

非一様宇宙の観測

赤方偏移空間歪み

赤方偏移空間

観測者が定義する空間は‘実際’の空間とは違う

特殊相対論の最低次の効果 (i.e., $v/c \ll 1$)

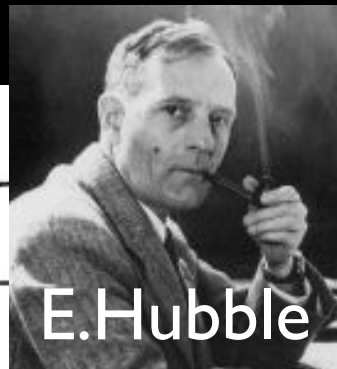
銀河の特異速度

赤方偏移空間
(共動系)

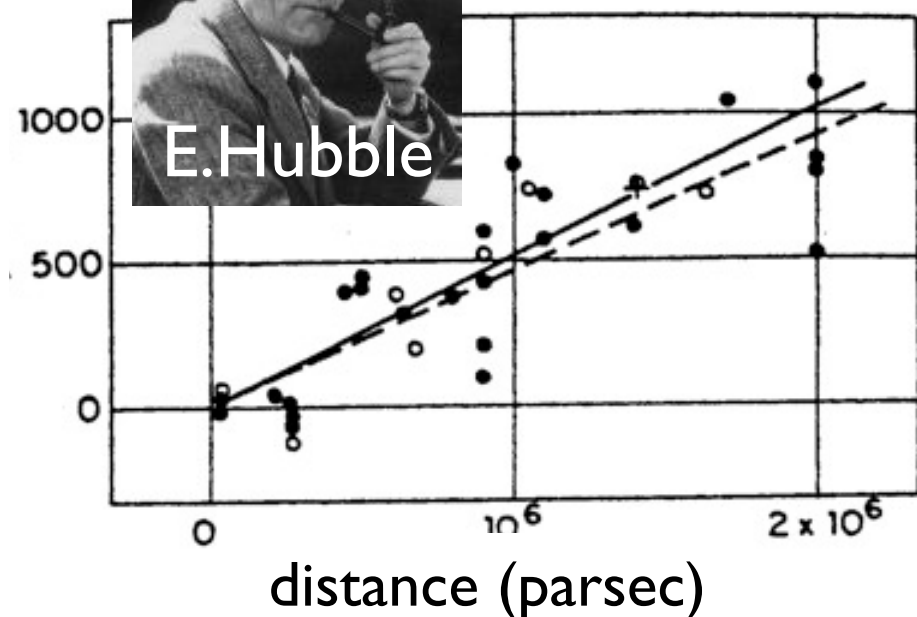
$$\vec{s} = \vec{r} + \frac{1+z}{H(z)} (\vec{v} \cdot \hat{z}) \hat{z}$$

観測者の視線方向

実空間



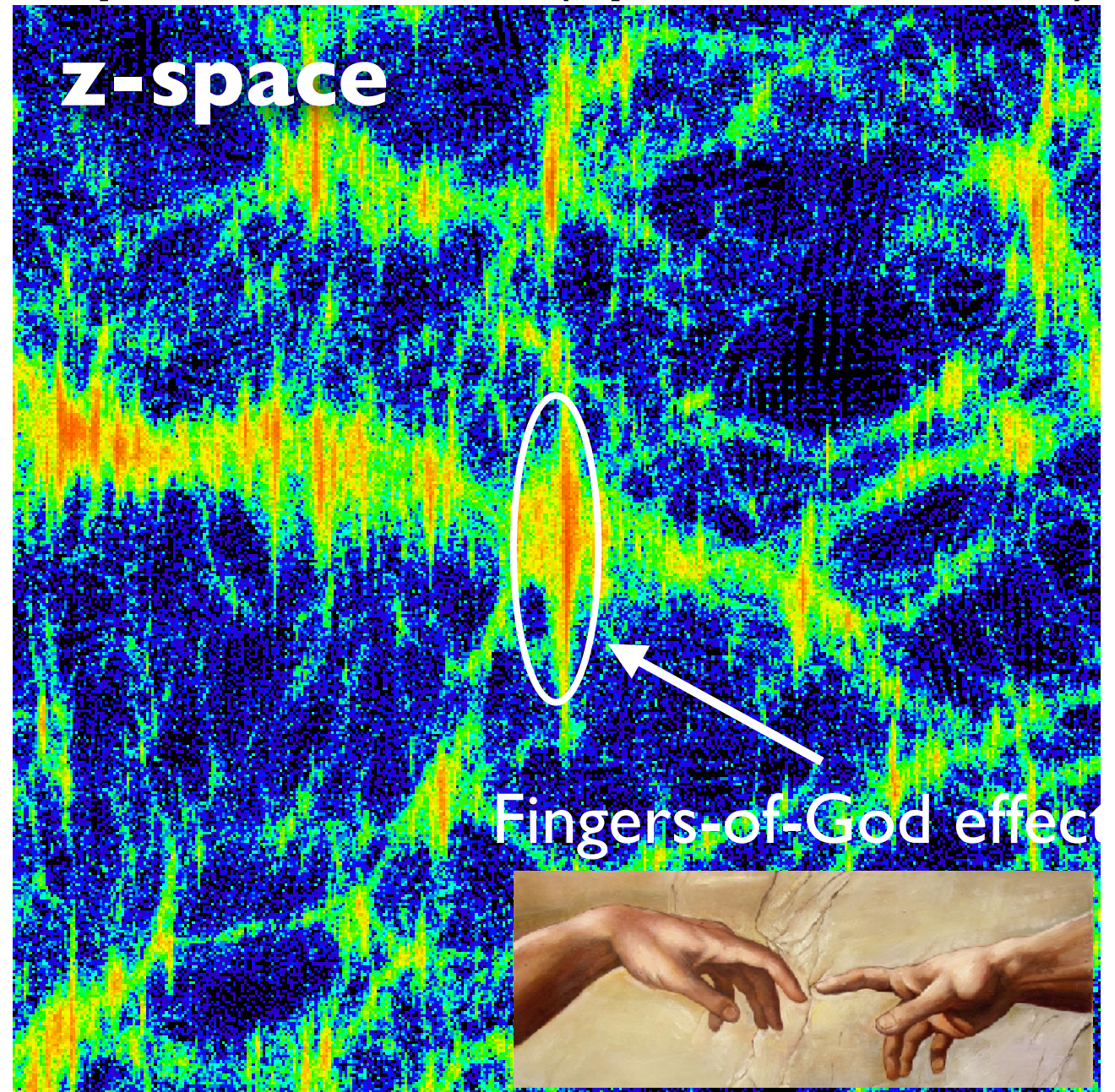
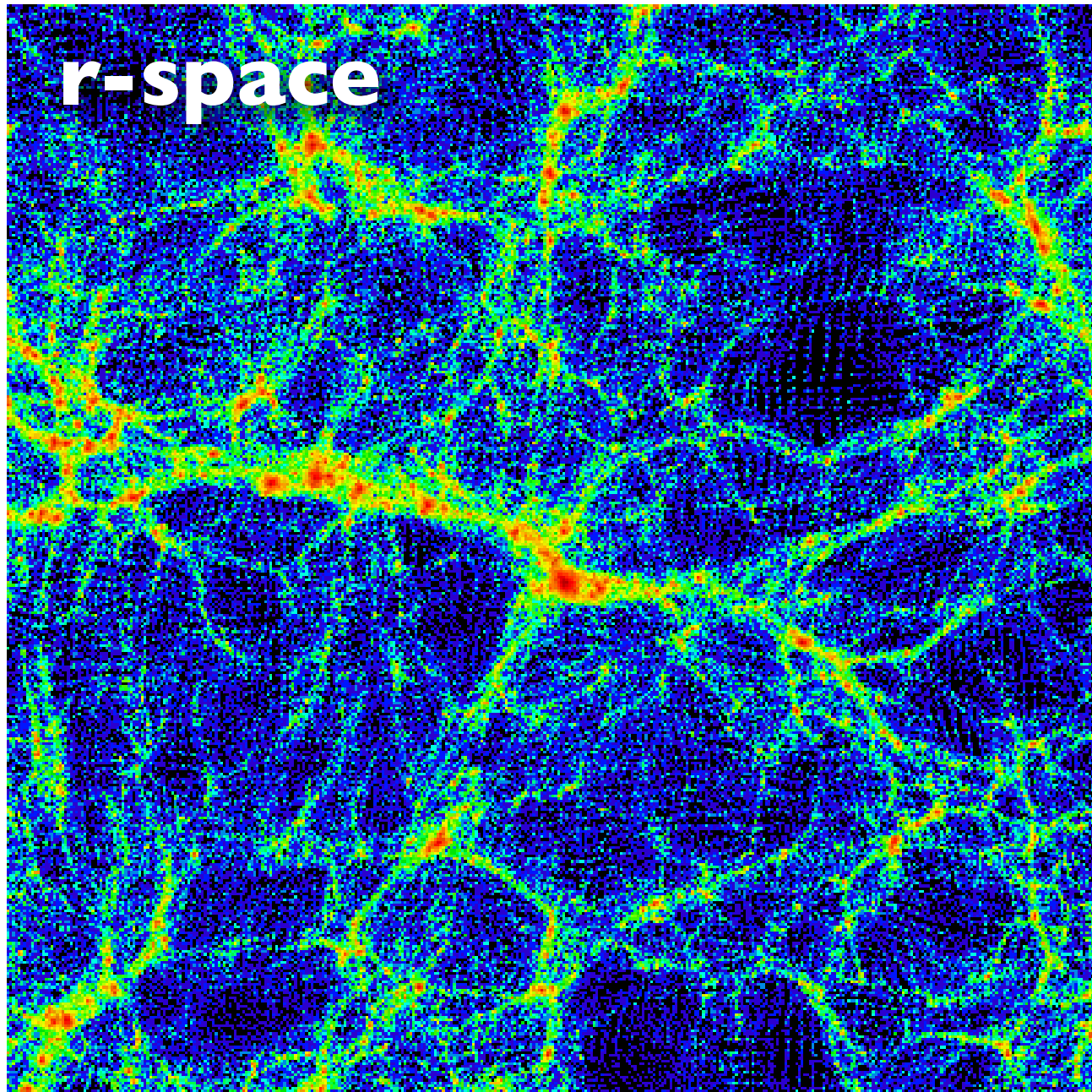
E. Hubble



- ハッブルダイアグラムに見られるバラツキの原因
- 2点相関関数・パワースペクトルでは系統的効果として効く

Redshift-space distortions (RSD)

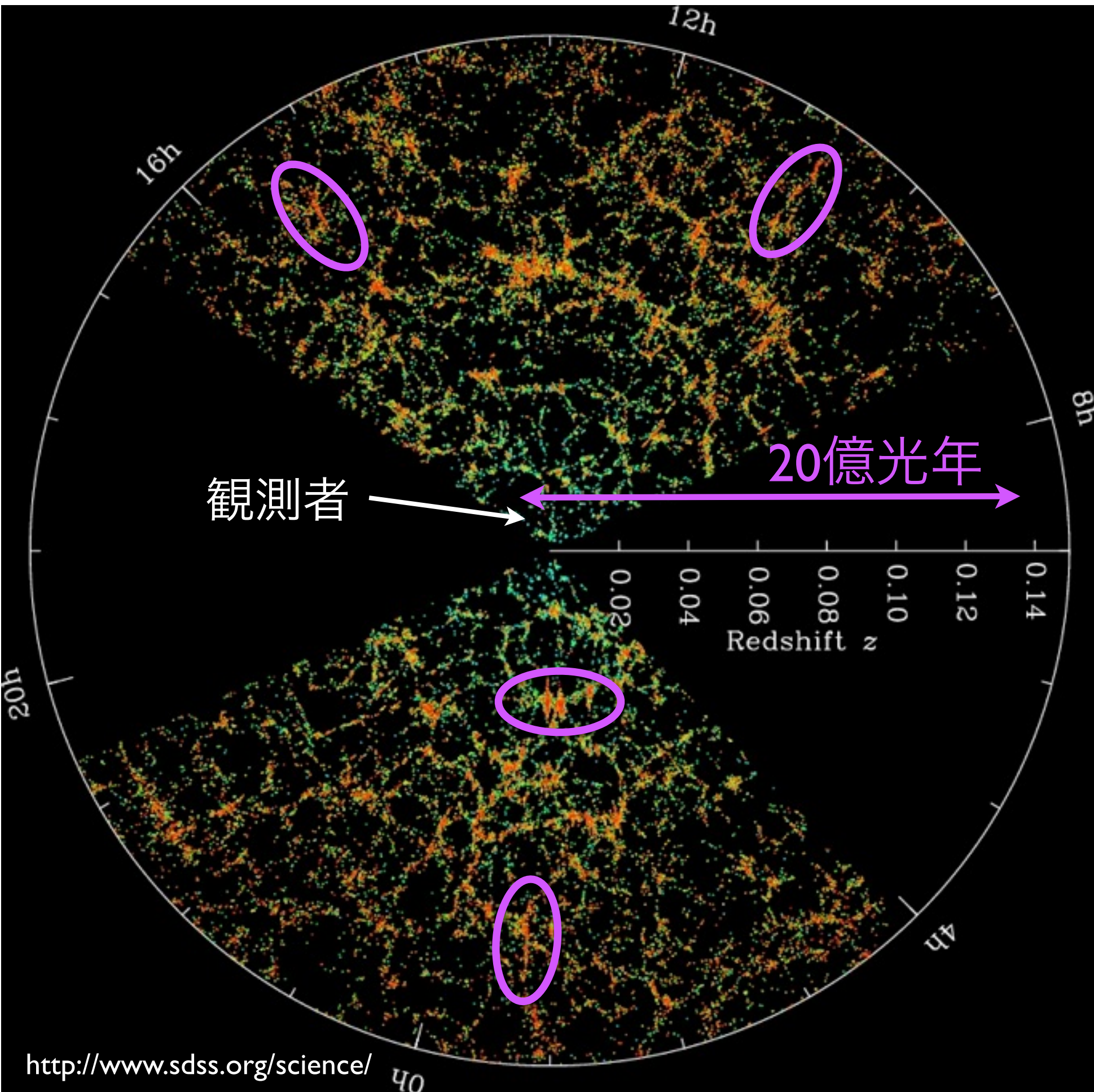
Dark matter in N-body simulations (by T. Nishimichi)



$\sim 100 \text{Mpc}/h$?

↑ observer's line-of-sight direction

RSD in SDSS-II main galaxies



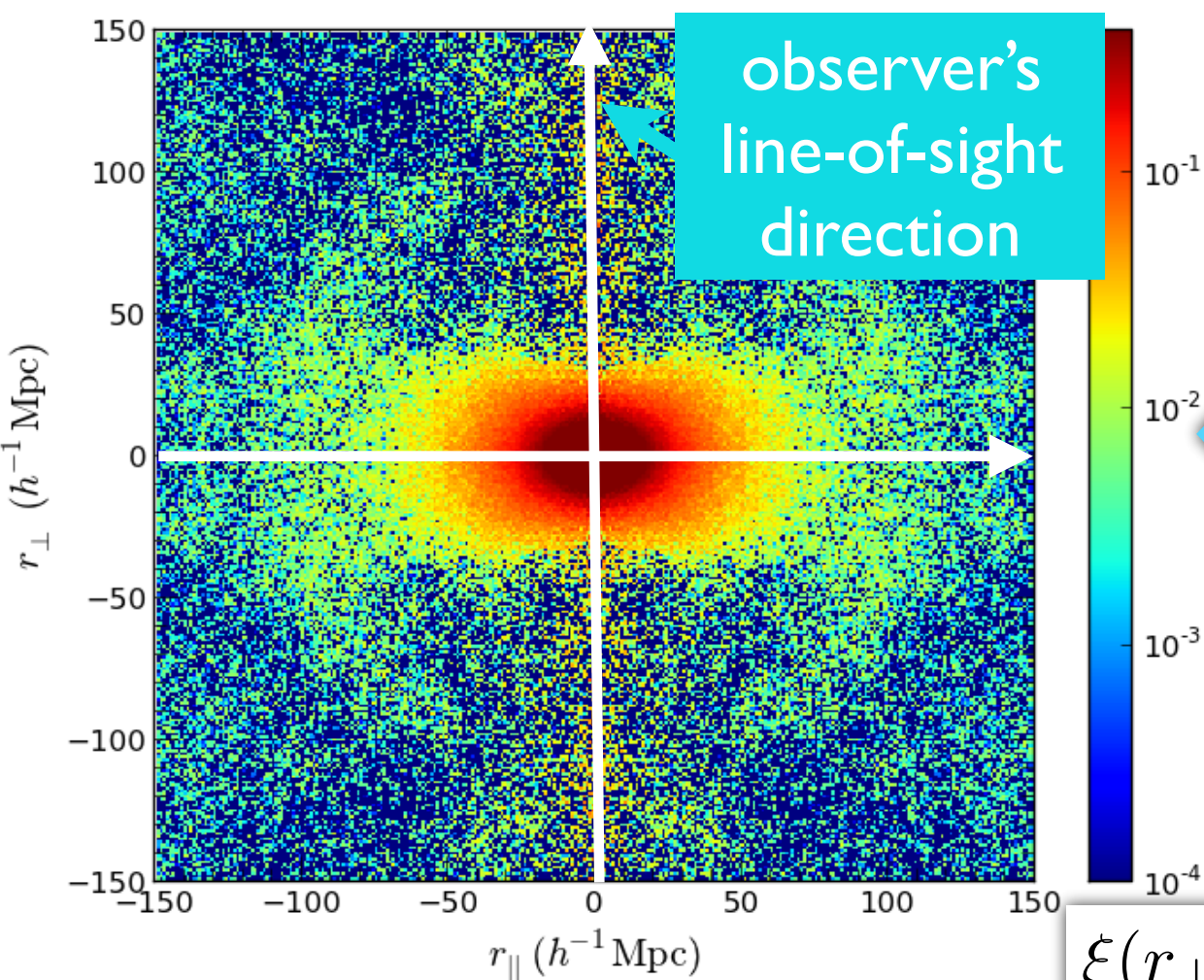
色は銀河の年齢
青い : 若い
赤い : 古い

Anisotropic correlation function

Anderson et al.('13)

BOSS DR11, CMASS samples

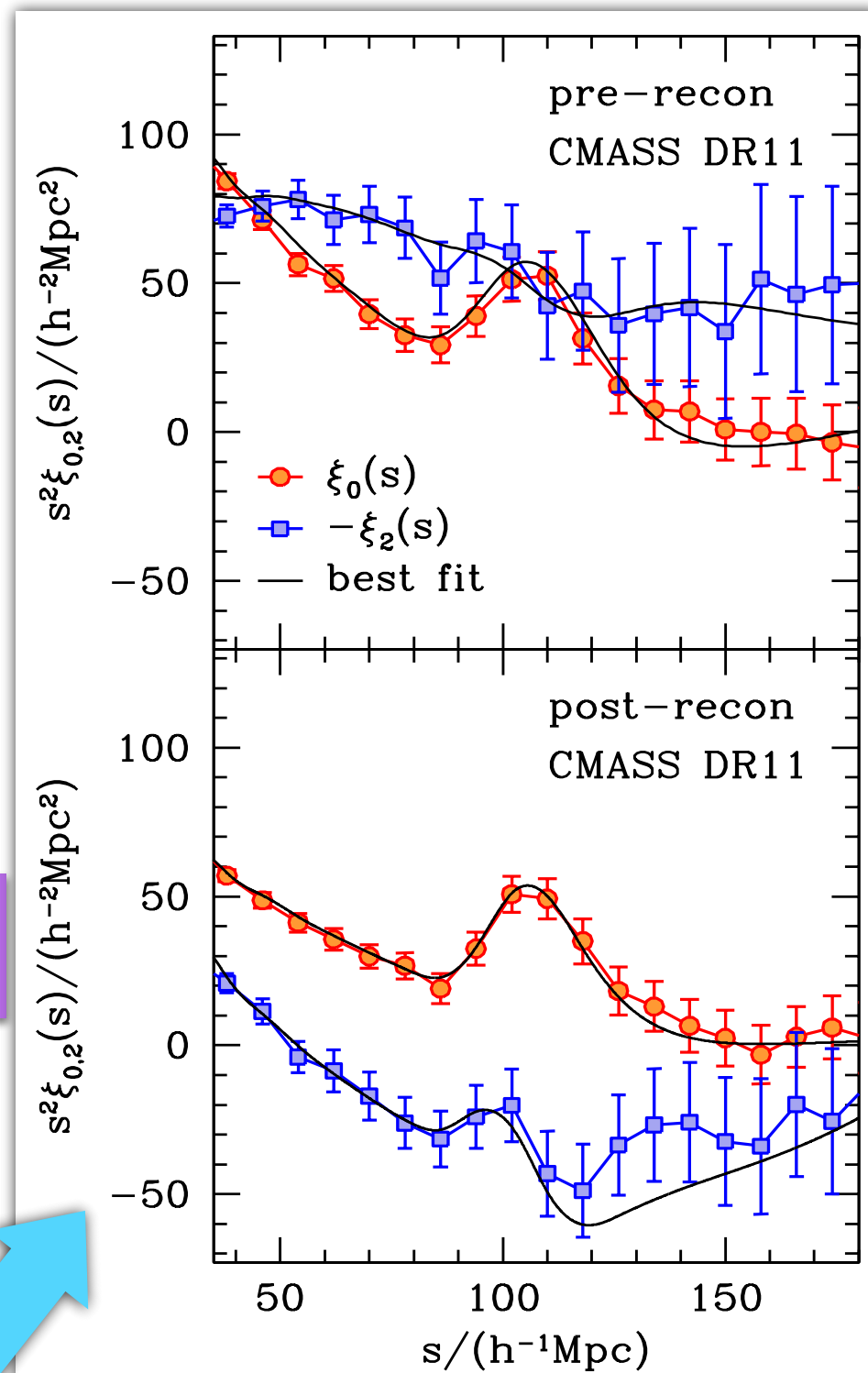
700,000 gals @ $0.43 < z < 0.7$



$$\xi(r_{\perp}, r_{\parallel})$$

Multipole expansion

$$\xi(r_{\perp}, r_{\parallel}) = \sum_{\ell:\text{even}} \xi_{\ell}(s) \mathcal{L}_{\ell}(r_{\parallel}/s) ; s = (r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2)^{1/2}$$



Samushia et al.('13)

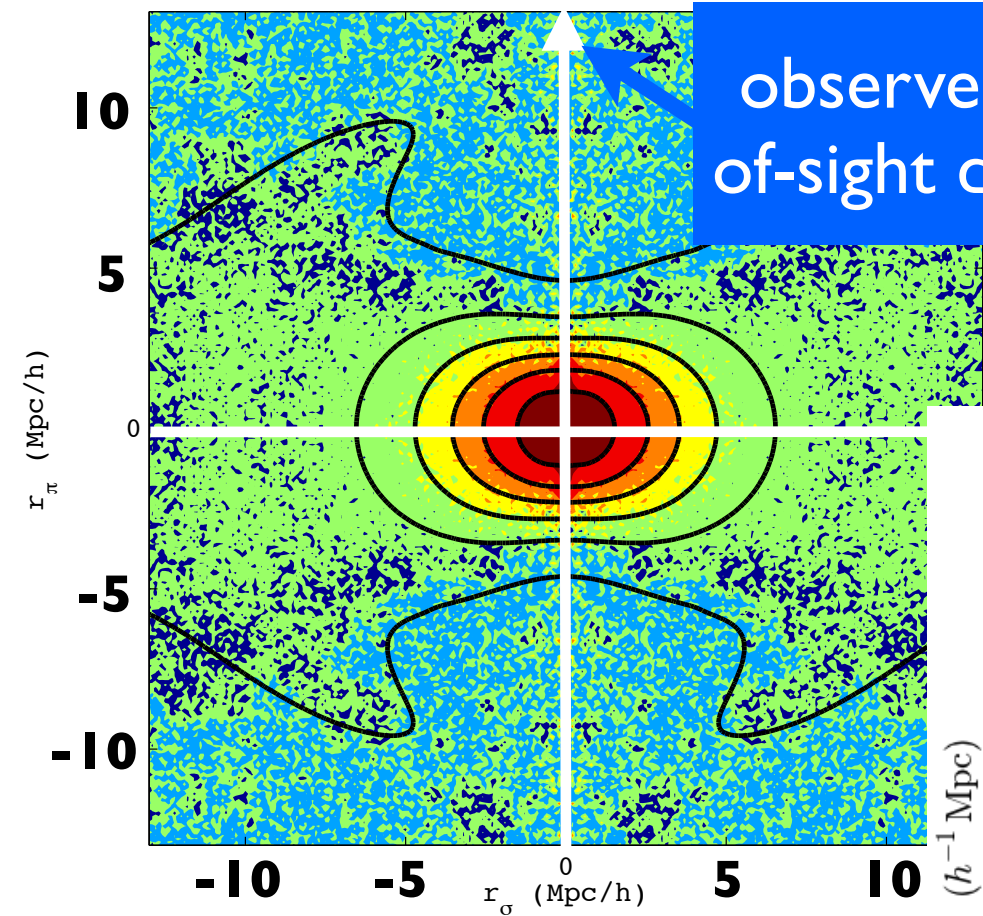
BOSS DR9

Reid et al. ('12)

Samushia et al. ('13)

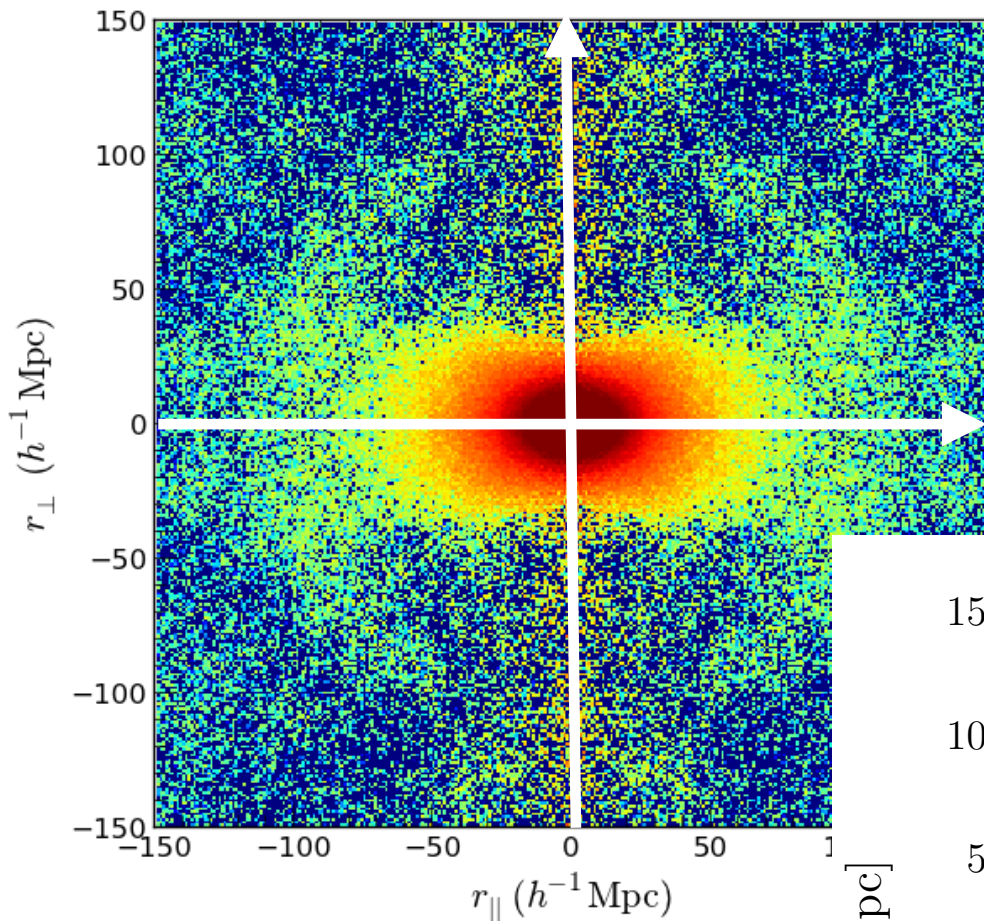
Alam et al. ('16)

observer's line-of-sight direction



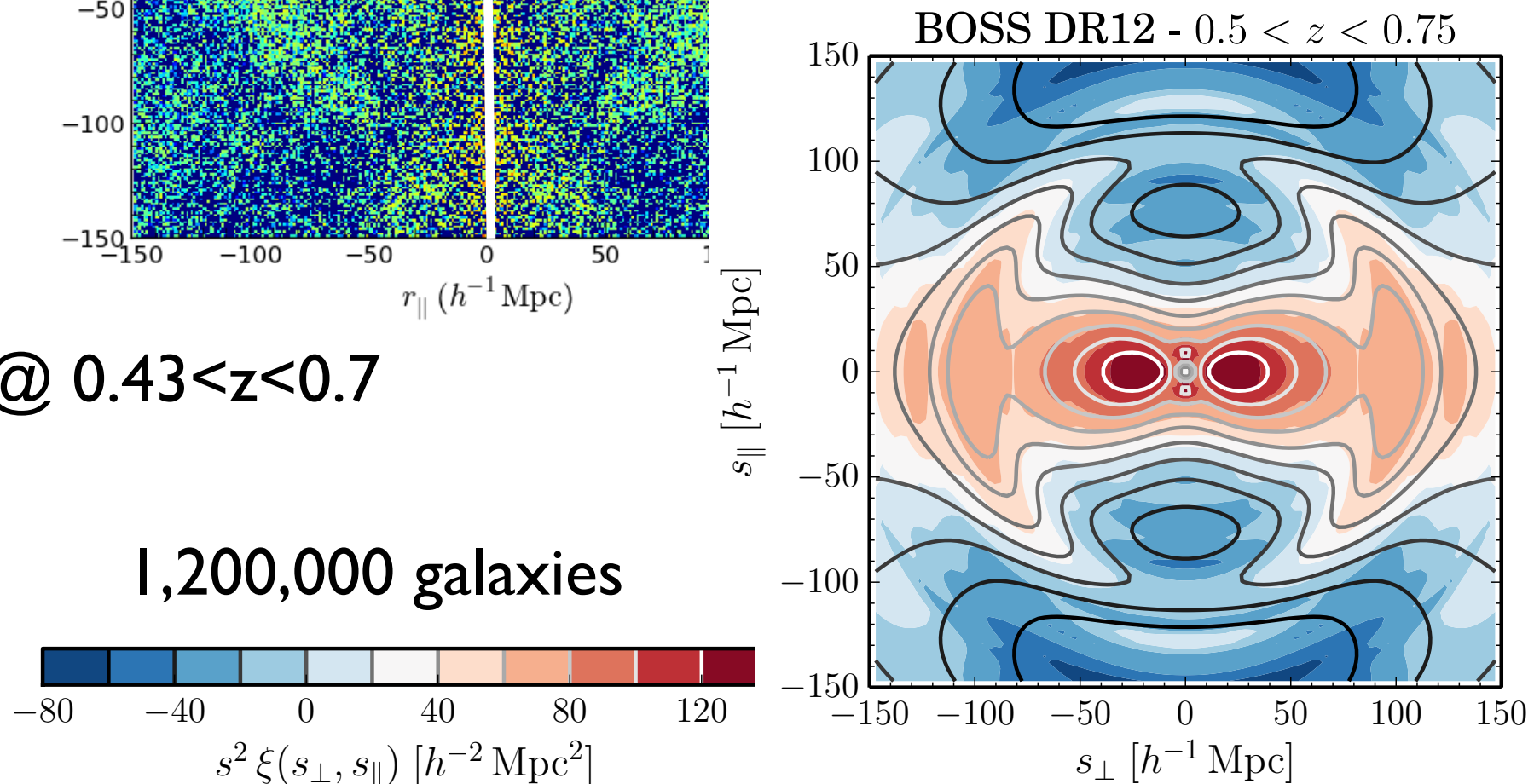
260,000gals @ $0.43 < z < 0.7$

BOSS DR11



700,000gals @ $0.43 < z < 0.7$

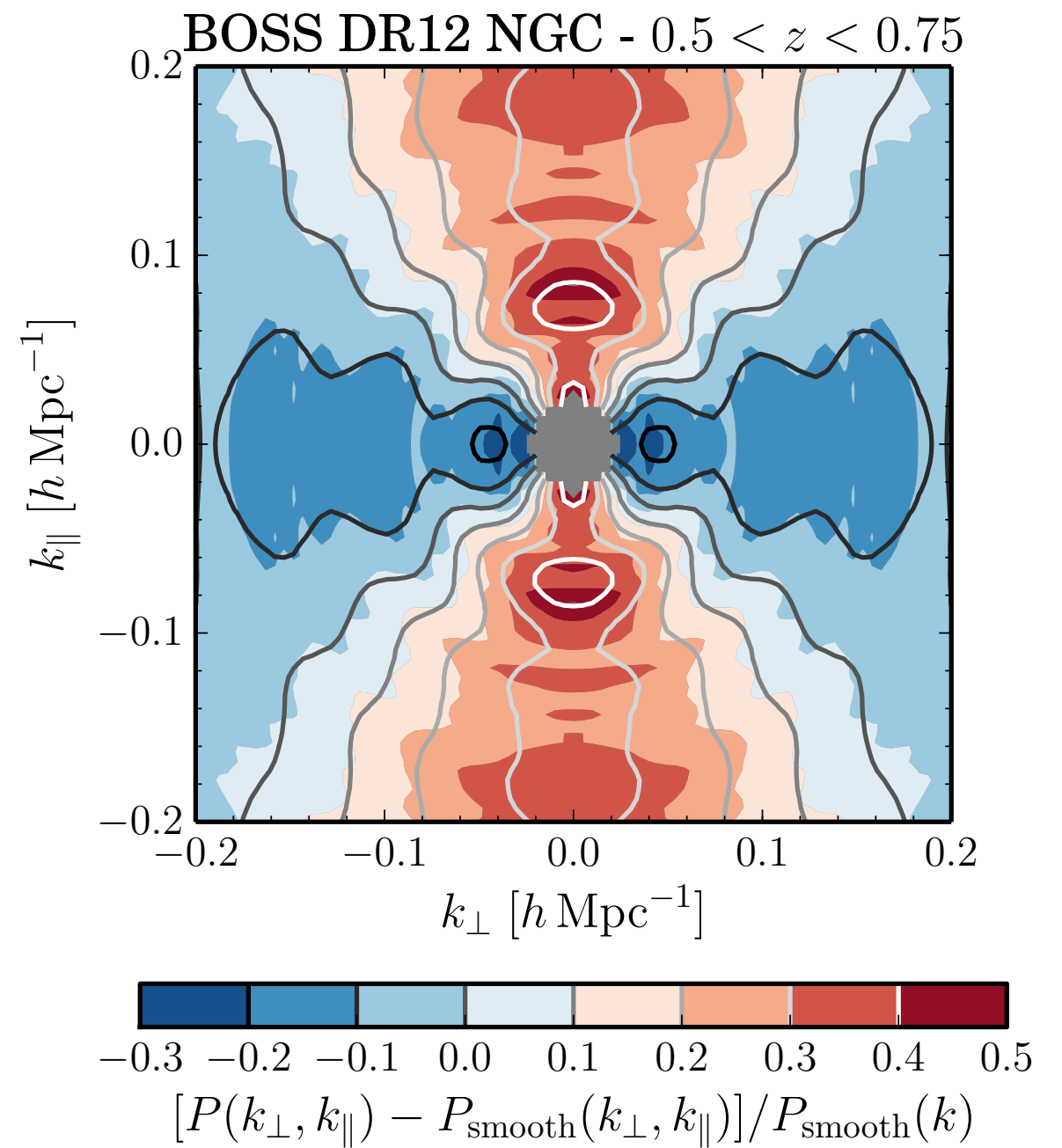
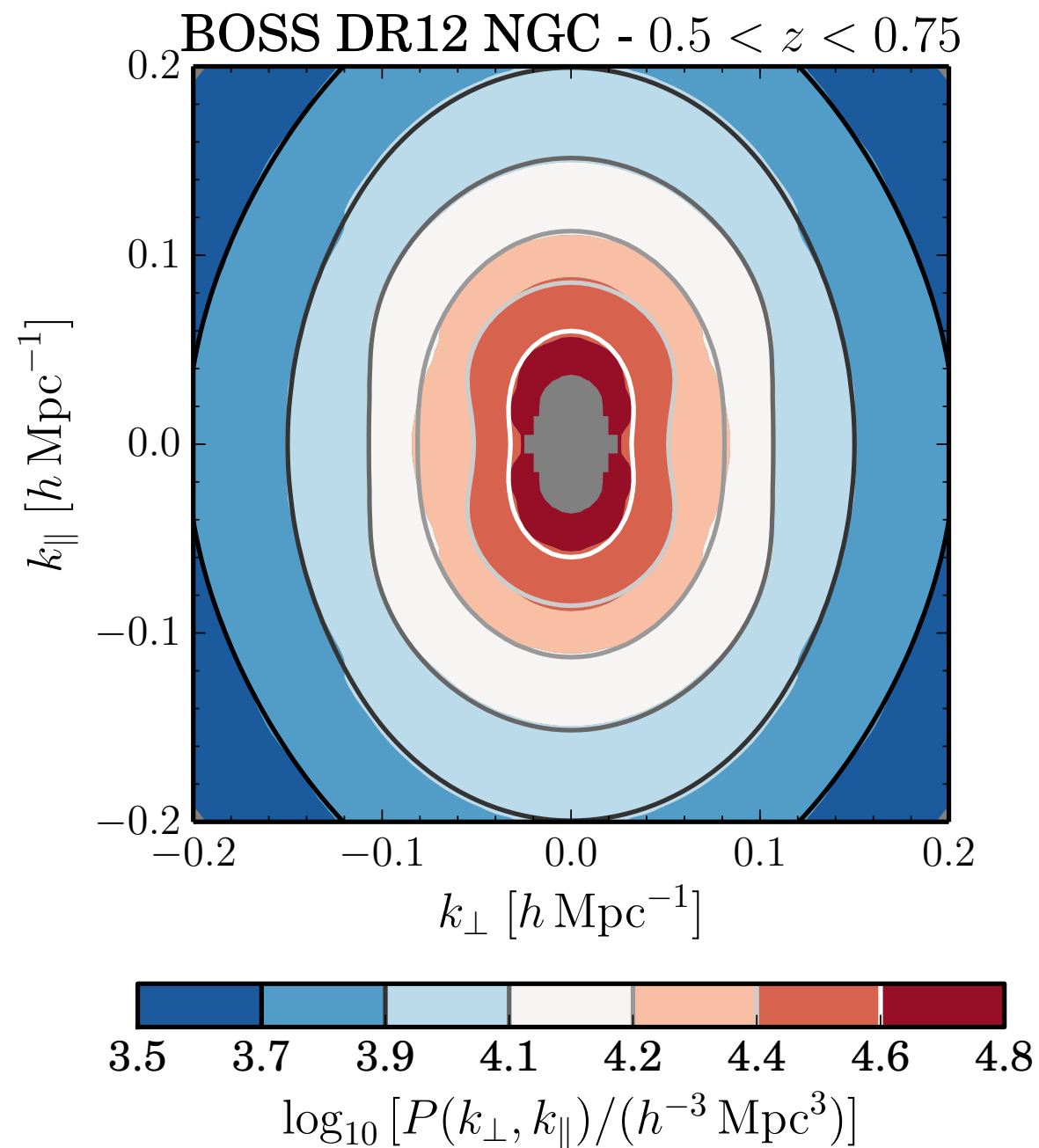
BOSS DR12



1,200,000 galaxies

Anisotropic power spectrum

BOSS DR12

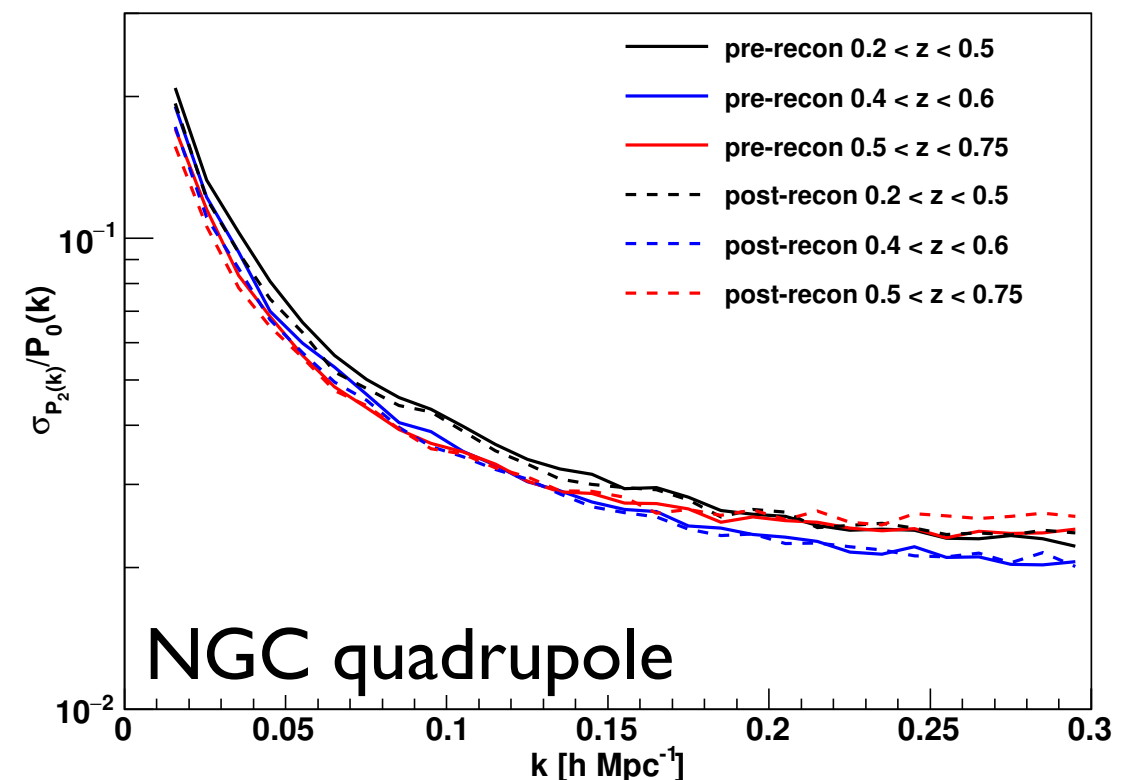
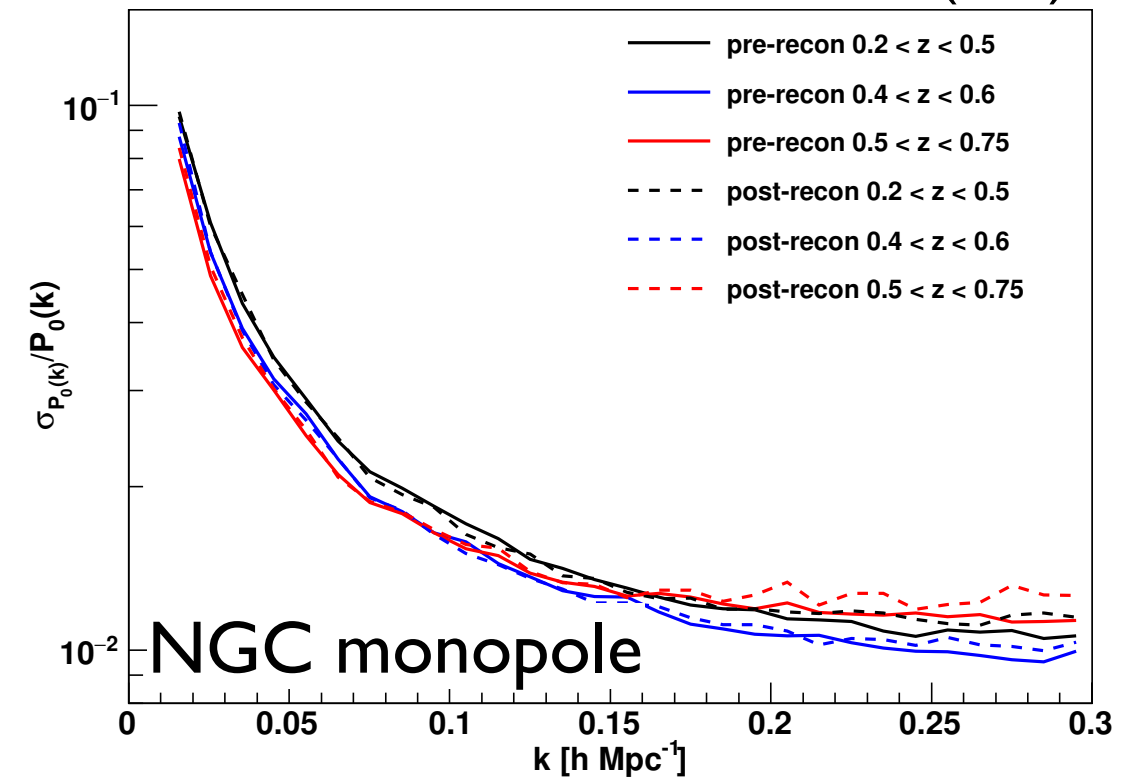
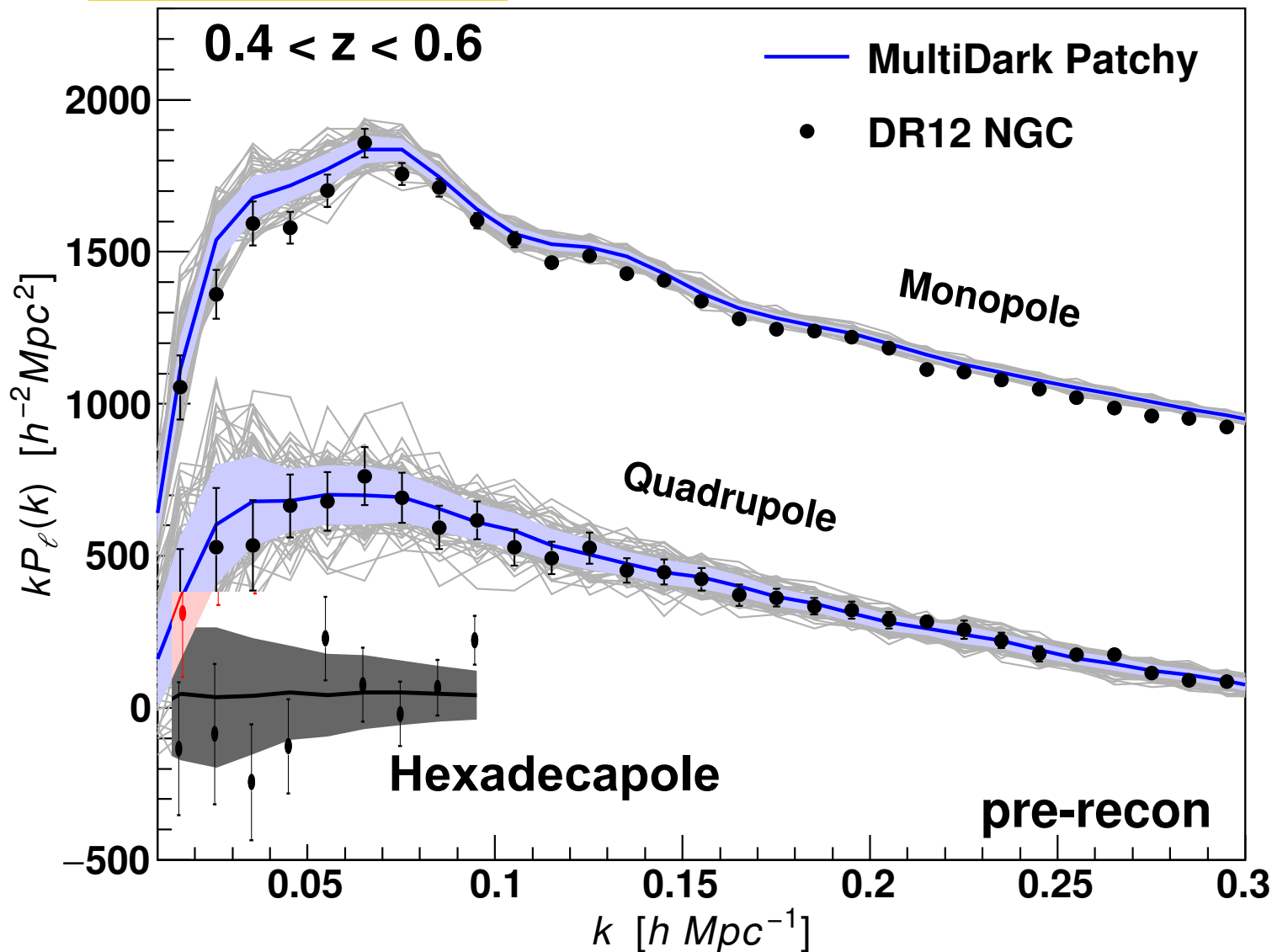


Alam et al. ('16)

Anisotropic power spectrum

BOSS DR12

Beutler et al. ('16)



$$P(k_{\parallel}, k_{\perp}) = \sum_{\ell: \text{even}} P_{\ell}(k) \mathcal{P}_{\ell}(k_{\parallel}/k)$$

$$; k = (k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2)^{1/2}$$

カイザー公式

Kaiser ('87)

赤方偏移空間
の密度場

$$\delta^{(S)}(\mathbf{s}) = \left| \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \right|^{-1} \{1 + \delta(\mathbf{s})\} - 1$$

質量密度の保存

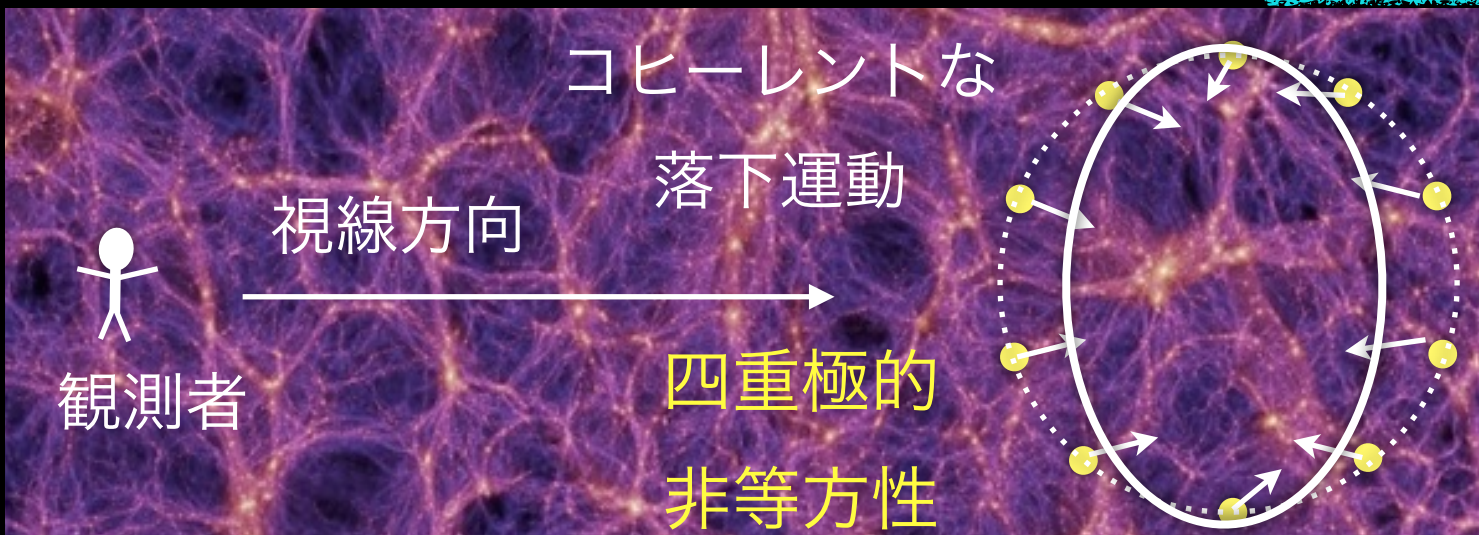
$$\begin{aligned} \{1 + \delta^{(S)}(\mathbf{s})\} d^3 \mathbf{s} \\ = \{1 + \delta(\mathbf{r})\} d^3 \mathbf{r} \end{aligned}$$

$$\simeq \delta(\mathbf{r}) - \frac{(1+z)}{H(z)} \partial_z v_z \quad (\text{線形近似})$$

フーリエ変換

連続の式： $\dot{\delta} + \frac{1}{a} \nabla \cdot \mathbf{v} \simeq 0$
(渦なし)

$$\delta^{(S)}(\mathbf{k}) = \left(1 + \mu_k^2 \frac{d}{d \ln a} \right) \delta(\mathbf{k}) ; \quad \mu_k \equiv \hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{z}} > 0$$



視線方向に沿って密度場の
振幅超過

重力のプローブ

カイザー
公式

$$\delta^{(S)}(\mathbf{k}) = (1 + f \mu_k^2) \delta(\mathbf{k}) ; \quad f \equiv \frac{d \ln D_+}{d \ln a}$$

線形成長因子
スケール因子

構造の成長率は重力の性質によって変わらうる

しかも

カイザー公式は重力理論とは無関係に成り立つ

宇宙論的大スケールで重力理論（相対論）を検証する手段

- Λ CDMモデルの中で未だ検証されていない仮定
- 加速膨張の起源に迫る手がかり

e.g., Linder ('08); Guzzo et al. ('08); Yamamoto et al. ('08); Percival & White ('09)

宇宙論的大スケールにおける重力

銀河

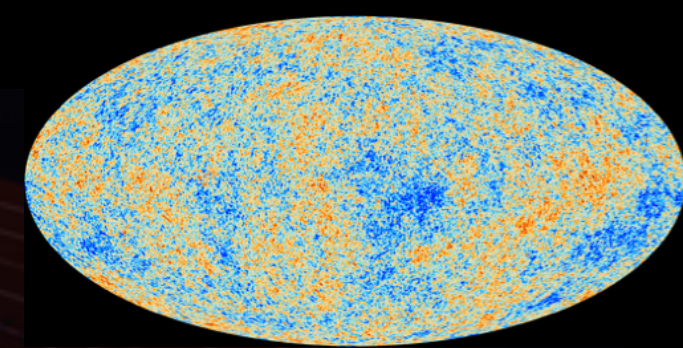
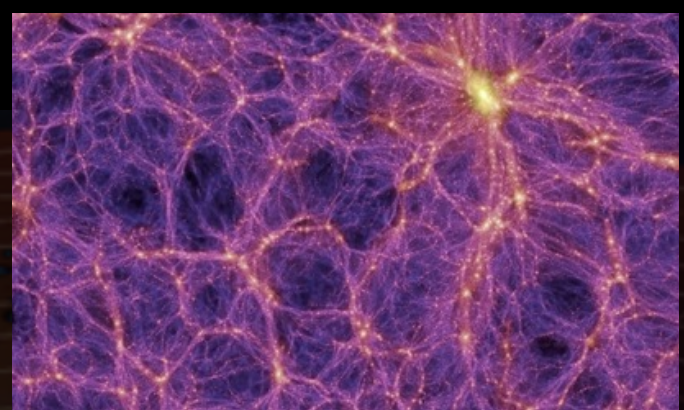
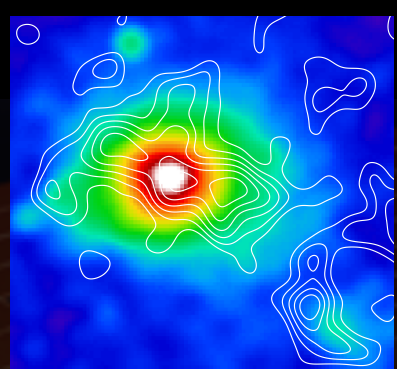
銀河団

銀河のクラスターリング

CMB



高密度



小スケール
(~kpc)

構造形成の修正

大スケール
(~Gpc)

一般相対論を再現
(重力スクリーニング)

スカラー自由度による

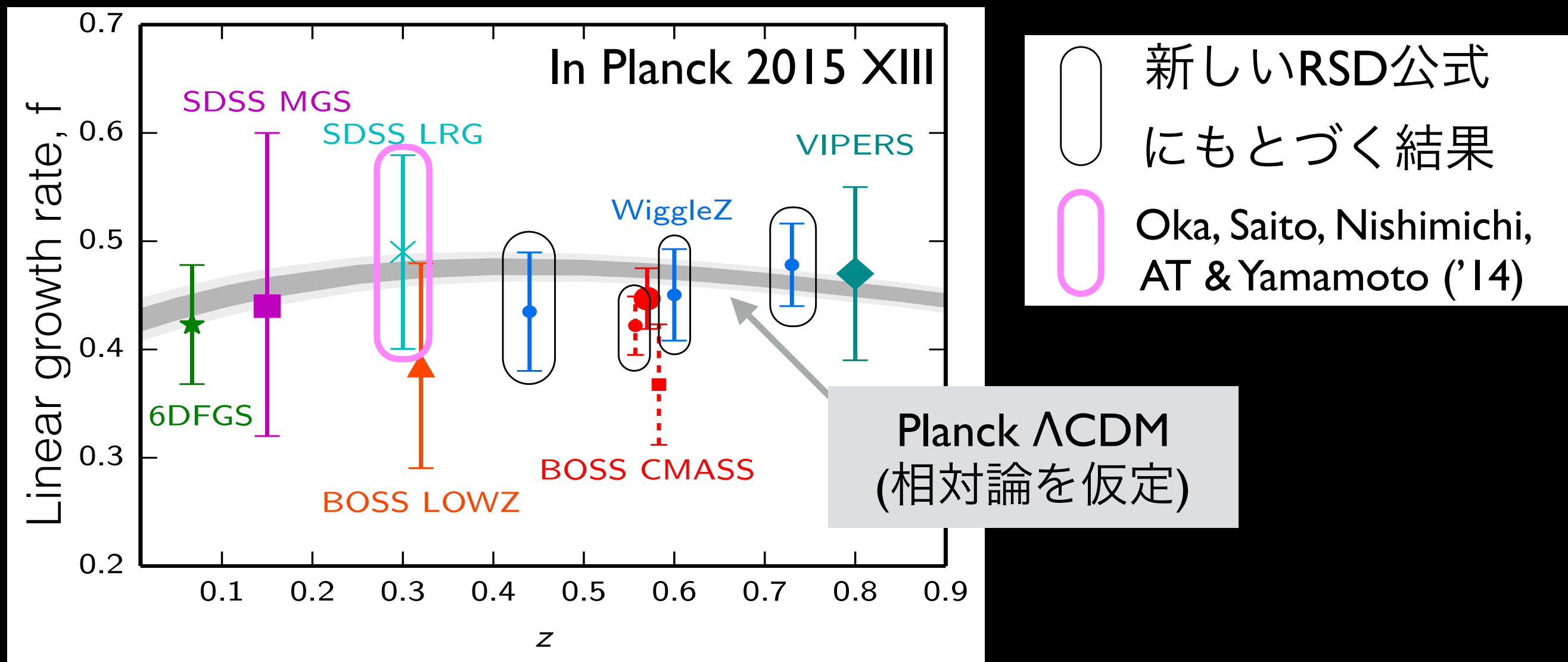
第5の力の発現

➡ 加速膨張

修正重力を記述する理論的枠組みは十分すぎるほど発展した:
f(R)重力、DGP、ホルンデスキー、ビヨンドホルンデスキー...

相対論のテスト

相対論 (Λ CDM) が正しいと仮定して構築した理論テンプレートを観測データと比較して、正しく成長率が求まるか？

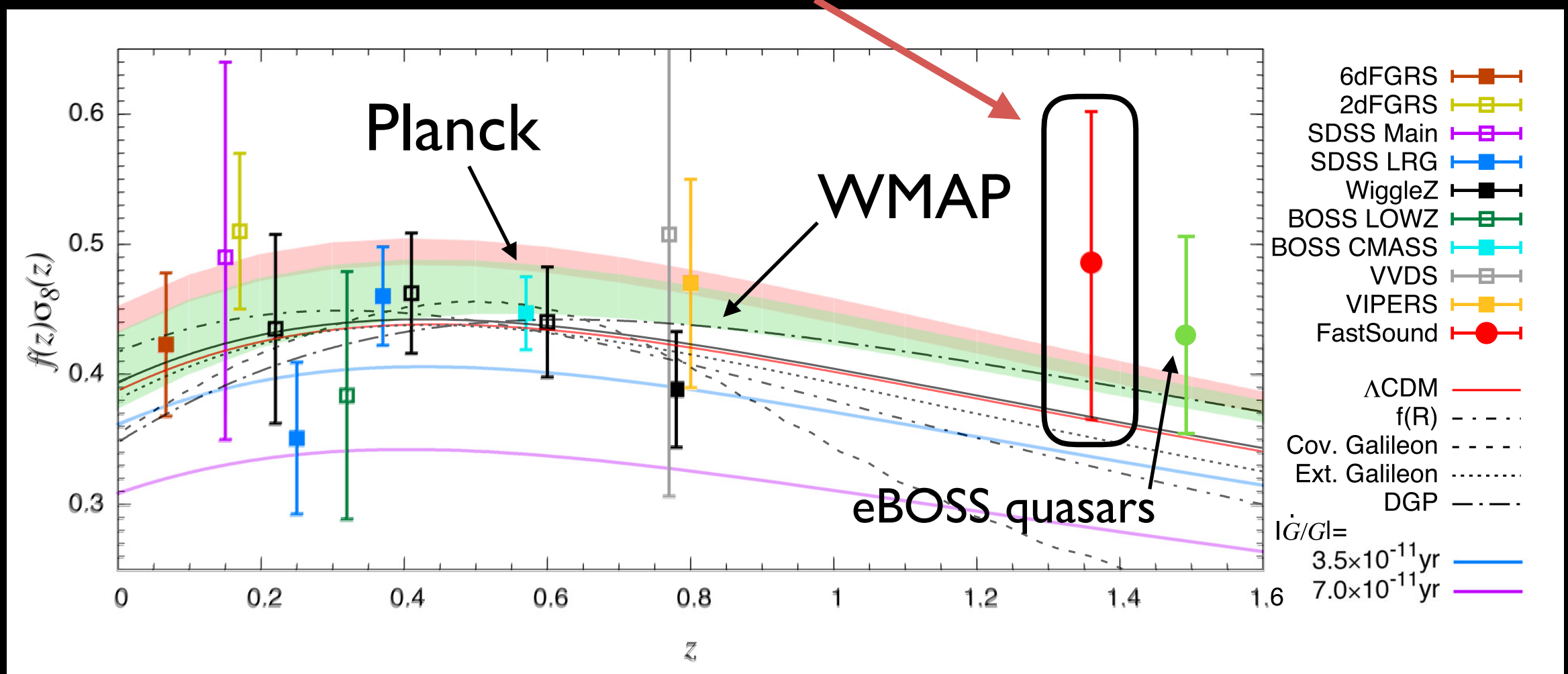
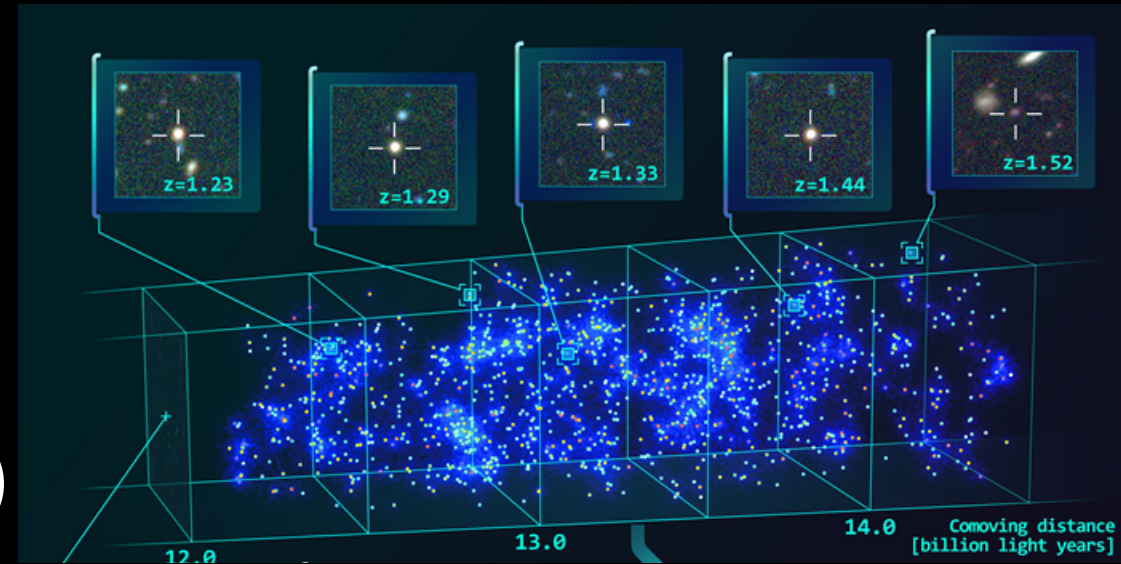


最近のデータ (BOSS DR12) でも新しいRSD公式が使われたが、相対論からの有意なずれは見つかっていない (Beutler, Seo, Saito et al. '16)

高赤方偏移での制限



$z \sim 1.4$ で2800個の輝線銀河を用いた
RSD観測 (線形理論でよくフィット)



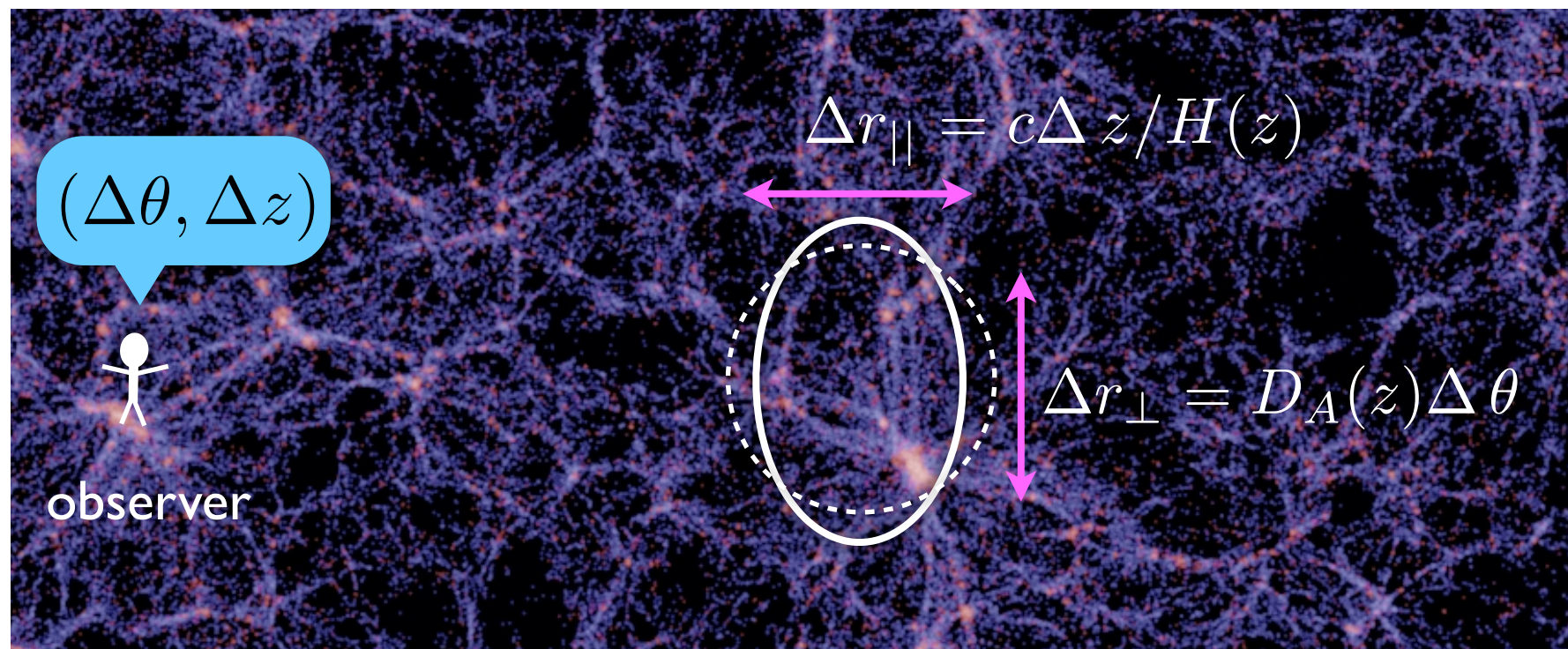
幾何学的歪み

(アルコール-パチンスキー効果)

Geometric distortions

(Alcock-Paczynski effect)

Cosmological distortions caused by apparent mismatch of underlying cosmological models



→ can generate higher multipole moments of anisotropies

Using the standard ruler,

H(z) & **DA(z)** can be measured simultaneously

An evolution free test for non-zero cosmological constant

Charles Alcock

The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey 08450

Bohdan Paczyński*

Department of Astronomy, University of California at Berkeley, Berkeley, California 94720 and Princeton University Observatory, Princeton, New Jersey 08540

The cosmological constant has recently been questioned because of difficulties in fitting the standard $\Lambda = 0$ cosmological models to observational data^{1,2}. We propose here a cosmological test that is a sensitive estimator of Λ . This test is unusual in that it involves no correction for evolutionary effects. We present here the idealised conception of the method, and hint at the statistical problem that its realisation entails.

Consider a collection of test objects emitting radiation containing spectral lines (so that redshifts may be determined), which are distributed on the surface of a sphere. (Any spherically symmetric, bounded distribution will do; this idealisation is for convenience only.) Let the sphere expand with the local

where

$$\sum_{+1}^{\infty} (x) = \sin x, \sum_{-1}^{\infty} (x) = \sinh x \quad (5)$$

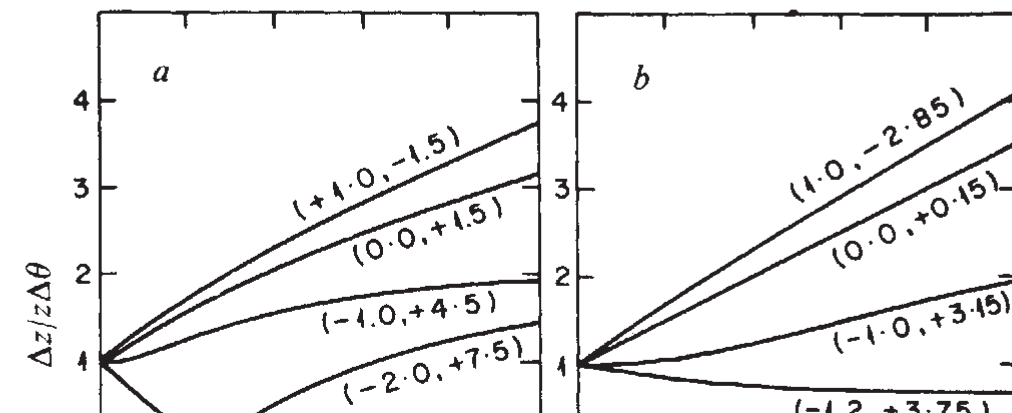
In the case $k = 0$,

$$\frac{\Delta z}{z \Delta \theta} = z^{-1} \{1 - \Omega_0 + \Omega_0(1+z)^3\}^{1/2} \int_1^{1+z} dy \{1 - \Omega_0 + \Omega_0 y^3\}^{-1/2} \quad (6)$$

For the 'conventional' cosmologies where $\Lambda = 0$ there is the simple expression,

$$\frac{\Delta z}{z \Delta \theta} = \frac{(1+2q_0z)^{1/2}}{q_0^2 z} \{q_0z + (q_0-1)((1+2q_0z)^{1/2}-1)\} \quad (7)$$

Numerical evaluation of equation (7) shows that $\Delta z/(z \Delta \theta)$ is not a powerful estimator of q_0 in the $\Lambda = 0$ case—there is only 11% variation of $\Delta z/(z \Delta \theta)$ between $q_0 = 0$ and $q_0 = 1$ at $z = 2$. However, the general expressions (4) and (6) show great variations of $\Delta z/(z \Delta \theta)$ with the parameters. This is shown in Fig. 1.

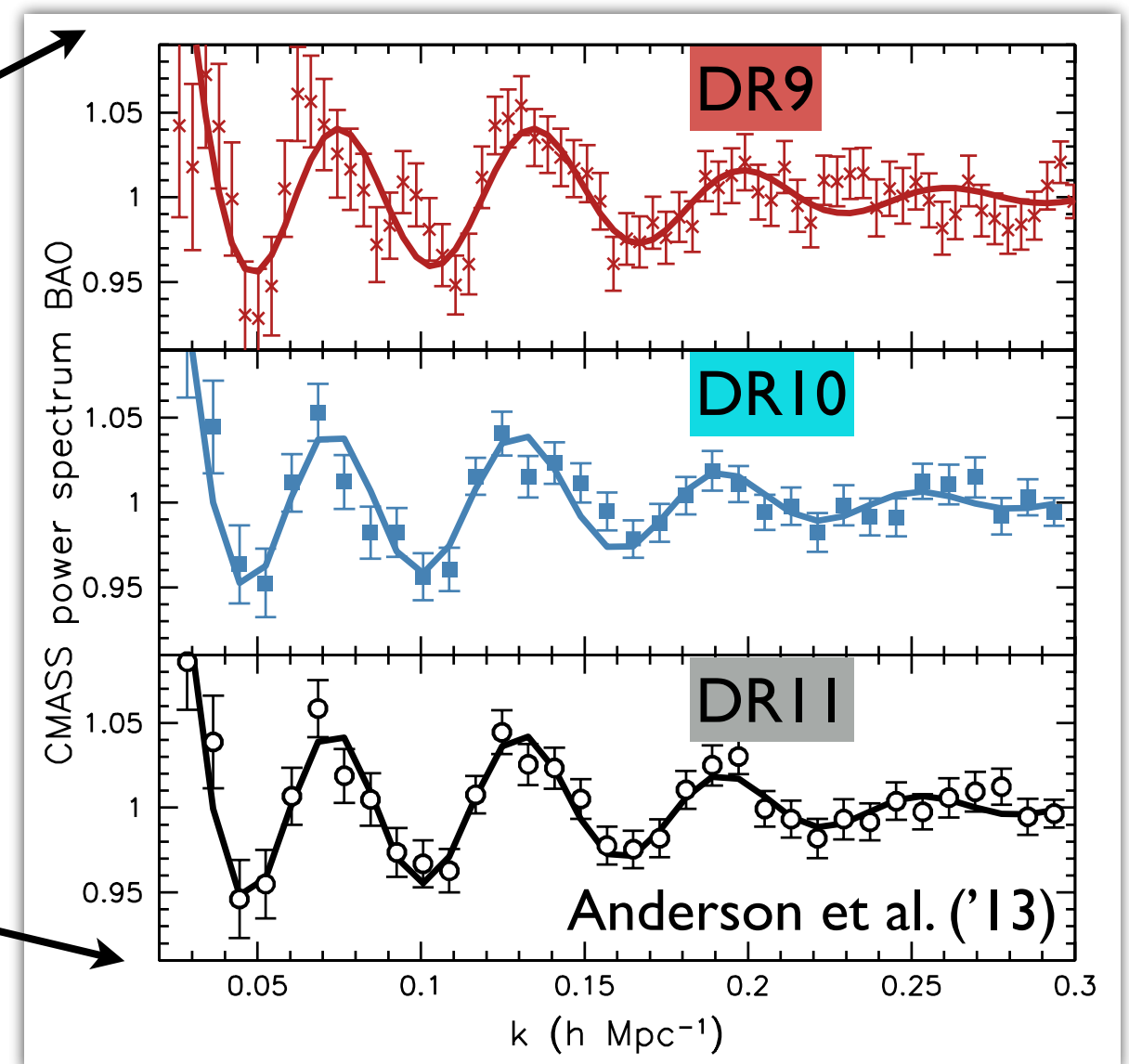
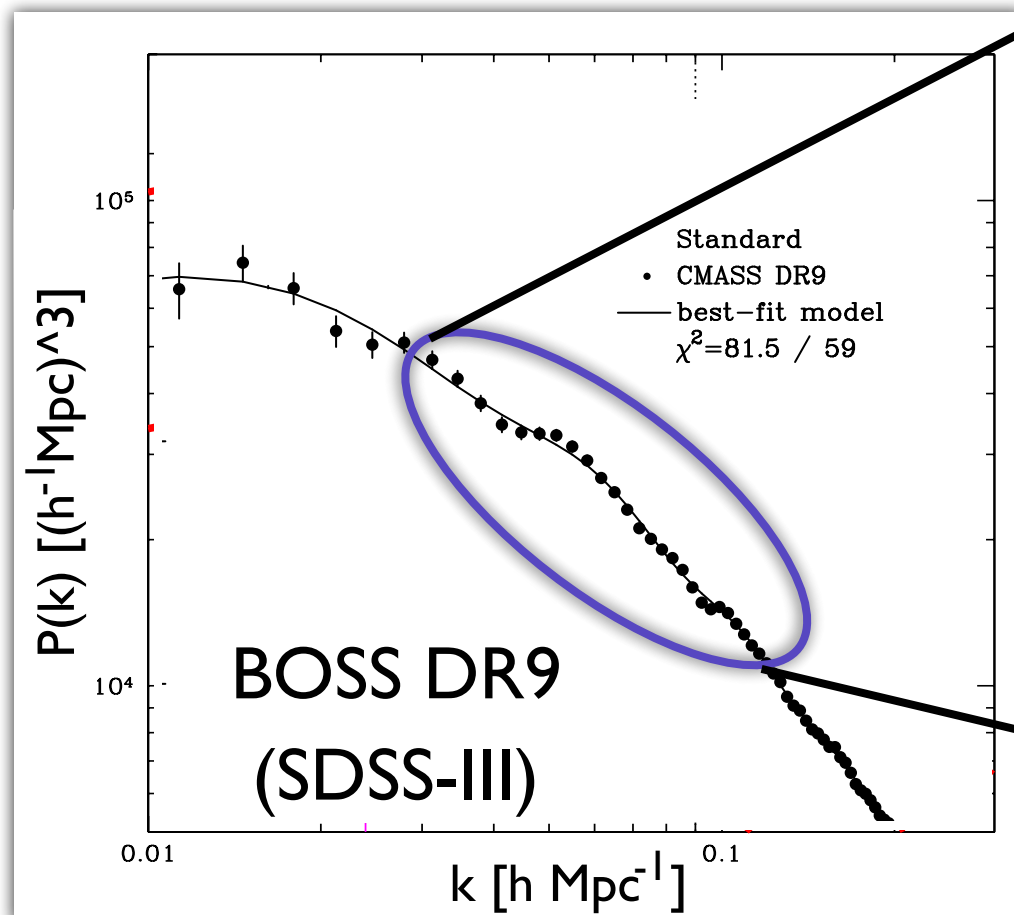


Early studies before detection of BAOs :

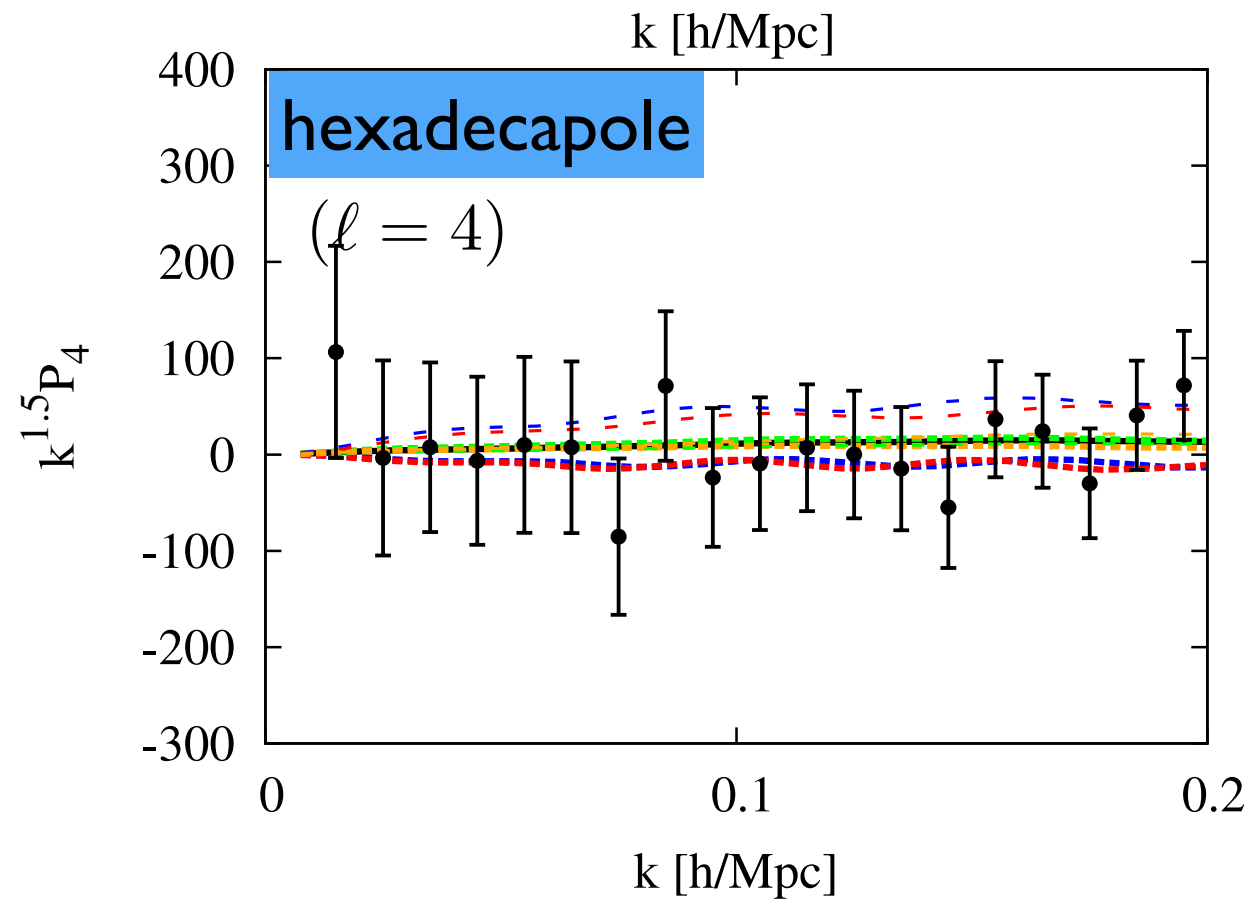
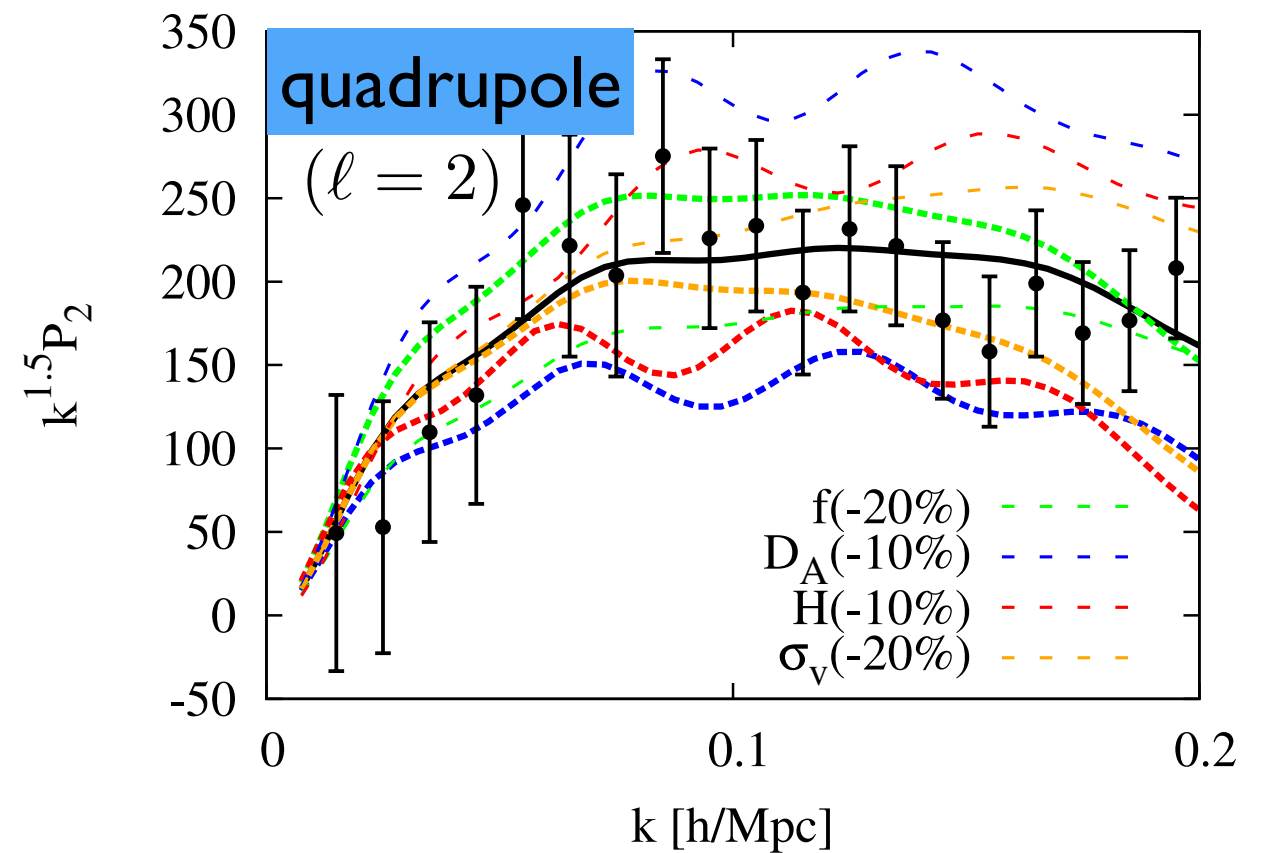
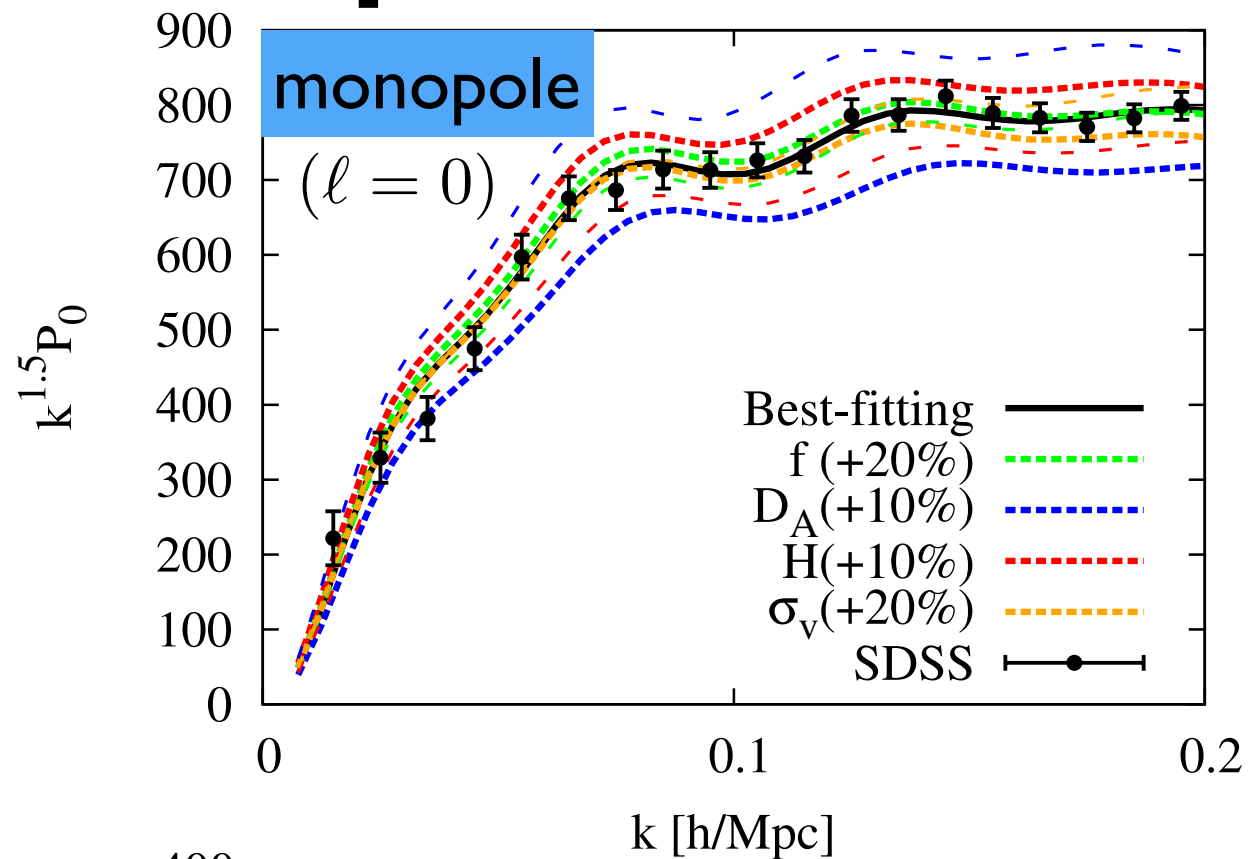
- Ryden ('95) ----- shape of void
- Ballinger, Peacock & Heavens ('96) ----- global shape of
- Matsubara & Suto ('96); Magira, Jing & Suto ('98) P(k) or $\xi(r)$

Baryon acoustic oscillations

- Characteristic scale of primeval baryon-photon fluid ($\sim 150\text{Mpc}$) imprinted on $P(k)$ or $\xi(r)$
- Can be used as standard ruler to estimate distance to galaxies



Impact of RSD & A-P effects



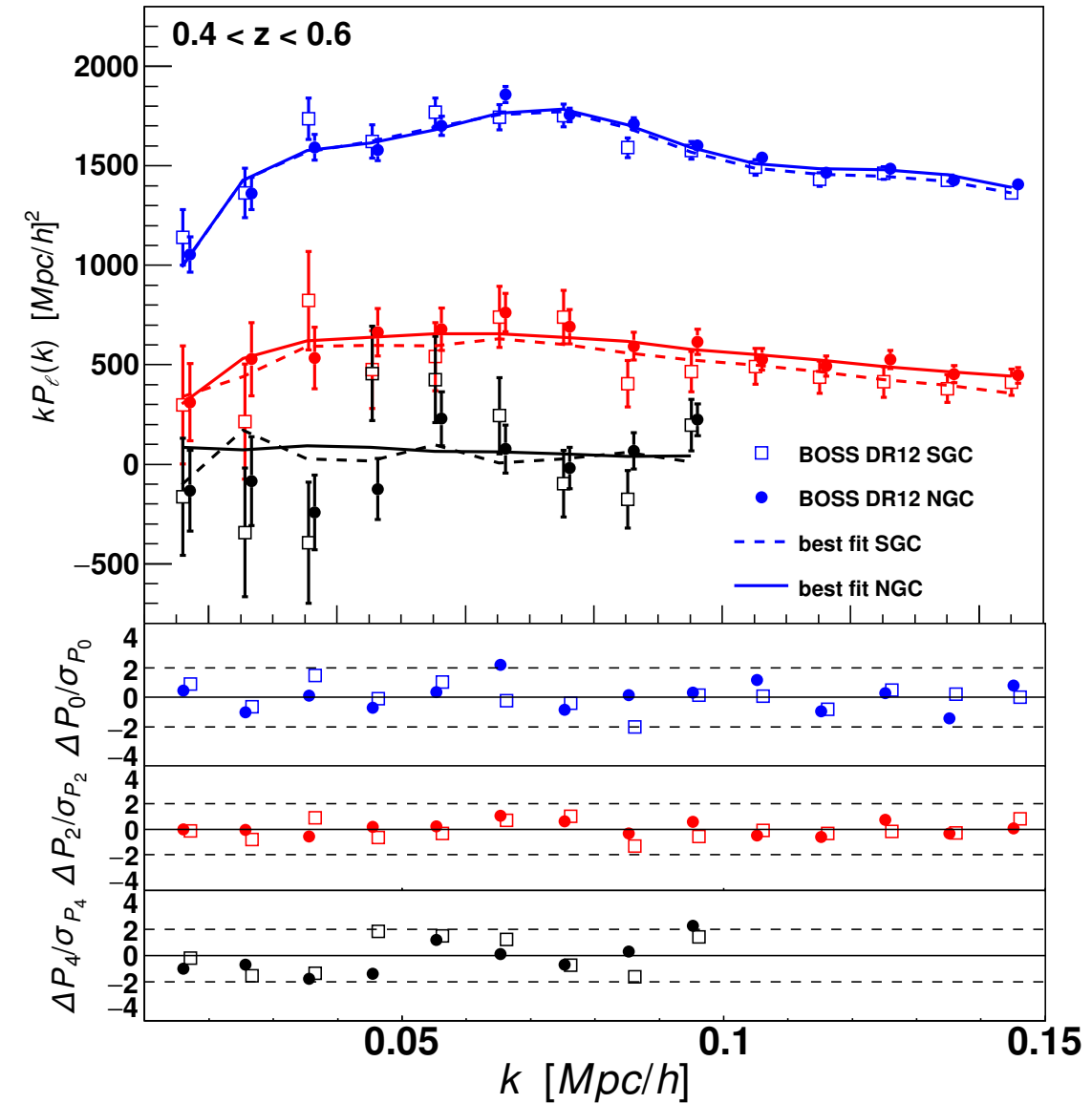
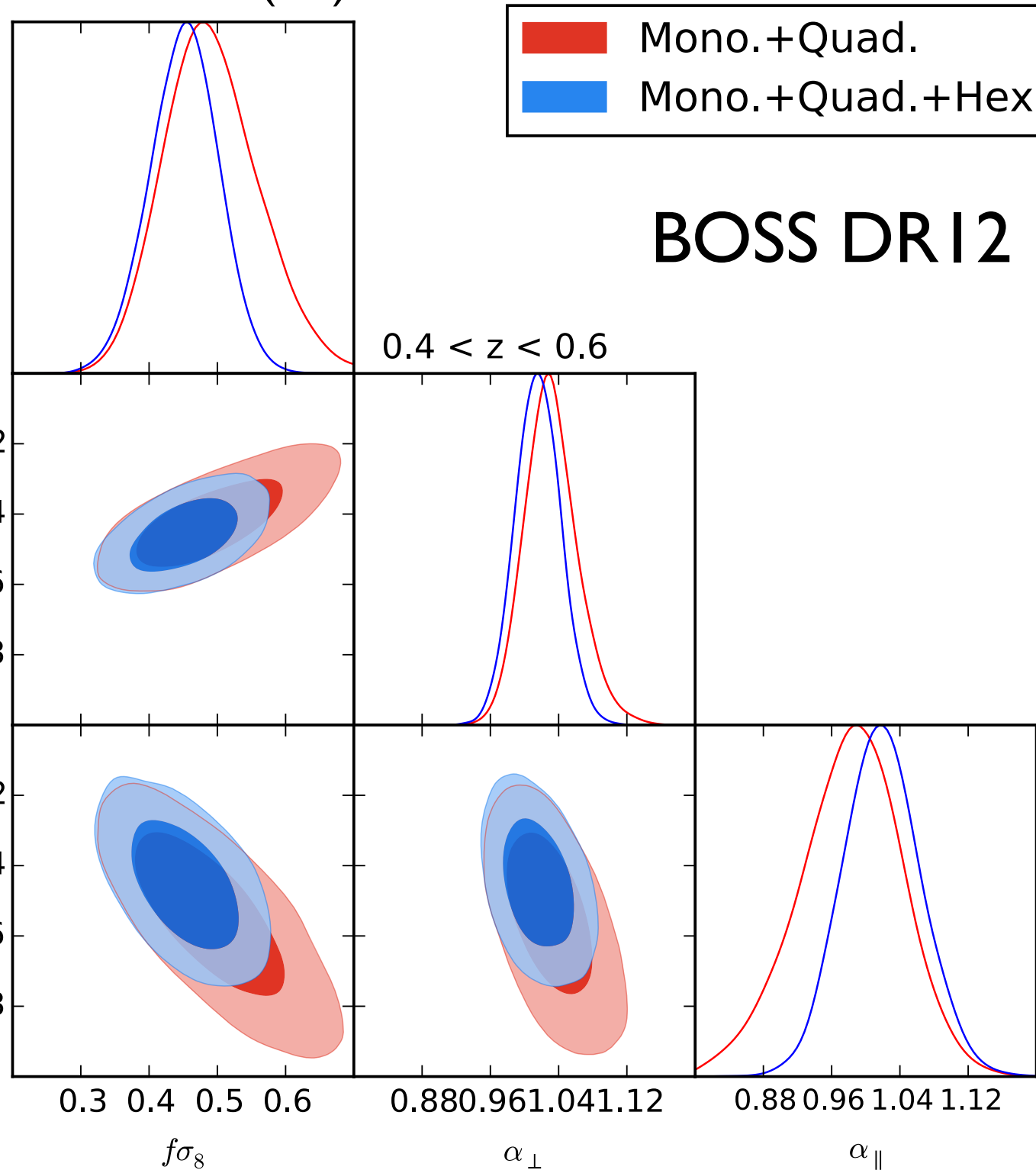
Sensitivity of clustering anisotropies to D_A , H & f

Obs. data: SDSS-II DR7 LRG

Oka et al.('13) modified

Cosmological constraints

Beutler et al. (16)



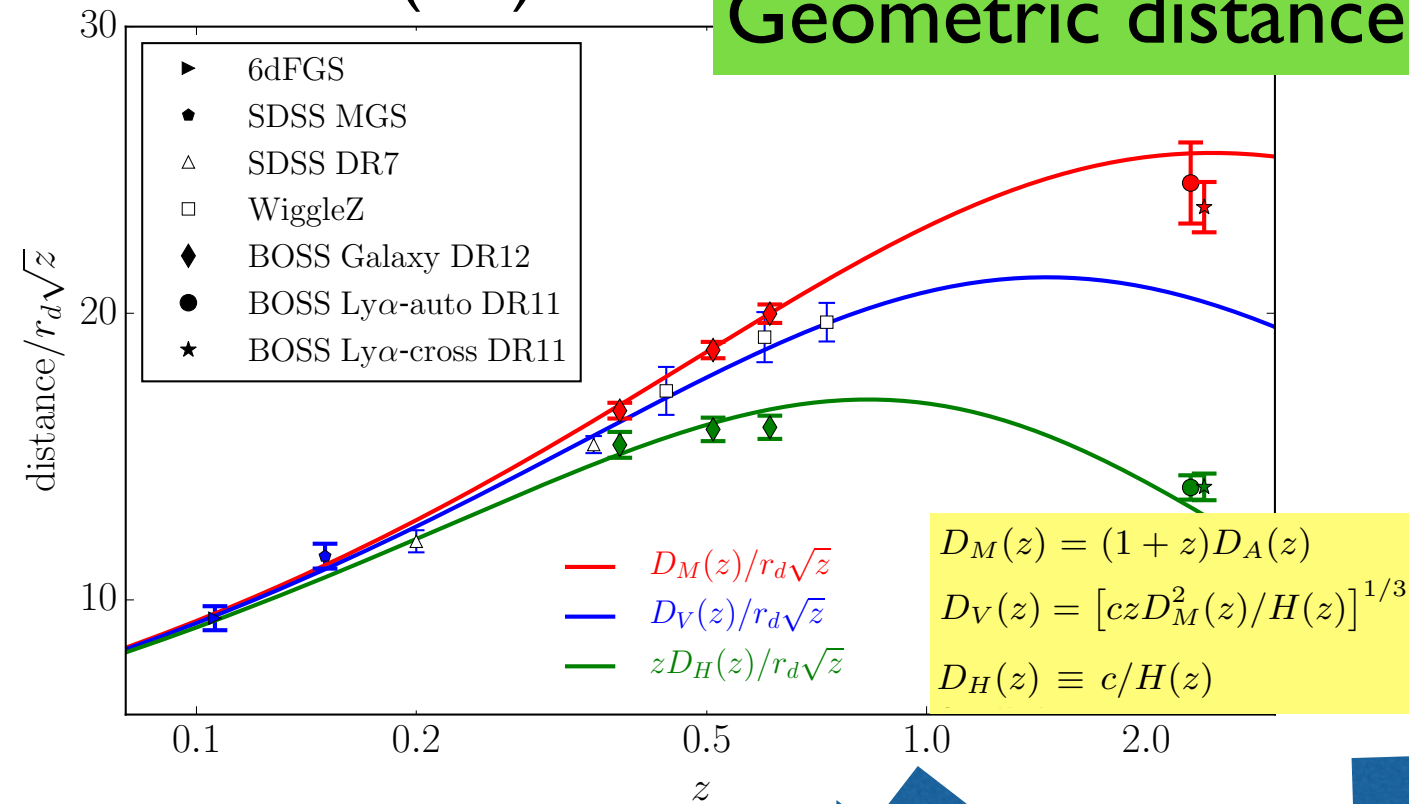
$$\alpha_{\parallel} = \frac{H^{\text{fid}}(z)r_s^{\text{fid}}(z_d)}{H(z)r_s(z_d)}$$

$$\alpha_{\perp} = \frac{D_A(z)r_s^{\text{fid}}(z_d)}{D_A^{\text{fid}}(z)r_s(z_d)}$$

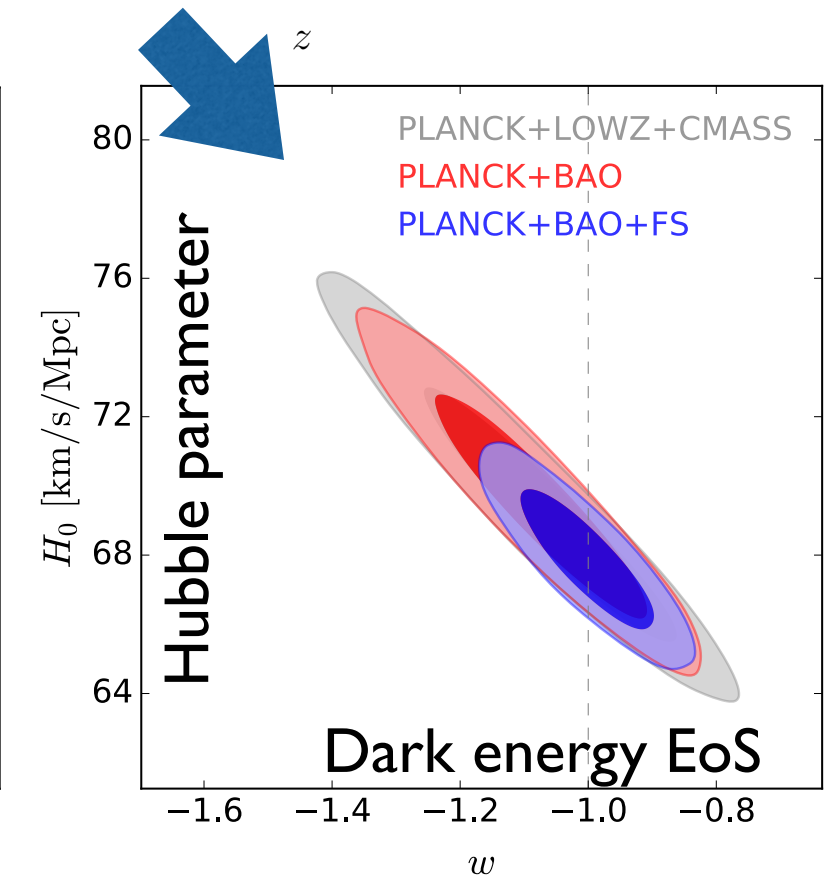
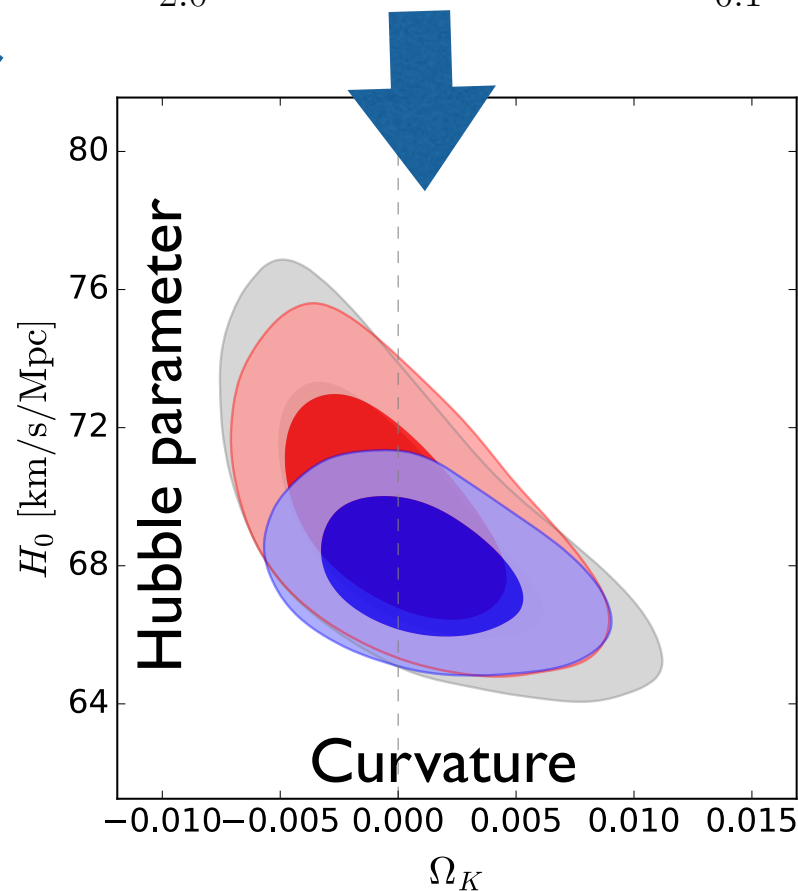
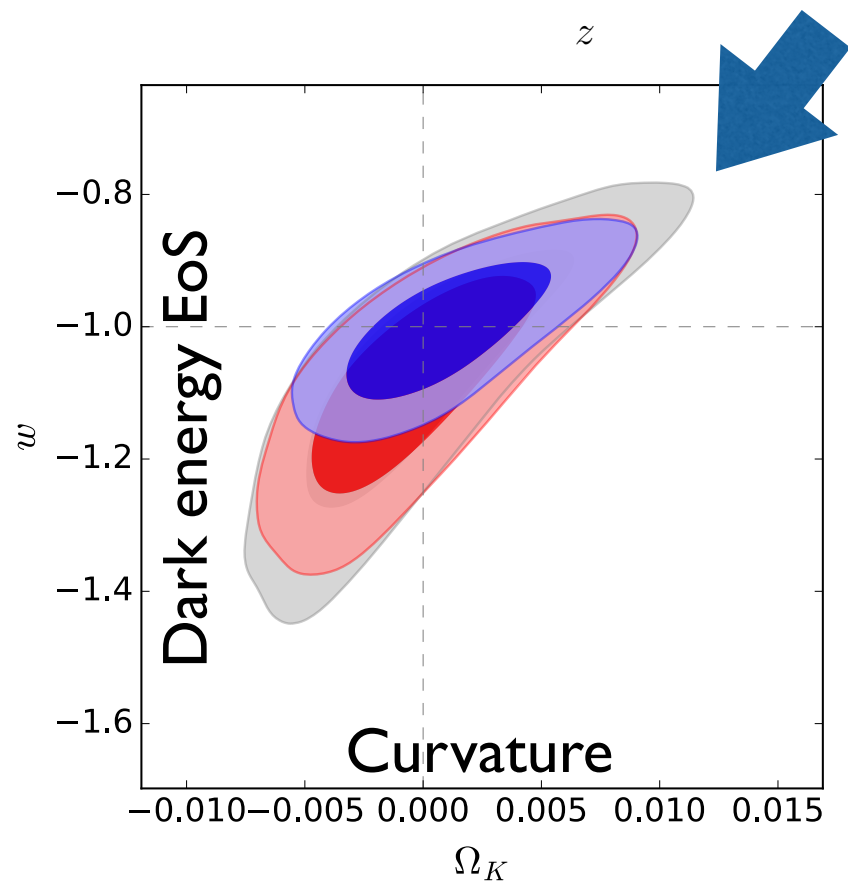
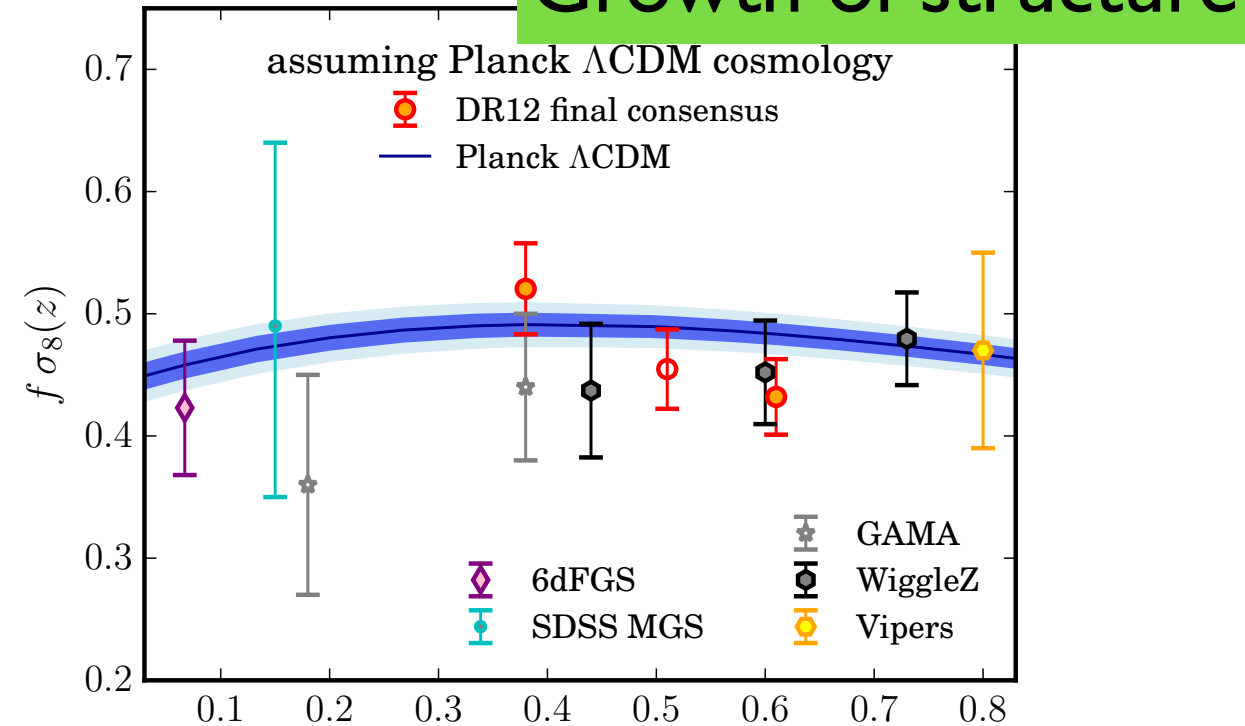
Cosmological constraints

Alam et al. ('16)

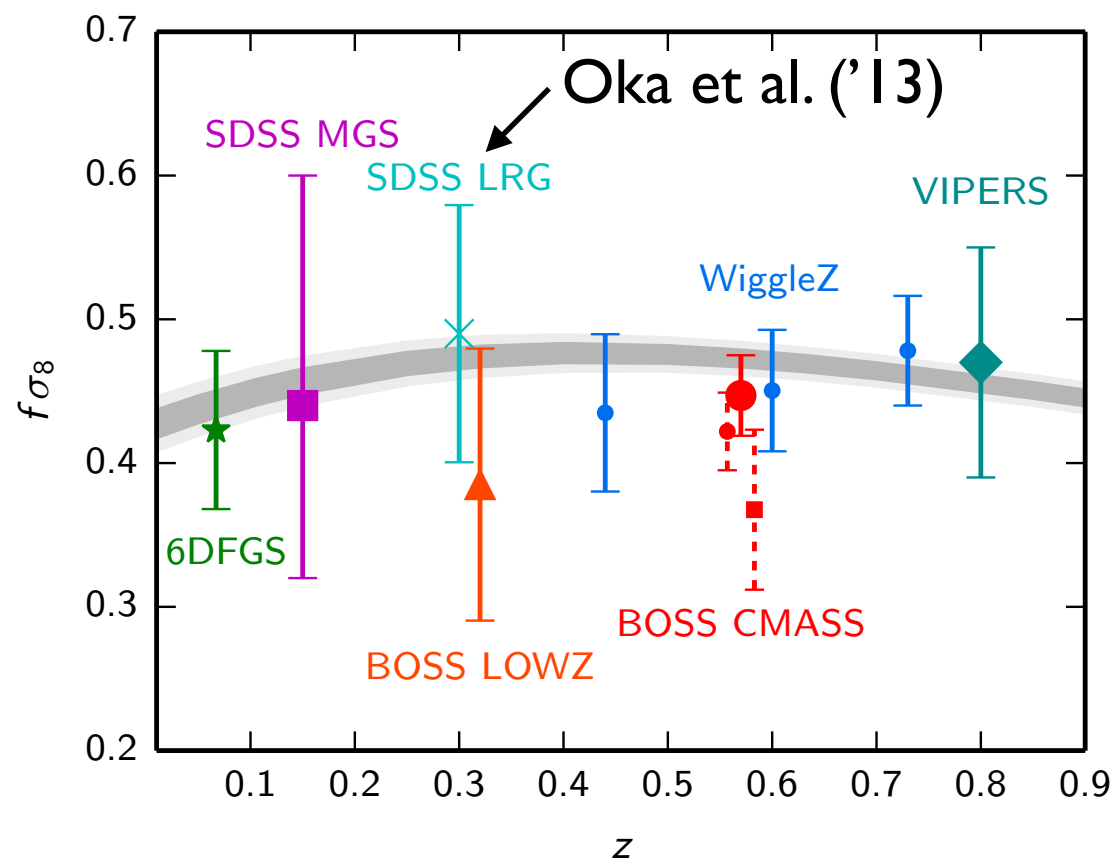
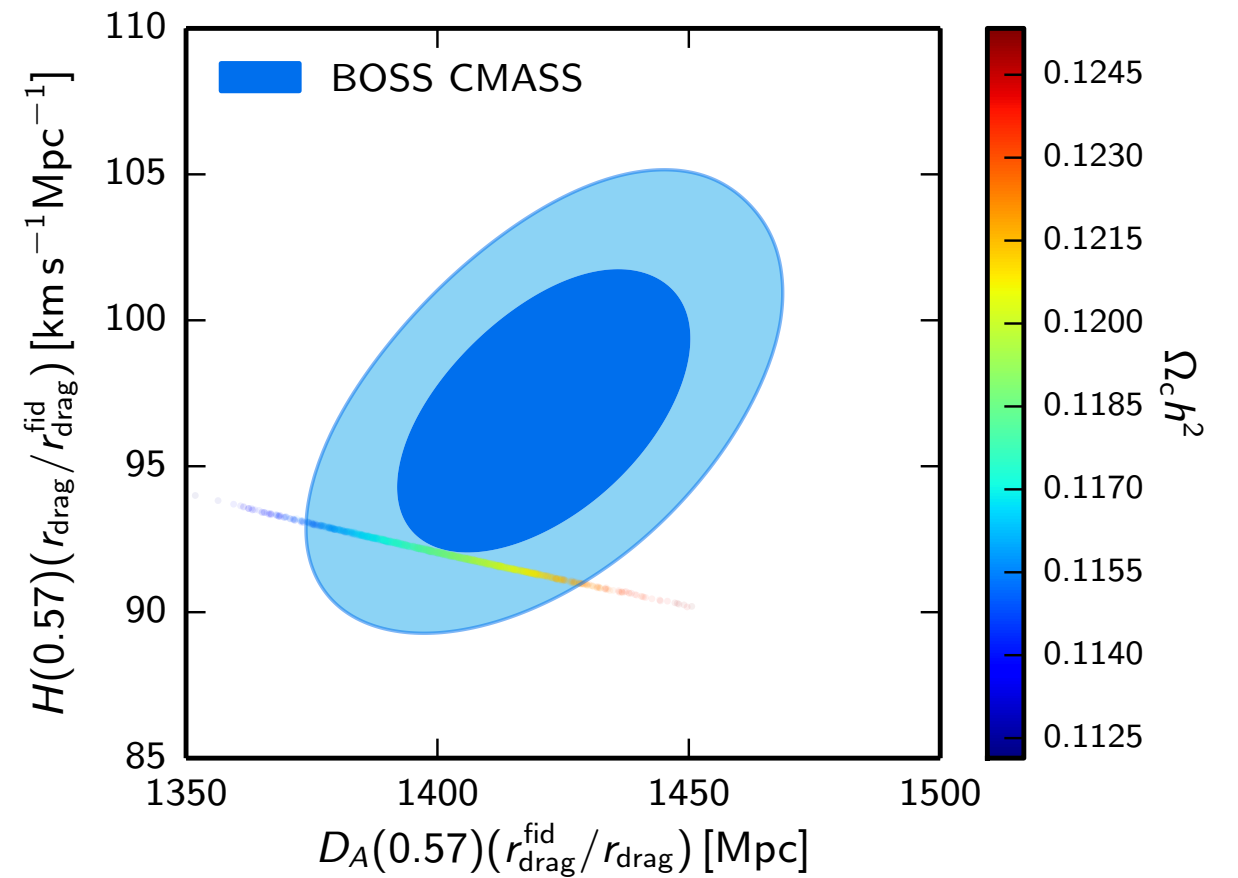
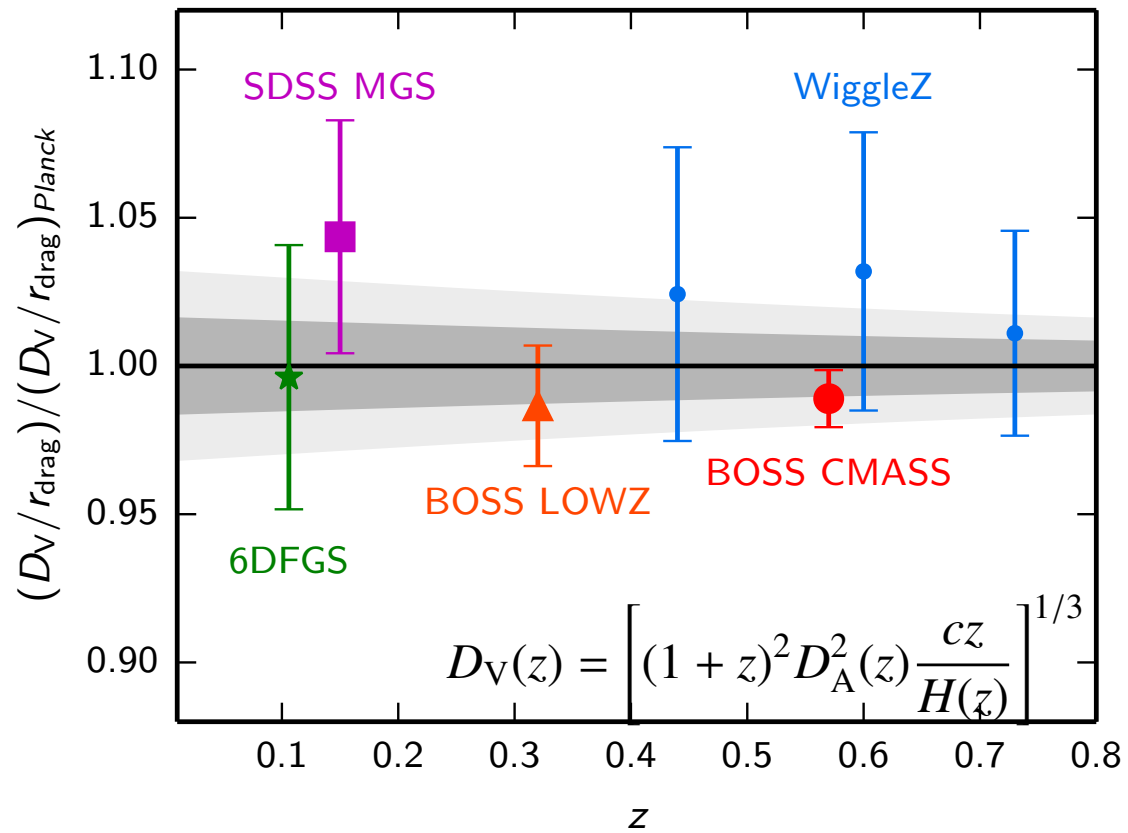
Geometric distances



Growth of structure



Compilation of other observations

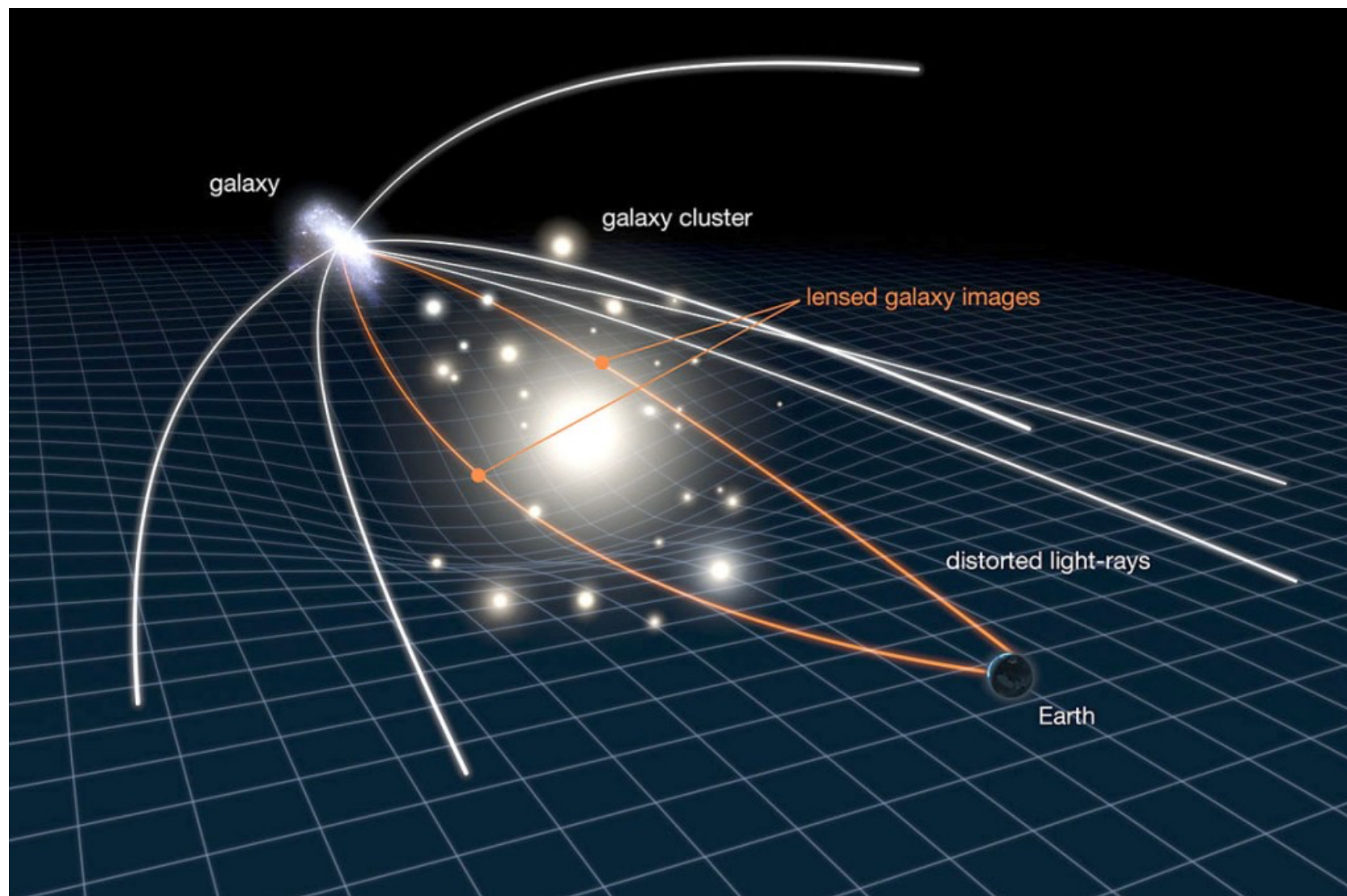


Planck 2015 results. XIII

(弱い) 重力レンズ効果

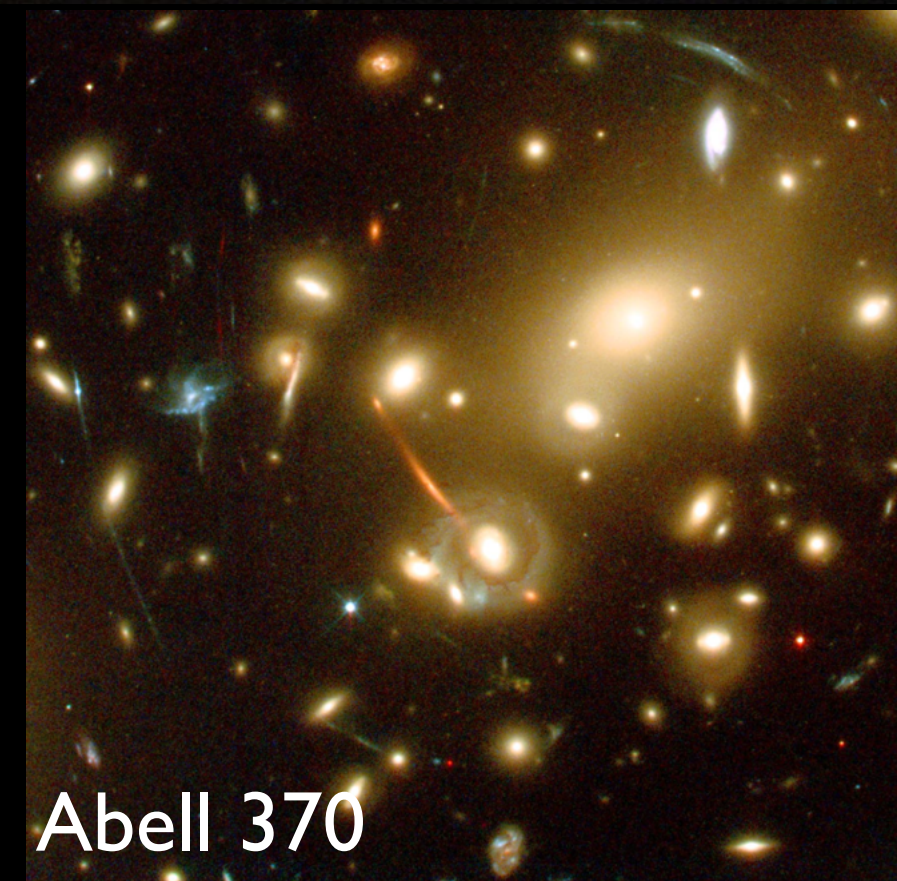
重力レンズ効果

星や銀河・銀河団などの重い天体の重力場によって光が曲げられる現象 → 強い重力レンズ、弱い重力レンズに大別



強い重力レンズ：多重像、増光（減光）がみえる
弱い重力レンズ：像の歪みがみえる

(強い) 重力レンズ効果

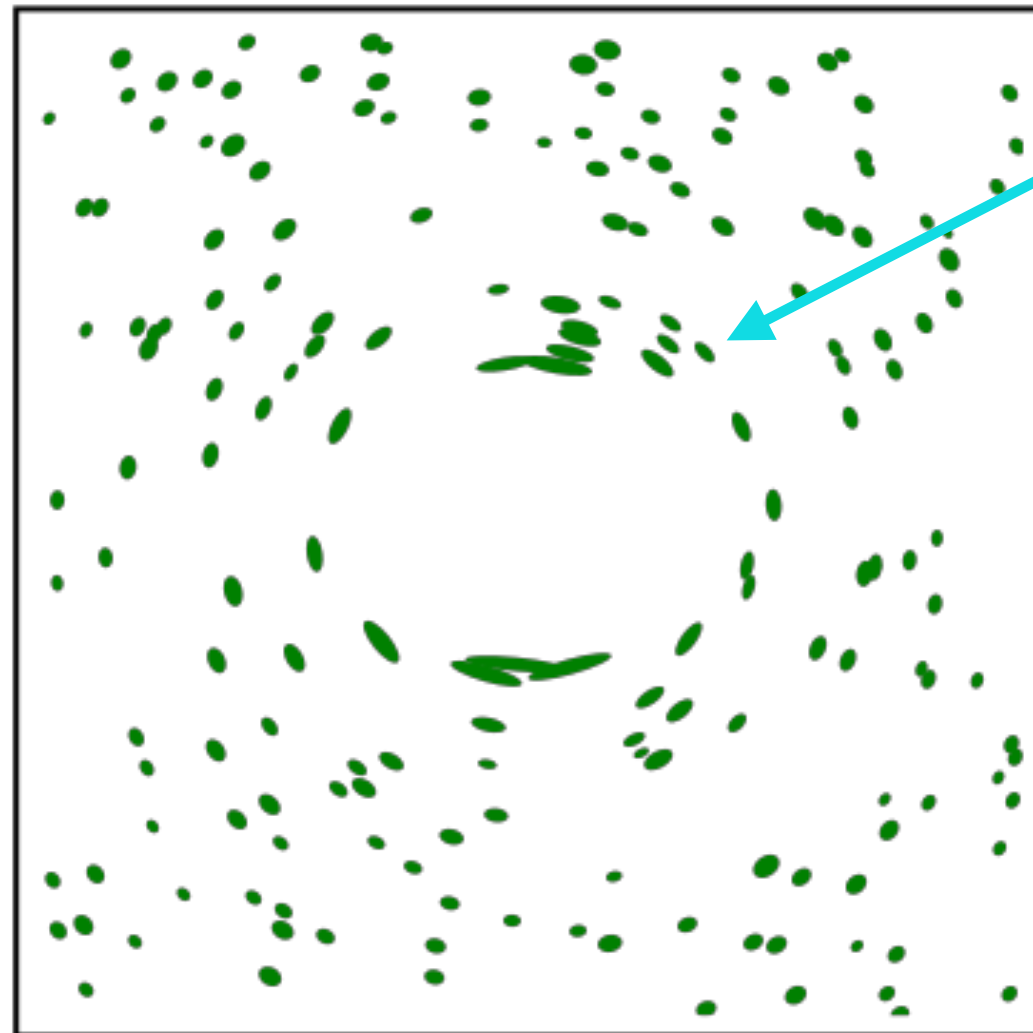
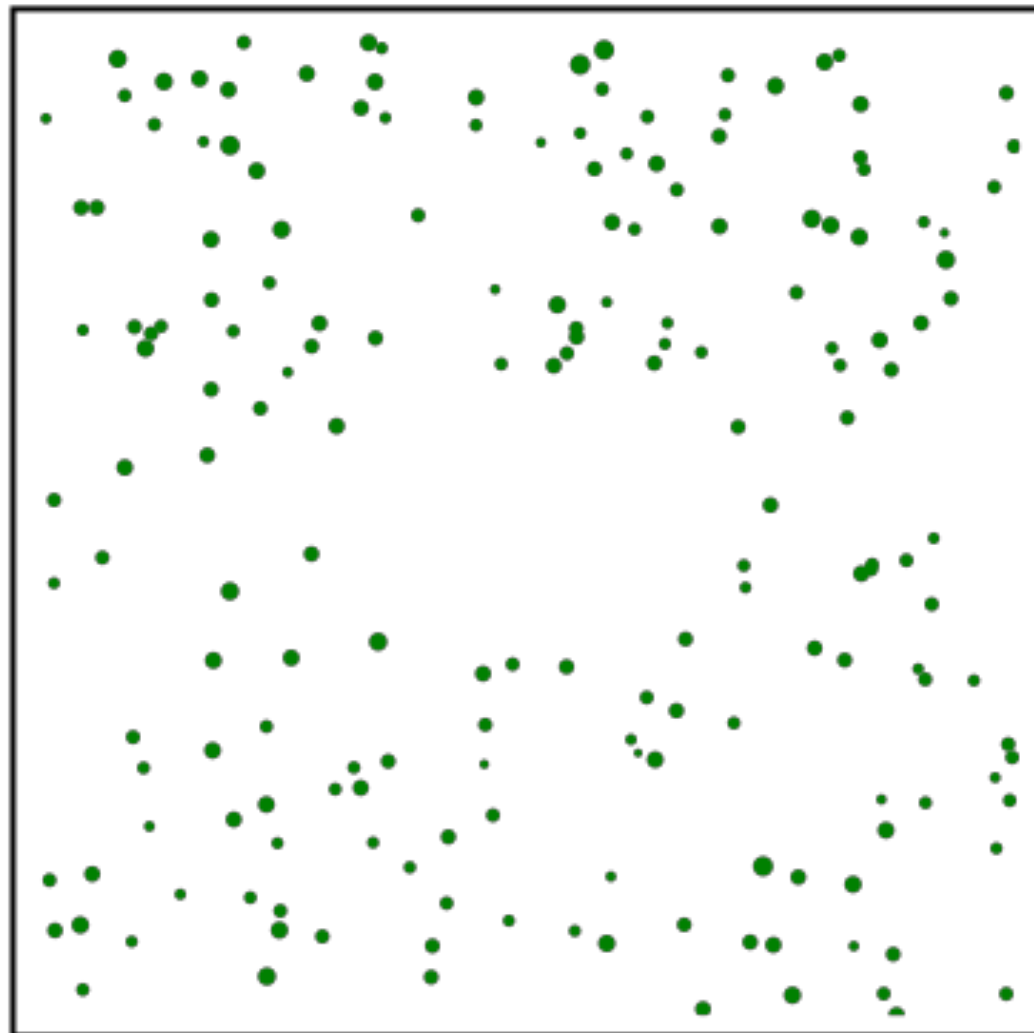


弱い重力レンズ効果

背景銀河の歪みから手前の見えない天体（ダークマターハロー）の性質を探ることができる

ダークマターなし

ダークマターあり



銀河のイメージの歪み

“弾丸” 銀河団

高温ガス

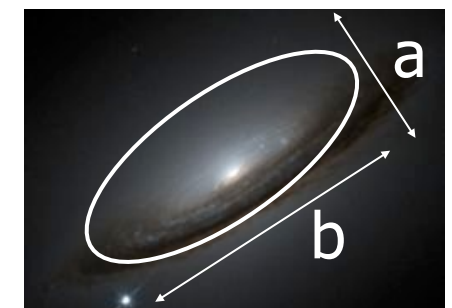
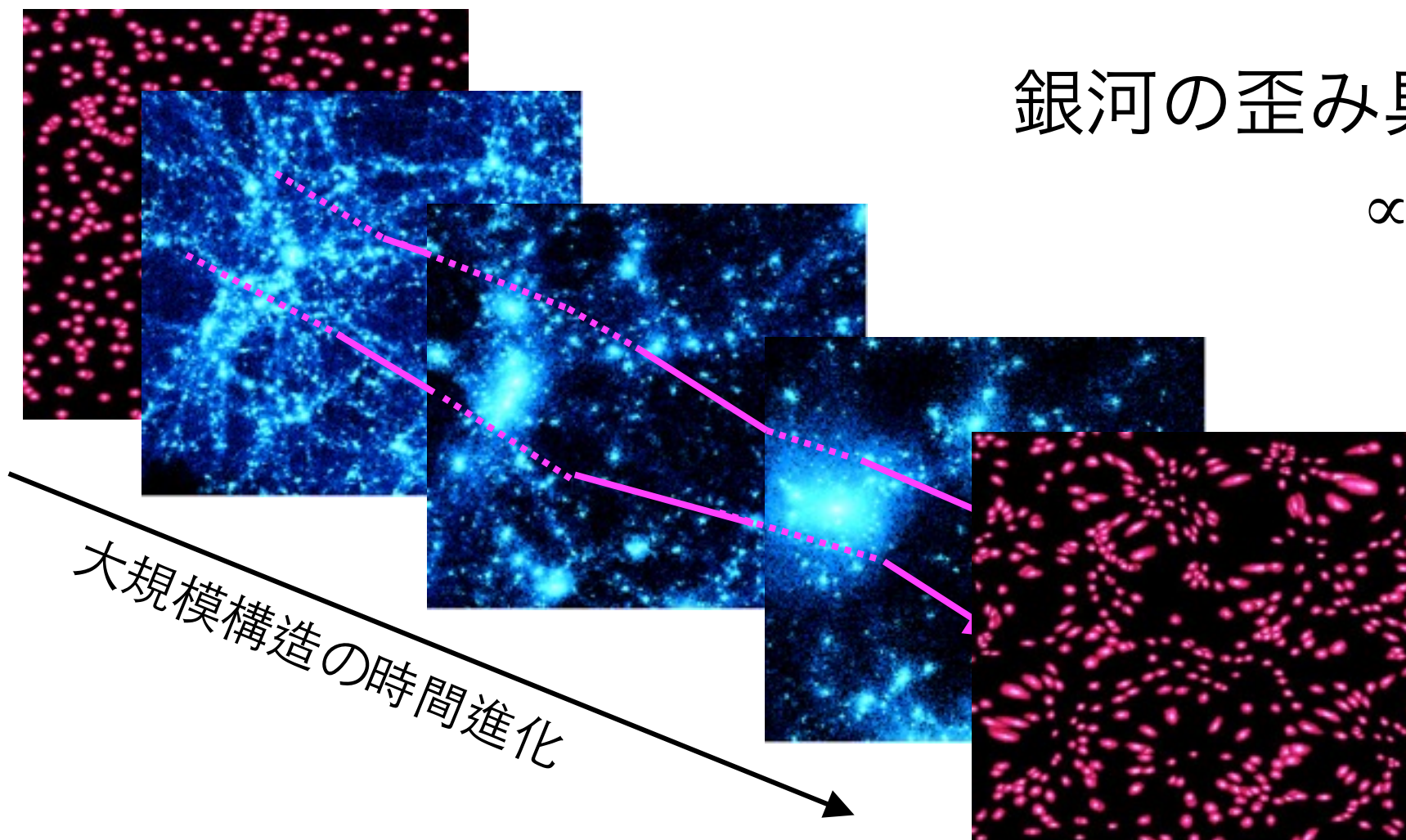
重力レンズ観測で見つかった質量密集領域
(ダークマターの証拠)

コスミック シア (Cosmic shear)

手前に存在する宇宙大規模構造が作る (弱い) 重力レンズ効果により、遠方の背景銀河のイメージが歪む現象

銀河の歪み具合 (楕円率)

\propto 幾何学的重み
 \times 密度ゆらぎの振幅



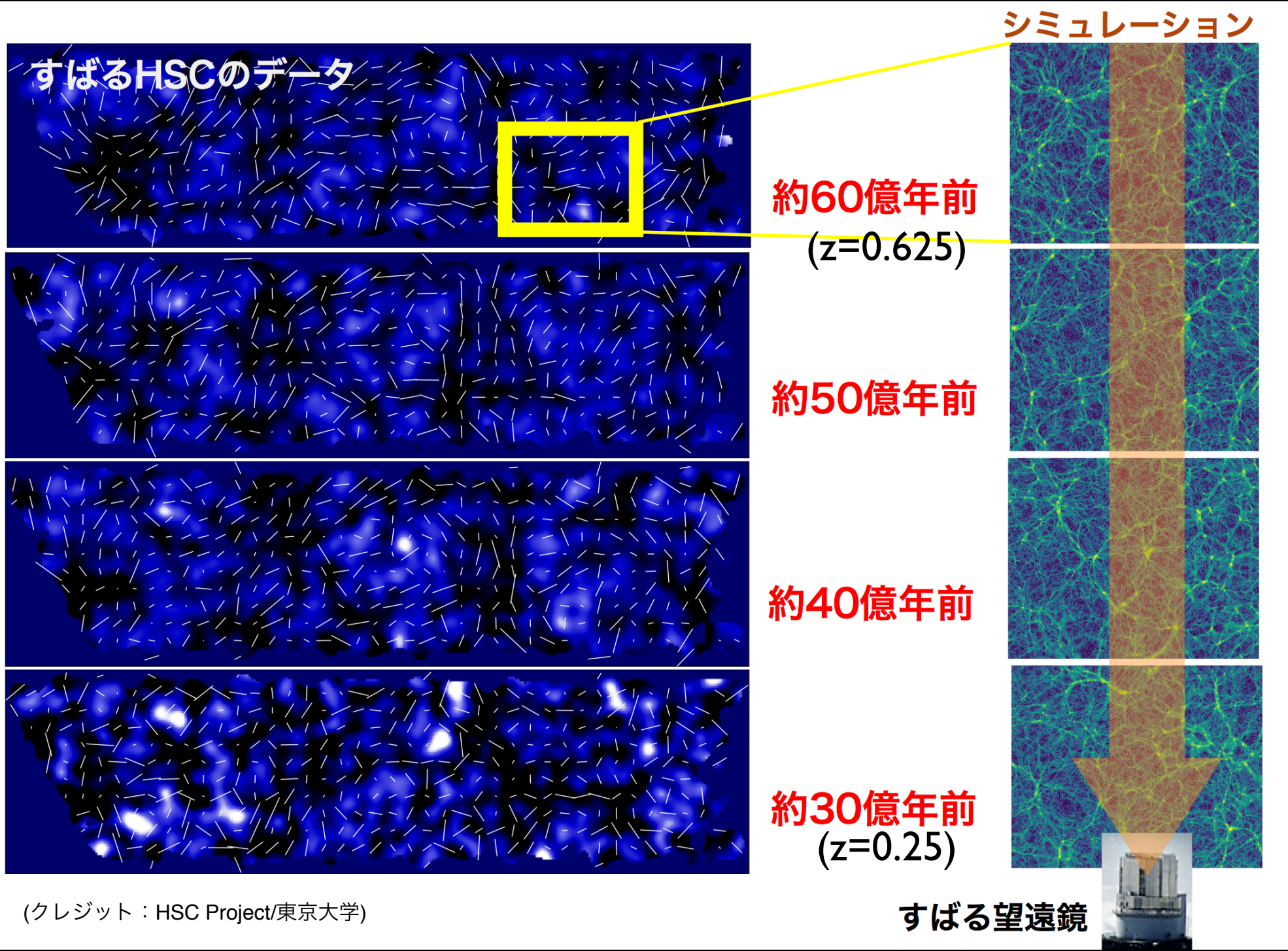
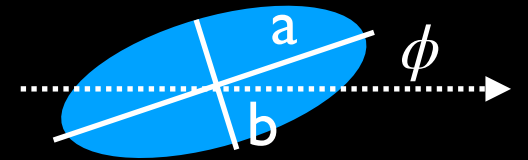
$$\gamma = \frac{a - b}{a + b}$$

イメージの歪みの空間相関から、宇宙大規模構造のもつ宇宙論的情報を引き出せる \rightarrow 精密宇宙論の基本観測量

Subaru HSC 1 year result

Ellipticity of each object :

$$e = (e_1, e_2) = \frac{1 - (b/a)^2}{1 + (b/a)^2} (\cos 2\phi, \sin 2\phi)$$



(クレジット : HSC Project/東京大学)

Cosmic shear statistics : theory

“Convergence field” (or Eモード) (平坦宇宙の場合)

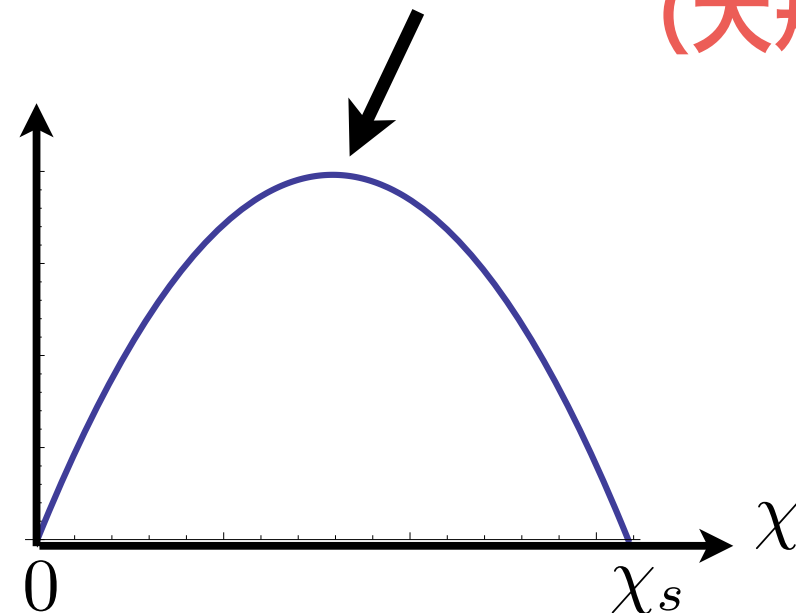
$$\kappa(\vec{\theta}) = \frac{3}{2} \Omega_m \frac{H_0^2}{c^2} \int_0^{\chi_\infty} d\chi_s n(\chi_s) \int_0^{\chi_s} d\chi \frac{\chi(\chi_s - \chi)}{\chi_s} \frac{\delta(\vec{\theta}, \chi)}{a(\chi)}$$

背景銀河の
分布

レンズカーネル
質量分布
(大規模構造)

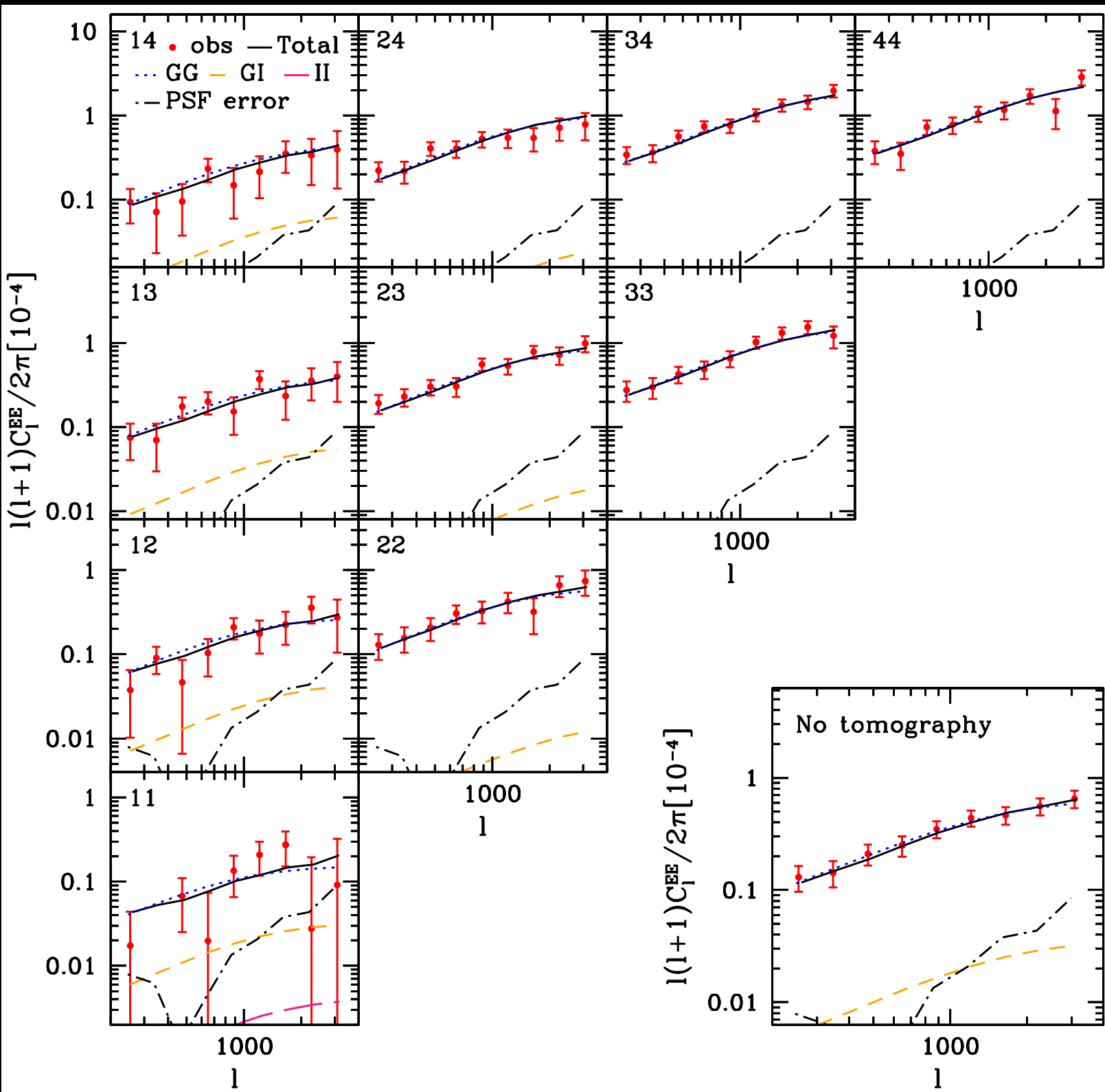
(共動) 動径距離 :

$$\chi(z) = \int_0^z \frac{c dz}{H(z)}$$



いろんな赤方偏移からの寄与が混じる (projection effect)

Cosmic shear power spectrum



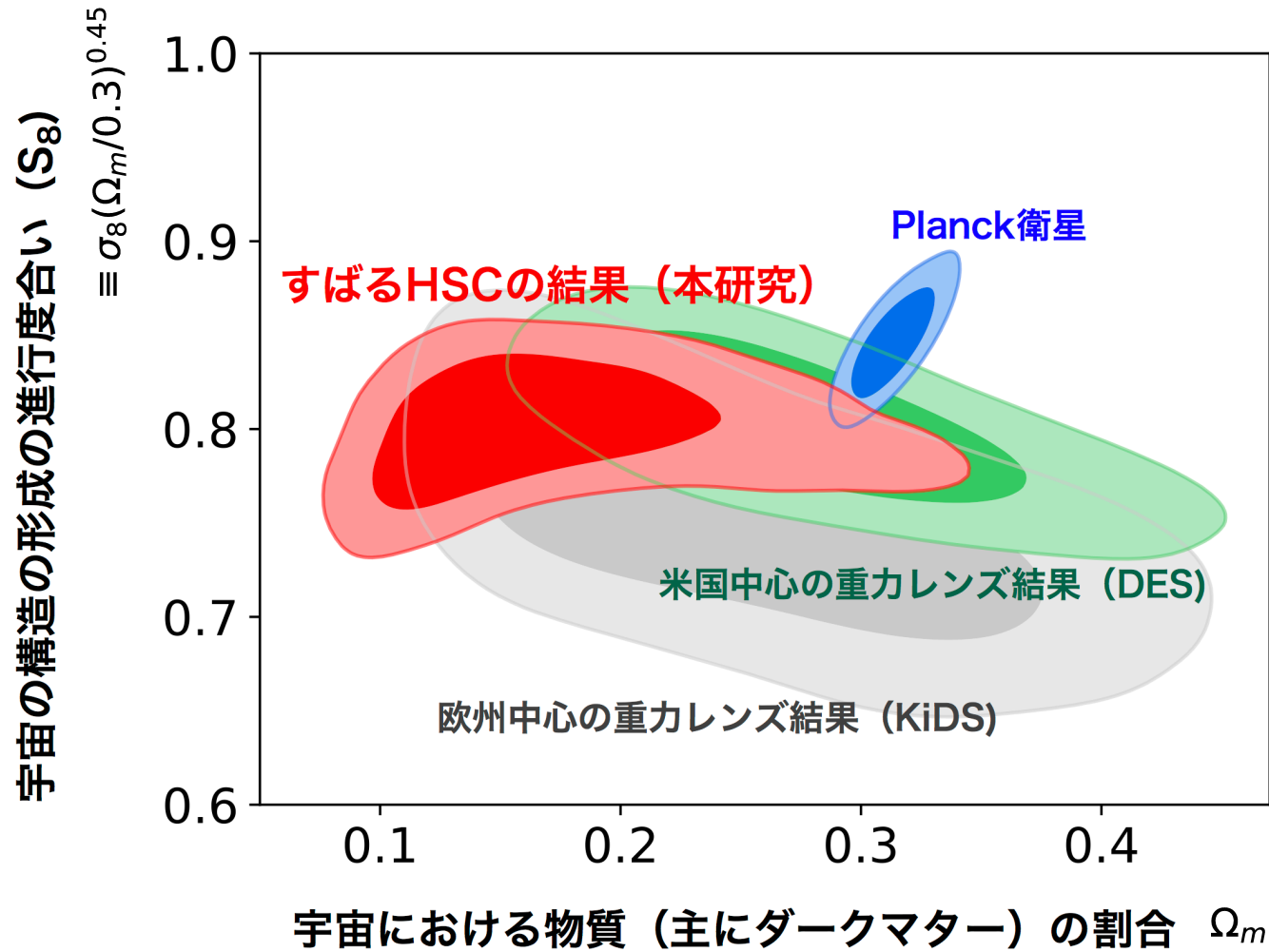
bin number	z range	z_{med}	N_g	n_g [arcmin $^{-2}$]
1	0.3 – 0.6	0.446	2842635	5.9
2	0.6 – 0.9	0.724	2848777	5.9
3	0.9 – 1.2	1.010	2103995	4.3
4	1.2 – 1.5	1.300	1185335	2.4
All	0.3 – 1.5	0.809	8980742	18.5

Auto- & cross power spectrum between multiple photo-z bins
(lensing tomography)

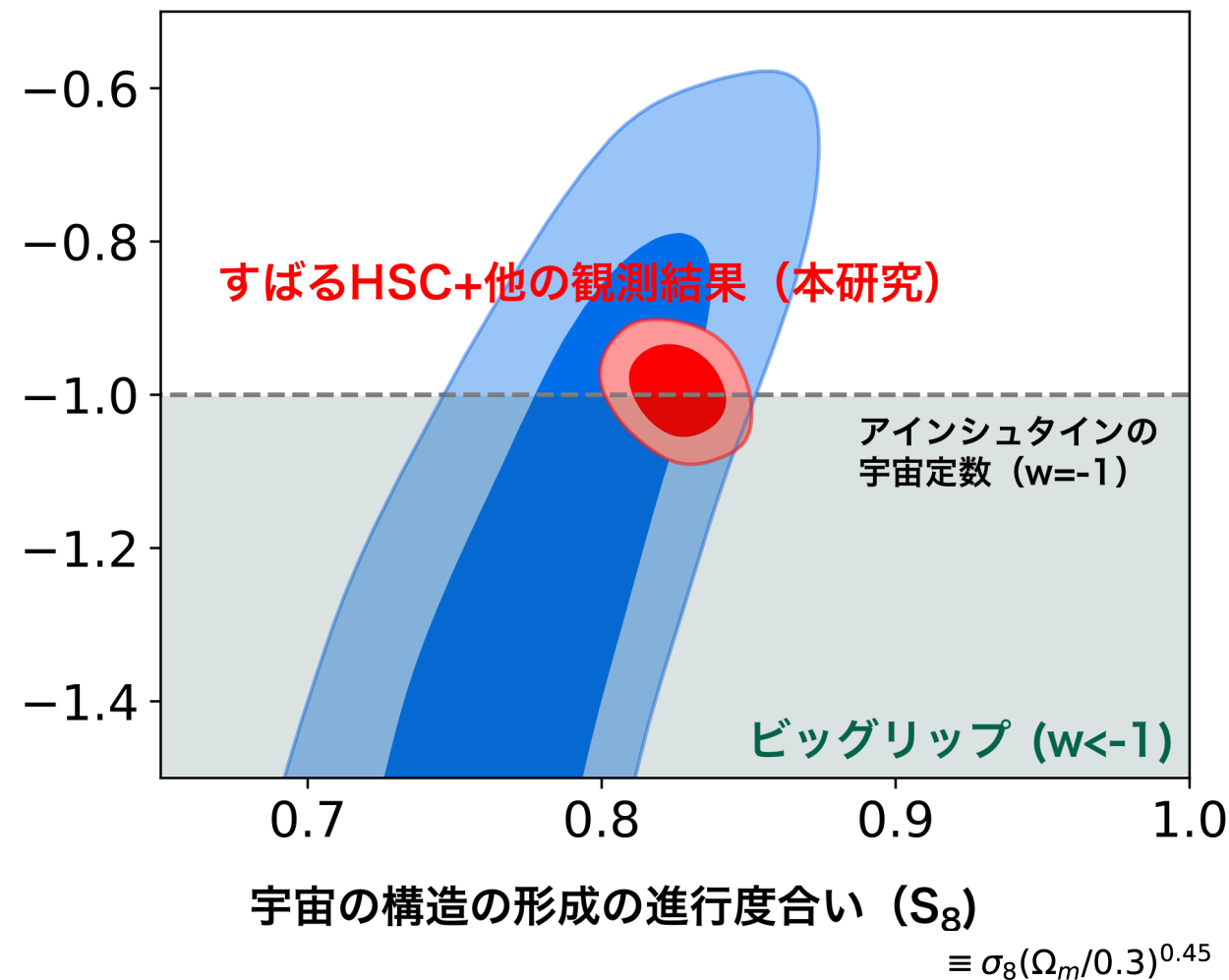
$$C_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |e_{\ell m}|^2$$

$$\left(e(\vec{\theta}) = \sum_{\ell, m} e_{\ell m} Y_{\ell m}(\vec{\theta}) \right)$$

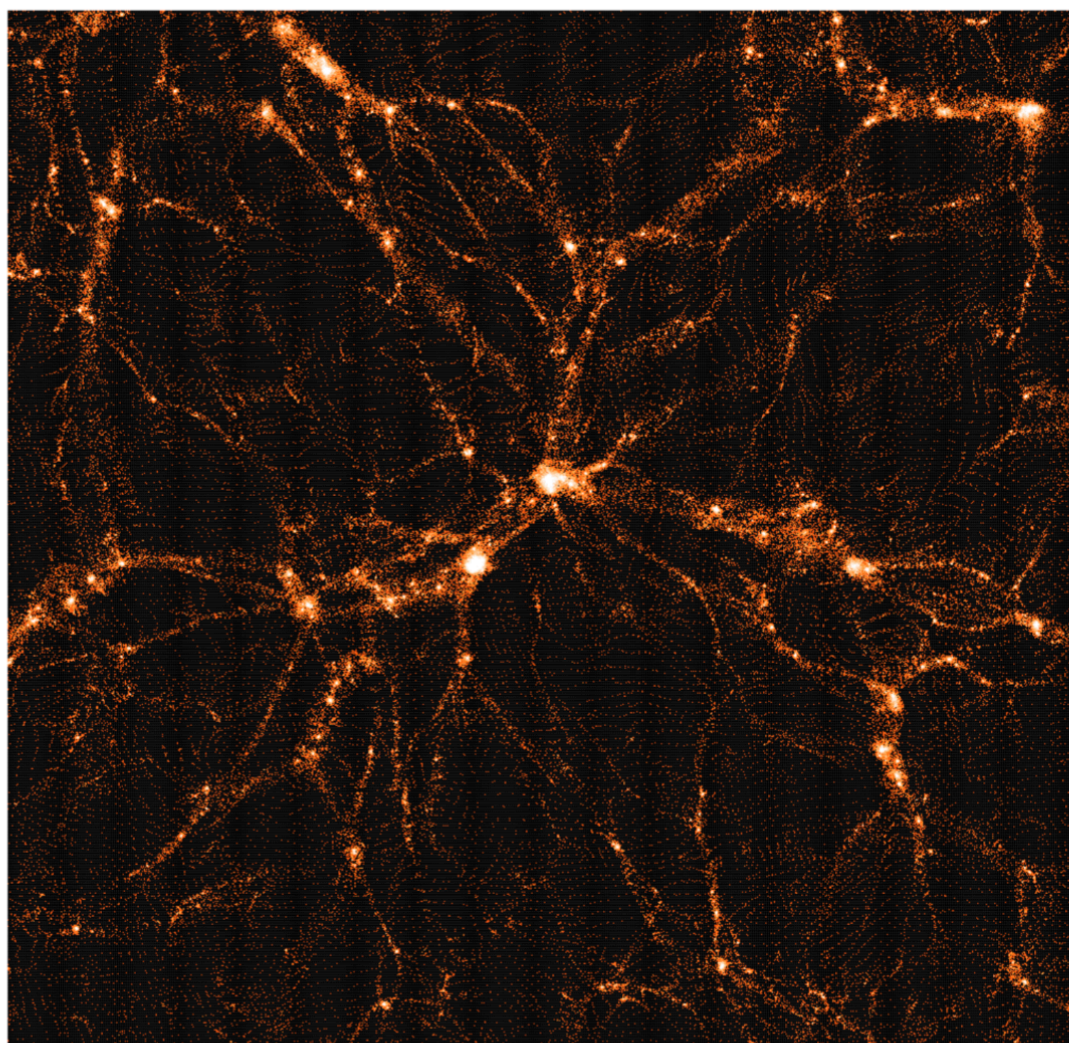
Cosmological constraint



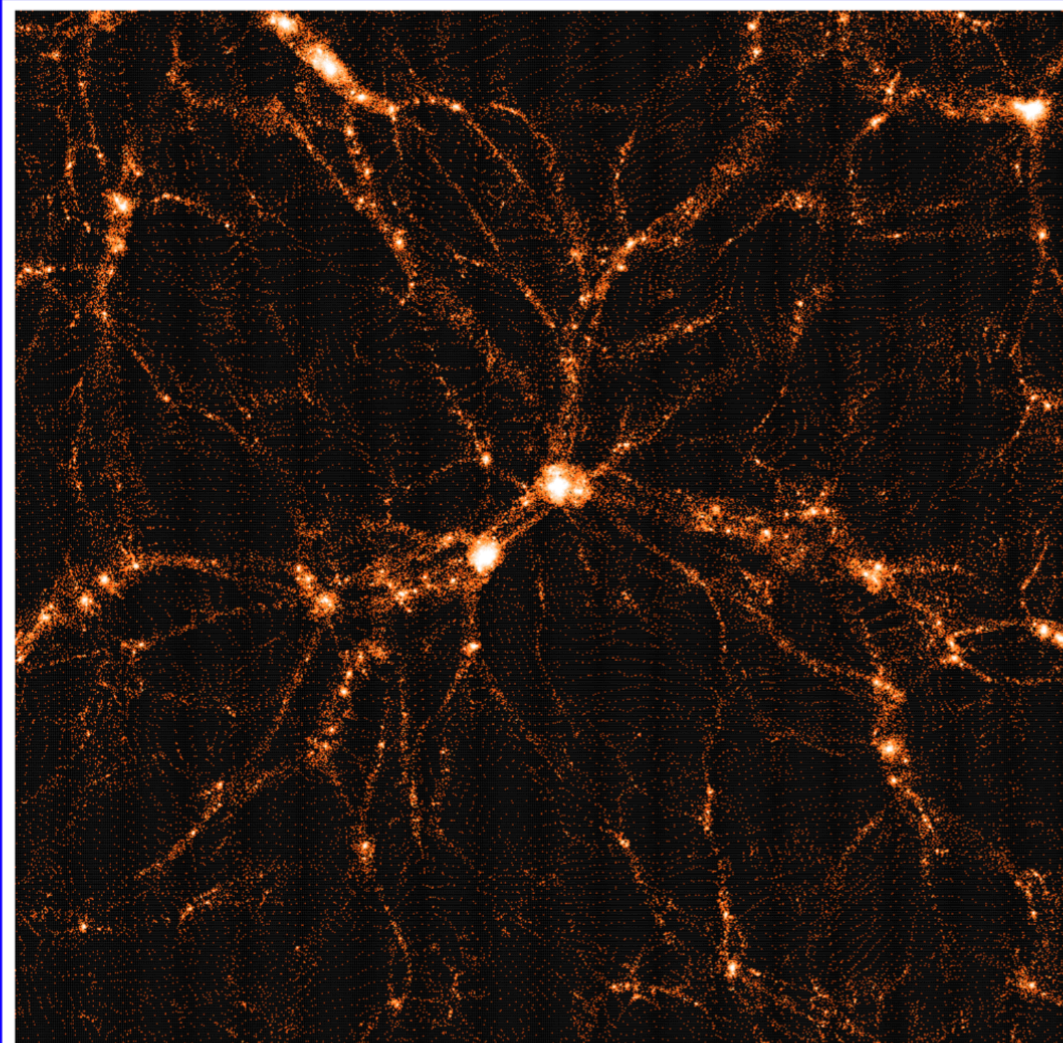
ダークエネルギーのパラメータ: w



HSCデータが支持する宇宙 (シミュレーション)



プランク衛星が支持する宇宙



相対論的効果による歪み

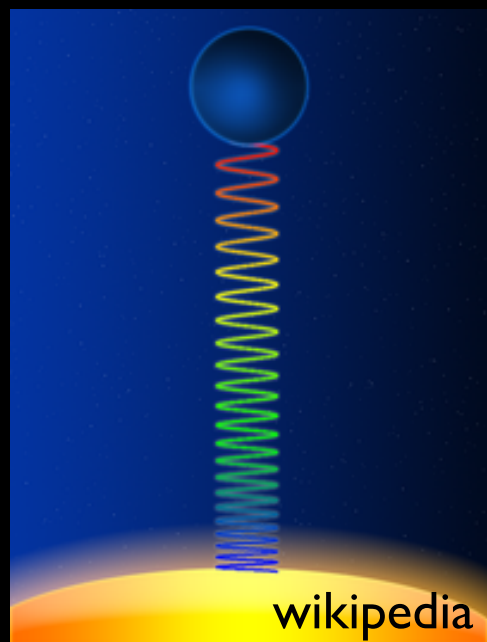
相対論的効果

大規模銀河サーベイによる高精度統計データは、

従来不可能だった**新しい相対論効果**の検出を可能にする

(かもしれない)

従来の赤方偏移空間ゆがみに加え、



横ドップラー効果

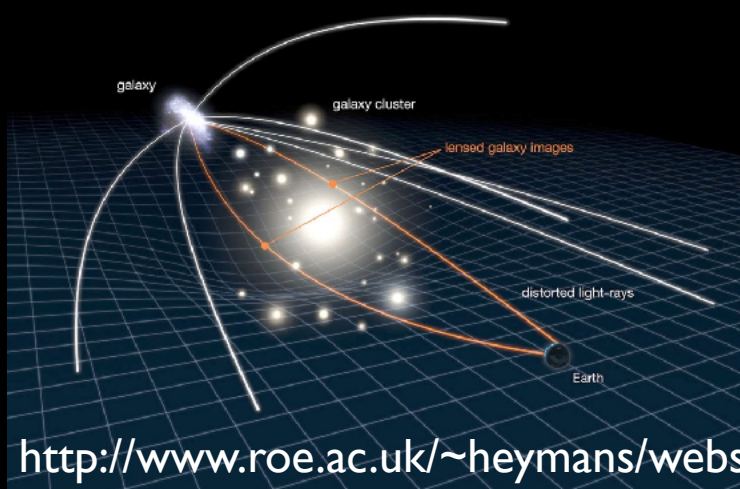
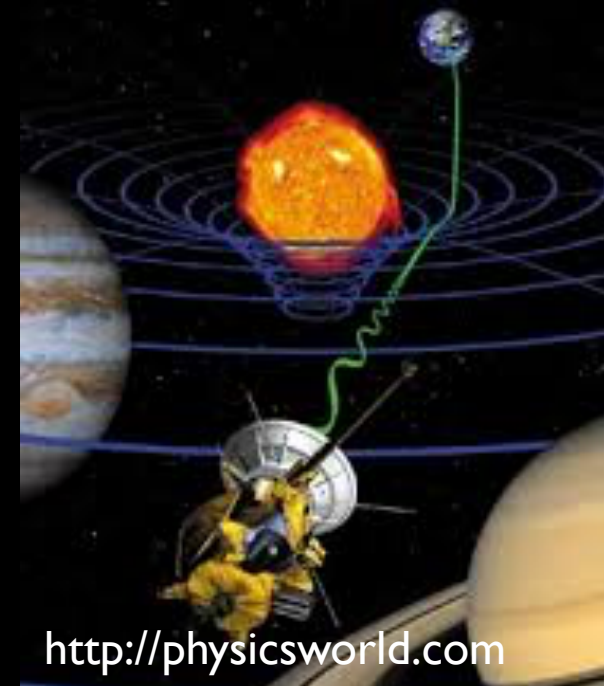
重力赤方偏移効果

積分ザックス-ヴォルフェ効果

弱重力レンズ効果

光円錐効果

シャピロ時間遅延効果



Yoo, Fitzpatrick & Zaldarriaga ('09);
McDonald ('09); Yoo ('10), Challinor
& Lewis ('11); Bonvin & Durrer ('11)

観測空間とは何か？

我々は観測量を本当に理解しているか？



摂動入りのフリードマン宇宙における光の経路を考える：

$$ds^2 = \left[-(1 + 2\Psi/c^2)(c dt)^2 + a^2(t)(1 + 2\Phi/c^2)\delta_{ij}dx^i dx^j \right]$$

天体から観測者までを結ぶ光の測地線を解く：

Null geodesic : $\frac{dk^a}{d\lambda} + \Gamma_{bc}^a k^b k^c = 0$ $k^a k_a = 0$ $k^a = \frac{dx^a}{d\lambda}$

Redshift : $1 + z = \frac{(k_a u^a)_S}{(k_a u^a)_O}$ u^a Observer/source's 4-velocity

(相対論的) 赤方偏移空間

E.g., Challinor & Lewis ('11)

(光で見た) 観測者からの銀河の位置

$$\mathbf{s} = \mathbf{x} + \mathbf{n} \left\{ \frac{c}{H} \delta z - \frac{1}{c^2} \int_0^{\chi(z_{\text{obs}})} d\chi' (\Psi - \Phi) \right\} - \chi(z_{\text{obs}}) \boldsymbol{\alpha}$$

シャピロ時間遅延

\mathbf{n} : 視線方向 (単位ベクトル)

χ : 共動距離

重力レンズ効果による光の折れ曲り:

天球面の位置

$$\vec{\theta}_{\text{obs}} = \vec{\theta}_{\text{source}} - \vec{\alpha} ; \quad \vec{\alpha} = -\frac{1}{c^2} \int_0^{\chi(z_{\text{obs}})} d\chi' \frac{\chi(z_{\text{obs}}) - \chi'}{\chi(z_{\text{obs}})} \nabla_{\perp} (\Psi - \Phi)$$

曲がり角

特殊・一般相対論的な光のエネルギーシフト

赤方偏移

For rest-frame observer

$$z = z_{\text{obs}} - \delta z ;$$

横ドップラー

$$\delta z = (1 + z_{\text{obs}}) \left\{ \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_s}{c} - \frac{\Psi_s}{c^2} + \frac{1}{2} \frac{v_s^2}{c^2} - \frac{1}{c^2} \int_{t_s}^{t_o} dt' (\dot{\Psi} - \dot{\Phi}) \right\}$$

standard RSD

(古典ドップラー)

重力赤方偏移

積分ザックス-ヴォルフエ

オーダー評価

効果	$\frac{\delta z}{1+z}$	[km/s]
Standard RSD (古典ドップラー)	$O(>10^{-3})$	$O(>10^2)$
重力赤方偏移	$O(10^{-5})$	$O(1)$
横ドップラー	$O(10^{-5})$	$O(1)$
積分ザックス-ヴォルフエ	$O(<10^{-5})$	$O(<1)$
		e.g., Cai et al. ('16); Sakuma et al. ('17)
重力レンズの曲がり角	$O(10^{-3})$ rad ~ $O(1)$ arcmin	(コヒーレンス: few deg or ell~100)
シャピロ時間遅延	$O(1)$ Mpc	(コヒーレンス: 100 deg or ell~2)
		e.g., Hu & Cooray ('01); Lewis & Challinor ('06)

相対論的ゆがみのシミュレーション

M-A. Breton, Y. Raseria, AT, O. Lacombe & S. Saga
arXiv:1803.04294

標準的なN体コード(RAMSES)から

➡ ダークマター・ハロー分布のスナップショット

- 光円錐上の重力ポテンシャルデータを保存
- 光の測地線方程式を観測者から天体（ハロー）に向けて逆解きする（ただし $\Phi = \Psi$ を仮定）

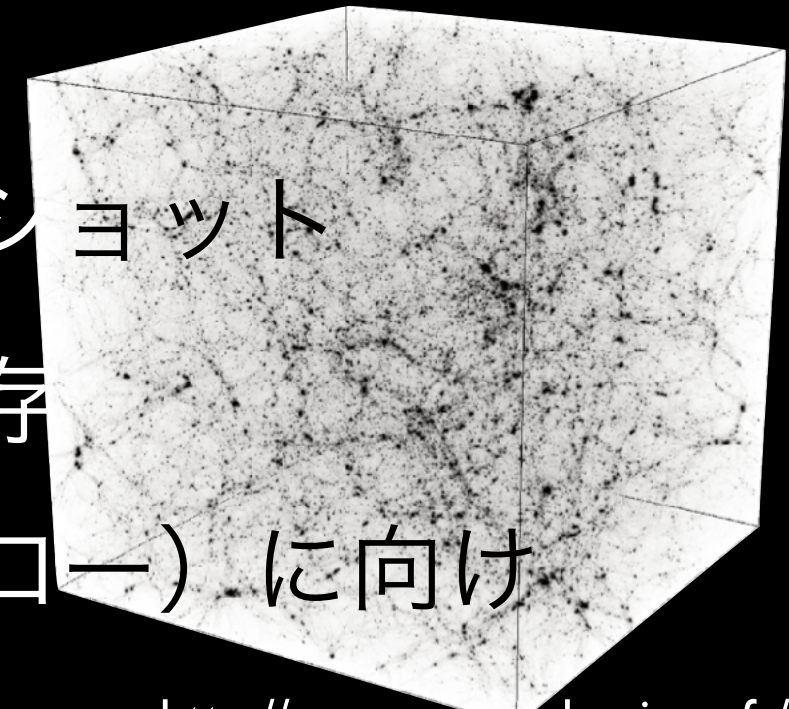
→ ゆがんだ天球面の位置 & 赤方偏移：

$$1 + z = \frac{(g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu)_s}{(g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu)_o}$$

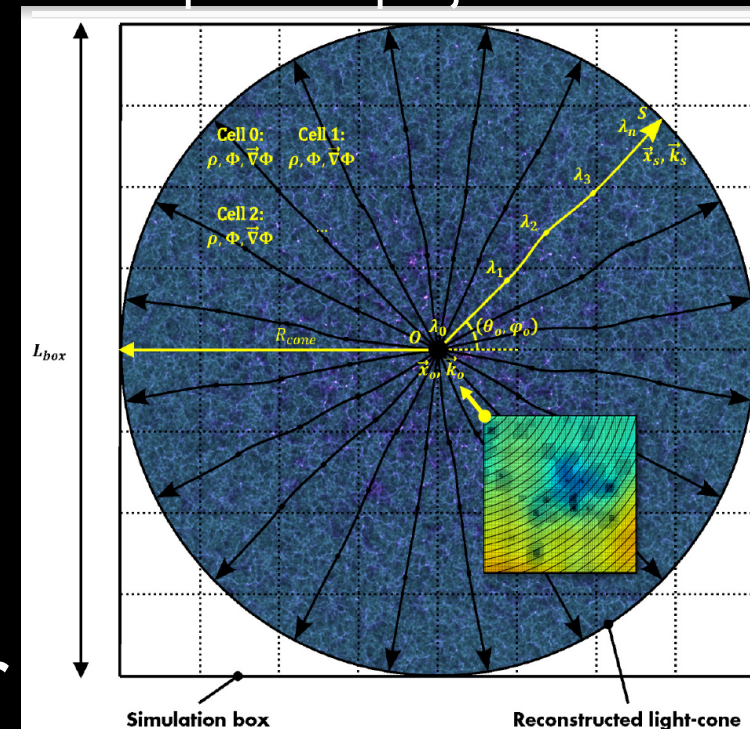
弱場近似の下で考えられる

相対論的効果全てが入る

k^μ : null 4-vector u^μ : observer's or source's 4-vector



<http://www.projet-horizon.fr/>



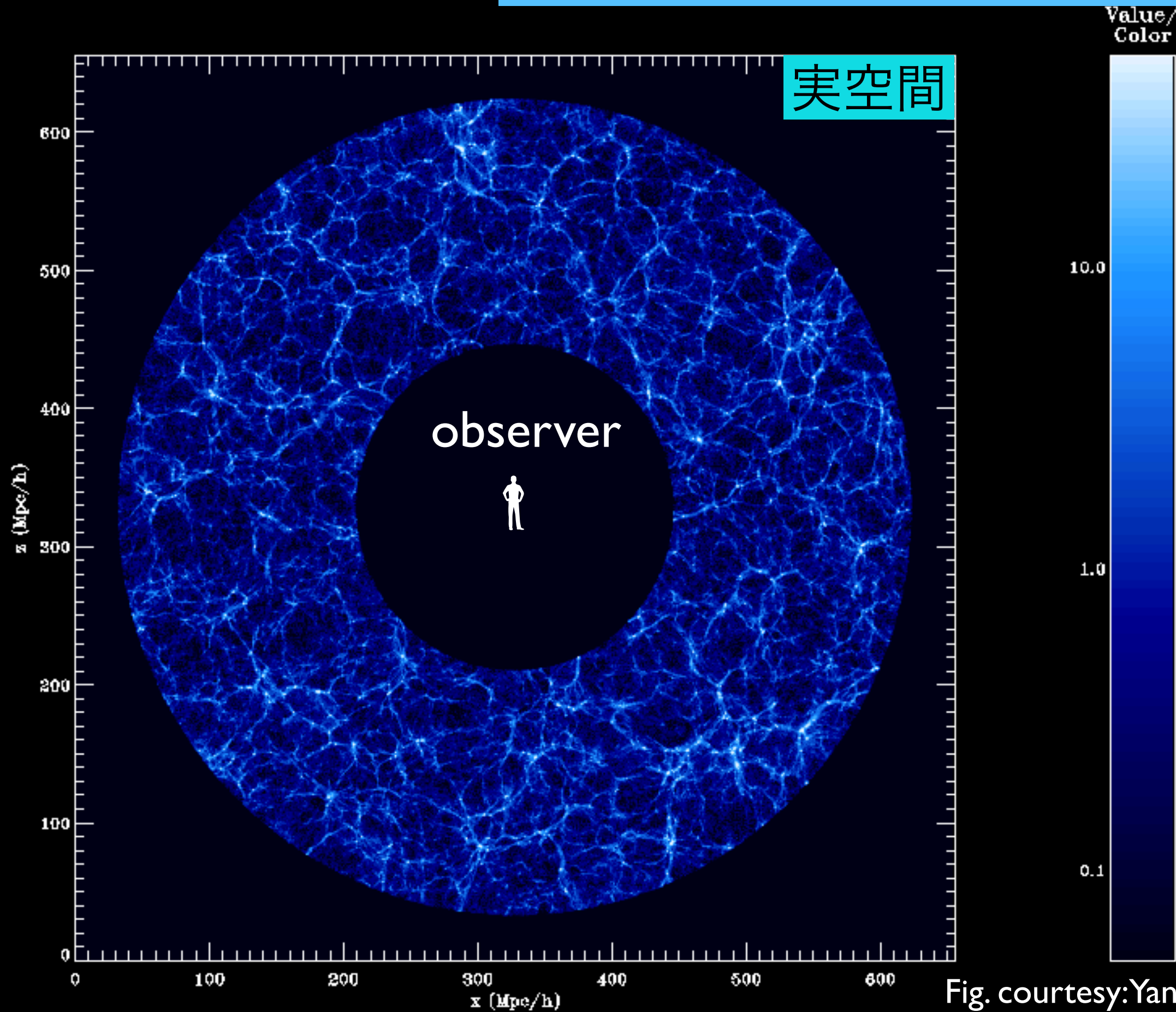
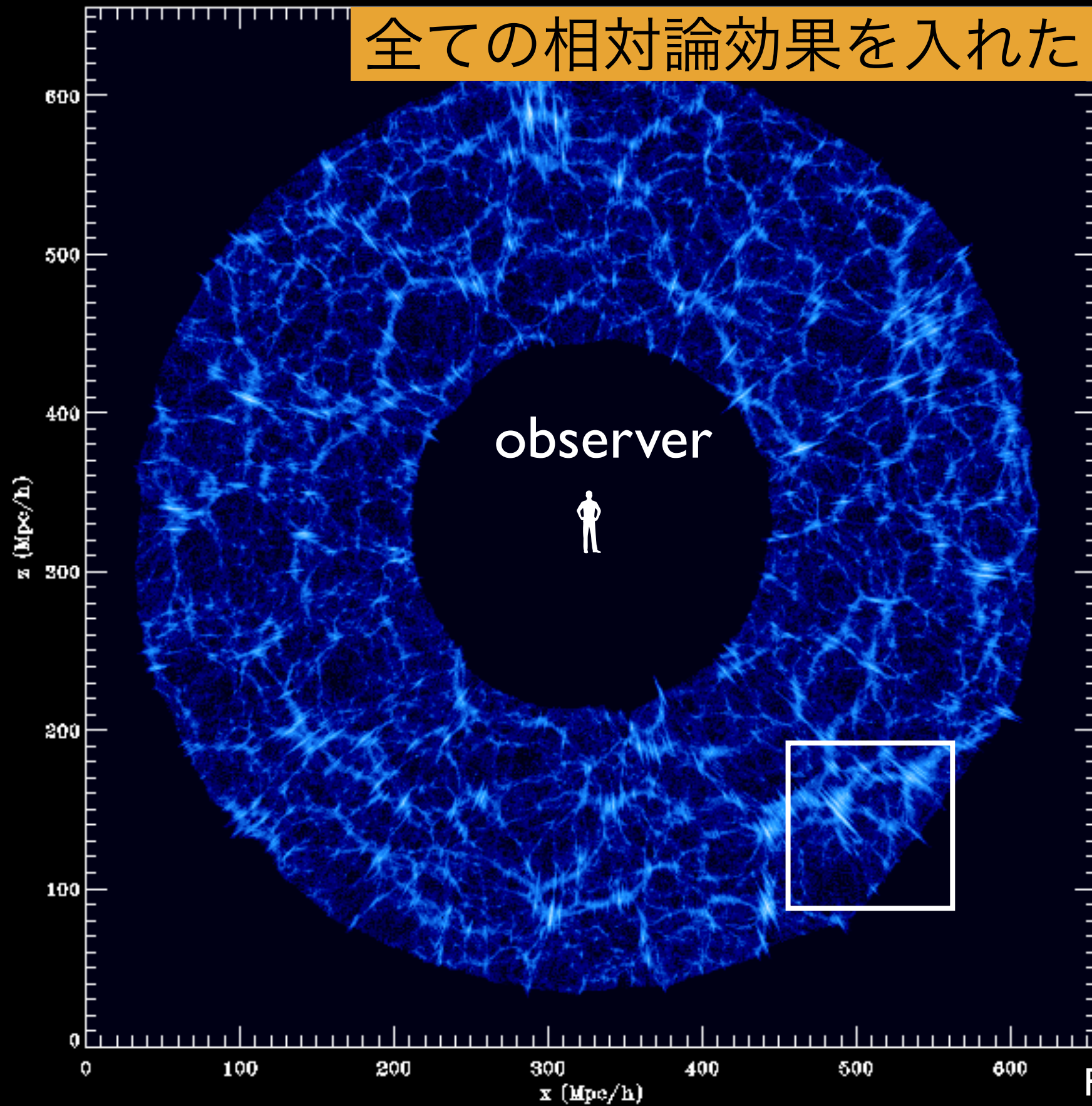


Fig. courtesy: Yann Rasera, based on the data by Michel-Andres Breton

全ての相対論効果を入れた



Value/
Color

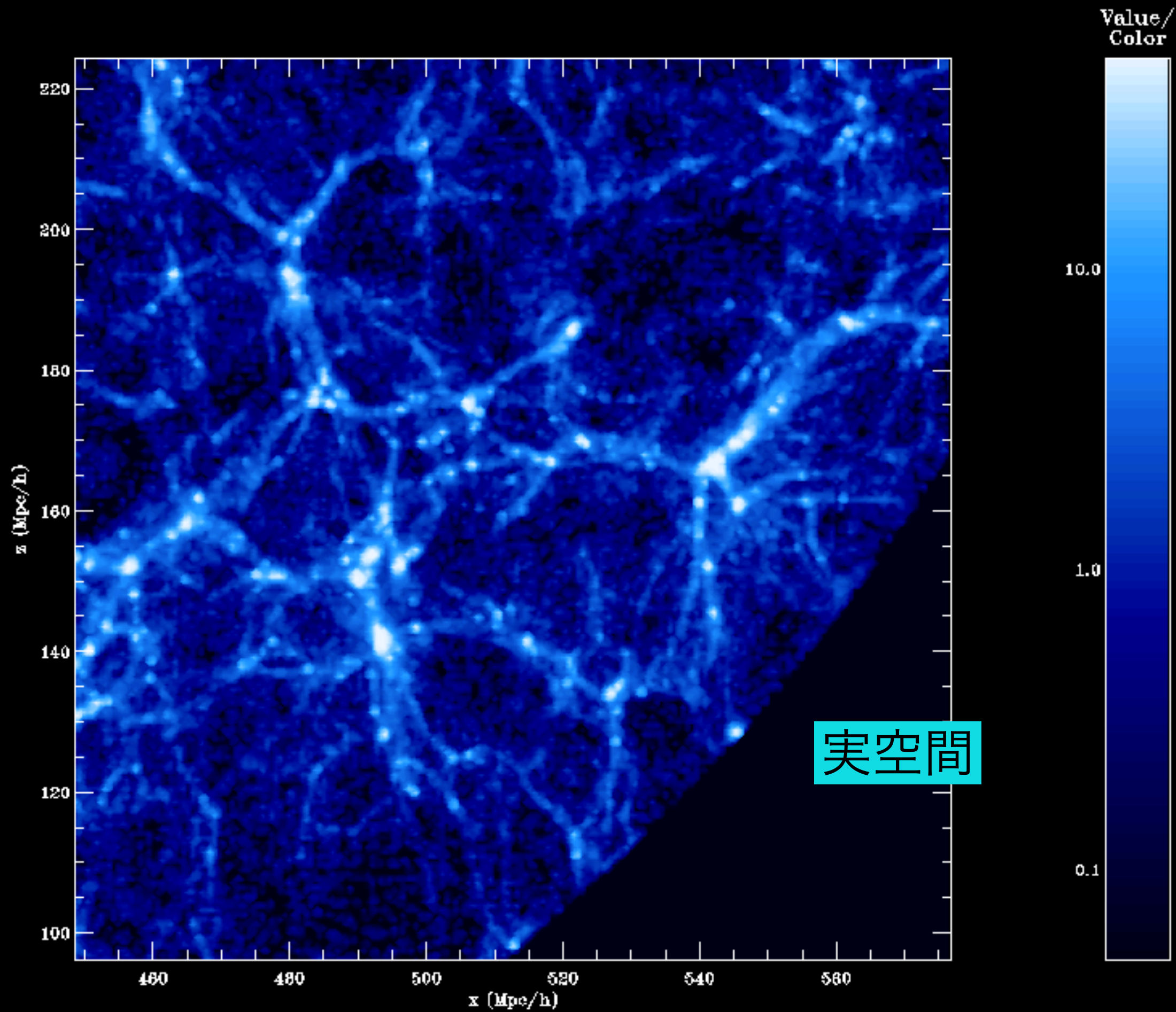
10.0

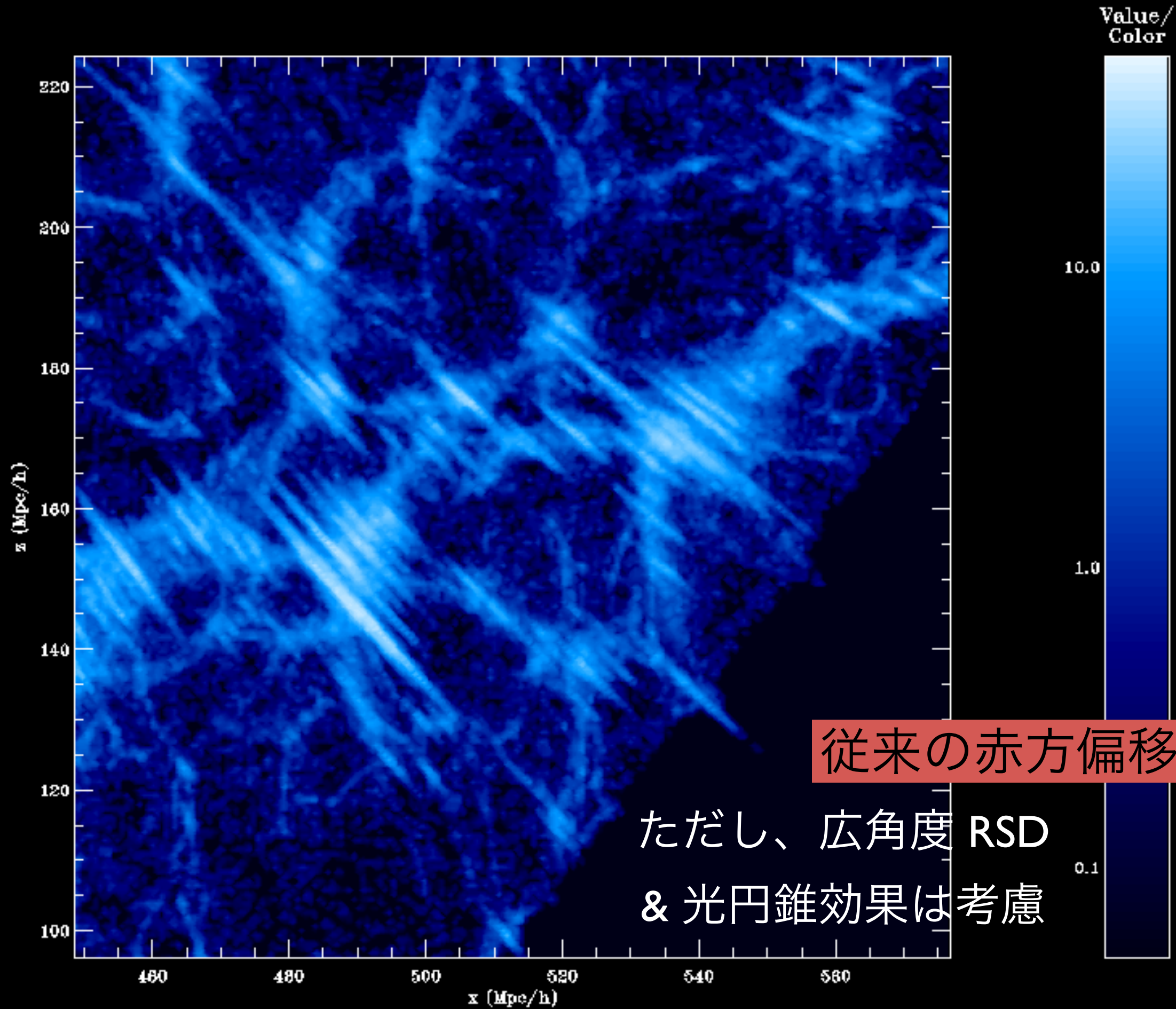
1.0

0.1

Fig. courtesy: Yann Rasera, based on the data by Michel-Andres Breton

density_zoom2_realspace

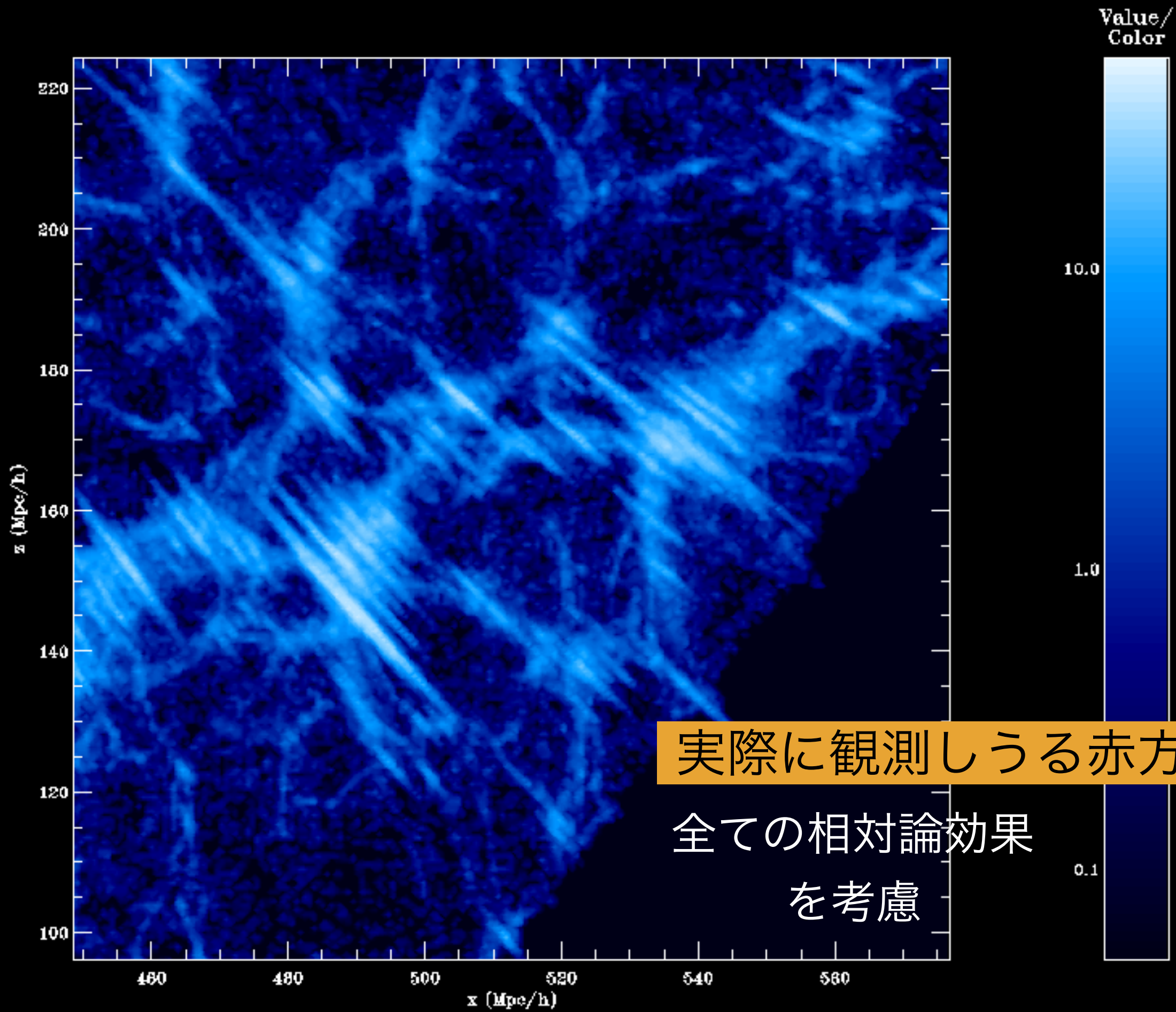




従来の赤方偏移空間

ただし、広角度 RSD
& 光円錐効果は考慮

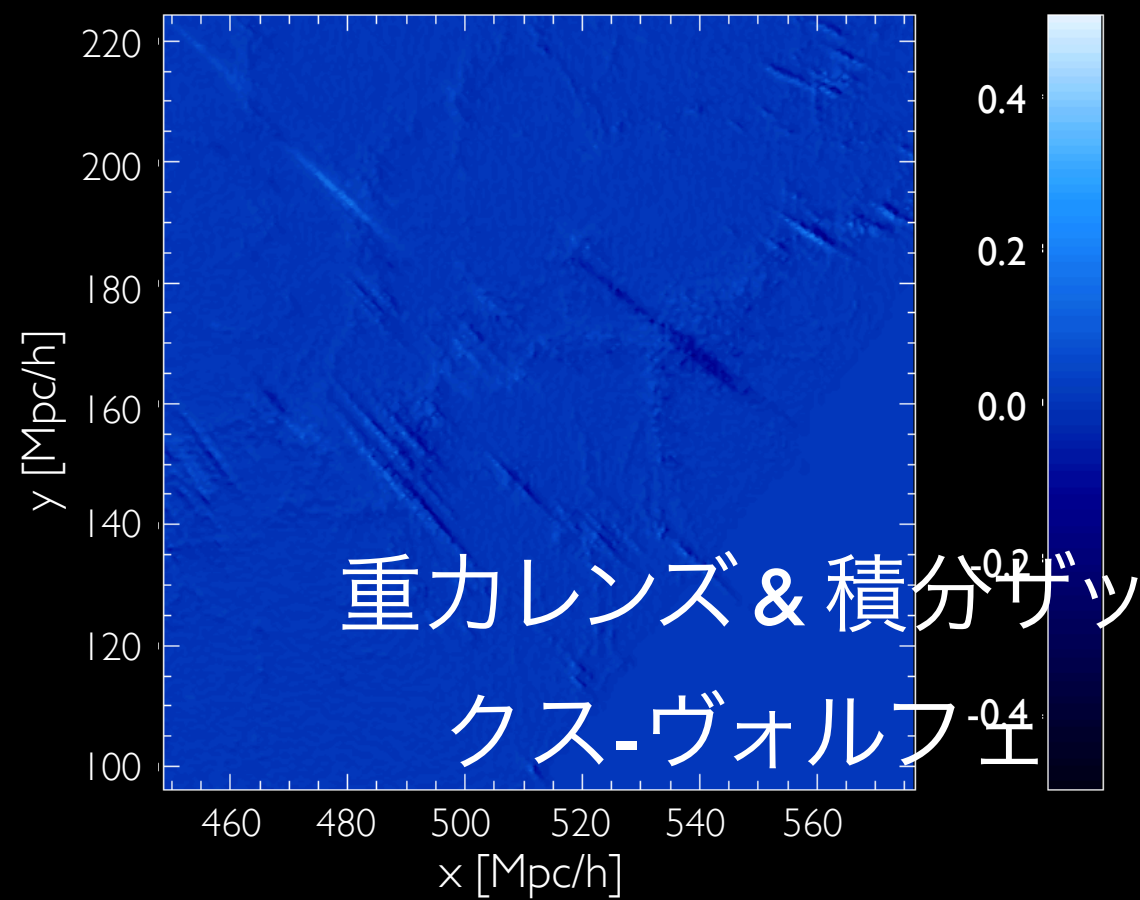
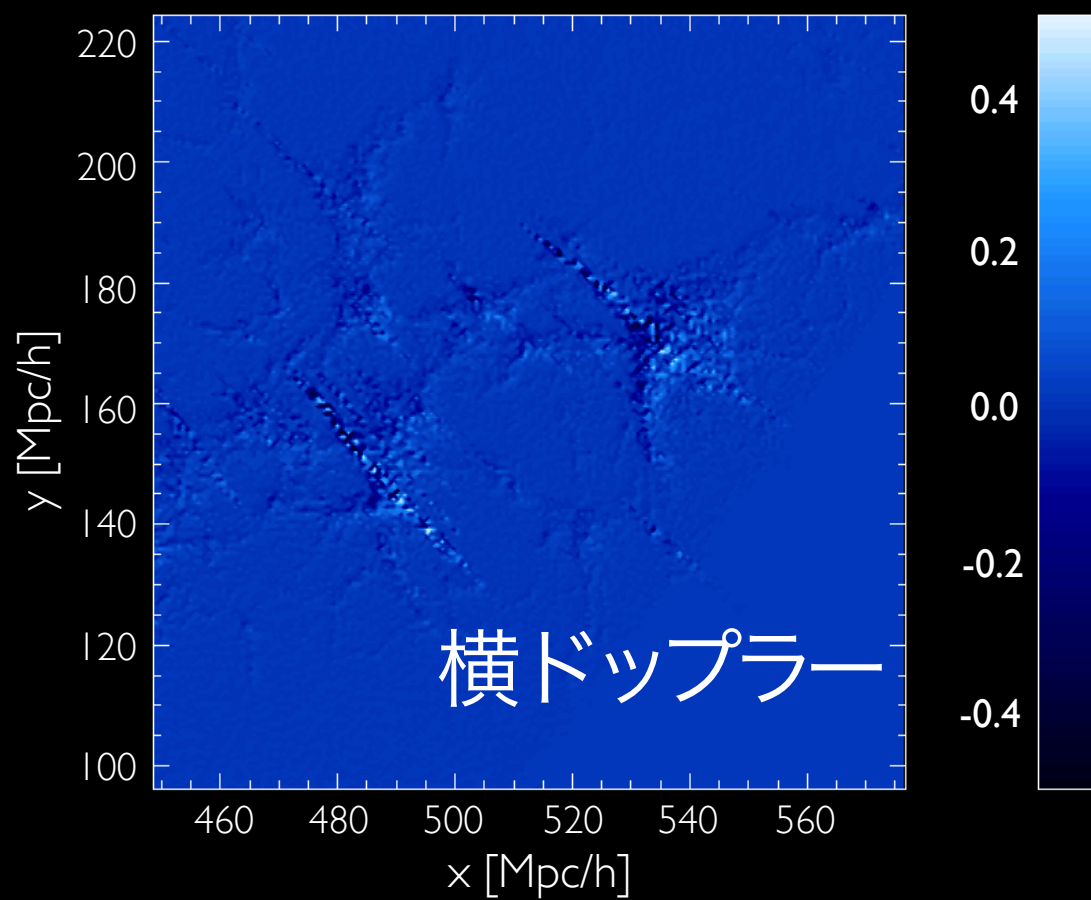
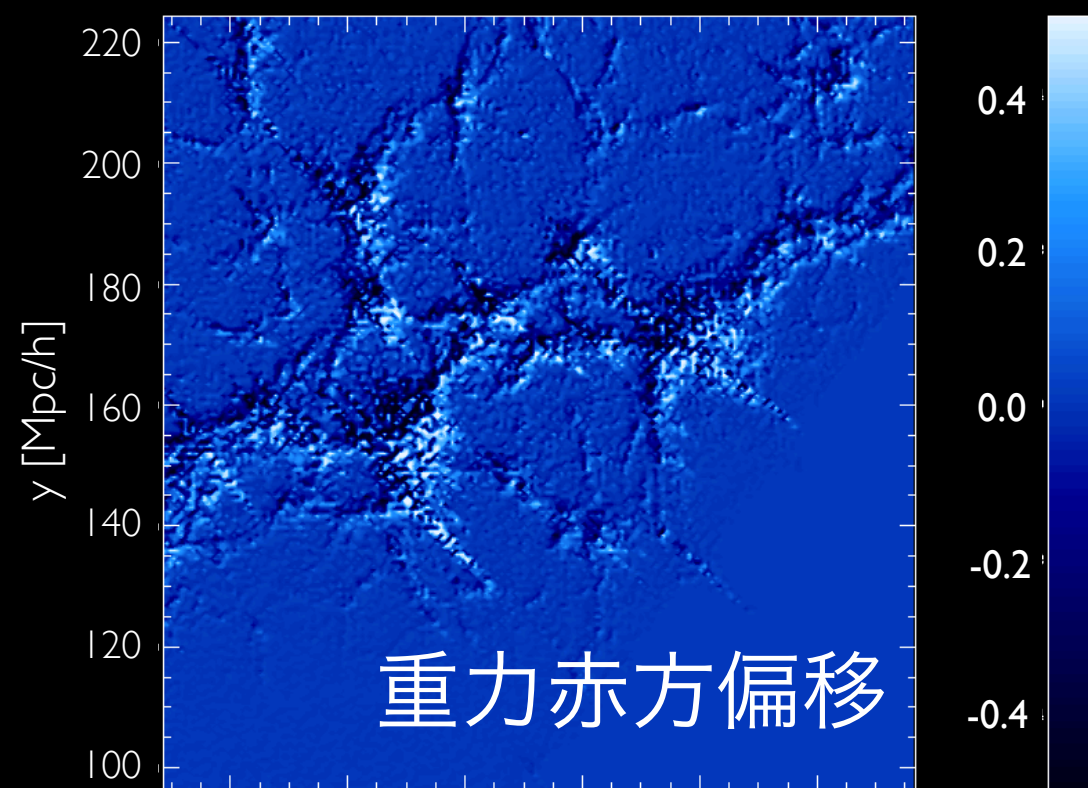
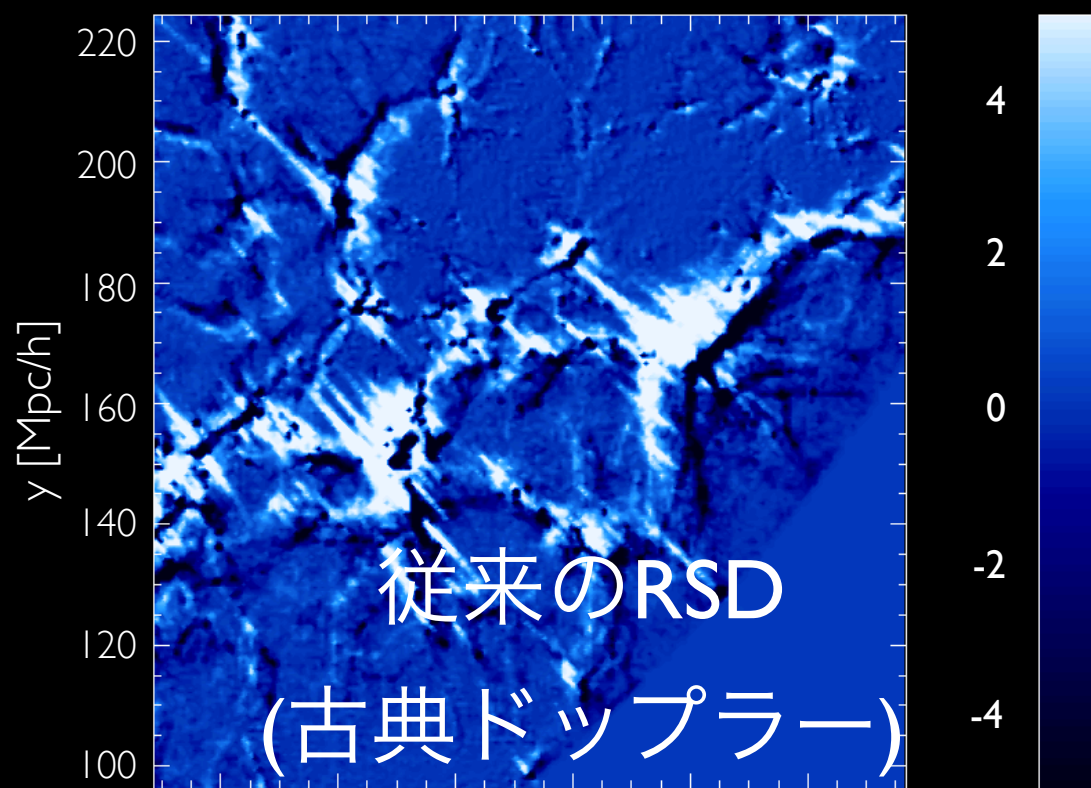
density_allrelativisticeffects



実際に観測しうる赤方偏移空間

全ての相対論効果
を考慮

差分をとった時の相対的寄与



観測される密度ゆらぎ：線形理論

相対論的な線形摂動論

e.g., Bonvin & Durrer ('11)

従来の RSD (カイザー効果)

magnification bias ignored

$$\Delta(\mathbf{n}, z) = b \delta - 2\Phi + \Psi - \frac{1}{\mathcal{H}} \partial_r (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) - \left(\frac{2}{r\mathcal{H}} + \frac{\dot{\mathcal{H}}}{\mathcal{H}^2} \right) \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} + \frac{\dot{\Phi}}{\mathcal{H}} + \frac{1}{\mathcal{H}} (\partial_r \Psi + \mathcal{H} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{v}}) + \frac{1}{r} \int_0^r dr' \left[2 - \frac{r-r'}{r'} \Delta_\Omega \right] (\Phi + \Psi) + \left(\frac{2}{r\mathcal{H}} + \frac{\dot{\mathcal{H}}}{\mathcal{H}^2} \right) \left(\Psi + \int_0^r (\dot{\Psi} + \dot{\Phi}) dr' \right).$$

δ : 共動ゲージにおける密度ゆらぎ

\mathbf{n} : (広角度) 視線方向

相関関数に双極子的
非対称性

($\dot{}$) : 共形時間微分

双極子的非等方性の一部は相対論的效果によって生み出される
(i.e., 重力赤方偏移)

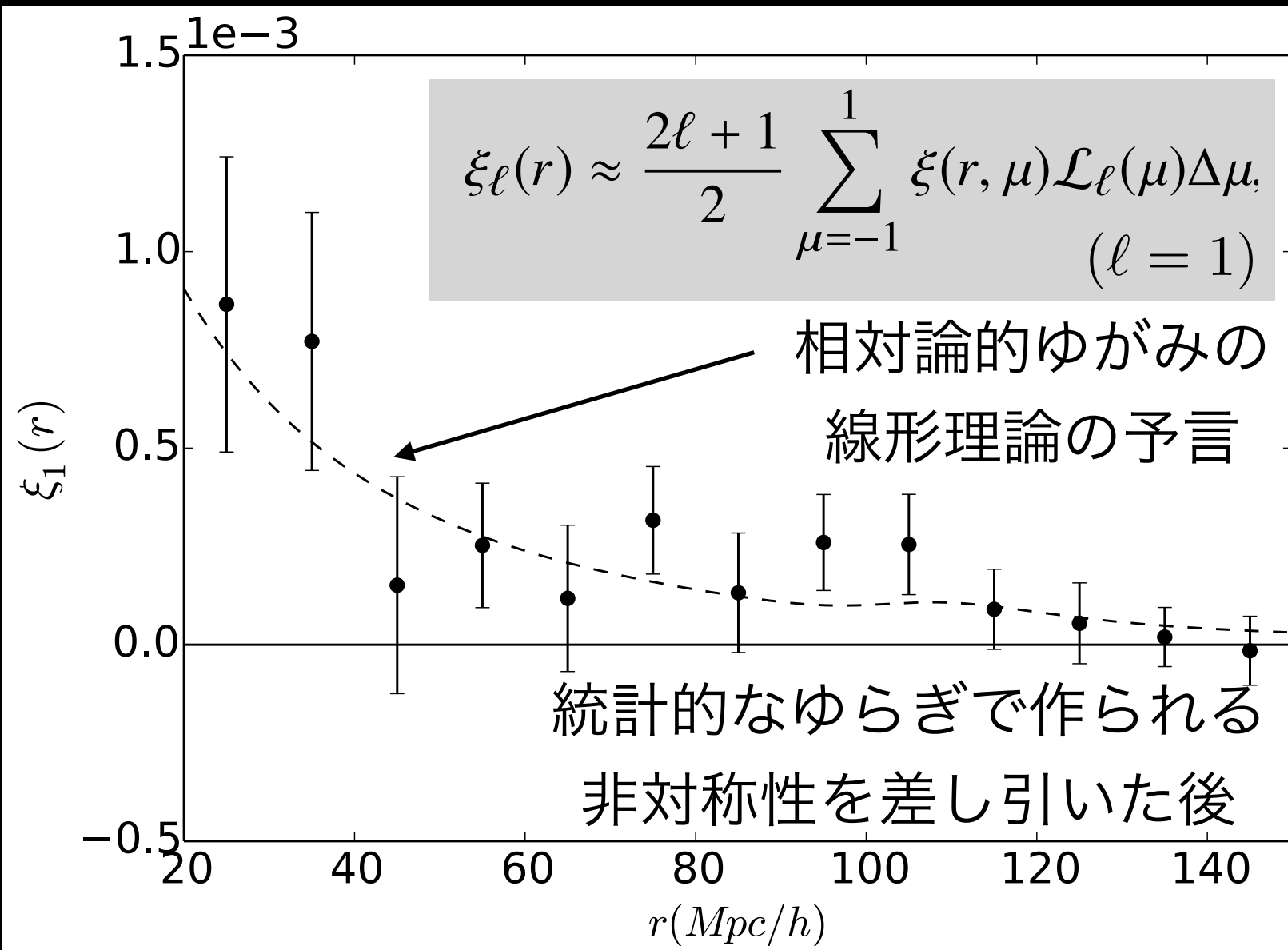
相関関数の双極子非対称性・1

異なる質量同士のハローの相関関数

(質量： 4.5×10^{13} & $2.6 \times 10^{12} M_{\text{sun}}/h$)

(5,400,000個)

(400,000個)



より大きなカタログを
作成

- 4096^3 個のダークマター
粒子
- 2.625 Gpc/h ボックス
($z < 0.46$)

RayGalGroupSims
(will be public)

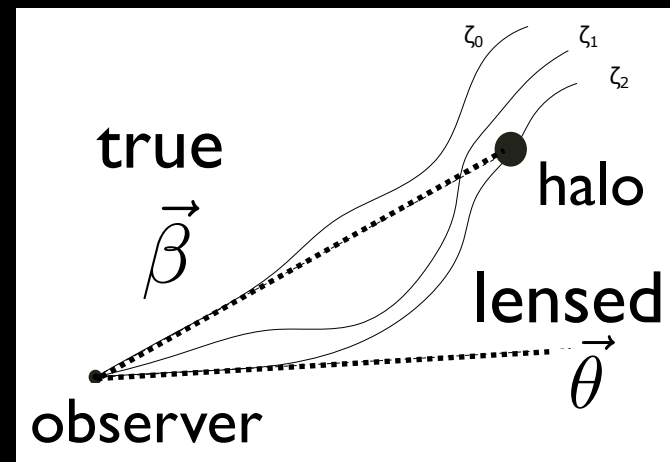
全ての相対論効果を考慮

双極子非等方性: 詳細 (1)

大スケール

ハローのカタログ

- 天球角: β, θ



- 赤方偏移:

$$z_0 = \frac{a_0}{a} - 1,$$

$$z_1 = \frac{a_0}{a} \left(1 + \phi_o/c^2 - \phi_s/c^2 \right) - 1,$$

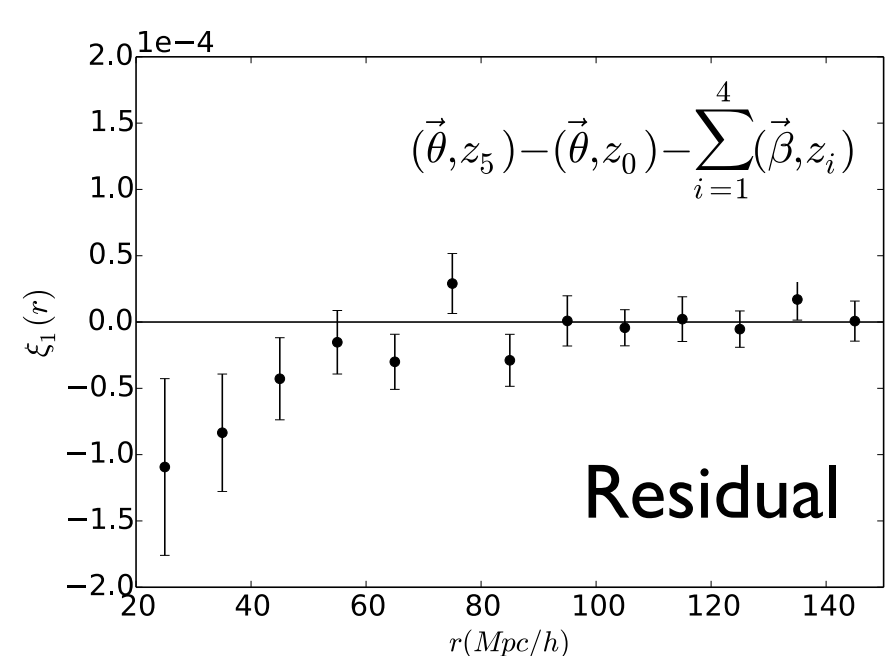
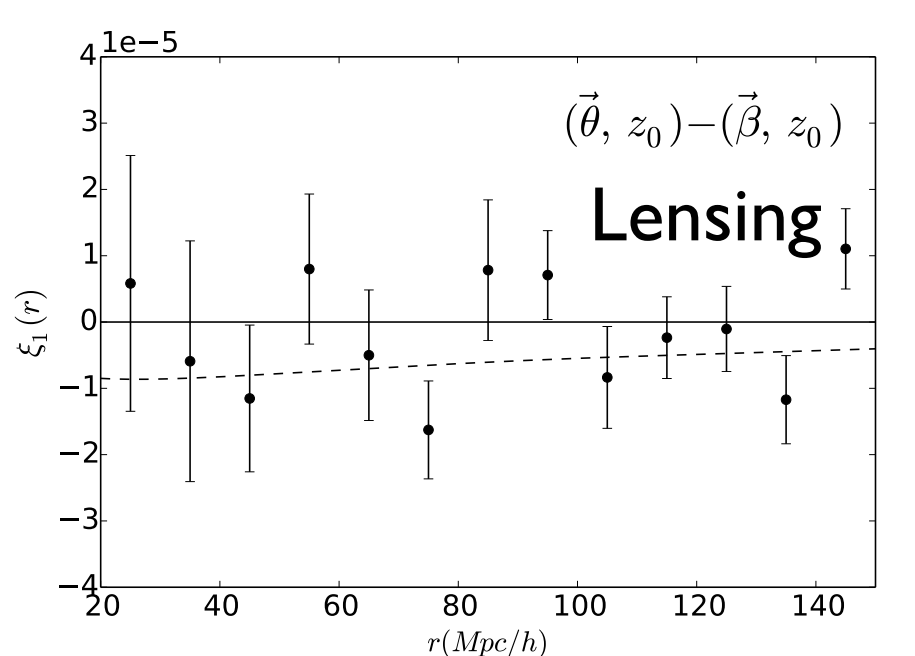
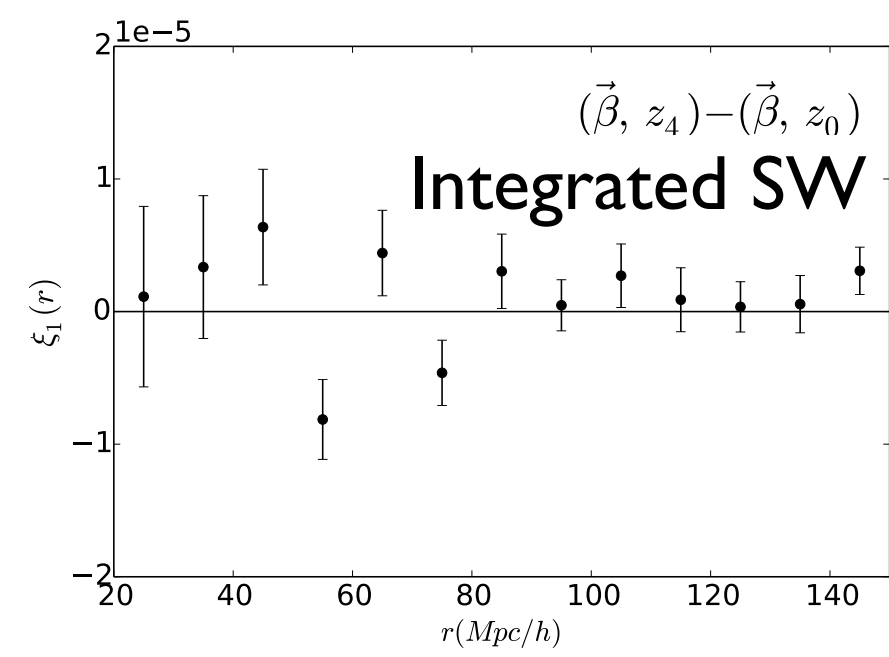
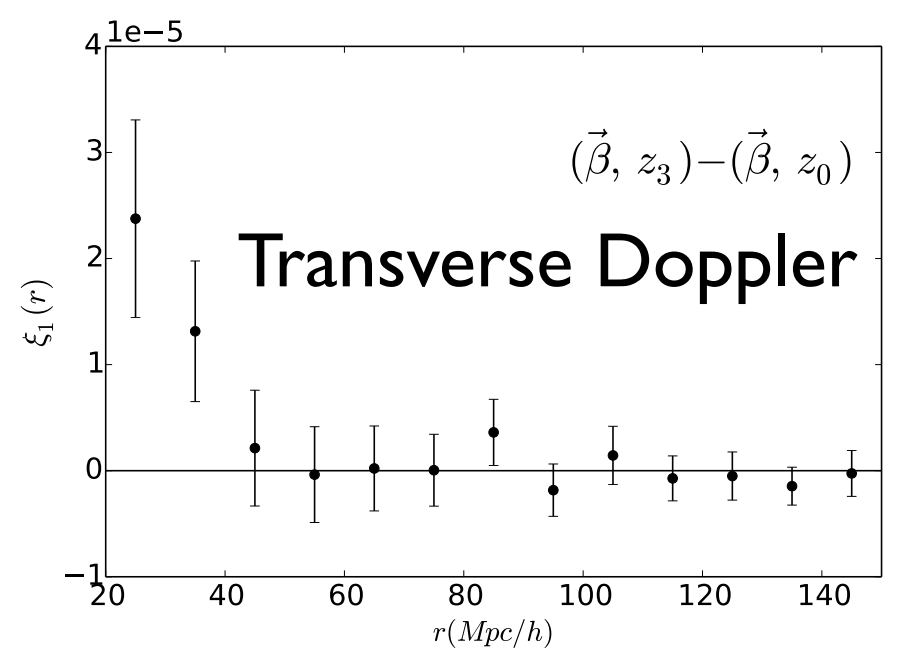
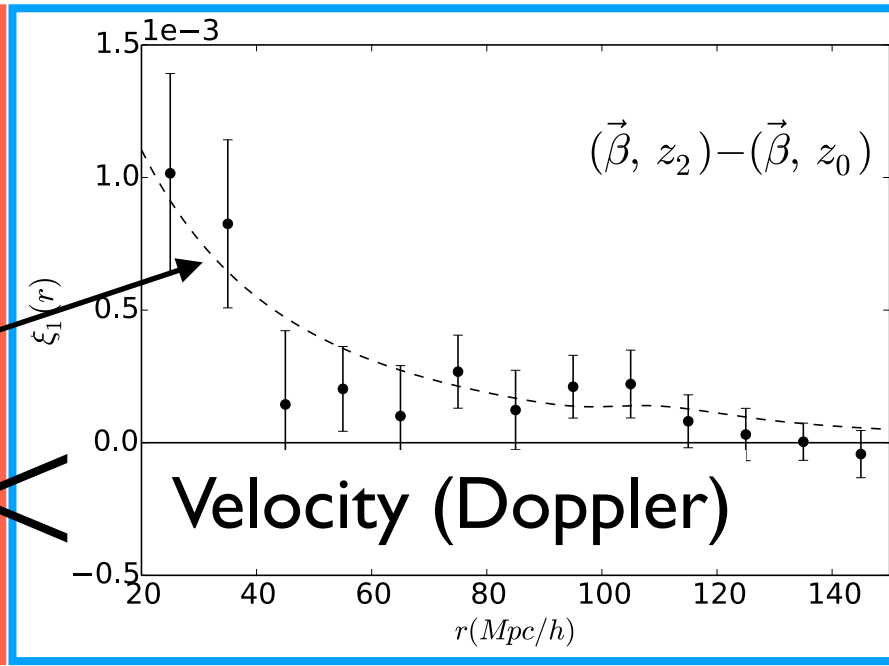
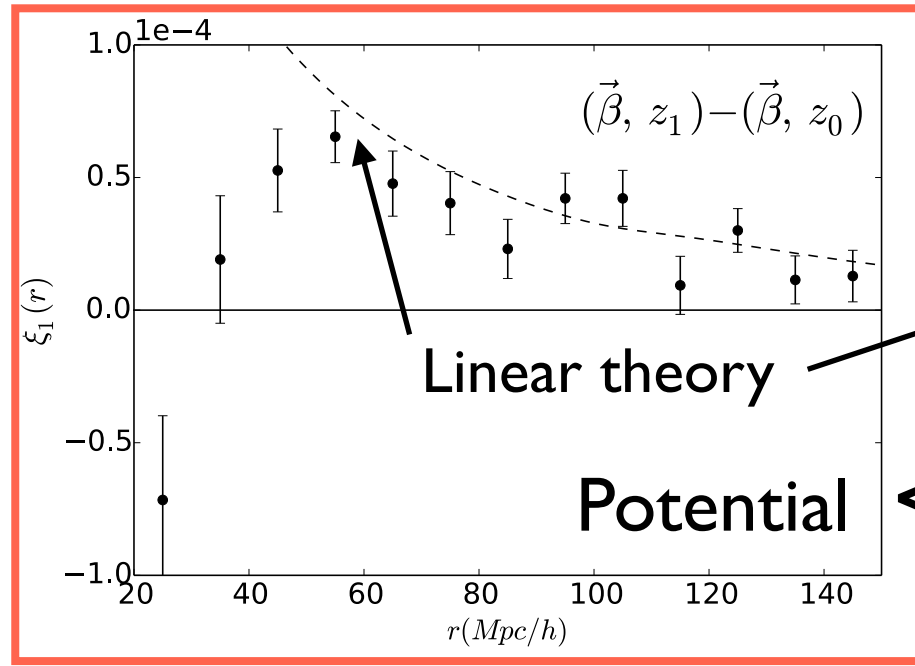
$$z_2 = \frac{a_0}{a} (1 + \mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}/c) - 1,$$

$$z_3 = \frac{a_0}{a} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v_s}{c} \right)^2 \right) - 1,$$

$$z_4 = \frac{a_0}{a} \left(1 - \frac{2}{c^2} \int_{\eta_s}^{\eta_o} \phi d\eta \right) - 1,$$

$$z_5 = \frac{(g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu)_s}{(g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu)_o} - 1,$$

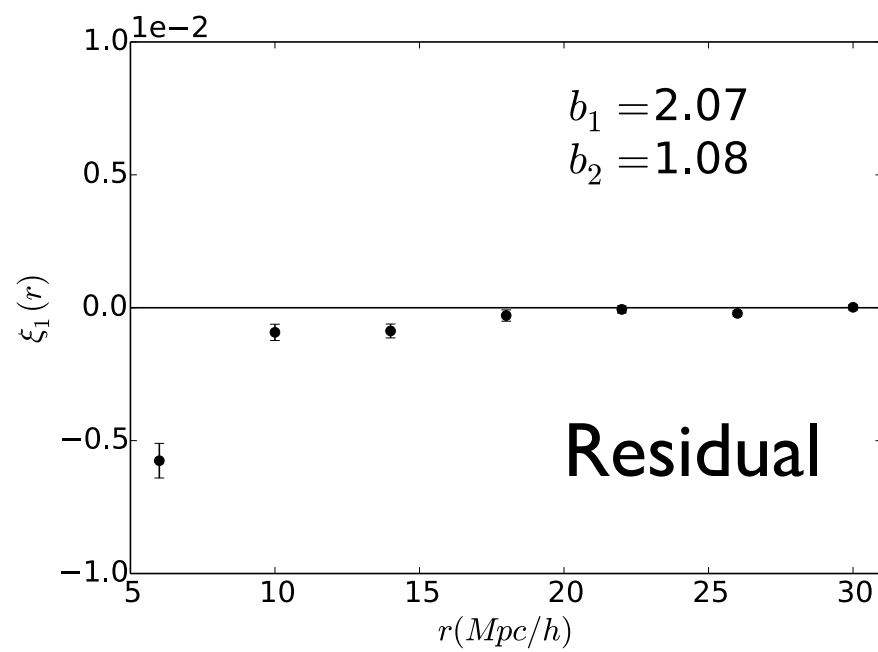
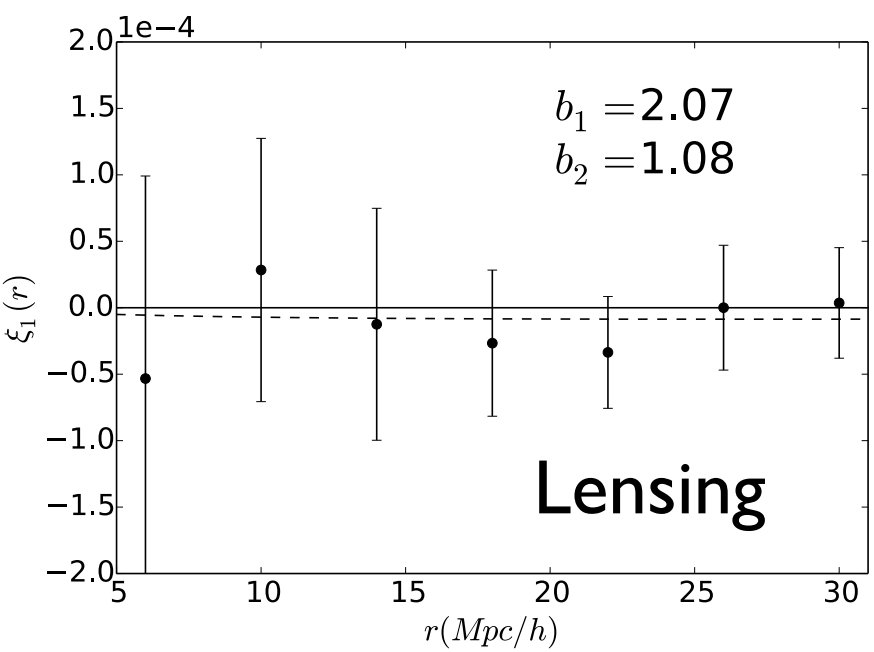
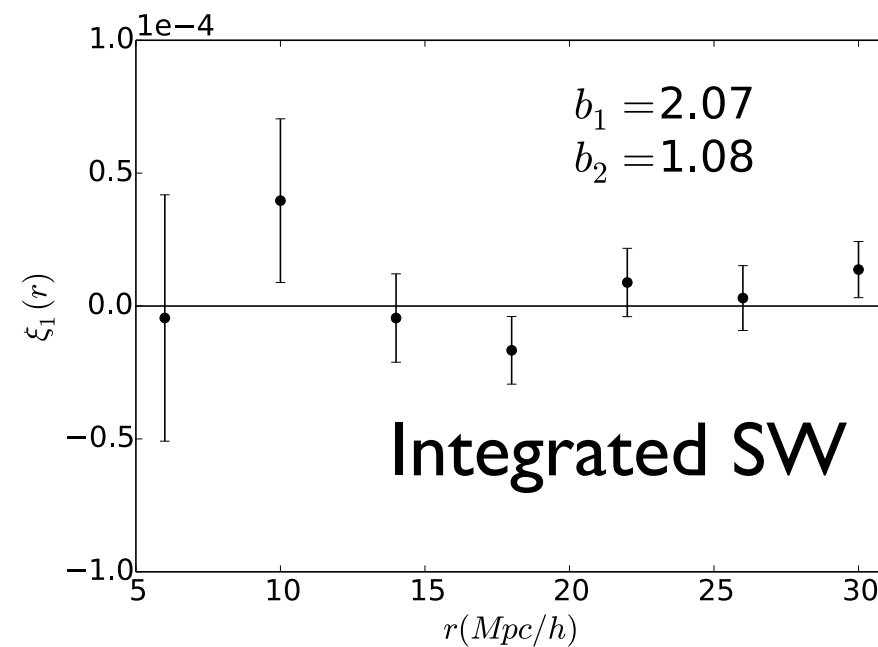
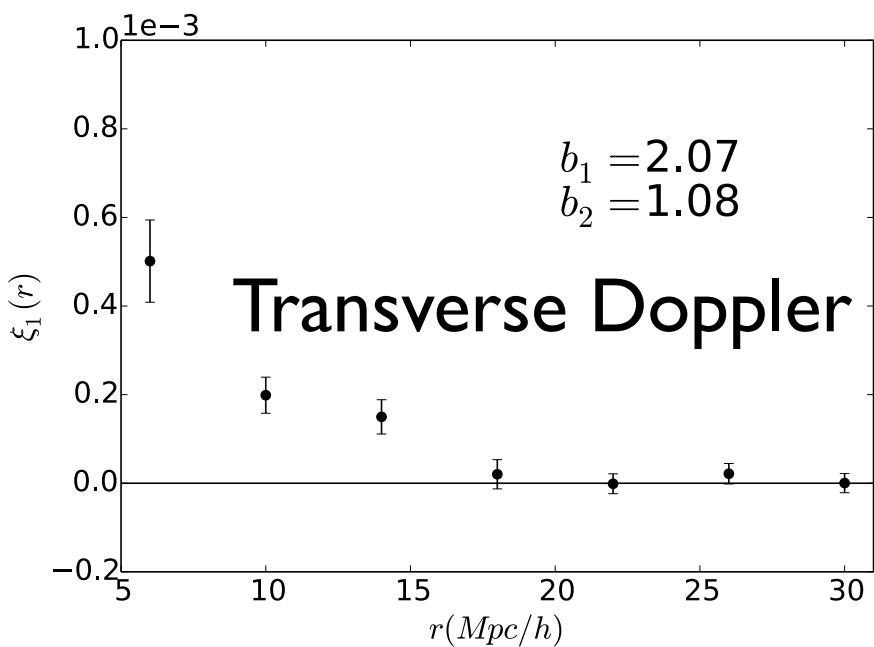
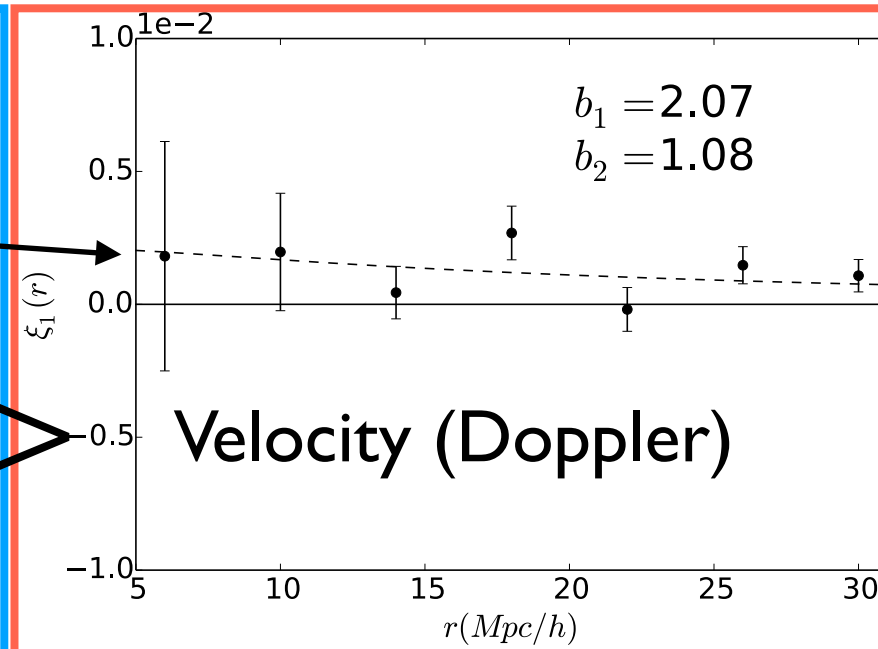
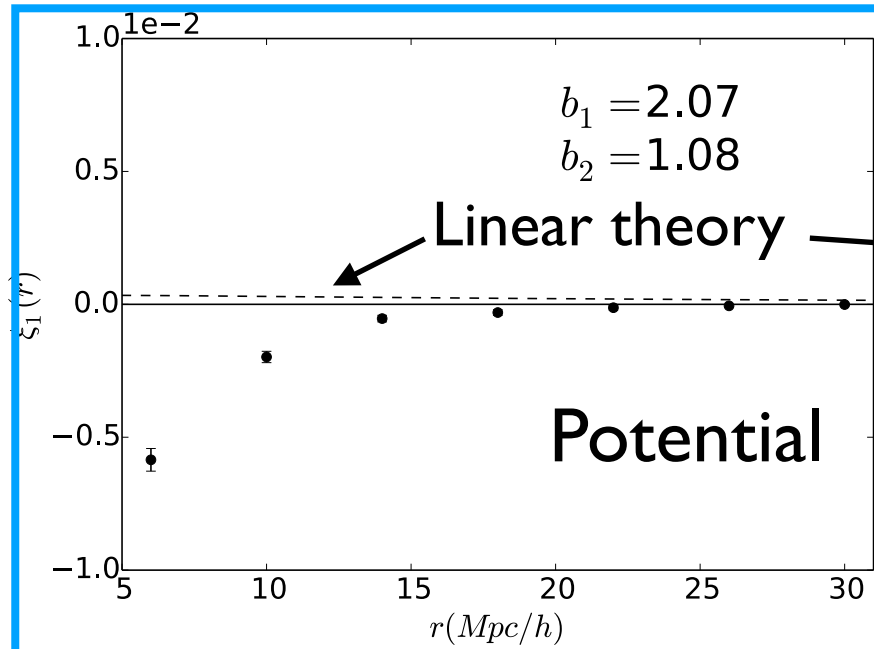
with $g_{\mu\nu} k^\mu u^\nu = -ack^0 \left(1 + \phi/c^2 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}/c + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right)$



双極子非等方性:

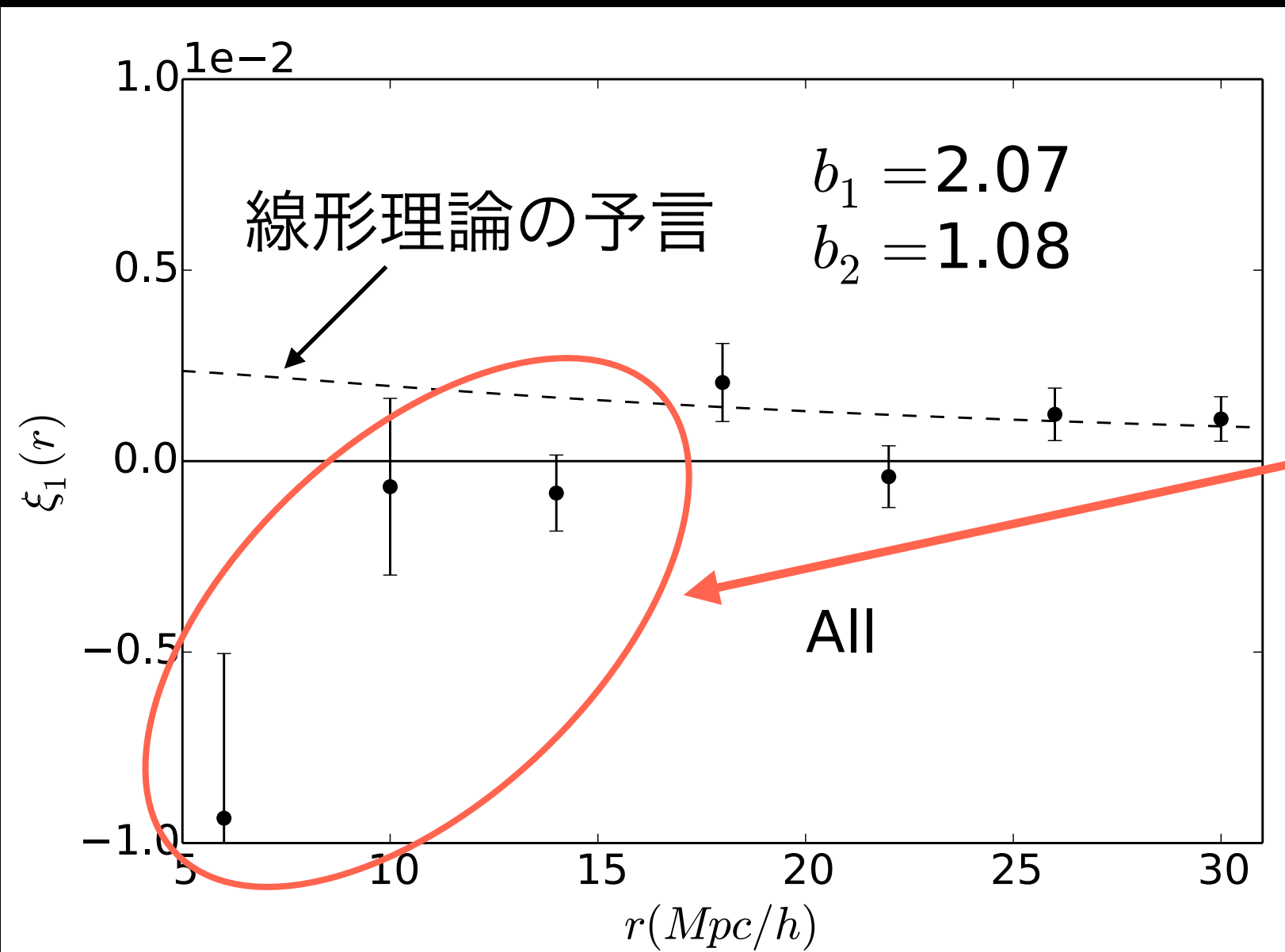
詳細 (2)

小スケール



相関関数の双極子非等方性・2

異なる質量同士のハローの相関関数
(質量： 4.5×10^{13} & $2.6 \times 10^{12} M_{\text{sun}}/h$)



$r < 20 \text{ Mpc}/h$ で重力赤方
偏移の効果が卓越

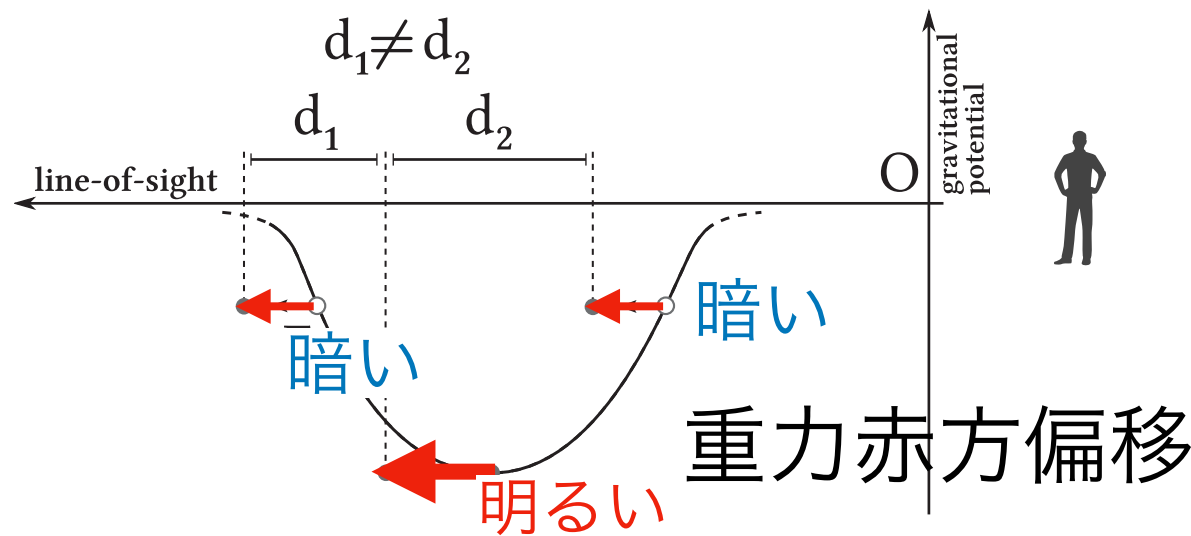
全ての相対論効果を考慮

重力赤方偏移の検出？

シェル推定量

Croft ('13)

$$z_g^{\text{shell}}(r') = \frac{\int_{r'}^{r'+\Delta r'} H r_{\parallel} [1 + \xi(r_{\perp}, r_{\parallel})] r^2 dr}{\int_{r'}^{r'+\Delta r'} [1 + \xi(r_{\perp}, r_{\parallel})] r^2 dr}$$



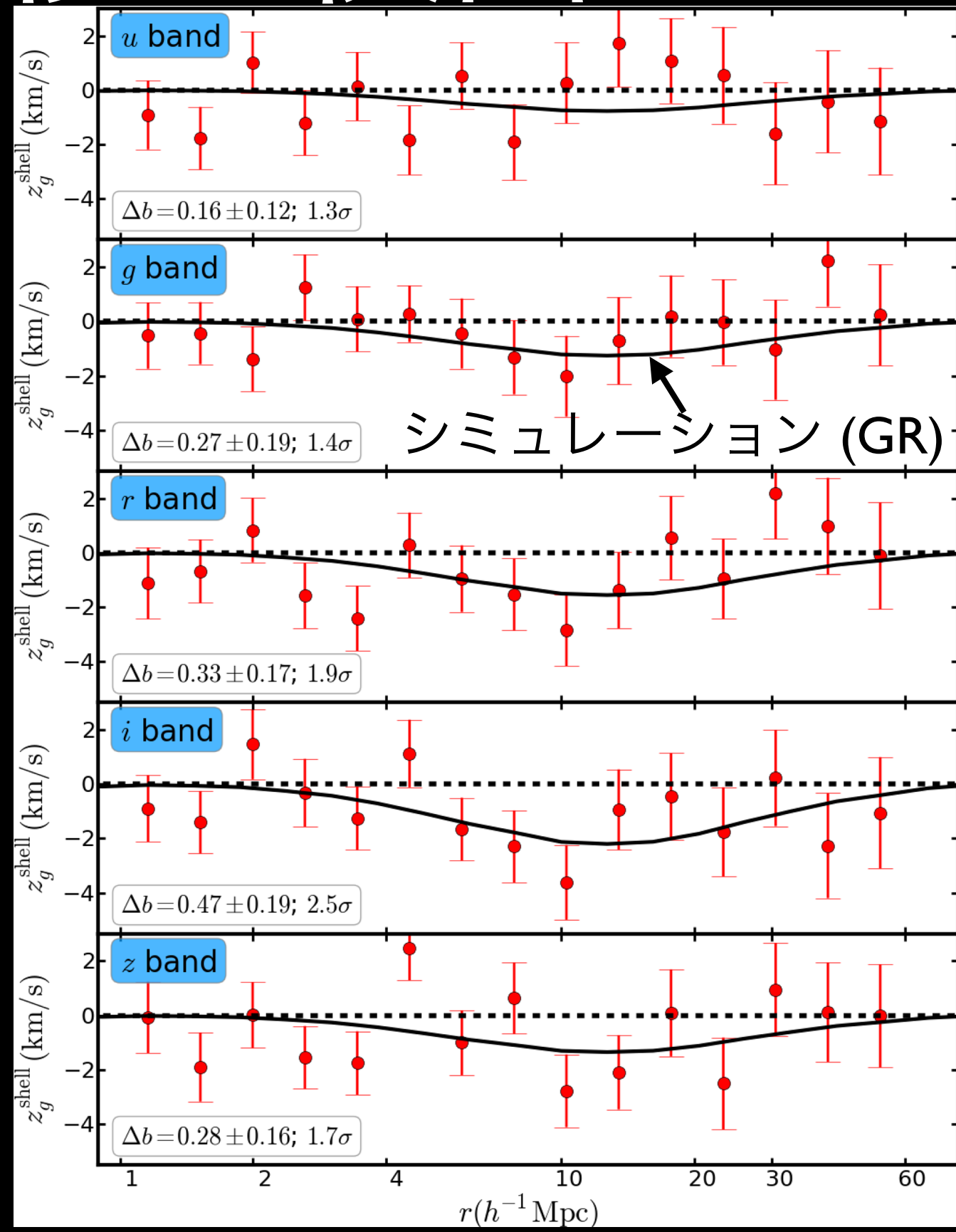
SDSS-III BOSS CMASS銀河

(76.5万個 @ $0.4 < z < 0.7$)

明るい・暗いの2サンプルで相関

全てを組み合わせると2.7 σ レベルでの検出 (Alam et al. '17)

(銀河団を用いた検出例は Wojtak et al. '11)



まとめ

宇宙の大規模構造観測に現れる「ゆがみ」を使った宇宙論

赤方偏移空間ゆがみ : 銀河の特異速度場に由来する銀河のクラスタリングの非等方性 → ゆらぎの重力的成長のプローブ

幾何学的ゆがみ : 銀河の位置を共動座標に変換する時に生じるみかけの非等方性 → BAOを使って加速膨張を精密診断

- 暗黒エネルギー・修正重力理論に対する制限
- 一般相対論のテスト

相対論的ゆがみ : 相対論的效果による新たな効果 → 新しい宇宙論のプローブ

- 相対論的観測効果を入れたシミュレーション
- 相関関数に現れる非対称性 (双極子成分)

まとめ

宇宙の大規模構造観測に現れる「ゆがみ」を使った宇宙論

赤方偏移空間ゆがみ → ゆらぎの重力的成長のプローブ

銀河の特異速度場に由来する銀河のクラスタリングの非等方性

幾何学的ゆがみ → BAOをものさしにして加速膨張を精密診断

銀河の位置を共動座標に変換する時に生じるみかけの非等方性

- 暗黒エネルギー・修正重力理論に対する制限
- 一般相対論のテスト

相対論的ゆがみ : 相対論的效果による新たな効果 (新しいプローブ?)

- 相対論的観測効果を入れたシミュレーション
- 相関関数に現れる非対称性 (双極子成分)