

# 夏の学校講演

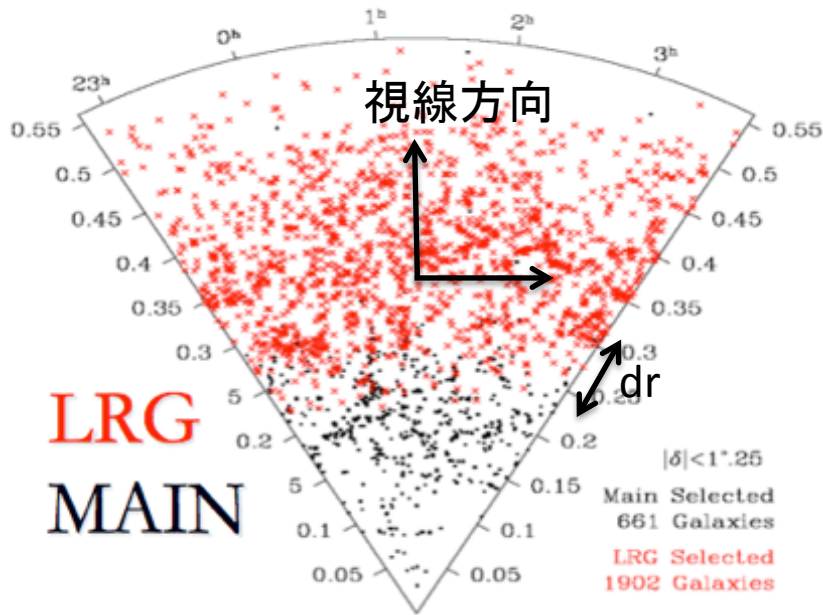
非等方相関関数を用いた銀河クラスター  
の解析と宇宙論パラメータの制限

名古屋大学 M2 片岡 明日香

# Introduction <銀河サーベイと赤方偏移変形>

## 銀河サーベイ

0.16 < z < 0.47    LRG: 明るく赤い銀河  
46,760個のLRGサンプル

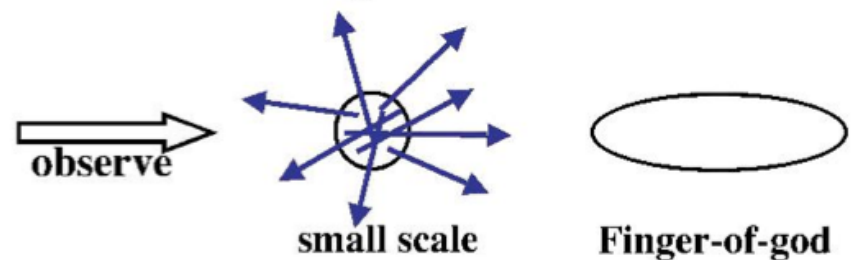


SDSS:  
Sloan Digital Sky Survey

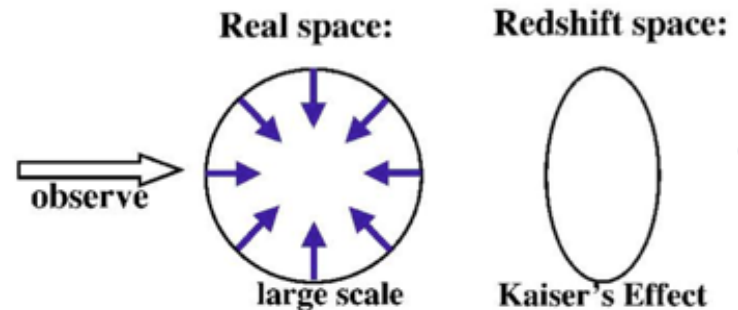
## 赤方偏移変形

観測では銀河の特異速度によって  
視線方向に変形を受ける。

small-scale : Finger-of-God    引き延ばされる



Large-scale : Kaiser効果    押しつぶされる



# Introduction <バリオン音響振動と2点相関関数>

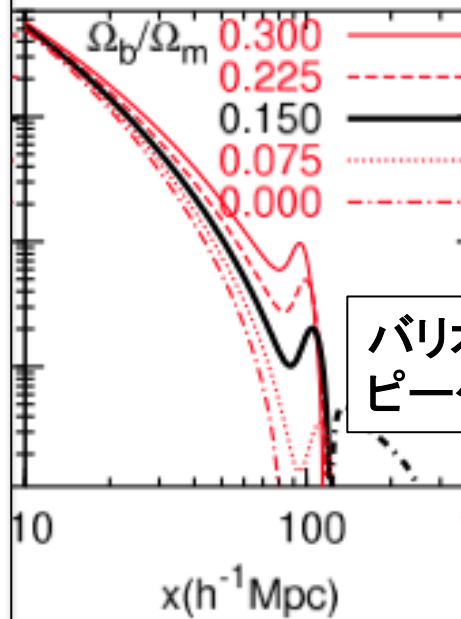
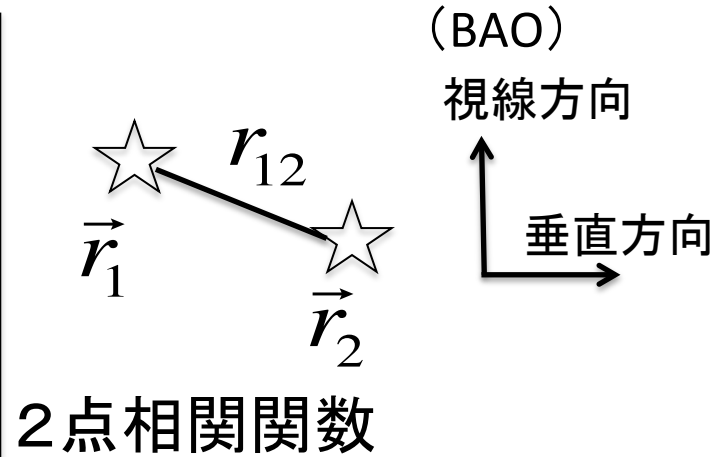
BAO

宇宙の  
晴れ上がり



サウンド  
ホライズン

約 $100h^{-1}\text{Mpc}$



バリオンリッジ

# 先行研究

Okumura T., et al. 2008

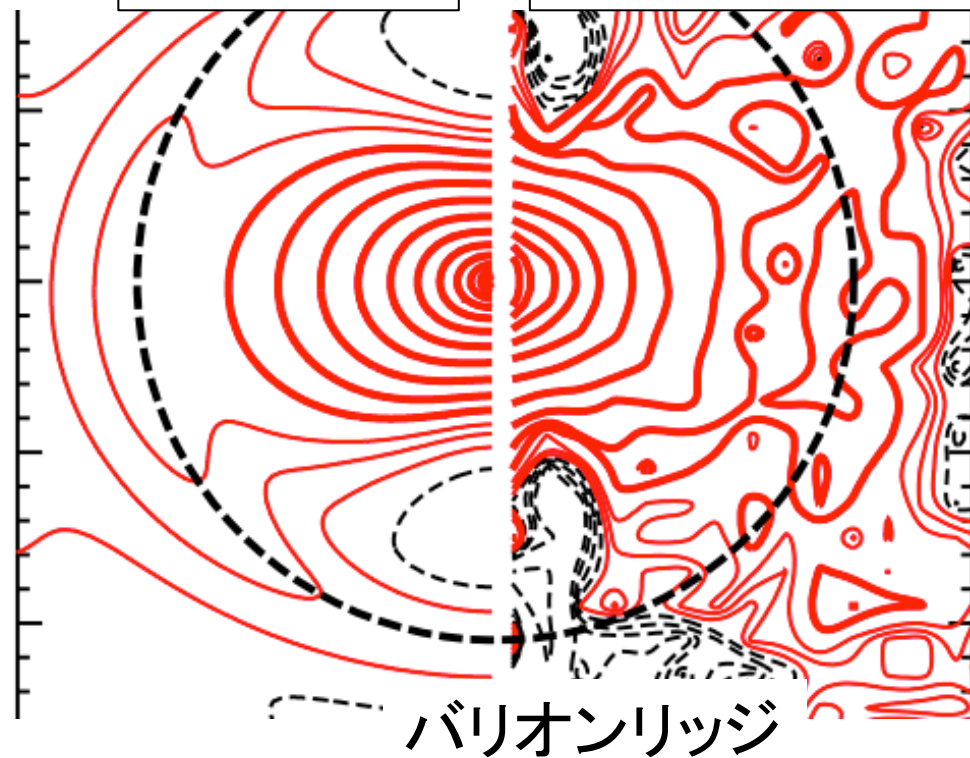
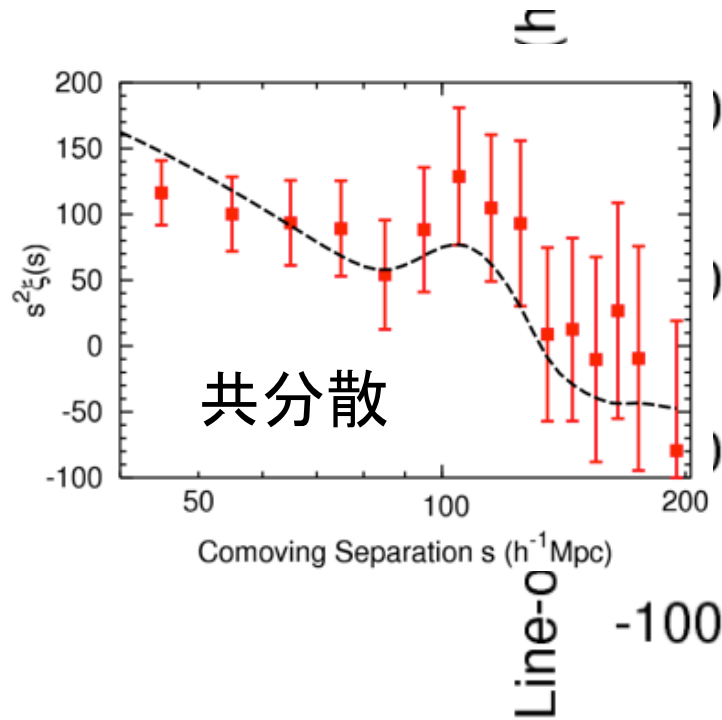
シミュレーション

理論

観測

解析公式

SDSS LRGサンプル



# 先行研究

Okumura T., et al. 2008

Eisenstein et al,2005		CONSTANT $w$ , FLAT		$w = -1$ , FLAT	
PARAMETER	WMAP+Main	+LRG	WMAP+Main	+LRG	
$w$ .....	$-0.92 \pm 0.30$	$-0.80 \pm 0.18$	...	...	
$\Omega_K$ .....	...	...	...	...	
$\Omega_m h^2$ .....	$0.145 \pm 0.014$	$0.135 \pm 0.008$	$0.146 \pm 0.009$	$0.142 \pm 0.005$	
$\Omega_m$ .....	$0.329 \pm 0.074$	$0.326 \pm 0.037$	$0.305 \pm 0.042$	$0.298 \pm 0.025$	
$h$ .....	$0.679 \pm 0.100$	$0.648 \pm 0.045$	$0.696 \pm 0.033$	$0.692 \pm 0.021$	
$n$ .....	$0.984 \pm 0.033$	$0.983 \pm 0.035$	$0.980 \pm 0.031$	$0.963 \pm 0.022$	

Parameter	LRG only		LRG(40 < $s$ < 200)	Marginalized	I
	40 < $s$ < 200	60 < $s$ < 160	+WMAP3		
$\Omega_m$	$0.218^{+0.047}_{-0.037}$	$0.208^{+0.069}_{-0.055}$	$0.240^{+0.019}_{-0.025}$	$\Omega_b, h, n_s, \sigma_8, b$	
$\Omega_b$	$0.0473^{+0.0157}_{-0.0160}$	$0.0462^{+0.0253}_{-0.0208}$	$0.0414^{+0.0023}_{-0.0024}$	$\Omega_m, h, n_s, \sigma_8, b$	
$h$	$0.702^{+0.187}_{-0.117}$	$0.656^{+0.220}_{-0.120}$	$0.718^{+0.023}_{-0.020}$	$\Omega_m, \Omega_b, n_s, \sigma_8, b$	
$n_s$	$1.122^{+0.152}_{-0.183}$	$1.030^{+0.144}_{-0.189}$	$0.947^{+0.016}_{-0.015}$	$\Omega_m, \Omega_b, h, \sigma_8, b$	
$\sigma_8$	$0.660^{+0.289}_{-0.216}$	$0.728^{+0.471}_{-0.359}$	$0.736^{+0.050}_{-0.062}$	$\Omega_m, \Omega_b, h, n_s, b$	
$\Omega_{DE}$	$0.770^{+0.051}_{-0.040}$	$0.786^{+0.060}_{-0.061}$	$0.772^{+0.024}_{-0.033}$	$h, n_s, w, \sigma_8, b$	!
$w$	$-0.93^{+0.45}_{-0.35}$	$-1.07^{+0.49}_{-0.46}$	$-0.97^{+0.12}_{-0.11}$	$\Omega_{DE}, h, n_s, \sigma_8, b$	!

角度平均

非等方

# MY WORK

## 2点相関関数の計算

1. N体シミュレーション
2. FOF halo finder、mass functionの計算
3. 赤方偏移変形の効果
4. Legendre展開  $\xi_0, \xi_2, \xi_4$   
(相関関数の非等方性)
5. 理論モデルとの比較

# 相関関数の計算 N体シミュレーション

- simulation code

- 初期条件・・・L-GenIC
- 重力計算・・・L-Gadget 2

- cosmological parameters

$$\Omega_m = 0.276$$

$$\Omega_\Lambda = 0.725$$

$$\Omega_b = 0.046$$

$$h = 0.702$$

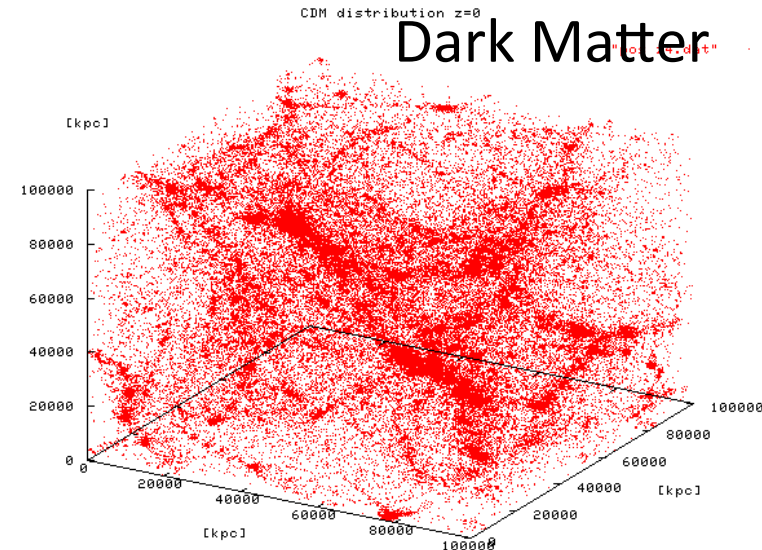
$$\sigma_8 = 0.816$$

WMAP 7yr

Number of particle :  $256^3, 512^3$

Box size : 500Mpc, 1Gpc

$z = 0.35$  (LRGの平均的redshift)



全質量M ~

$$(\text{Box size})^3 \times \rho_M$$

$$(500[\text{Mpc}])^3 \times 2.78 \times 10^{11} [\text{h}^2 \text{Msun Mpc}^{-3}] \times 0.136$$

$$\sim 2 \times 10^{17} [\text{Msun}]$$

▪ 点粒子の質量

$$M/256^3 \sim 5 \times 10^{11} [\text{Msun}]$$

# 相関関数の計算 halo finder, mass function

halo finder DMからhaloをつくる

結合長

球対称崩壊モデル

$$b = 0.2 \times \frac{L}{N^{1/3}}$$

$$\delta \cong 177 \bar{\rho} \cong \frac{1}{(0.2)^3} \bar{\rho}$$

FOF (friends-of-friends)

結合長 b より近い時、仲間とみなす



平均粒子間距離

球対称崩壊モデル



mass function

確認

Sheth - Tormen mass function

理論モデル

$$\frac{dn(M)}{dM} = A \frac{1}{Mv} \frac{dv}{dM} \rho_M \left( 1 + \frac{1}{av^{0.3}} \right) \left( \frac{av}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{e^{-\frac{av}{2}}}{\sqrt{\pi}}$$

$$\rho_M = \Omega_m \rho_c = 0.279 \times 2.775 \times 10^{11} [h^2 M_{sun} Mpc^{-3}]$$

$$\delta_c = 1.69$$

$$v = \left( \frac{\delta_c}{\sigma} \right)^2$$

$$A = 0.322, \quad a = 0.707$$



# 相関関数の計算

観測では銀河の特異速度によって視線方向に変形を受ける。

small-scale : Finger-of-God

引き延ばされる

Large-scale : Kaiser効果

押しつぶされる

# 赤方偏移変形の効果

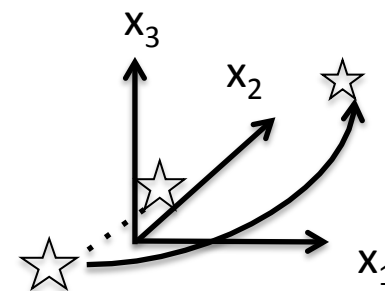
視線方向を $x_3$ 方向とし、ハローの座標を変える。

$$S_z = x_3 + v_z/aH(z)$$

$$H(z) \cong H_0 \sqrt{(1+z)^3 \Omega_m + \Omega_\Lambda}$$

境界条件

- ◎  $500\text{Mpc} < x_3$   
→  $x_3 - 500$
- ◎  $x_3 < 0$   
→  $500 + x_3$



# 相関関数の計算

粒子数を増やし、  
統計的にエラーを少なくする。

Landy & Szalay (1993)

$$\xi(s) = \frac{DD - 2DR + RR}{RR}$$

DD: 銀河と銀河のペアの数  
RR: ランダムとランダムのペアの数  
DR: 銀河とランダムのペアの数

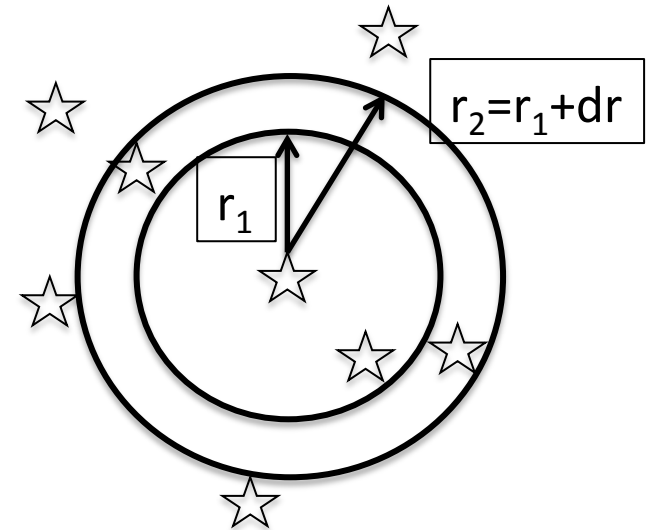
シミュレーションと同じ体積内に、  
ハローの約10倍のランダム分布を発生させる。



RR: ランダムとランダムのペアの数  
DD: 銀河と銀河のペアの数  
DR: 銀河とランダムのペアの数 をそれぞれ計算



銀河の数を $n$ 、ランダムの数を $m$ として、  
 $n(n-1)/2$ ,  $m(m-1)/2$ ,  $nm$ でそれぞれ規格化する。

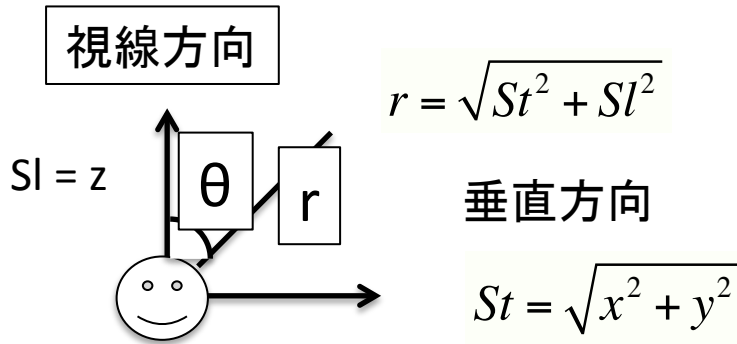


# Legendre展開 $\xi_0$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_4$

シミュレーション

bin ( $dr=2.0\text{Mpc}, d\cos\theta(d\mu)=0.01$ )

$$\mu = \cos\theta = \frac{Sl}{r}$$



<結果>

$$\xi_g^{(s)} = \frac{1}{(2\pi)^3} \int d\mathbf{k} (1 + \beta\mu^2)^2 P_g^{(r)}(k) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}}$$

$$= \xi_0^{(s)}(x) P_0(\mu) + \xi_2^{(s)}(x) P_2(\mu) + \xi_4^{(s)}(x) P_4(\mu)$$

$$P_0 = 1$$

$$P_2 = \frac{1}{2}(3\mu^2 - 1)$$

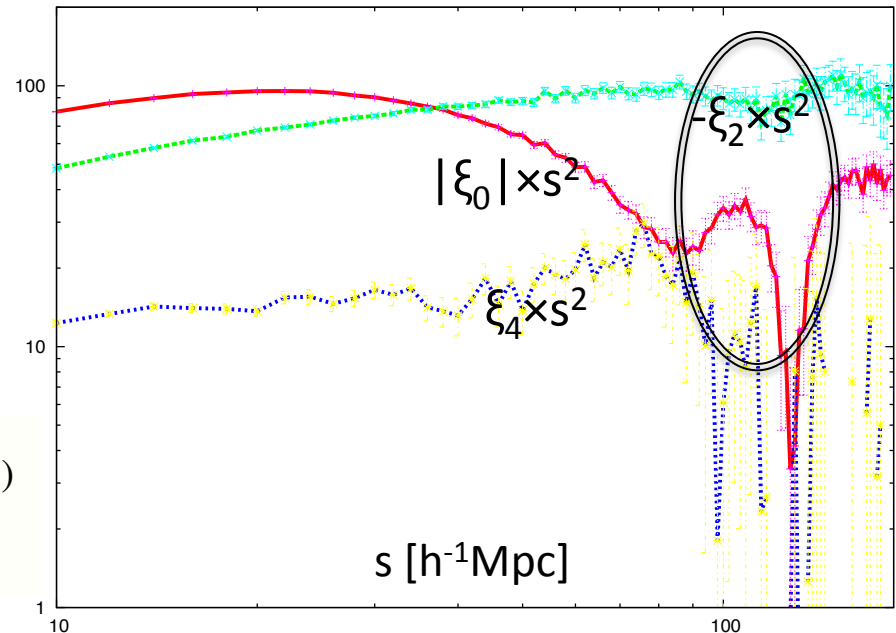
$$P_4 = \frac{1}{8}(35\mu^4 - 30\mu^2 + 3)$$

積分

$$2 \int_0^1 P_n(\mu) P_m(\mu) d\mu = \begin{cases} \frac{2}{2n+1} & (m=n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases}$$

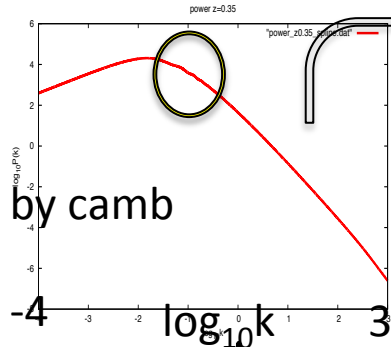
$\xi_l(s) \times s^2$

100回平均



# 理論モデル $\xi_0, \xi_2, \xi_4$

$\log_{10} P(k)$



赤方偏移効果

$b=1.64$

$$\begin{pmatrix} P_0(k) \\ P_2(k) \\ P_4(k) \end{pmatrix} = P'_m(k) \begin{pmatrix} b^2 + \frac{2}{3}bf + \frac{1}{5}f^2 \\ \frac{4}{3}bf + \frac{4}{7}f^2 \\ \frac{8}{35}f^2 \end{pmatrix}$$

$$f \approx \Omega_m^{4/7}(z) + \frac{\Omega_\Lambda(z)}{70} \left( 1 + \frac{\Omega_m(z)}{2} \right) = 0.67 \quad (z=0.35)$$

BAOを抑制する効果

$$P_m(k) = [P_{\text{lin}}(k) - P_{\text{smooth}}(k)]e^{-k^2 \Sigma_{\text{nl}}^2 / 2} + P_{\text{smooth}}(k)$$

Eisenstein et al. 2007

$P_{\text{lin}}$ : cambのデータ

$P_{\text{smooth}}$ : no-wiggleモデル

Eisenstein & Hu 1997

# 理論モデル $\xi_0$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_4$

$$\xi_\ell(s) = i^\ell \int \frac{dk}{k} \Delta_\ell^2(k) j_\ell(ks) \quad \Delta_\ell^2 \equiv k^3 P_\ell(k) / (2\pi^2)$$

spline補間



積分

$j_0(ks) = (ks)^{-1} \sin(ks)$  球Bessel関数

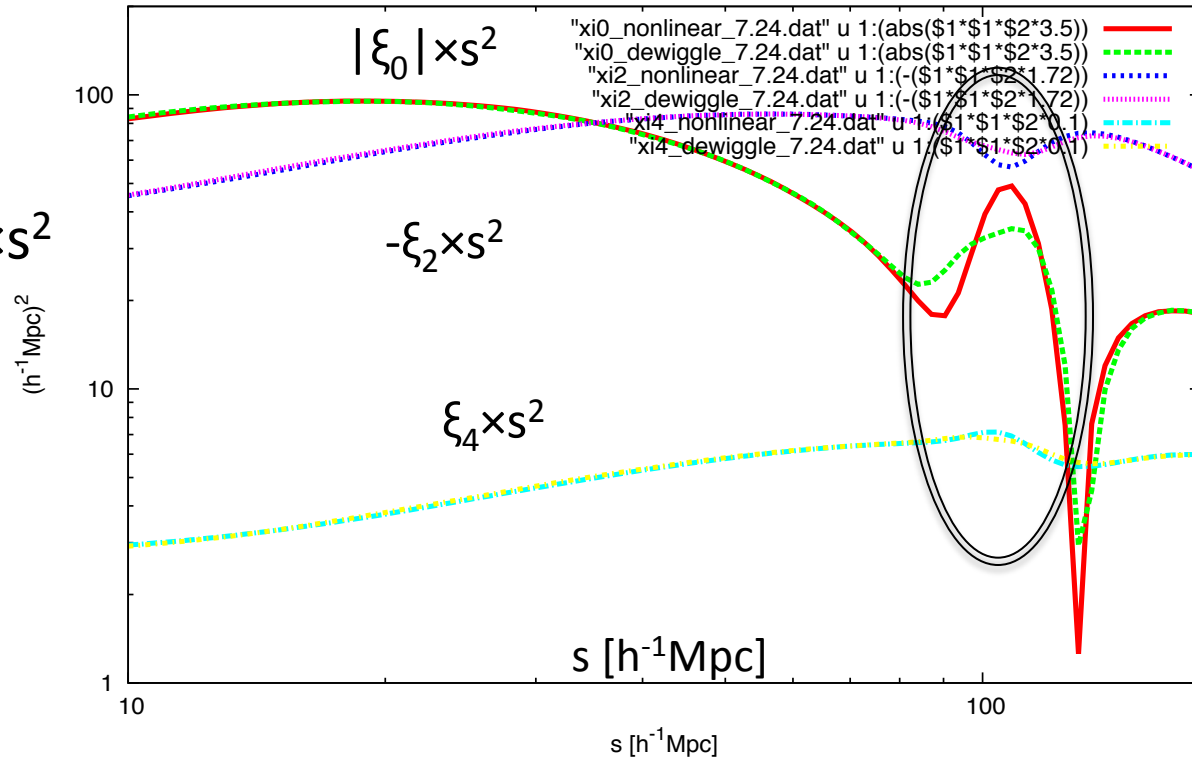
$$j_2(ks) = (ks)^{-3} \left[ (3 - (ks)^2) \sin(ks) - 3ks \cos(ks) \right]$$

$$j_4(ks) = (ks)^{-5} \left[ (105 - 45(ks)^2 + (ks)^4) \sin(ks) - (ks)(105 - 10(ks)^2) \cos(ks) \right]$$

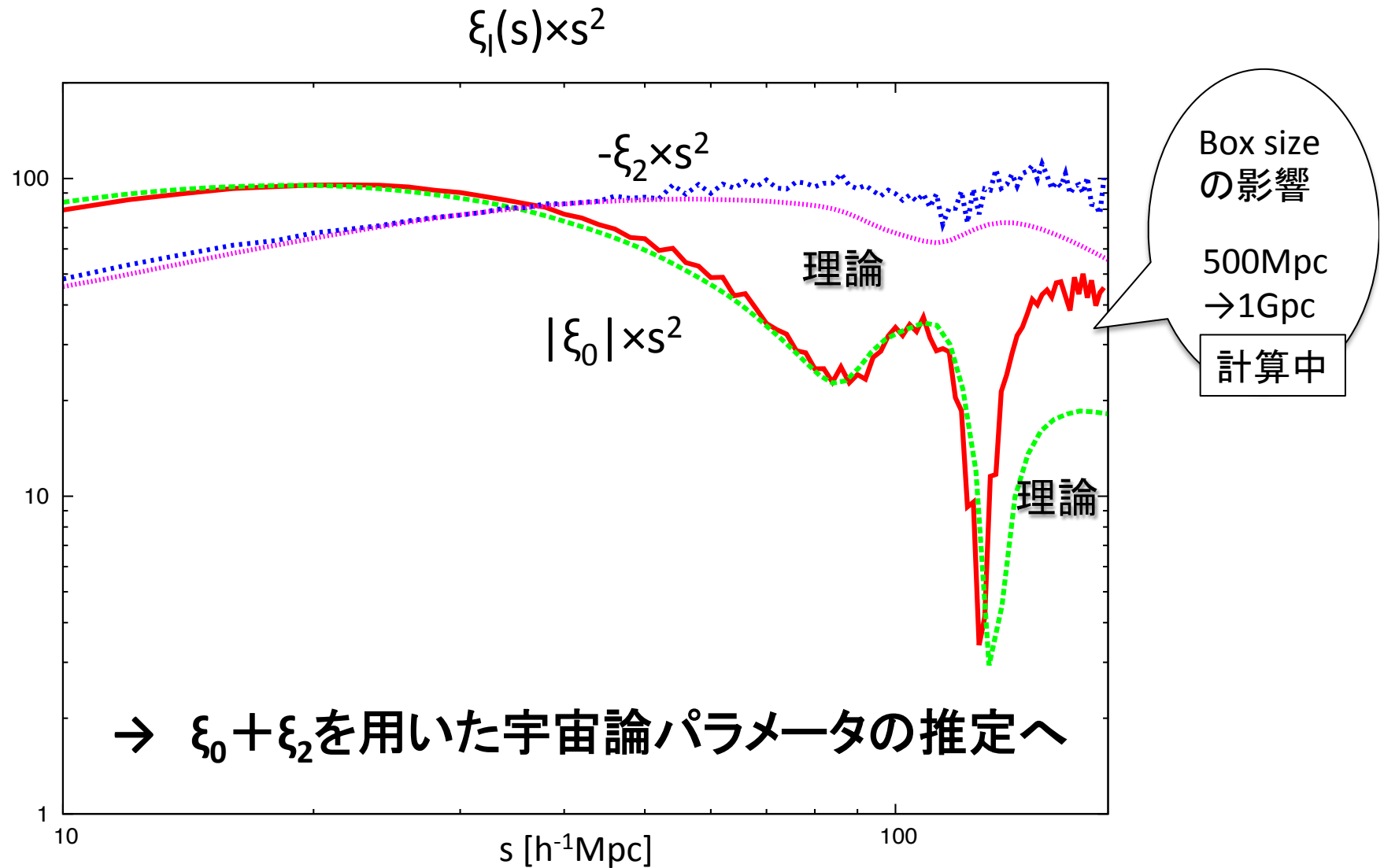
camb and dewiggle(sigma=8), b=1.64

<結果>

$$\xi_\ell(s) \times s^2$$



# 相関関数の計算 理論とシミュレーションの比較



# まとめと今後

- 赤方偏移銀河サーベイは、非等方な赤方偏移変形をする為、2点相関関数も非等方性を考える必要がある。
- N体シミュレーションを繰り返し、Legendre展開した2点相関関数  $\xi_0$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_4$ を計算した。
- 一方、赤方偏移変形、非線形効果を考慮した理論式を計算した。
- 理論とシミュレーションを比較し、BAOを検出した。
- $\xi_0$ 、 $\xi_2$ によって宇宙論パラメータへ制限をつける。
- selection functionを用いて、mock sample(擬似観測サンプル)を作成する。