

宇宙論スケールでの重力理論の検証

山本一博
(広島大理)

Collaboration with G. Huetsi, T. Sato, G. Nakamura

世界天文年2009

ガリレオ 望遠鏡による天体観測(1609)

ケプラー 惑星運動に関する第1法則・第2法則(1609)

ニュートン 万有引力の発見 (天体観測→重力検証の主役)

(重力理論の検証始まる)

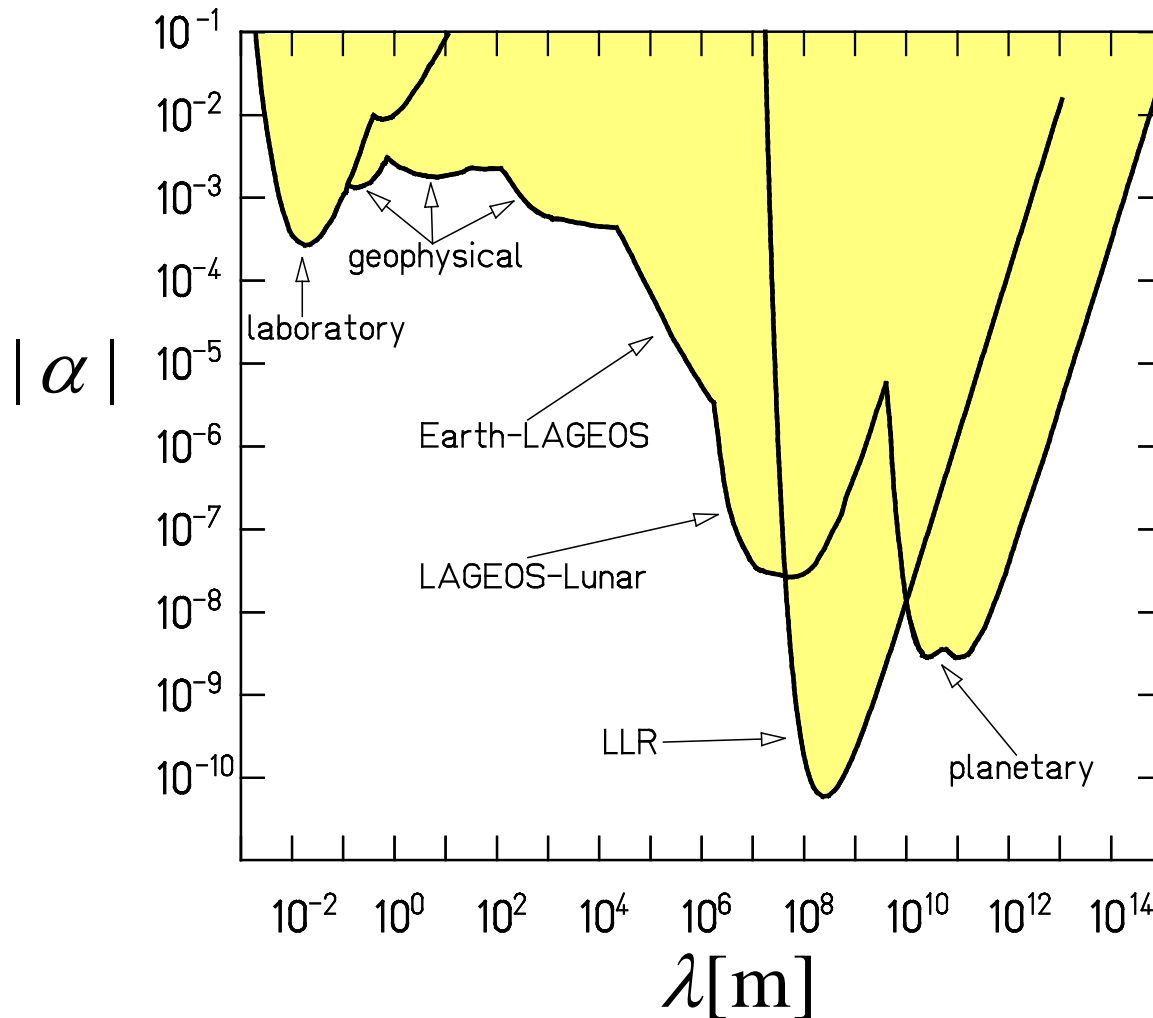
アインシュタイン 一般相対性理論

一般相対性理論の検証

($1/r^2$ 則の検証)

$$V = -\frac{Gm_1m_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \left(1 + \alpha e^{-|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|/\lambda} \right)$$

Adelberger et al (03)



$10^{-3} \text{ m} < R < 10^{13} \text{ m}$

最も強い制限は惑星と月の運動の精密測定

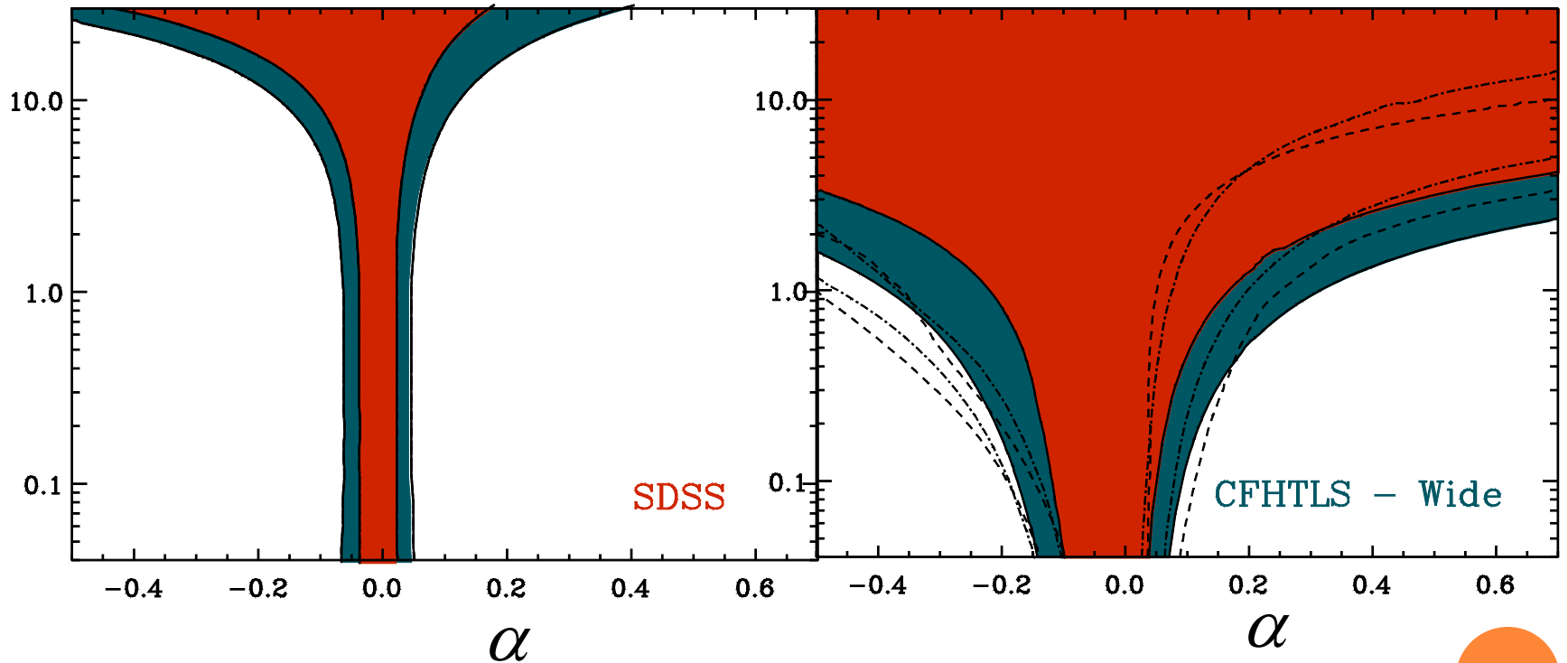
宇宙論スケールでは

cf. Shirata et al. (07,05)

$$V = -\frac{Gm_1m_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \left(1 + \alpha \left(1 - e^{-|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|/\lambda} \right) \right)$$

Dore et al. (08)

λ [Mpc]



ダークエネルギーサーベイを利用して重力のテストができる例

拡張重力模型


DGP模型(ブレーンワールド)、スカラーテンソル理論
F(R) 重力模型

宇宙論スケールの重力理論の検証 第一目標

宇宙項入りアインシュタイン方程式で十分か？否か？

ダークエネルギーサーベイの目的 ダークエネルギーは宇宙項？

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + 8\pi G T_{\mu\nu}^{DE}$$


宇宙項入りアインシュタイン方程式で十分か？否か？

ダークエネルギーの検証 ~ 重力理論検証

宇宙項入りアインシュタイン方程式で十分か？否か？



膨張率の検証

バックグラウンド宇宙の膨張率（平坦 $K=0$ 宇宙）

$$H^2(z) = \frac{\dot{a}^2}{a^2} = H_0^2 (\Omega_m (1+z)^3 + 1 - \Omega_m) \quad a = \frac{1}{1+z}$$

距離-赤方偏移関係 $r(z) = \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$

バリオン音響振動スケールを距離, $H(z)$ を測る道具として使う

宇宙項入りアインシュタイン方程式で十分か？否か？

摂動の検証

物質(バリオン+CDM)揺らぎの進化

$$\delta(t, x) = \frac{\rho_m(t, \vec{x}) - \bar{\rho}_m(t)}{\bar{\rho}_m(t)} \quad \begin{array}{l} \text{非等方圧力}=0 \\ \text{サブホライズンスケール} \end{array}$$

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2H \frac{\partial \delta}{\partial t} - 4\pi G \bar{\rho}_m \delta = 0 \quad \text{ジーンズ不安定性による成長}$$

線形密度揺らぎの成長はスケールによらない(非線形性はスケール依存)

$$\delta(t, x) = D_1(z) \delta(x)$$

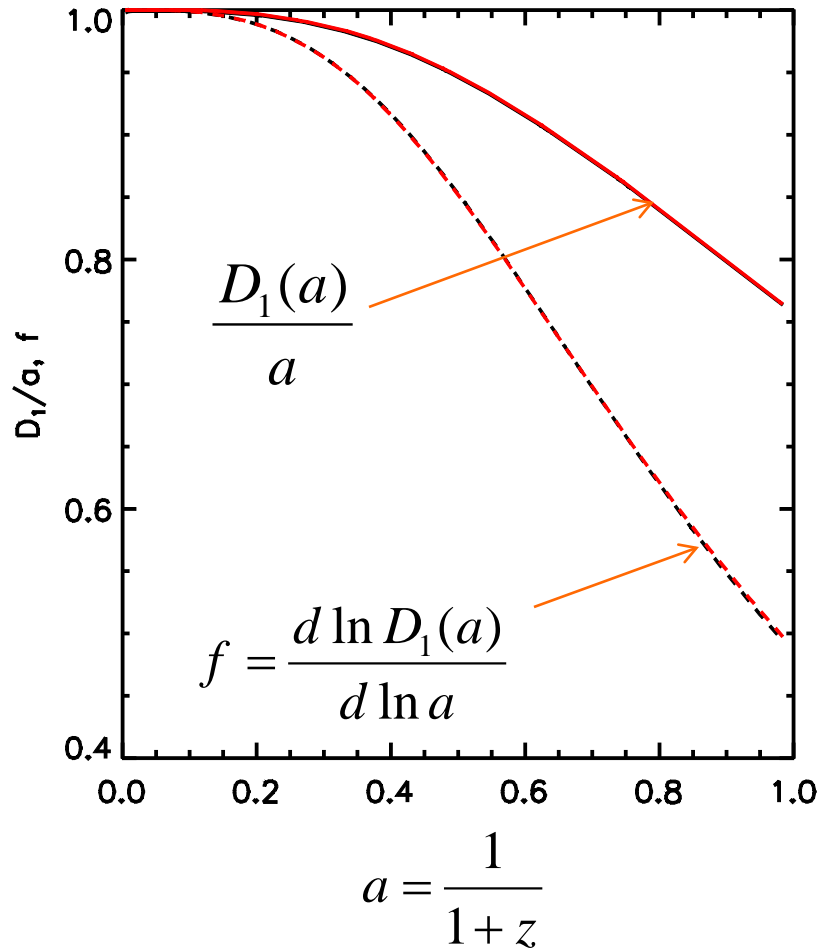
$$D_1(z) \quad \text{Growth factor}$$

$$\frac{d \ln D_1}{d \ln a} = f \quad \text{Growth rate}$$

重力の変更は線形成長率に影響を及ぼす



Growth factor, Growth rate

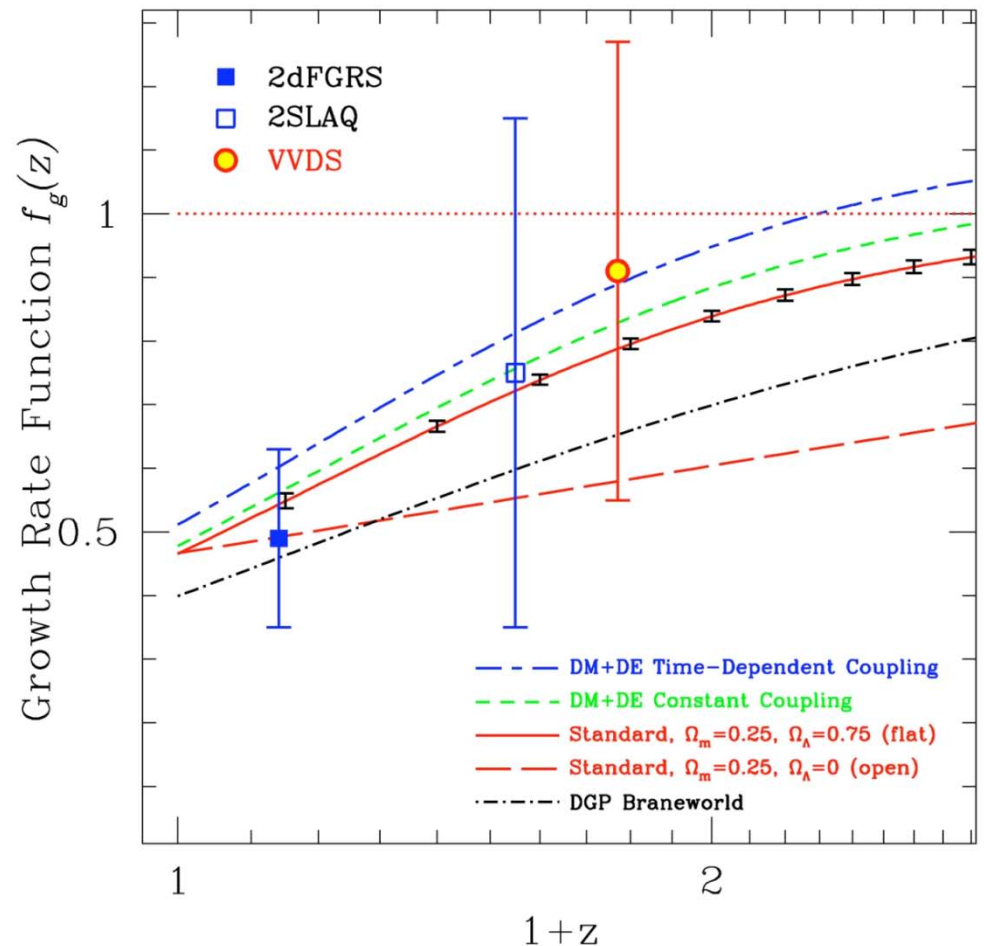


$\Omega_m = 0.28$ 宇宙項模型の場合

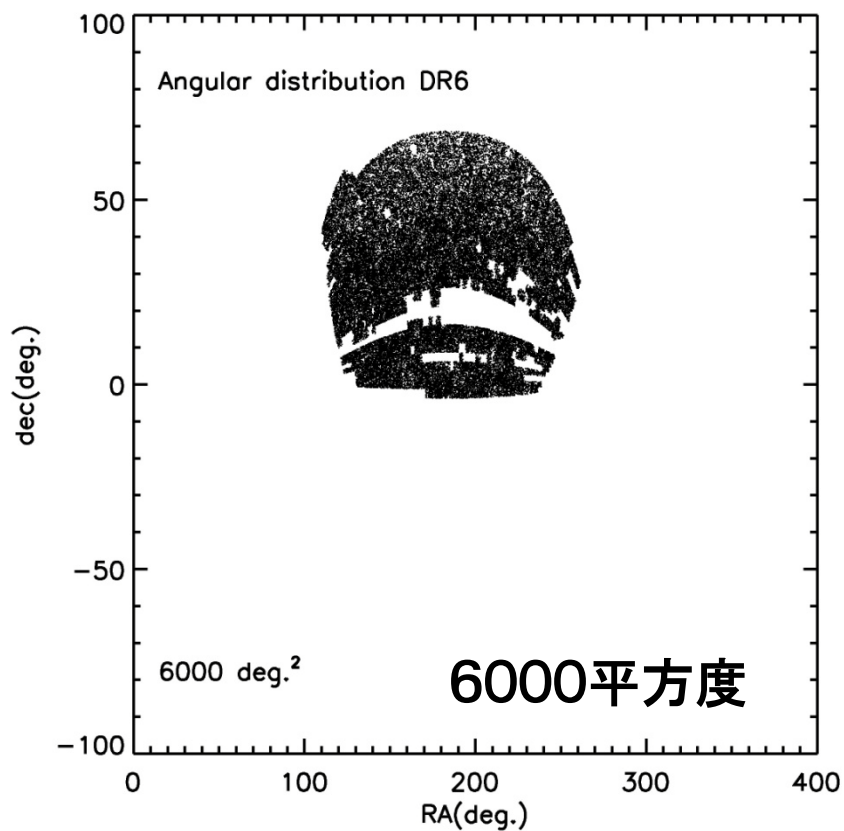
Guzzo et al, (08)

VVDS wide-survey (6000 gal. redshifts)

赤方偏移歪みを使った f の測定

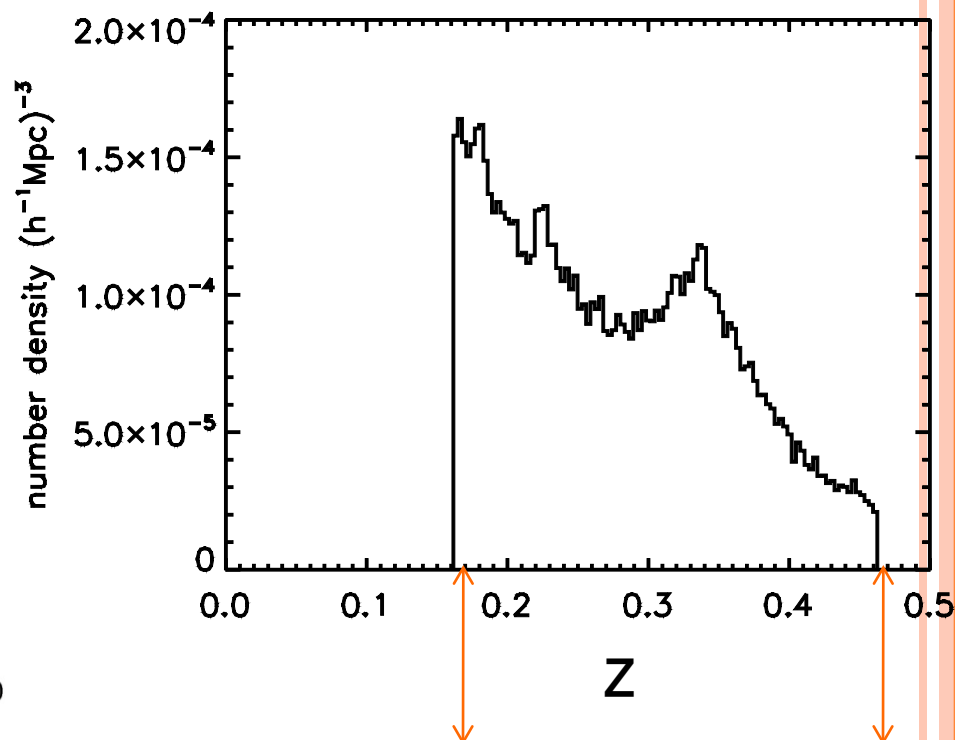


角度分布



$\bar{n}(z)$

数密度z分布

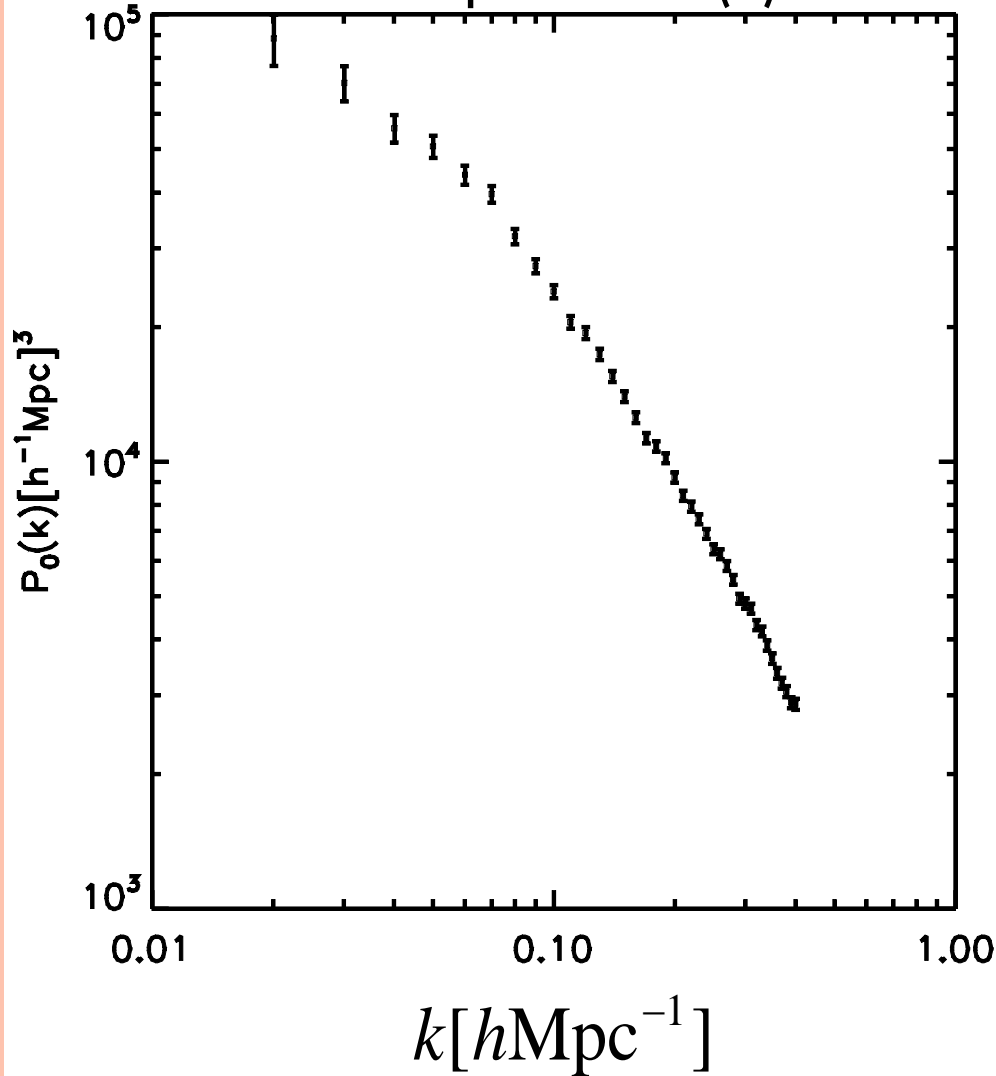


$$0.16 \leq z \leq 0.47$$

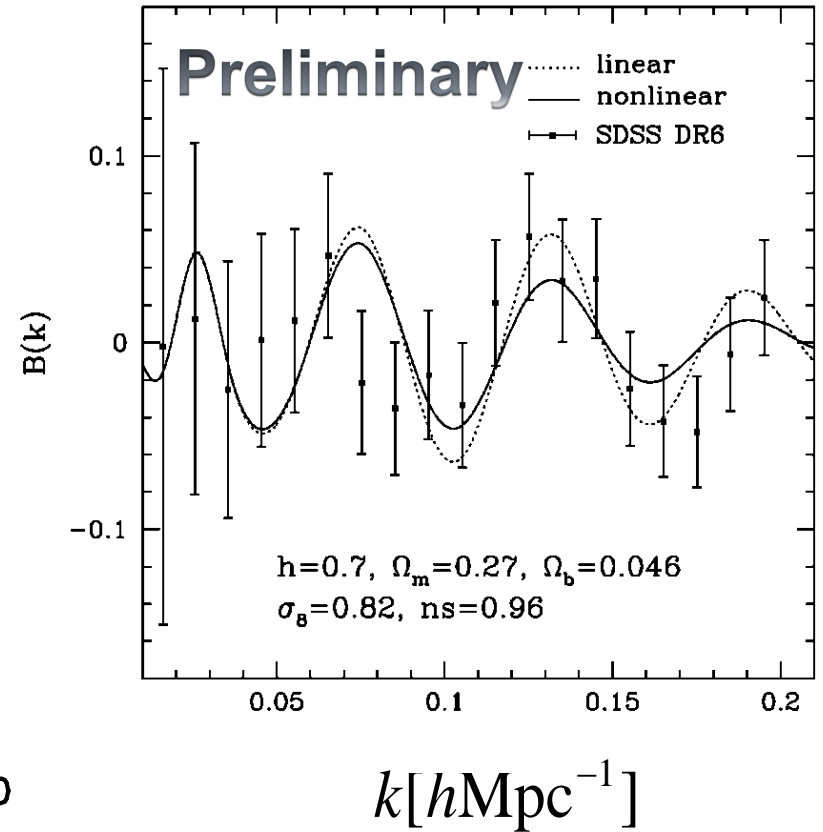
$$P(k) = \langle |\tilde{\delta}_{\vec{k}}|^2 \rangle, \quad \frac{n_g(\vec{x}) - \bar{n}_g}{\bar{n}_g} = \sum_{\vec{k}} \tilde{\delta}_{\vec{k}} e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}}$$

(Nomura et al, 09)

Power spectrum $P(k)$

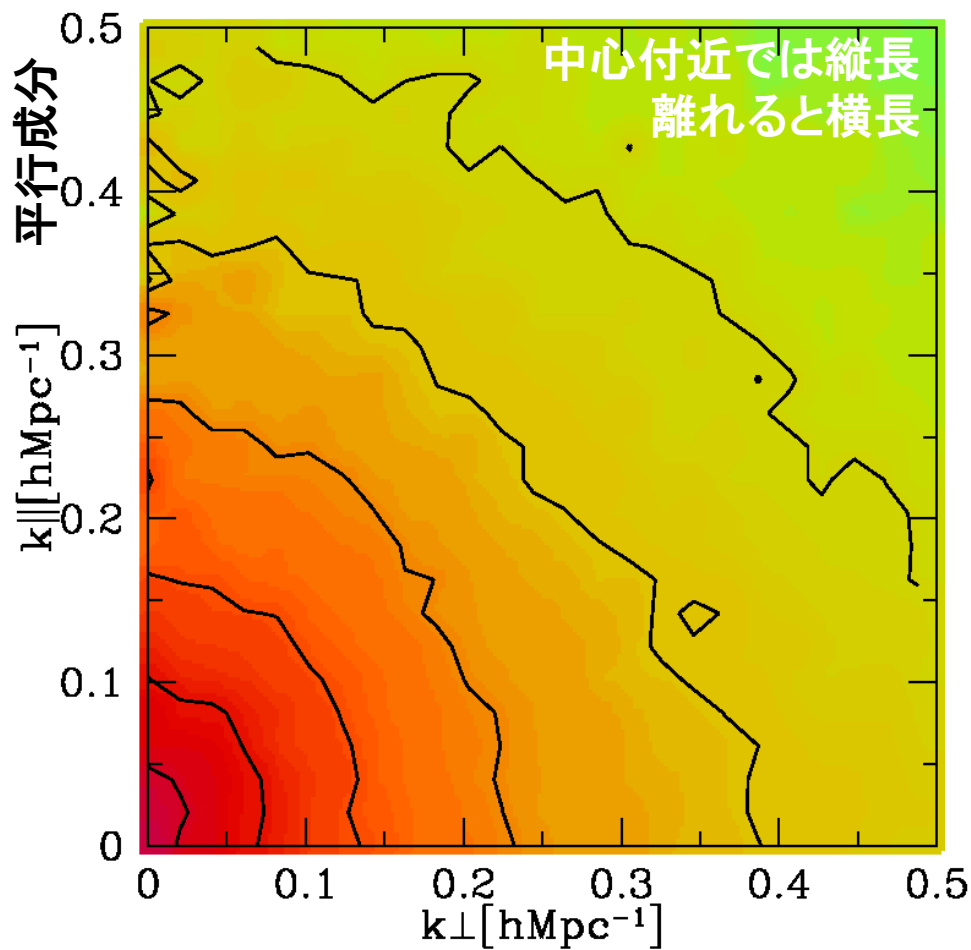


バリオン音響振動(BAO)

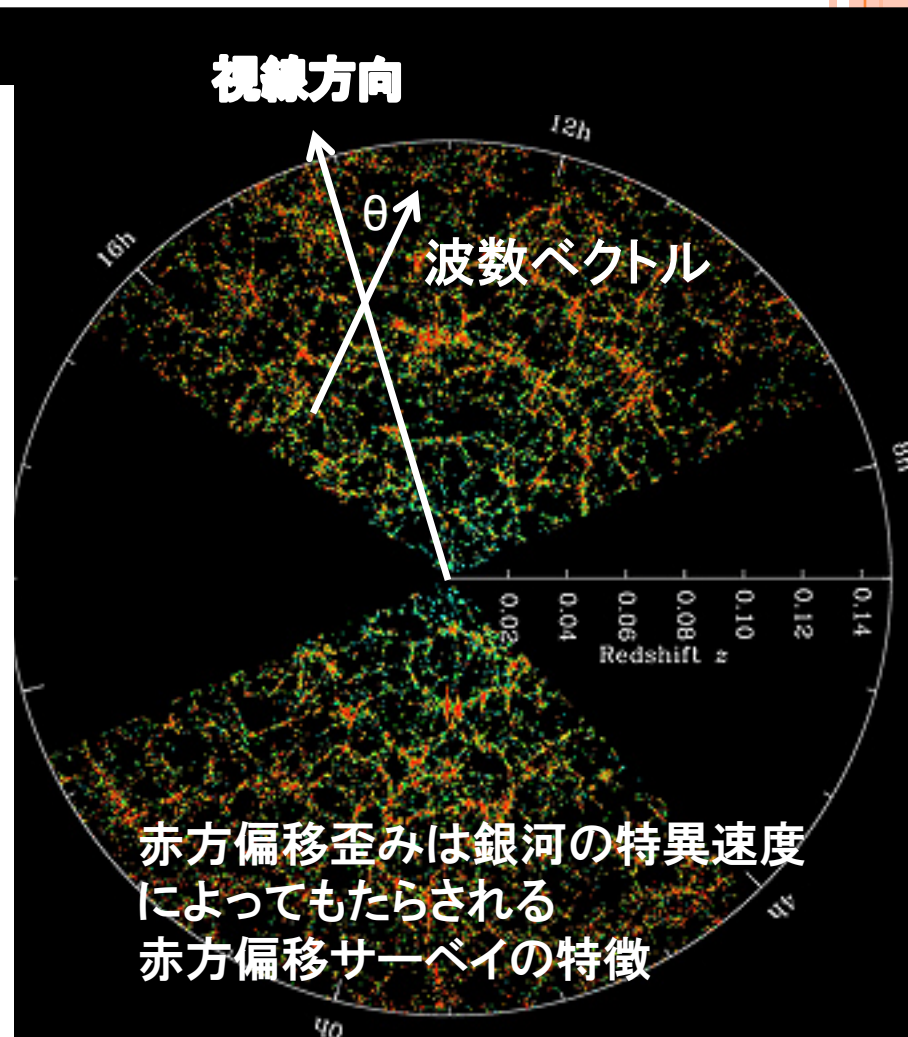


「赤方偏移歪み」を用いた揺らぎの成長率の制限

パワースペクトル $P(k_{\perp}, k_{\parallel})$ の等高線



視線方向に垂直成分



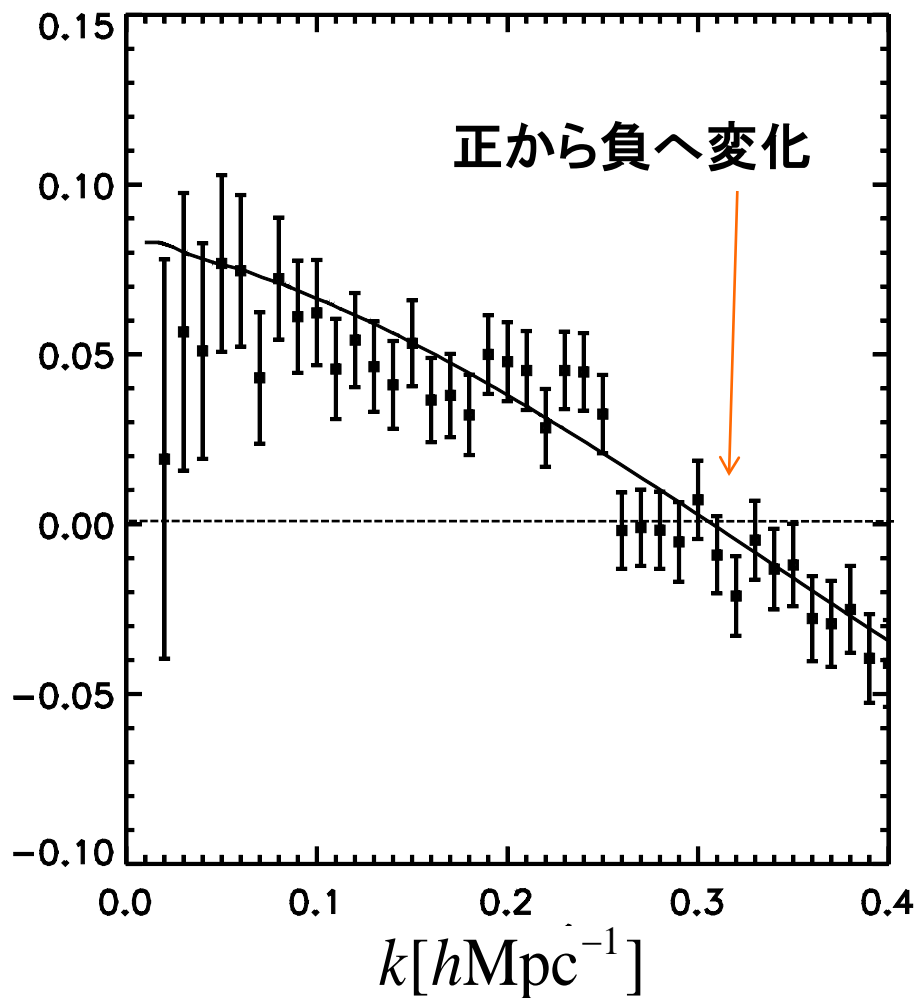
非等方パワースペクトル $P(k_{\perp}, k_{\parallel})$ の多重極展開

$$P(k, \theta) = \sum_{\ell=0,2,4,\dots} P_{\ell}(k) L_{\ell}(\cos \theta)$$



Legendre
Polynomial

$$\frac{P_2(k)}{P_0(k)}$$



$P_2(k)$ 非等方成分

$P_0(k)$ 等方成分

赤方偏移歪みの解釈

\vec{V} 銀河の特異速度

→ $\delta z = (1+z)\vec{\gamma} \cdot \vec{V}$ 赤方偏移に影響(ドップラー効果)

→ $\delta r = \frac{\delta z}{H(z)}$ みかけの位置のズレ

● 線形理論で生じる速度場 (コヒーレントな速度場)

$$\frac{\partial \delta(t, x)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{V}(t, x) = 0$$

$$\vec{V} \propto \dot{D}_1(t) \propto \frac{d \ln D_1}{d \ln a} = f$$

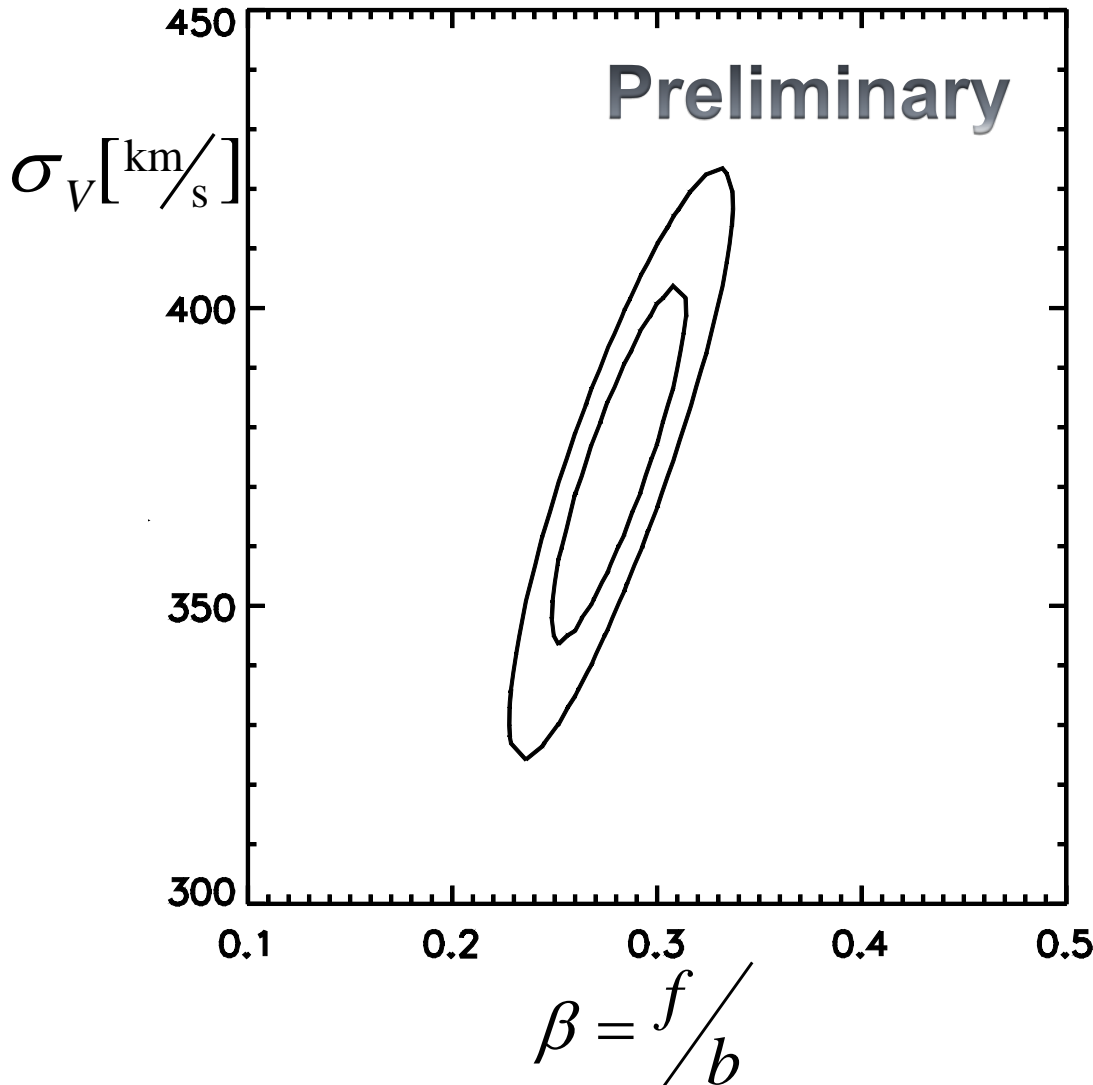
● ランダムな速度分布 速度分散 σ_V

$$\frac{P_2(k)}{P_0(k)} = \frac{4\beta(7+3\beta)}{7(15+10\beta+3\beta^2)} - \frac{(735+1260\beta+714\beta^2+140\beta^3+15\beta^4)}{47(15+10\beta+3\beta^2)^2} \left(\frac{k\sigma}{H_0}\right)^2 + O\left(\left(\frac{k\sigma}{H_0}\right)^4\right)$$

$$\beta = \frac{f}{b}, \quad \sigma_V \quad \text{二つのパラメーターによって決まる}$$

データと理論との比較

$\Delta\chi^2$ 等高線



$$\beta = \frac{f}{b} = 0.28 \pm 0.2$$

$$\sigma_V = 375 \pm 20 \text{ km/s}$$

at 1σ level

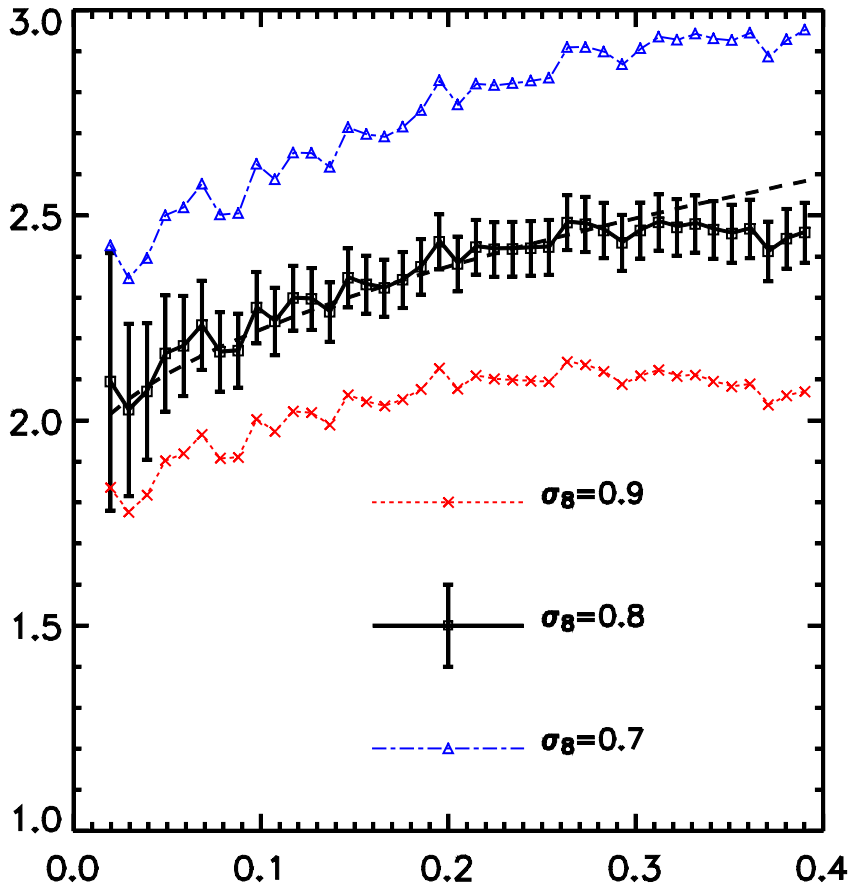
$$\beta = \frac{f}{b}$$

バイアス b の決め方？

SDSS LRG clustering bias

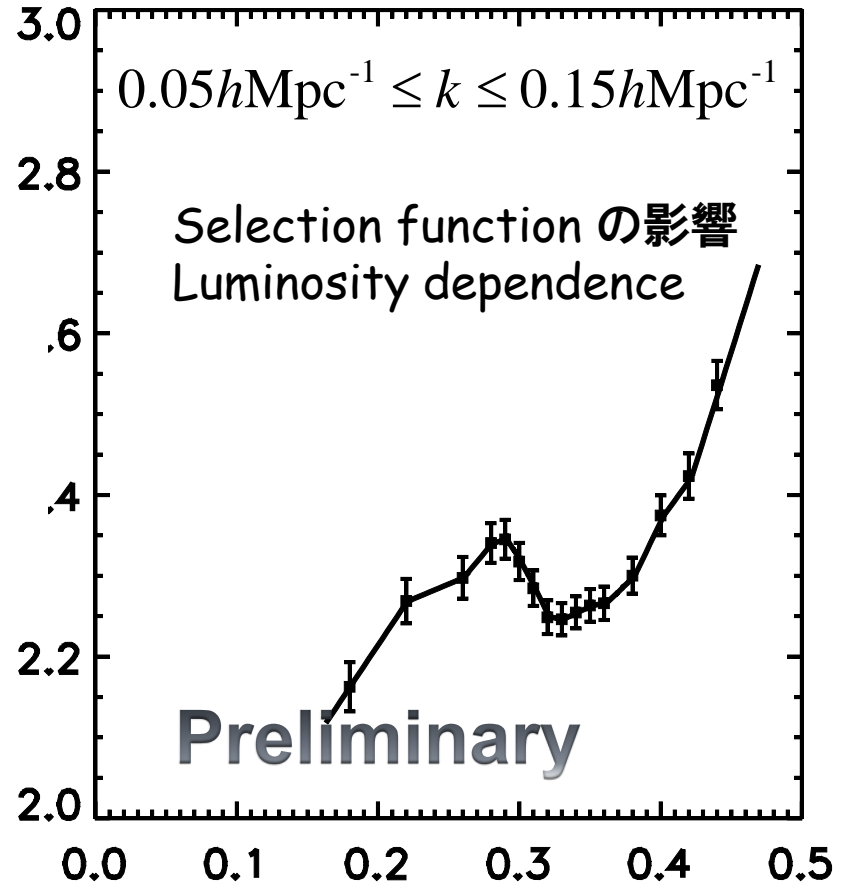
$b(k, z)$

k (波数) 依存



$k [h\text{Mpc}^{-1}]$

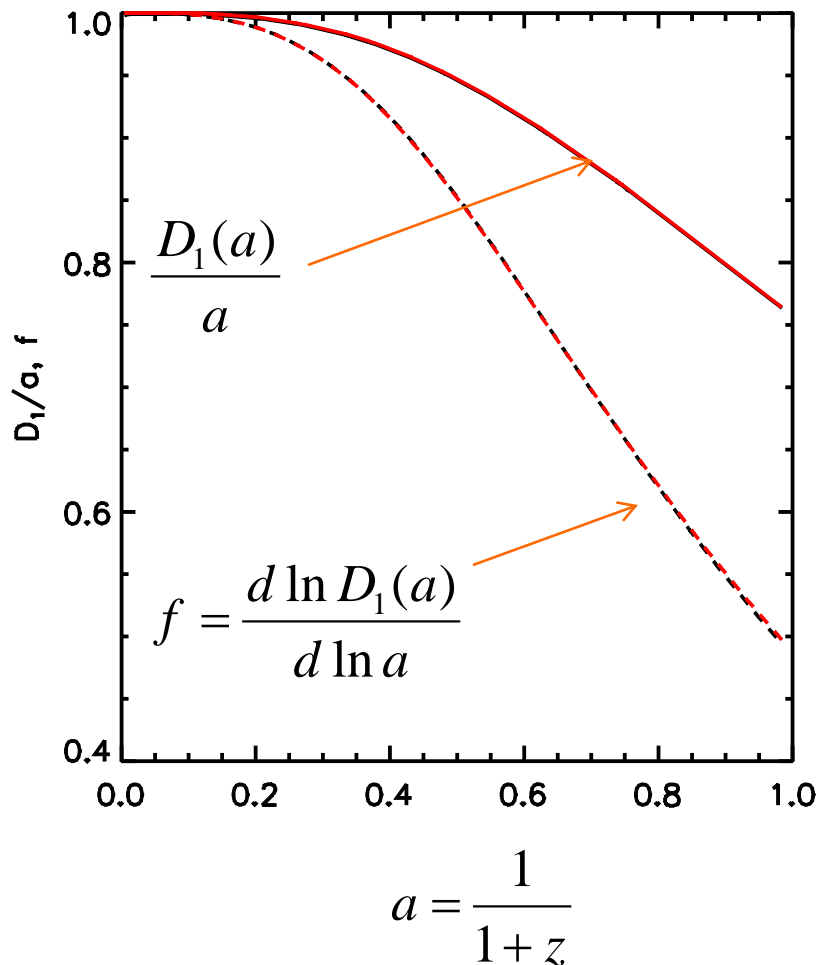
$b(k, z)$ z 依存 (時間進化)



z

Growth history γ Parameterization

Growth factor, Growth rate



$$\gamma = 0.56$$



$$f = \frac{d \ln D_1(a)}{d \ln a} \cong \Omega_m(a)^\gamma$$

$$\Omega_m(a) = \frac{H_0^2 \frac{\Omega_m}{a^3}}{H^2(a)}$$

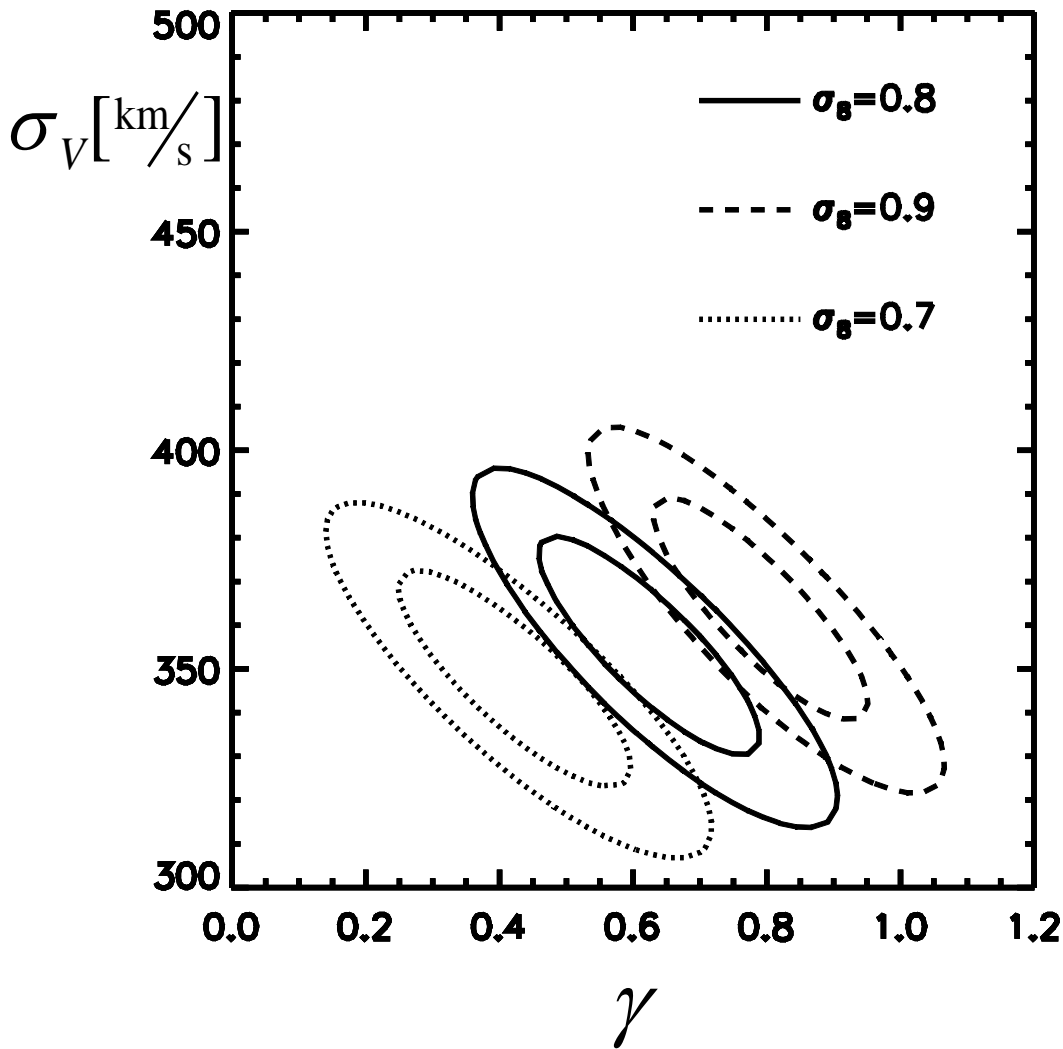
$$D_1(a) = a \exp \left[\int_0^a \frac{da'}{a'} \left(\Omega_m(a')^\gamma - 1 \right) \right]$$

一般相対性理論で
 γ のとる値

$$\gamma = 0.55 - 0.56$$

SDSS LRG からの γ - parameter の制限

$\Delta\chi^2$ 等高線

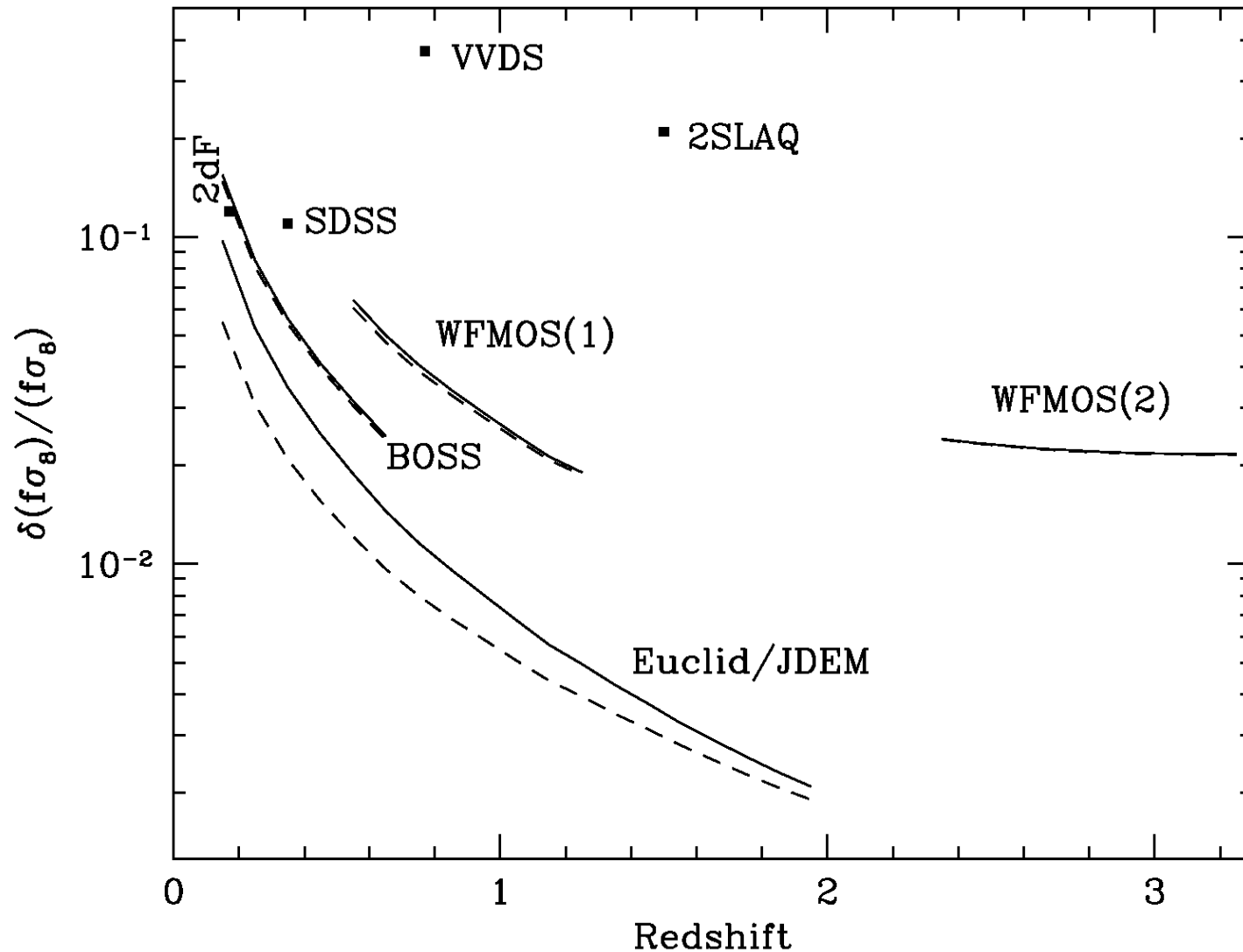


$$\gamma = 0.62 + 1.8(\sigma_8 - 0.8) \pm 0.11$$

σ_8 を別の方法で決める必要
 γ を20%程度で制限している

$b(k, z)$ は $P_0(k)$ から決定

Growth Rate に対する将来の制限



結論

ダークエネルギーサーベイを利用して宇宙論スケールの一般相対性理論の検証ができる

赤方偏移歪みの定量化、線形成長率の測定による相対論のテスト

新たな進展 → WFMOS Science Subject

SDSS LRG パワースペクトル解析からの制限 (1σ)

$$\gamma = 0.62 + 1.8(\sigma_8 - 0.8) \pm 0.11$$

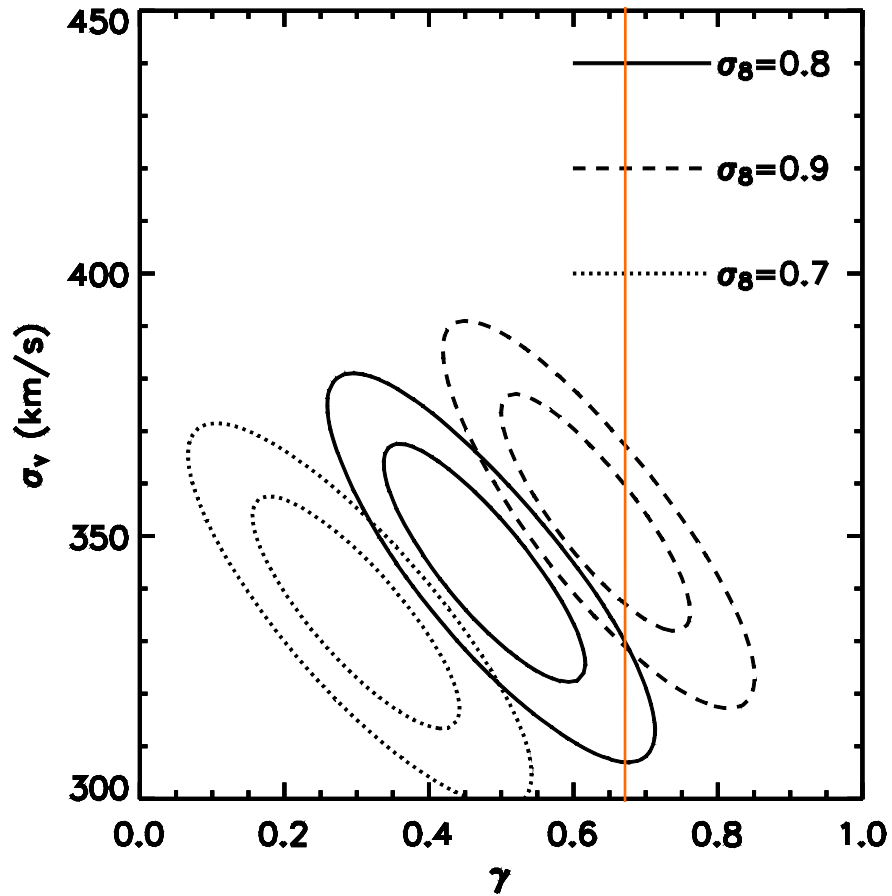
理論値 (一般相対性理論では) $\gamma = 0.55 - 0.56$

DGP(重力拡張)モデルに対する制限 $\gamma = 0.68$

DGPモデルが観測と整合性をもつためには $\sigma_8 > 0.87$

cf. WMAP 5year $\sigma_8 = 0.8 \pm 0.036$

DGP模型の場合



理論値

$$\gamma = 0.68$$

観測値 (1σ)

$$\gamma = 0.47 + 1.7(\sigma_8 - 0.8) \pm 0.09$$

理論と観測の整合値

$$\sigma_8 > 0.87$$