

見えてきた宇宙大構造の進化

日影 千秋

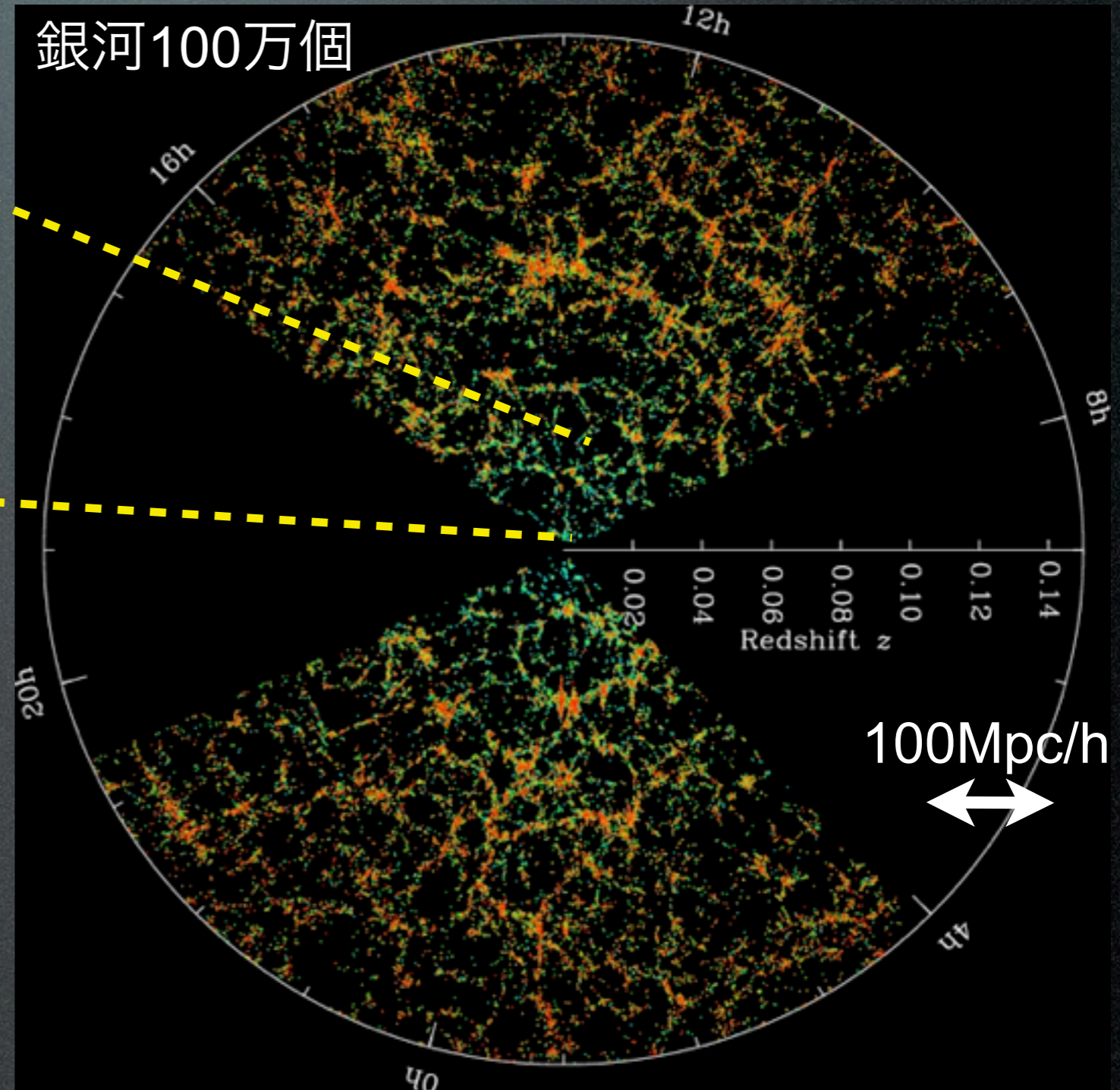
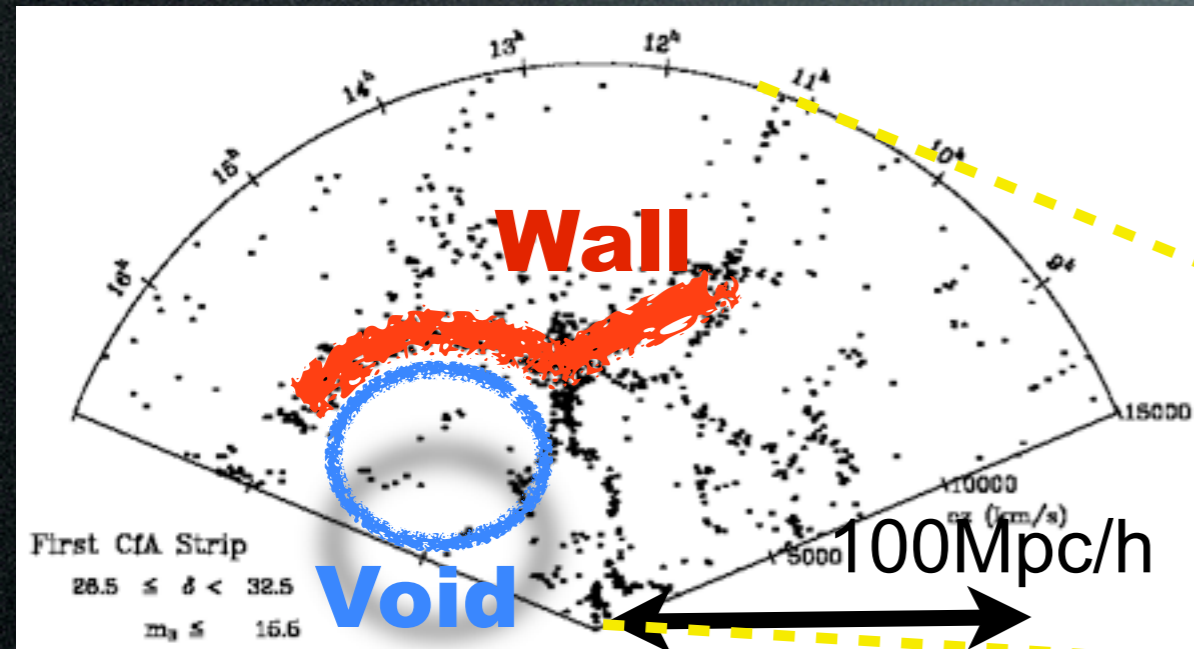
名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 (KMI)

宇宙大構造

CfA銀河サーベイ, 銀河1100個

スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS)

銀河100万個

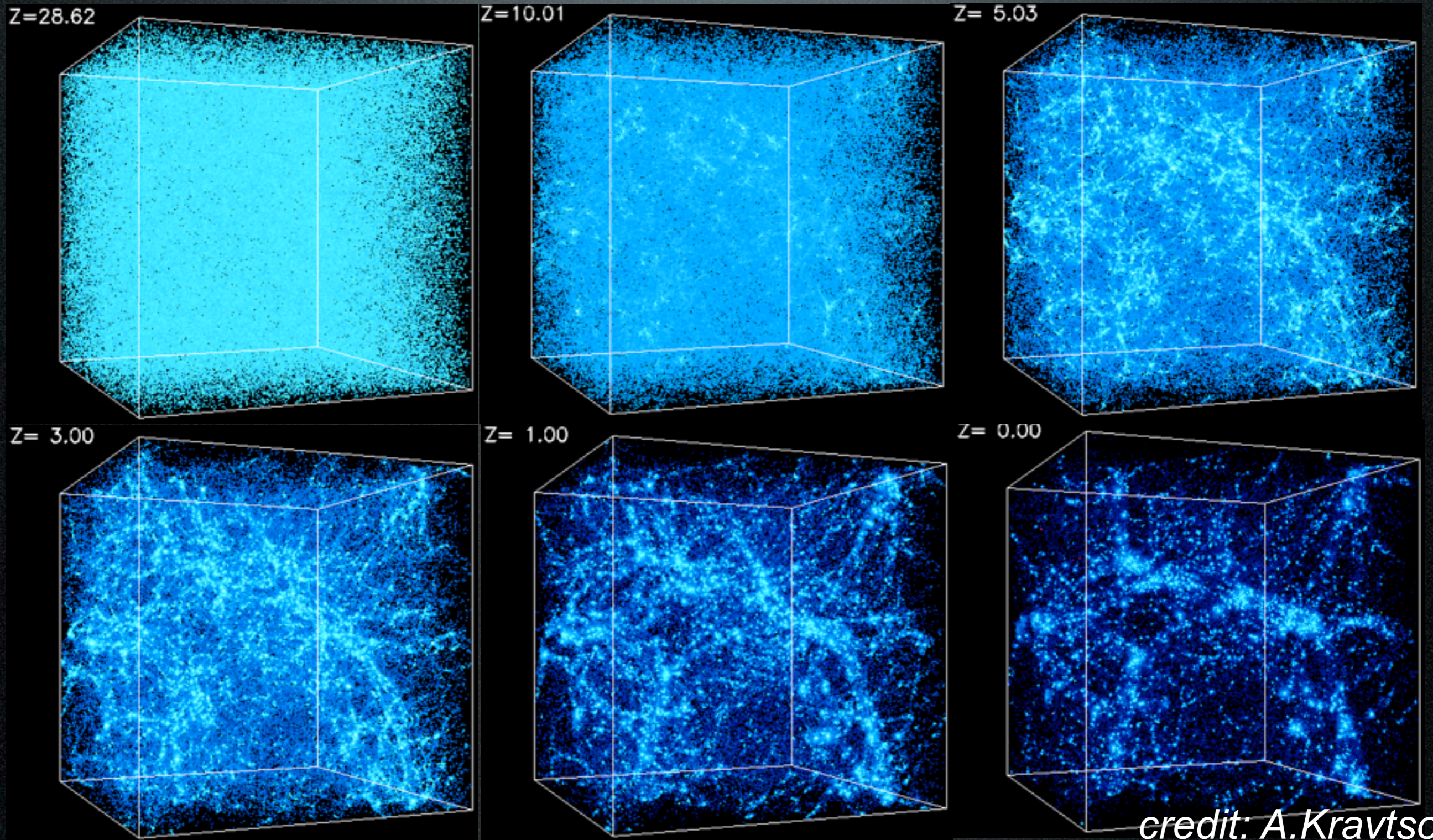


de Lapparent, Geller, Huchra, 1986

- 1990~ Las Campanas
- 2000~ SDSS, 2dF
- BOSS, WiggleZ
- 2010~ FMOS, Sumire
- BigBOSS
- 2020~ Euclid

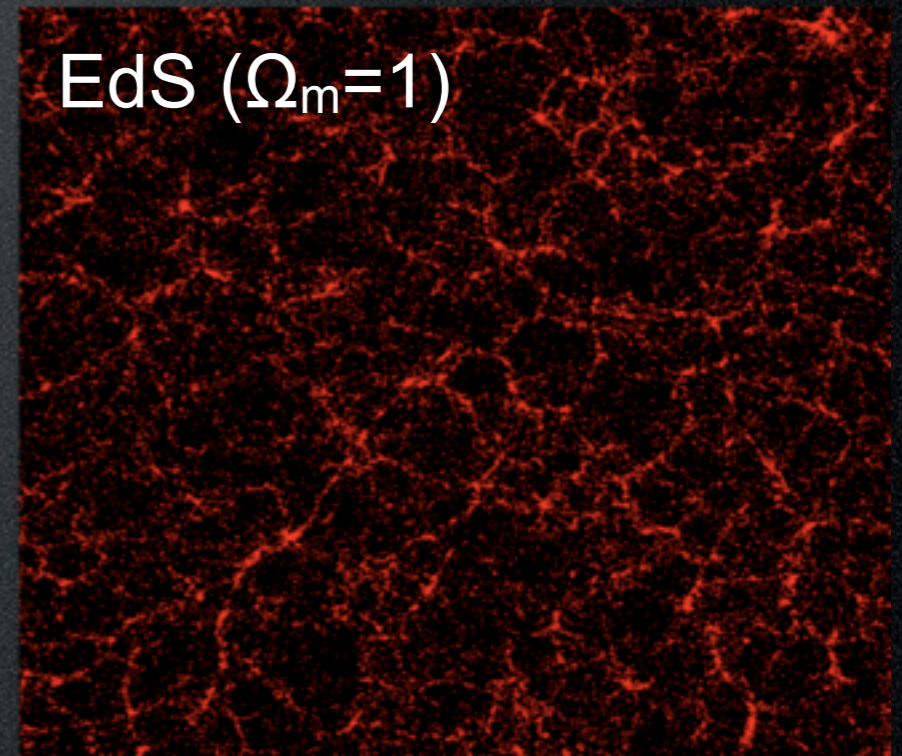
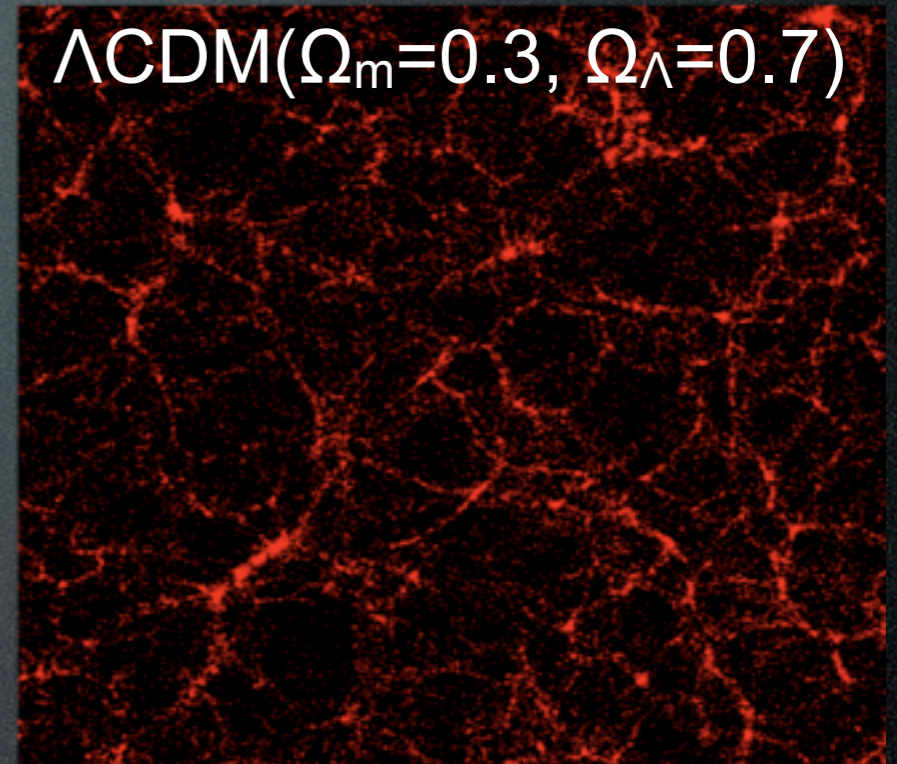
重力不安定性による構造進化

宇宙初期にできた微小なゆらぎが重力成長し、現在の大構造へと発展

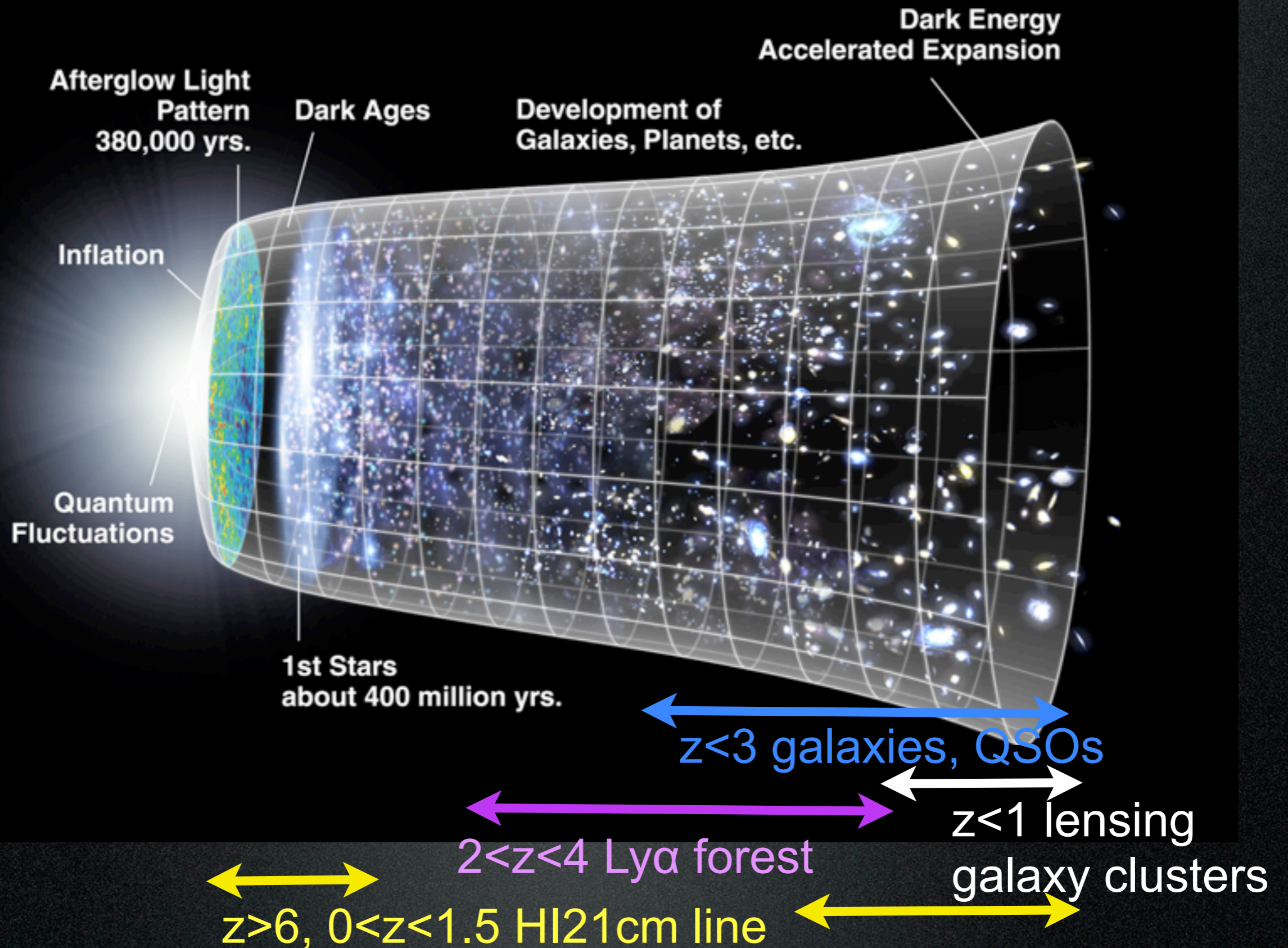


宇宙大構造から何が分かるか？

- ・ 宇宙のエネルギー組成
 - ・ 宇宙の膨張史
 - ・ 重力のテスト
 - ・ ニュートリノ質量、世代数
 - ・ 構造の起源：非ガウス性
 - ・ ダークマターの性質
- などなど



宇宙大構造のトレーサー



Contents

- 銀河分布
 - バリオン音響振動 (BAO)
 - 赤方偏移歪み
 - パワースペクトル
 - SDSS, BOSS銀河サーベイの観測結果
- 重力レンズ
- 今後のサーベイ
 - Sumire, Euclid

加速する宇宙

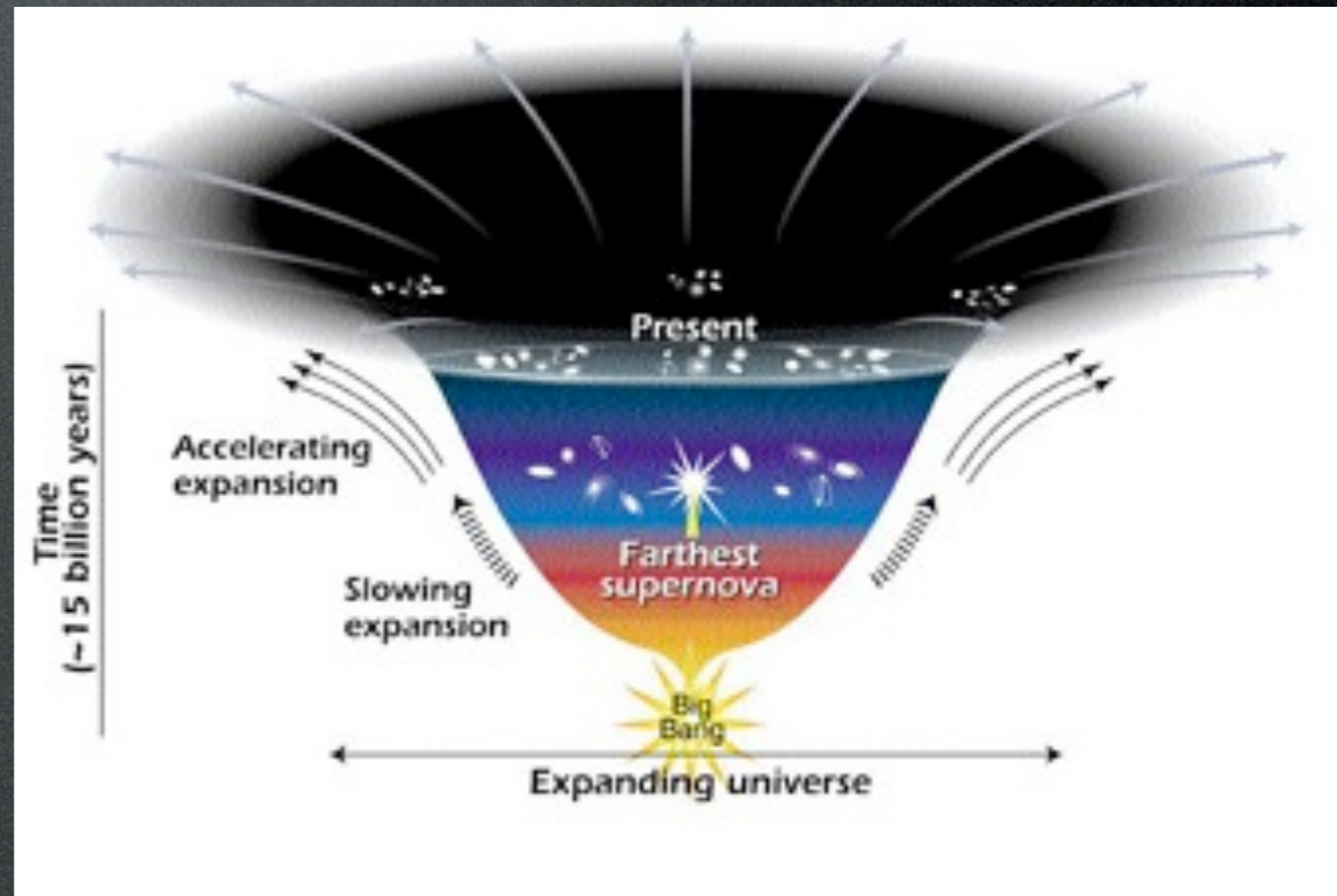
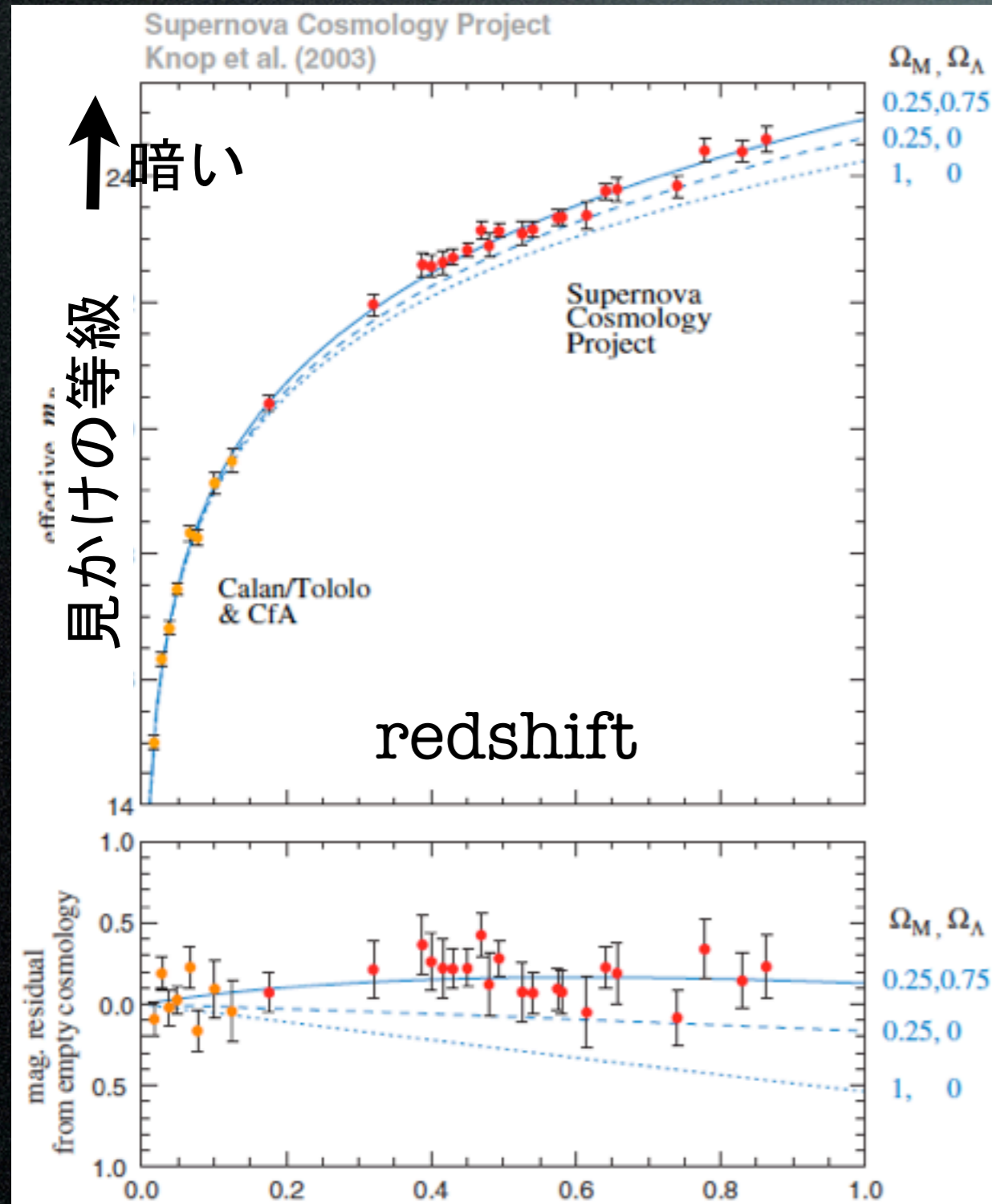
標準光源(SN Ia)を使った距離測定

宇宙の膨張率

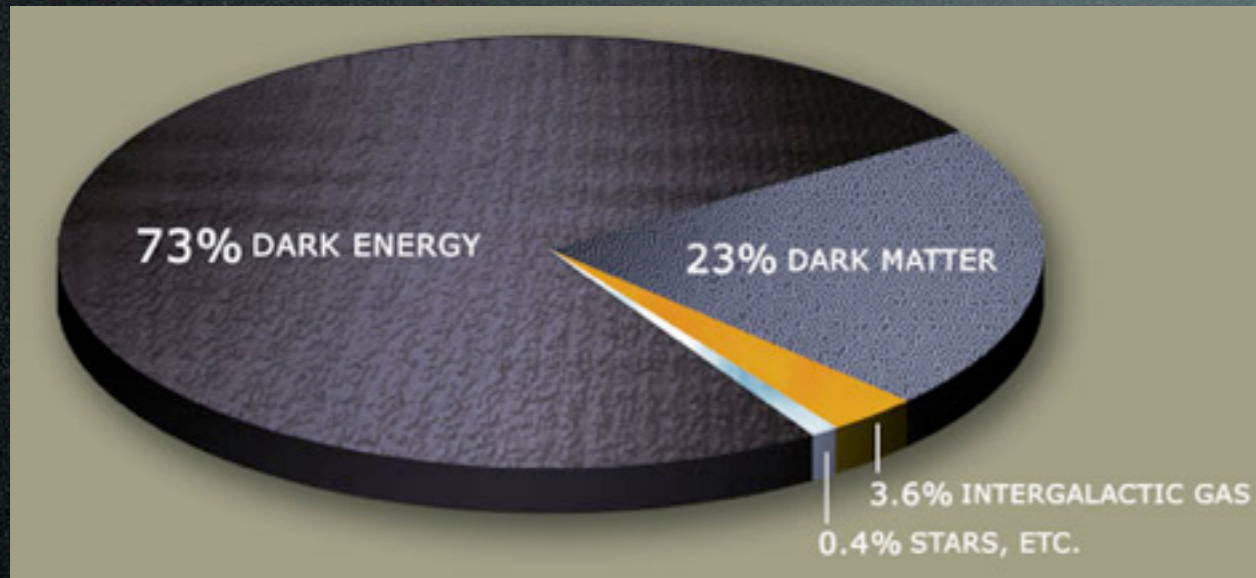
$$H(z) = H_0[\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda]^{1/2}$$

光度距離

$$d_L(z) = (1+z) \int_0^z \frac{cdz}{H(z)} \quad (\text{flat})$$



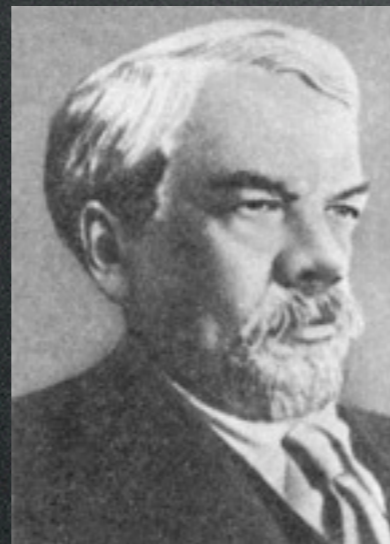
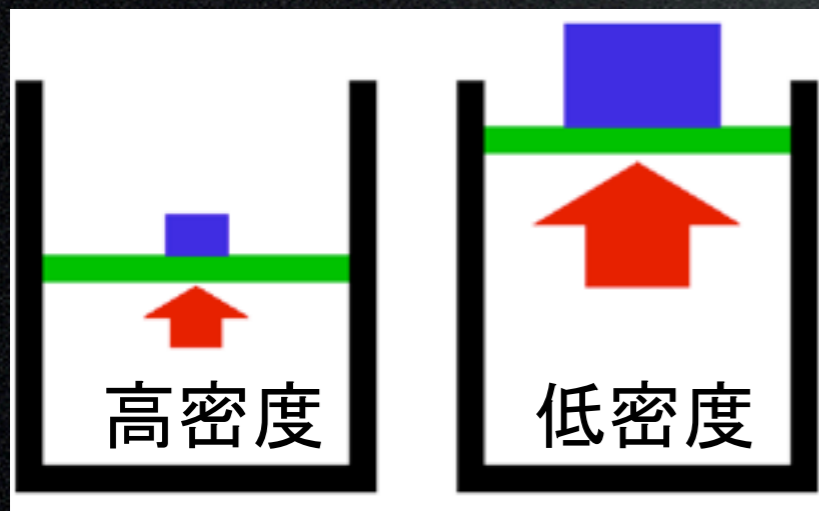
Dark Energy or Modified Gravity ?



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad ?$$

Λ

Chaplygin gas $p = -A/\rho$



$f(R)$

DGP

Chameleon mechanism



Dark Energy Probes

Ia型超新星: 光度距離 $D_L(z)$

Pros: 宇宙の膨張率を直接測ることができる

Cons: 超新星の進化、ダスト補正の不定性

銀河分布: BAOを使った距離 $D_A(z)$, $H(z)$, 赤方偏移歪みから構造成長率

Pros: 線形摂動論に基づく, BAOはAstrophysicalな不定性が小さい

Cons: 非線形進化, 銀河バイアス, Finger-of-Godの不定性

重力レンズ: 宇宙大構造によるレンズ歪みの空間パターン

Pros: 質量分布を直接調べることができる

Cons: photo-z, intrinsic alignment, 銀河形状測定, PFSの不定性

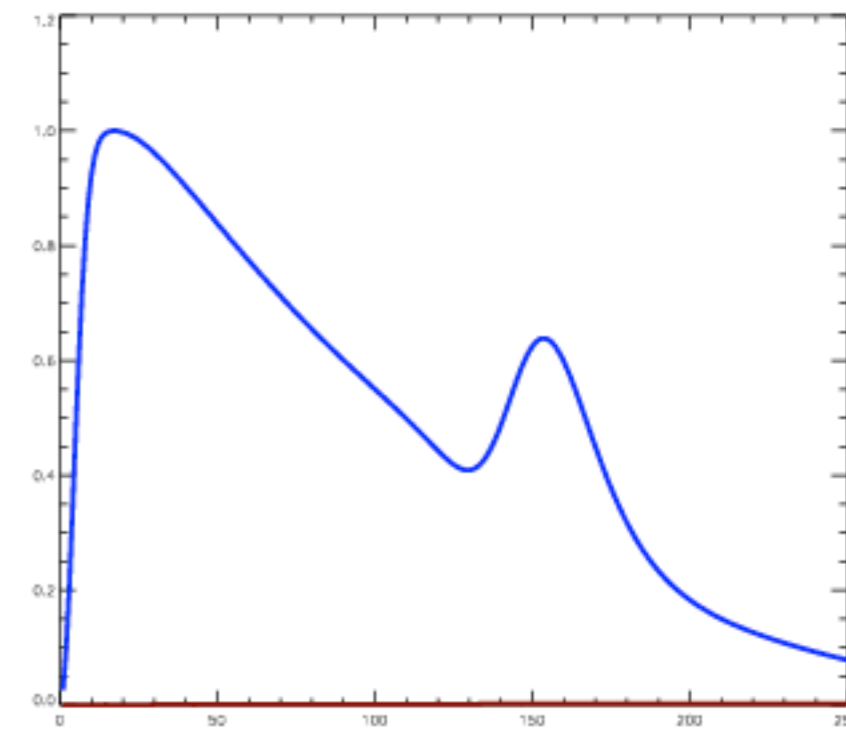
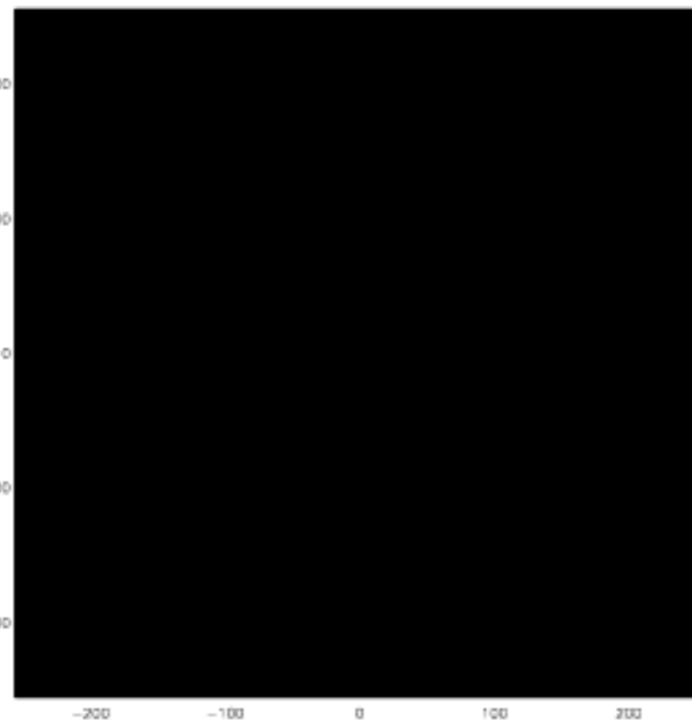
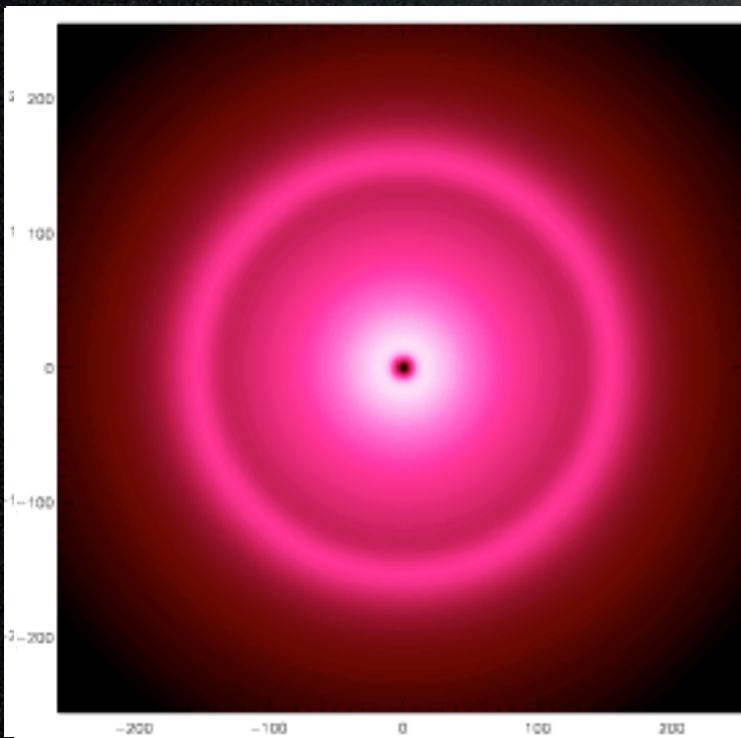
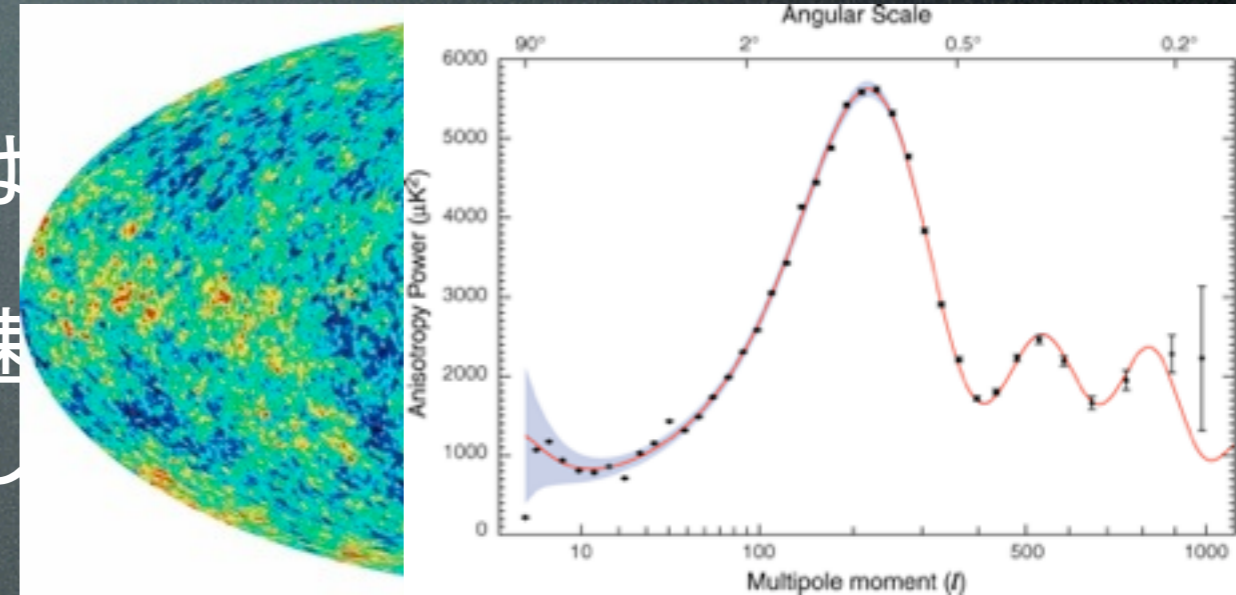
銀河団: 数分布、質量関数、空間分布

Pros: ポテンシャル大

Cons: 銀河団質量の推定の不定性

バリオン音響振動 (BAO)

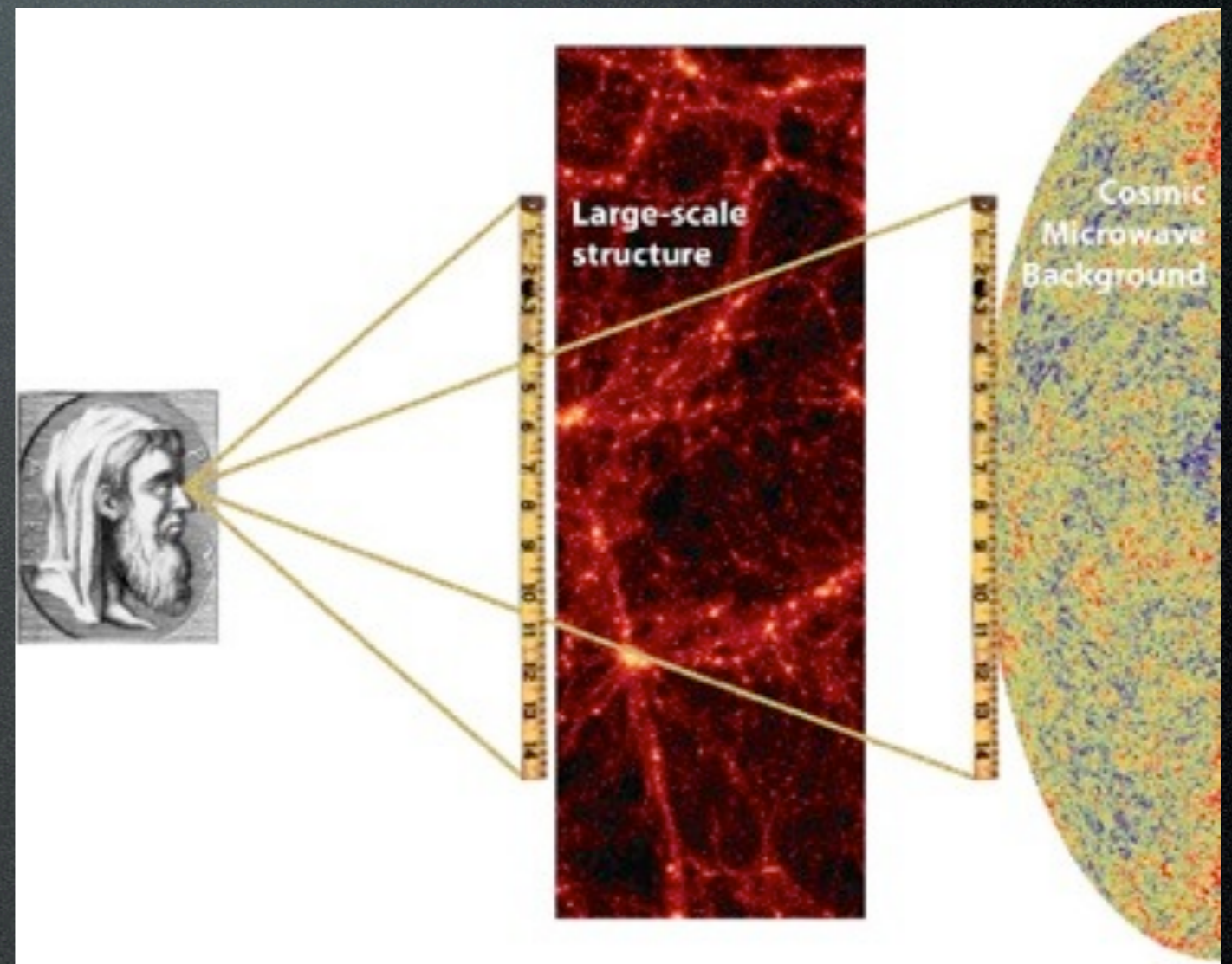
- バリオンと光子の摂動を考える
 - 宇宙初期には、バリオンと光子はように振る舞う
 - 光の圧力によってバリオンは光速
 - 宇宙が冷え、電子と陽子が結合しが切れる(その時の光が、CMB)
 - 光の圧力を失ったバリオンは、ほとんど外側に広がらず、100Mpc/h付近に特徴的なスケールをもったゆらぎとなる
- 重力成長したダークマターのゆらぎに、BAOの痕跡が残る



Credit: Martin White

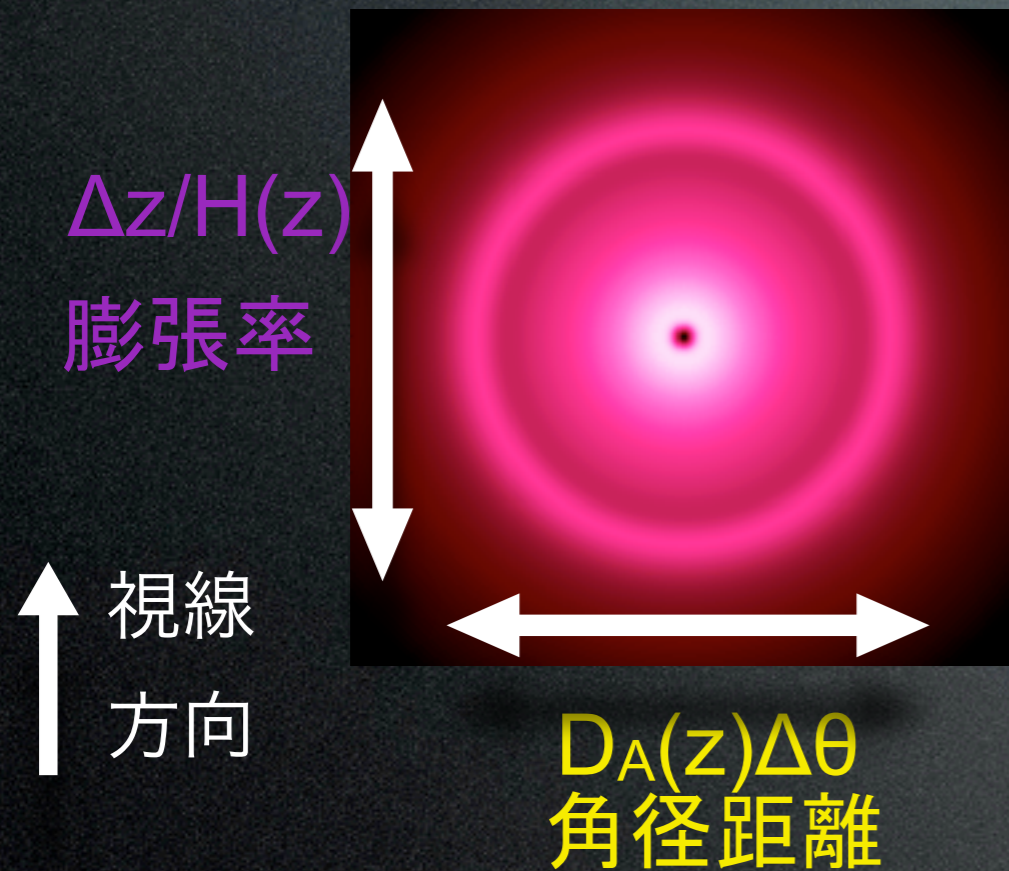
Inverse distance ladder

SNなどの距離指標は、近傍での測定を基準として、遠方へ距離を伸ばしていった。BAOは逆に、遠方($z \sim 1100$)のCMBの振動スケールを基準とした距離指標



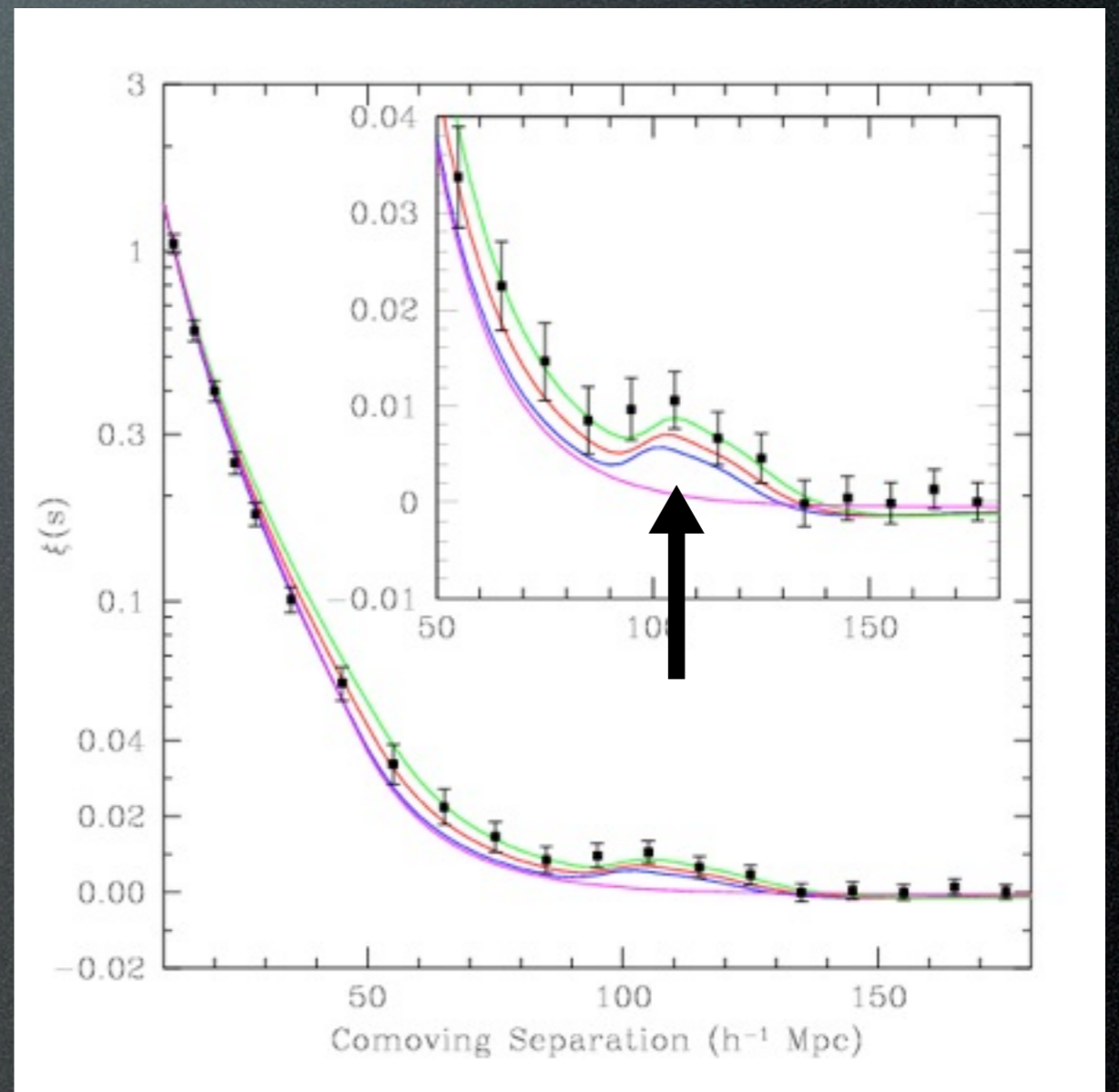
Standard Ruler

BAOは宇宙の幾何学を使った距離指標、Astrophysicalな不定性はほとんどないrobustなprobe



角度平均したBAO スケールから制限される距離

$$D_v(z) = \left[(1+z)^2 D_A^2(z) \frac{cz}{H(z)} \right]^{1/3}$$



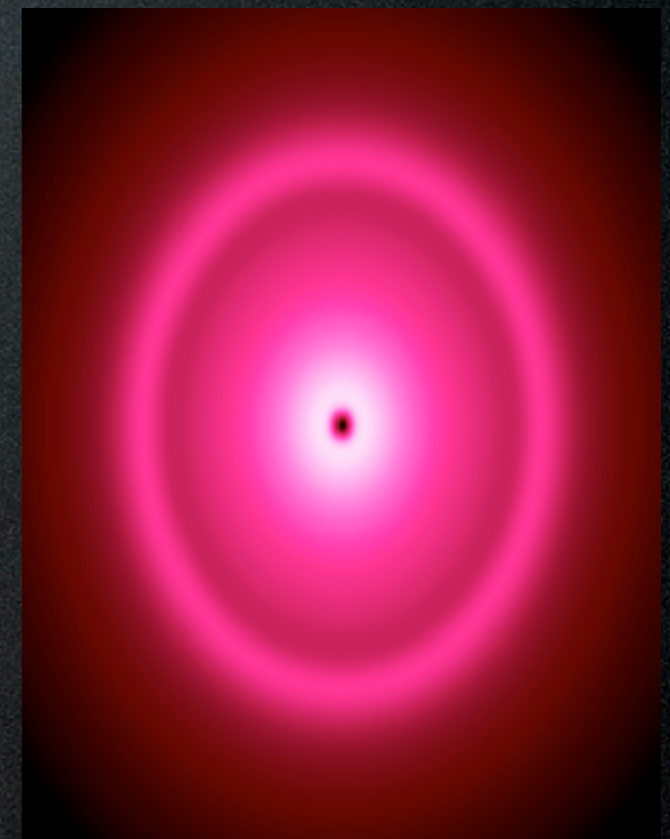
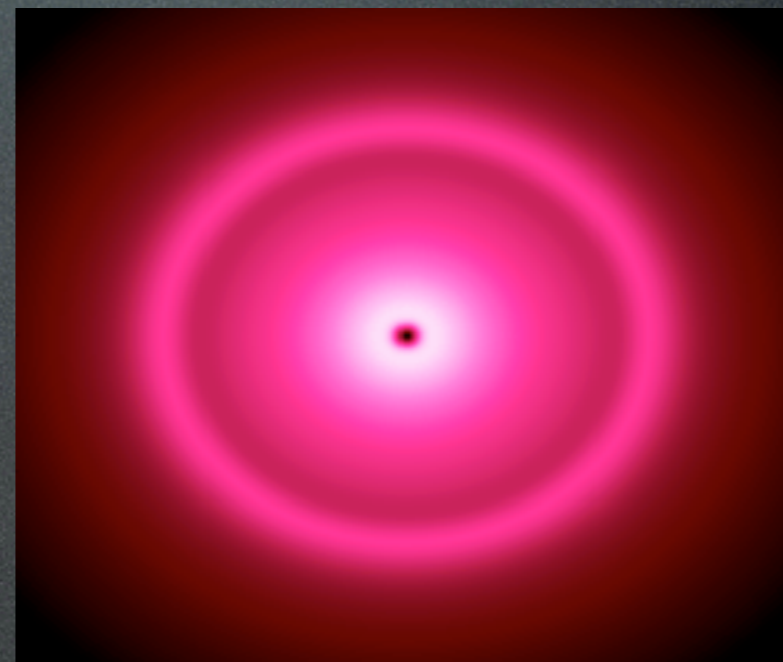
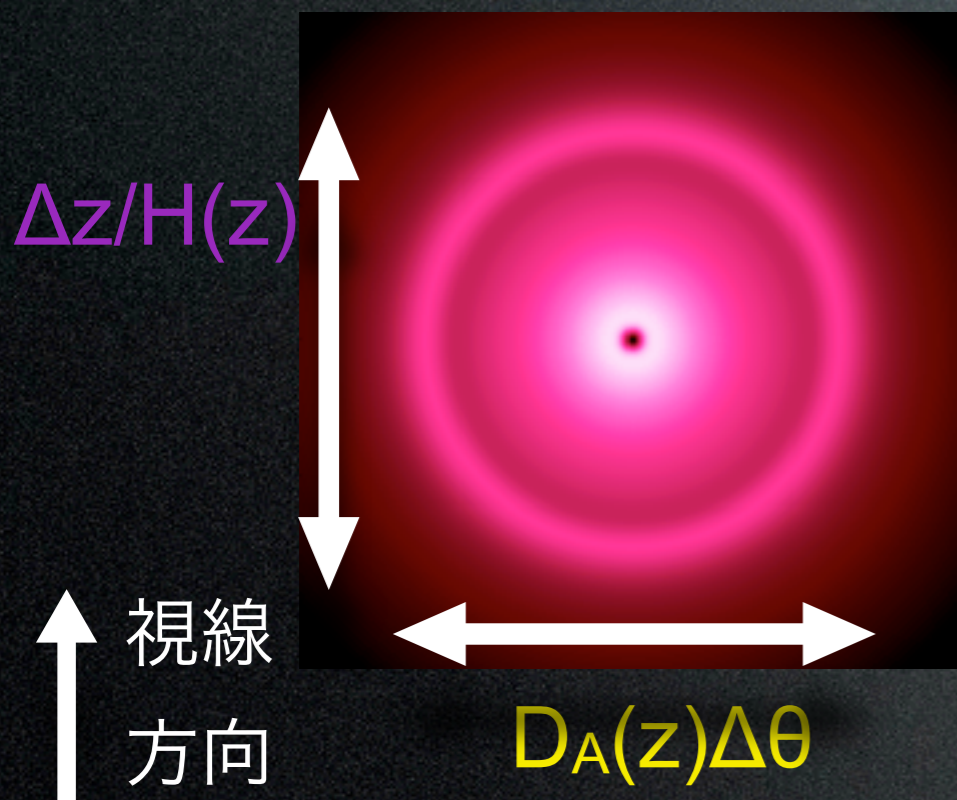
Eisenstein et al. 2005

Alcock-Paczynski test

BAOの非等方性を使った宇宙論テスト

等方な宇宙では、
BAOも等方

間違った宇宙モデルのもとで距離を変換すると、一般にBAOは非等方になる



非等方性パラメター

$$F(z) = \frac{1+z}{c} D_A(z) H(z)$$

SDSS III BOSS survey(2009-2014)

Goal

distance measurements using BAO
with 1% ($z=0.35$ and 0.6) and
1.5% ($z=2.5$) precisions

Target

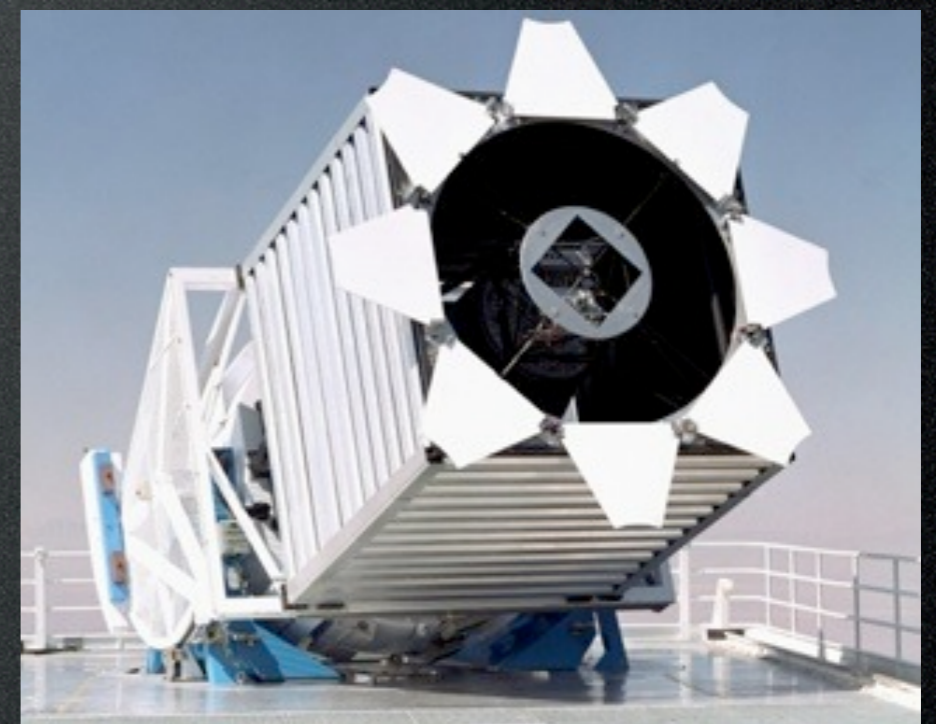
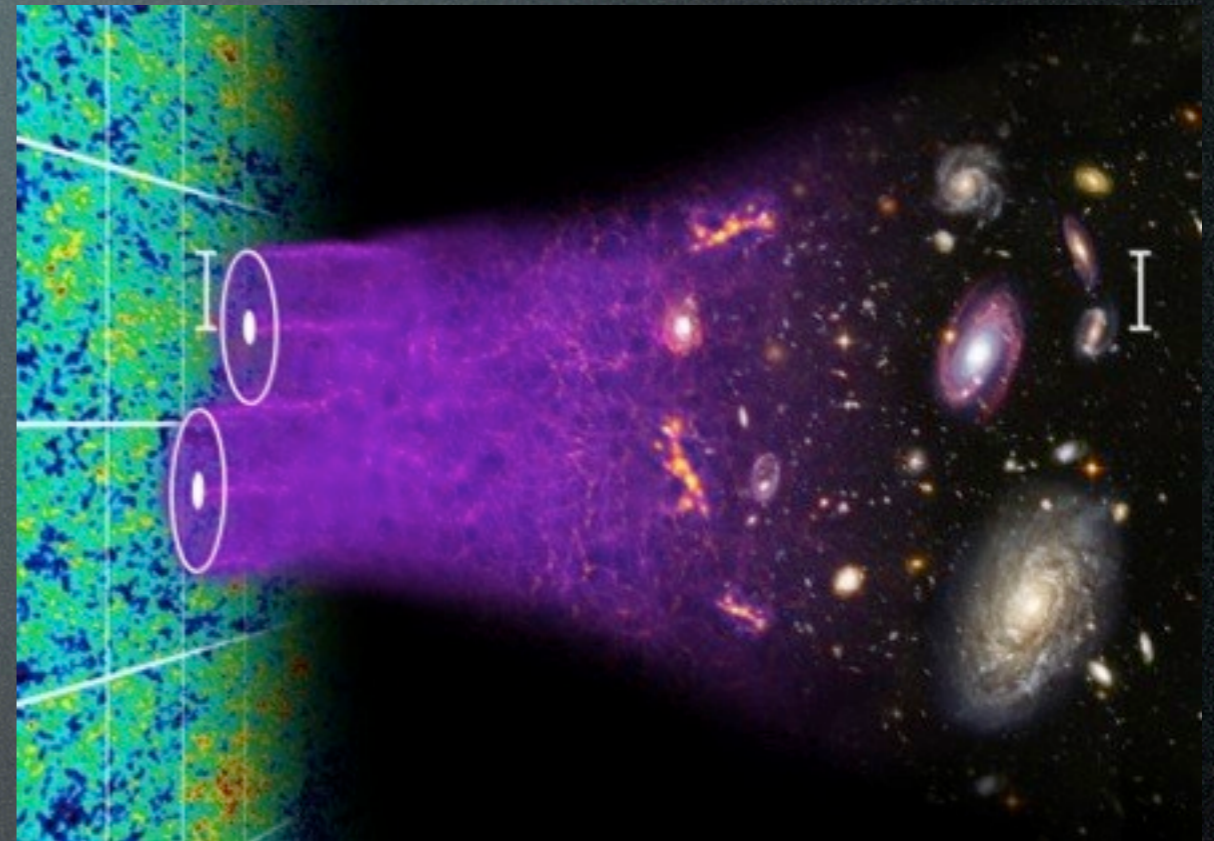
1,500,000 LRGs ($0.2 < z < 0.8$)
160,000 QSOs ($2.2 < z < 3$)
over 10,000 deg^2 of sky

Instruments

SDSS 2.5m telescope at Apache Point
observatory (2788m, 1.2" seeing)

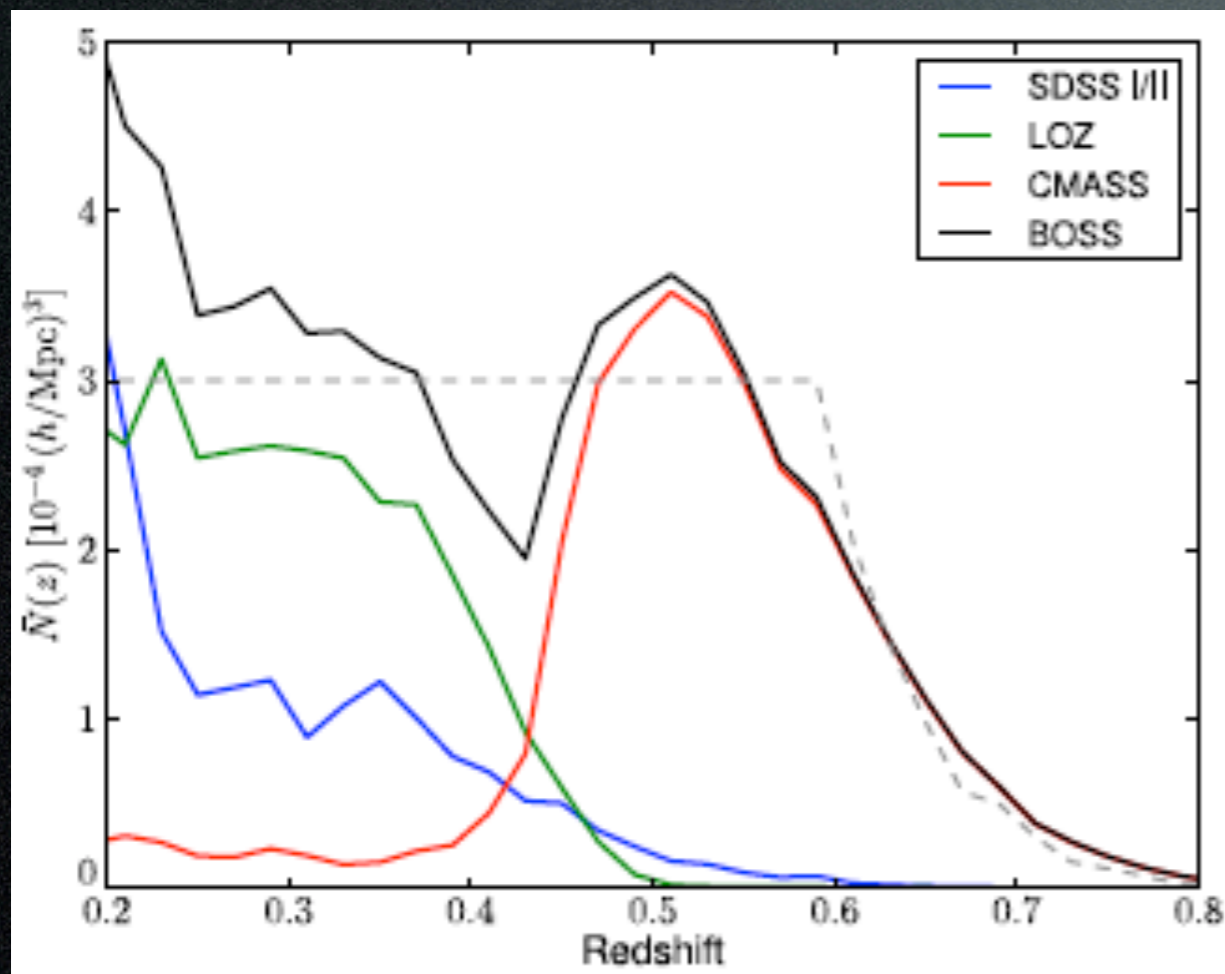
Camera: 30 2kx2k CCDs with 5 filters
(r, i, u, z, g), 6 deg^2 FOV

Spectrographs: 1000 fibers (2"
diameter), $R \sim 2000$, 360-1000nm

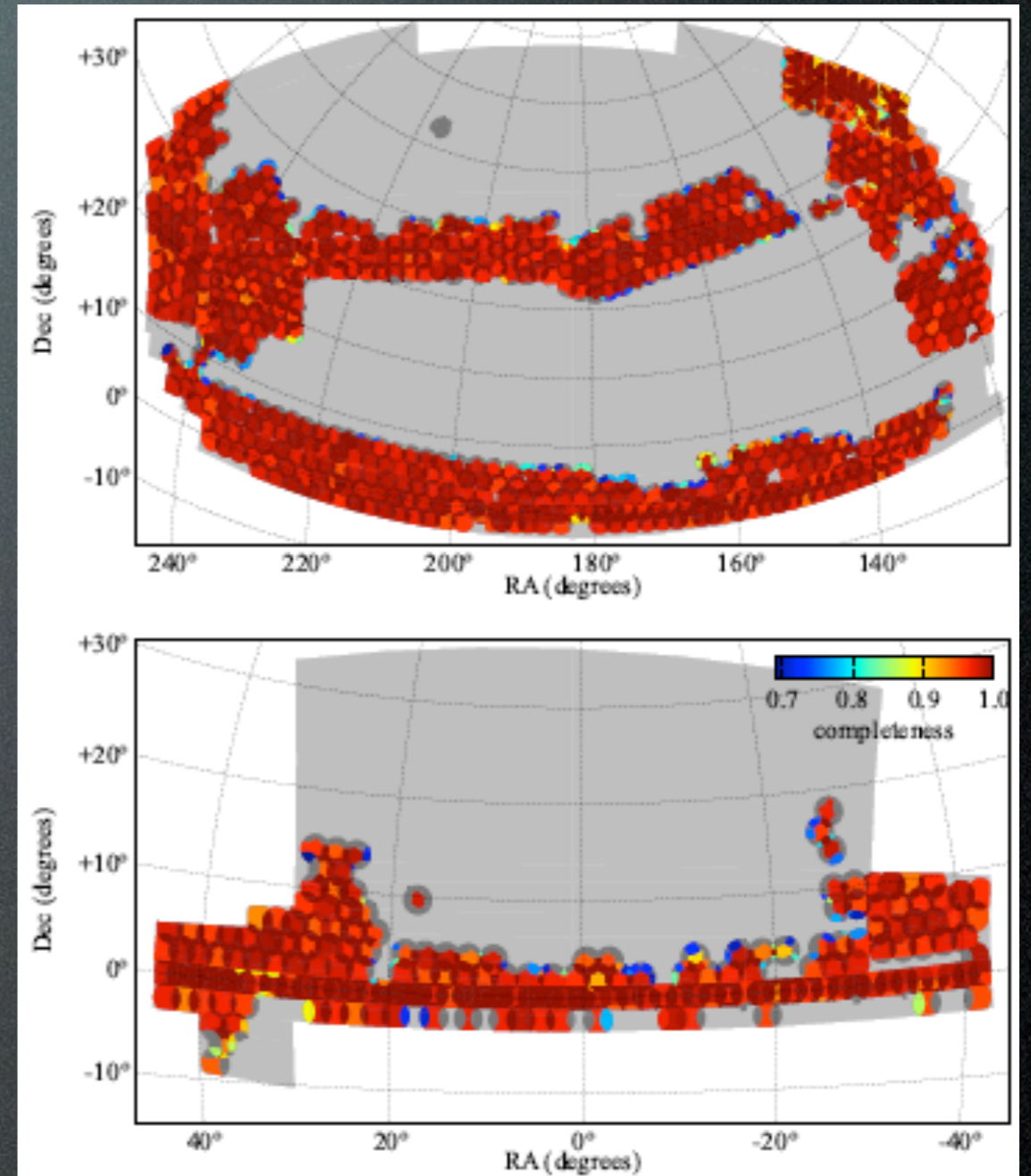


BOSS CMASS Catalog

CMASS (Constant stellar MASS cut)
264,283 LRGs in $0.43 < z < 0.7$
 $z_{\text{eff}} = 0.57$, $V_{\text{eff}} = 2.2 (\text{Gpc}/h)^3$



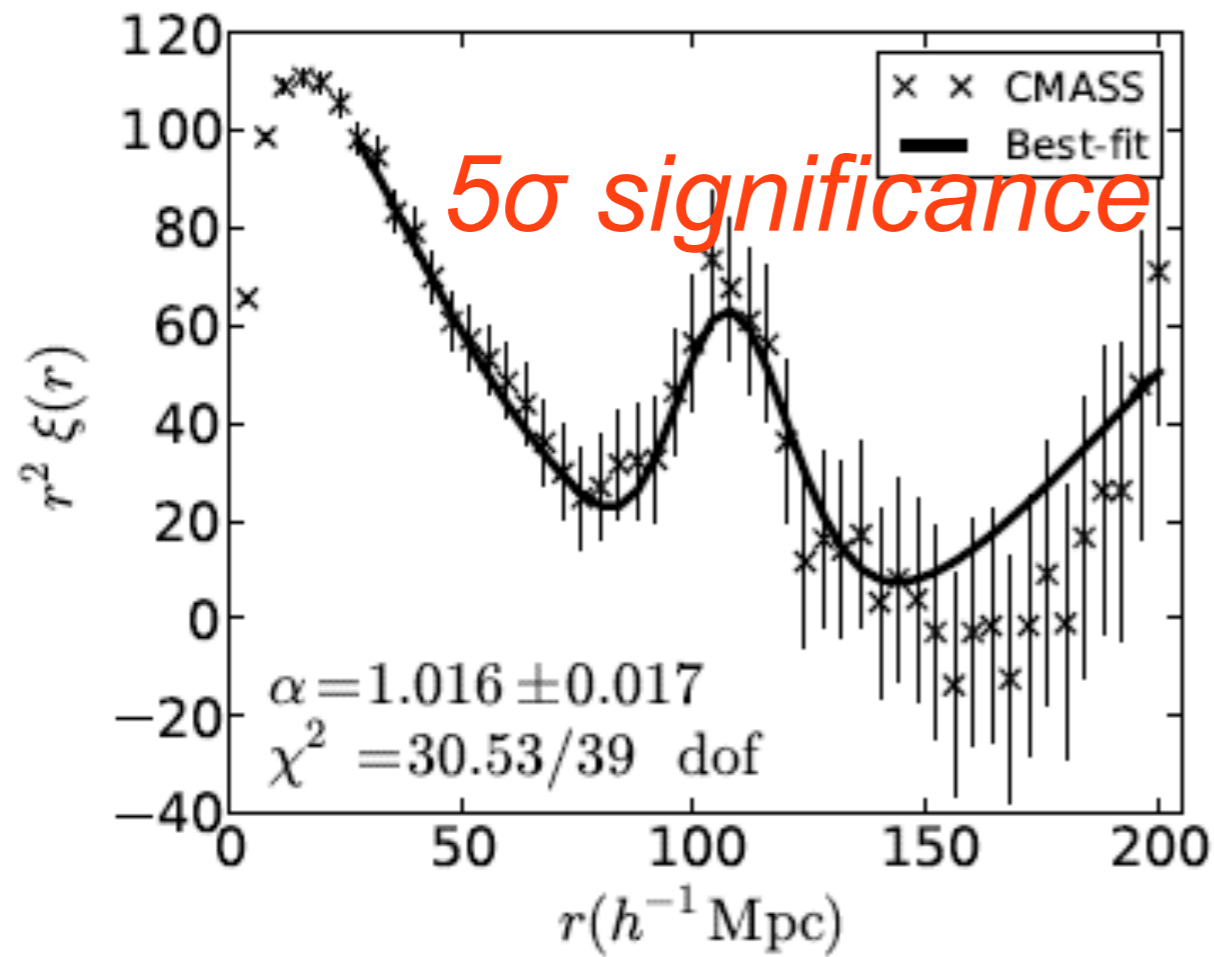
Anderson et al. 2012



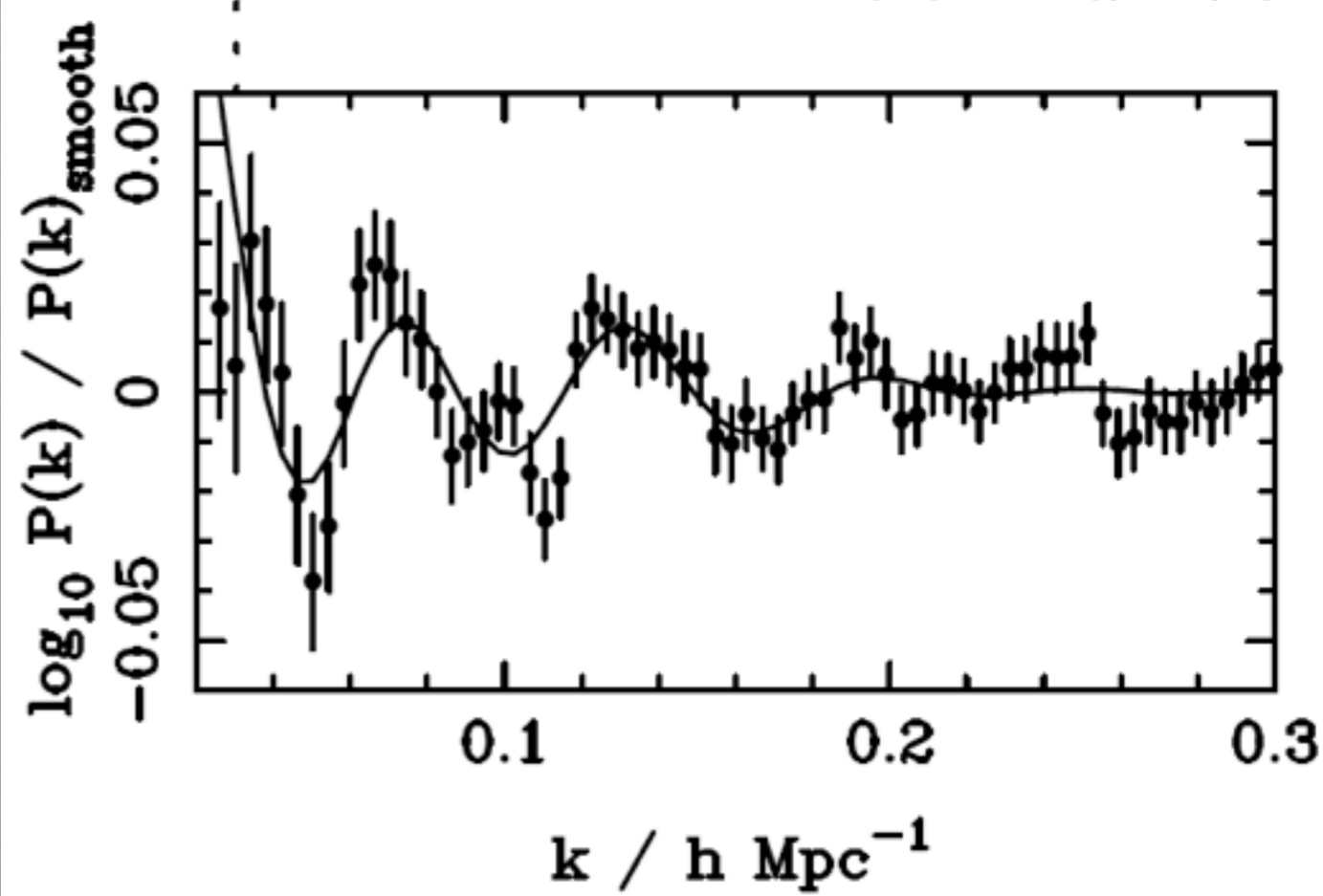
Sky coverage of current data (3275deg^2)
Grey: expected total (10269deg^2)

BOSS BAO Measurement

2点相関関数 $\xi(r) = \langle \delta(\mathbf{x})\delta(\mathbf{x} + r) \rangle$



パワースペクトル $P(k) = \langle |\tilde{\delta}_{\mathbf{k}}|^2 \rangle$



Anderson et al. 2012

$D_V(z=0.57) = 2094 \pm 34 \text{ Mpc}$ (1.7% エラー)

WiggleZ Dark Energy Survey

Goal

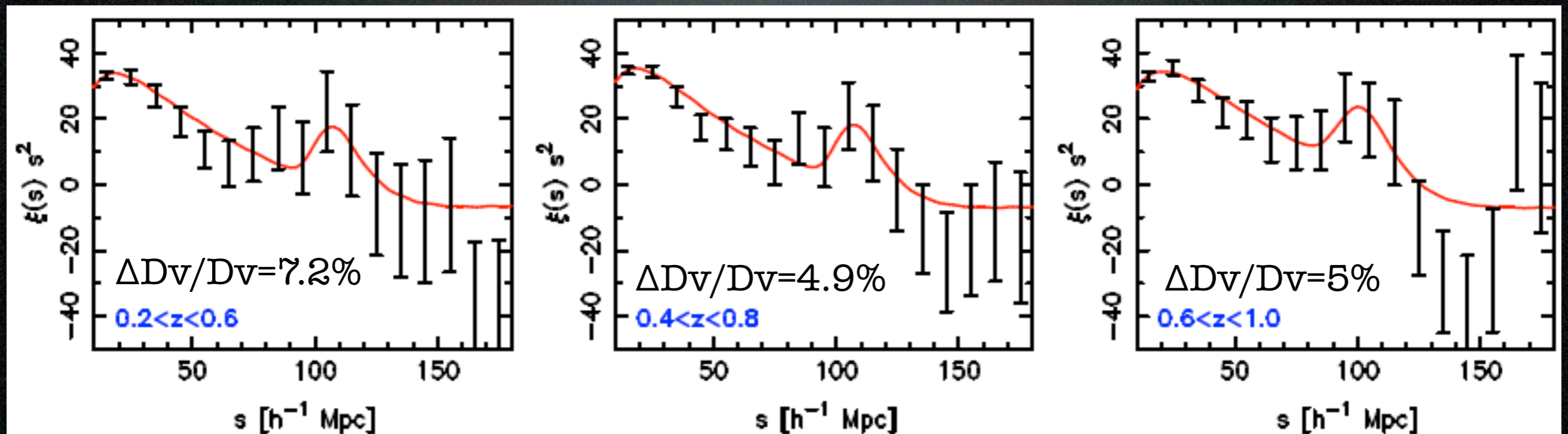
2% distance measurement at $z=0.7$

Target

240,000 blue emission line galaxies
over 1000 deg² of sky in $0.2 < z < 1$
($\sim 1 \text{ Gpc}^3$ volume)

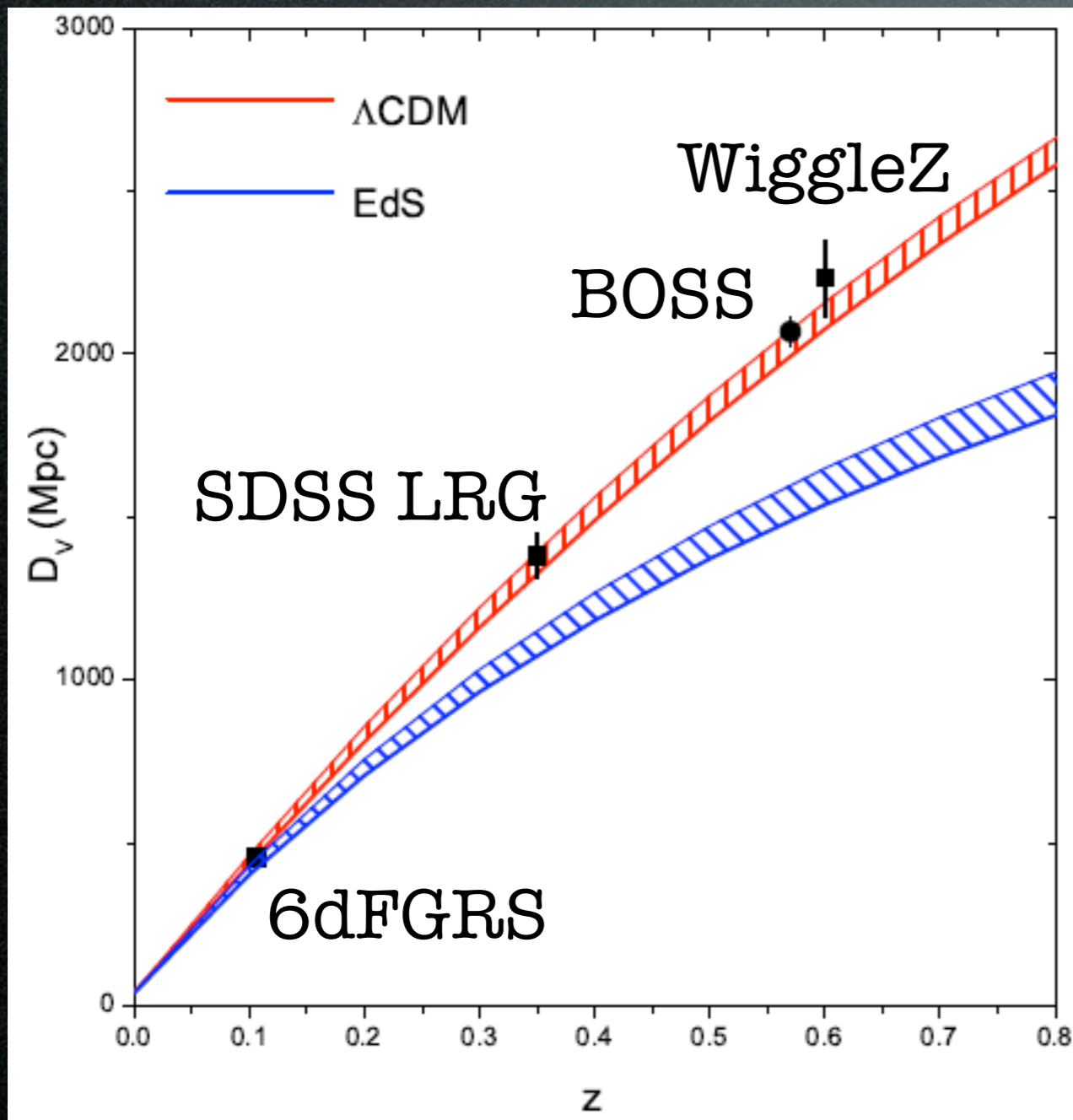
Instrument

4m Anglo-Australian Telescope
AAOmega/2df spectrograph
276 nights (2006-2011)

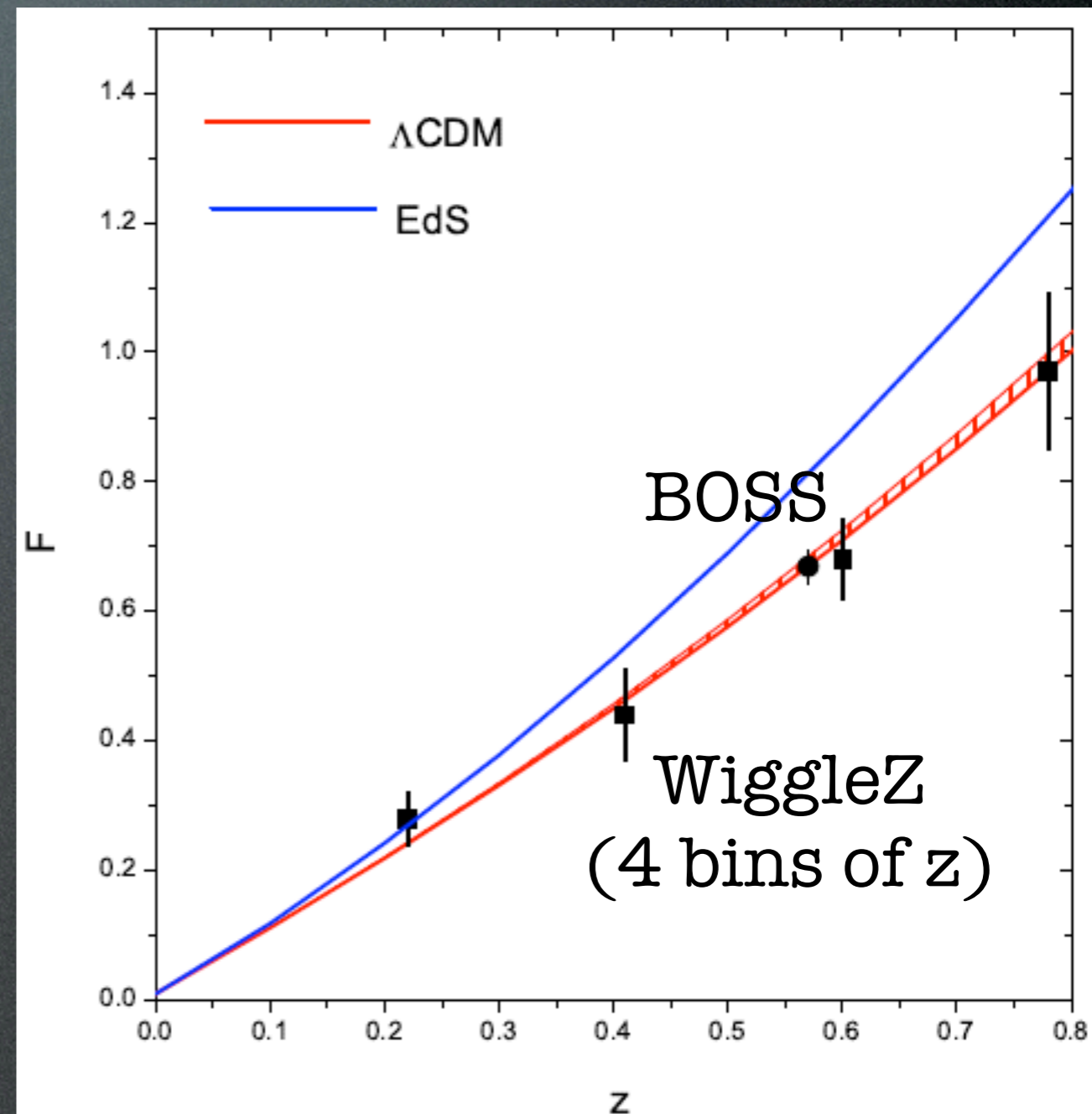


Distance & Anisotropy measurements using BAO

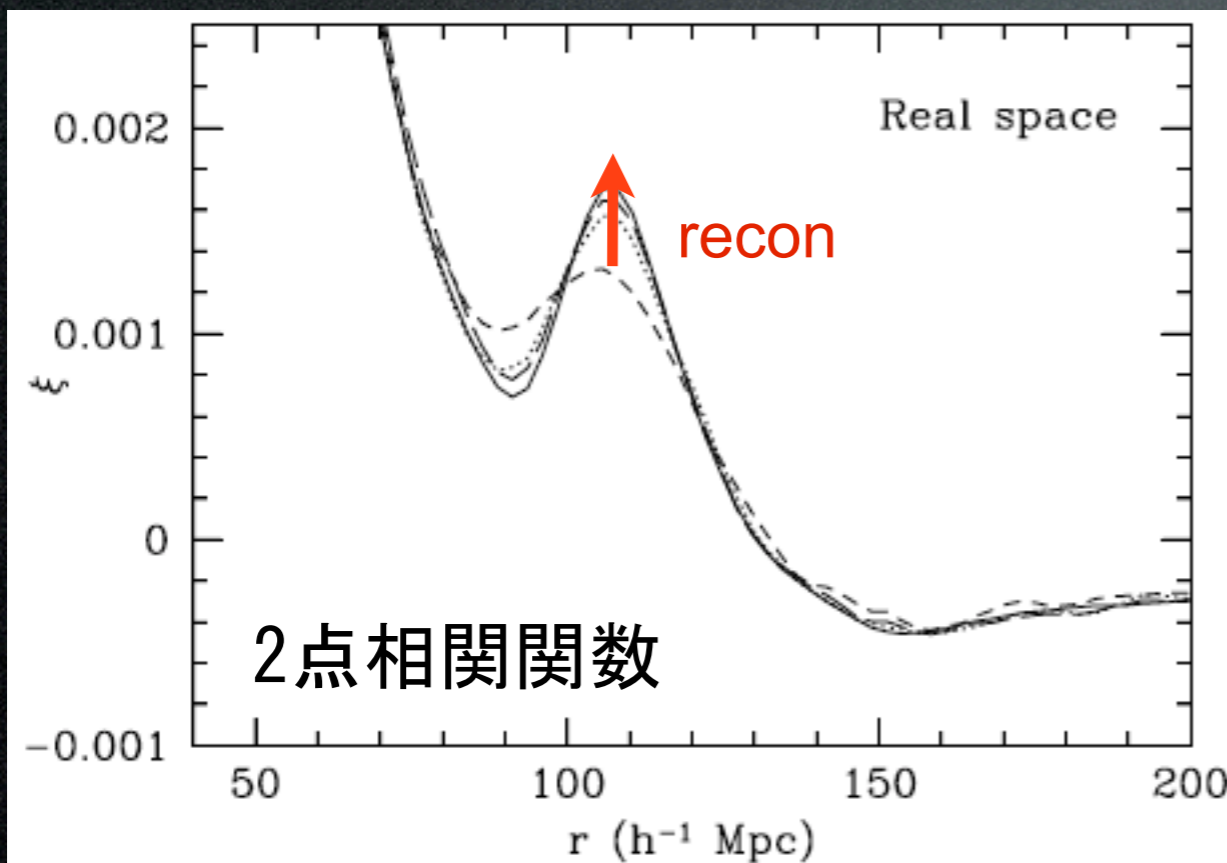
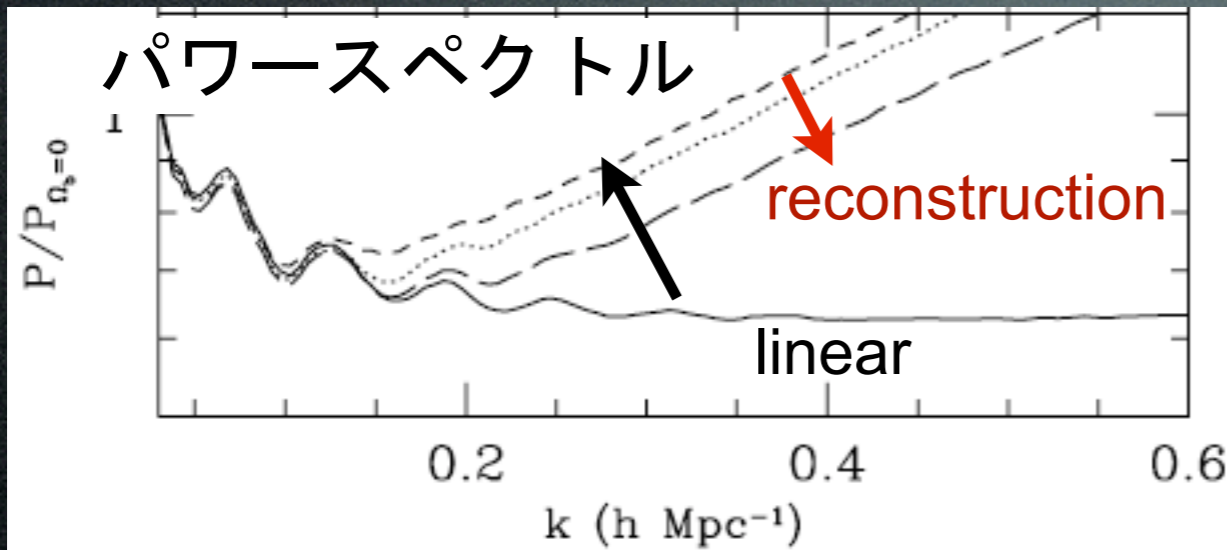
Angle-averaged Distance



Anisotropy

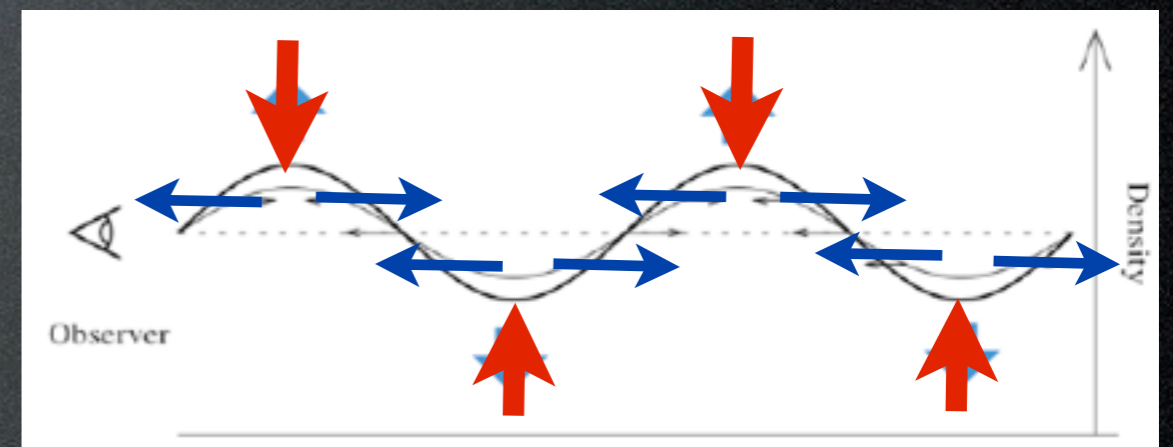


Reconstruction of BAO



BAOのシグナルは構造の進化の非線形性によって弱まる

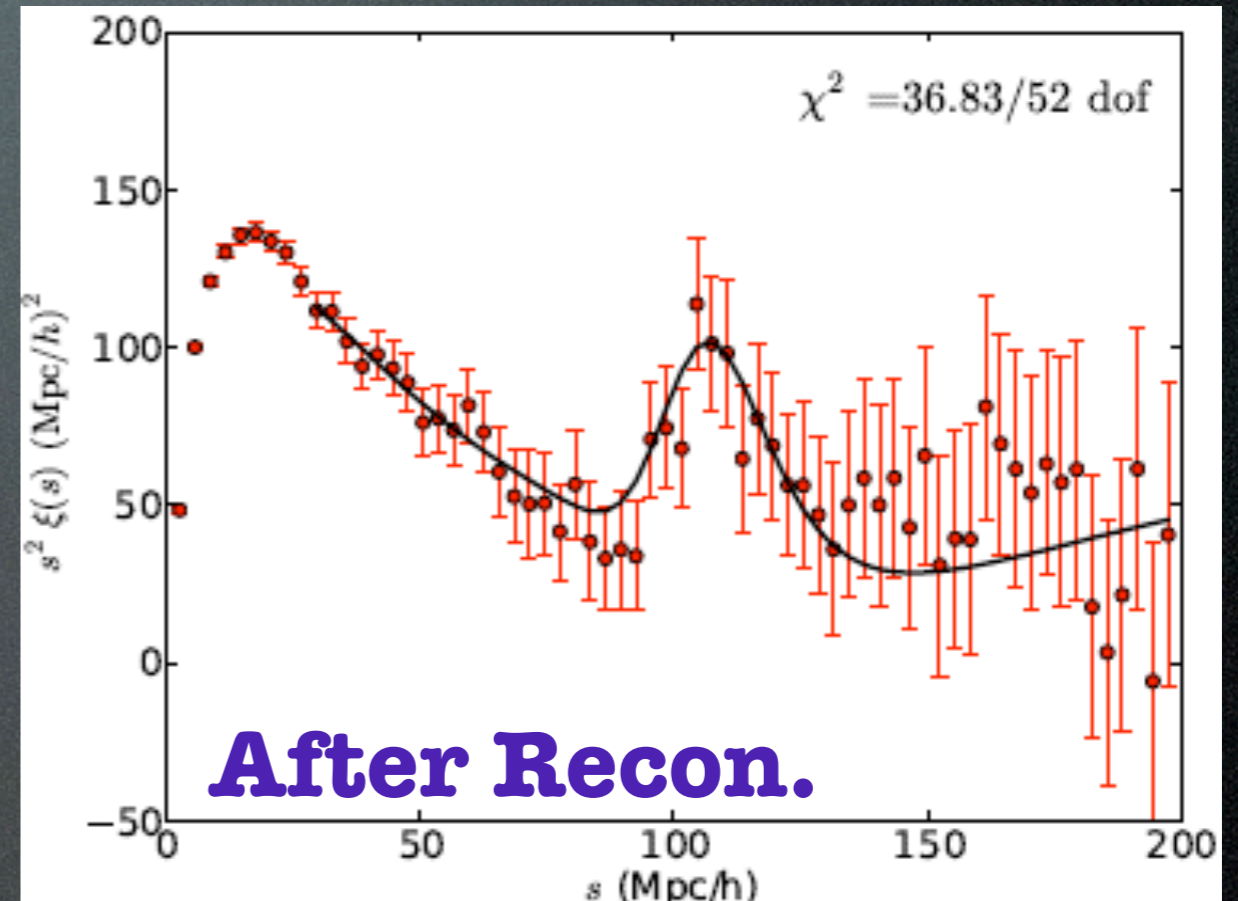
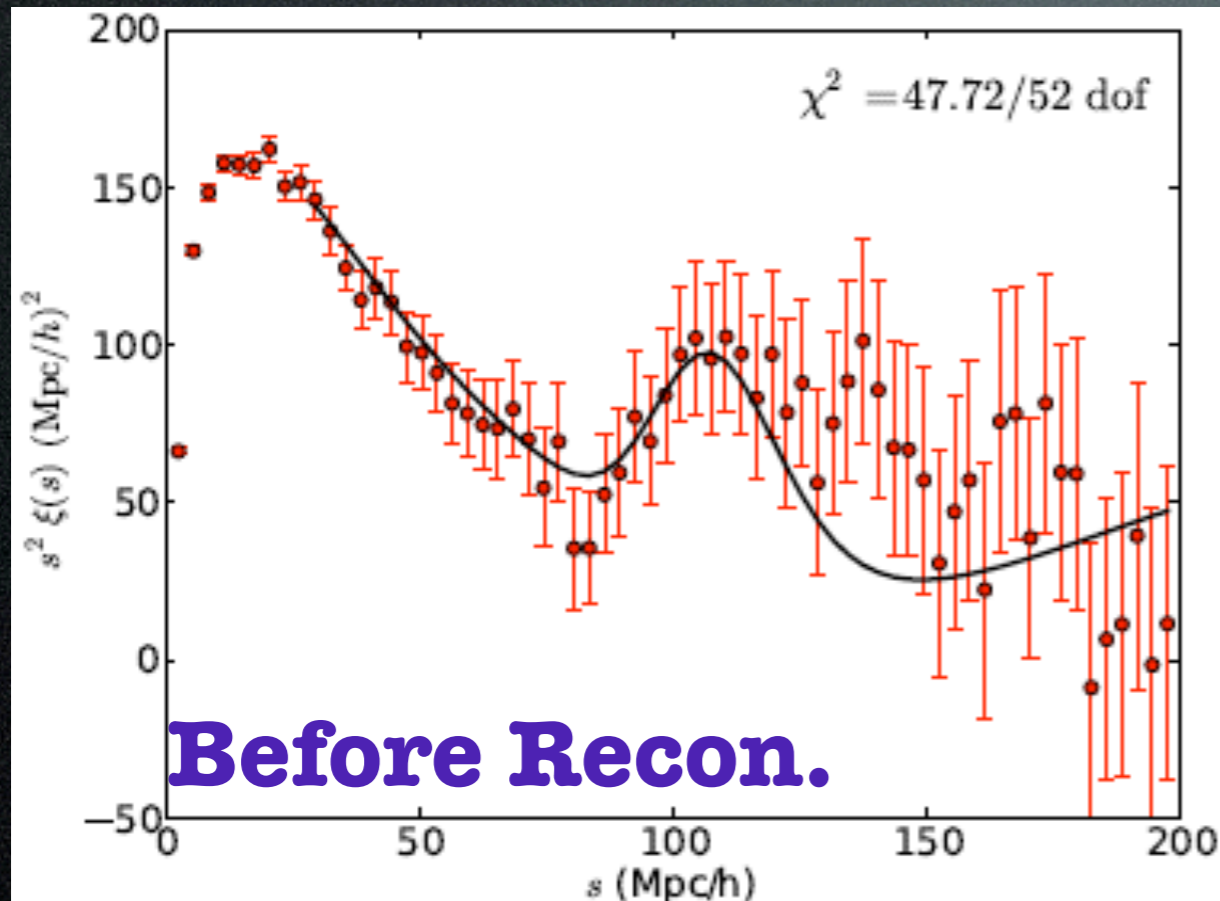
銀河のゆらぎを均す方向に銀河を動かすことで、非線形な影響を部分的に取り除くことができ、BAOのシグナルが復活する



$$\nabla \cdot \mathbf{q} = -\delta$$

Eisenstein et al. 2007

Application to SDSS DR7 LRG

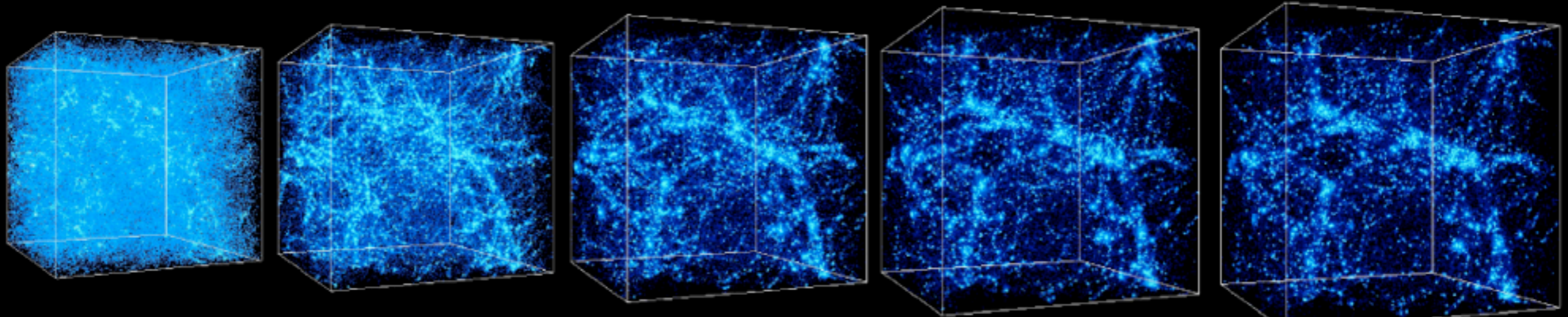


Padmanabhan et al. 2012

$$D_V/r_s = 8.89 \pm 0.31 \rightarrow 8.88 \pm 0.17$$

Reconstructionによって、距離の測定精度が2倍近く向上！

密度ゆらぎの進化



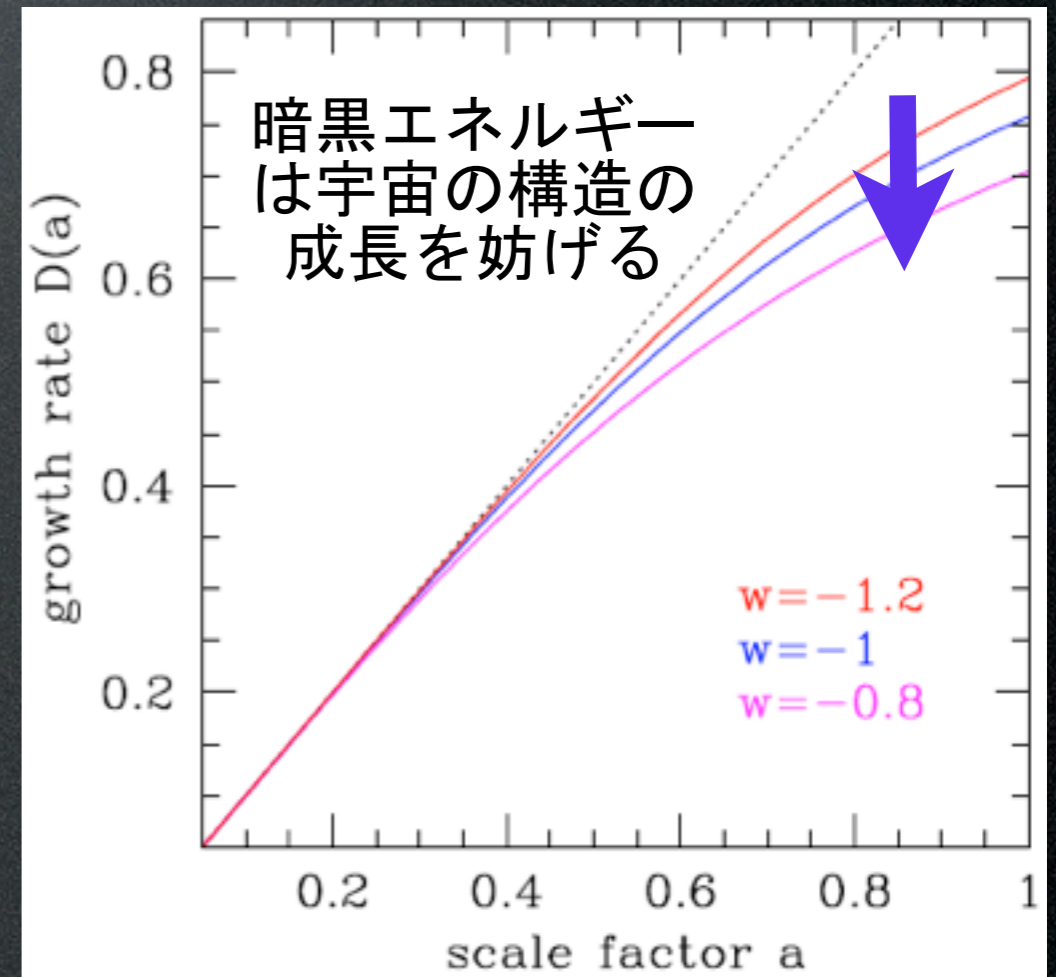
credit: A. Kravtsov

線形摂動論に基づく非相対論物質の
密度ゆらぎの成長方程式

$$\ddot{D} + 2H\dot{D} - 4\pi G\bar{\rho}_m D = 0, \quad \delta_k(z) \propto D(z)$$

線形成長率 (Growth Rate)

$$f(z) \equiv \frac{d \ln D}{d \ln a} \simeq \Omega_m(z)^{0.55} \quad (\text{Peebles 1984})$$



Modified Gravity

計量のゆらぎ (ニュートンゲージ)

$$ds^2 = -(1 + 2\psi)dt^2 + (1 - 2\phi)a^2(t)dr^2$$

GR

Modified Gravity

$$k^2 \phi = -4\pi G a^2 \bar{\rho} \delta$$

$$G_{\text{eff}}(\mathbf{k}, t)$$

$$\phi = \psi$$

$$\eta(\mathbf{k}, t)$$

連続、オイラー式 (圧力、非等方テンソルなし)

$$\dot{\delta} = -\theta/a$$

$$\dot{\theta} = -H\theta + k^2 \Psi/a$$

密度ゆらぎの成長方程式

$$\ddot{D} + 2H\dot{D} - 4\pi G \bar{\rho}_m a^2 D = 0$$

$$\frac{G_{\text{eff}}(\mathbf{k}, t)}{\eta(\mathbf{k}, t)}$$

赤方偏移歪み

銀河までの距離は赤方偏移(後退速度)からハッブル則を使って推定
→個々の銀河の特異速度によって、観測される銀河分布は歪む

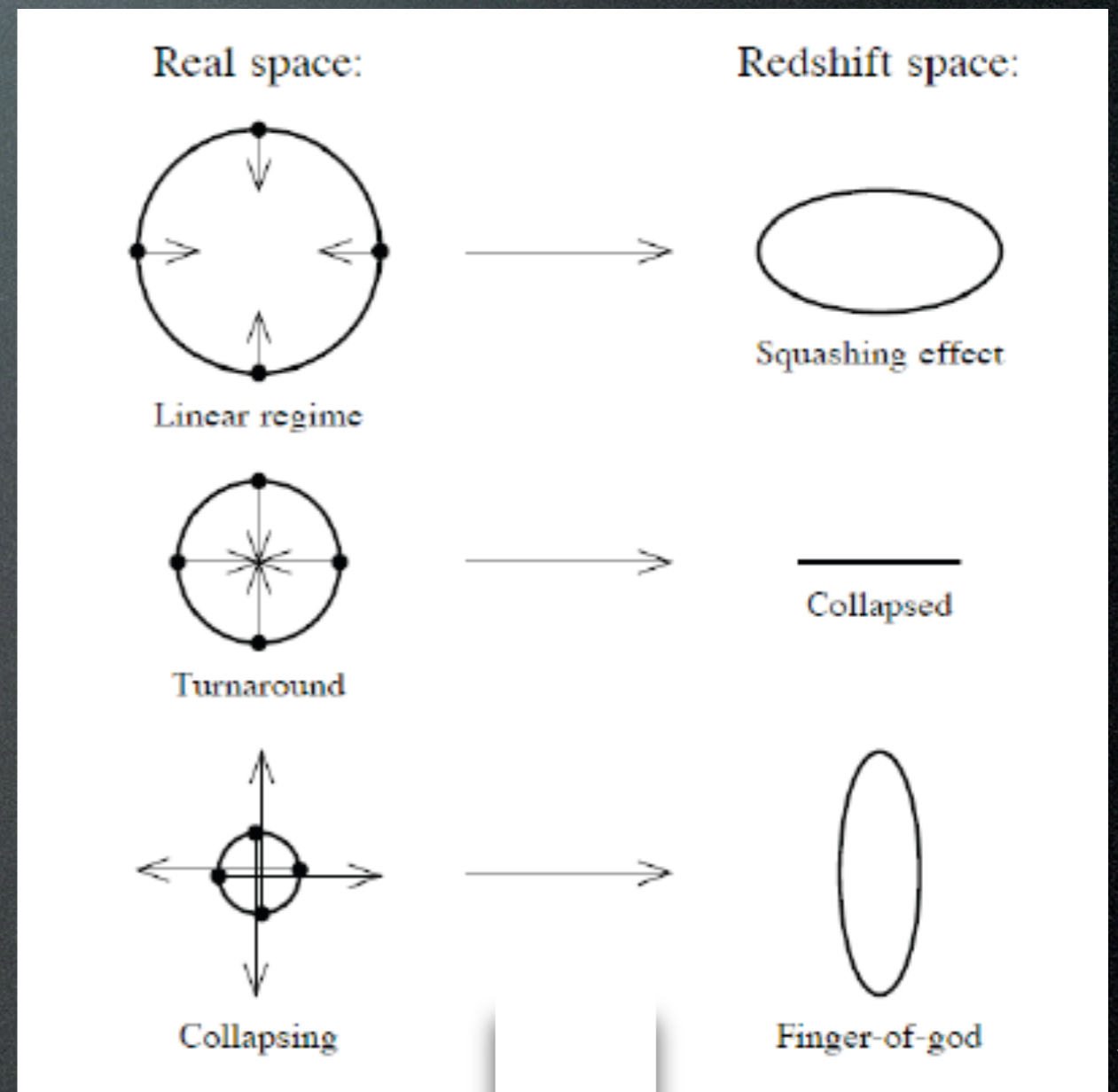
$$Z_{\text{obs}} = Z_{\text{true}} + \delta v/c$$

線形領域

大スケールの銀河運動により視線方向につぶれる (Kaiser 1987)

非線形領域

ランダムな運動によって視線方向に伸びる “Finger-of-God”



Hamilton 1998

視線方向 ↑

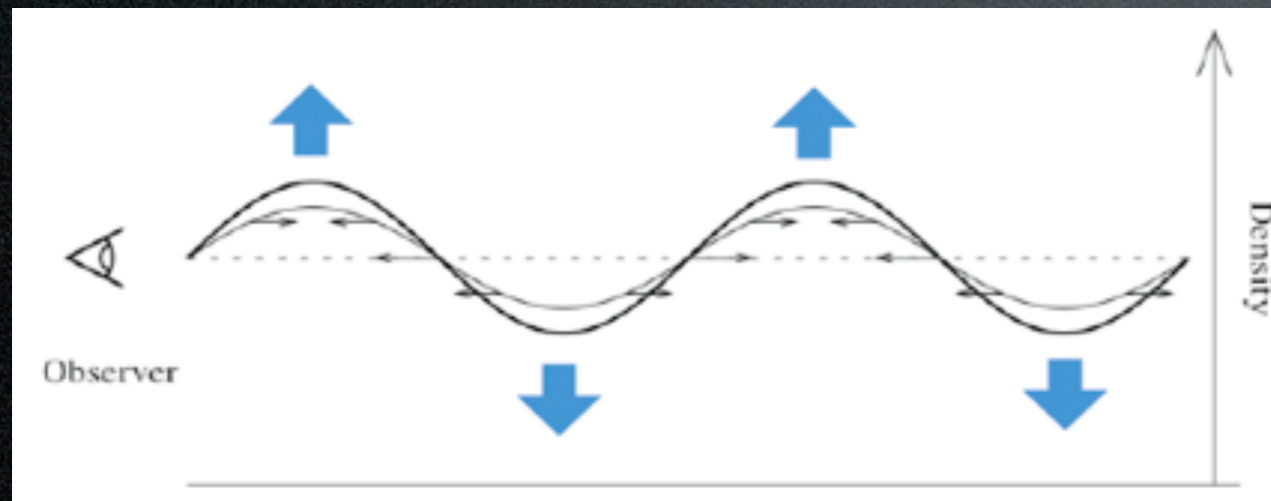
赤方偏移歪みを使った Growth Rate測定

線形近似では、Growth Rateは特異速度の大ききさで決まる
 →大スケールでの赤方偏移歪みの大ききさから、Growth Rateの推定ができる

Growth Rate

特異速度

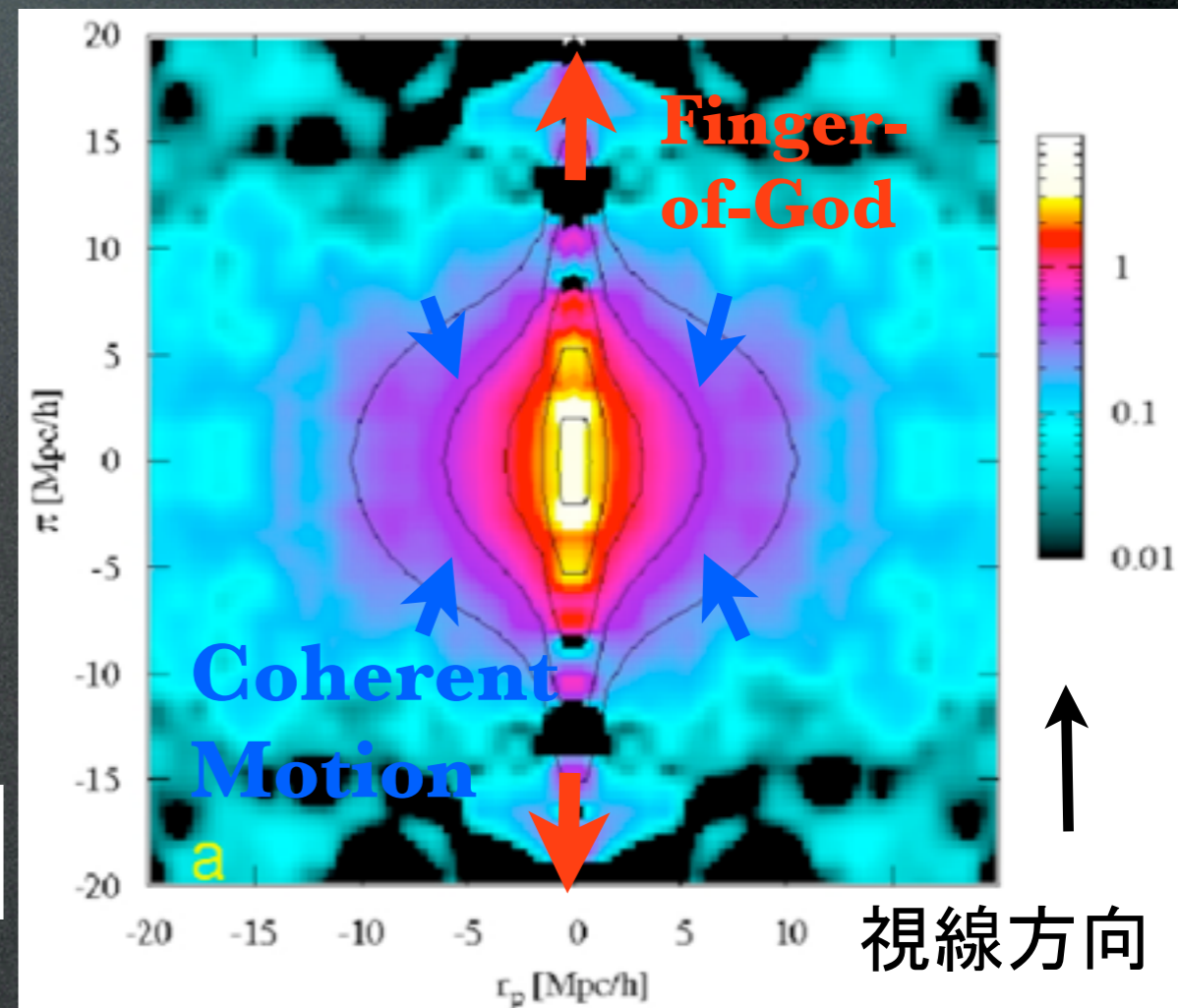
$$\dot{\delta}(z) = -(1+z)\nabla \cdot \mathbf{v}$$



$$P_g(k, \mu) = (b + f\mu)^2 P_m(k) \quad (\text{Kaiser 1987})$$

$$\delta_g = b\delta_m, \quad \cos(\mu) = k_{\parallel}/k$$

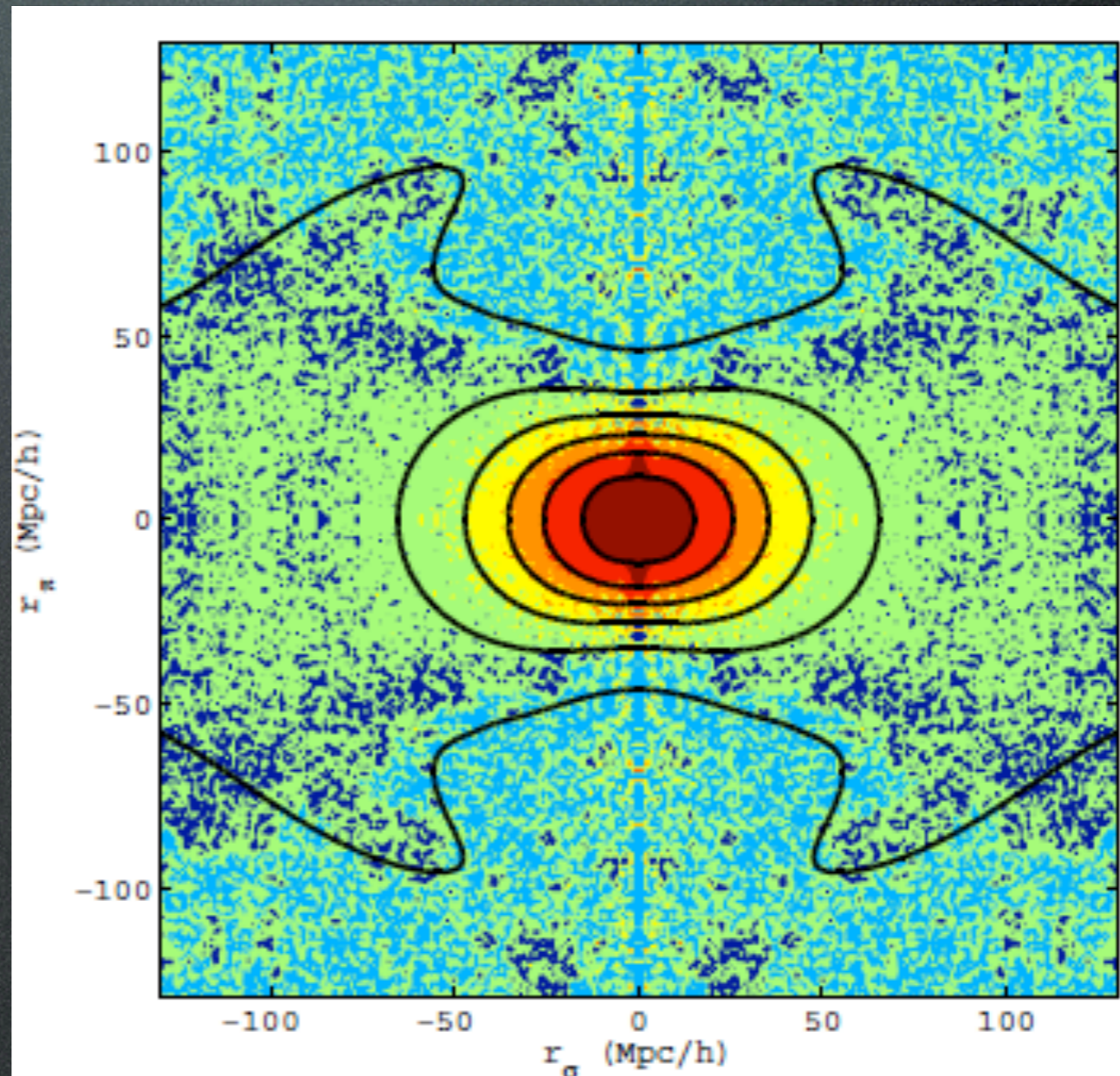
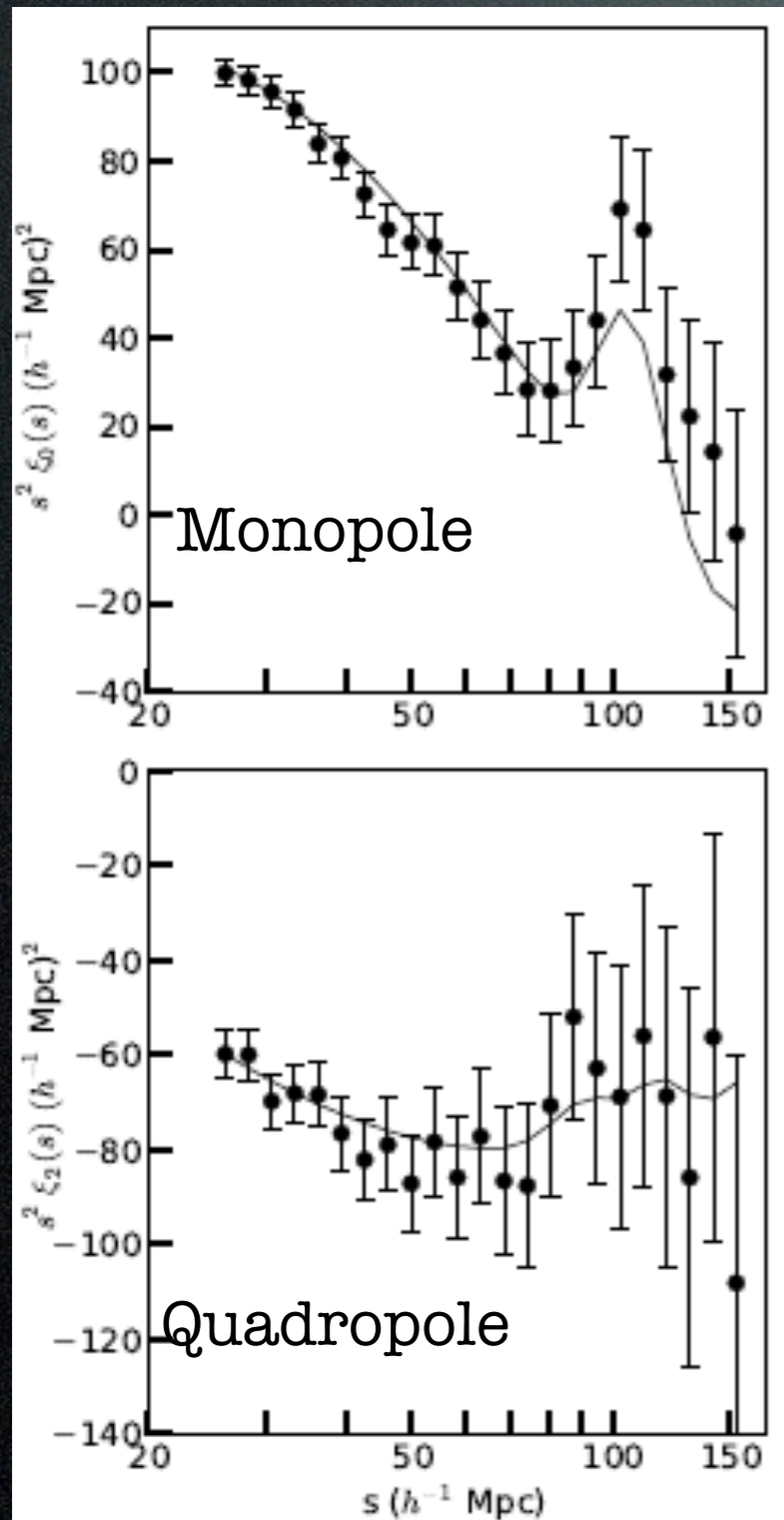
2点相関関数



Guzzo et al. 2008

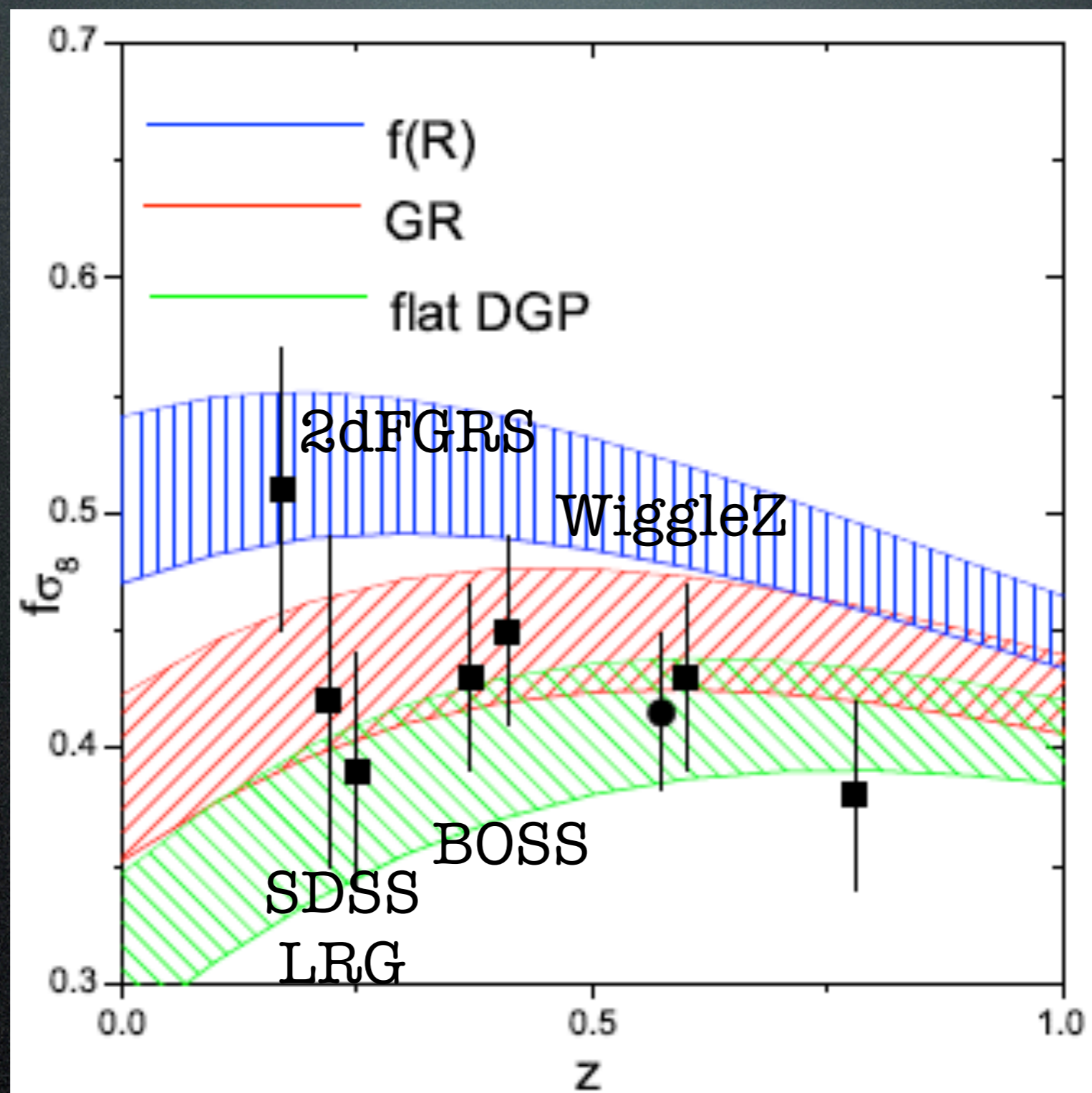
Anisotropy Measurement

BOSS CMASS サンプルを使った
2次元の2点相関関数 $\xi(r_p, r_\pi)$

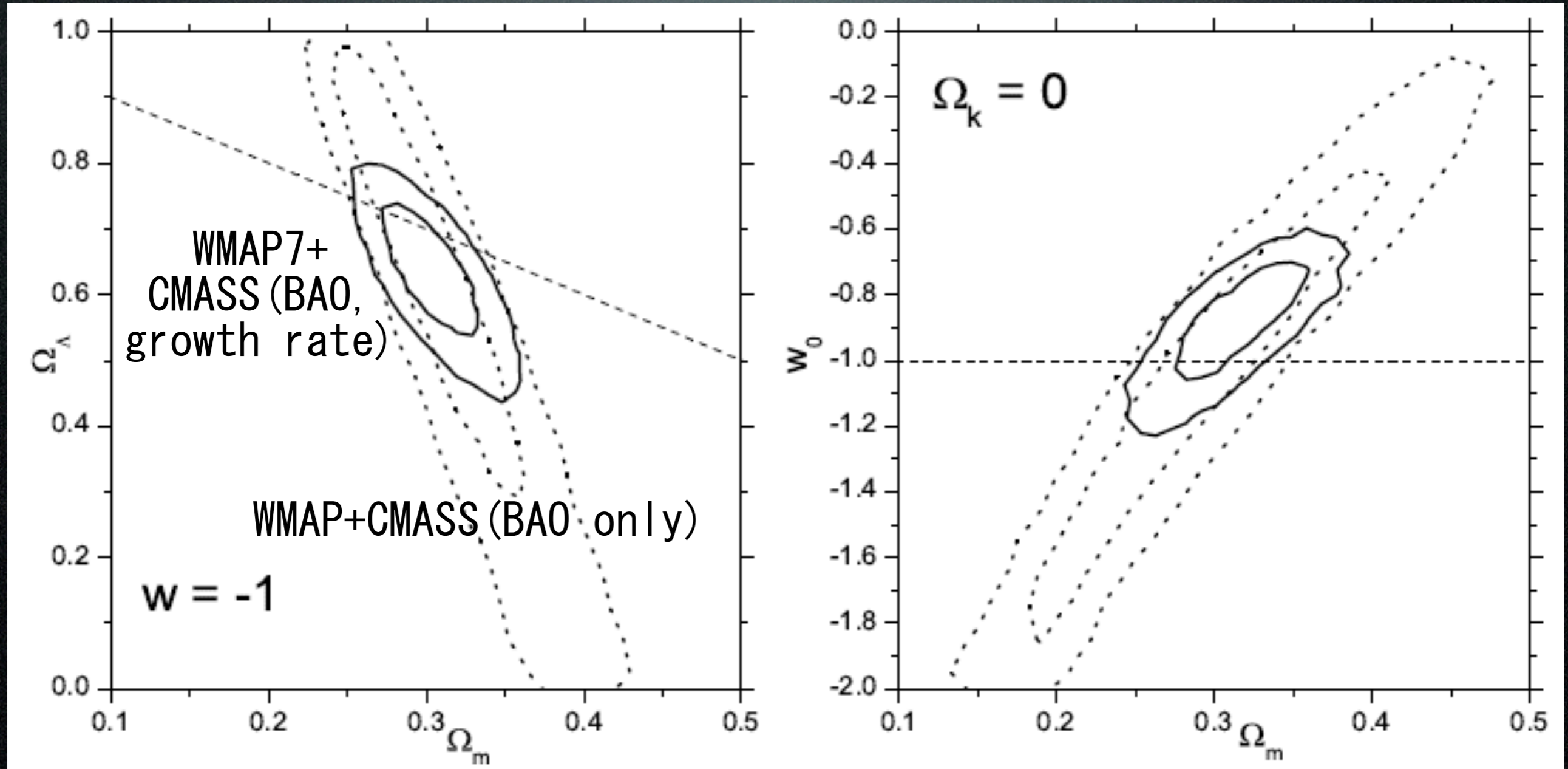


Reid et al. 2012

Growth rate への制限



Dark Energy parameterへの制限



BAO, Growth Rateからの 宇宙論パラメータ制限

Cosmological model	Data set	Ω_m	$1000\Omega_k$	H_0	w_0	w_a
Λ CDM	CMB + CMASS + SNeIa	0.285 ± 0.014	0	68.9 ± 1.1	-1	0
Λ CDM	CMB + CMASS	0.291 ± 0.014	0	68.5 ± 1.2		
Λ CDM	CMB + CMASS + H_0	0.281 ± 0.013	0	69.5 ± 1.1	-1	0
$O\Lambda$ CDM	CMB + CMASS + SNeIa	0.281 ± 0.014	-9.2 ± 5.0	67.7 ± 1.3	-1	0
$O\Lambda$ CDM	CMB + CMASS	0.288 ± 0.017	-8.5 ± 5.4	67.4 ± 1.3	-1	0
$O\Lambda$ CDM	CMB + CMASS + H_0	0.277 ± 0.014	-6.0 ± 4.9	68.8 ± 1.3	-1	0
wCDM	CMB + CMASS + SNeIa	0.292 ± 0.015		68.0 ± 1.4	-0.94 ± 0.05	0
wCDM	CMB + CMASS	0.313 ± 0.017		65.9 ± 1.5	-0.87 ± 0.05	
wCDM	CMB + CMASS + H_0	0.291 ± 0.015		68.2 ± 1.4	-0.93 ± 0.05	
Ow CDM	CMB + CMASS + SNeIa	0.285 ± 0.017	-8.2 ± 5.5	67.4 ± 1.5	-0.98 ± 0.05	0
Ow CDM	CMB + CMASS	0.307 ± 0.022	-3.9 ± 6.8	65.9 ± 1.6	-0.90 ± 0.07	0
Ow CDM	CMB + CMASS + H_0	0.285 ± 0.018	-3.7 ± 5.7	68.2 ± 1.5	-0.95 ± 0.07	0
w_0w_a CDM	CMB + CMASS + SNeIa	0.280 ± 0.018	0	68.8 ± 1.6	-1.13 ± 0.12	0.65 ± 0.36
w_0w_a CDM	CMB + CMASS	0.313 ± 0.037	0	66.2 ± 2.8	-0.86 ± 0.34	-0.14 ± 1.04
w_0w_a CDM	CMB + CMASS + H_0	0.261 ± 0.037	0	71.2 ± 2.3	-1.29 ± 0.19	1.02 ± 0.48

$H_0: 1.5\%$

$\Omega_k:$
 0.5%

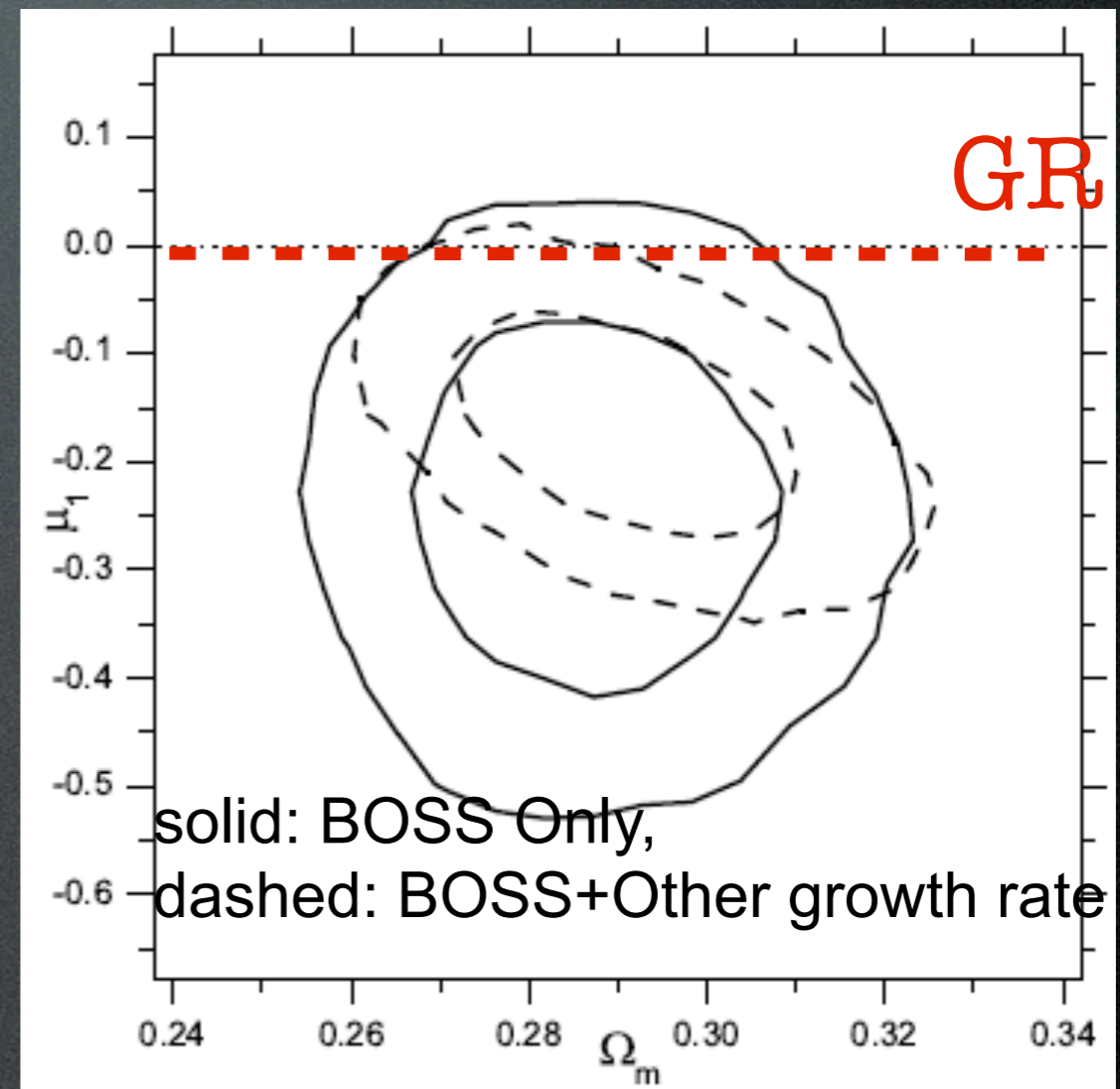
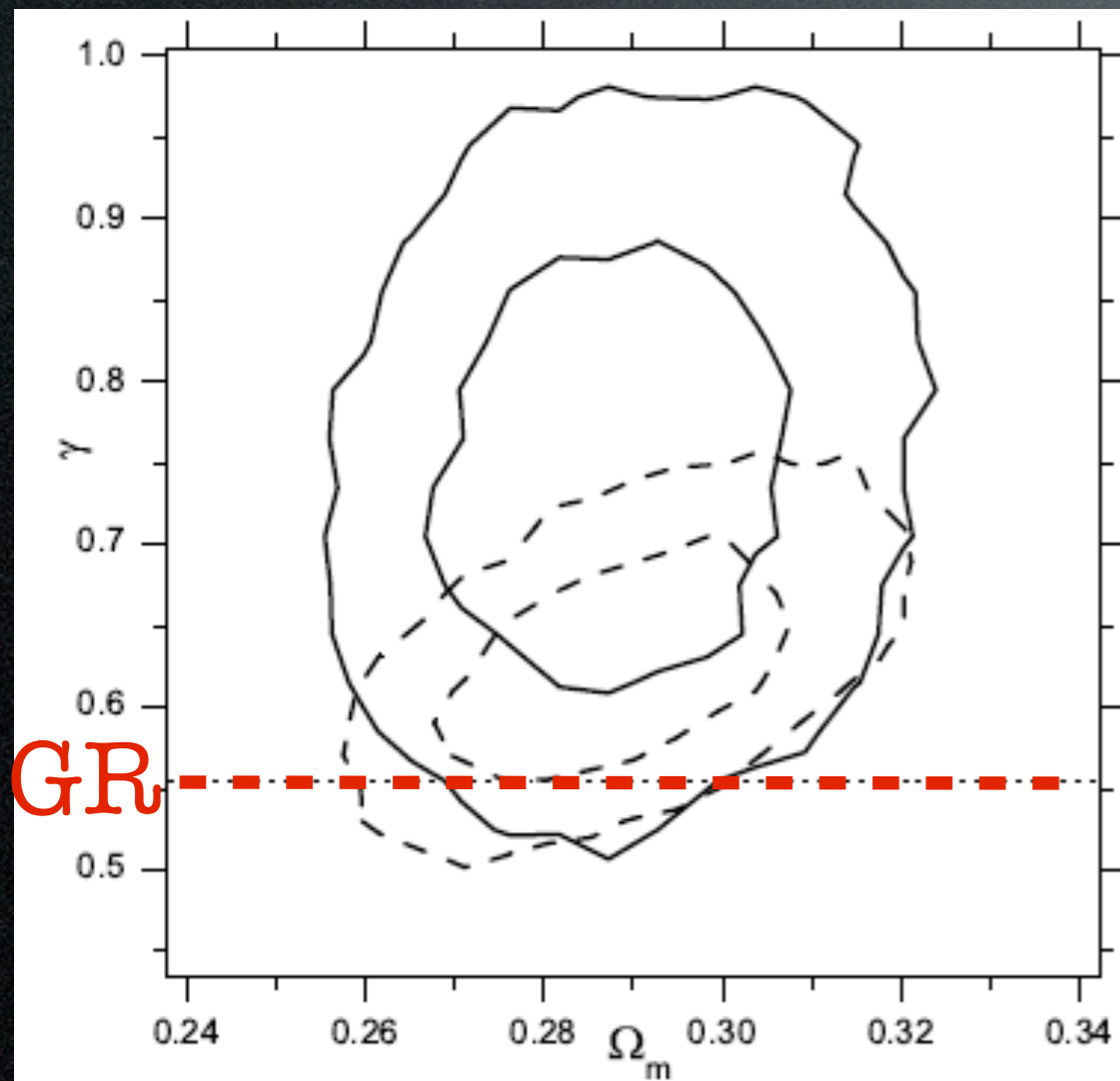
$w: 5\%$

Test of General Relativity (GR)

$$f(z) = \Omega_m(z)^\gamma$$

$$\ddot{D} + 2H\dot{D} - 4\pi G_{\text{eff}}\bar{\rho}_m a^2 D = 0$$

$$G_{\text{eff}} = G(1 + \mu_s)$$

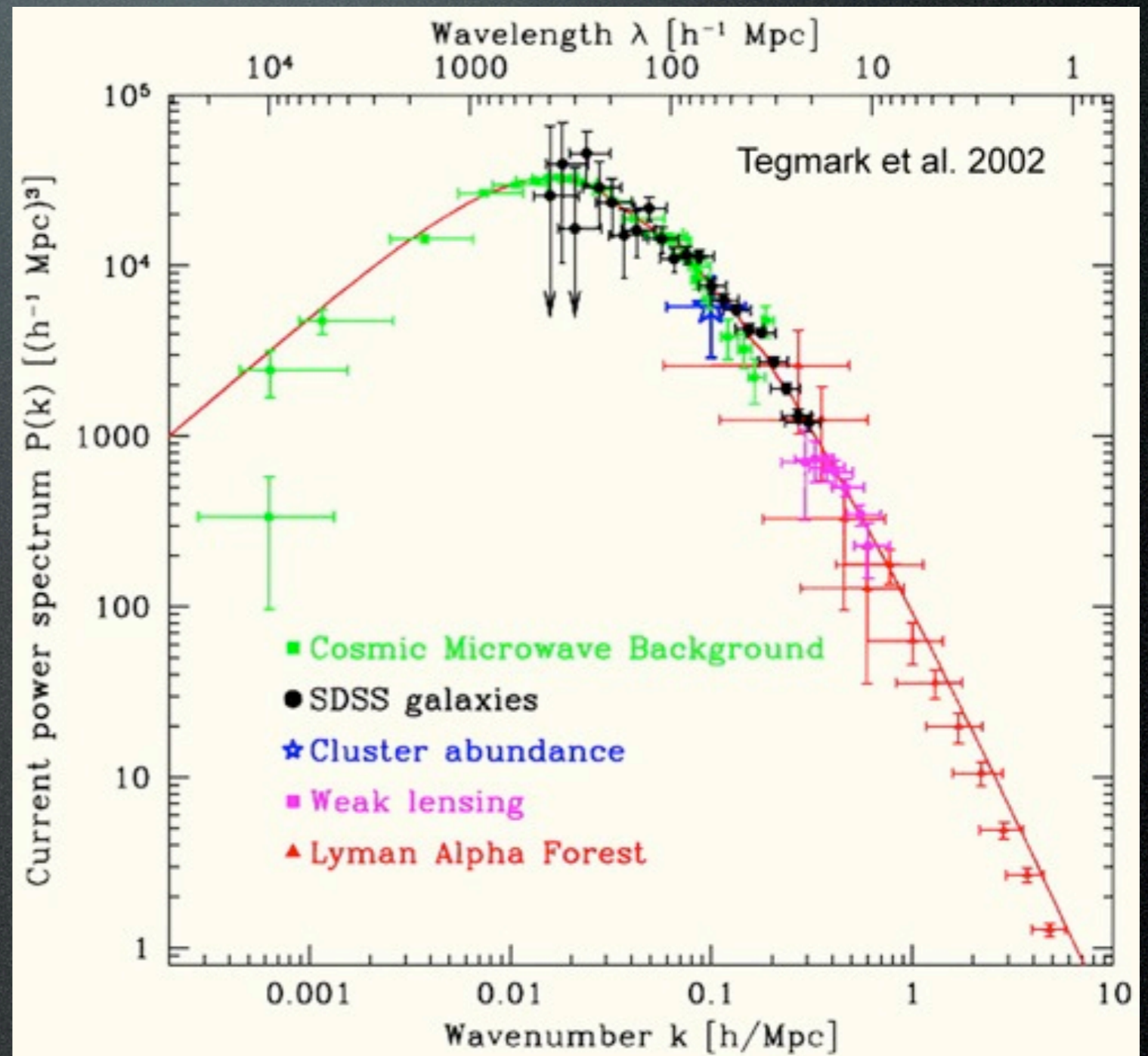


Broadband shape of LSS power spectrum

ゆらぎの各スケールでの
フーリエ振幅の2乗

$$P(\mathbf{k}) = \langle |\delta_{\mathbf{k}}|^2 \rangle$$

CMB、銀河分布、重力レンズサーベイから幅広いスケールのゆらぎを調べることが可能

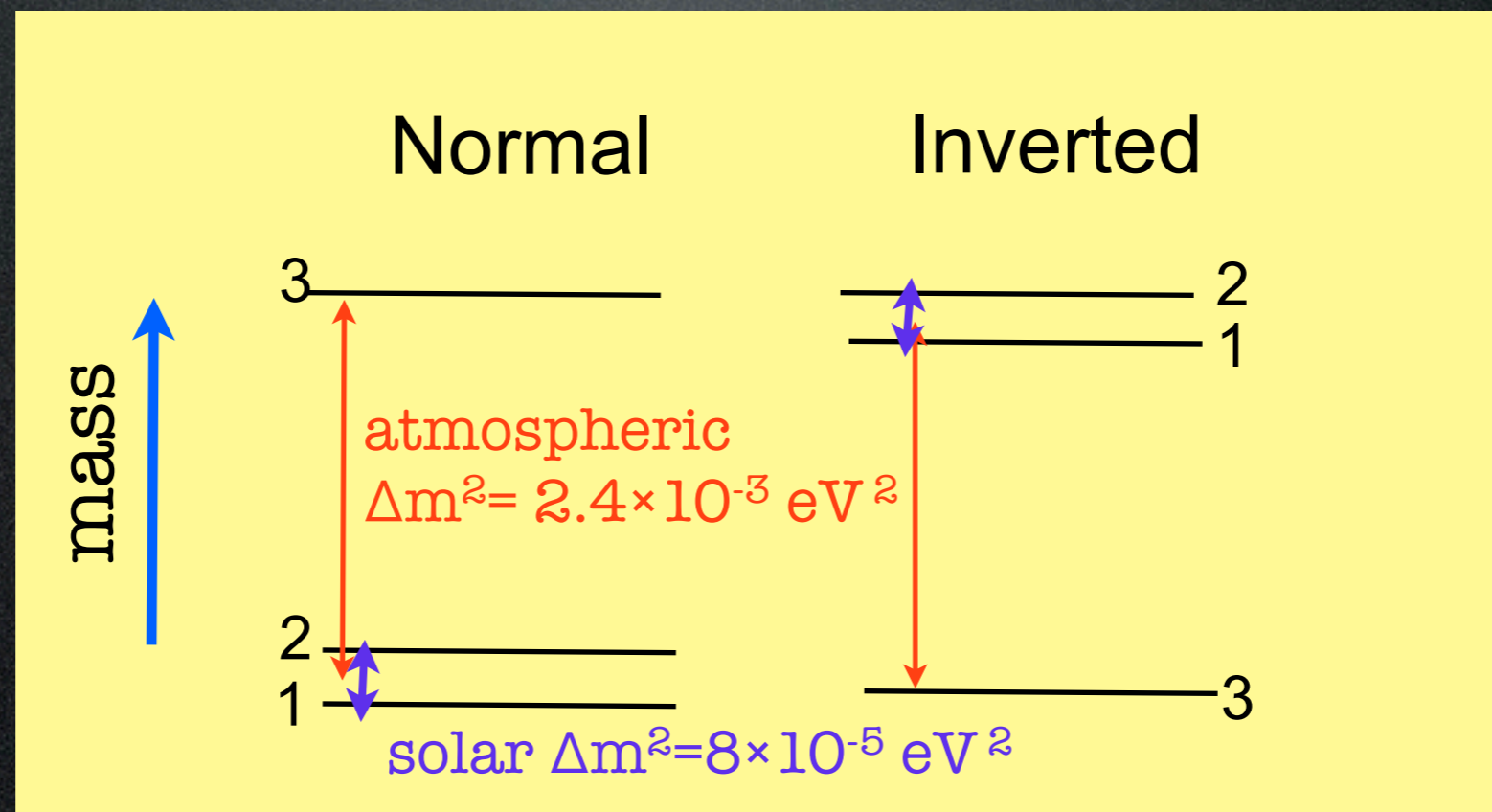


Neutrino Properties

What is the neutrino absolute mass ?

What is the hierarchy ?

Neutrinos are Majorana fermions ?



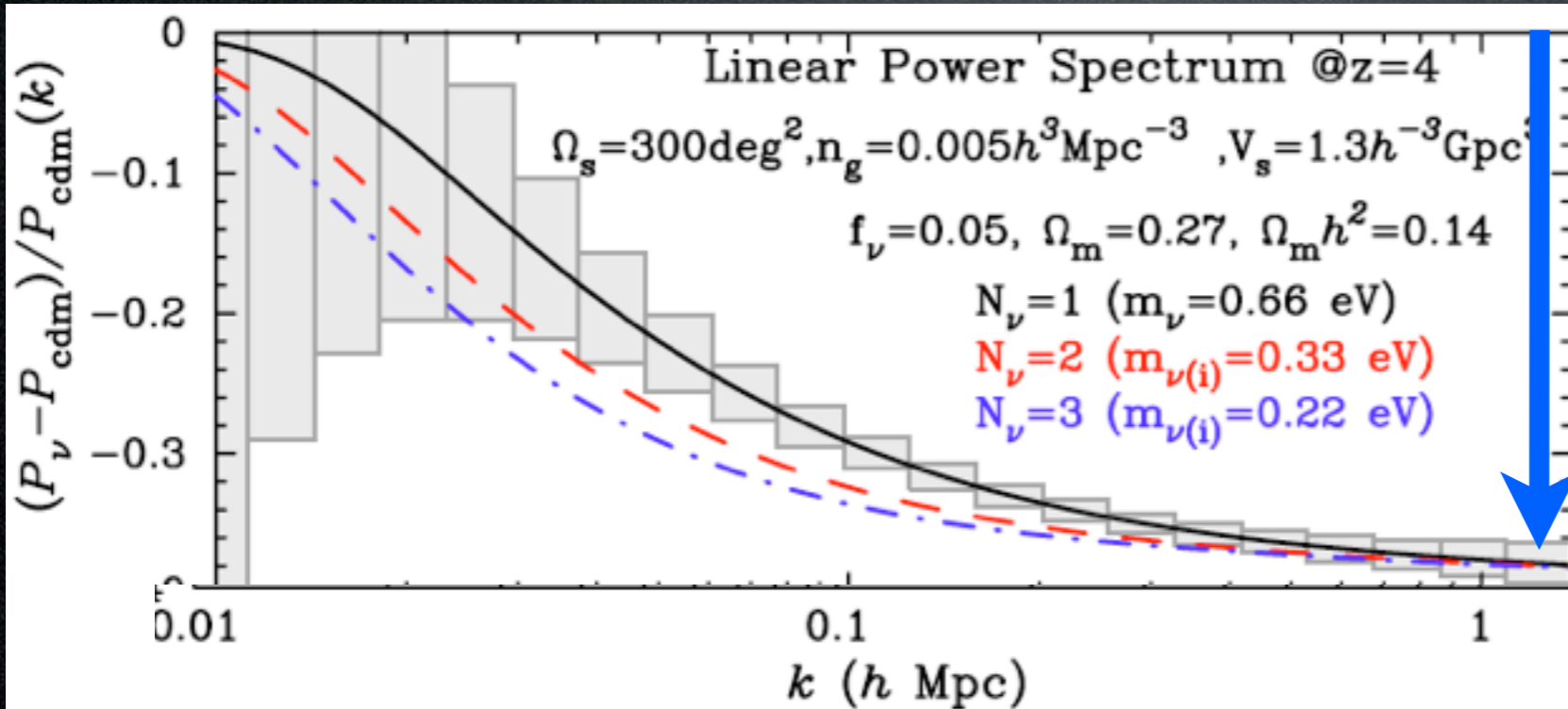
Free-streaming damping

ニュートリノの自由運動によって小スケール ($k > k_{fs}$) のゆらぎが減衰

Free-streaming scale

$$\lambda_{FS} = \sqrt{\frac{8\pi^2}{3\Omega_m H^2(z)}} c_\nu \simeq 4.2 \sqrt{\frac{1+z}{\Omega_m}} \left[\frac{1\text{eV}}{m_\nu} \right]$$

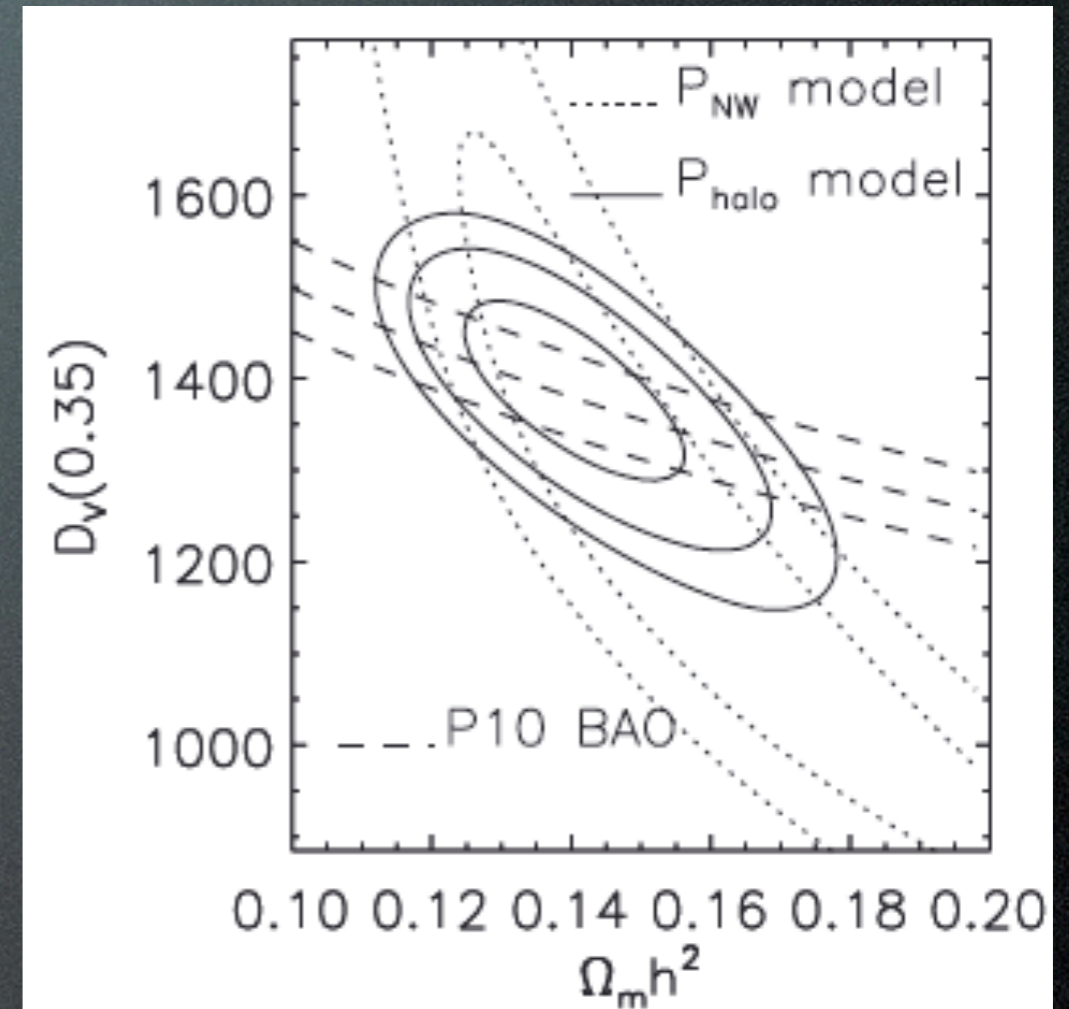
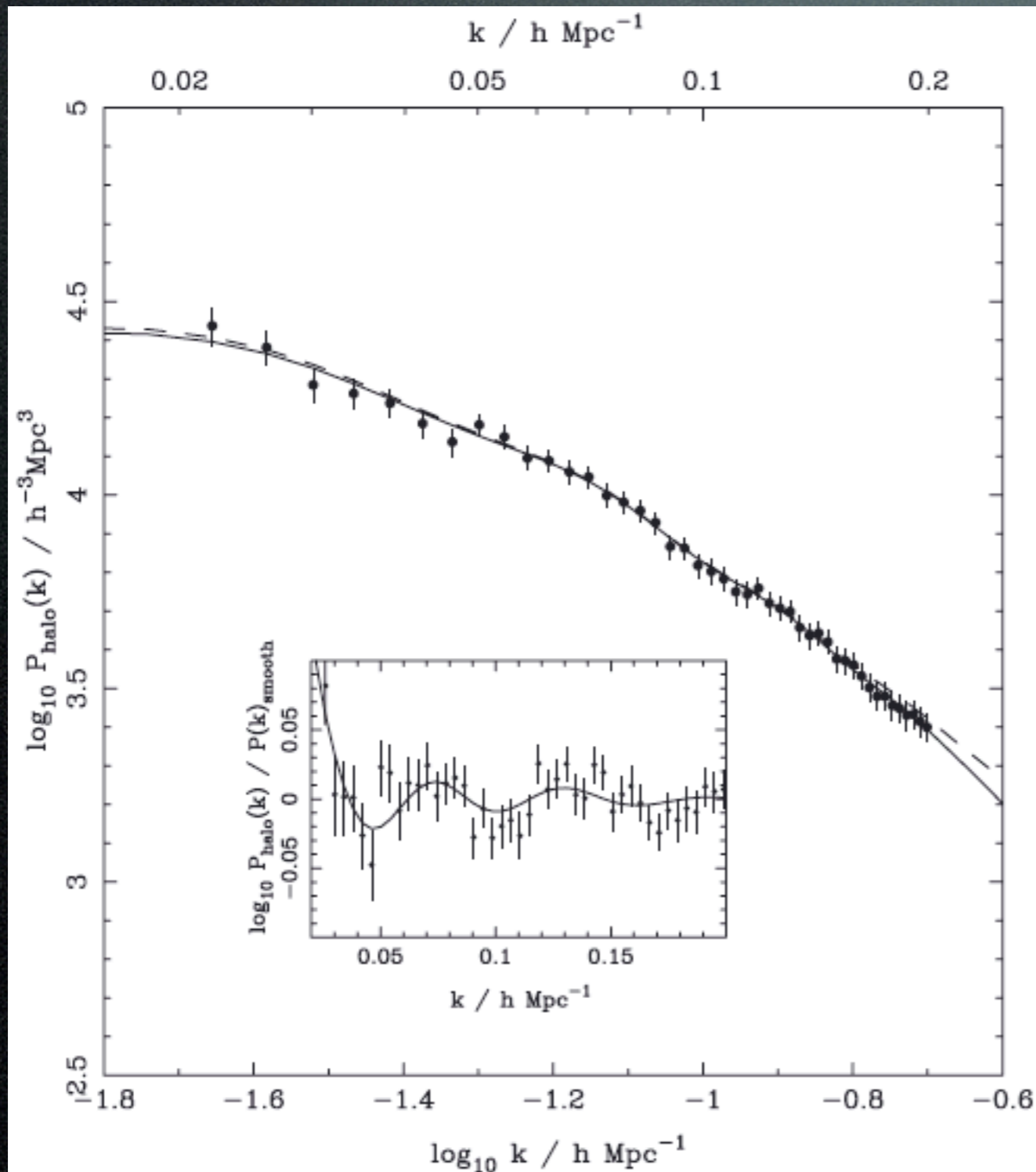
$$c_\nu \simeq 81(1+z) \left[\frac{1\text{eV}}{m_\nu} \right] \text{ km/s}$$



$$\frac{\Delta P}{P} \sim 8f_\nu$$

$$f_\nu = \frac{\Omega_\nu}{\Omega_m}, \quad \Omega_\nu h^2 = \frac{m_{\nu, \text{tot}}}{94.2 \text{ eV}}$$

SDSS LRG DR7 $P(k)$

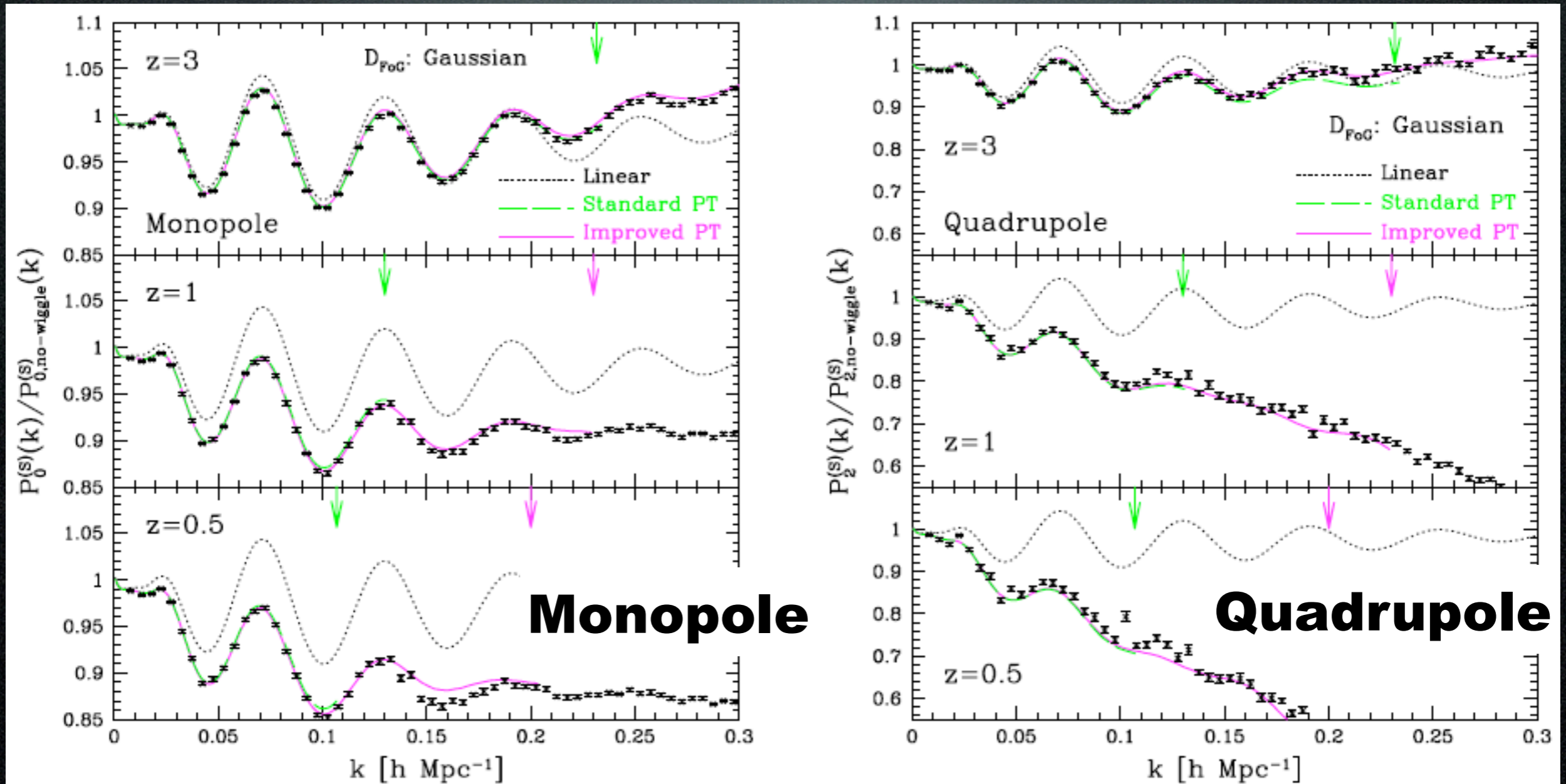


BAO+Broadband shape
reduces the degeneracy
between D_V and $\Omega_m h^2$

$m_{\nu, \text{tot}} < 0.62 \text{eV}$ (WMAP5 + $P(k)$)

不定性1: 非線形重力

赤方偏移空間での質量パワースペクトル



Taruya, Nishimichi, Saito 2010

$k < 0.2 h/\text{Mpc}$ まで摂動論とSimulationは非常に良く一致

不定性 2: 銀河バイアス

銀河個数分布と質量分布の関係

線形バイアス

$$\delta_g = b\delta_m \text{ (Kaiser 1984)}$$

非線形バイアス

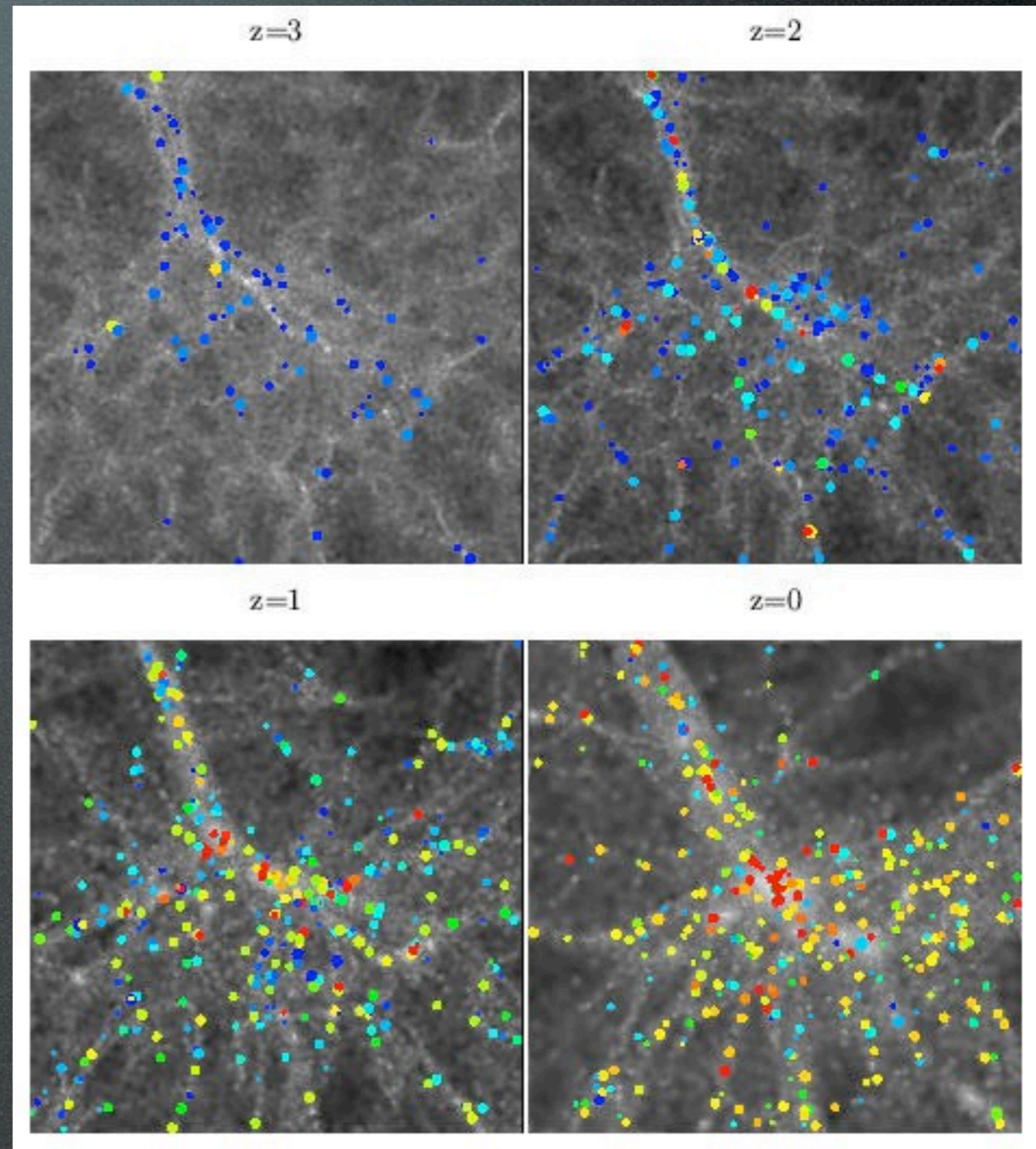
$$\delta_g = b_1\delta_m + b_2\delta_m^2 + \dots$$

(Fry & Gaztanaga 1993)

非線形確率的バイアス

$$P(\delta_g|\delta_m)$$

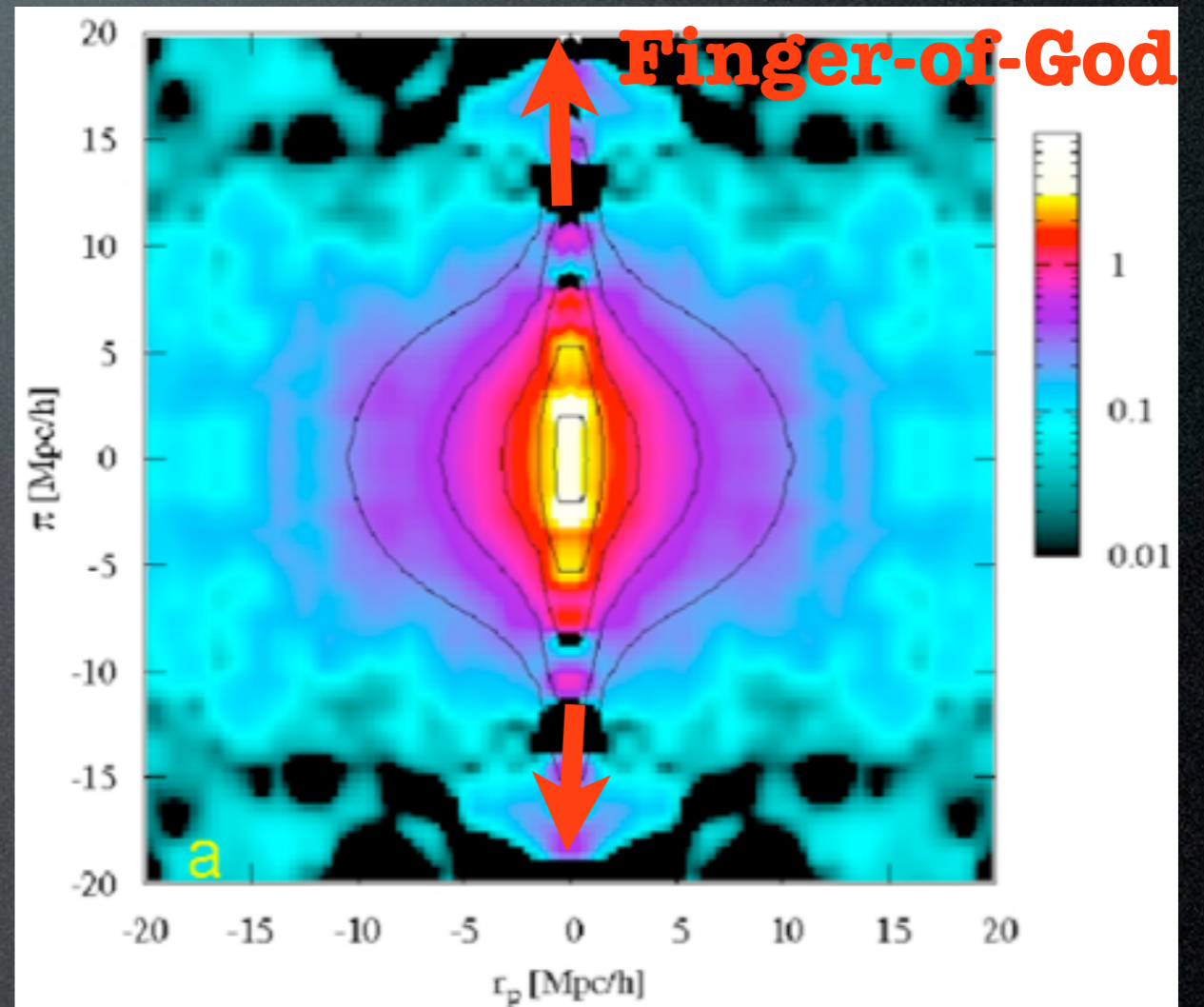
(DeKel & Lahav 1999)



Colberg et al.

不定性 3: Finger-of-God (FoG)

銀河のランダム運動による非線形な赤方偏移歪みの効果

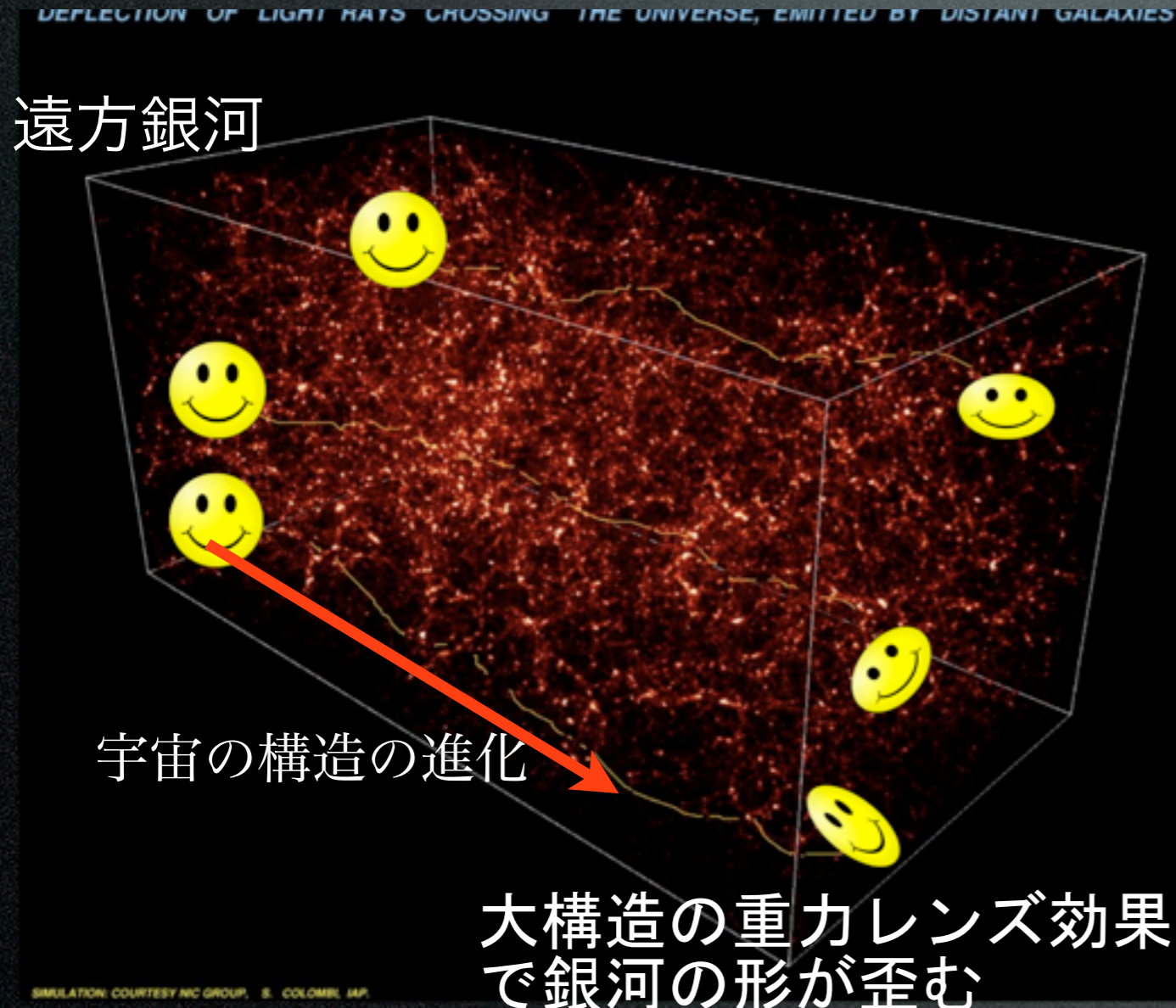


FoGによるpowerの減衰をガウシアンやローレンツ関数で近似

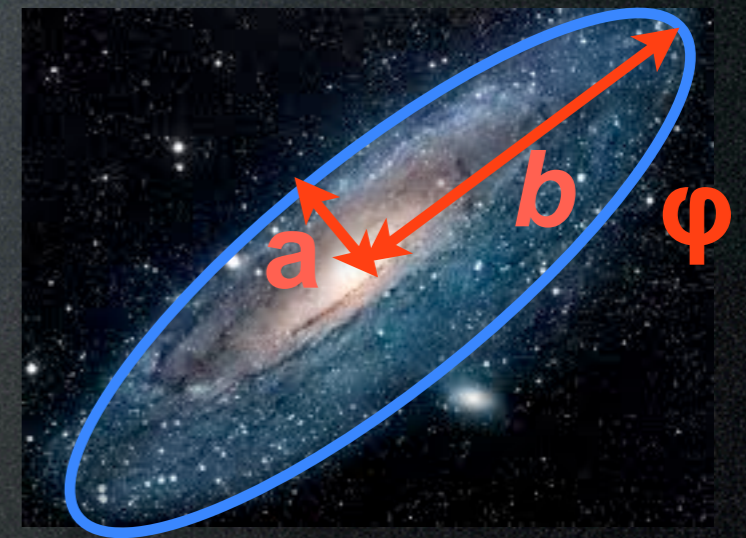
e.g., $D_{\text{FoG}} = \exp(-\sigma^2 k^2)$, $1/(1+\sigma^2 k^2)$

(弱い) 重力レンズ

宇宙大規模構造による重力レンズ効果を測ることで、**宇宙の質量 (ダークマター) 分布**を調べることができる



多くの銀河の形 (楕円率) を平均し、レンズによる歪みを測定



楕円率

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} \right) \exp(2i\varphi)$$

Shear

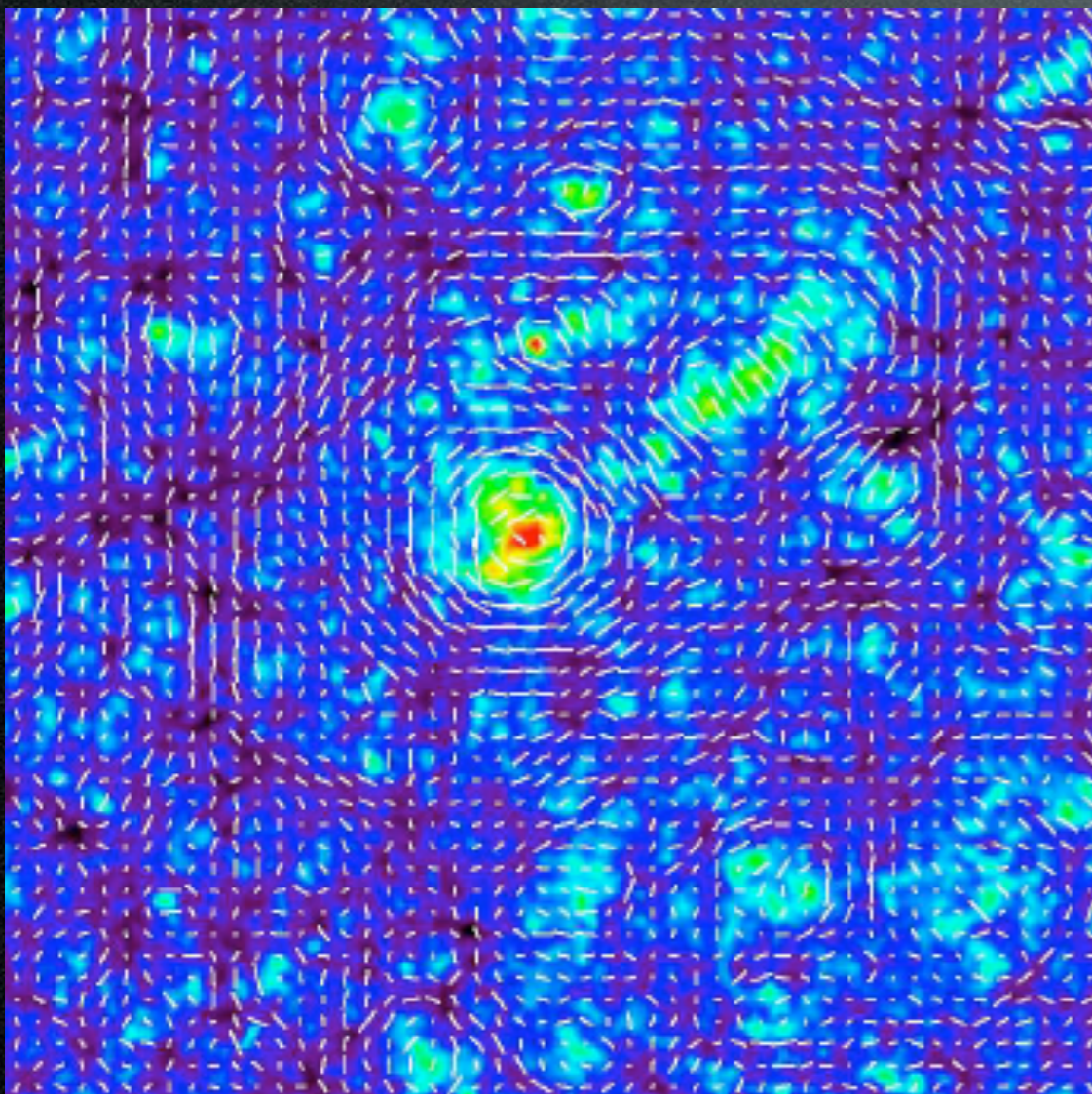
$$\gamma = \langle \epsilon \rangle / 2\mathcal{R} \quad \mathcal{R} = 1 - \langle \epsilon^2 \rangle$$

R: Shear Responsibility

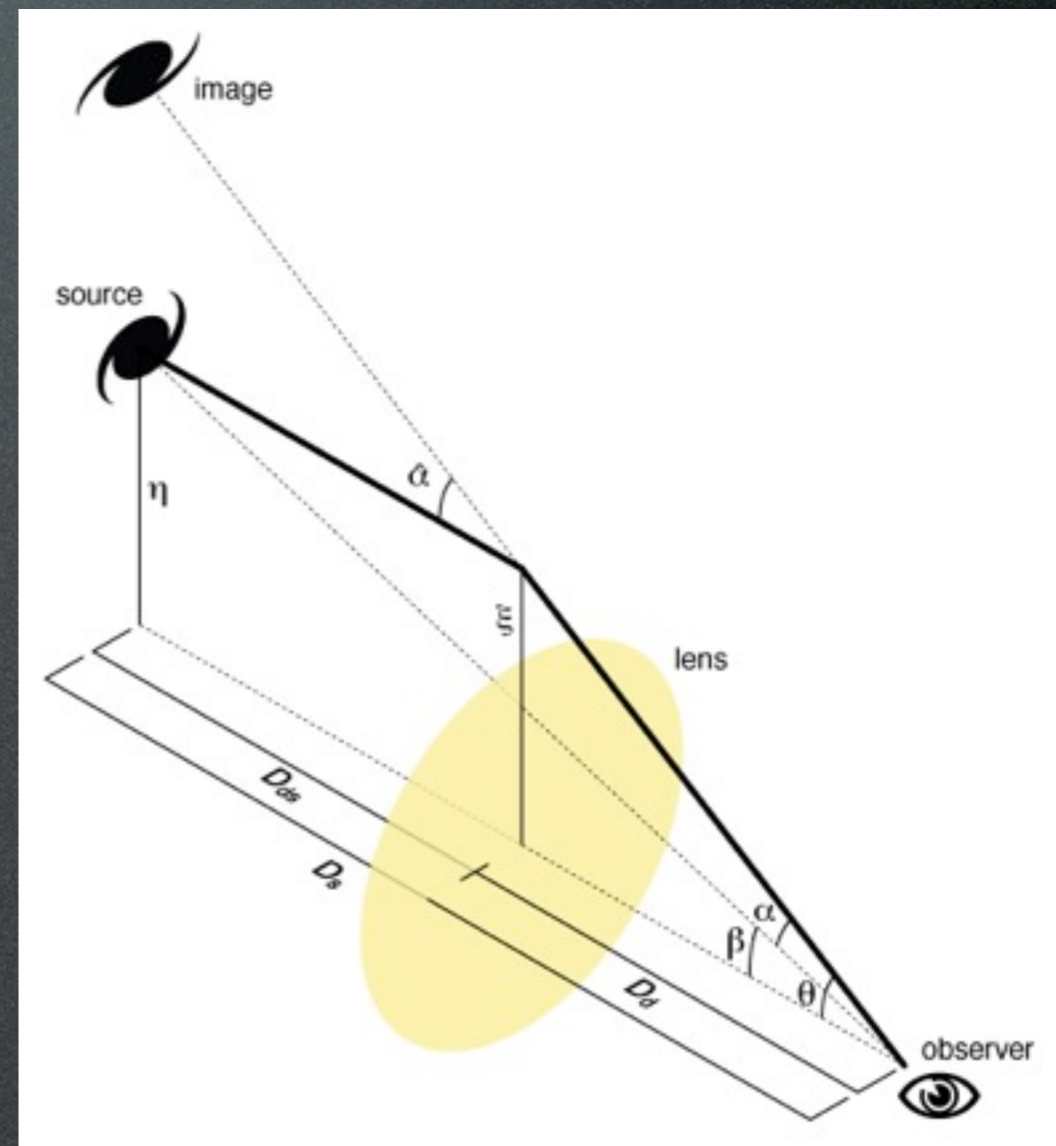
Cosmic Shear

重力レンズによる歪みは、距離と質量密度ゆらぎの両方に依存する

$$\gamma \propto \Omega_{m0} \int_0^{z_s} dz_L \frac{d_s(z_L) d_s(z_s - z_L)}{d_s(z_s)} \delta(z_L)$$

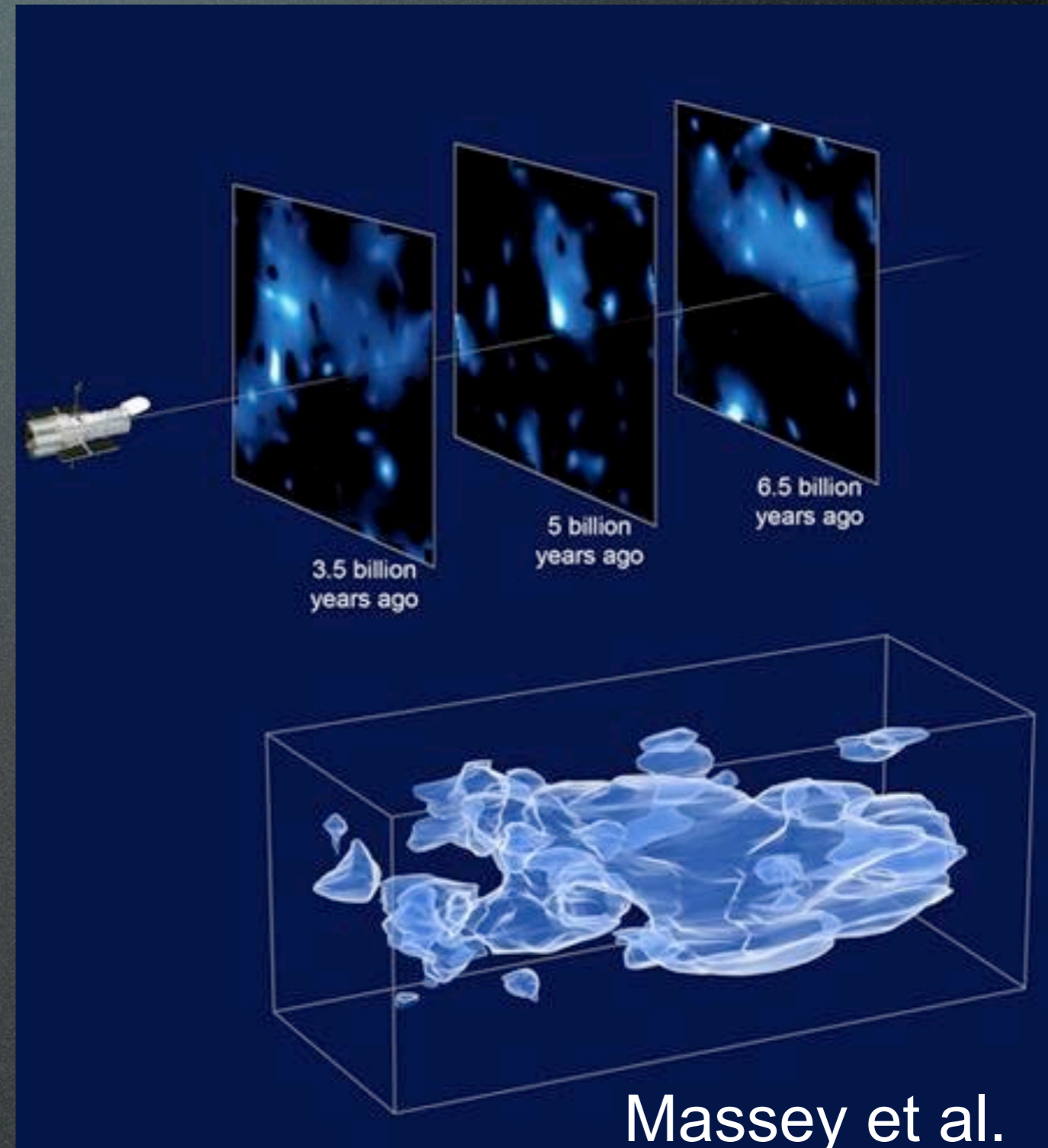
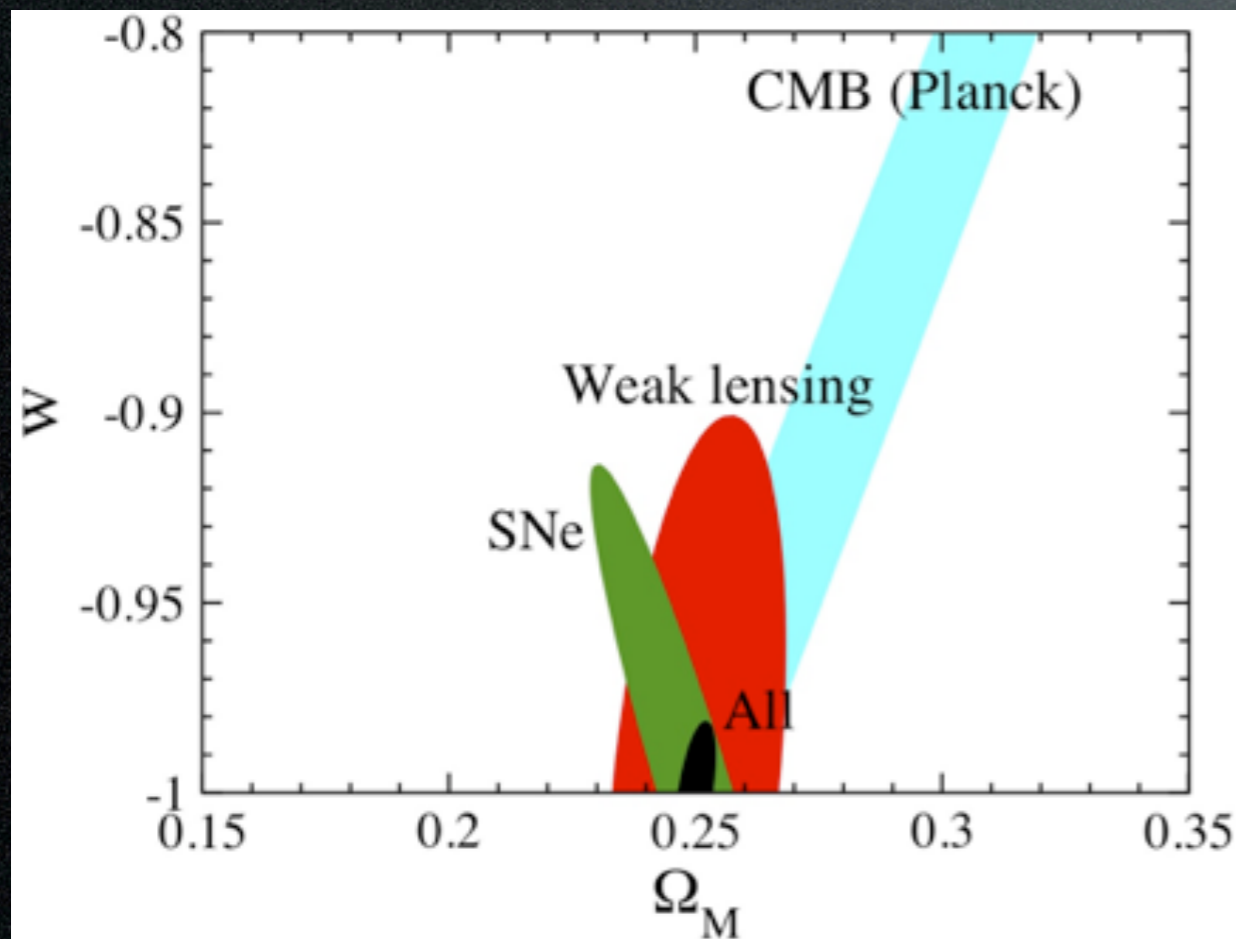


credit: Hamana



Lensing Tomography

ソース銀河のredshift情報
を使うことで、3次元の物
質分布が分かる



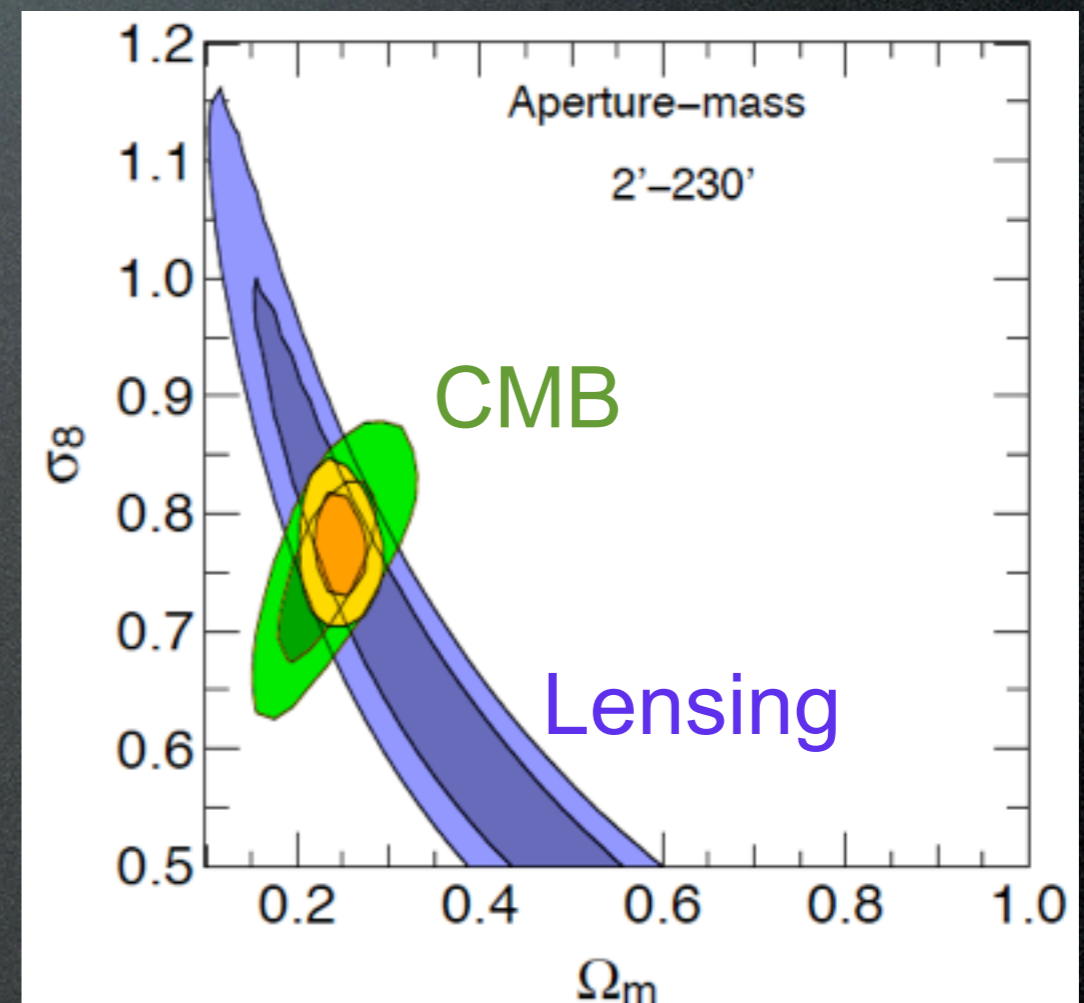
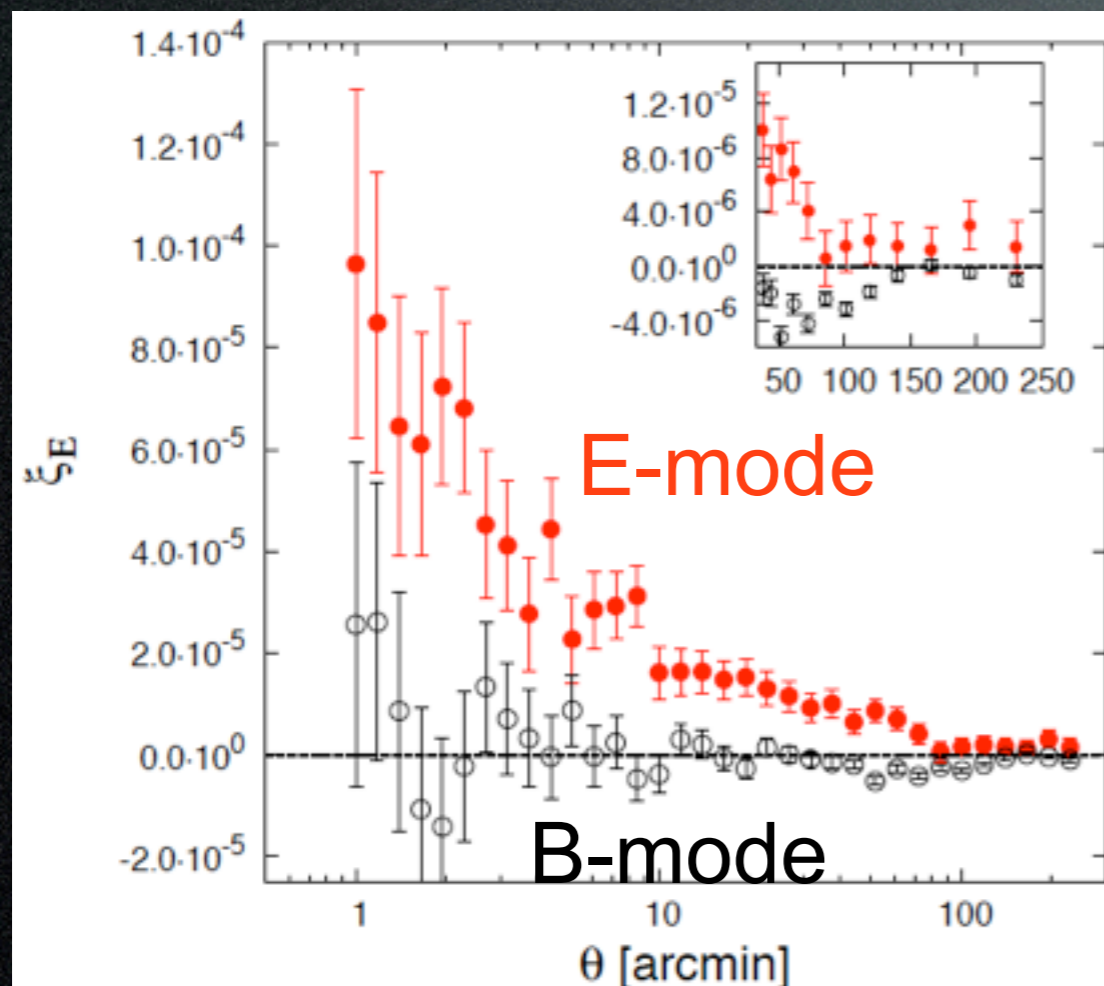
Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey (CFHTLS)

Weak lensing survey over 170deg^2 (4 patches)

3.6m telescope in Maunakea, Hawaii

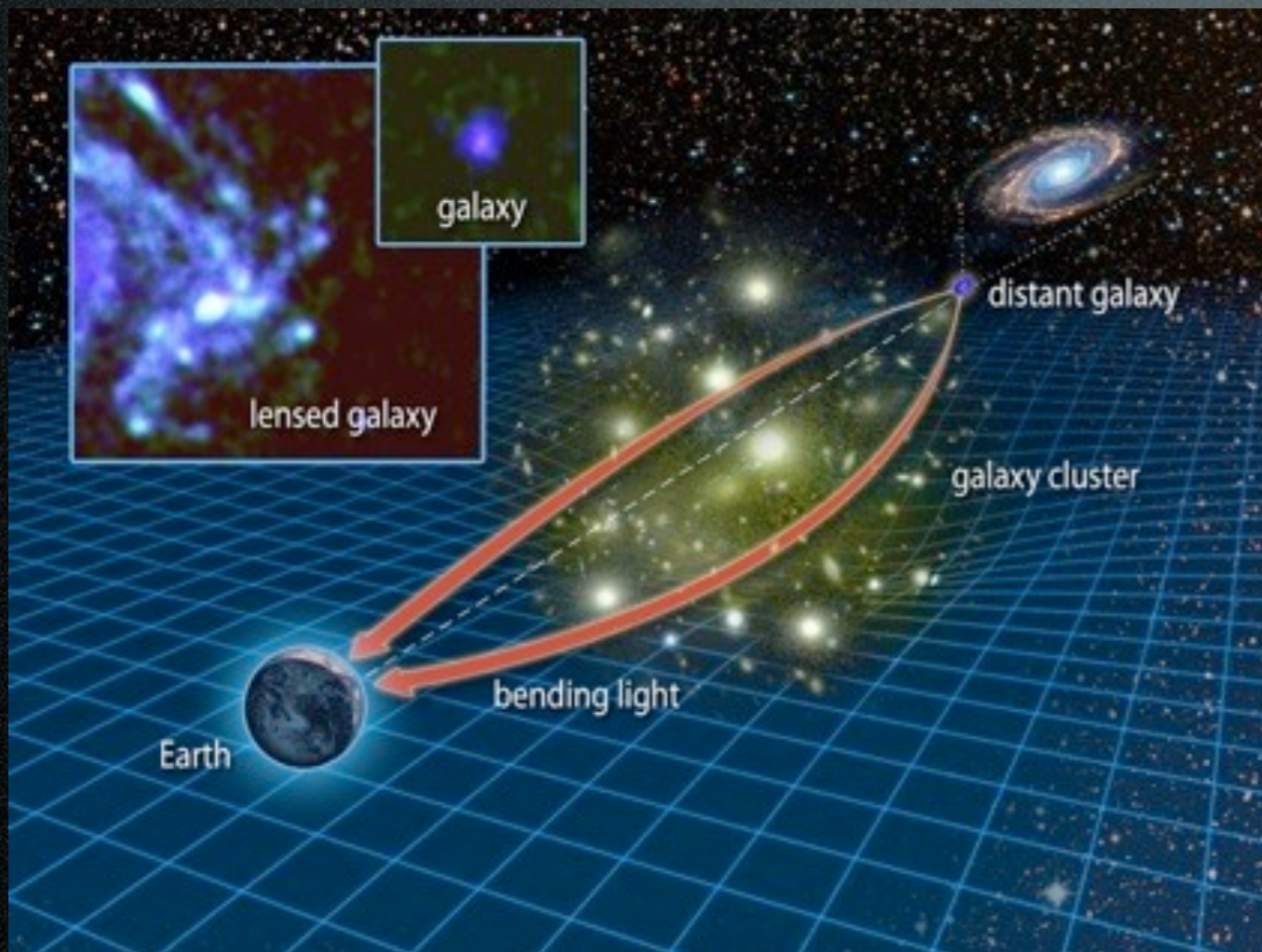
MegaCAM: 340 Megapix, FOV $1^\circ \times 1^\circ$, 0.18" pixel, u*g'r'i'z', $i' < 24.5$

2003-2009, 450 night (2300 hours)

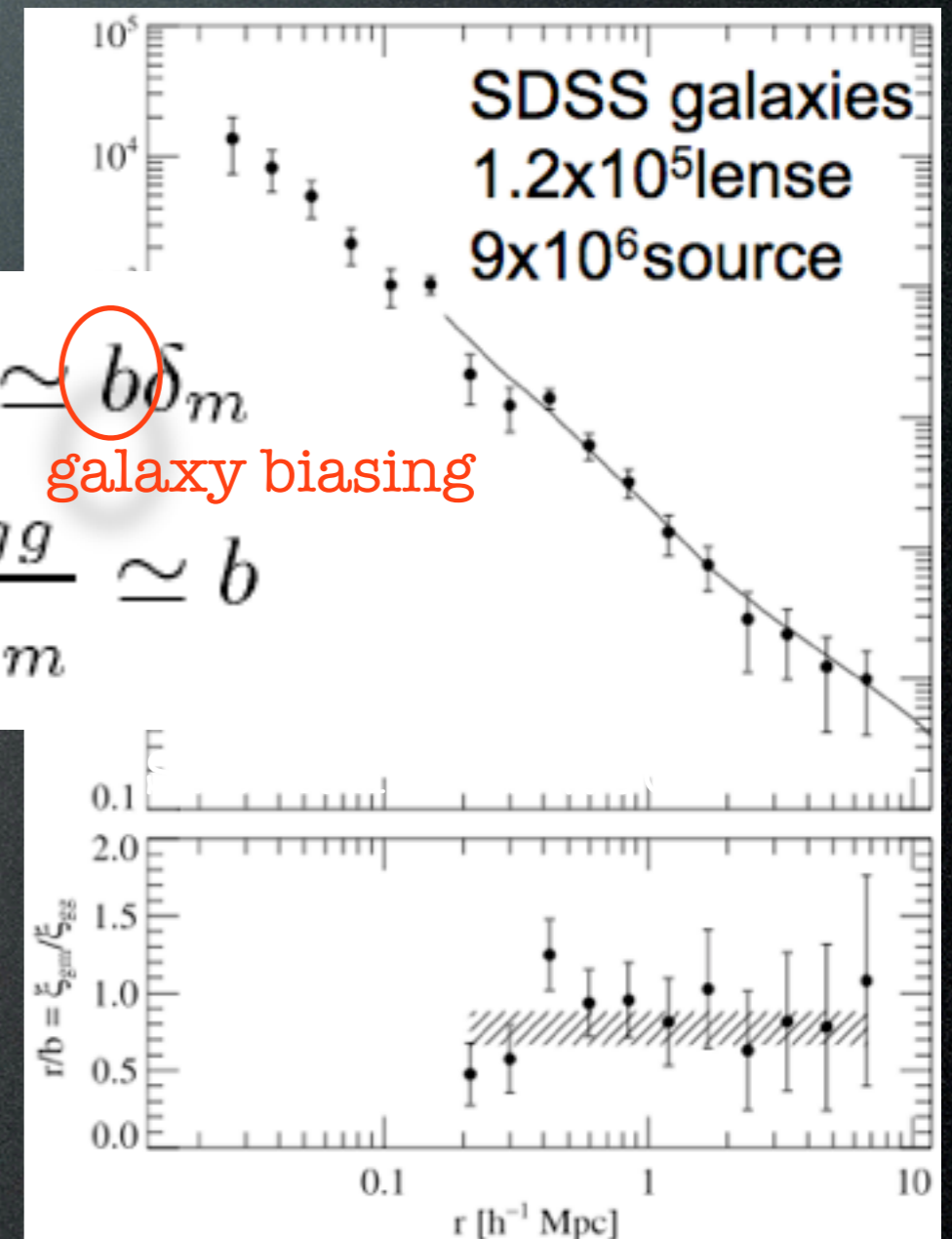


銀河・銀河レンズズ

銀河分布と遠方銀河のレンズ歪みとの相互相関



Credit: Karen Teramura, U Hawaii IfA



$$\delta_g \simeq b\delta_m$$

galaxy biasing

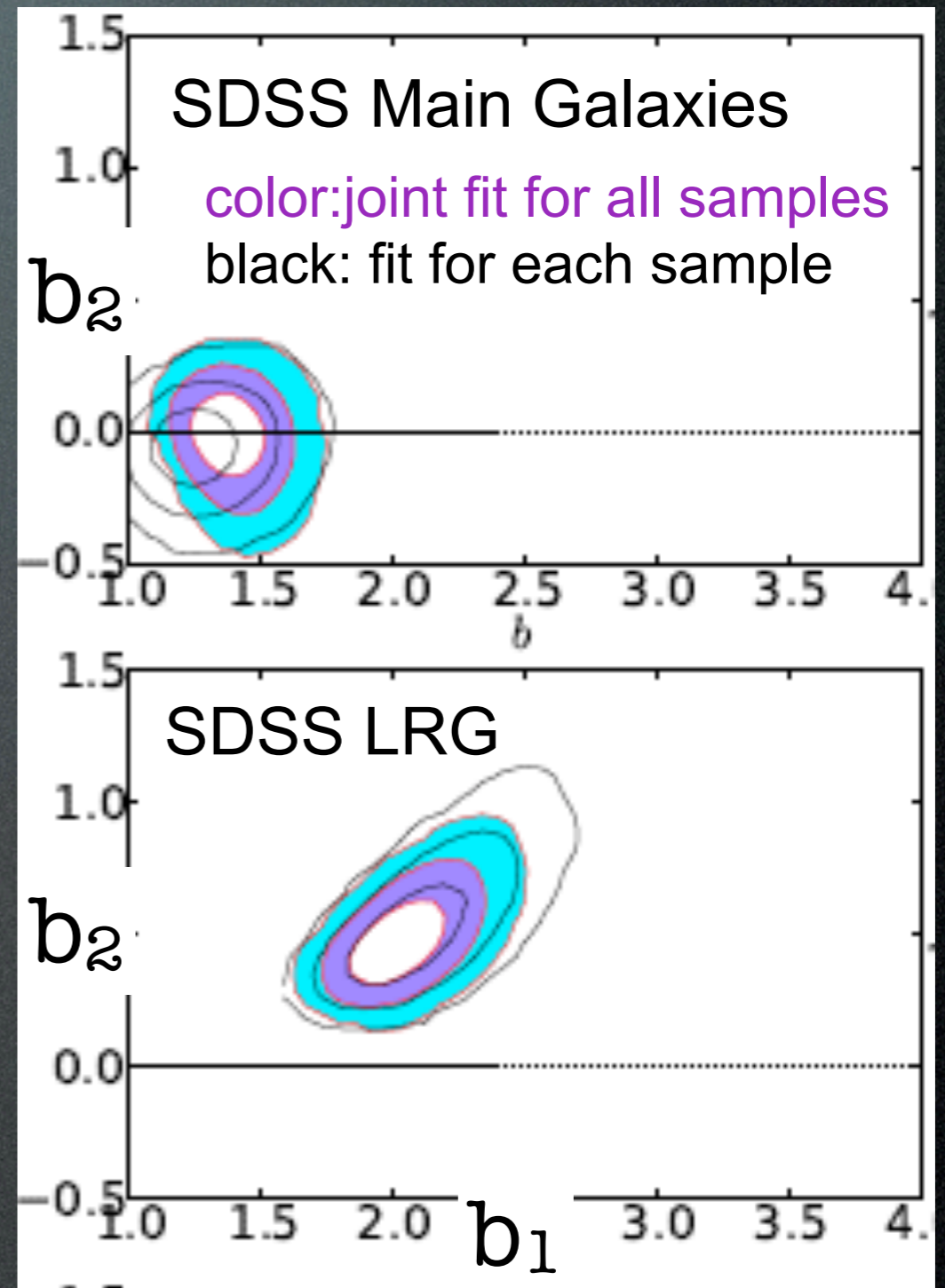
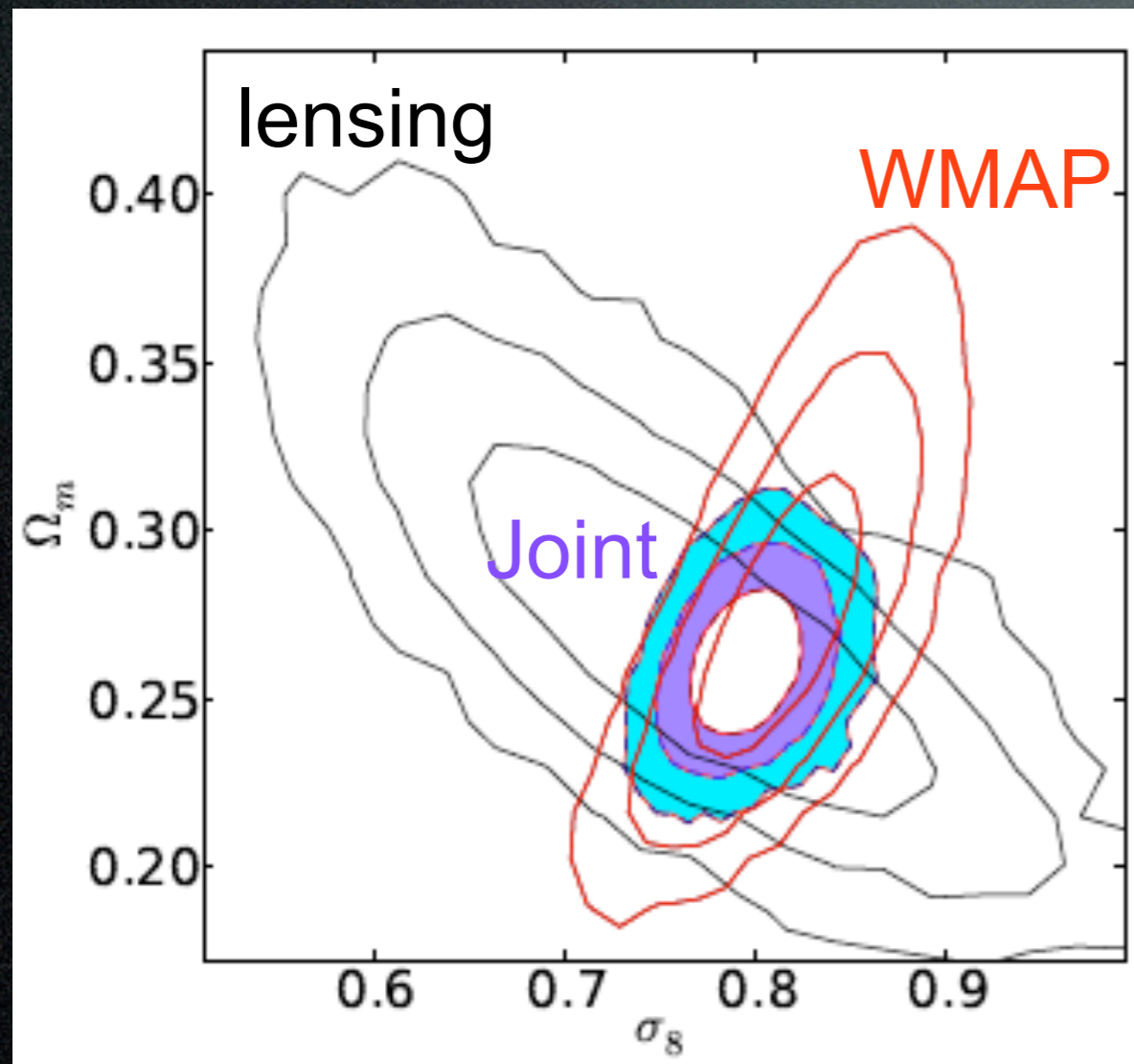
$$\frac{\xi_{gg}}{\xi_{gm}} \simeq b$$

銀河周りの質量分布(銀河バイアス)の情報が得られる

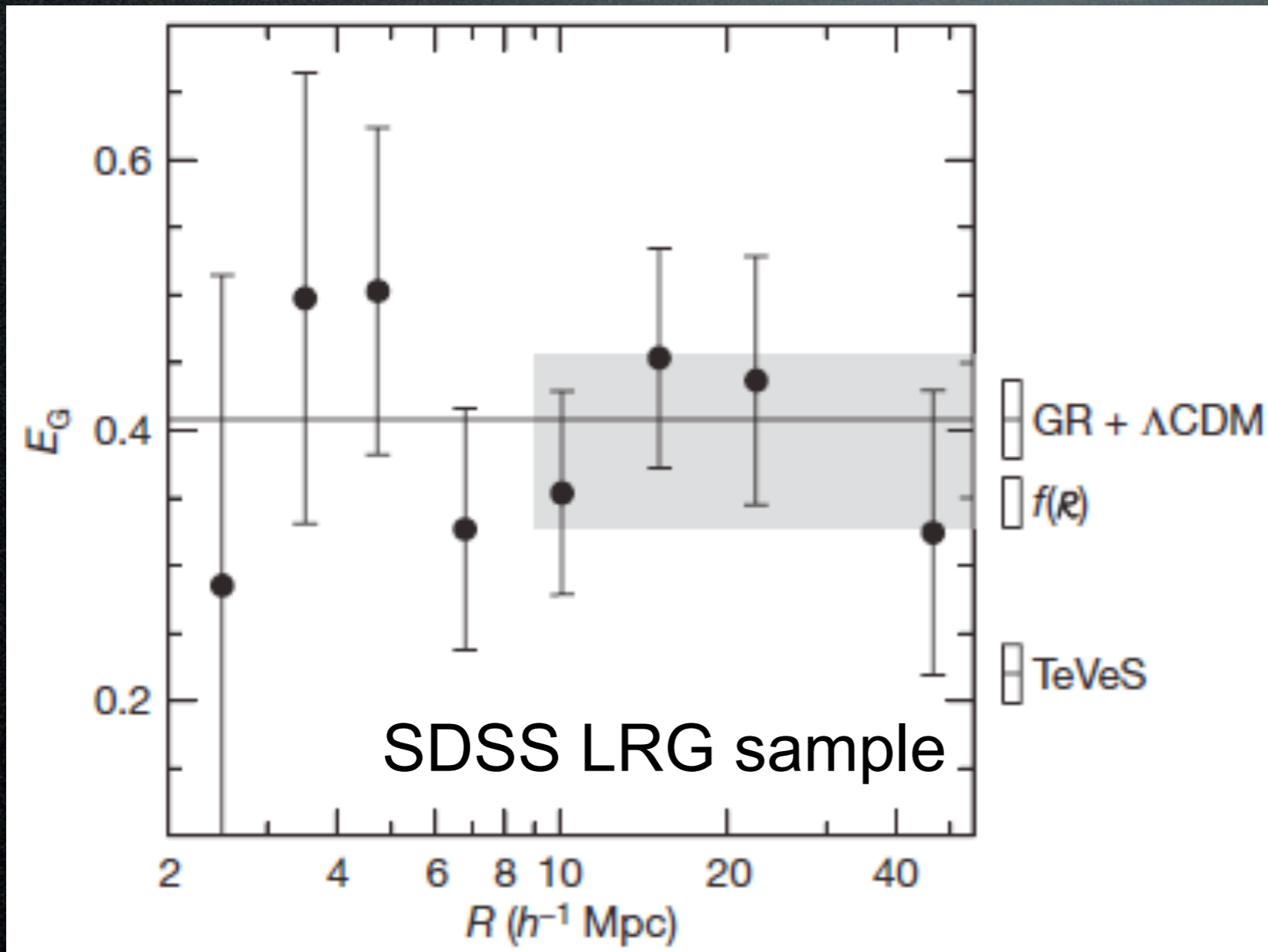
レンズ情報を使った銀河バイアスの制限

2次の非線形バイアスの制限

$$\delta_g = b_1 \delta_m + b_2 \delta_m^2$$



Bias-Free Einstein Gravity Test



Reyes et al. 2010

galaxy-galaxy lensing

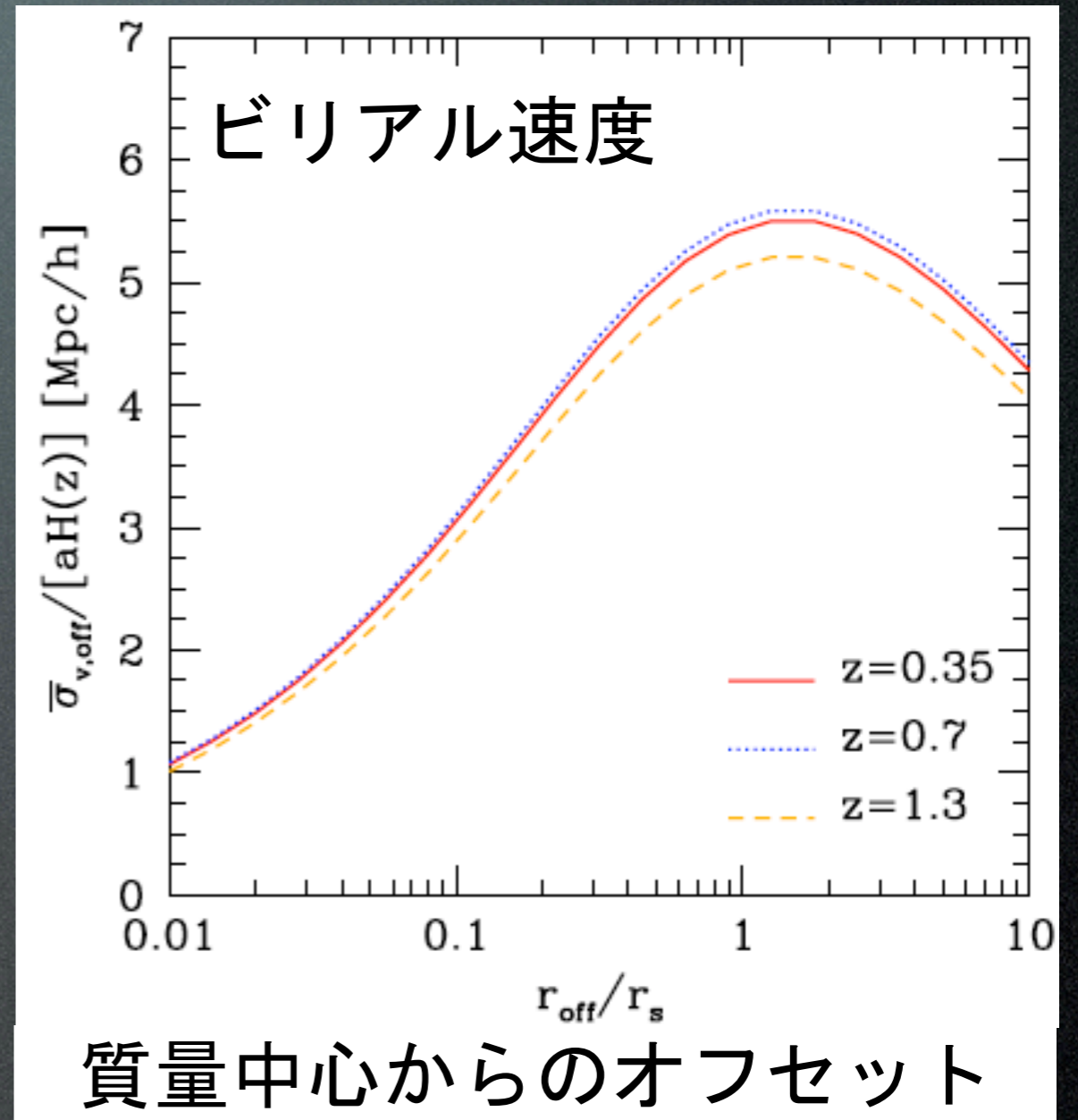
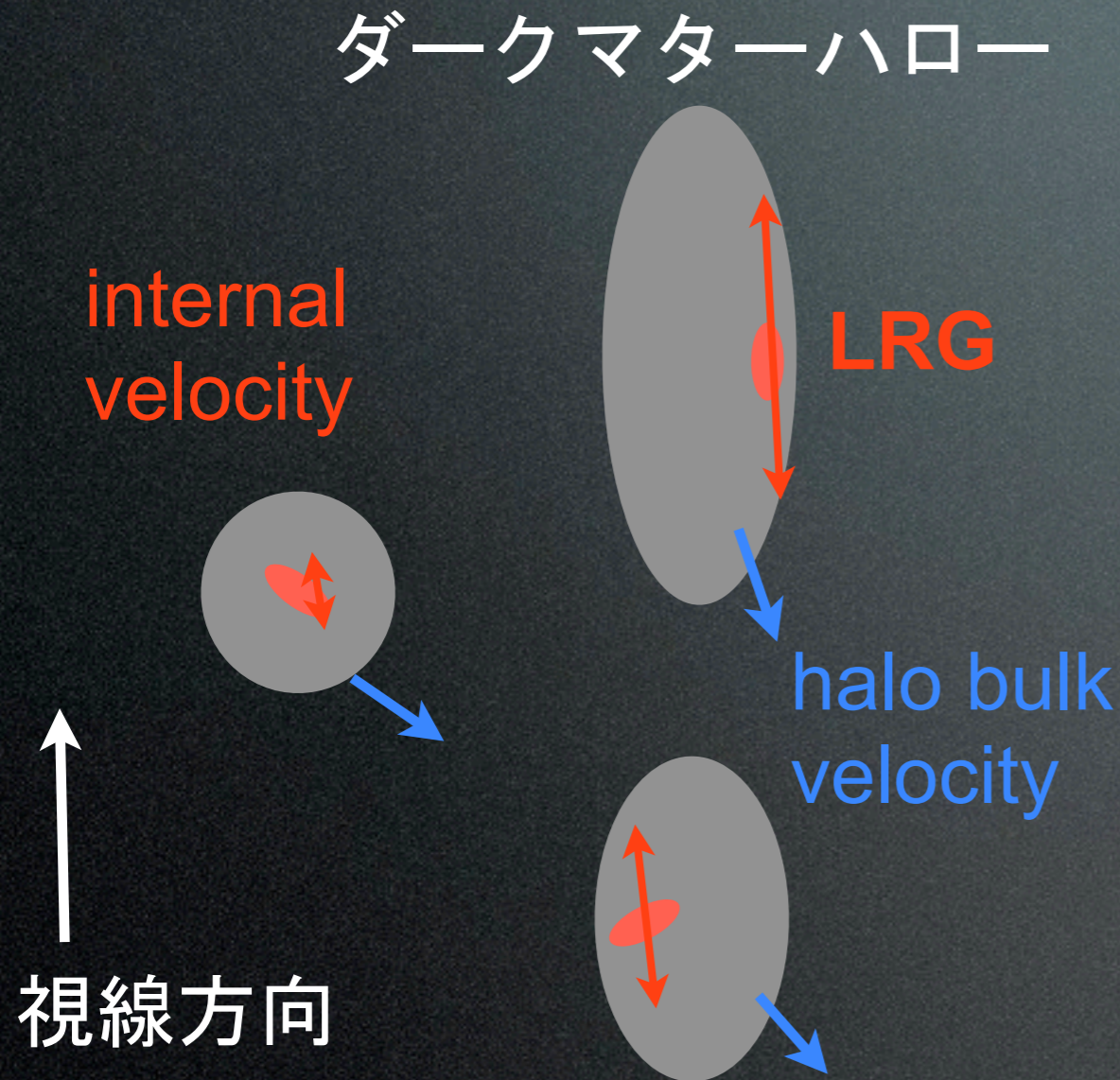
$$E_G(R) = \frac{1}{\beta} \frac{Y_{gm}(R)}{Y_{gg}(R)}$$

galaxy correlation

Anisotropy of galaxy power spectrum

$$\beta = f/b$$

オフセット銀河によるFinger-of-God

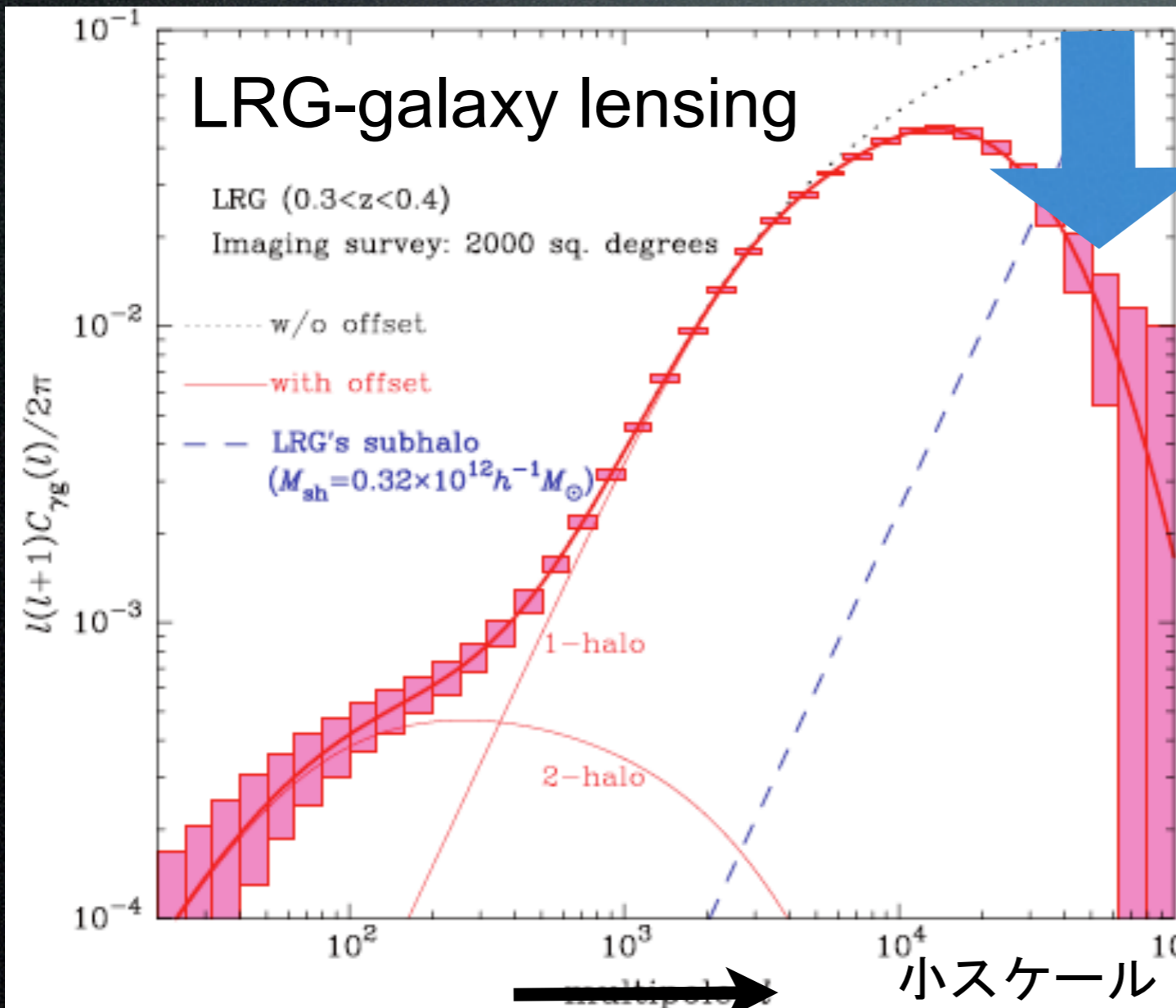


Hikage et al. 2012

銀河の速度分散 (FoGの大きさ) は、ハローの質量中心からの距離 (オフセット) に依存する

レンズ情報を使ったFoG補正

銀河周りの重力レンズ情報から、銀河のオフセット(ハロー質量中心からの距離)を測定することで、FoGの影響を補正できる



オフセットによる
ダンピング

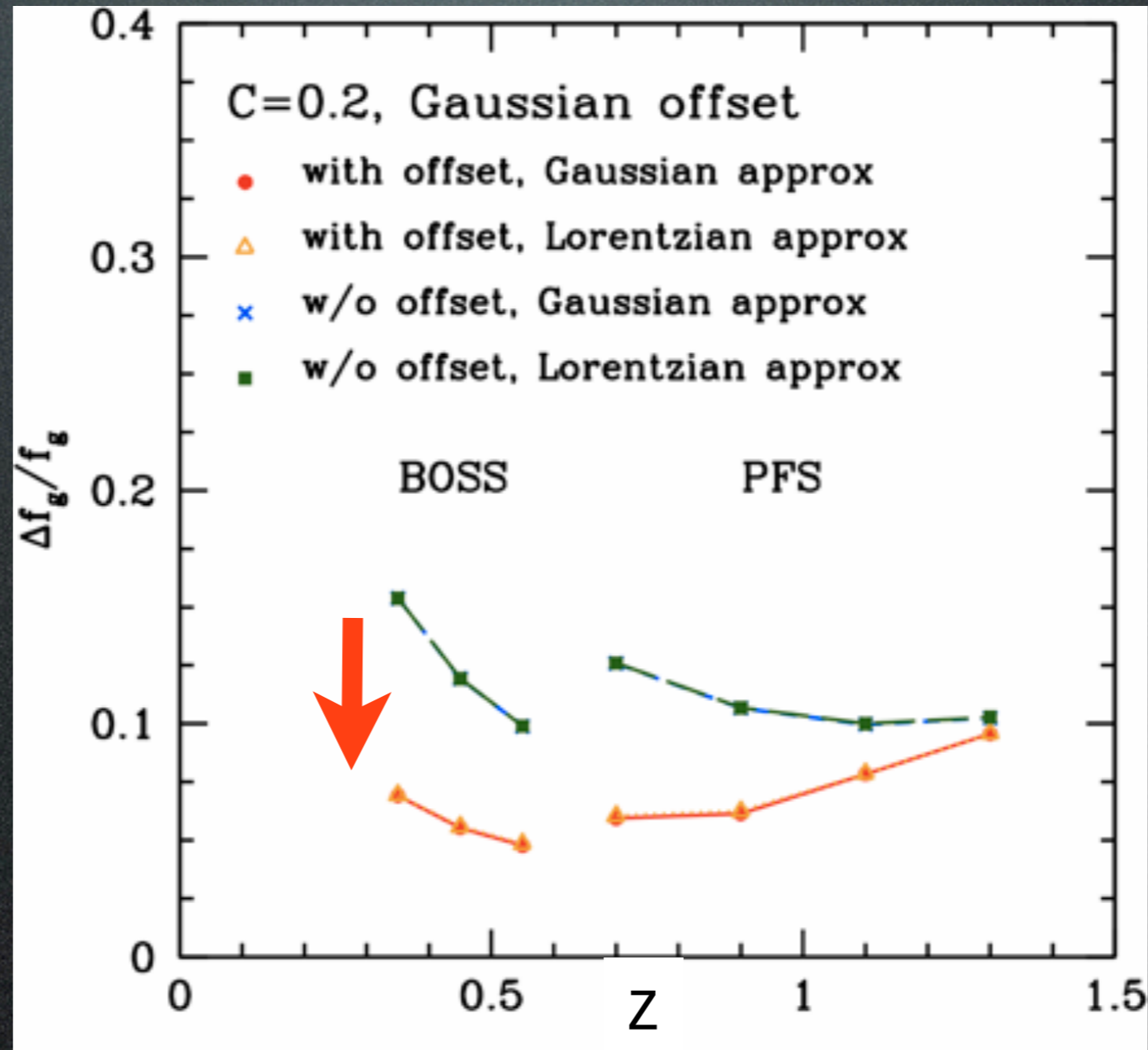
ダークマターハロー

オフセット

× ← → LRG
質量中心

Impact on Growth Rate Measurement

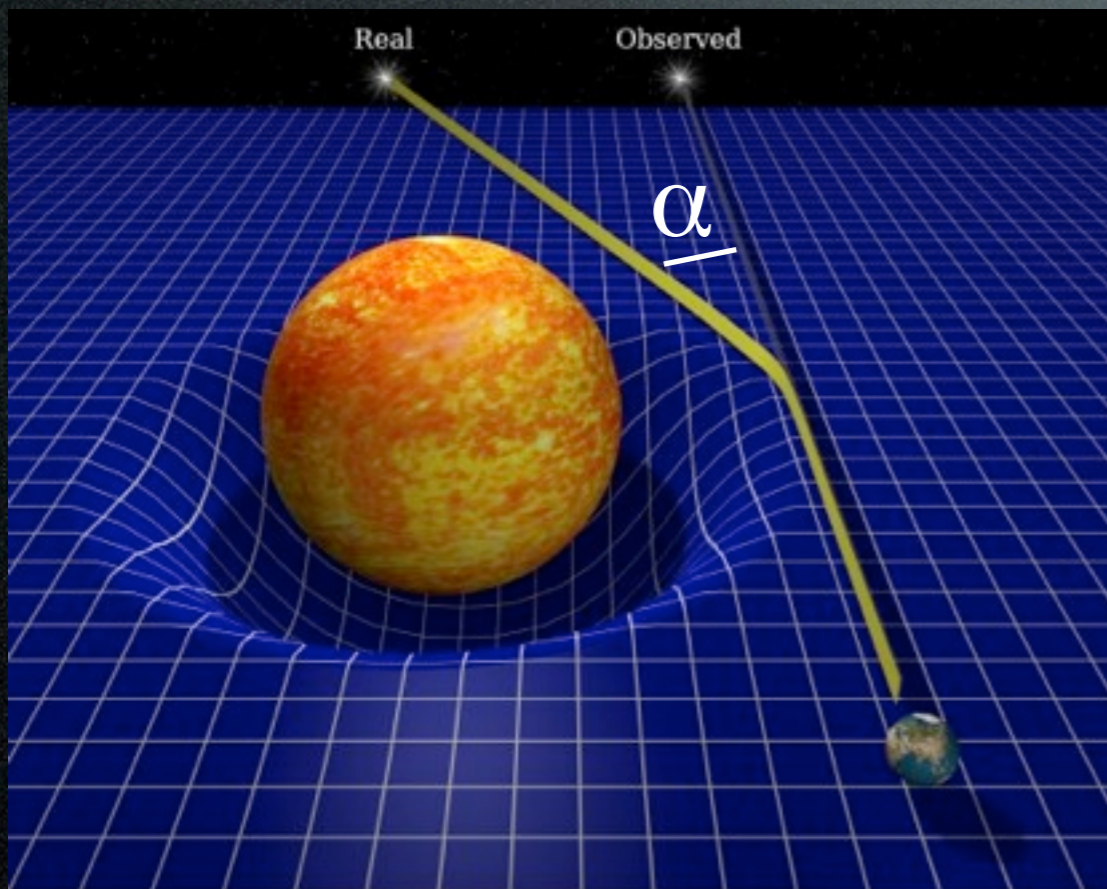
Growth
Rate
のエラー



レンズ情報を使うことで、Growth rateの測定精度が2倍向上

Modified Gravity from Lensing

重力レンズ歪みの大きさは、ポテンシャル(Ψ), 曲率(ϕ)の和に依存



$$ds^2 = -(1 + 2\psi)dt^2 + (1 - 2\phi)a^2(t)dr^2$$

deflection angle

$$\alpha_i = - \int \partial_i(\Psi + \Phi)ds$$

convergence

$$\kappa(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^{z_s} \frac{dz}{H(z)} \frac{r(z)r(z_s, z)}{r(z_s)} \nabla_\theta^2(\Psi + \Phi)$$

convergence power spectrum

$$C_{\kappa_i \kappa_j}(l) = \frac{9}{4} \Omega_m^2 H_0^4 \int_0^\infty \frac{dz}{H(z)a^2} \zeta^2(k, z) P_{\delta\delta}(k, z) W_L(z, z_i) W_L(z, z_j)$$

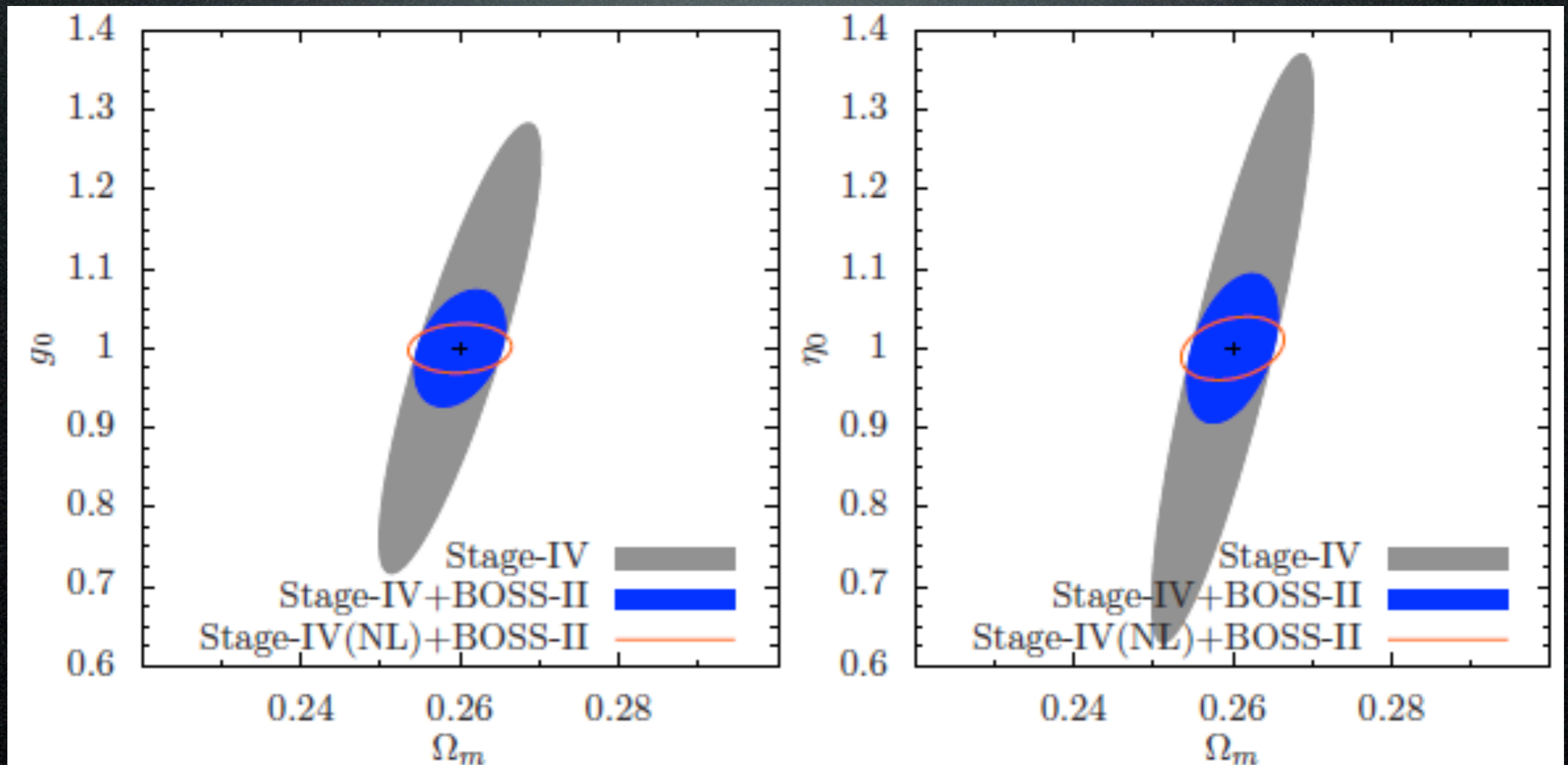
correction factor

$$\zeta = G_{\text{eff}}/G(1 + \eta)$$

Gravity test using Galaxy Redshift Survey & Lensing

Effective gravitational constant $g_0 = G_{\text{eff}}/G$

Ratio of Metric perturbation $\eta = \Phi/\Psi$



SUbaru Measurement of Images and REdshift (SUMIRE)

Joint Mission of Imaging and Redshift surveys using 8.2m Subaru Telescope

Hyper-Suprime Cam (HSC)

- 1400 deg² sky (overlap w ACT, BOSS)
- 30gals/arcmin², $z_{\text{mean}}=1$, $i \sim 26(5\sigma)$
- 1.5 deg FoV, grizy band, 0.16"pix,
- 2013-2017

Prime Focus Spectrograph (PFS)

- 1400 deg² of sky (overlap with HSC)
- Redshift of LRGs + OII emitters at $0.8 < z < 2.4$ (9.3 Gpc/h³ comoving vol)
- 2400 fibers, 380--1300nm
- 2018-2023 (planned)



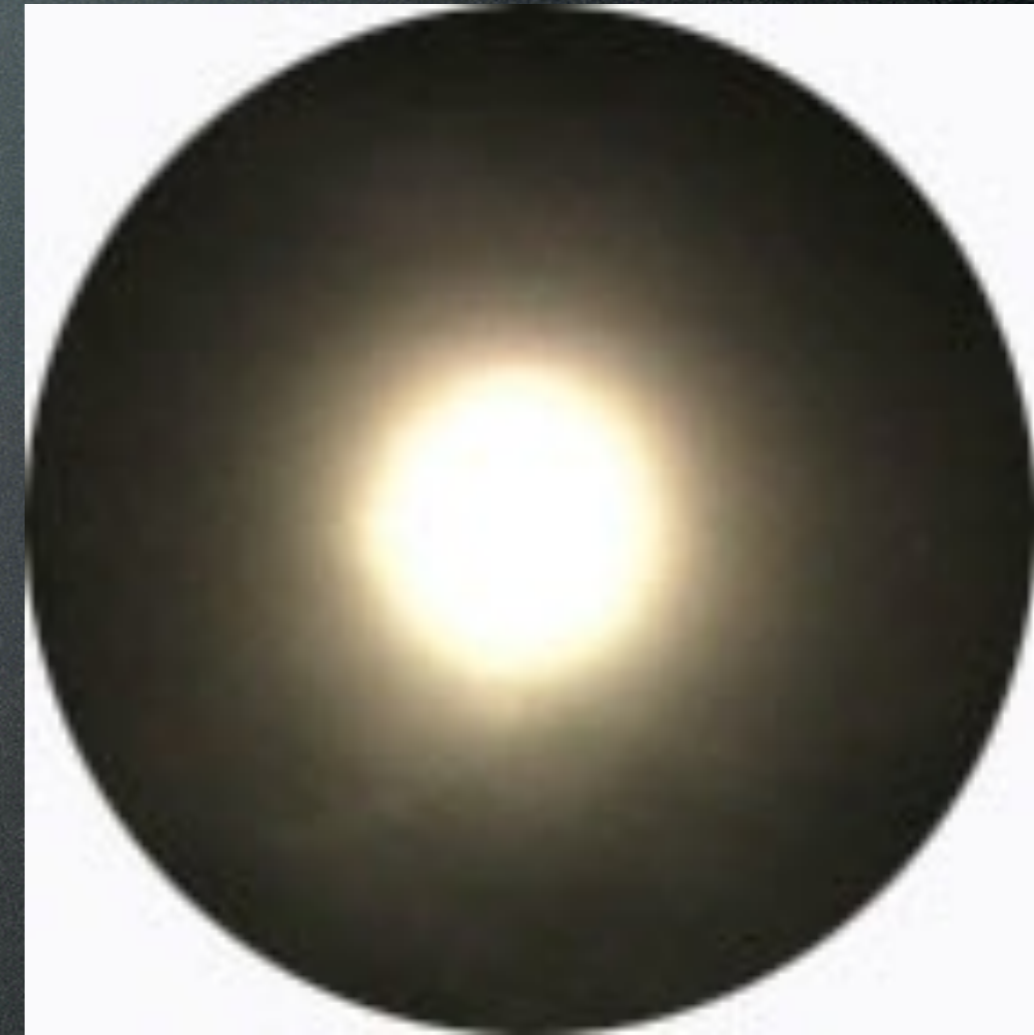
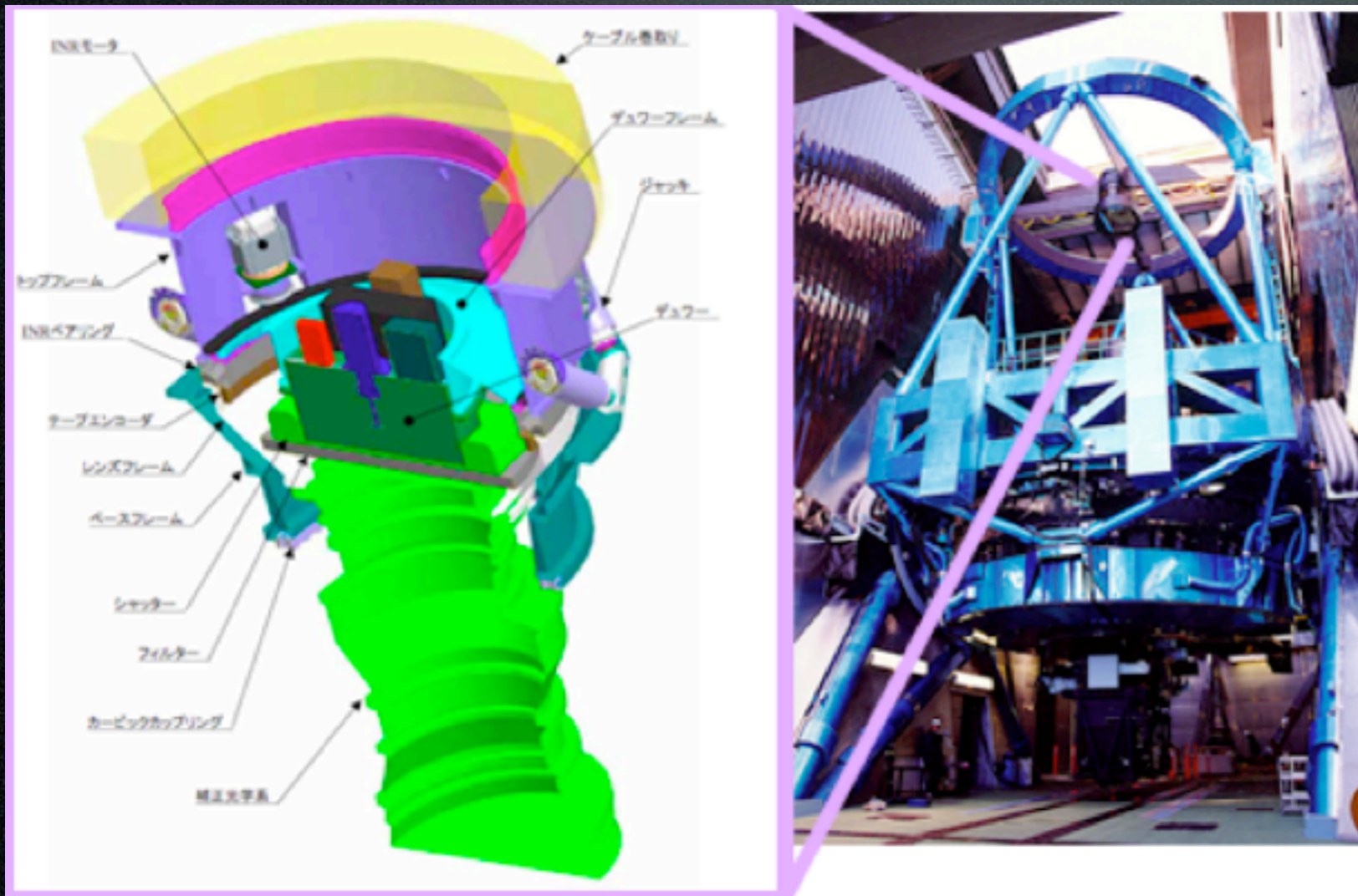
Mauna Kea, Hawaii,
4139m alt., 0.6-0.7" seeing

Hyper Suprime Camera

800M pix (106 2Kx4K CCDs)

Hamamatsu Photonics-NAOJ collaboration

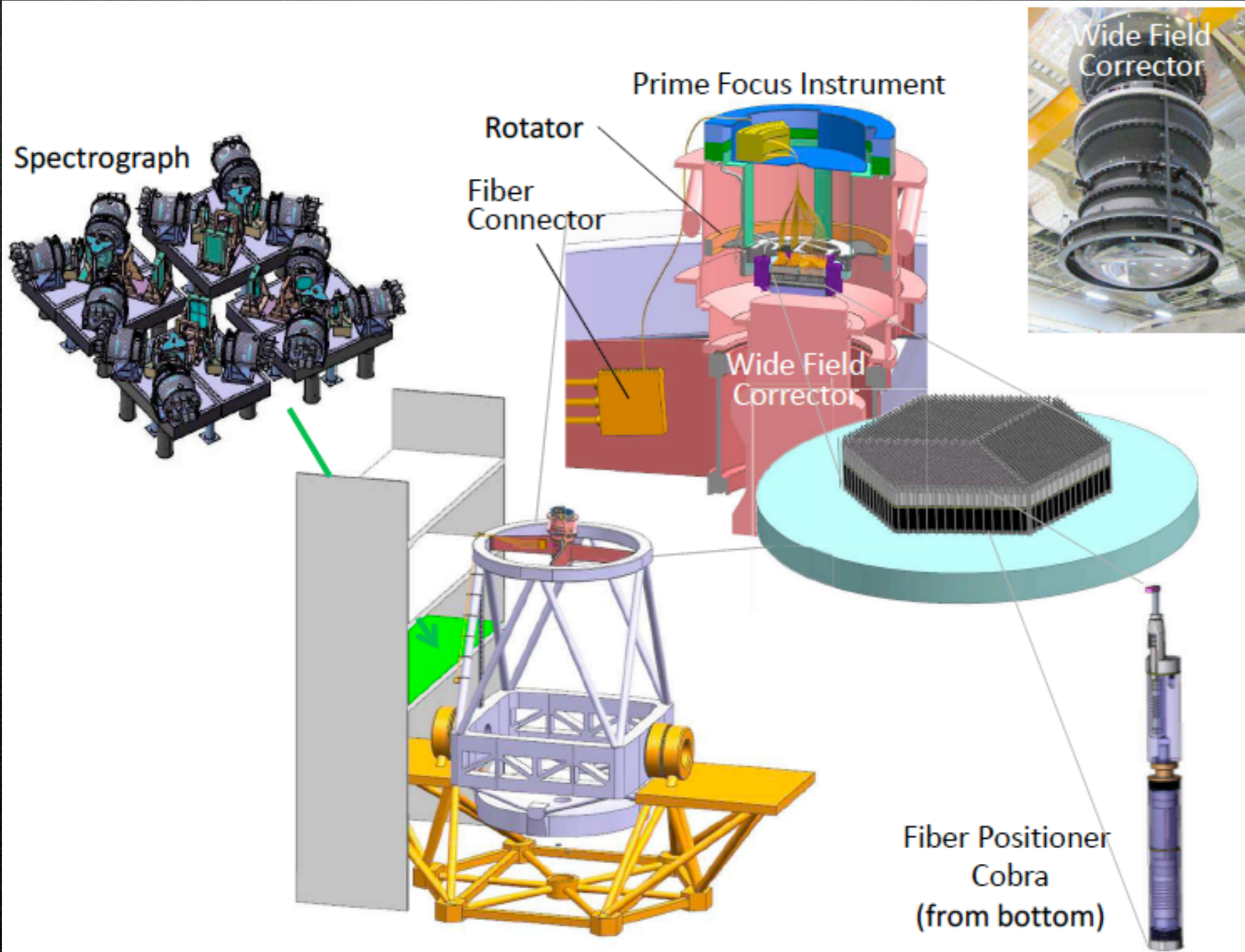
1.5 deg FoV, 0.16"pix



HST 3'

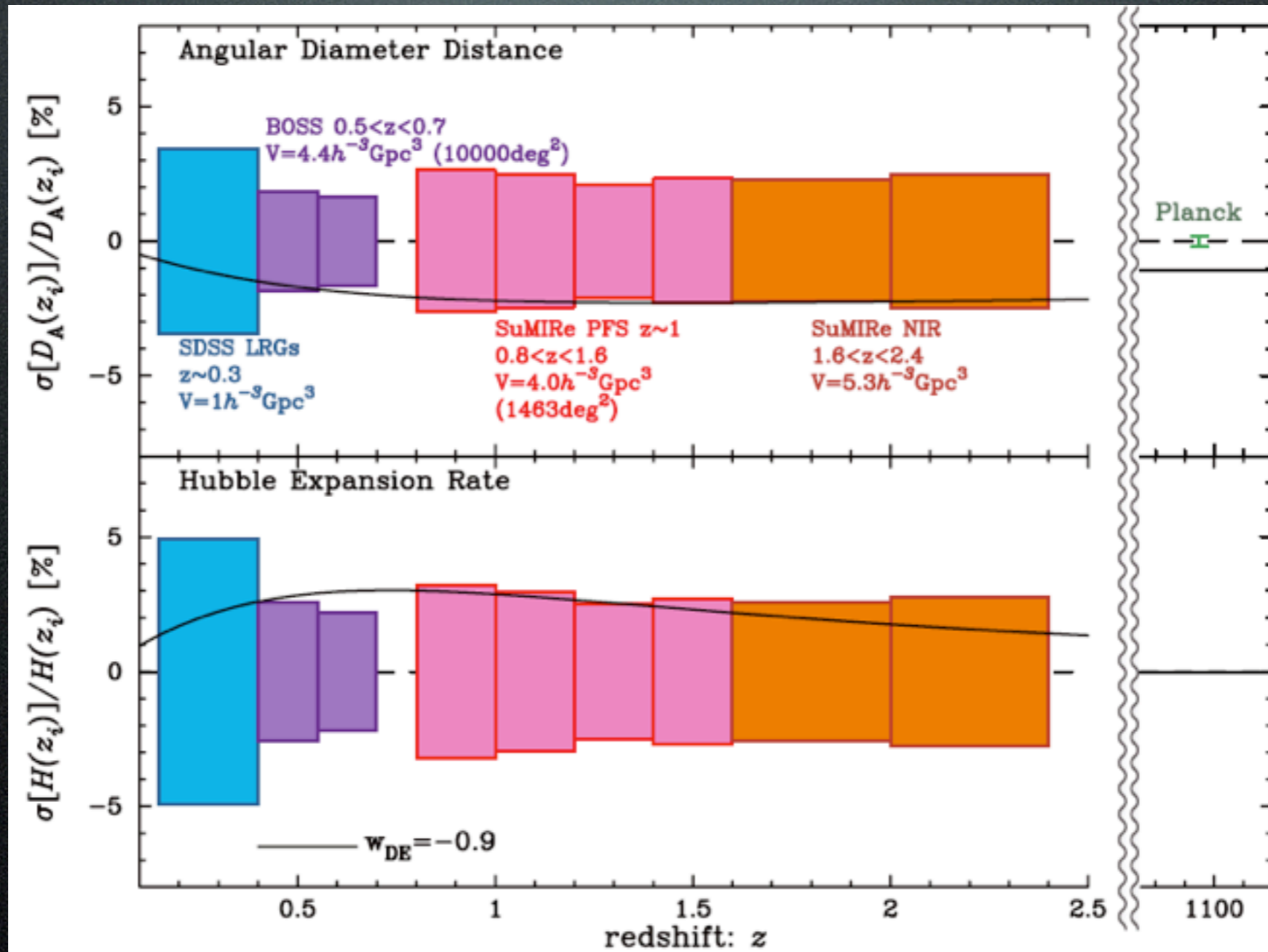


PFS Instruments



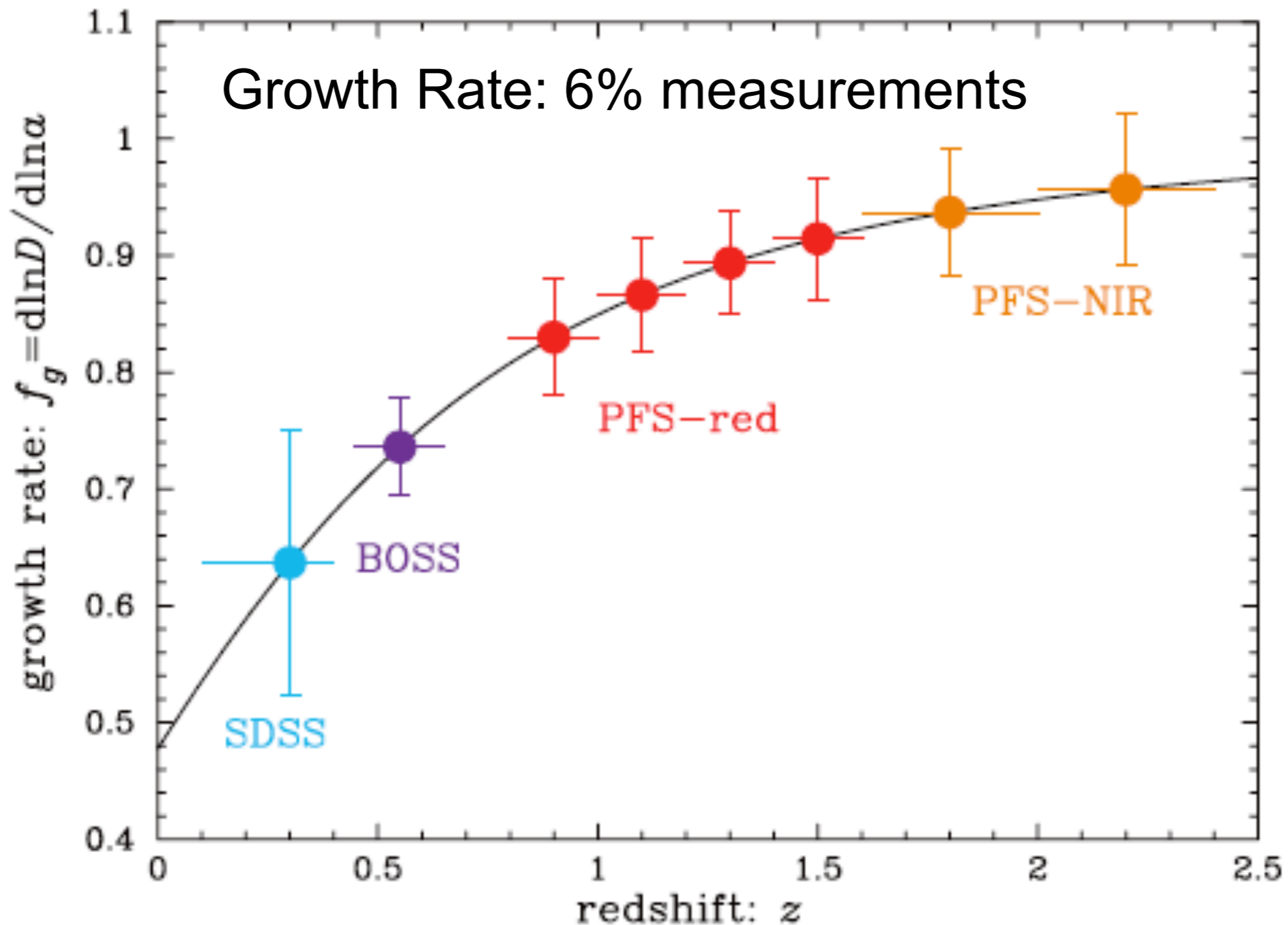
PFS Forecast

2-3% measurements of $D_A(z), H(z)$ for 6 redshift bins



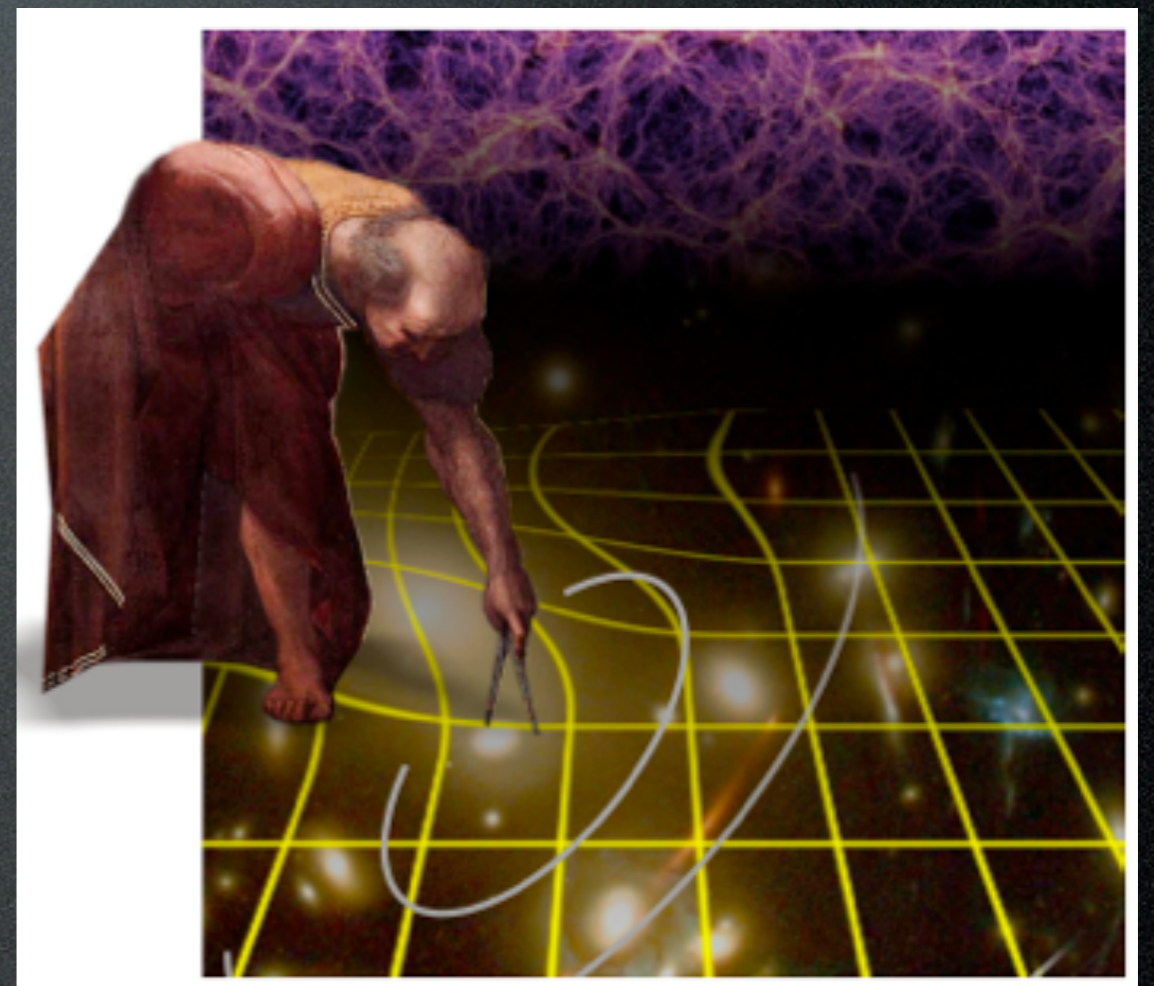
Survey	$\Omega_{\text{de}0}$	w_{pivot}	w_a	FoM _{de}	Ω_K	$m_{\nu,\text{tot}}$ [eV]	f_{NL}
SDSS+BOSS	0.0061	0.076	1.2	11	0.0071	0.188	16
SDSS+BOSS+PFS	0.0051	0.059	0.36	47	0.0030	0.133	11

PFS Forecast II



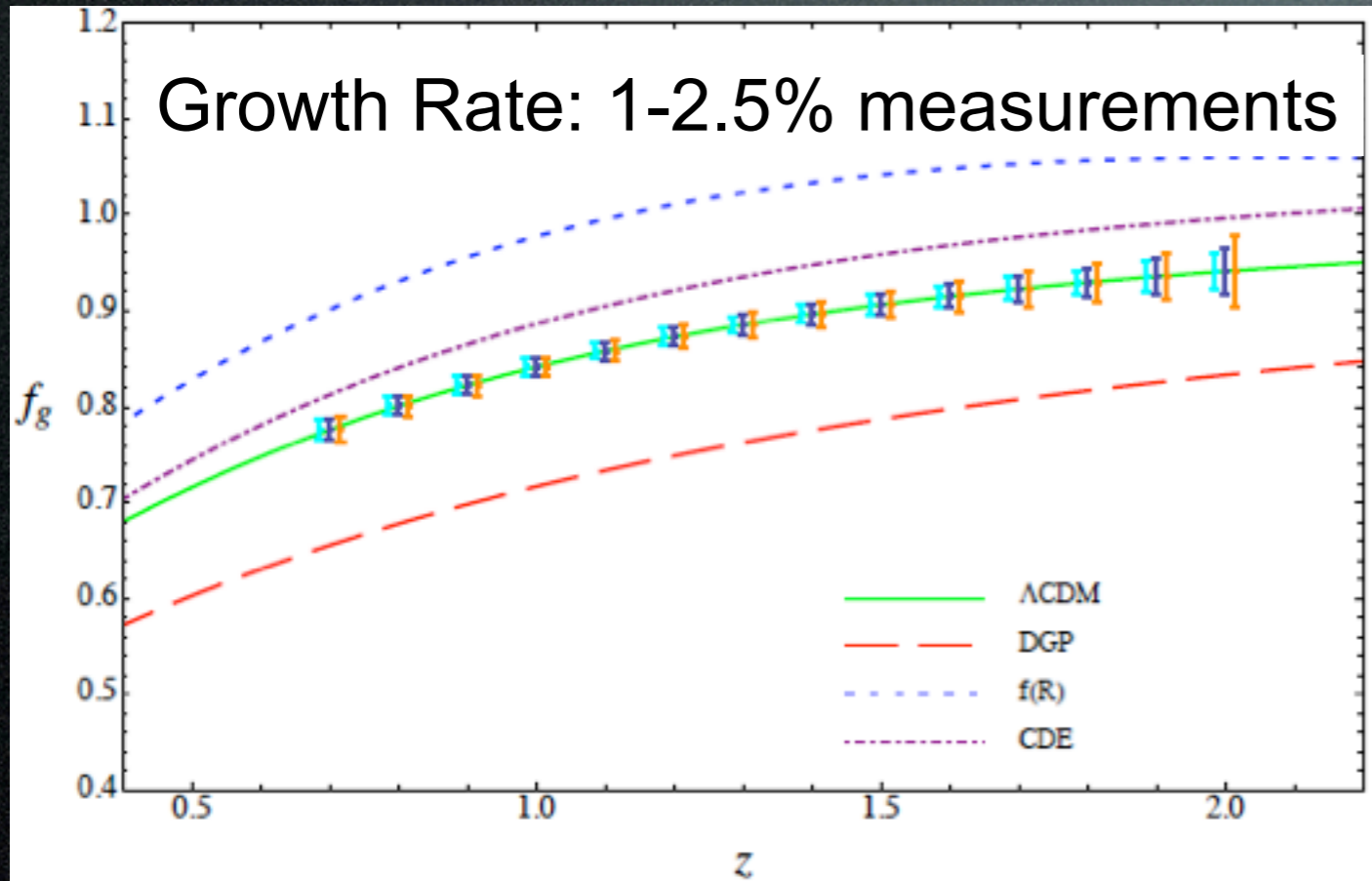
Euclid

- ESA M-class mission
- Dark energy probe via weak lensing & BAO
- Imaging 20000 deg² sky, 40gals/arcmin²
- Spectrum of 70M H α emitters at $0.5 < z < 2$,
- 1.2m telescope
- FOV 0.5deg², rizYJH band (550--1800nm), 0.2-0.3" pixel size
- Spectrograph: 1-2 μ m, R=500
- 2020-2025 (planned)



Euclid Forecast

Euclid White Paper (arXiv:1206.1225)



Primordial Non-Gaussianity

Bispectrum shape	local	orthogonal	equilateral
Fiducial f_{NL}	0	0	0
Galaxy clustering (spectr. z)	4.1 (4.0)	54 (11)	220 (35)
Galaxy clustering (photom. z)	5.8 (5.5)	38 (9.6)	140 (37)
Weak lensing	73 (27)	9.6 (3.5)	34 (13)
Combined	4.7 (4.5)	4.0 (2.2)	16 (7.5)

$$\Delta f_{NL}^{loc} \sim 5$$

Neutrino mass, number of species (N_{eff})

General cosmology						
fiducial \rightarrow	$\Sigma=0.3 \text{ eV}^a$	$\Sigma=0.2 \text{ eV}^a$	$\Sigma=0.125 \text{ eV}^b$	$\Sigma=0.125 \text{ eV}^c$	$\Sigma=0.05 \text{ eV}^b$	$N_{eff}=3.04^d$
EUCLID+Planck	0.0361	0.0458	0.0322	0.0466	0.0563	0.0862
Λ CDM cosmology						
EUCLID+Planck	0.0176	0.0198	0.0173	0.0218	0.0217	0.0224

**In Λ CDM,
Neutrino mass
error $\sim 0.02 \text{ eV}$**

Summary

- ・ 宇宙大構造の精密観測から、宇宙の加速膨張の謎、ニュートリノ質量、初期ゆらぎの起源を探ることができる
- ・ 現在、BOSSやWiggleZによる銀河サーベイが進行中。BAOが2%、Growth Rateは6%の誤差で測定され、宇宙の曲率0.5%、 H_0 は1.5%、 w が5%で測定、重力のテストが行われる
- ・ 銀河のパワースペクトル情報は、ニュートリノの性質を探る上で特に重要。しかし、銀河バイアスやFinger-of-Godの不定性を克服しなくてはならない
- ・ 重力レンズ情報を組み合わせることで、銀河と暗黒物質の関係が明らかになり、不定性を減らすことができる
- ・ 今後、SumireやEuclidなど、銀河分光と撮像(重力レンズ)を組み合わせた大規模銀河サーベイが計画されており、より一層の発展が期待できる