

Detection Of The Baryon  
Acoustic Peak In The Large Scale  
Correlation Function Of SDSS  
Luminous Red Galaxies

Eisenstein et al 2005


2点相関関数からのバリオン音響ピークの  
発見と宇宙モデル

東北大学理学研究科天文学専攻

M1 望月 悠紀

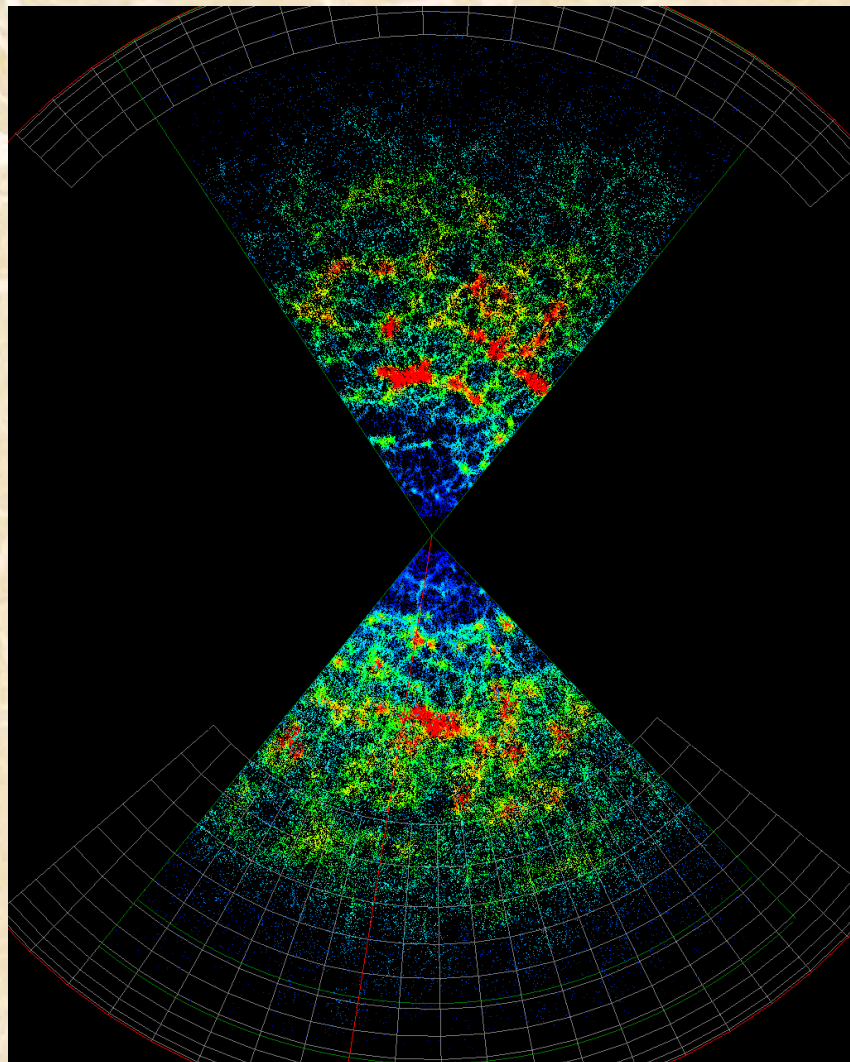
# 今日の話

- バリオン音響ピークとは
- バリオン音響ピークの観測
- バリオン音響ピークからわかること
- バリオン音響ピークの未来



導入

# バリオン音響ピークとは！？



2dF 銀河赤方偏移サーベイ

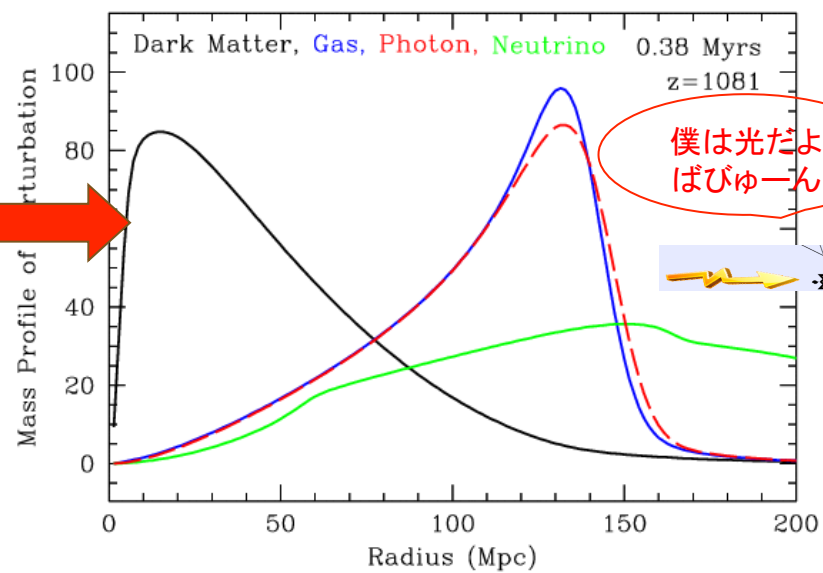
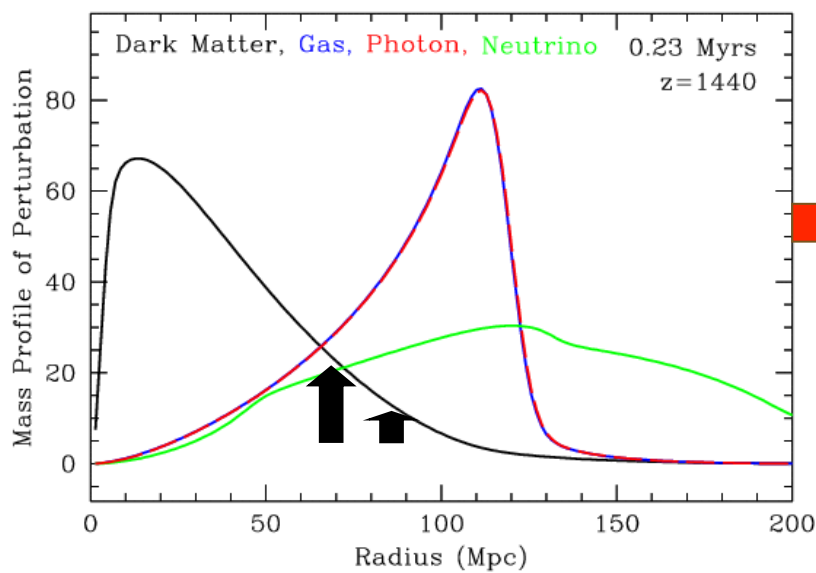
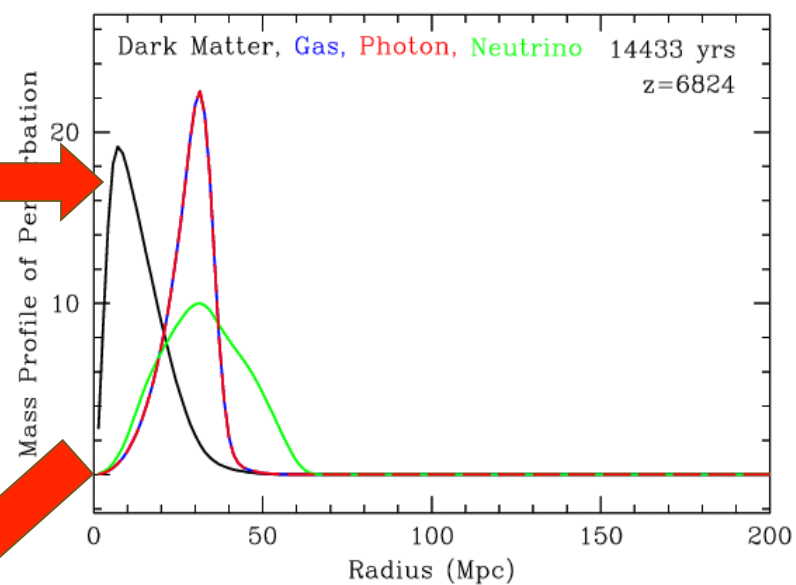
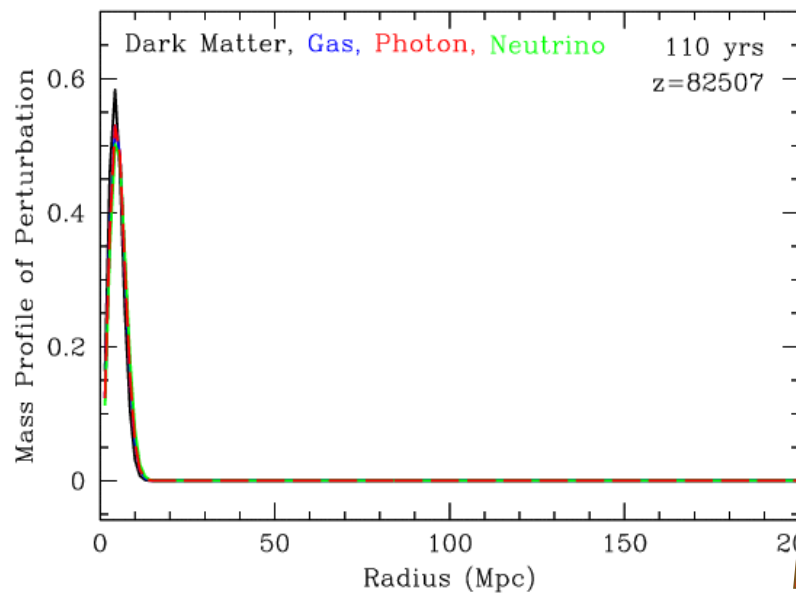
- 銀河がたくさん
- 普通の銀河分布に見えるが.....
- 宇宙論は、この銀河分布にとんでもない特徴があることを予言する。

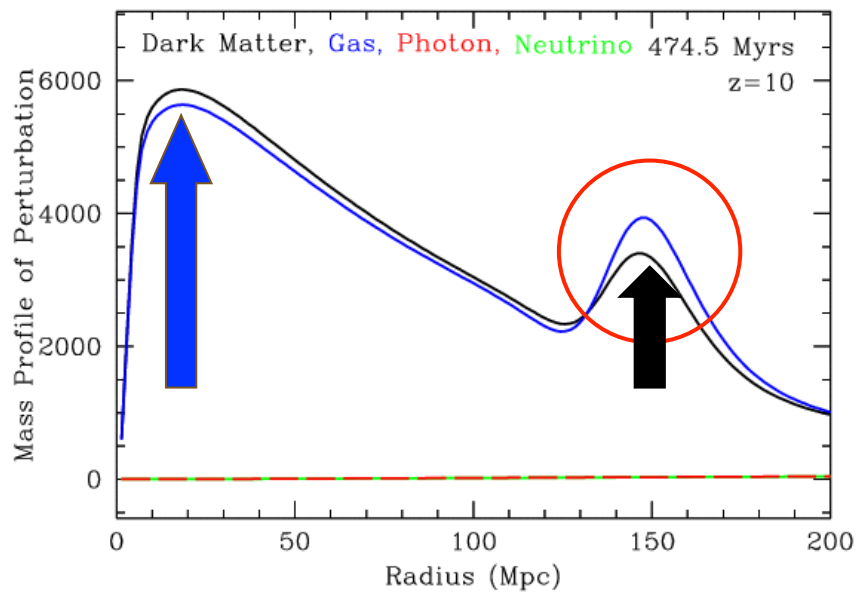
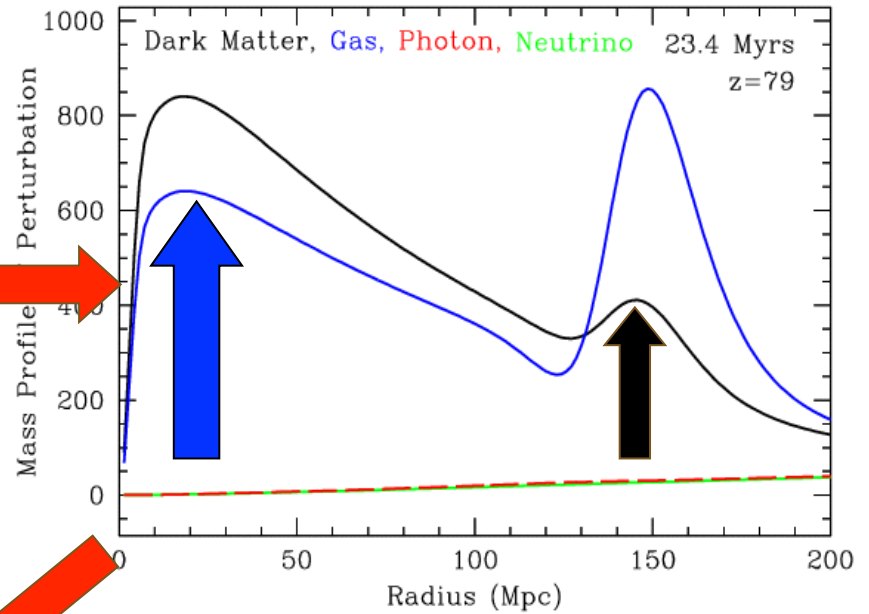
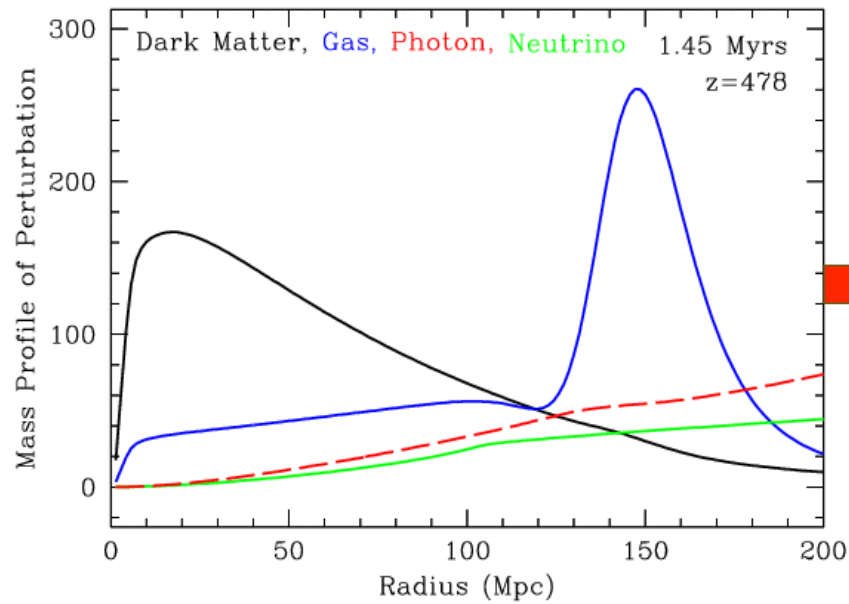
## バリオン音響ピーク

100~150Mpcのスケールで銀河の個数がわずかに増加。

- どうしてそんなことが？  
インフレーション後からの宇宙を考える。

# 各スケールにおける質量プロファイル





Baryon Acoustic Peak!!

質量がたくさん集まるところができる

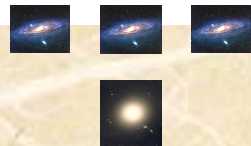
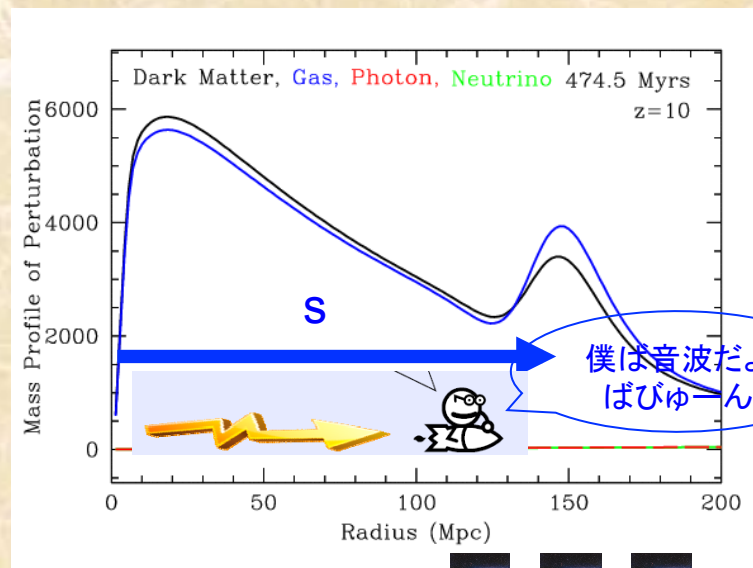
銀河分布に影響

協力: Eisenstein さん



# バリオン音響ピークを定量的に観測したい！

- どのような観測をすればいいのか？？



ピークには、重い、つまり**明るい楕円銀河**が集まってくるだろう。

—>ピークの特徴的な形を見たいから、**明るくて赤い銀河の集まり**具合を観測！

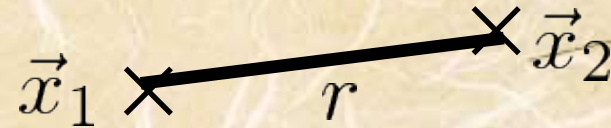
**集まり具合**を見るためには、できるだけ多くの銀河の配置を、統計的に調べる必要がある！

—>Large Scaleを観測

...集まり...具合??

# 銀河の集まり具合？ → 相関関数 $\xi$

- 2点相関関数  $\xi(r)$  ?



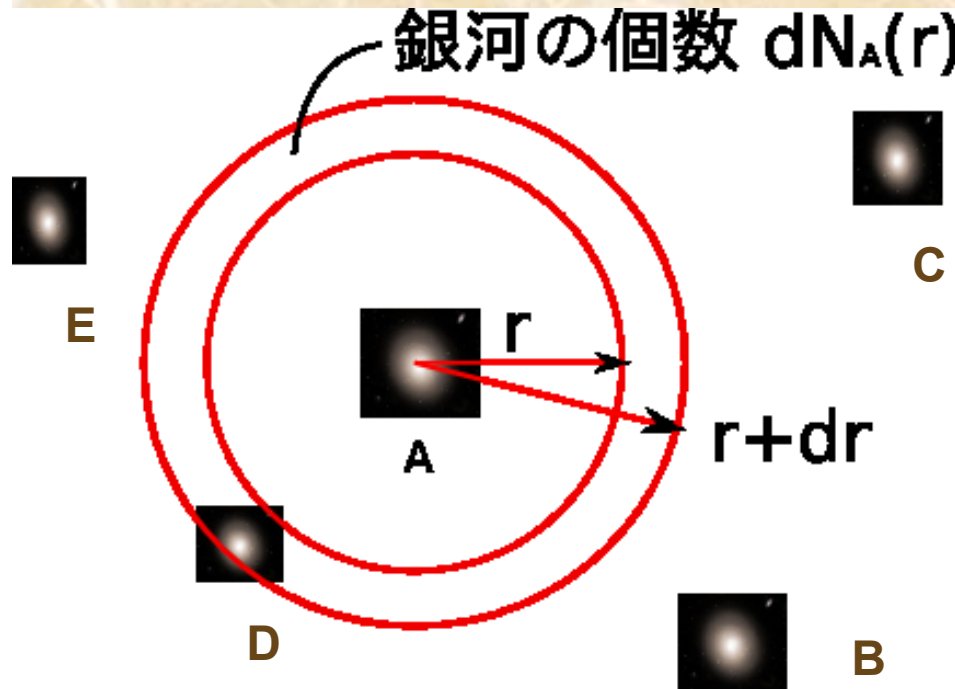
$$P(\vec{x}_1, \vec{x}_2)d^3x_1d^3x_2 = \bar{n}^2(1 + \xi(r))d^3x_1d^3x_2$$

- 距離  $r$  の銀河の対の数が完全なランダム分布よりどれくらい多いかを表す。
- 例:  $\xi(r) = 0$  → 銀河の集まりはランダム分布
- $\xi(r) > 0$  → 銀河の集まりはランダム分布より多い
- $\xi(r) < 0$  → 銀河の集まりはランダム分布より少ない

⇒ いろんな  $r$  に対して、相関関数  $\xi(r)$  を計算。  
⇒ 銀河はどのような集まり方をするかが見えてくる！



# 2点相関関数 $\xi(r)$ の計算



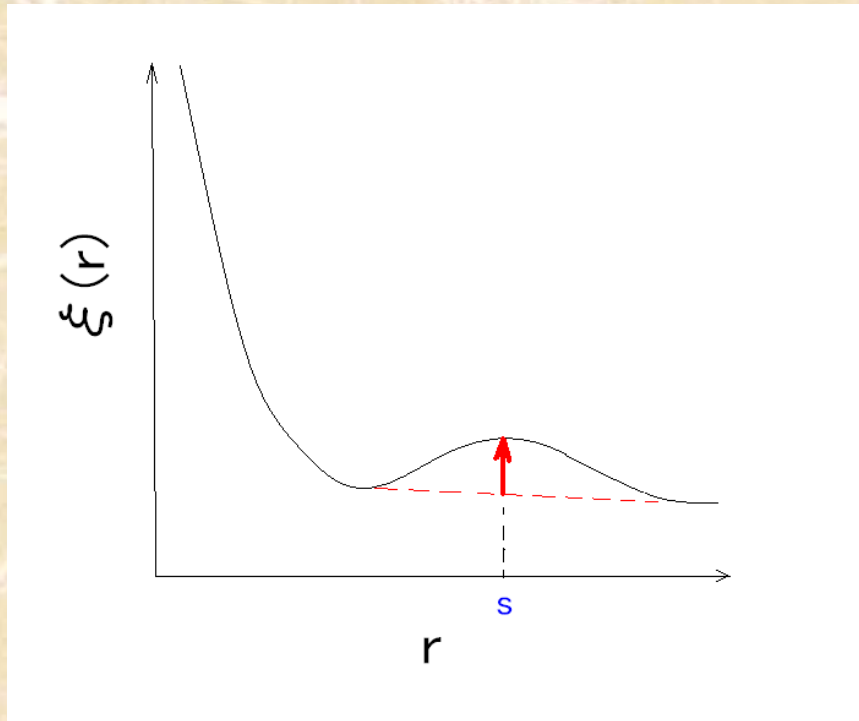
## 2点相関関数の計算方法

- ある銀河Aに着目し、Aからの距離が  $r$  と  $r + dr$  の間にある銀河の数  $N_A$  を数える。
- 他の銀河B、C...に対しても同様に繰り返し、平均値  $\overline{dN}$  を計算する。
- 関係式

$$\overline{dN} = 4\pi\bar{n}r^2dr(1 + \xi(r))$$

から、各  $r$  に対する  $\xi(r)$  が求まる。

# バリオン音響ピークを観測して何が嬉しいか

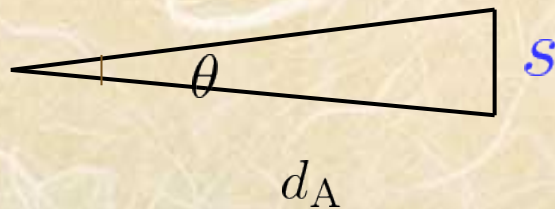


- 重力不安定性による線形理論の検証
- 宇宙論パラメータの推定
  - 音響ピークの盛り上がり具合  $\rightarrow \Omega_m h^2$
  - $\rightarrow$  音響スケール  $s$  がわかる
  - $\rightarrow$  角径距離  $d_A$  がわかる。

$$s \sim \frac{44.5 \ln(9.83/\Omega_m h^2)}{\sqrt{1 + 10(\Omega_b h^2)^{3/4}}} \text{ Mpc}$$

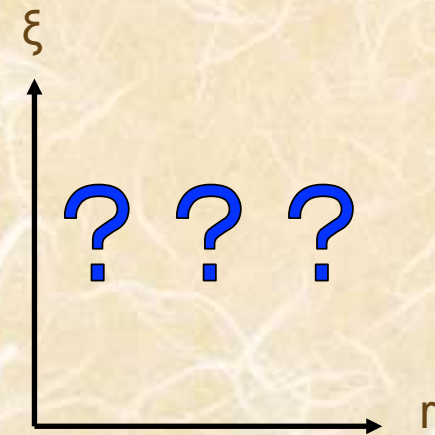
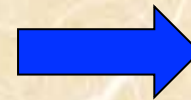
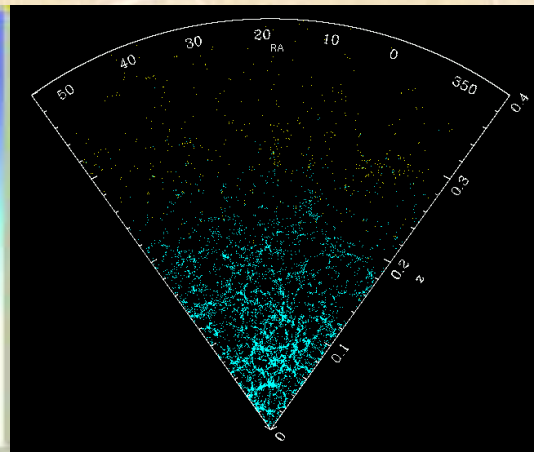
$$d_A = \frac{c}{H_0(1+z)\sqrt{|\Omega_K|}} \begin{cases} \sinh(\sqrt{\Omega_K}\chi(z)) & \Omega_K > 0 \\ \sin(\sqrt{-\Omega_K}\chi(z)) & \Omega_K < 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow \Omega_K, \Omega_\Lambda, H_0, w$$

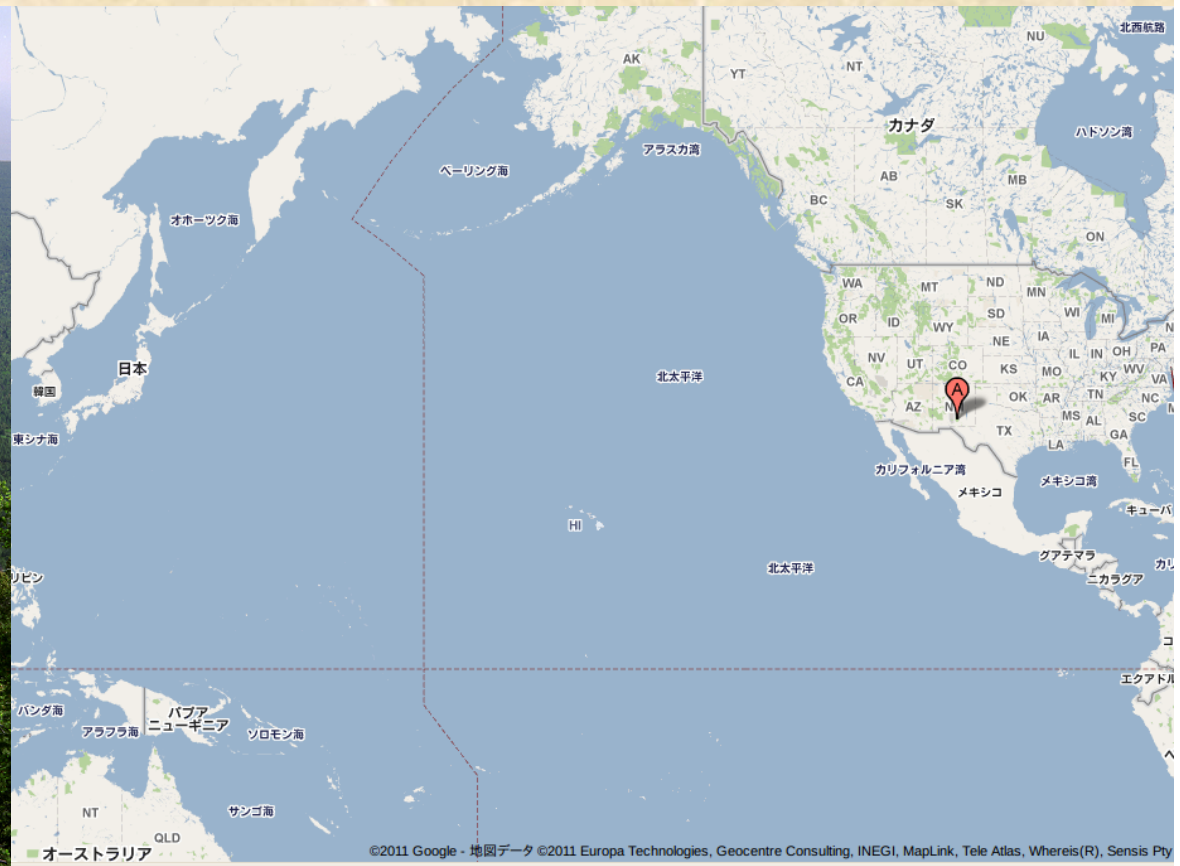
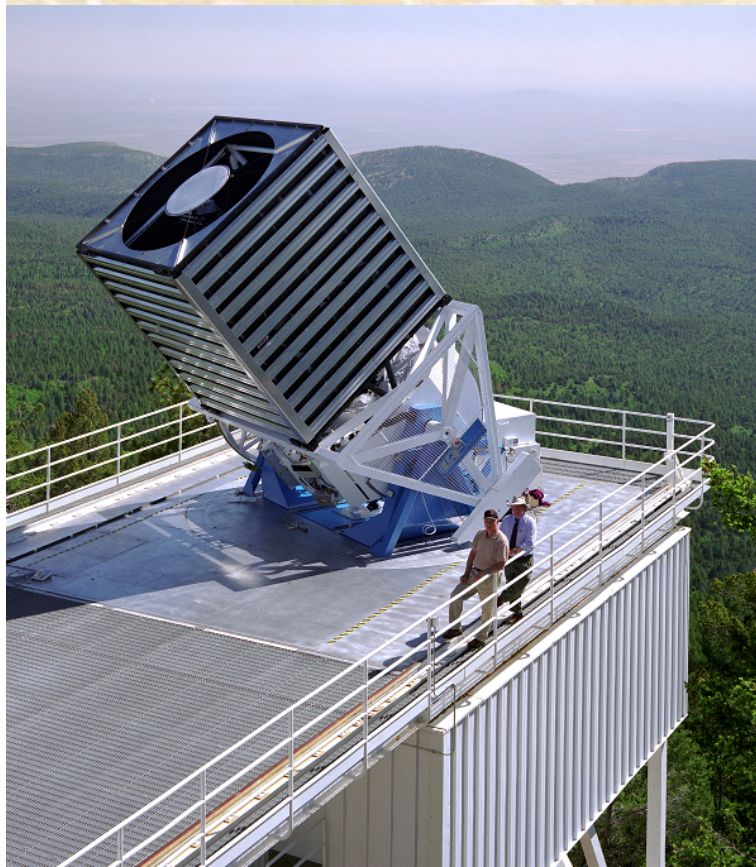


# 観測

- バリオン音響ピーク発見のため.....
  - できるだけ広いスケールで、
  - できるだけ多くの、明るくて赤い銀河の位置を観測し、
  - 2点相関関数のグラフを作成せよ！！



# Sloan Digital Sky Survey



Apache Point Observatory  
口径2.5m ドームなし 満月30個分の視野  
一度に640個の天体の分光が可能

# Data

- Luminous **Red** Galaxies 46748個の分布

- 赤方偏移  $0.16 < z < 0.47$

- 観測領域 3816平方度

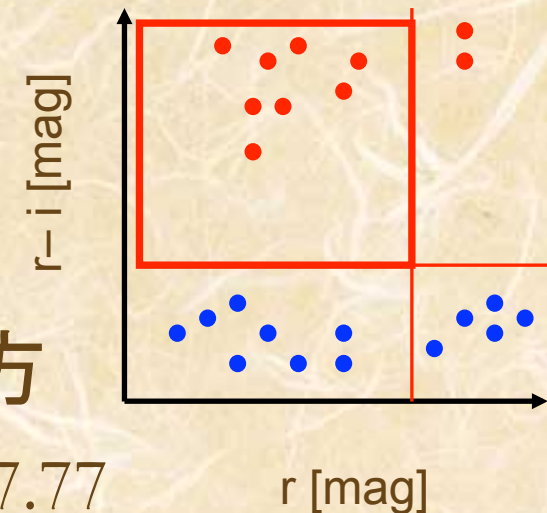
- 体積  $0.72 h^{-3} \text{Gpc}^3$

- Luminous Red Galaxies の選び方

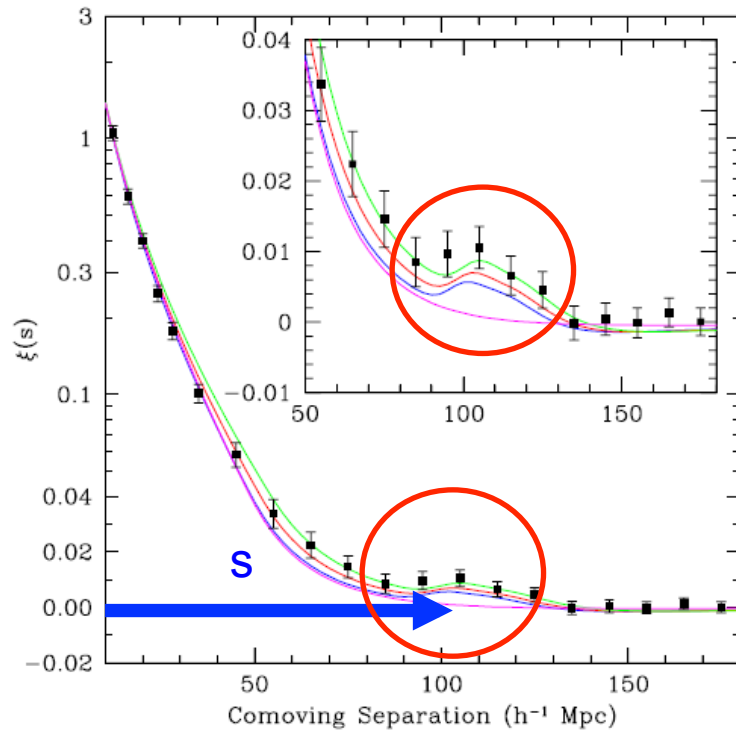
- まず、SDSS Main Sample で  $r < 17.77$

- その中から、color cut!! G, r, I band

※ K correction, 銀河進化を  $z = 0.3$  に焼き直す



# 観測から求めた2点相関関数は？



- バリオン音響ピークの検出に成功！！
- 宇宙論パラメータ  
線形理論と観測結果を比較

$$\Omega_m h^2 = 0.130 \left( \frac{n}{0.98} \right)^{1.2} \pm 0.011$$

$$\Omega_m = 0.273 + 0.123(1 + w_0) + 0.137\Omega_K \pm 0.025$$

$$s \sim \frac{44.5 \ln(9.83/\Omega_m h^2)}{\sqrt{1 + 10(\Omega_b h^2)^{3/4}}} \sim 151 \text{ Mpc}$$

→ 角形距離  $d_A$  がわかる

$$(\Omega_m h^2, \Omega_b h^2) = (0.12, 0.024)$$

$$(\Omega_m h^2, \Omega_b h^2) = (0.13, 0.024)$$

$$(\Omega_m h^2, \Omega_b h^2) = (0.14, 0.024)$$

$$(\Omega_m h^2, \Omega_b h^2) = (0.105, 0.0)$$

他の宇宙論パラメータは、例えば、WMAPや、SDSS Main の結果と組み合わせて求める！

# WMAPとSDSS Main と組み合わせて見積もった宇宙論パラメータ

JOINT CONSTRAINTS ON COSMOLOGICAL PARAMETERS INCLUDING CMB DATA

Parameter	Constant $w$ flat		$w = -1$ curved		$w = -1$ flat	
	WMAP+Main	+LRG	WMAP+Main	+LRG	WMAP+Main	+LRG
$w$	$-0.92 \pm 0.30$	$-0.80 \pm 0.18$	...	...	...	...
$\Omega_K$	...	...	$-0.045 \pm 0.032$	$-0.010 \pm 0.009$	...	...
$\Omega_m h^2$	$0.145 \pm 0.014$	$0.135 \pm 0.008$	$0.134 \pm 0.012$	$0.136 \pm 0.008$	$0.146 \pm 0.009$	$0.142 \pm 0.005$
$\Omega_m$	$0.329 \pm 0.074$	$0.326 \pm 0.037$	$0.431 \pm 0.096$	$0.306 \pm 0.027$	$0.305 \pm 0.042$	$0.298 \pm 0.025$
$h$	$0.679 \pm 0.100$	$0.648 \pm 0.045$	$0.569 \pm 0.082$	$0.669 \pm 0.028$	$0.696 \pm 0.033$	$0.692 \pm 0.021$
$n$	$0.984 \pm 0.033$	$0.983 \pm 0.035$	$0.964 \pm 0.032$	$0.973 \pm 0.030$	$0.980 \pm 0.031$	$0.963 \pm 0.022$

さらに、

バリオン音響ピークの存在から、構造の線形理論を確認。

ダークマター、ダークエネルギーの存在を確認。

# バリオン音響ピークは宇宙モデルを決める有力な道具になった！

## WMAP 5-year Cosmological Interpretation

TABLE 1  
SUMMARY OF THE COSMOLOGICAL PARAMETERS OF  $\Lambda$ CDM MODEL AND THE CORRESPONDING 68% INTERVALS

Class	Parameter	WMAP 5-year ML <sup>a</sup>	WMAP+BAO+SN ML	WMAP 5-year Mean <sup>b</sup>	WMAP+BAO+SN Mean
Primary	$100\Omega_b h^2$	2.268	2.262	$2.273 \pm 0.062$	$2.267^{+0.058}_{-0.059}$
	$\Omega_c h^2$	0.1081	0.1138	$0.1099 \pm 0.0062$	$0.1131 \pm 0.0034$
	$\Omega_\Lambda$	0.751	0.723	$0.742 \pm 0.030$	$0.726 \pm 0.015$
	$n_s$	0.961	0.962	$0.963^{+0.014}_{-0.015}$	$0.960 \pm 0.013$
	$\tau$	0.089	0.088	$0.087 \pm 0.017$	$0.084 \pm 0.016$
	$\Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0^e)$	$2.41 \times 10^{-9}$	$2.46 \times 10^{-9}$	$(2.41 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	$(2.445 \pm 0.096) \times 10^{-9}$
Derived	$\sigma_8$	0.787	0.817	$0.796 \pm 0.036$	$0.812 \pm 0.026$
	$H_0$	72.4 km/s/Mpc	70.2 km/s/Mpc	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	$70.5 \pm 1.3$ km/s/Mpc
	$\Omega_b$	0.0432	0.0459	$0.0441 \pm 0.0030$	$0.0456 \pm 0.0015$
	$\Omega_c$	0.206	0.231	$0.214 \pm 0.027$	$0.228 \pm 0.013$
	$\Omega_m h^2$	0.1308	0.1364	$0.1326 \pm 0.0063$	$0.1358^{+0.0037}_{-0.0036}$
	$z_{\text{reion}}^f$	11.2	11.3	$11.0 \pm 1.4$	$10.9 \pm 1.4$
	$t_0^g$	13.69 Gyr	13.72 Gyr	$13.69 \pm 0.13$ Gyr	$13.72 \pm 0.12$ Gyr



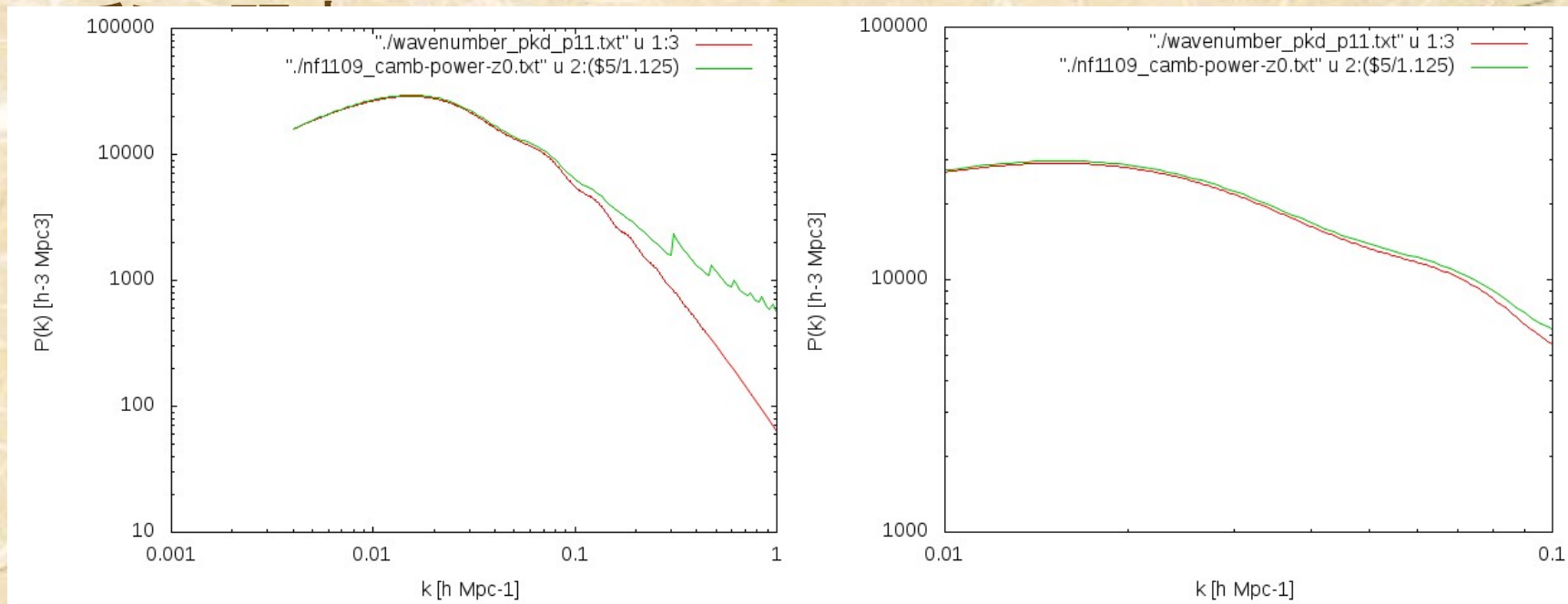
# まとめ

- バリオン音響ピークのでき方をみた。
- バリオン音響ピークの観測に初成功！
- 宇宙論パラメータを見積もることができた。
- 構造形成の線形理論の検証ができた。
- バリオン音響ピークは、宇宙モデルを決定するのに強力なツールであることがわかった。

# ちょっと待った！！

- 本当に理論曲線はあっているのか！？
  - 相関関数の理論モデルは線形理論を仮定していた。
  - でも、本当は、非線形の効果が効いてくるはず！（他にも銀河バイアスなどが効いてくる！）
- 精密な理論モデルを作るために、非線形効果を入れるべき。
  - > 宇宙論パラメータをさらに精度よく出すことが期待できる

# バリオン音響ピークの将来は？



- これは、世界一正確な理論モデルになる！  
 $\Omega_m$ だけでなく、  
ニュートリノの質量にさらなる制限をかけること  
できる！！

かもしれない。

# 終わる前に

1年間、雑誌会のお世話をしてくれた、

岡村さん、安達さん、馬渡くん、高山くん、  
そして参加者の皆様、

本当にお疲れ様でした！！

ご清聴ありがとうございました！！