

# 夏の学校講演

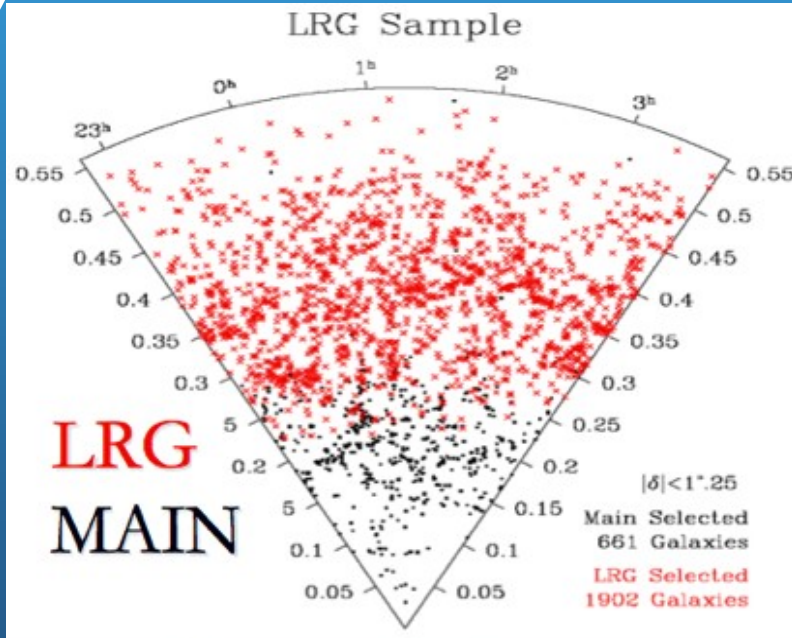
非等方相関関数を用いたSDSSのLRG  
データ解析と宇宙論パラメータの制限

Okumura T., et al. 2008, ApJ, 676, 889

名古屋大学 M1 片岡 明日香

2011/8/2 17:15-17:30

# Introduction



$0.16 < z < 0.47$   
46,760個のLRGサンプル

LRG : Luminous Red Galaxies  
明るく赤い銀河



SDSS:  
Sloan Digital Sky Survey

- ・口径2.5mの望遠鏡
- ・可視の5バンドで測光
- ・アメリカニューメキシコ州

バリオン音響振動 (BAO)

赤方偏移変形, 幾何学的変形

非等方相関関数

- ・理論
- ・観測
- ・比較

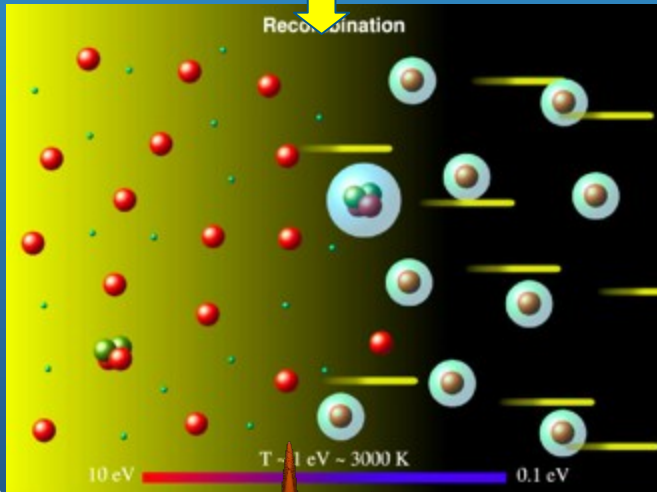
宇宙論パラメーターの制限

- ・統計的手法
- ・結果

# バリオン音響振動

# バリオン音響振動

宇宙の  
晴れ上がり



バリオン・光子混合流体の音速  $C_s$

$$C_s^2 = \left( \frac{\partial p}{\partial (\rho / c^2)} \right)_s = \frac{c^2}{3} \left( 1 + \frac{3 \rho_b}{4 \rho_r} \right)^{-1}$$

サウンドホライズンスケール

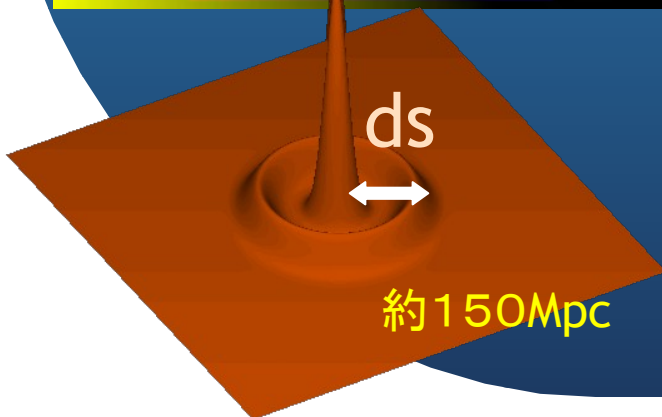
$$\begin{aligned} d_s(t_{rec}) &= \int_0^{t_{rec}} \frac{C_s}{a} dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{3(1 + 3\rho_b/4\rho_r)}} \frac{2c}{H_0 \sqrt{\Omega_m}} (1 + z_{rec})^{-1/2} \end{aligned}$$

$$3\rho_b/4\rho_r = 3.0 \times 10^4 \Omega_b h^2 / (1 + z)$$

$$d_s(a_{rec}) \approx 144.4 \left( \frac{\Omega_m h^2}{0.14} \right)^{-0.252} \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.024} \right)^{-0.083} \quad (Mpc)$$

$$\approx 150 Mpc$$

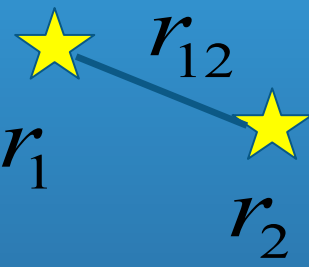
$$\approx 100 h^{-1} Mpc$$



# バリオン音響振動

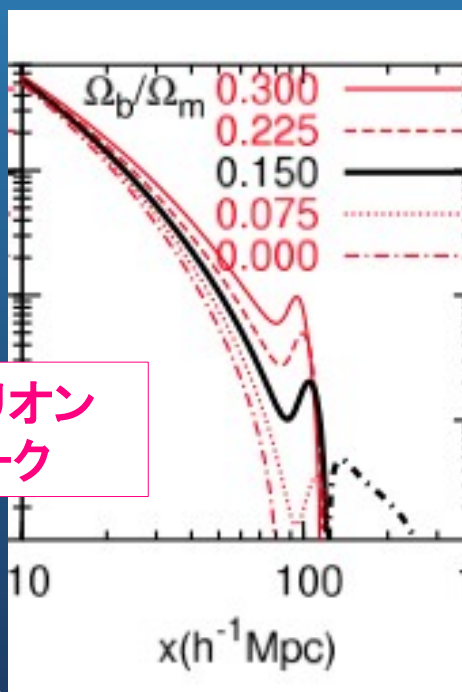
## 相関関数

$$\xi(r_{12}) \equiv \langle \delta(r_1) \delta(r_2) \rangle$$



密度ゆらぎ

$$\delta(\vec{r}) \equiv \frac{\rho(\vec{r}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$$

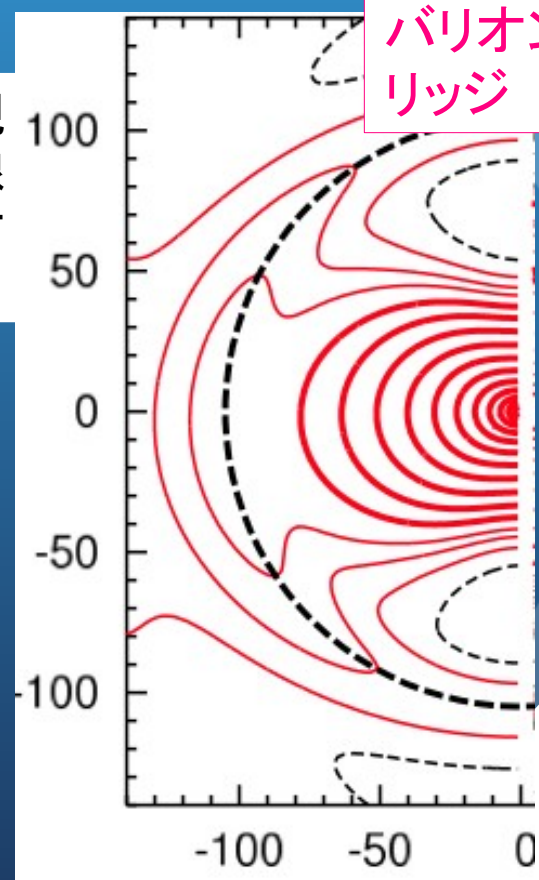


バリオン  
ピーク

## 非等方相関関数

視線方向

2次元



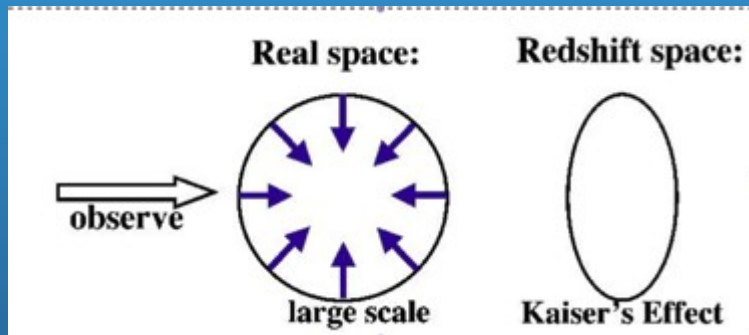
バリオン  
リッジ

垂直方向  $h^{-1} \text{Mpc}$

# 変形の効果

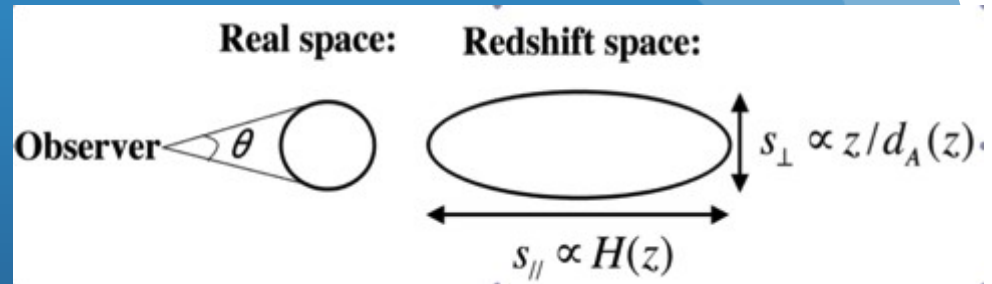
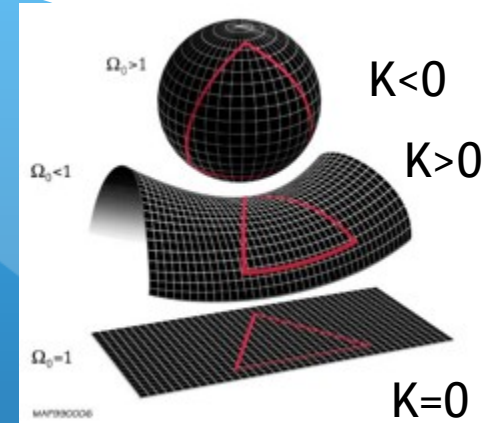
# 変形の効果

## 赤方偏移変形



銀河の特異速度によって  
視線方向に変形を受ける。

## 幾何学的変形



視線方向:  $H(z)$   
垂直方向:  $d_A$  (角径距離) に依存する。

$$d_A = S_K[x(z)] / (1+z)$$

## 宇宙論パラメータに依存

$$\Omega_m (= 1 - \Omega_{DE}), \Omega_b, h, n_s, w, \sigma_8, b$$

$$S_K(x) \equiv S_K[x(z)] = \begin{cases} \frac{\sinh(\sqrt{-K}x)}{\sqrt{-K}} & K < 0 \\ x & K = 0 \\ \frac{\sin(\sqrt{K}x)}{\sqrt{K}} & K > 0 \end{cases}$$

# 非等方相関関数



# 非等方相関関数 理論

実空間の相関関数



変形の効果を考慮した赤方偏移空間の相関関数  $\xi(k)$

$$\xi(z_1, z_2, \theta) = D(z_1)D(z_2)b(z_1)b(z_2) [\xi^{(0)}(z_1, z_2, \theta) + \beta(z_1)\xi^{(1)}(z_1, z_2, \theta) + \beta(z_2)\xi^{(1)}(z_1, z_2, \theta) + \beta(z_1)\beta(z_2)\xi^{(2)}(z_1, z_2, \theta)]$$

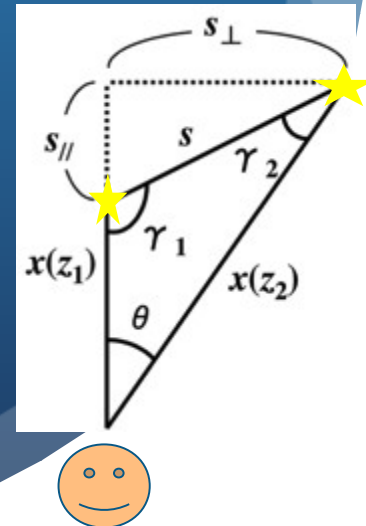
$D(z)$ : ゆらぎの線形成長率

$b(z)$ : 赤方偏移依存する線形バイアスパラメータ

$f = b(z)$ : 赤方偏移変形因子

$$f \equiv \frac{1}{H} \frac{d \ln D}{dt} = \frac{d \ln D}{d \ln a}$$

: 無次元化した成長モードの線形成長率



# 非等方相関関数 観測

## 相関関数の測定

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

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

## 銀河と銀河の共動間隔 $s$

視線方向

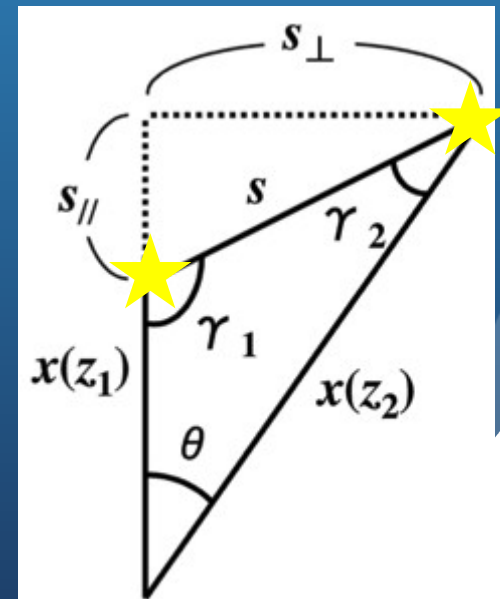
$$s_{\parallel} = x(z_2) \cos \theta - x(z_1),$$

垂直方向

$$s_{\perp} = x(z_2) \sin \theta.$$

## 銀河までの共動距離 $x(z)$

$\Omega_m=0.3, \Omega_\Lambda=0.7$ の平坦宇宙  
を仮定して計算



# 非等方相関関数 観測

## 共分散行列

誤差を見積もる

## 擬似カタログの作成

↓ (CMBfast, 2LPTコード)

l番目の擬似カタログ

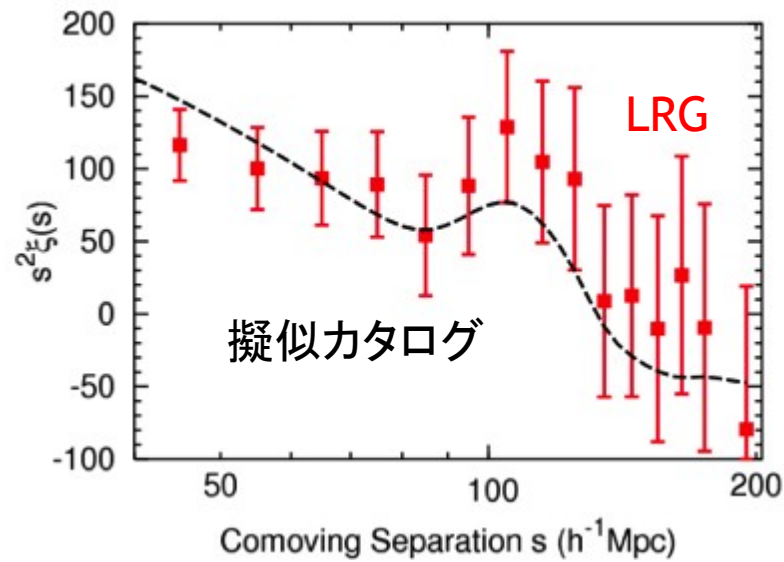
全カタログの平均

$$(\mathbf{C})_{ij} \equiv \text{Cov}(\xi_i, \xi_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (\xi_i^l - \bar{\xi}_i)(\xi_j^l - \bar{\xi}_j),$$

i番目、j番目のビン

擬似カタログの数 (2500個)

■ : 角度平均したLRGの相関関数  
誤差棒 : 共分散行列の対角成分  
---- : 擬似カタログから計算した相関関数の平均値



# 非等方相関関数 理論+観測

## 相関関数の比較

### 理論

ある宇宙論パラメータセットを与えたときに  
解析公式から得られた赤方偏移空間相関関数

$\Omega_m=0.3, \Omega_\Lambda=0.7$ の  
平坦宇宙を仮定

実空間空間相関関数

### 観測

LRGサンプルから測定した赤方偏移空間相関関数

$\Omega_m=0.3, \Omega_\Lambda=0.7$ の  
平坦宇宙を仮定

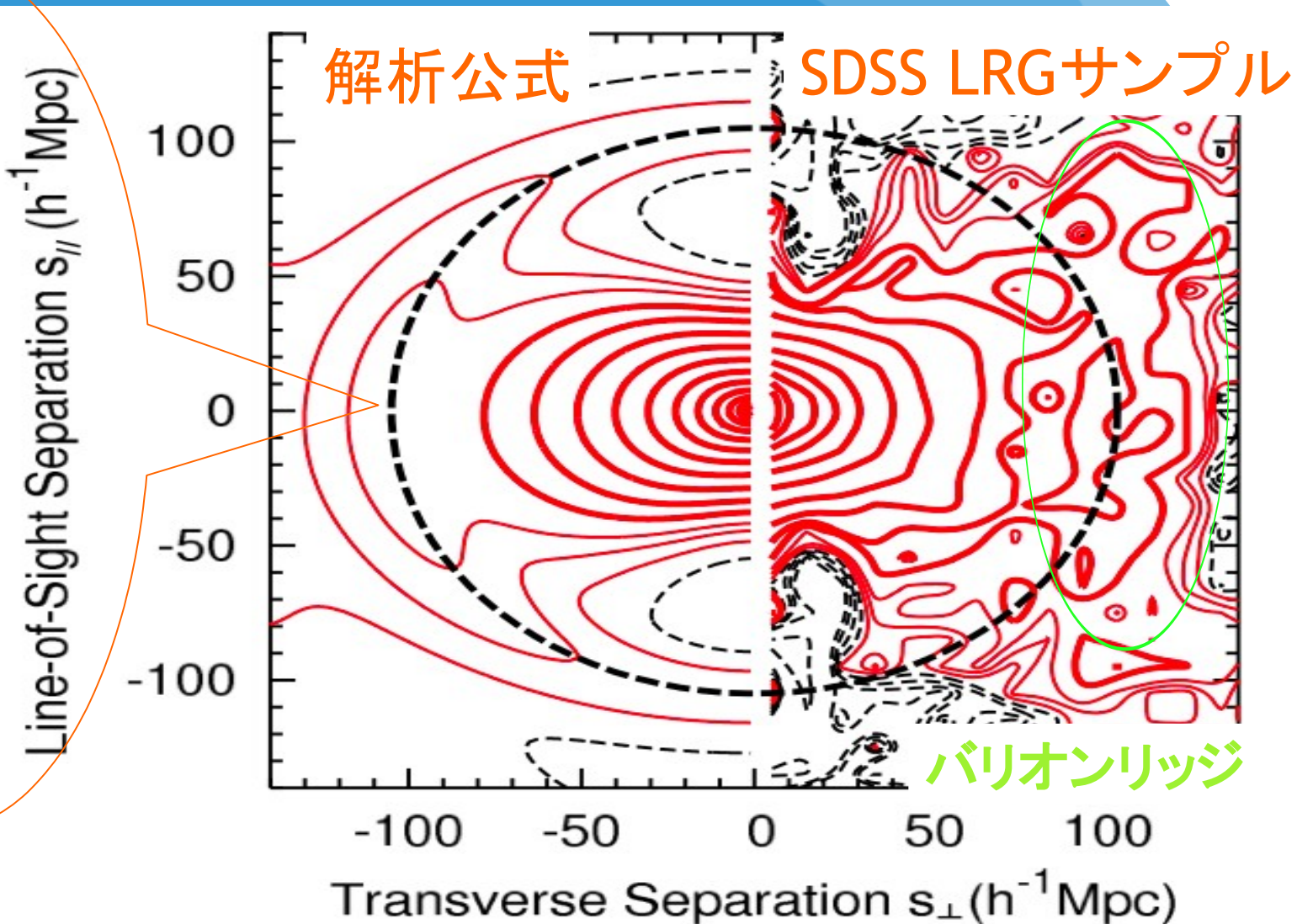
実空間空間相関関数

比較

# 非等方相関関数 理論+観測

ある宇宙  
パラメータ  
を仮定

$\Omega_m$   
 $\Omega_b$   
 $h$   
 $\sigma_8$   
 $b$   
 $w$   
 $ns$



# 宇宙論パラメータの制限

# 宇宙論パラメータの制限

## x2統計量

7次元パラメータ空間  $\Omega_m (= 1 - \Omega_{\text{DE}}), \Omega_b, h, n_s, w, \sigma_8, b$

x2乗  
統計量

$$\chi^2(\vec{\theta}) = \sum_{i,j}^{N_{\text{bin}}} (\xi_i^{\text{obs}} - \xi_i^{\text{model}}(\vec{\theta})) [\text{Cov}(\xi_i, \xi_j)]^{-1} (\xi_j^{\text{obs}} - \xi_j^{\text{model}}(\vec{\theta}))$$

$\theta$ : 宇宙論パラメータセット

## 確率分布関数

M次元

$$P[\vec{\theta}|\vec{d}] = \frac{\exp(-\chi^2(\vec{\theta})/2)}{\int \dots \int_{-\infty}^{\infty} d^M \theta \exp(-\chi^2(\vec{\theta})/2)}$$

積分

2次元

$$P[\theta_i, \theta_j|\vec{d}] = \int \dots \int_{-\infty}^{\infty} d\theta_1 \dots d\theta_{i-1} d\theta_{i+1} \dots d\theta_{j-1} d\theta_{j+1} \dots d\theta_M P[\vec{\theta}|\vec{d}]$$

積分

1次元

$$P[\theta_i|\vec{d}] = \int_{-\infty}^{\infty} d\theta_j P[\theta_i, \theta_j|\vec{d}]$$

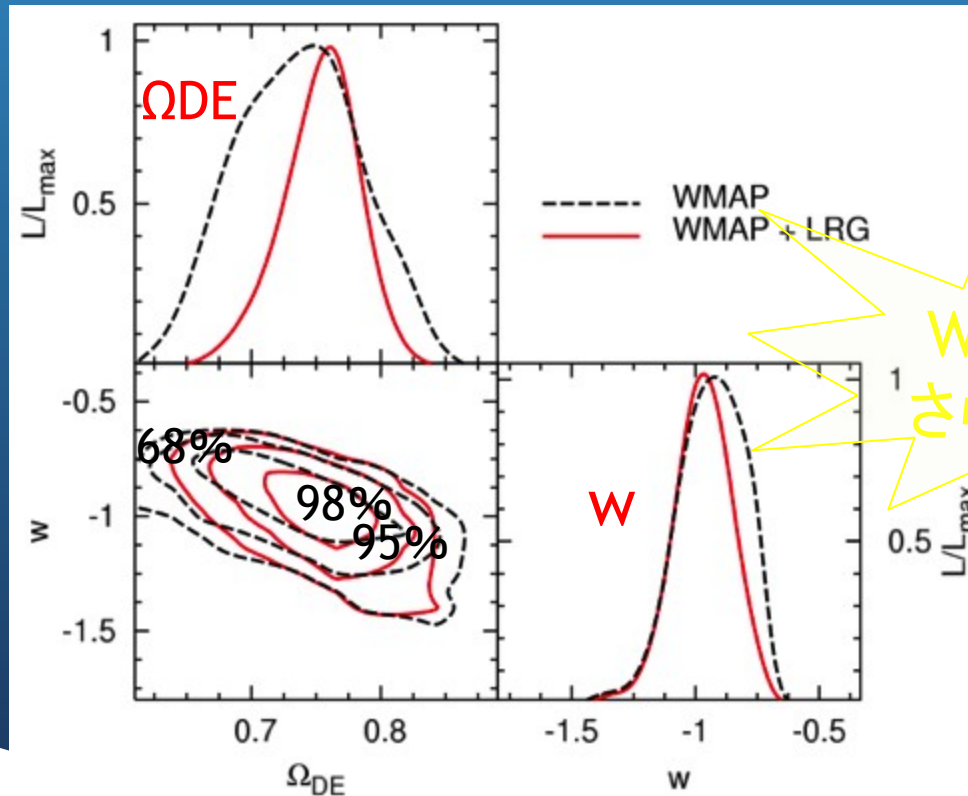
# 宇宙論パラメータの制限

確率分布関数

$$\theta = (\Omega_{DE}, w, h, n_s, \sigma_8, b) \quad \text{積分}$$

固定  $\Omega_b h^2 = 0.024, \Omega_K = 0$

事前確率分布に  
WMAP3yr  
を用いると…



WMAP 3yrへ  
さらなる制限



# 宇宙論パラメータの制限のまとめ

Parameter	LRG only		LRG(40 < s < 200)	積分	固定
	40 < s < 200	60 < s < 160	+WMAP3	Marginalized	Fixed
$\Omega_m$	$0.218^{+0.047}_{-0.037}$	$0.208^{+0.069}_{-0.055}$	$0.240^{+0.019}_{-0.025}$	$\Omega_b, h, n_s, \sigma_8, b$	$w$
$\Omega_b$	$0.0473^{+0.0157}_{-0.0160}$	$0.0462^{+0.0253}_{-0.0208}$	$0.0414^{+0.0023}_{-0.0024}$	$\Omega_m, h, n_s, \sigma_8, b$	$w$
$h$	$0.702^{+0.187}_{-0.117}$	$0.656^{+0.220}_{-0.120}$	$0.718^{+0.023}_{-0.020}$	$\Omega_m, \Omega_b, n_s, \sigma_8, b$	$w$
$n_s$	$1.122^{+0.152}_{-0.183}$	$1.030^{+0.144}_{-0.189}$	$0.947^{+0.016}_{-0.015}$	$\Omega_m, \Omega_b, h, \sigma_8, b$	$w$
$\sigma_8$	$0.660^{+0.289}_{-0.216}$	$0.728^{+0.471}_{-0.359}$	$0.736^{+0.050}_{-0.062}$	$\Omega_m, \Omega_b, h, n_s, b$	$w$
$\Omega_{DE}$	$0.770^{+0.051}_{-0.040}$	$0.786^{+0.060}_{-0.061}$	$0.772^{+0.024}_{-0.033}$	$h, n_s, w, \sigma_8, b$	$\Omega_b h^2$
$w$	$-0.93^{+0.45}_{-0.35}$	$-1.07^{+0.49}_{-0.46}$	$-0.97^{+0.12}_{-0.11}$	$\Omega_{DE}, h, n_s, \sigma_8, b$	$\Omega_b h^2$
$\Omega_m$	$0.235^{+0.040}_{-0.037}$	—	—	$h, \sigma_8, b$	$\Omega_b h^2, n_s, w$
$\Omega_m h^2$	$0.123^{+0.048}_{-0.032}$	—	—	$h, \sigma_8, b$	$\Omega_b h^2, n_s, w$

# 角度平均相関関数と非等方相関関数

Eisenstein et al, 2005

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

角度平均

非等方

Parameter	LRG only		LRG ( $40 < s < 200$ )		
	$40 < s < 200$	$60 < s < 160$	+WMAP3	Marginalized	Fixed
$\Omega_m$	$0.218^{+0.047}_{-0.037}$	$0.208^{+0.069}_{-0.055}$	$0.240^{+0.019}_{-0.025}$	$\Omega_b, h, n_s, \sigma_8, b$	$w$
$\Omega_b$	$0.0473^{+0.0157}_{-0.0160}$	$0.0462^{+0.0253}_{-0.0208}$	$0.0414^{+0.0023}_{-0.0024}$	$\Omega_m, h, n_s, \sigma_8, b$	$w$
$h$	$0.702^{+0.187}_{-0.117}$	$0.656^{+0.220}_{-0.120}$	$0.718^{+0.023}_{-0.020}$	$\Omega_m, \Omega_b, n_s, \sigma_8, b$	$w$
$n_s$	$1.122^{+0.152}_{-0.183}$	$1.030^{+0.144}_{-0.189}$	$0.947^{+0.016}_{-0.015}$	$\Omega_m, \Omega_b, h, \sigma_8, b$	$w$
$\sigma_8$	$0.660^{+0.289}_{-0.216}$	$0.728^{+0.471}_{-0.359}$	$0.736^{+0.050}_{-0.062}$	$\Omega_m, \Omega_b, h, n_s, b$	$w$
$\Omega_{DE}$	$0.770^{+0.051}_{-0.040}$	$0.786^{+0.060}_{-0.061}$	$0.772^{+0.024}_{-0.033}$	$h, n_s, w, \sigma_8, b$	$\Omega_b h^2$
$w$	$-0.93^{+0.45}_{-0.35}$	$-1.07^{+0.49}_{-0.46}$	$-0.97^{+0.12}_{-0.11}$	$\Omega_{DE}, h, n_s, \sigma_8, b$	$\Omega_b h^2$