

The VIMOS VLT Deep Survey

Testing the gravitational instability paradigm at $z \sim 1$

Marinoni, C et al.
2008A&A...487....7M

2011/6/21 => 7/5

第111回雑誌会

馬渡健 (M2)

Abstract

- VVDS-Deep surveyから $z=0.4\sim 1.5$ にわたる 3次元銀河密度マップをreconstruct
- マップから $10h^{-1}$ スケールの銀河PDFを構築、2次・3次モーメントの抽出(それぞれ構造形成における線形効果と二次の非線形効果に対応)
- PDFの2次・3次モーメントの $z=1.5\rightarrow 0$ の進化は、重力不安定性をエンジンとする非線形構造形成理論の予測と一致 = “Gravitational Instability Paradigm(GIP)”
- localの大規模構造をよく説明できるGIPが9Gyr前まで遡って矛盾しないことを初めて実証した
- 非線形効果はやっぱり必要

キーワード

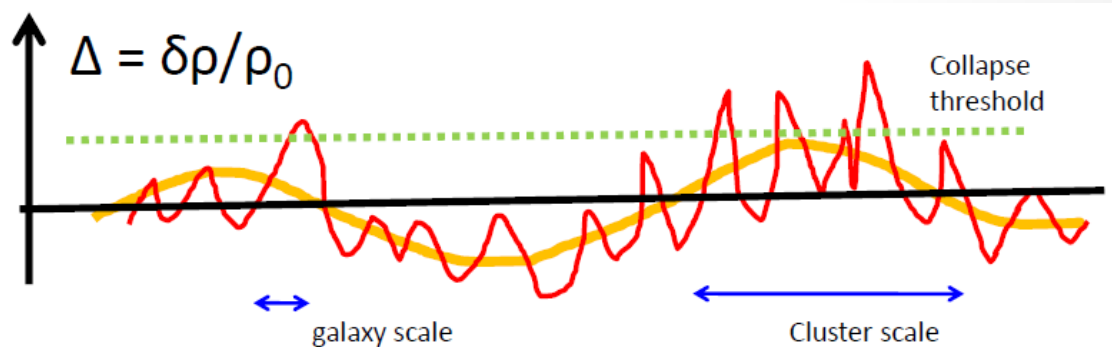
・ 構造形成

：「質量(ダークマター)密度ゆらぎの密な部分ではゆらぎの重力収縮が宇宙膨張に打ち勝ち、質量密度ゆらぎの成長

=>質量密度ゆらぎのpeakがあるしきい値を超えると銀河が形成される」

という描像

※ $\rho = \bar{\rho}(1 + \delta)$ の時、
 δ の何次まで考えるか？
一次 => linear
二次以上 => non-linear



・ 大規模構造

：銀河、銀河団、ボイドでトレースされる宇宙規模の質量（銀河）むらむら

Redshift $z=18.3$ ($t = 0.21$ Gyr)

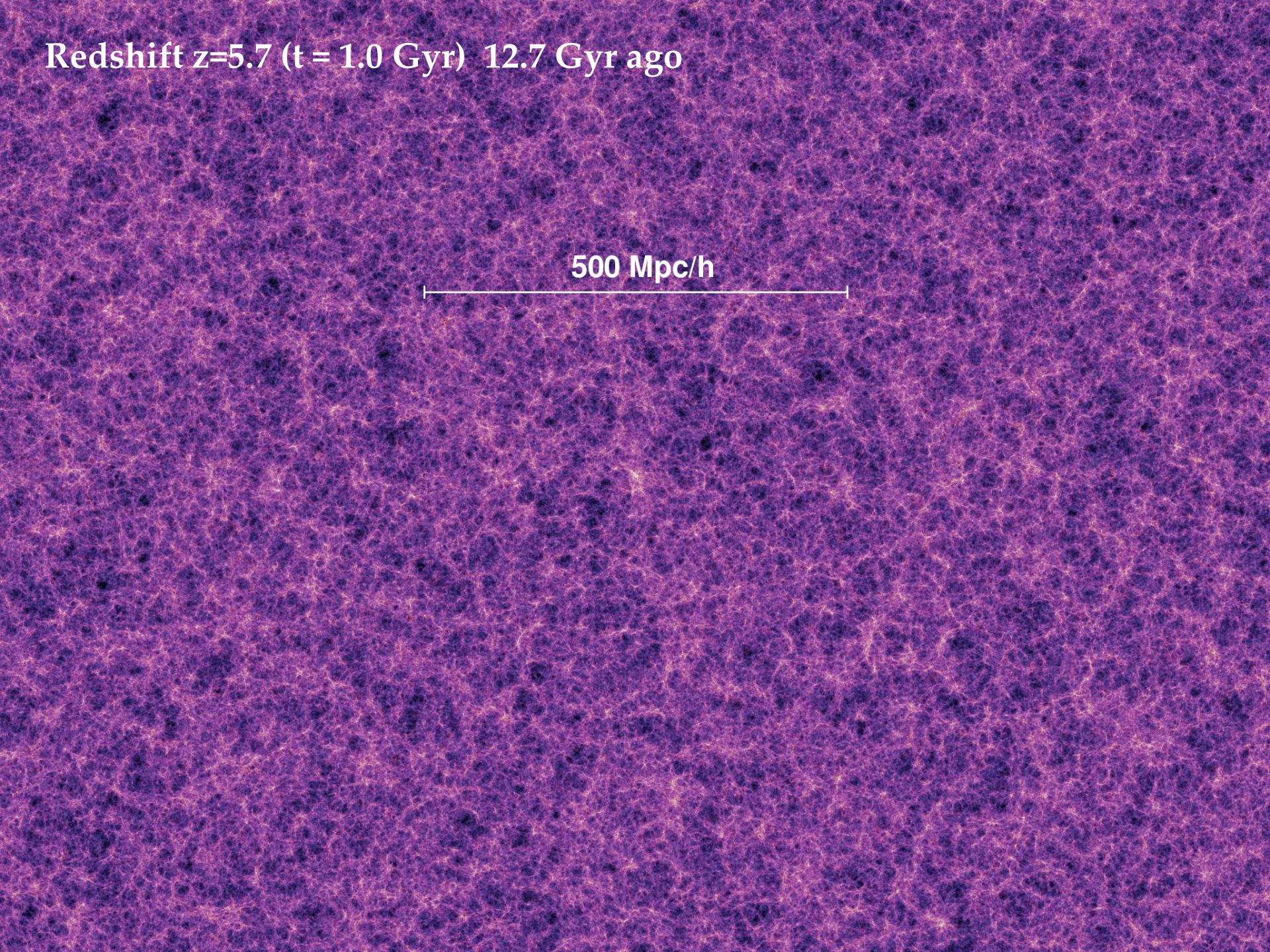
13.5 Gyr ago

500 Mpc/h



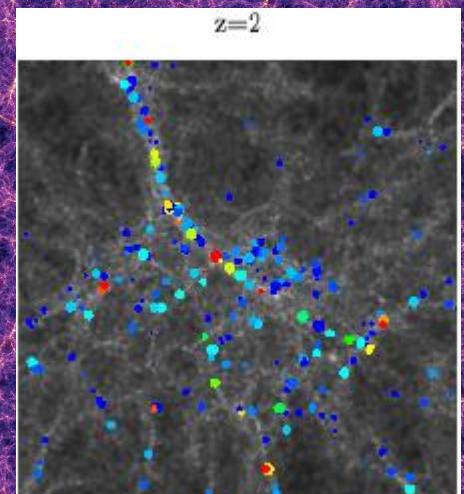
Redshift $z=5.7$ ($t = 1.0$ Gyr) 12.7 Gyr ago

500 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at redshift $z=5.7$, showing a dense network of dark matter filaments and clusters. The filaments are represented by a complex, interconnected web of purple and blue lines, with brighter yellow and orange spots indicating regions of higher density or galaxy clusters. A horizontal scale bar with vertical end-caps is positioned in the upper-middle part of the image, labeled "500 Mpc/h".

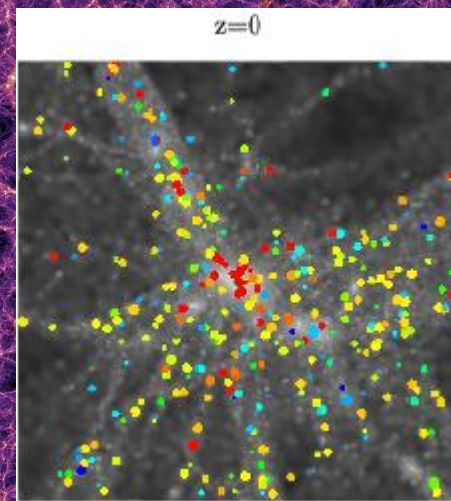
Redshift $z=1.4$ ($t = 4.7$ Gyr) 9 Gyr ago

500 Mpc/h



Redshift $z \sim 0$ ($t = 13.6$ Gyr) 0.1 Gyr ago

500 Mpc/h



キーワード

• バイアス

：質量ゆらぎに対して銀河数密度ゆらぎは偏って(バイアスされて)いる

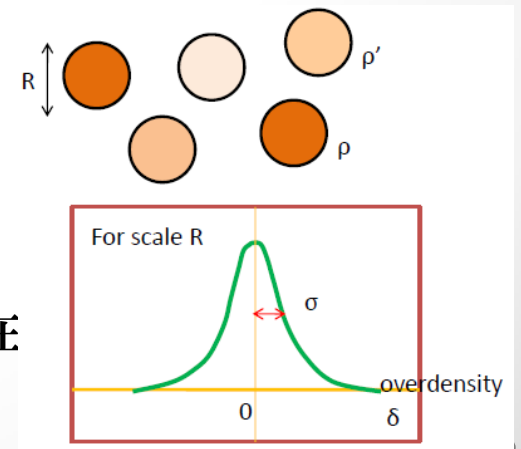
$$\Rightarrow \delta_{gal} = \underline{b(z, R, \delta_{mass}?) \times \delta_{mass}} \quad , \quad (\text{with } \delta = \frac{\rho(z, R) - \overline{\rho(z, R)}}{\overline{\rho(z, R)}} \text{ ; 密度超過})$$

[linear bias - $b(z, R)$, independent of δ_{mass}
non-linear bias - $b(z, R, \delta_{mass})$, or $\delta_{gal} = \text{func}(\delta_{mass})$

$$\text{e.g. } \delta_{gal} = b_0 + b_1 \delta_{mass} + \frac{b_2}{2} \delta_{mass}^2$$

• 確率分布関数 (Probability Distribution Function ; PDF)

：あるスケール(R)の球の密度(ρ)を考えたとき
平均($\bar{\rho}$)からの超過(δ)が
($\delta, \delta+d\delta$)の範囲の存在する確率分布



mass PDF => シミュレーションとあう解析的な式が存在

galaxy PDF => サーベイ結果からreconstruct

Redshift sample from VVDS-Deep survey

VLT(Very Large Telescope@チリ)/VIMOS(multi object spectrograph)によるredshiftサーベイ

VVDS-02h-4 sample

galaxy 3D mapの
reconstructionの際
のみ使用

flux-limited($17.5 \leq I \leq 24$)

FoV= $0.4 \times 0.4 \text{ deg}^2$

$0.4 < z < 1.5$

3001 galaxies

VVDS-02h-4 sub-samples

galaxy PDF
reconstruction以下
大体こちらを使用
メインサンプル

volume-limited sample

$M_B < -20 + \log h$

redshiftで2サンプルに区分

: $0.7 < z < 1.1$ sample

$1.1 < z < 1.5$ sample

galaxy 3D density map

- Density reconstruction method

$$\rho(\mathbf{r}, R, < \mathcal{M}_c) = \sum_i \frac{\int_0^\infty \delta^D(u - |\Delta \mathbf{r}_i|/R) F(u) du}{S(r_i, \mathcal{M}_c) \Phi(m) \zeta(r_i, m) \Psi(\alpha, \delta)} \quad \text{with} \quad F(u) = (2\pi R^2)^{-3/2} \exp\left[-\frac{1}{2}u^2\right]$$

※ $R \Rightarrow \rho$ 求める際に考える密度ゆらぎのスケール

$\vec{r} \Rightarrow$ 考える密度ゆらぎの位置。 $|\vec{r}| \Leftrightarrow z$ 対応

(分子) $\Rightarrow$ 離散的な銀河分布をgaussian(smoothing factor= R)でなまし
連続的な 3 次元密度場に焼き直し

(分母) $\Rightarrow$ 観測バイアスの補正項

S : distant dependent selection function

$\rightarrow$ LF使って擬似的にvolume-limitedサンプル($M = -15 + 5 \log h$)にする

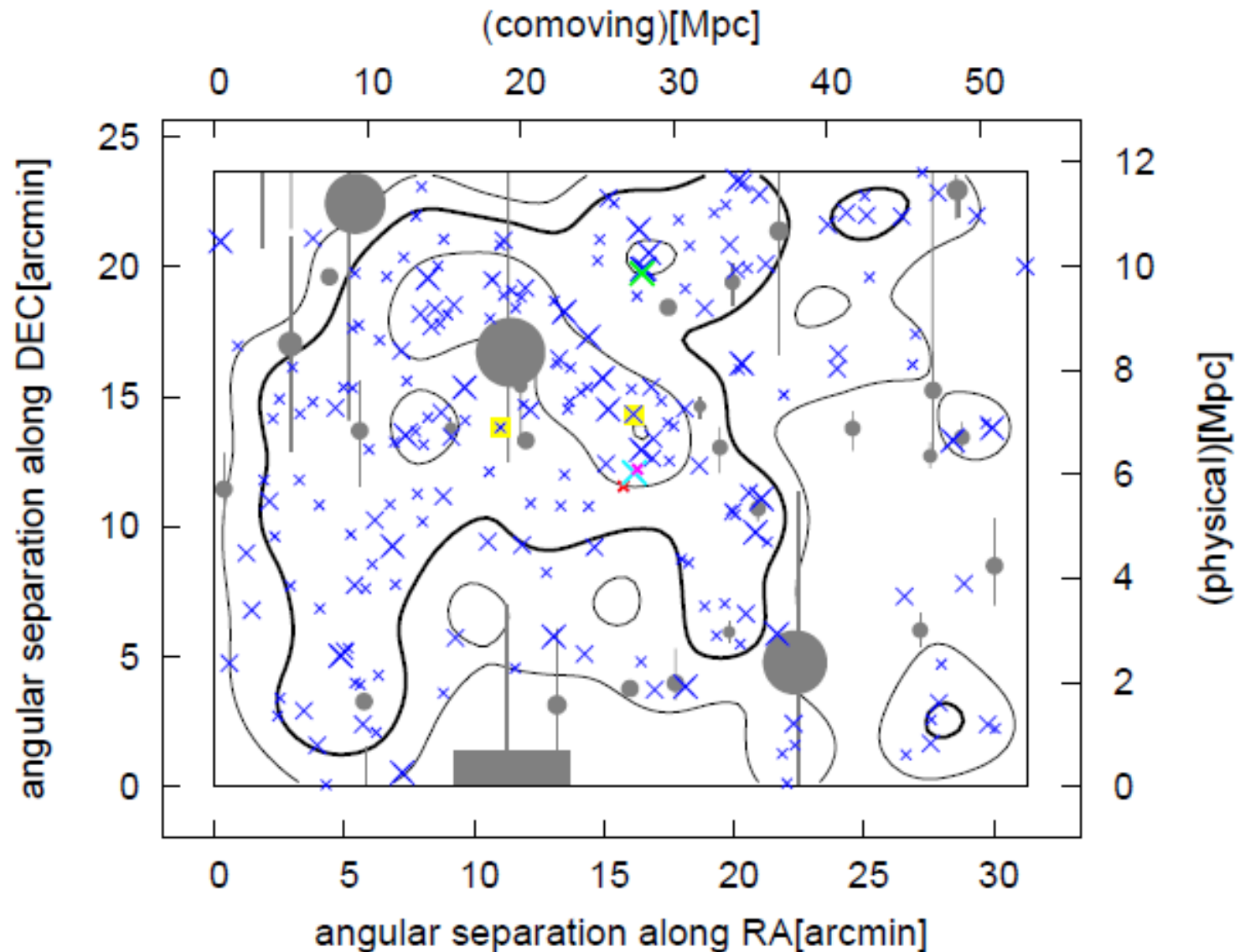
Φ : スリット置き方の装置的なバイアスが測光に及ぼす影響

ζ : 分光redshift決定の成功率

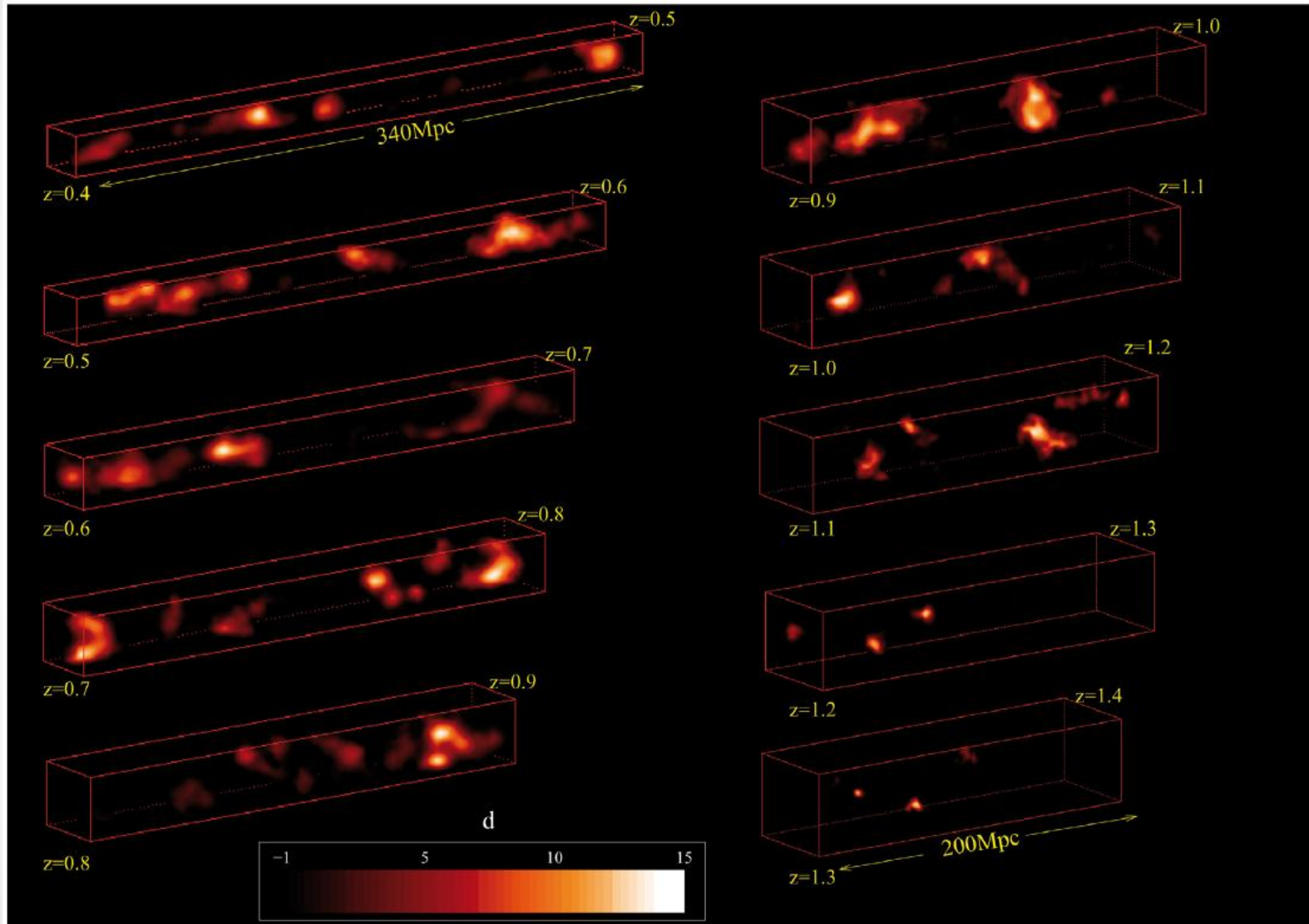
Ψ : サンプリング・レート

-17.5 < l < 24 の天体全て分光してるわけじゃない。 ~30%

- gaussianなましによる密度場構築の一例(2D, 53W002F)



galaxy 3D density map : A cosmographical tour



- smoothing factor $R=2h^{-1}Mpc$

galaxy 3D density map : A cosmographical tour

- 3D mapからの定性的な議論

(1) 割と昔($z \sim 1$?)まで現在の大規模構造とよく似たものが見えている

: 構造のサイズやコントラストなど。特に高密領域が $\sim 100h^{-1}\text{Mpc}$ の voidにより high- z まで規則的にseparateされているのはおもしろい

=> $z=1.5$ (宇宙年齢の30%)にはすでに今と大差ない大規模構造が形成されていた

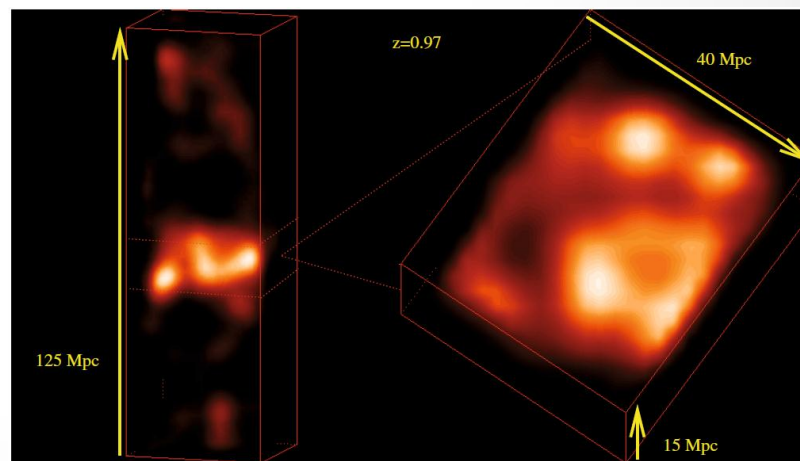
(2) dense “wall” at $z=0.97$ (total 164 galaxies)

: localで一番大きい構造と同じくらい

同程度のmass密度超過の $z=0.97$ における存在確率は $z=0$ の $1/4$

+ survey volume内の期待値は0.2個

=> 銀河biasが赤方偏移と正の相関という示唆



Evolution of the PDFs of galaxy fluctuations

- galaxy PDF reconstruction : observational

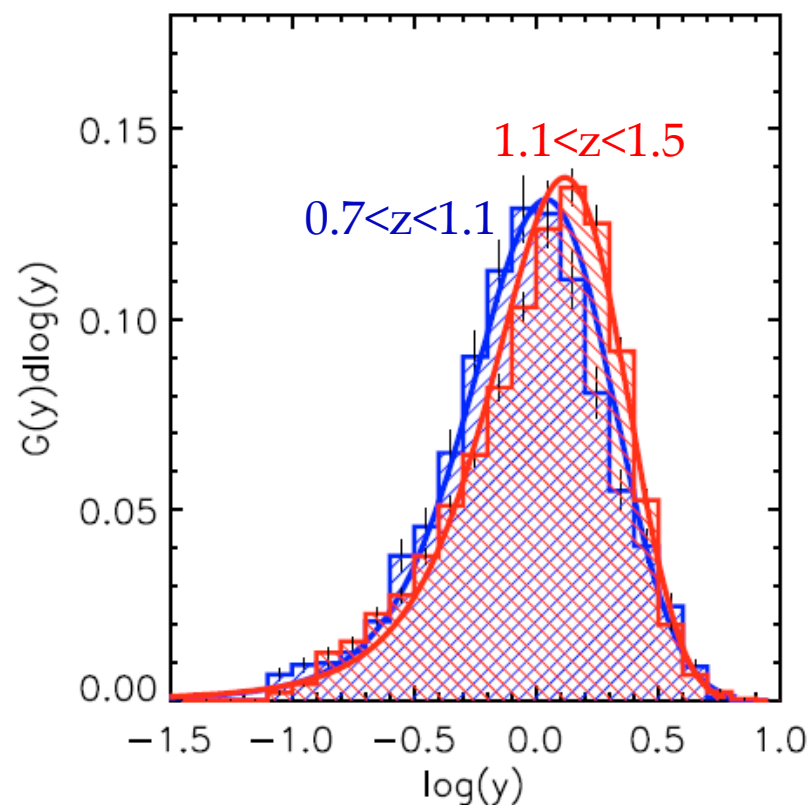
Volume limited sub-samples ($M_B < -20 + 5 \log h$) is used.

scale = $10h^{-1} \text{Mpc}$ = smoothing factor

この後はずっと固定

- PDF peak が low- z で
low-dense 側にシフト
- low- z サンプルのPDFの方がより
広がった low-density tail

⇒ 時間と共に void が占める体積が
増えていくという GIP を反映
していると解釈するのが自然



$$y = 1 + \delta = \rho_g / \bar{\rho}$$

Expected PDF of mass fluctuations

- mass PDF reconstruction : (semi-)theoretical
hierarchicalモデルにおける数値シミュレーションが支持する
mass PDFの形

$$\Rightarrow f_R(\delta) = \frac{(2\pi\omega_R^2)^{-1/2}}{1+\delta} \exp\left\{-\frac{[\ln(1+\delta) + \omega_R^2/2]^2}{2\omega_R^2}\right\} \quad \text{with} \quad \omega_R^2 = \ln[1 + \langle\delta^2\rangle_R]$$

$\sigma_R^2 \equiv \langle\delta^2\rangle_R$: ゆらぎ成長のlinear効果を反映
(という仮定?)

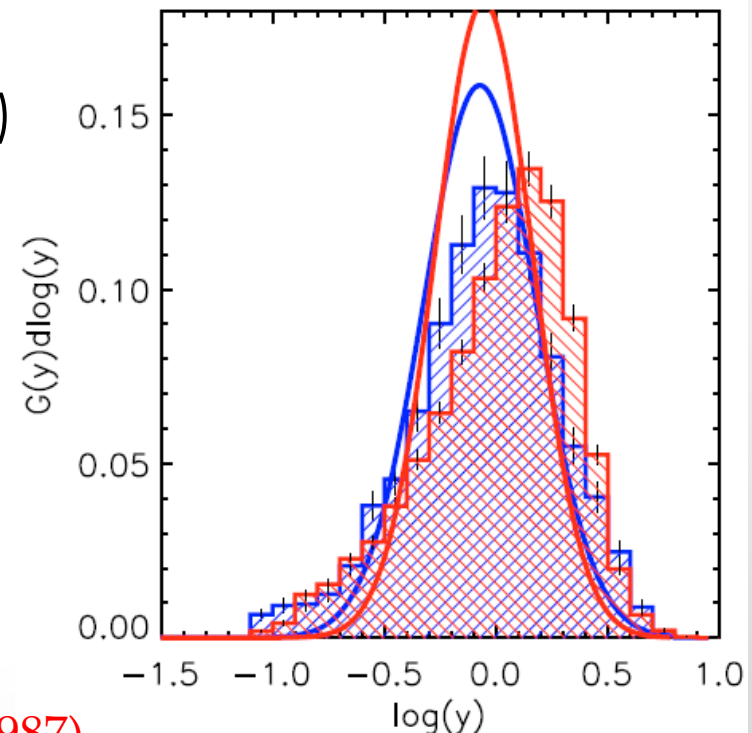
$$\Rightarrow \sigma_R(z) = \sigma_R(0)D(z)$$

with $\begin{cases} D(z) = \exp\left[-\int_0^z f(z) d\ln(1+z)\right] \\ f(z) \sim \Omega_m^\gamma(z) \quad (\gamma \simeq 0.55) \end{cases}$

- Real-space $\Rightarrow$ z-space

$$\sigma_R^z(z) = p(z)\sigma_R(z)$$

$$p(z) = \left[1 + \frac{2}{3}f(z) + \frac{1}{5}f^2(z)\right]^{1/2} \quad (\text{Kaiser 1987})$$



Evolution and non-linearity of biasing

- Estimate bias from PDF of mass and galaxy

$\delta_g = b(z, \delta, R)\delta$: definition of bias in this paper



$g(\delta_g)d\delta_g = f(\delta)d\delta$ (確率保存)という条件の下、数値的に解く
 $g(\delta_g)$: galaxy PDF, $f(\delta)$: mass PDF

numerical solution $b(z, \delta, R)$



analytically approximated only to 2nd order

$$\delta_g(\delta) = \sum_{k=0}^n \frac{b_k(z)}{k!} \delta^k \cong \underline{b_0 + b_1\delta + \frac{b_2}{2}\delta^2} = b_0 + \left(b_1 + \frac{b_2}{2}\delta\right)\delta$$

Table 2. Best fitting parameters of the non linear biasing models given in Eqs. (34) and (35). Errors do not include cosmic variance.

R $h^{-1}\text{Mpc}$	Redshift range	$\mathcal{M}_B^c$	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2
10	$0.7 < z < 0.9$	-20	0.21 ± 0.03	1.33 ± 0.10	1.45 ± 0.16	-0.22 ± 0.04	0.18 ± 0.06	1.26 ± 0.11	-0.28 ± 0.10
	$0.9 < z < 1.1$		0.18 ± 0.04	1.51 ± 0.15	1.38 ± 0.16	-0.13 ± 0.03	0.20 ± 0.08	1.36 ± 0.14	-0.26 ± 0.08
	$1.1 < z < 1.3$		0.38 ± 0.04	1.37 ± 0.17	1.50 ± 0.15	-0.13 ± 0.03	0.37 ± 0.10	1.50 ± 0.14	-0.26 ± 0.08
	$1.3 < z < 1.5$		0.22 ± 0.05	1.76 ± 0.20	1.83 ± 0.16	-0.18 ± 0.03	0.33 ± 0.12	1.73 ± 0.17	-0.34 ± 0.08

Evolution and non-linearity of biasing

- non-linear biasing(b_2)

average over the redshift range $0.7 < z < 1.5$

$$\Rightarrow \left\langle \frac{b_2}{b_1} \right\rangle = -0.19 \pm 0.04$$

：biasの度合いは下敷きとなるmassの量に依存 (non-linear)
Cappi+08など同サンプル用いたN体相関関数解析の結果とも一致

- Evolution (as function of redshift)

$$b_L^2 \equiv \frac{\langle b^2(\delta) \delta^2 \rangle}{\langle \delta^2 \rangle} \quad : \text{線形バイアスのestimator} \quad (\Leftrightarrow \xi_g = b_L^2 \xi)$$



$z \sim 0$ sample from Verde+02

$0.4 < z < 1.5$ from VVDS results

$$b_L(z) = 1 + (0.03 \pm 0.01)(1 + z)^{3.3 \pm 0.6}$$

Testing gravitational instability

- Estimating 2nd and 3rd order moments essentially,

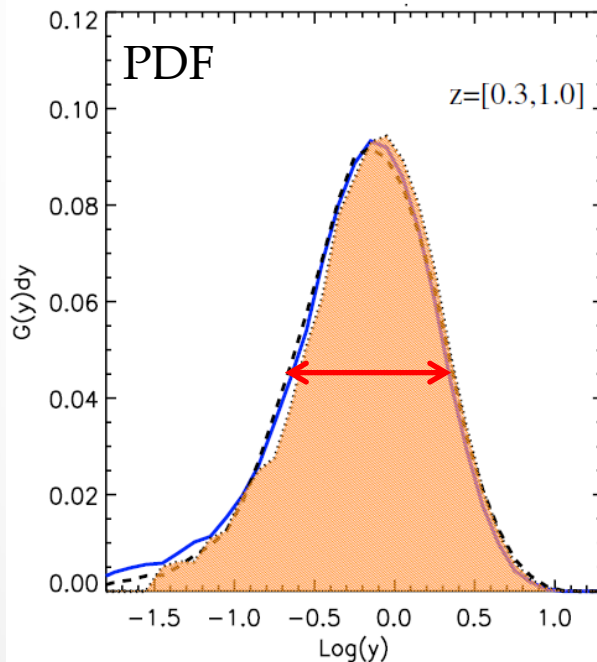
$$\langle \delta_g^2 \rangle_R = \int_{-1}^{\infty} \delta_g^2 g_R(\delta_g) d\delta_g, \quad \langle \delta_g^3 \rangle_R = \int_{-1}^{\infty} \delta_g^3 g_R(\delta_g) d\delta_g$$

2次モーメント：rms / variance
分散的なアレ(幅)

3次モーメント：skewness
非対称度

Gaussian分布からのズレ

理論的(GIP)には、重力ゆらぎ成長の
2次以上の項が決定



本当は観測的效果などを考慮して
もっと慎重な定式化を採用している
が、省略。。。。

Testing gravitational instability

- Evolution of rms of galaxy fluctuations

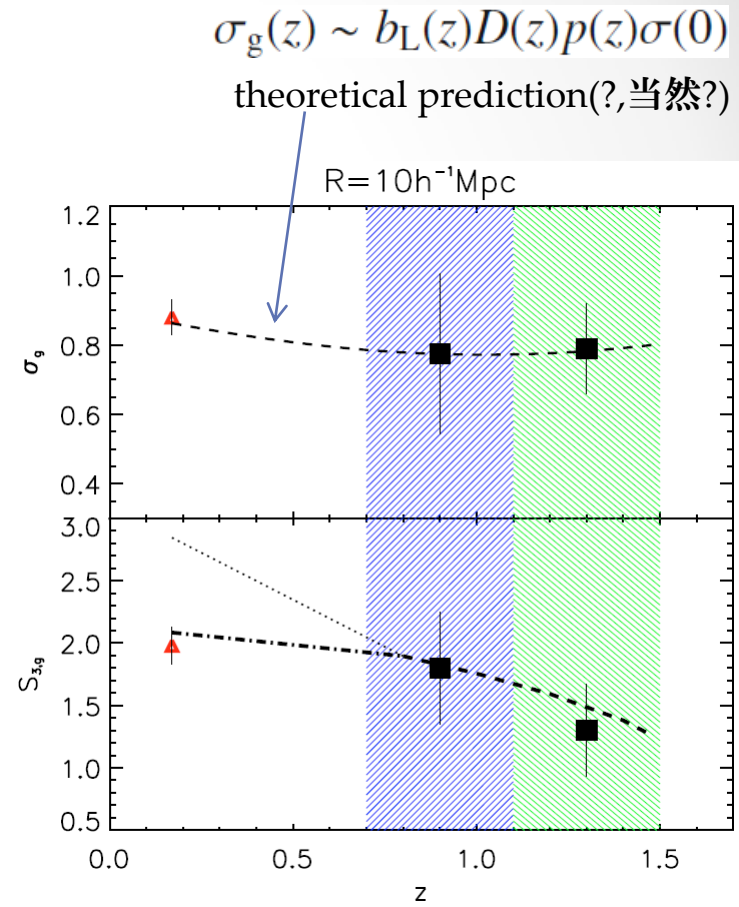
$$\sigma_g = \sqrt{\langle \delta_g^2 \rangle_c}$$

- $z=0 \sim 1.5$ にかけて nearly constant
=> 宇宙年齢の2/3の期間、線形の範囲で
銀河ゆらぎ分布は frozen
(↑ cosmological tour の定性的議論と一致)

- Evolution of skewness

$$S_3 = \langle \delta_g^3 \rangle_c / \sigma^4 : \text{normalized skewness}$$

- high- z ($z \sim 1.5$)、大スケール ($R=10h^{-1}\text{Mpc}$) でも
ゆらぎ分布は non-Gaussian (4- σ detection)
- cosmic-time に対して増加



※ $z=0.15$ sample: from 2dFGRS
(Croton+04)

Testing gravitational instability

• GIP(理論)チェック

Gaussian初期密度ゆらぎ + GIPのみを仮定した理論(skewnessだから2次)から
mass skewness in z-spaceは

$$S_3 \sim \frac{35.2}{7} - 1.15(n+3) \quad n: \text{パワースペクトルの傾き。} R=10h^{-1}\text{Mpcで} \sim -2$$

: time, ρ , geometry, (scale?) independent

observed galaxy skewness

$$S_{3,g} \sim b_1(z)^{-1} \left[S_3 + 3 \frac{b_2(z)}{b_1(z)} \right]$$

3つのz-binでの b_1, b_2 から内挿した理論予測

$$b_2/b_1 = -0.34 (\text{Gaztanaga+02})$$

$$b_2 = 0 (\text{Verde+02})$$

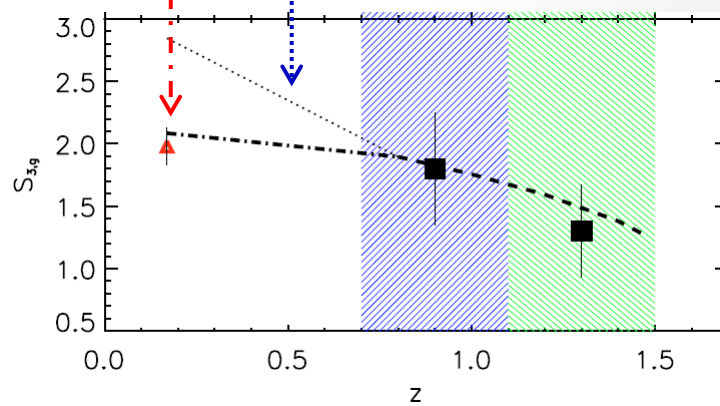
• 理論予測と観測値がよく一致

(するようにバイアスを決めてあるだけでは?)

※ $0.7 < z < 1.5$ の b_1, b_2 の推定は高次ゆらぎ理論と

独立、 $z \sim 0.15$ の b_1, b_2 は独立でない(3点相関)

=> バイアス推定の手法に依らない結果



GIPは $z \sim 1.5$ まで遡っても正しい

Conclusion

VVDS volume limited sampleから3D密度ゆらぎを再現し、 $0 < z < 1.5$ の範囲でPDFおよびバイアスの時間的な進化を明らかにした

- 低密領域(PDFのlow-density tail)は時間に対して増加 (GIPと一致)
- バイアス非線形項(b_2)の存在
- 宇宙年齢の2/3の期間、線形範囲で銀河PDFは変化なし($\langle \delta_g^2 \rangle_c$)
 - ∴ low- z につれてmass分布のrmsは増加するが、線形バイアスが減少する効果で相殺される
- 銀河PDFのskewnessは時間に対して増加
- バイアスを決定してしまうと、銀河PDFのrmsとskewnessのどちらも線形および非線形GIPとよく一致 (個人的には△)
- localの非線形バイアスについては線形を支持する研究(Verde+02)も非線形を支持する研究(Gaztanaga+05)もどちらも存在するが、今回の結果は非線形を支持