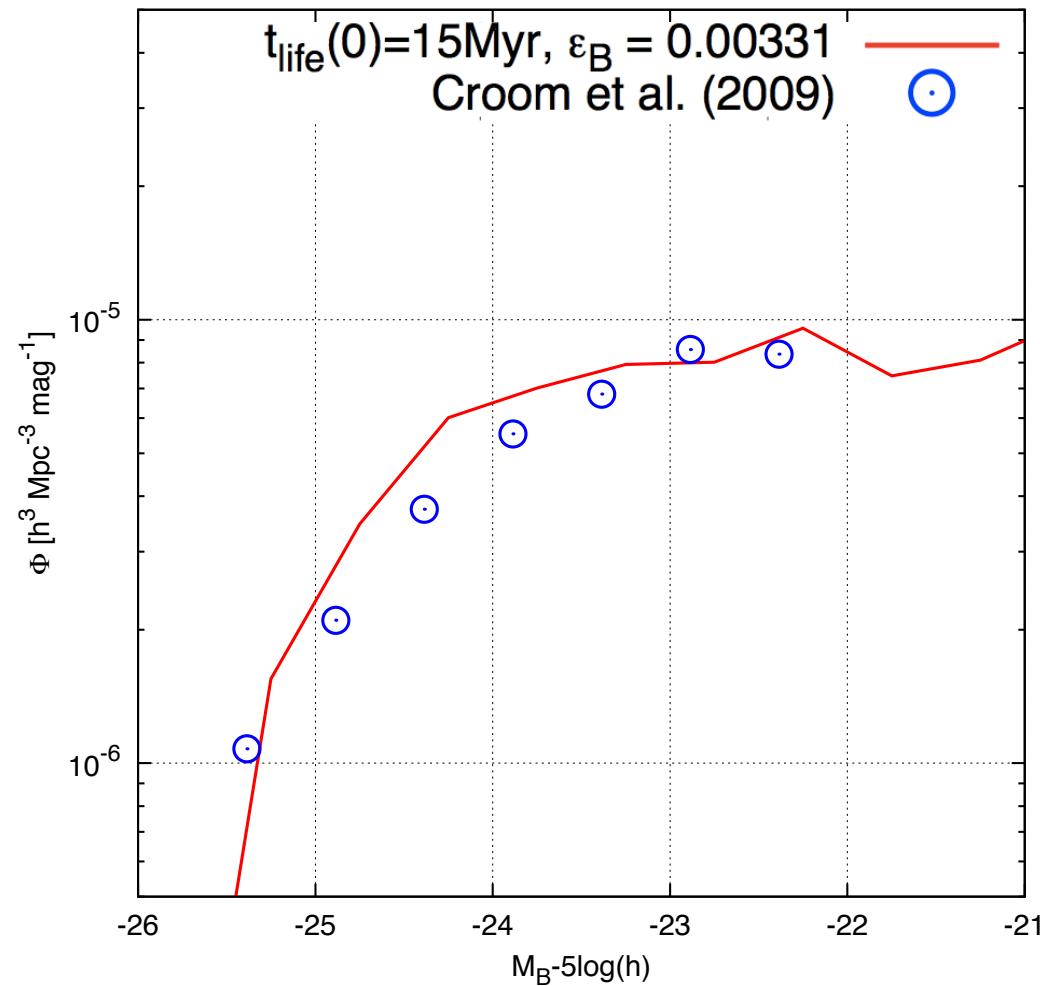
$$t_{\text{life}}(z) \propto t_{\text{dyn}} \propto 1/\sqrt{\rho_{\text{vir}}}$$

$\varepsilon_B, t_{\text{life}}(z=0)$  are fixed by matching the observed B-band Luminosity function of QSO at  $z=2$ .

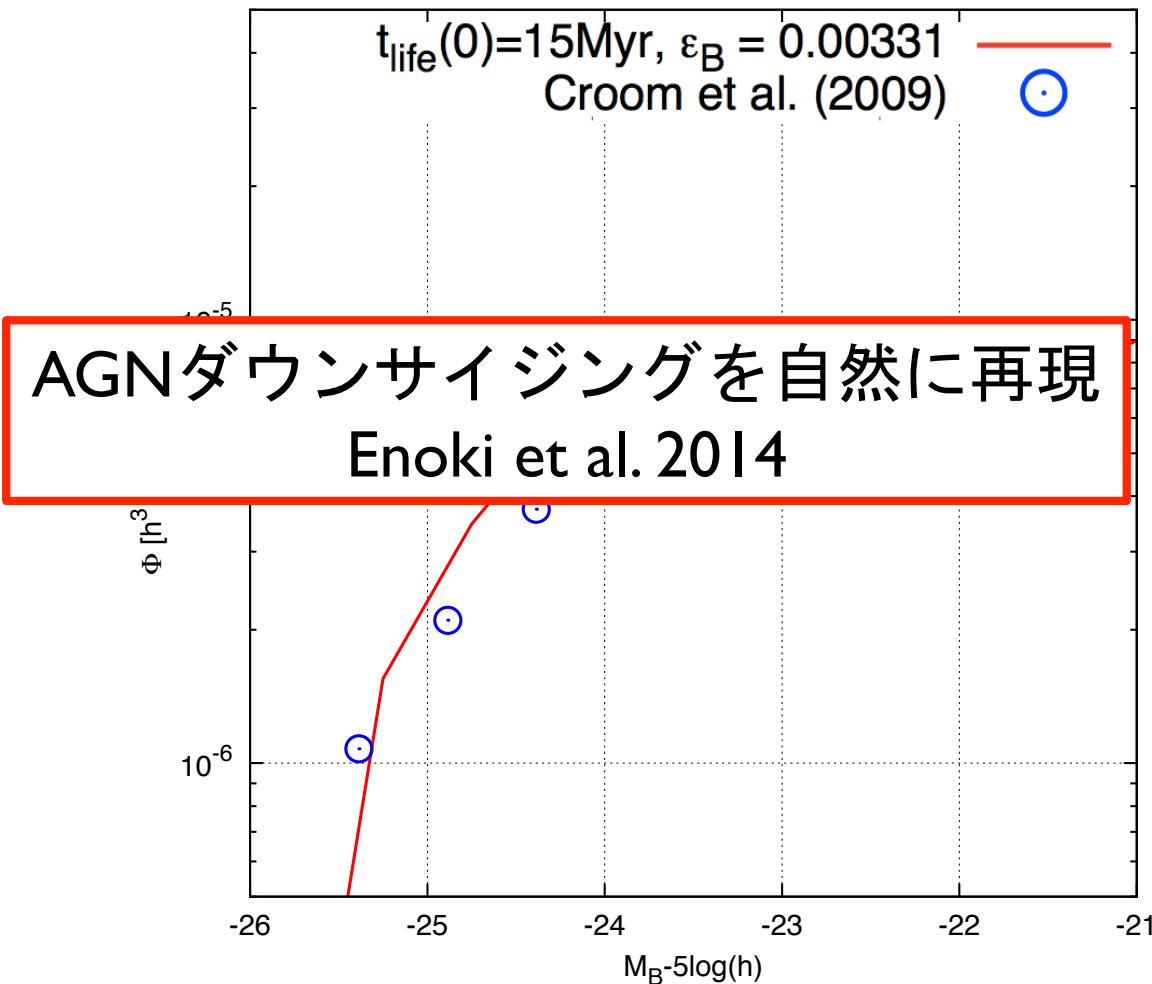
$$\varepsilon_B = 0.00331$$

$$t_{\text{life}}(z=0) = 15 \text{Myr}$$

# Constraint QSO luminosity function at z=2



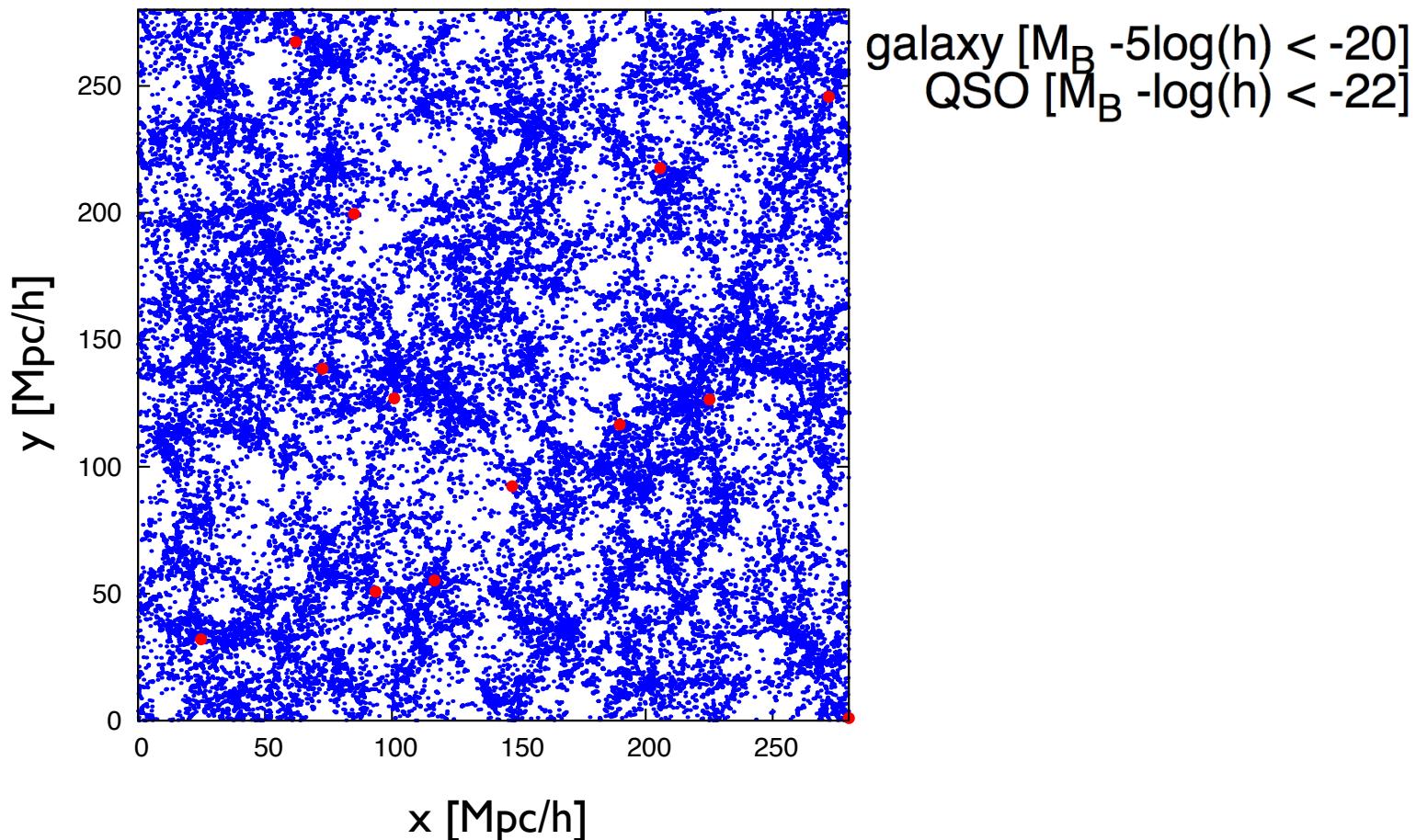
# Constraint QSO luminosity function at z=2



# Spatial distribution of galaxies and quasars

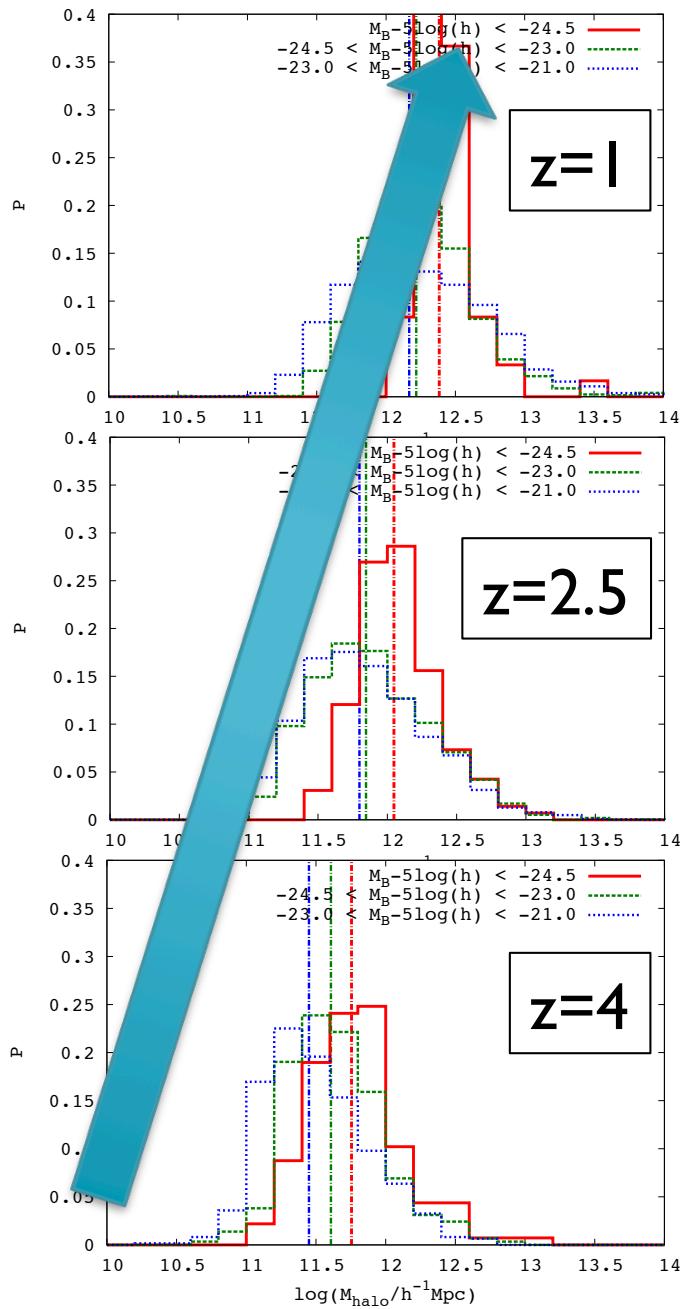
$z=3$

$280 \text{ Mpc}/h \times 280 \text{ Mpc}/h \times 14 \text{ Mpc}$





# QSO host halo の質量分布



- $z=4$  から  $z=1$  にかけて、  
host halo mass は一桁増  
加 (median:  $\sim$  a few  
 $10^{11} \rightarrow \sim$  a few  $10^{12} M_{\text{sun}}$ )
  - Shen+2009の観測結果と不  
一致 ( $z$ とともに、host  
halo mass が増加する傾向)
- Host halo mass は QSO  
luminosity にあまり依ら  
ない

# Estimators of correlation functions

- 銀河自己相関関数

$$\xi(r) = \frac{\langle DD(r) \rangle}{\langle DR(r) \rangle} - 1$$

- e.g. Davis & Peebles 1983

D: 銀河の集合, R: ランダム粒子の集合

$\langle DD(r) \rangle$ : 距離  $(r, r+dr)$  にある銀河-銀河ペアの数

$\langle DR(r) \rangle$ : 距離  $(r, r+dr)$  にある銀河-ランダム粒子ペアの数

(ペアの数は、銀河・ランダム粒子の数で規格化する)

- QSO-銀河相互相関関数

- QSO自己相関に比べ統計誤差を小さくおさえることができる

$$\xi(r) = \frac{QG(r)}{QR(r)} - 1$$

- e.g. Coil et al. 2007

Q: QSOsの集合, G: 銀河の集合

R: ランダム粒子の集合

$QG$ : 距離  $(r, r+dr)$  にある QSO-銀河ペアの数

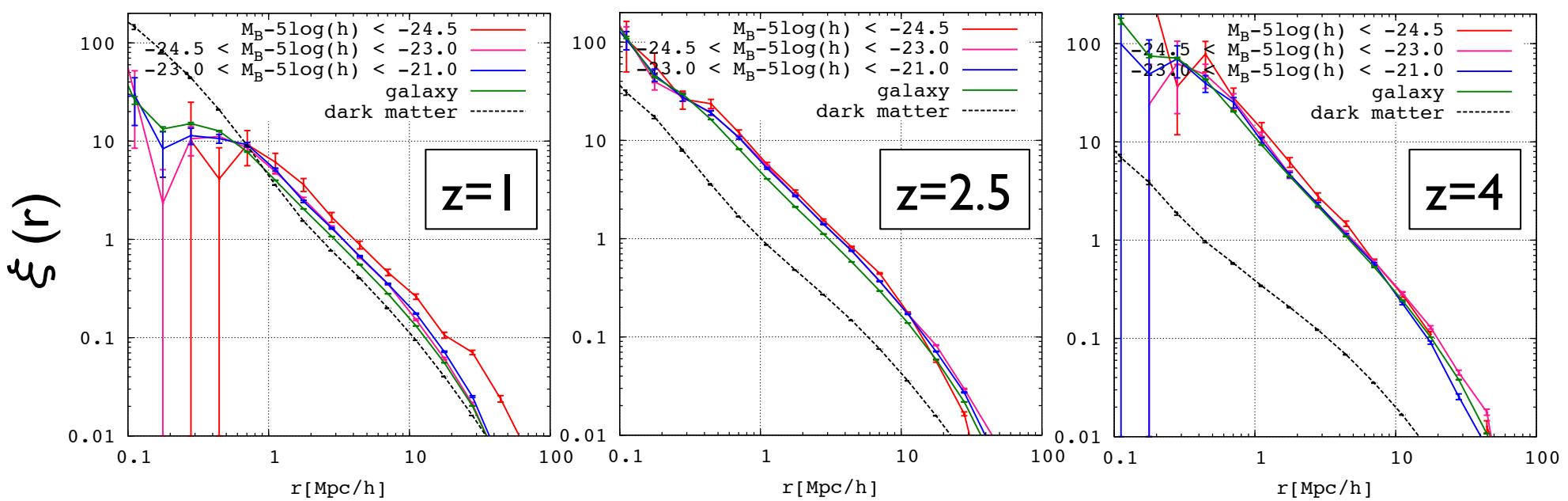
$QR$ : 距離  $(r, r+dr)$  にある QSO-ランダム粒子ペアの数

(ペアの数は、銀河・ランダム粒子の数で規格化する)

# QSO-galaxy cross correlation function

Galaxy sample:  $M_B - 5\log(h) < -20$

$\xi_{DM}(r)$  は、宇宙論的N体シミュレーションの結果を用いる



- $[1, 10]$  Mpc/h で power law
- Luminosity dependence はあまりない
- $z$  とともにバイアスが増加

# QSO linear bias

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

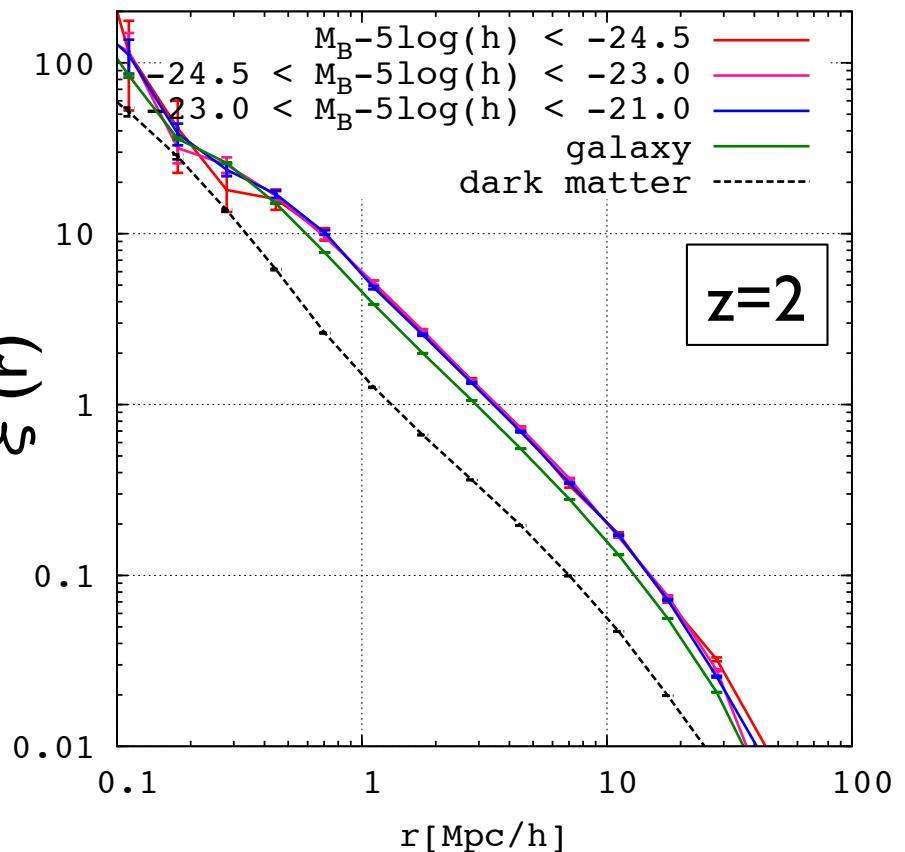
線形バイアスを仮定すると、

$$\xi_{QG} = \sqrt{\xi_Q \xi_G}$$

であるから、QSOバイアスは、

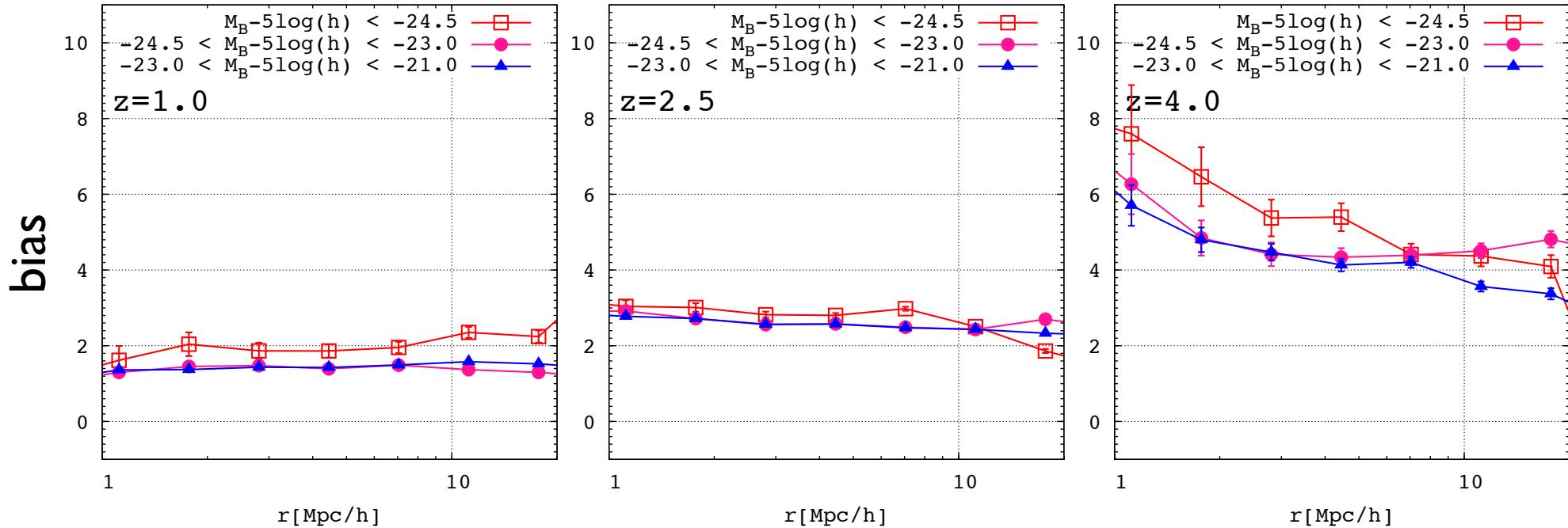
$$b_Q = \frac{\xi_{QG}(r)}{\sqrt{\xi_G(r)\xi_{DM}(r)}}$$

で得られる。





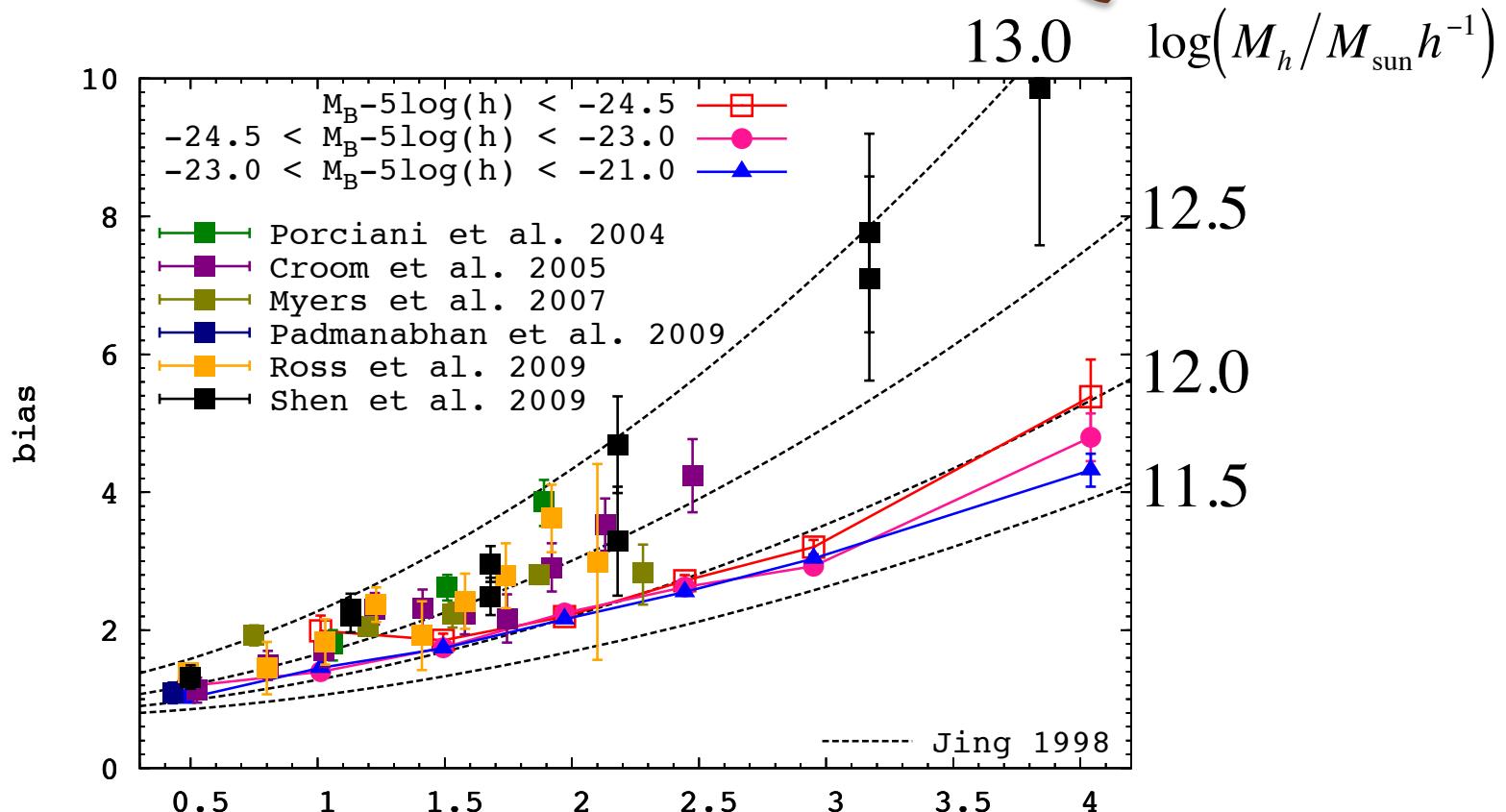
# QSO linear bias



- バイアスは  $z$  とともに増加
- バイアスの距離  $r$  依存性
  - low- $z$ :  $r$  にあまりよらない
  - high- $z$ : 小さいスケールほどバイアスが大きい

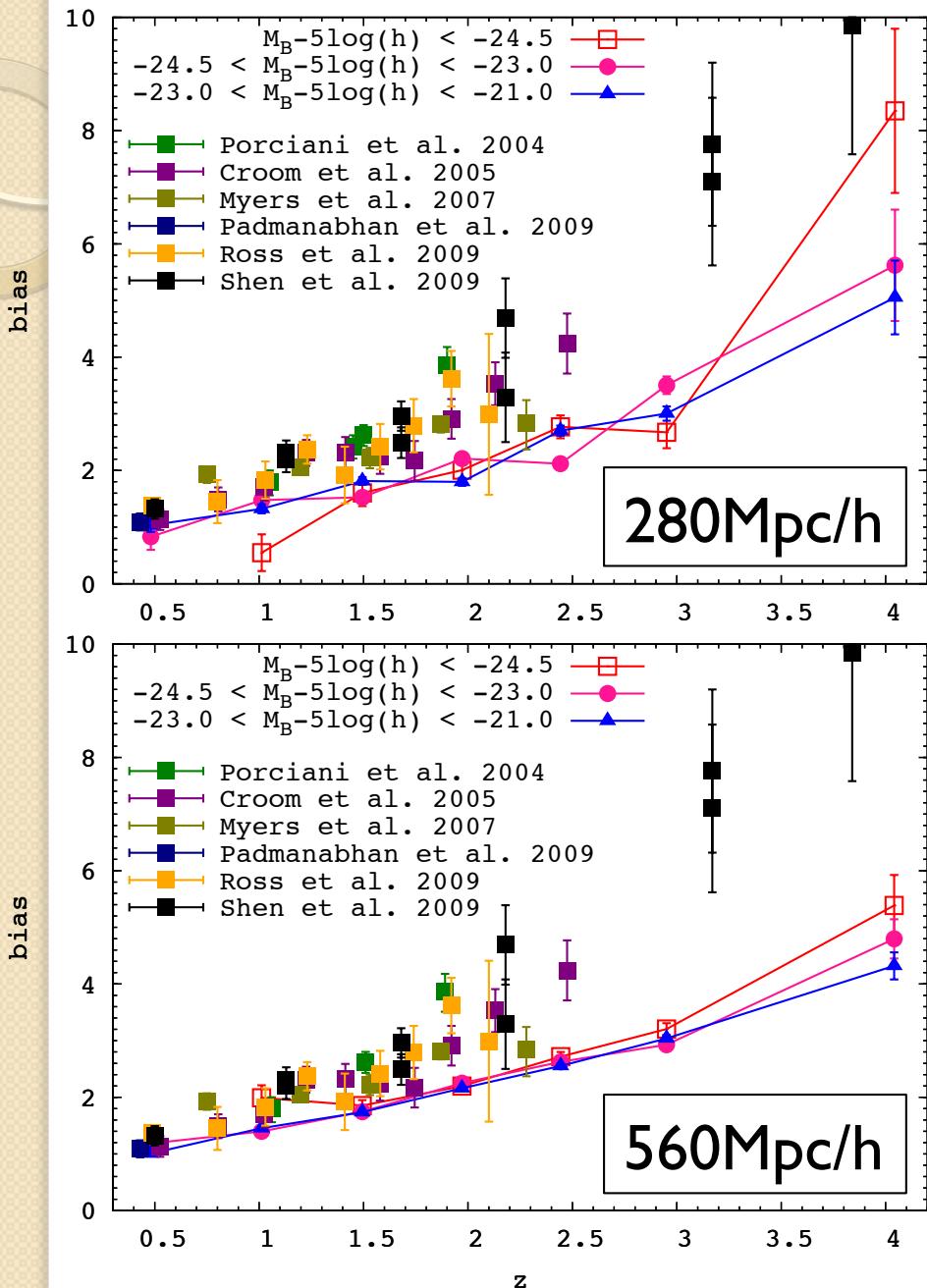


# Redshift evolution of the QSO bias



- QSO バイアスは  $\text{redshift}^z$  の増加関数
- Jing 1998 のハローバイアスと consistent
- QSO luminosity にはあまり依存しない
- low-z では観測と consistent
- high-z の観測との不一致
  - $z > 2$  では、観測は明るいQSOのみ( $M_B - 5\log h \sim -26$ )を見ているため

# 280Mpc/hと560Mpc/hの比較



- 相互相関関数、バイアスは Boxsize に大きく依存する
- Large Box での解析が重要



# Summary and future study

- 準解析的モデル Numerical Galaxy Catalog ( $\nu$  GC) を用いて、QSO のクラスタリングを調べた
- QSO host halo mass
  - 各 redshift で、QSO luminosity よらずほぼ一定  $\rightarrow$  同じようなクラスタリング
  - $z$  とともに小さくなる:  $\sim a \text{ few} \times 10^{12} \text{ M}_{\odot} @ z=1 \Rightarrow \sim a \text{ few} \times 10^{11} \text{ M}_{\odot} @ z=4$
- QSO バイアス
  - redshift とともに増加する
  - QSO luminosity に大きく依存しない
  - 観測との不一致は、観測では非常に明るいQSOのみを見ているため
- 結果は Boxsize に大きく依存する  $\rightarrow$  large box での解析が必須
- 今後
  - $1120 \text{ Mpc}/h$  box のN体シミュレーションを用いた、より明るい QSOs, high-z QSOs の空間相関
  - HSC の観測結果と直接比較可能なデータの提供