

ダークハローの非線形 確率的バイアスモデル

東京大学 大学院理学系研究科

須藤 靖

共同研究者:

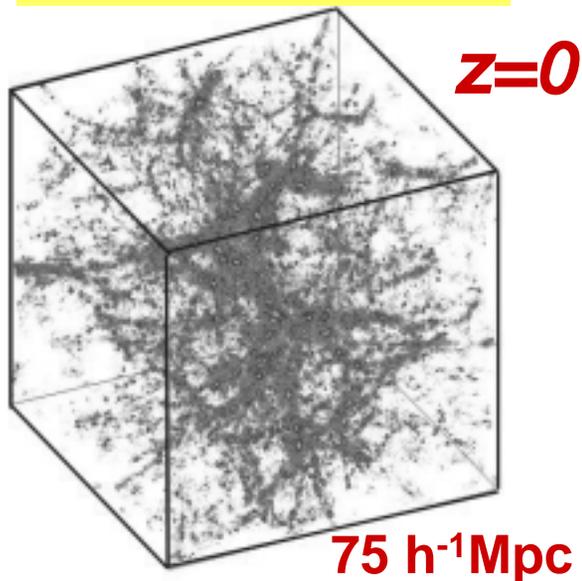
樽家篤史 (東京大学)、吉川耕司 (京都大学)

景益鵬 (上海天文台)、日影千秋 (東京大学)

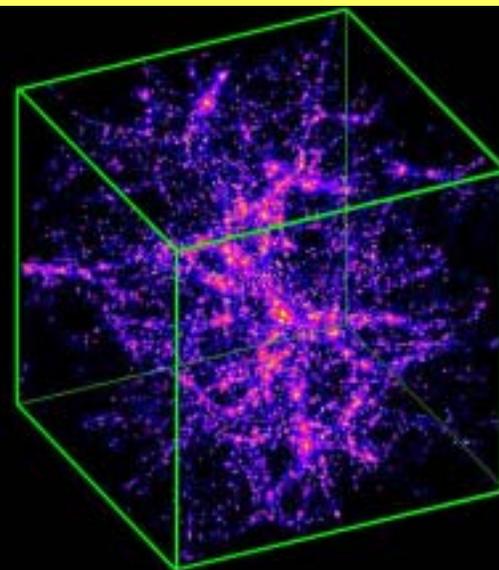
2001年2月22日 京都大学物理学教室談話会

バイアス：質量分布と天体分布との違い

ダークマタ - の分布



銀河団高温ガスの分布

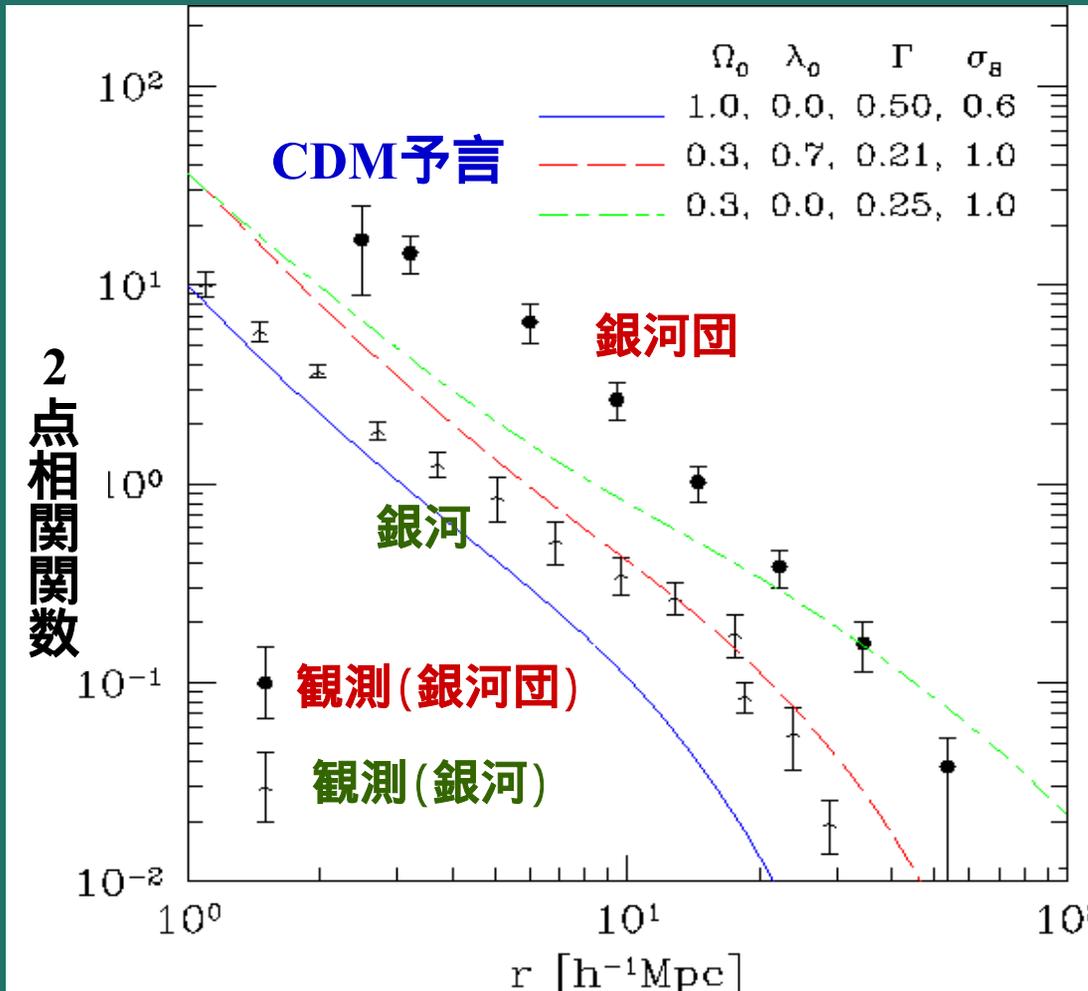


バイアス

$\sigma=0.3, \quad \sigma=0.7, \quad h=0.7, \quad \sigma=1.0$

- 天体は、ダークマタ - 重力ポテンシャルのどのような場所で誕生するのか ???

銀河・銀河団バイアスの観測的証拠



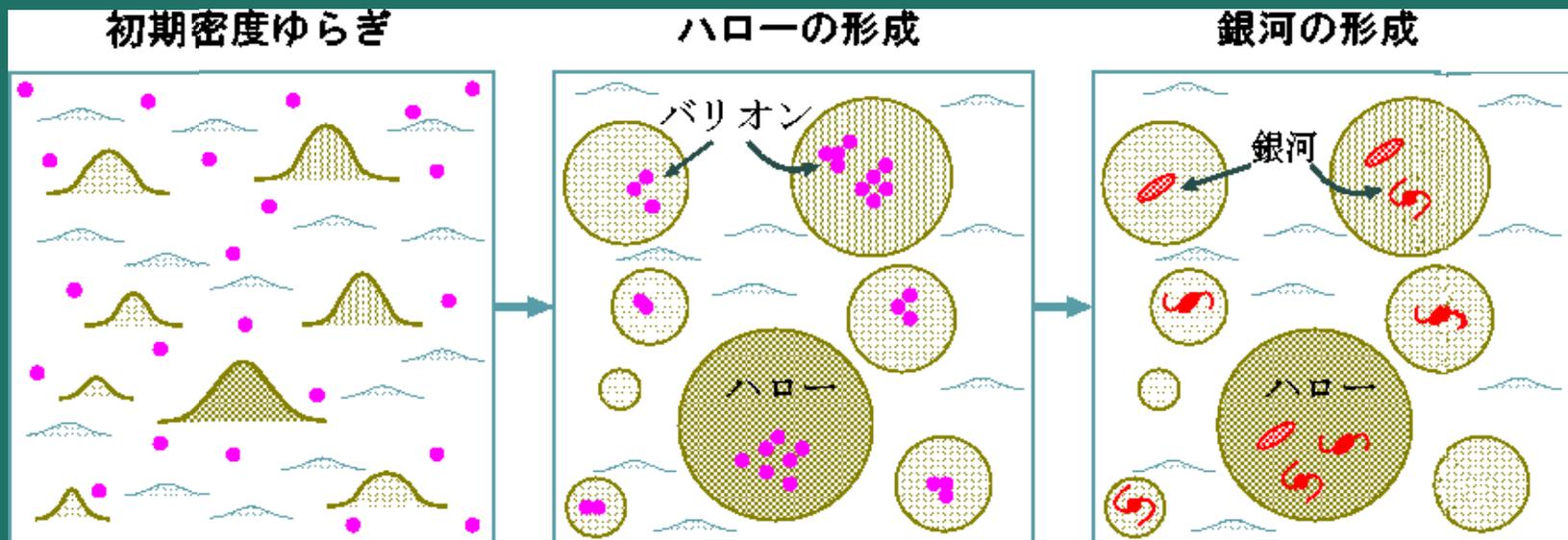
- 観測されている銀河と銀河団の2点相関関数は一桁程度異なる振幅を持つ
- 一般に、天体の空間分布はダークマタ - 分布とは異なると考えるほうが自然

非線形確率的バイアス

- 天体形成の条件は、局所的なダークマタ - の質量密度だけで決まるとは考えられず、非局所的な環境効果、過去の履歴、など複雑な要因を含むはず
一般にはバイアスは複雑な汎関数で記述される

- 線形バイアス(定数): $\delta_{\text{obj}}(\mathbf{r}) = b \delta_{\text{mass}}(\mathbf{r})$
- 非線形(deterministic)バイアス: $\delta_{\text{obj}}(\mathbf{r}) = F[\delta_{\text{mass}}(\mathbf{r})]$
Fは $\delta_{\text{mass}}(\mathbf{r})$ に対する(局所的な)関数
- 非線形確率的バイアス: $\delta_{\text{obj}}(\mathbf{r}) = F[\delta_{\text{mass}}, \mathbf{A}]$
Aは天体形成に関与する種々の変数の総称。 $\delta_{\text{mass}}, \mathbf{A}$ は座標 \mathbf{r} での値とは限らず、Fはそれらの汎関数。

重力不安定による構造形成の描像



重力進化

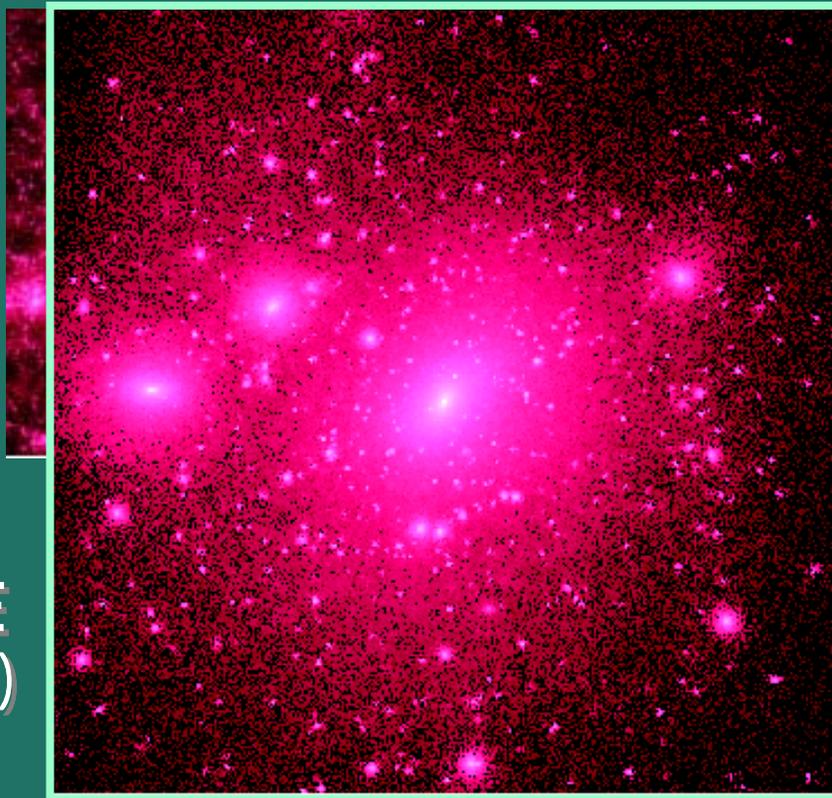
ガスの冷却
輻射過程
星形成進化
...

ダークハロー（ダークマタ
の自己重力系）の形成
が天体形成において最も
基本的な素過程

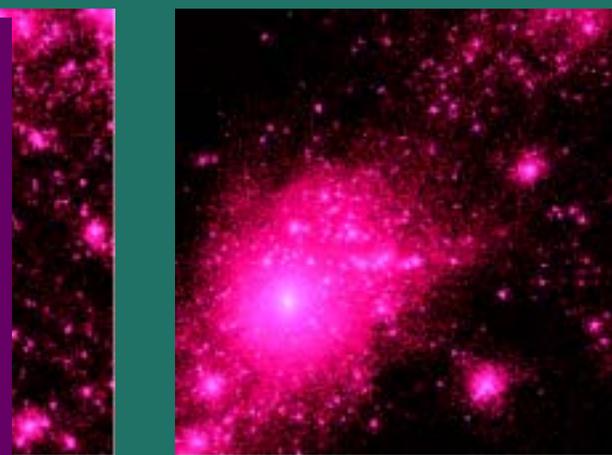
樽家 (2001) 日本物理学会誌

数値シミュレーション:銀河ハロー

■ 冷たい暗黒物質モデルにおける、銀河の形成



現在
($z=0$)



$z=1$

$$\Omega_0 = 0.3, \lambda_0 = 0.7, h = 0.7$$

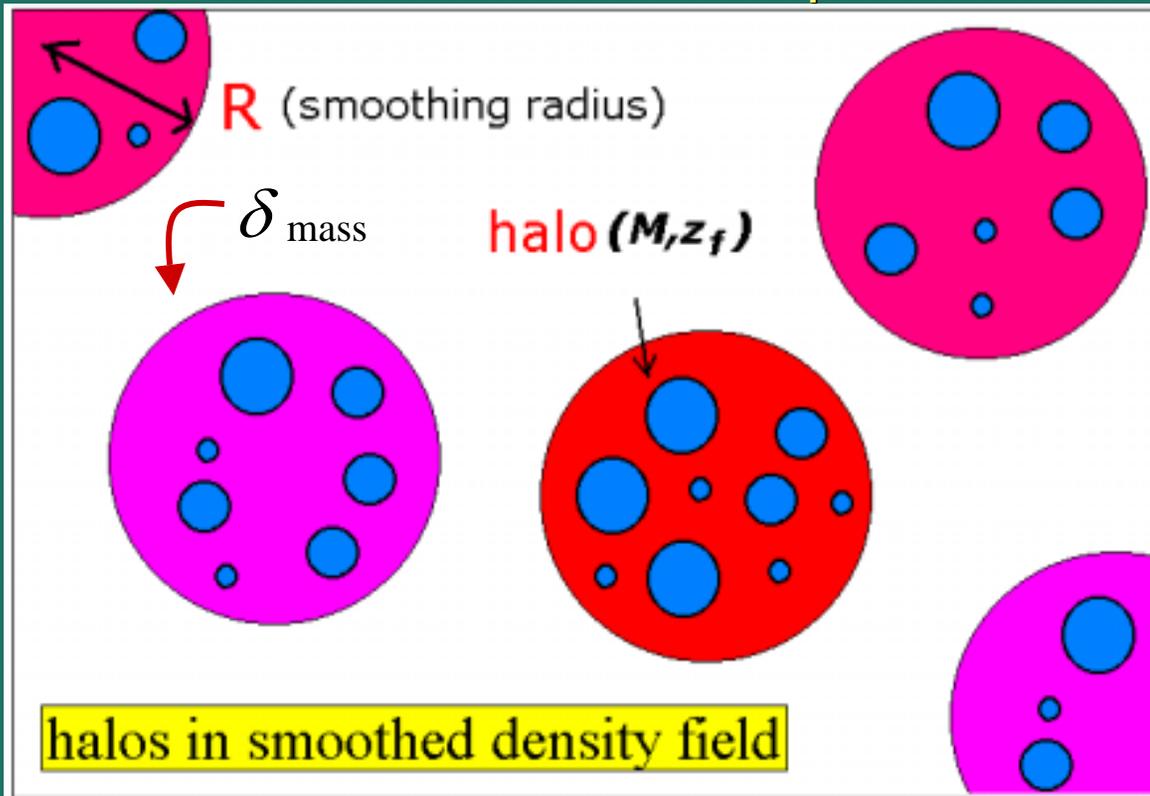
$$M = 5 \times 10^{12} h^{-1} M_{sun}$$

(Jing & Suto 2000)

ダークハローの非線形確率的バイアスモデル

ダークハローバイアスの解析モデル

半径 R の球(ダークマタ - の密度 δ_{mass})内で、形成時刻 z_f に誕生した質量 M のハローの条件付個数密度分布関数を計算。
“隠れた変数” M と z_f によるバイアスの非線形確率性



原始密度ゆらぎがランダムガウシアン統計に従うことを仮定して、非線形重力進化によるハローの宇宙論的形成・合体・進化を解析的にモデル化

(Taruya & Suto 2000)

解析的ハローバイアスモデルの概略

■ ハローの個数密度ゆらぎ(δ_{halo}):

- extended Press-Schechter model (Bower 1991)
- halo bias model (Mo & White 1996)

$$\delta_{\text{halo}} = \Delta_h(R, z | \delta_{\text{mass}}, M, z_f)$$

■ 質量(M)の分布:

- Press-Schechter mass function

$$n(M, z; \delta_c)$$

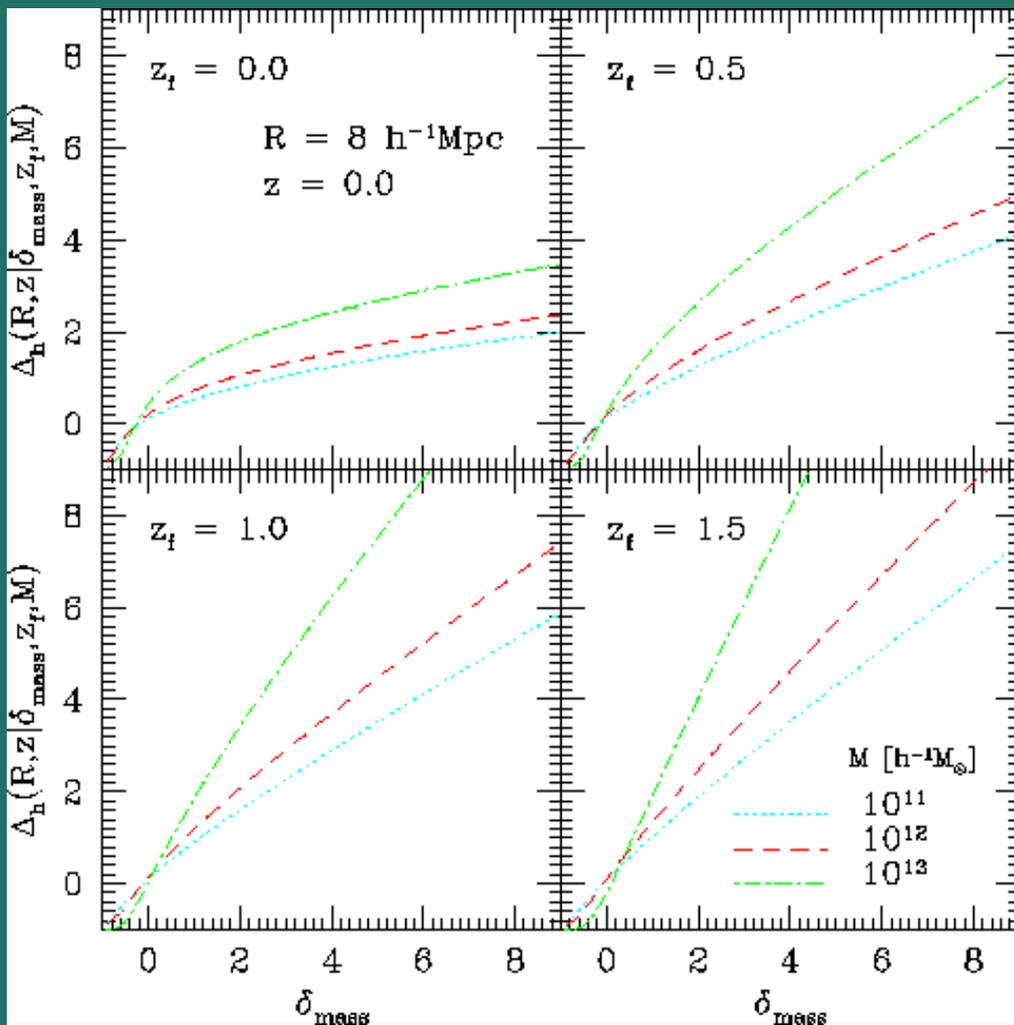
■ 形成時刻(z_f)の分布:

- halo formation epoch distribution (Lacey & Cole 1993; Kitayama et al. 2004)

$$\frac{\partial p}{\partial z_f}(z_f | M, z)$$

原始密度ゆらぎの確率分布関数がランダムガウシアンであることを仮定

ダークハローの個数密度ゆらぎ



■ ハローの密度ゆらぎと質量密度ゆらぎの関係は、ハローの質量・形成時刻に強く依存した非線形性を示す

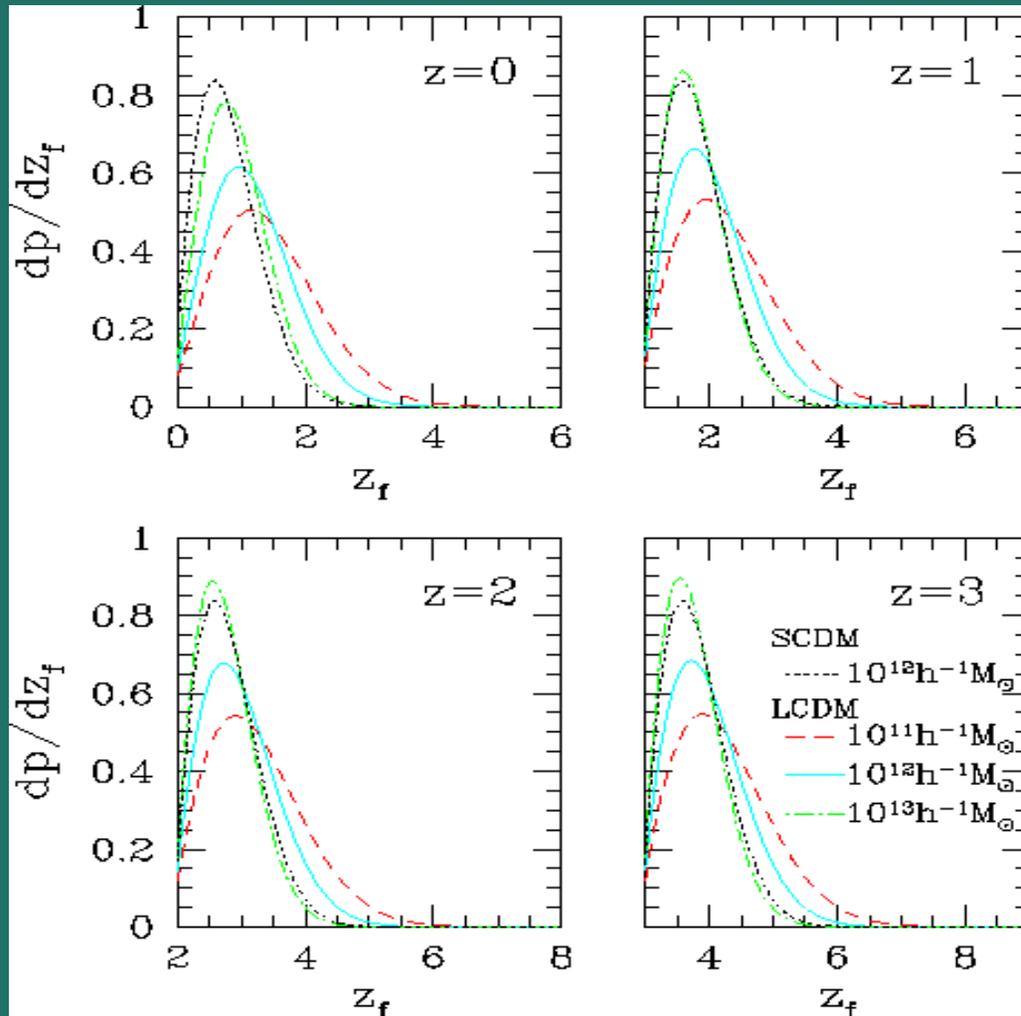
ΛCDM:

$(\Omega_0, \lambda_0, h, \sigma_8) = (0.3, 0.7, 0.7, 1.0)$

(Taruya & Suto 2000)

ダークハローの非線形確率的バイアスモデル

ダークハローの形成時期分布関数



- z に存在するハローの質量が初めて半分になる時期をその形成時期 z_f と定義
- 銀河サイズのハローの場合、
 $z_f \sim z+1$
 にピークを持つ

$(\Omega_0, \lambda_0, h, \sigma_8)$

LCDM: (0.3, 0.7, 0.7, 1.0)

SCDM: (1.0, 0.0, 0.5, 0.6)

(Taruya & Suto 2000)

ハローバイアスの確率分布関数

■ conditional probability distribution

$$P(\delta_{\text{halo}} | \delta_{\text{mass}}) d\delta_{\text{halo}} = \mathcal{N}^{-1} \int \int dM dz_f \frac{\partial p}{\partial z_f}(z_f | M, z) n(M, z) c(M, z_f)$$

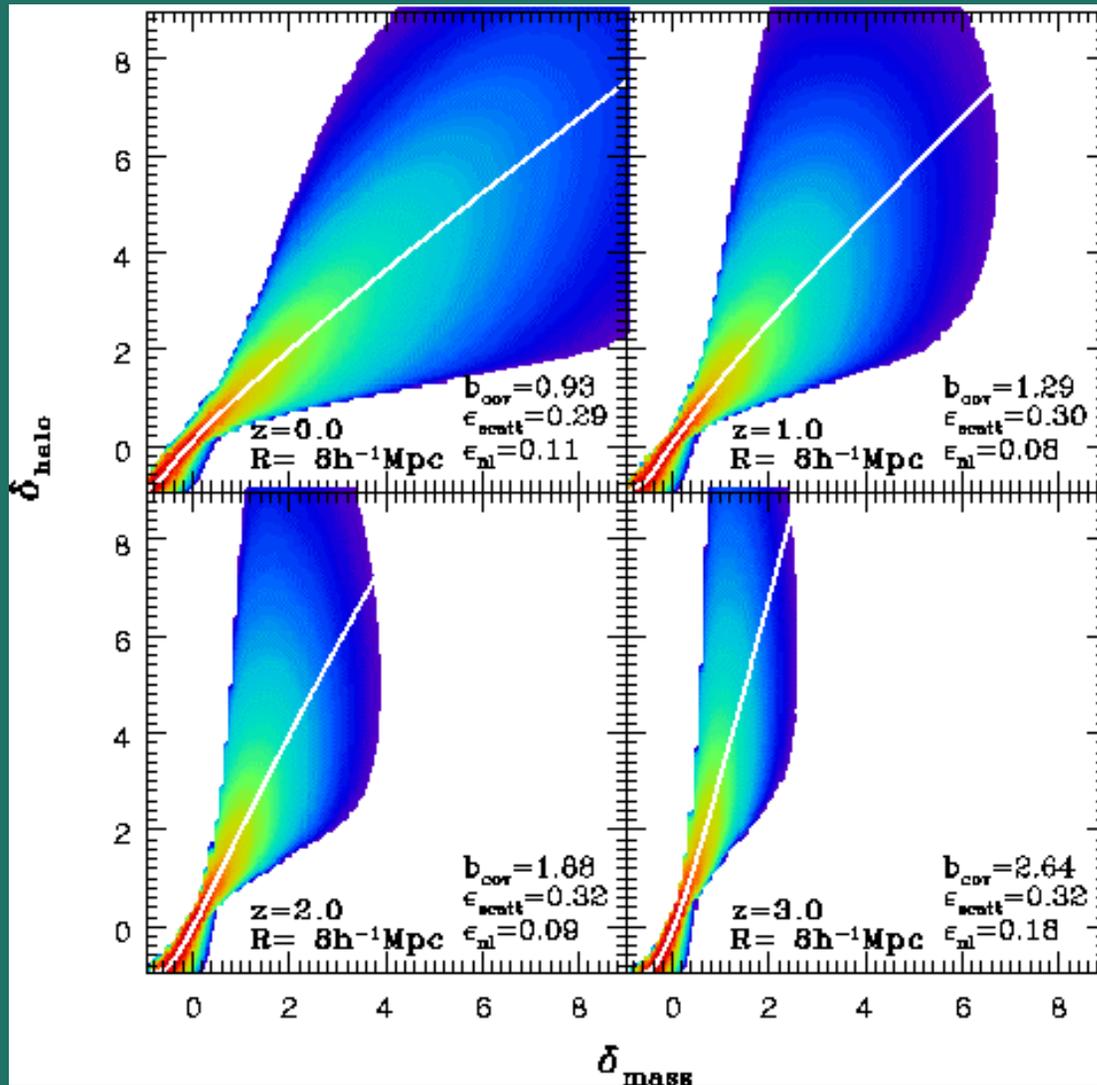
積分条件 $c(M, z_f) = \{M, z_f | \delta_{\text{halo}} \leq \Delta_h(R, z | \delta_{\text{mass}}, M, z_f) \leq \delta_{\text{halo}} + d\delta_{\text{halo}}, M_{\text{min}} \leq M \leq M_{\text{max}}, z \leq z_f \leq \infty\}$

■ joint probability distribution

$$P(\delta_{\text{mass}}, \delta_{\text{halo}}) = P(\delta_{\text{halo}} | \delta_{\text{mass}}) P(\delta_{\text{mass}})$$

Log-normal分布を仮定

確率分布関数 $P(\delta_{\text{halo}}, \delta_{\text{mass}})$ の振る舞い



■ ダークハローの重力進化に関する限り、バイアスの非線形確率性は解析的にモデル化可能

LCDM:

$(\Omega_0, \lambda_0, h, \sigma_8)$

$= (0.3, 0.7, 0.7, 1.0)$

(Taruya & Suto 2000)



ダークハローの非線形確率的バイアスモデル

バイアスの非線形確率性の定量化

■ conditional mean: $\bar{\delta}_{\text{halo}}(\delta_{\text{mass}}) \equiv \int d\delta_{\text{halo}} P(\delta_{\text{halo}} | \delta_{\text{mass}}) \delta_{\text{halo}}$

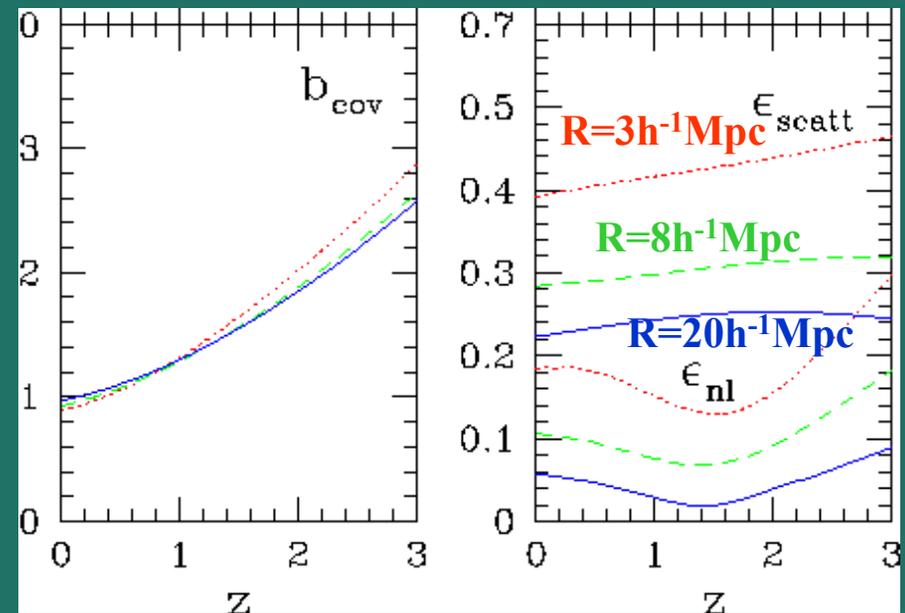
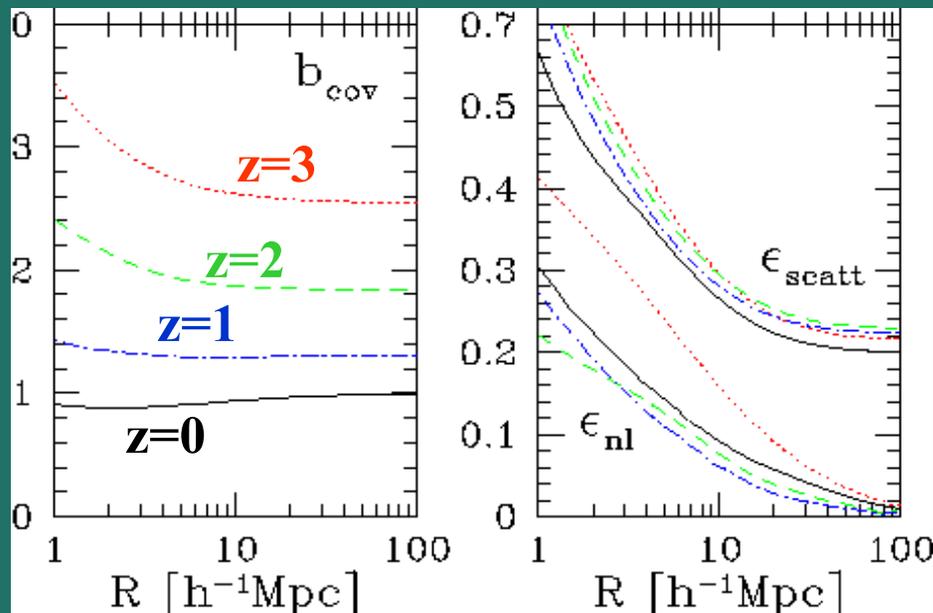
■ degree of nonlinearity: $\epsilon_{\text{nl}}^2 \equiv \frac{\langle \delta_{\text{mass}}^2 \rangle \langle \bar{\delta}_{\text{halo}}^2 \rangle}{\langle \delta_{\text{mass}} \bar{\delta}_{\text{halo}} \rangle} - 1$

■ degree of stochasticity: $\epsilon_{\text{scatt}}^2 \equiv \frac{\langle \delta_{\text{mass}}^2 \rangle \langle (\delta_{\text{halo}} - \bar{\delta}_{\text{halo}})^2 \rangle}{\langle \delta_{\text{mass}} \bar{\delta}_{\text{halo}} \rangle}$

■ linear regression: $\mathbf{b}_{\text{cov}} \equiv \frac{\langle \delta_{\text{mass}} \bar{\delta}_{\text{halo}} \rangle}{\langle \delta_{\text{mass}}^2 \rangle}$

1 点統計バイアスパラメータの理論予言

- バイアスのスケール依存性は比較的弱い
- 一方、時間依存性は強い
- 大スケールになるにつれて、非線形確率性は無視できるようになる



数値シミュレーションの必要性

- 解析的ハローバイアスモデルの妥当性
 - 質量密度ゆらぎの重力非線形成長は現象論的な対数正規分布で近似
 - ハローの定義として球対称モデルを仮定
 - ハローを点粒子であると近似しており、有限サイズに起因する体積排除効果を無視
- ガスの輻射冷却を考慮した場合、ハローバイアスは銀河バイアスの良い近似モデルとなり得るか？

数値シミュレーションの概要

■ cosmological hydrodynamic simulations

- P³M gravity solver + SPH for gas
- CDM: $\Omega_0=0.3$, $\lambda_0=0.7$, $h=0.7$, $\sigma_8=1.0$, $\Omega_b=0.015h^{-2}$
- $N_{\text{DM}}=128^3$, $N_{\text{gas}}=128^3$ in $L_{\text{box}}=75h^{-1}\text{Mpc}$ box
 $m_{\text{DM}}=2.2 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$, $m_{\text{gas}}=2.4 \times 10^9 M_{\text{sun}}$

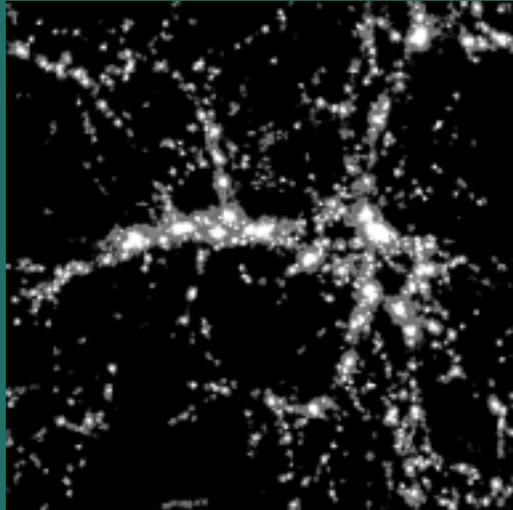
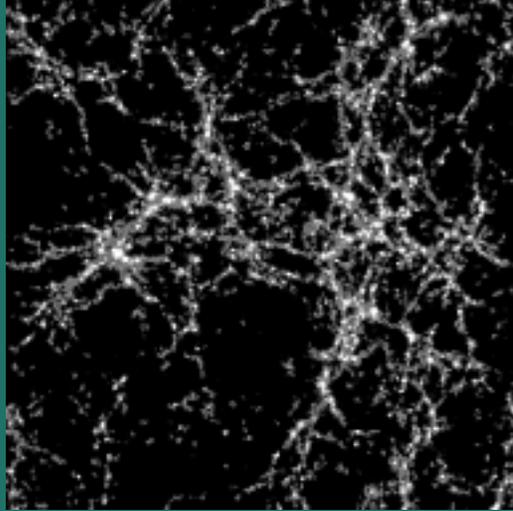
■ friend-of-friend法でハロー・銀河を同定

- **ハロー**: $M_{\text{halo}}=(10^{12} \sim 10^{14})M_{\text{sun}}$
 $\delta_{\text{halo}} > \Delta_{\text{vir}}(z) \sim 18\pi^2\Omega(z)^{-0.6}$
- **“銀河”** (cold gas clumps): $M_{\text{gal}}=(10^{11} \sim 10^{12})M_{\text{sun}}$
Jeans条件、 $\rho_{\text{gas}} > 100\rho_b(z)$ 、 $\delta_{\text{gal}} > 180\pi^2\Omega_0(1+z)^{-3}$

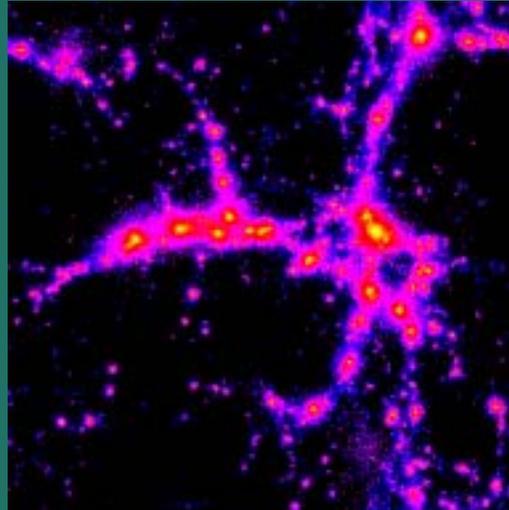
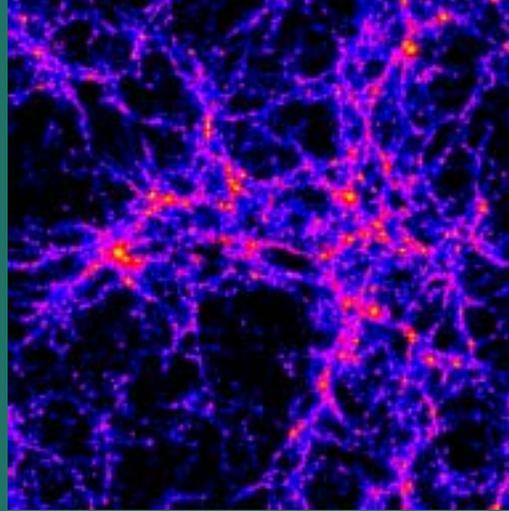
(Yoshikawa, Jing & Suto 2000; Yoshikawa, Taruya, Jing & Suto 2001)

質量分布とガス分布の進化

ダークマター



バリオンガス



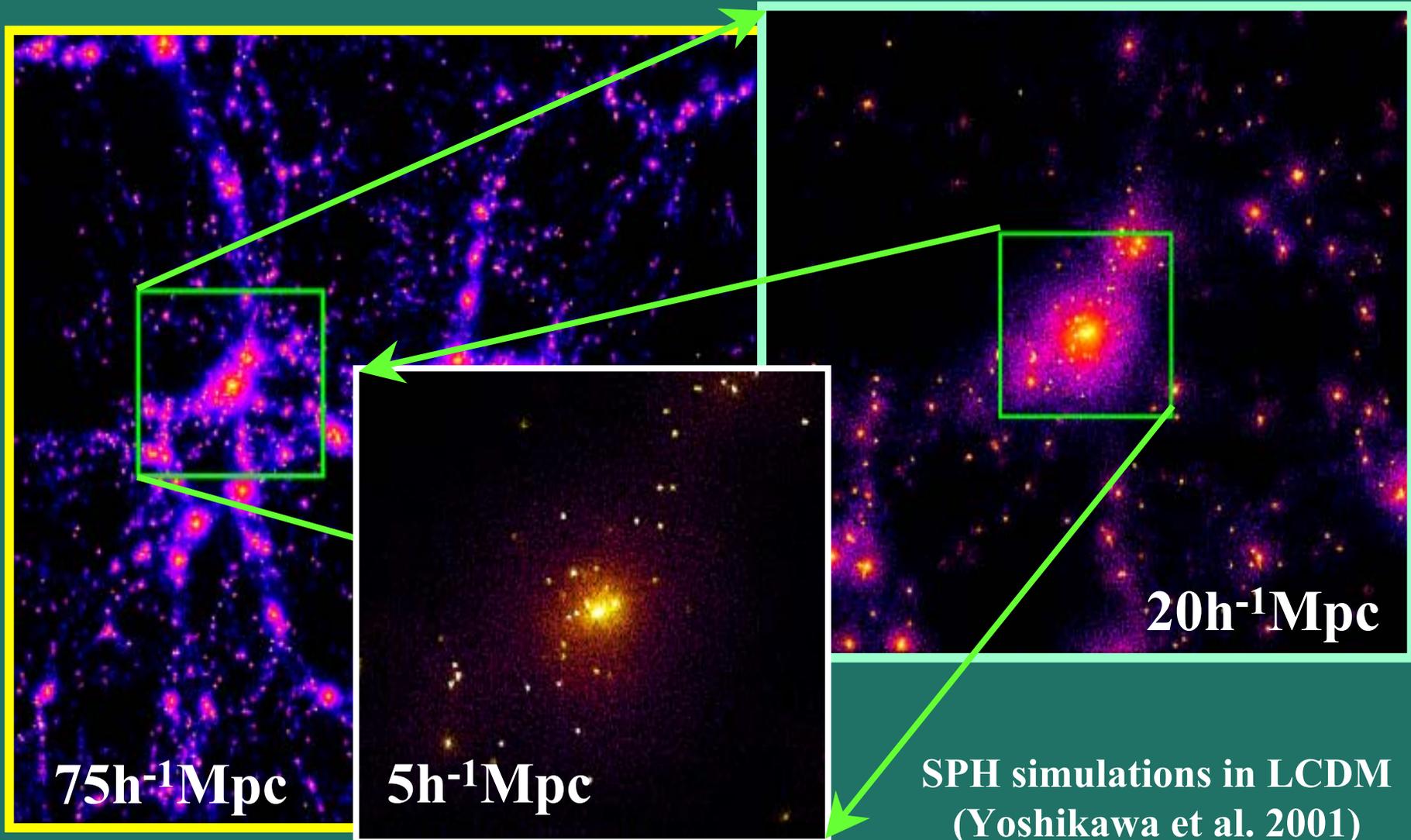
$z=2$

$z=0$

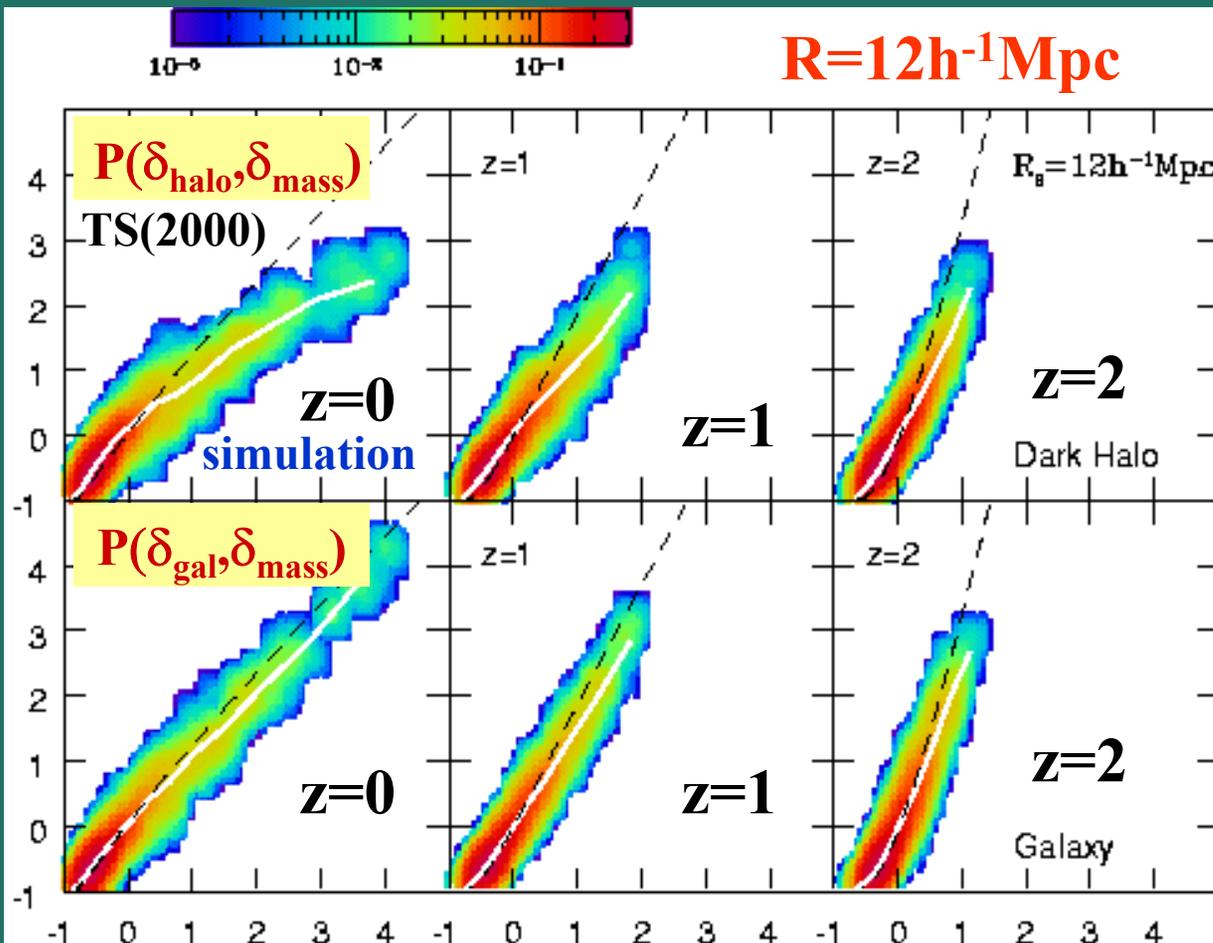
- 高温ガスは、複数の小スケールのダークマターの構造 (~ 低温ガスの塊を含む) を包み込むようにより広がった分布を示す

LCDM: $75 \times 75 \times 15 \text{ h}^{-3} \text{Mpc}^3$
(Yoshikawa et al. 2001)

Zooming in the simulated structure

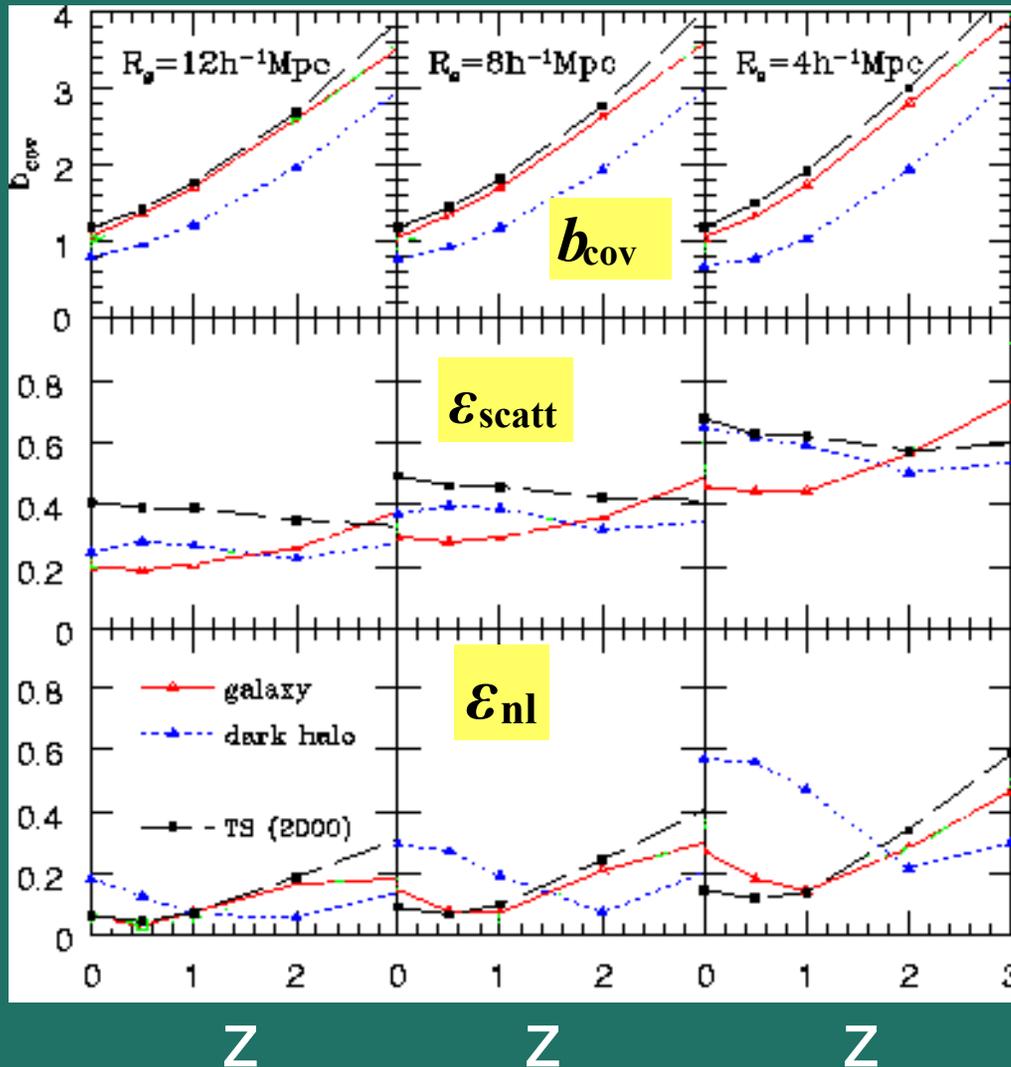


確率分布関数の比較



- ハローに対しては、有限体積の効果でバイアスは理論予言よりも系統的に小さめになる。
- 銀河に対しては、この効果は比較的小さく、理論予言との一致が良い。

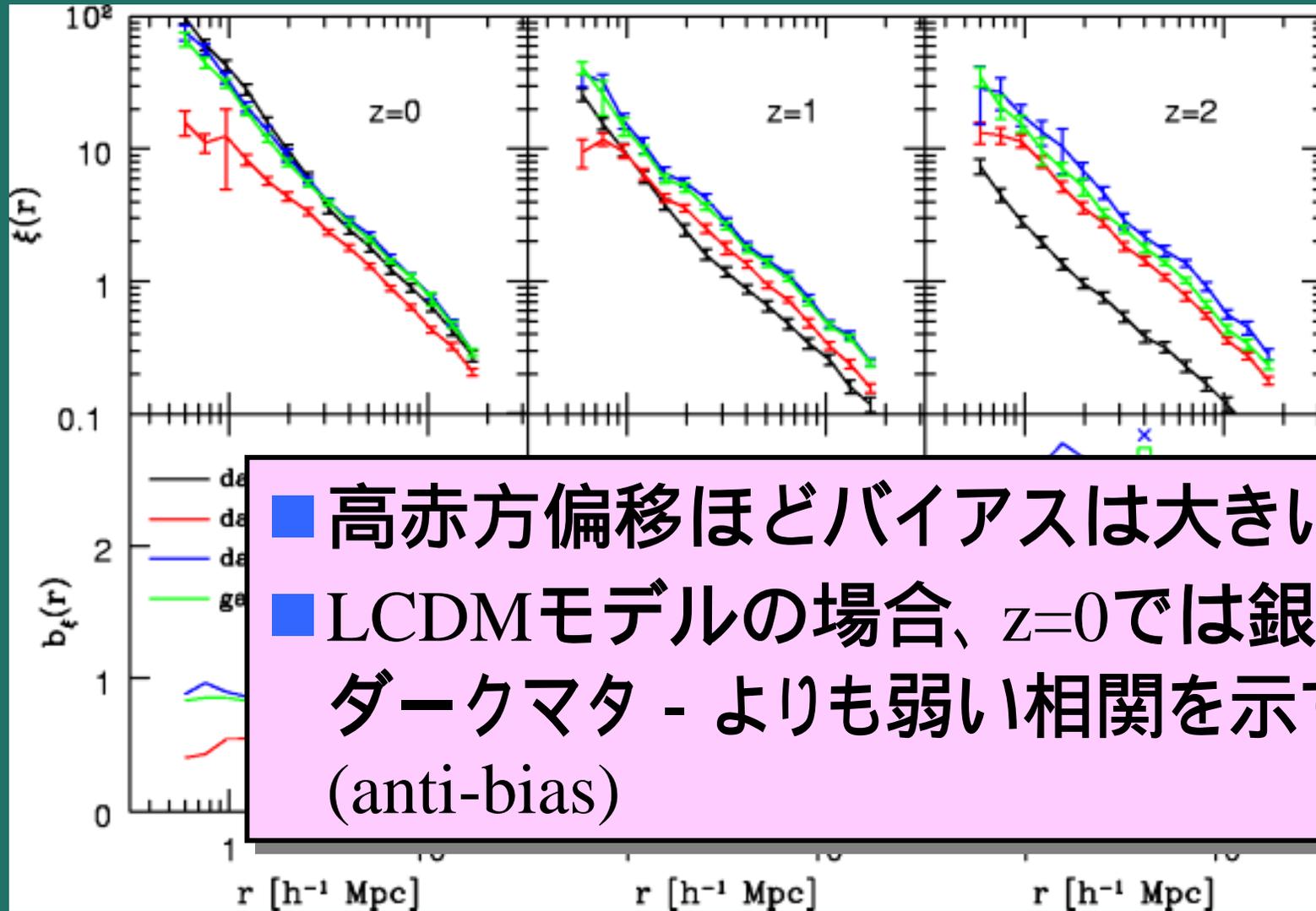
1点統計におけるバイアスパラメータ



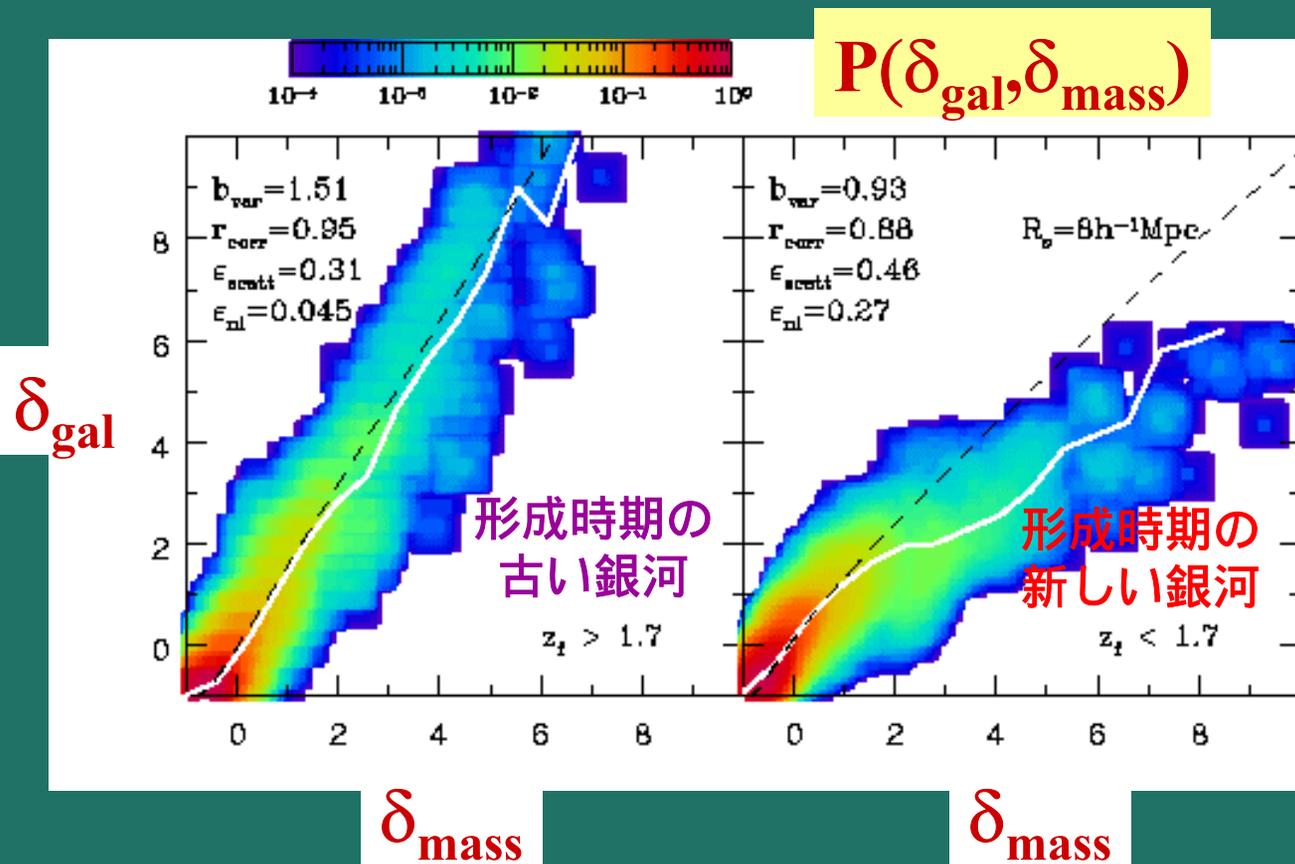
■ 非線形確率的ハローバイアスに対する解析的モデル(Taruya & Suto 2000)は、有限体積の効果が重要でない銀河スケールの天体に対して、むしろ良い現象論的近似を与えている。

Yoshikawa, Taruya,
Jing & Suto (2001)

2点相関関数に対するバイアス



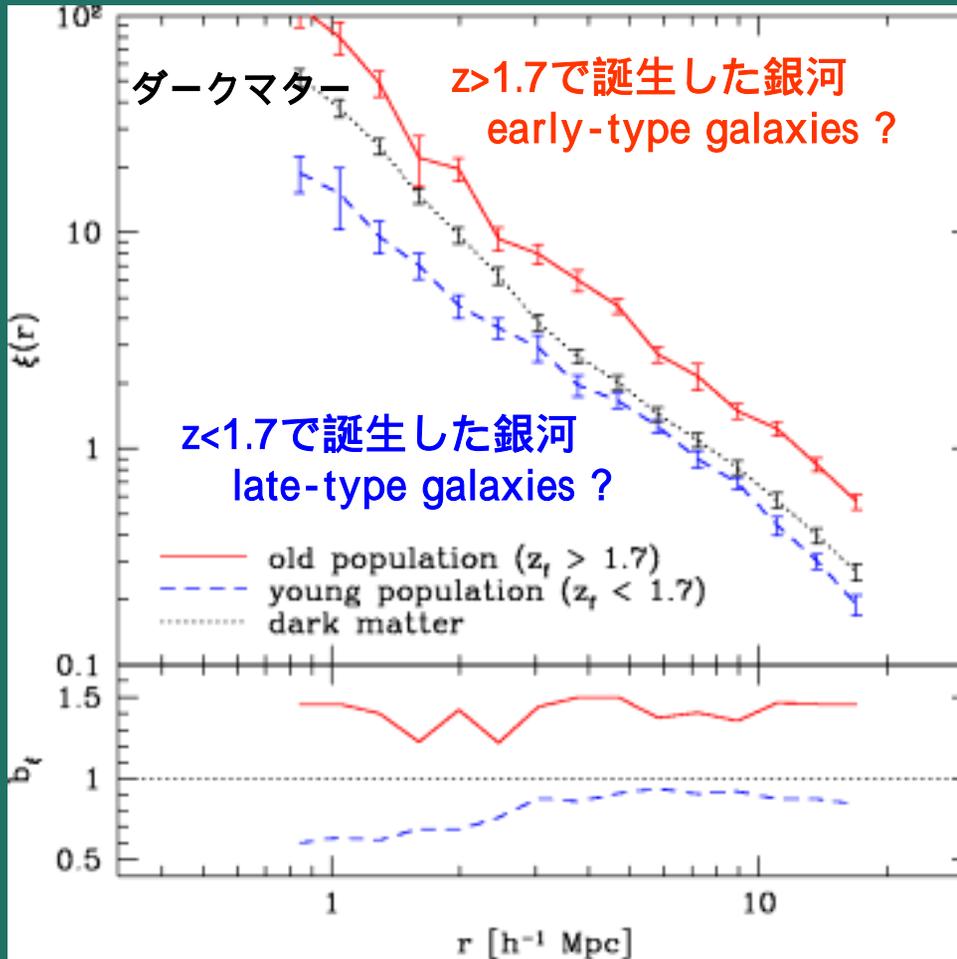
シミュレーション銀河の密度形態関係



- 形成時期が古いほど、バイアスの値が大きい
- 特に、高赤方偏移で生まれた銀河は、ハローバイアスの解析モデルの予言を良く再現

Yoshikawa, Taruya, Jing & Suto (2001)

銀河の形成時期とバイアスの違い



- 高赤方偏移で形成された銀河ほど強いバイアスを持つ
- 最近誕生した銀河はむしろ高密度領域を避ける傾向にある

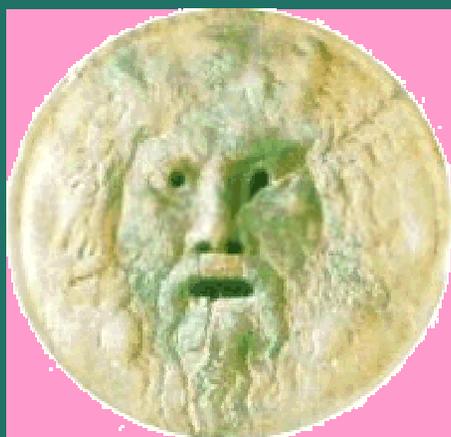
Yoshikawa, Taruya, Jing & Suto (2001)

ジーナス統計の宇宙論的応用

- **ジーナス**: 等密度面における
(穴の数) - (孤立した領域の数)



$$G = 0 - 9 = -9$$



$$G = 5 - 1 = 4$$

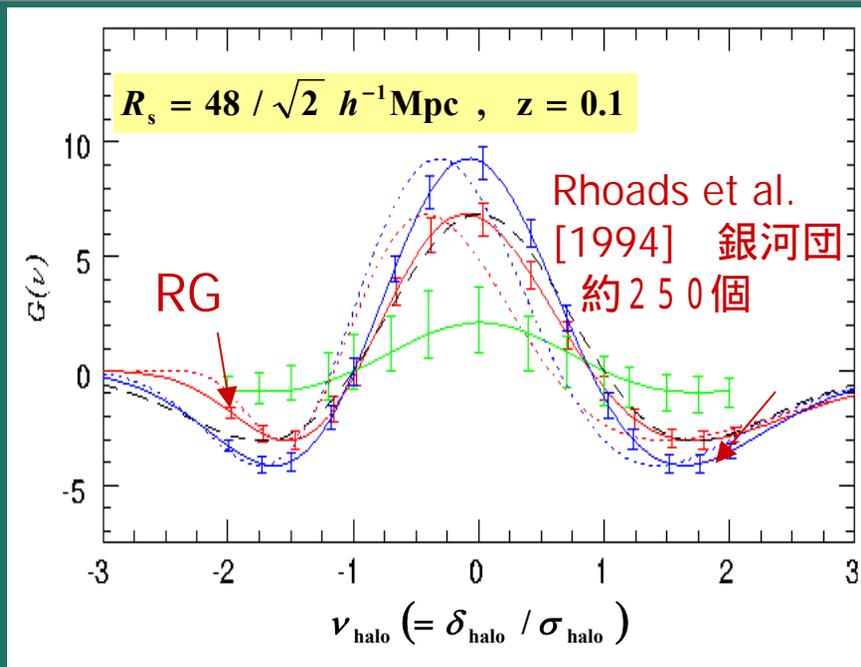


$$G = 0 - 3 = -3$$

日影千秋: 東京大学修士論文(2001)

銀河団に対するジーナス統計

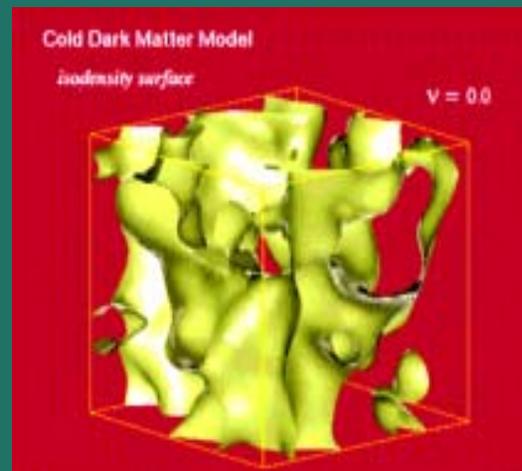
- 非線形重力進化による影響
- ダークハローの非線形バイアスモデルを銀河団に適用



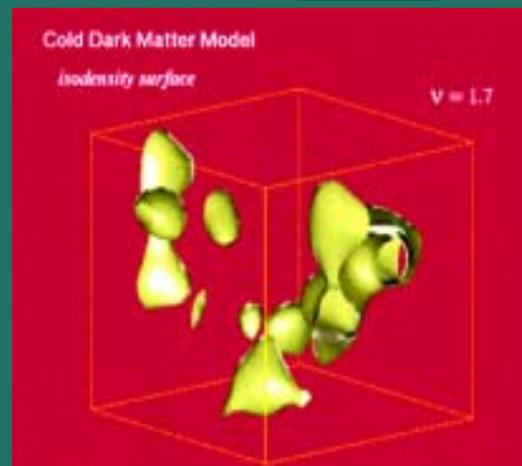
Hikage, Taruya & Suto (2001)

ダークハローの非線形確率的バイアスモデル

$G > 0$ $v = 0.0$



$G < 0$ $v = 1.7$



[Matsubara & Suto 1996]

まとめ

- ダークハローの非線形確率的バイアスに関する解析的モデルを構築（現時点では唯一の物理的バイアスモデル）
- 銀河団スケールのハローに対しては、バイアスを大きめに予言するが、銀河スケールのハローについては、解析的モデル予言はシミュレーション結果をそれなりに良く再現する
- 有限体積効果の考慮、2点統計への応用など残された課題はいくつかあるが、バイアスの理解に対する第一ステップの近似理論として有用