

# Determinación de Parámetros Cosmológicos usando Oscilaciones Acústicas de Bariones en Cartografiados Fotométricos de Galaxias

Aurelio Carnero Rosell

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Lectura de Tesis Doctoral  
04-Julio-2011

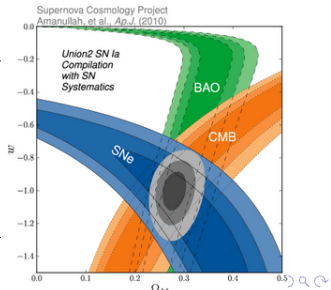
# Determinación de Parámetros Cosmológicos usando Oscilaciones Acústicas de Bariones en Cartografiados Fotométricos de Galaxias

## Objetivo de la Cosmología

- ▶ Formalismo matemático.
- ▶ Abundancia de especies: materia bariónica, materia oscura, energía oscura, neutrinos, radiación.
- ▶ Condiciones Iniciales, edad del Universo, futuro del Universo.

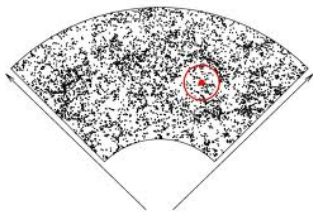
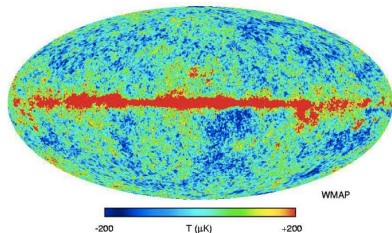
## Modelo $\Lambda$ CDM

$\Omega_M = 0.266 \pm 0.029$	$H_0 = 71.0 \pm 2.5 \text{ km/s/Mpc}$
$\Omega_b = 0.0449 \pm 0.0028$	$n_s = 0.963 \pm 0.014$
$\Omega_\Lambda = 0.734 \pm 0.029$	$z_* = 1090.79 \pm 0.93$
$r_s = 153.2 \pm 1.7 \text{ Mpc}$	$\theta_* = 0.5950 \pm 0.0015^\circ$



## Determinación de Parámetros Cosmológicos usando Oscilaciones Acústicas de Bariones en Cartografiados Fotométricos de Galaxias

- ▶ **BAO**: Origen en el Universo primitivo.
- ▶ Una de las predicciones más importantes del modelo estándar.
- ▶ Distancia entre galaxias preferente (al 1%).
- ▶ La medida de esta distancia ha evolucionado solo por la expansión del Universo (regla estándar): se observa tanto en las fluctuaciones de temperatura del fondo de microondas (CMB) y en la distribución de galaxias  $\theta_{BAO}$ .

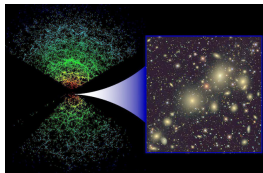


## Determinación de Parámetros Cosmológicos usando Oscilaciones Acústicas de Bariones en Cartografiados Fotométricos de Galaxias

- ▶ Los cartografiados de galaxias miden posiciones y distancias a millones de galaxias.
- ▶ Permiten la medida de las BAO, además de otros muchos observables.
- ▶ Lo más difícil es la medida de la distancia, que se obtiene a través del corrimiento al rojo,  $z \rightarrow$  Fotometría vs Espectroscopía.

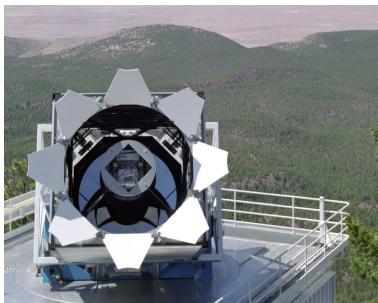
$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda_{emit}}{\lambda_{emit}}$$

Fotometría: más volumen y número de objetos, peor resolución en  $z \rightarrow$  photoz



## Cartografiados espectroscópicos

- ▶ Sloan Digital Sky Survey →
- ▶ 2dF → Completo
- ▶ Hetdex
- ▶ WFMOS...



## Cartografiados fotométricos

- ▶ SDSS → Completo
- ▶ Dark Energy Survey
- ▶ Pan-Starrs
- ▶ HSC
- ▶ PAU...



# Determinación de Parámetros Cosmológicos usando Oscilaciones Acústicas de Bariones en Cartografiados Fotométricos de Galaxias

1. **Proponemos** un método nuevo para extraer la escala BAO de la distribución angular de galaxias.
2. **Objetivo:** Usar esta información para determinar el valor de parámetros cosmológicos (energía oscura), usando BAO como una regla estándar en venideros cartografiados fotométricos de galaxias.
3. Método probado en 1 simulación de N-cuerpos con efectos fotométricos. Predicción para el proyecto Dark Energy Survey.
4. Análisis de la muestra fotométrica del Sloan Digital Sky Survey-DR7. BAO medido.

# Índice

El modelo estándar cosmológico:  $\Lambda$ CDM

Oscilaciones Acústicas de Bariones

El método PLG

Aplicación a una simulación de DES

Análisis de SDSS-DR7

Conclusiones del trabajo

# Índice

El modelo estándar cosmológico:  $\Lambda$ CDM

Oscilaciones Acústicas de Bariones

El método PLG

Aplicación a una simulación de DES

Análisis de SDSS-DR7

Conclusiones del trabajo



# El modelo estándar cosmológico

## Principio Cosmológico

- ▶ Universo homogéneo e isótropo  $\rightarrow$  Métrica.

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right]$$

- ▶  $a(t)$  es el factor de escala:  $a(t) \equiv \frac{1}{1+z}$

## Principio de Relatividad General

*"La materia le dice al espacio como curvarse, y el espacio le dice a la materia como moverse"* John Wheeler.

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

Tensor de energía-momento:  $T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + pg_{\mu\nu}$

# Solución: métrica de FLRW

## Ecuaciones de Friedmann

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2 R_0^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

Densidad crítica:  $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_{rad} + \Omega_K = 1$$

Parámetro de Hubble:

$$H(a)^2 = H_0^2 (\Omega_{M,0} a^{-3} + \Omega_{\Lambda,0} + \Omega_{rad,0} a^{-4} + \Omega_{K,0} a^{-2})$$

## Fluidos perfectos

Ecuación de continuidad:

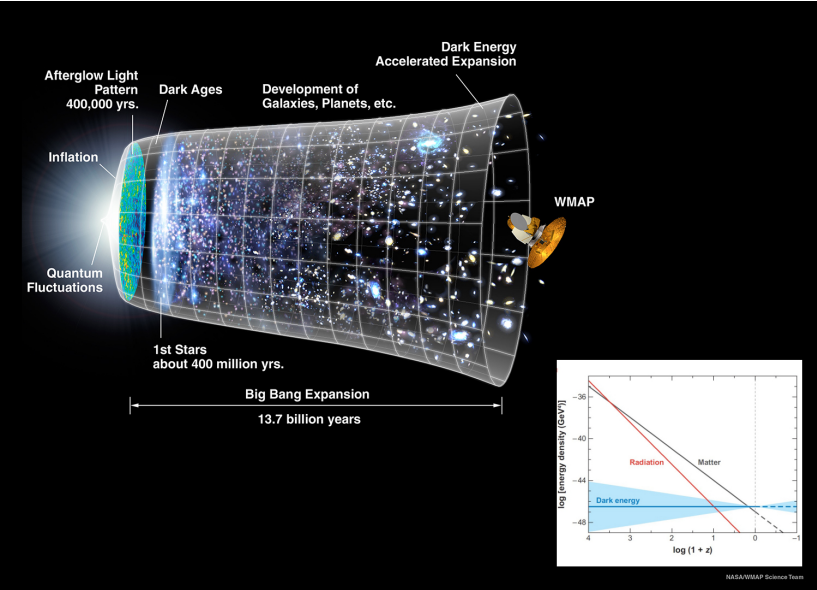
$$\dot{\rho} = -3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p)$$

Ecuación de estado:

$$\rho \propto a^{-3(1+w)}$$

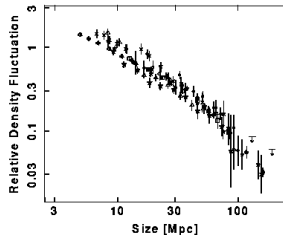
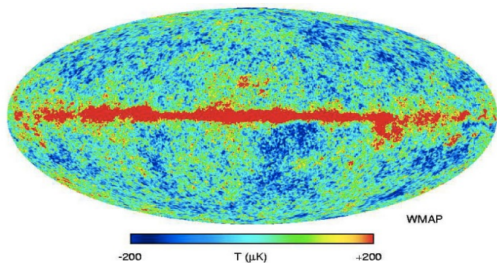
- 
- ▶ Materia:  $\rho_M \propto a^{-3}$ ,  $w = 0$
  - ▶ Radiación:  $\rho_{rad} \propto a^{-4}$ ,  $w = 1/3$
  - ▶  $\Lambda$ :  $\rho_\Lambda \propto a^0$ ,  $w = -1$
  - ▶ Curvatura:  $\rho_{curve} \propto a^{-2}$ ,  $w = -1/3$

# Historia térmica del Universo



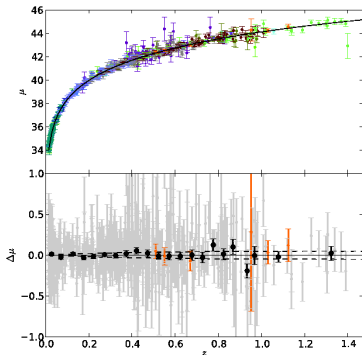
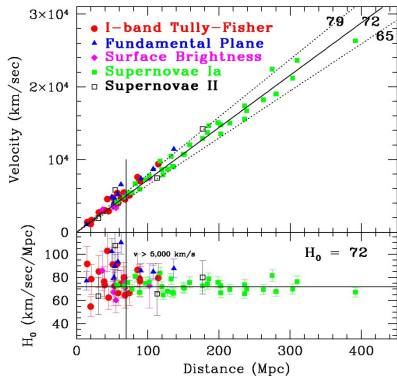
# Base Observacional del modelo estándar

## Isotropía y homogeneidad



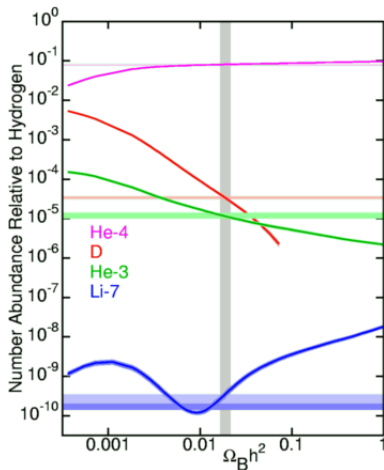
# Base Observacional del modelo estándar

## Expansión del Universo



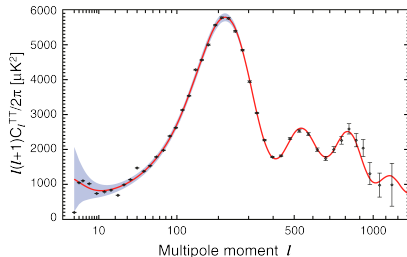
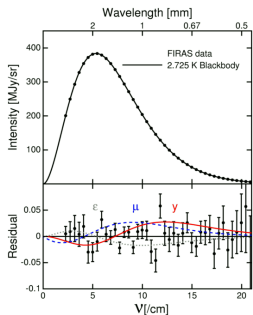
# Base Observacional del modelo estándar

## Abundancias elementos ligeros



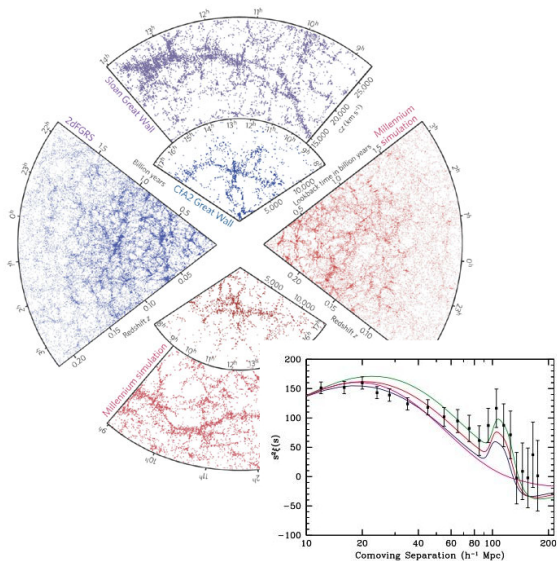
# Base Observacional del modelo estándar

## Existencia y fluctuaciones en el CMB



# Base Observacional del modelo estándar

## Estructura a gran escala

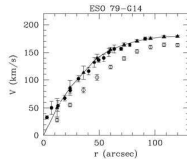
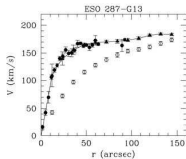
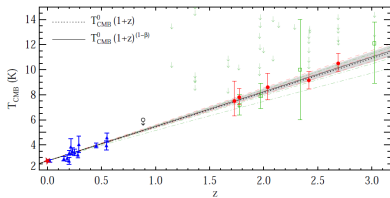




# Base Observacional del modelo estándar

## Otros observables

- ▶ Edad del Universo
- ▶ Temperatura del Universo
- ▶ Correlación galaxias-CMB
- ▶ Observaciones indirectas de la materia oscura



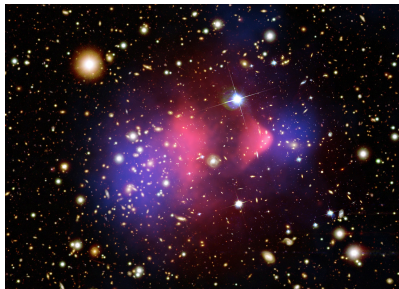
# El sector oscuro del Universo

## Materia Oscura

- ▶ No relativista. Forma el 23% del total de energía del Universo.
- ▶ Extensión al modelo estándar de partículas?

## Energía Oscura

- ▶ Expansión acelerada del Universo. 75% del contenido total de energía del Universo.
- ▶ **Constante Cosmológica?** Nuevo campo escalar? Descripción errónea de la teoría?
- ▶ Para comparar modelos en FLRW:  
$$w(a) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$$

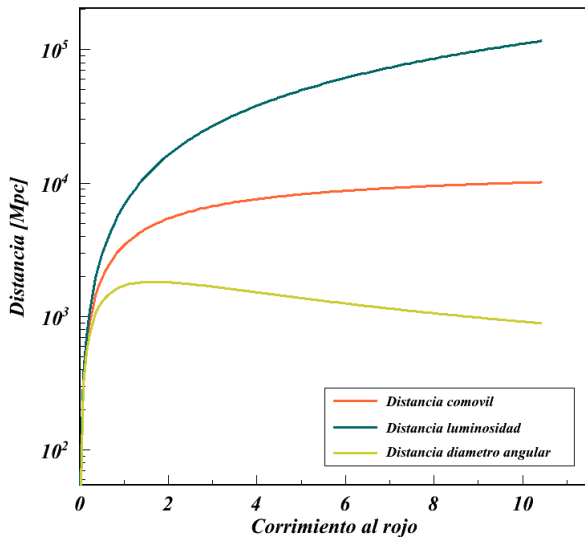


## Métodos de estudio

- ▶ Distancias a Supernovas Ia.
- ▶ Abundancia cúmulos de galaxias.
- ▶ Lentes gravitacionales débiles.
- ▶ Oscilaciones Acústicas de Bariones.

# Distancias en Cosmología

Definición no trivial. Ley de Hubble:  $cz = H_0 d$



# Distancias en Cosmología

- ▶ Distancia comóvil:  $d_C = c \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$

$$d_M = \begin{cases} d_H \frac{1}{\sqrt{\Omega_k}} \sinh [\sqrt{\Omega_k} d_C / d_H] & \text{para } \Omega_k > 0 \\ d_C & \text{para } \Omega_k = 0 \\ d_H \frac{1}{\sqrt{\Omega_k}} \sin [\sqrt{\Omega_k} d_C / d_H] & \text{para } \Omega_k < 0 \end{cases} \quad (1)$$

- ▶ Distancia por luminosidad  $d_L \equiv \sqrt{\frac{L}{4\pi S}} = (1+z)d_M$

$$\mu \equiv m - M = 2.5 \log_{10} \left( \frac{d_L}{10 \text{ pc}} \right)^2$$

- ▶ Distancia por diámetro angular: Regla estándar.  $\Delta\theta = \frac{s_{\perp}}{d_A}$

$$d_A = \frac{d_M}{1+z}$$

$$H(z) = \frac{c \Delta z}{s_{\parallel}(z)}$$

# La Estructura a Gran Escala del Universo

- ▶ Condiciones iniciales: fluctuaciones en el Universo primitivo.
- ▶ Crecimiento por interacción gravitatoria.
- ▶ Contraste de densidad:  $\rho(r, t) = \bar{\rho}(t)[1 + \delta(r, t)]$

---

▶ **Continuidad:**  $\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a} \vec{\nabla} \cdot [(1 + \delta)\mathbf{v}] = 0$

▶ **Euler:**  $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{a}(\mathbf{v} \cdot \vec{\nabla})\mathbf{v} + \frac{\dot{a}}{a}\mathbf{v} = -\frac{1}{a}\vec{\nabla}\phi$

▶ **Poisson:**  $\nabla^2\phi = 4\pi G\bar{\rho}a^2\delta$  con  $\phi \equiv \Phi - \frac{2}{3}\pi G\bar{\rho}a^2x^2$

---

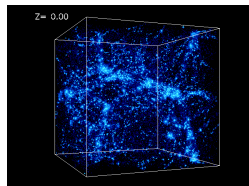
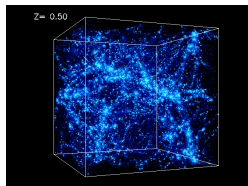
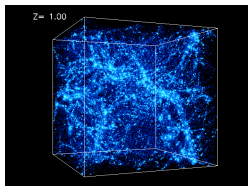
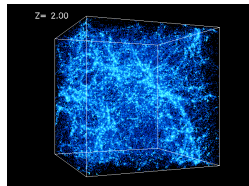
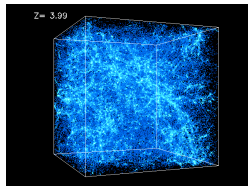
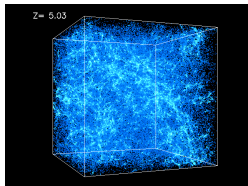
▶ Ecuación lineal  $\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2\frac{\dot{a}}{a}\frac{\partial \delta}{\partial t} = 4\pi G\bar{\rho}\delta$

▶ Solución:  $\delta(x, t) = \delta(x, t_{init})\frac{D_+(t)}{D_+(t_{init})}$

- ▶ Factor de crecimiento:

$$D_+(z) = \frac{H(z)}{H_0} \int_z^\infty \frac{dz'(1+z')}{H^3(z')} \left[ \int_0^\infty \frac{dz'(1+z')}{H^3(z')} \right]^{-1}$$

# Simulaciones de N-cuerpos



# Espectro de potencias

- ▶ Si fluctuaciones son gaussianas, toda la información estadística está codificada en el espectro de potencias  $P(k)$  o en su transformada de Fourier, la función de correlación a dos puntos  $\xi(r)$ .

$$P(k)_{inicial} = k^{n_s} \text{ De WMAP7: } n_s = 0.963 \pm 0.014$$

- ▶ A un  $z$  dado:  $P(k, z) = k^{n_s} D_+^2(z) T^2(k, z)$
- ▶ Función de transferencia  $T(k, z)$ , corrige de las interacciones ocurridas en Universo primitivo (BAO...)
- ▶ Galaxias se acumulan sobre las sobredensidades de densidad

$$P(k, z)_{gal} = b(z)^2 P(k, z)_m$$

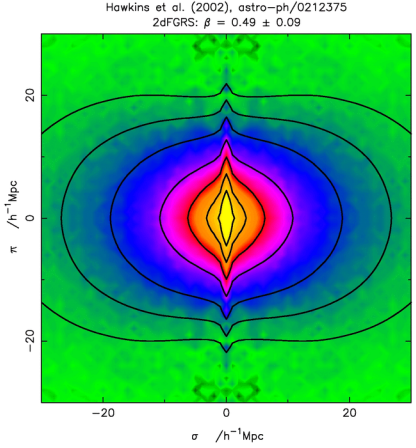
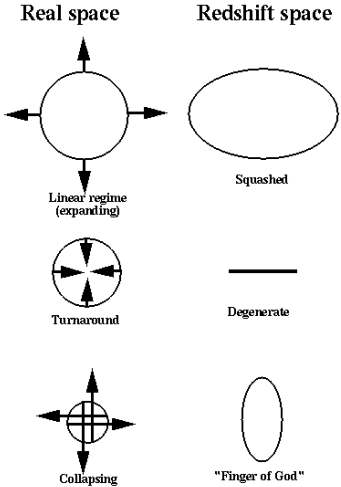
- ▶ Distorsiones en el Espacio de  $z$  (RSD). Velocidades peculiares afectan a la medida de  $z$

$$P(k, z)_z = (1 + \beta(z)\mu^2)^2 P(k, z)_{gal}$$

- ▶ Velocidades peculiares son una medida del campo de densidad y de la teoría subyacente.

$$\beta = \frac{f(\Omega_M)}{b} \equiv \frac{1}{b} \frac{d \ln D_+}{d \ln a} \text{ Ritmo de crecimiento: } f \sim \Omega_m^\gamma, \gamma = 0.55 \text{ en RG}$$

# Redshift Space Distortions

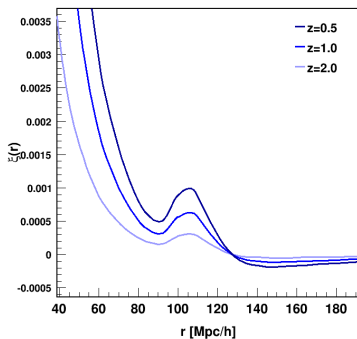
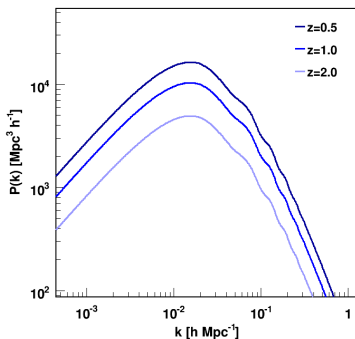




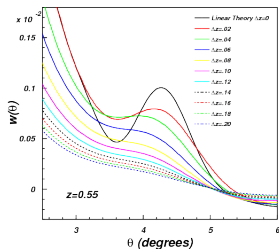
# La función de correlación

- ▶ Exceso de probabilidad de encontrar una galaxia a una distancia  $r$ , comparada con la probabilidad en una distribución aleatoria uniforme con la misma densidad media.
- ▶ Relacionado con  $P(k)$  como la transformada de Fourier. Asumiendo isotropía:

$$\xi(r) = \frac{1}{2\pi^2} \int dk k^2 P(k) \frac{\sin(kr)}{kr}$$



# Función de correlación angular



## Relación entre $\xi(r)$ y $\omega(\theta)$

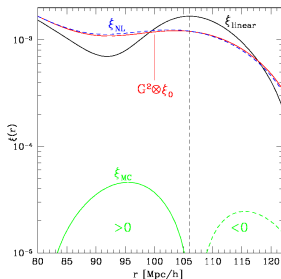
$$\omega(\theta) = \int_0^\infty dz_1 \phi(z_1) \int_0^\infty dz_2 \phi(z_2) \xi(r; \bar{z})$$

## No-linealidades: vía RPT

$$P_{NL} = P_L e^{-k^2 \sigma_v^2(z)/2}$$

$$\sigma_v(z) = \left[ \frac{1}{6\pi^2} \int_0^\infty dk P_L(k; z) \right]^{-1/2}$$

Descartamos la contribución del término de acoplo de modos en  $P(k) \rightarrow$  **Válido a grandes escalas.**



## Matriz de covarianza de $\omega(\theta)$

$Cov_{\theta\theta'} \equiv \langle \omega(\theta)\omega(\theta') \rangle$ . Para un cartografiado dado, se puede estimar:

$$Cov_{\theta\theta'} = \sum_{l \geq 0} \frac{2(2l + 1)P_l(\cos(\theta))P_l(\cos(\theta'))}{(4\pi)^2 f_{sky}} \left[ C(l) + \frac{1}{N_{gal}/\Delta\Omega} \right]^2$$

Donde  $f_{sky}$  es la fracción de cielo cubierta por el cartografiado,  $\Delta\Omega = 4\pi f_{sky}$  y  $P_l$  los polinomios de Legendre.

Errores en  $\omega(\theta)$  obtenidos de la matriz de covarianza.

Referencia: Crocce, Cabre, Gaztañaga. Arxiv.: 1004.4640

# Índice

El modelo estándar cosmológico:  $\Lambda$ CDM

Oscilaciones Acústicas de Bariones

El método PLG

Aplicación a una simulación de DES

Análisis de SDSS-DR7

Conclusiones del trabajo

# Oscilaciones Acústicas de Bariones

- ▶ En el plasma primordial, materia y radiación están acopladas
- ▶ Bariones son atraídos a las sobredensidades de materia oscura, pero son repelidos por la presión de radiación, formando ondas en el plasma primordial (BAO).
- ▶ El tamaño de la perturbación está dada por la velocidad del sonido en el fluido. En el desacoplo  $c_s = 0$ .
- ▶ Escala del horizonte acústico en el desacoplo.

$$r_s(z_{dec}) = \frac{c}{\sqrt{3}} \int_0^{1/(1+z_{dec})} \frac{da}{a^2 H(a) \sqrt{1 + (3\Omega_b/4\Omega_\gamma)}} \text{ Mpc } h^{-1}$$

- ▶ Es una regla estándar

# Oscilaciones Acústicas de Bariones

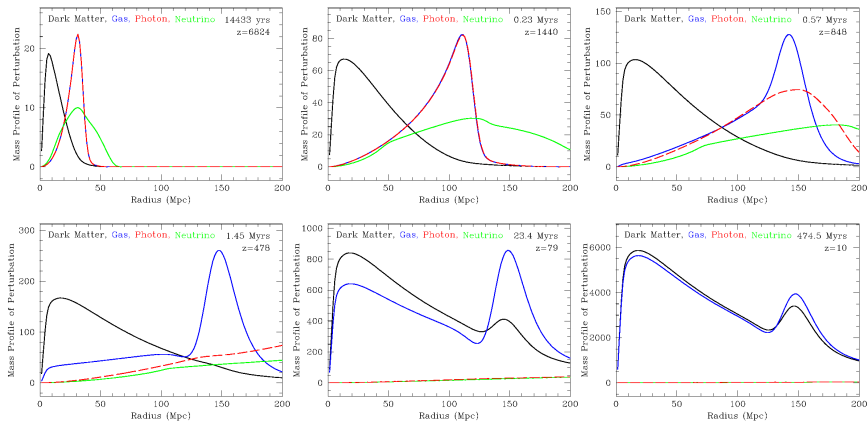
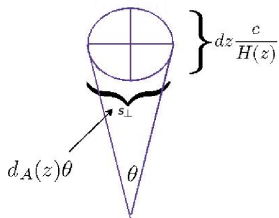


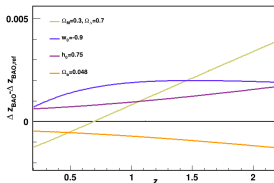
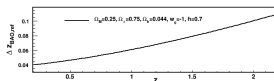
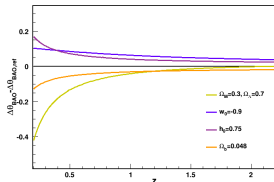
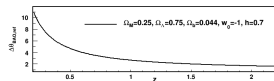
Figure: D.J. Eisenstein, H.J. Seo and M. White. *ApJ* 664, 660-674, 2007

# Método de la Regla Estándar



$$\theta_{BAO}(z) = \frac{r_s(z_{dec})}{d_A(z)} \rightarrow r_s \text{ conocido.}$$

$$\Delta z_{BAO}(z) = \frac{c}{H(z)r_s(z_{dec})}$$

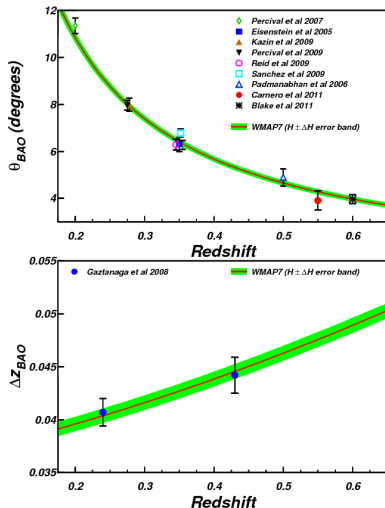


# Estado actual

## Detección del BAO.

- ▶ BAO confirmado en distribución de galaxias.
  - ▶ Generalmente con datos espectroscópicos.
  - ▶ Nuevos proyectos dedicados al estudio de la Energía Oscura.
  - ▶ Dos formas de mejora:
    1. Más espectros. Cartografiados espectroscópicos.
    2. Más volumen y estadística.
- Cartografiados fotométricos.**

## Estado actual

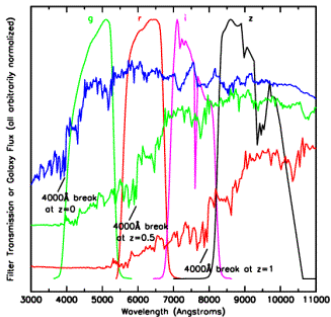


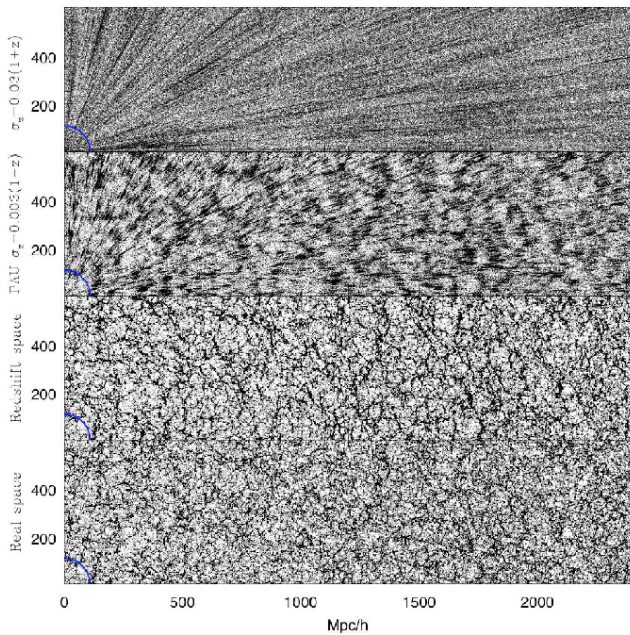


## En cartografiados fotométricos.

- ▶ Mayor precisión en la determinación de parámetros cosmológicos por su mayor volumen y número de galaxias observadas, incluso si el photoz tiene peor precisión comparada con  $z$  espectroscópicos.
- ▶ Generalmente imposible inferir la distribución 3-dimensional. Se requiere el análisis angular de la muestra, como la función de correlación angular a dos cuerpos  $\omega(\theta)$  o el espectro de potencias angular  $C_l$ .

Para LRGs, Error en photoz depende sobre todo del rango de frecuencias y del número de filtros con que se observa.





# Índice

El modelo estándar cosmológico:  $\Lambda$ CDM

Oscilaciones Acústicas de Bariones

**El método PLG**

Aplicación a una simulación de DES

Análisis de SDSS-DR7

Conclusiones del trabajo

# Método PLG

Proponemos un método nuevo.

- ▶ **Objetivo:** Recuperar la escala BAO en función de  $z$  y obtener las propiedades de la energía oscura de su evolución.
- ▶ Genérico a cualquier cartografiado fotométrico, pero probado en simulaciones con las expectativas observacionales de DES.
- ▶ Usar BAO solo como una regla estándar. No intentamos usar todo el perfil de la función de correlación.
- ▶ **Menos sensible a errores sistemáticos.**

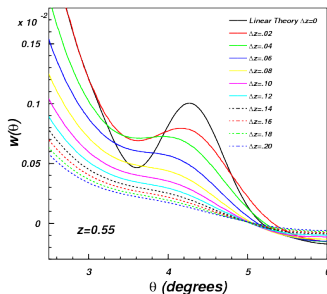
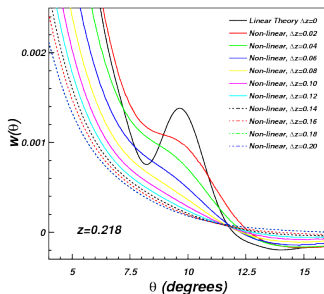
Resultados en *MNRAS*, 2011, 411,277-288.

# BAO como regla estándar

- ▶ El método se basa en el potencial de relacionar la posición del máximo del pico acústico en la función de correlación de galaxias con la escala del horizonte acústico en el desacoplo.

- ▶ Distiguimos entre  $\theta_{BAO} \equiv r_S/d_A(z)$  y el máximo local.

Efecto de proyección



## Método para recuperar $\theta_{BAO}$ .

1. Dividir la muestra de galaxias en capas de  $z$  (usando photoz).
2. Calcular la función de correlación angular a dos puntos en cada capa.
3. Parametrizar la función con la siguiente expresión:

$$\omega(\theta) = A + B\theta^\gamma + Ce^{-(\theta - \theta_{FIT})^2 / 2\sigma^2}$$

y realizar ajuste a  $\omega(\theta)$  con parámetros libres  $A, B, C, \gamma, \theta_{FIT}, \sigma$ .

4. La escala BAO se estima usando el parámetro  $\theta_{FIT}$  y corrigiendo del efecto de proyección:  
$$\theta_{BAO}(z) = \alpha(z, \Delta z)\theta_{FIT}(z)$$
5. Ajustar parámetros cosmológicos usando la evolución de  $\theta_{BAO}$  con  $z$ .

## Calibración teórica $\omega(\theta)$

Hemos probado la bondad del método a varios  $z$ , desde 0.2 a 1.4 para un alto rango de grosores de capa y para 14 modelos cosmológicos.

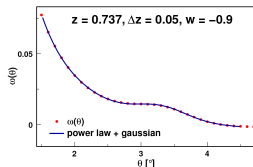
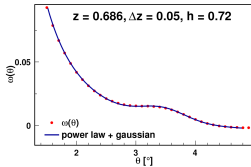
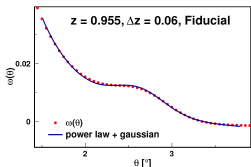
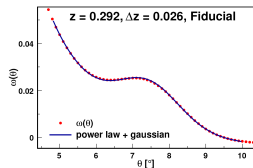
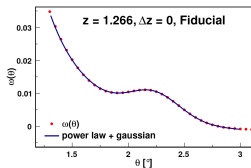
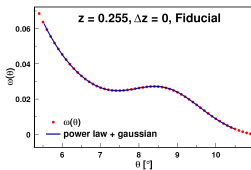
- ▶ Errores en cada punto de  $\omega(\theta)$  es  $\sim 1\%$ . Menos que la varianza cósmica para una observación de cielo completa..

$h$	$\Omega_M$	$\Omega_b$	$\Omega_k$	$w_0$	$w_a$	$n_s$
0.70	0.25	0.044	0.00	-1.00	0.0	0.95
0.68						
0.72						
	0.20					
	0.30					
		0.040				
		0.048				
			+0.01			
			-0.01			
				-0.90		
				-1.10		
					-0.1	
					+0.1	
						1.00

## Calibración teórica $\omega(\theta)$

Hemos probado la bondad del método a varios  $z$ , desde 0.2 a 1.4 para un alto rango de grosores de capa y para 14 modelos cosmológicos.

- ▶ Errores en cada punto de  $\omega(\theta)$  es  $\sim 1\%$ . Menos que la varianza cósmica para una observación de cielo completa..



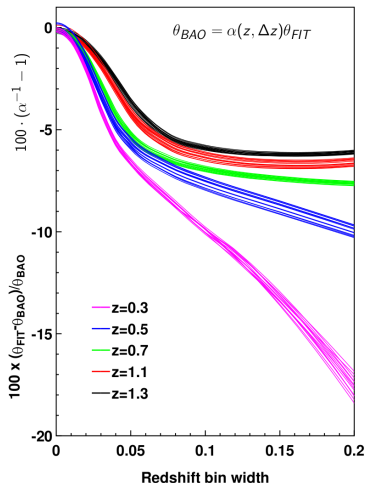


# RESULTADO CLAVE!

Efecto de proyección puede corregirse independientemente de la cosmología.

Corrigiendo de efecto de proyección.

1. Aplicando PLG a las 770  $\omega(\theta)$ :
2. Podemos corregir  $\theta_{FIT}$  para obtener  $\theta_{BAO}$  independientemente de la cosmología (valor medio).
3. En cada banda hay 14 modelos cosmológicos. La mitad del grosor es el error en la corrección.
4. Desplazamiento relativo. En absoluto,  $\theta_{BAO}$  es diferente para cada modelo.

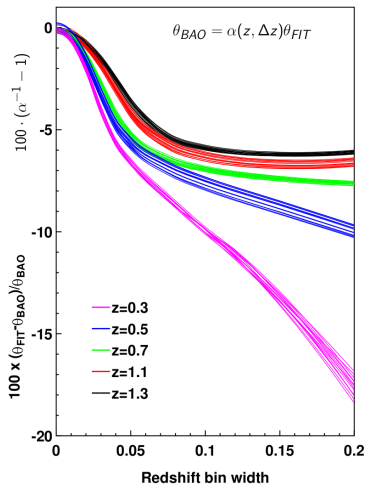


# RESULTADO CLAVE!

Efecto de proyección puede corregirse independientemente de la cosmología.

Corrigiendo de efecto de proyección.

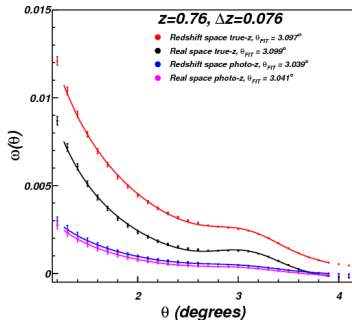
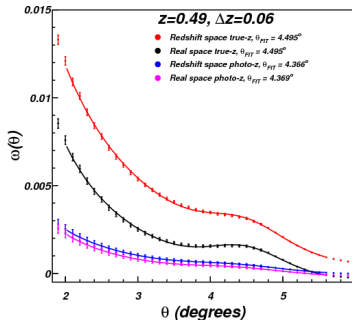
1. En una capa infinitesimal, recuperamos el valor teórico exacto de  $\theta_{BAO}$  para todas las cosmologías, con un error del orden de  $10^{-3}$ .
2. La corrección es mayor para  $z$  pequeños y para capas más anchas.
3. **Advertencia: Solo probado sobre cosmologías FLRW**



# Efecto de las RSD

## RSD en cartografiados fotométricos.

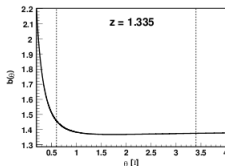
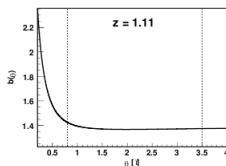
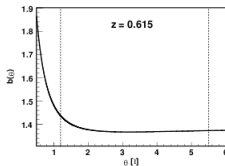
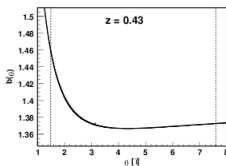
- ▶ RSD son importantes y hay que considerarlas. **El efecto es pequeño en espacio de photoz.**
- ▶ El principal efecto es un aumento de la amplitud.
- ▶ Sin embargo, no desplaza  $\theta_{FIT}$  que se obtiene con la parametrización PLG al nivel de  $10^{-3}$ . Los otros parámetros de PLG absorben RSD.
- ▶ **z verdadero vs Photoz**



## bias galáctico

También estudiamos el efecto del bias galáctico en la parametrización:

- ▶ **bias independiente de escala:**  $\omega(\theta)_b = b(z)^2\omega(\theta)$ . Los errores se rescalan proporcionalmente. El resultado en  $\theta_{FIT}$  no cambia.
- ▶ **bias dependiente de escala:** toy model, i.e.:  
 $\omega(\theta)_b = b(z, \theta)^2\omega(\theta)$ . Las variaciones de  $\theta_{FIT}$ , dentro del 1%.
- ▶ Efecto mayor a bajo  $z$ .
- ▶ Bias es importante a pequeña escala  $\theta$ , pero el modelo PLG es robusto frente a variaciones en el bias del 20%.



Podemos ignorar el efecto del bias en la calibración En el sentido de que  $\theta_{FIT}$  no cambia.

# bias galáctico

También estudiamos el efecto del bias galáctico en la parametrización:

GALAXY BIAS AND ITS EFFECTS ON THE BARYON ACOUSTIC OSCILLATIONS MEASUREMENTS

KUSHAL T. MEHTA<sup>1</sup>, HEE-JONG SEO<sup>2,3</sup>, JONATHAN ECKEL<sup>1</sup>, DANIEL J. EISENSTEIN<sup>1,4</sup>, MARC METCHNIK<sup>1</sup>, PHILIP PINTO<sup>1</sup>,  
XIAOYING XU<sup>1</sup>

*Draft version April 8, 2011*

## ABSTRACT

The baryon acoustic oscillation (BAO) feature in the clustering of matter in the universe serves as a robust standard ruler and hence can be used to map the expansion history of the universe. We use high force resolution simulations to analyze the effects of galaxy bias on the measurements of the BAO signal. We apply a variety of Halo Occupation Distributions (HODs) and produce biased mass tracers to mimic different galaxy populations. We investigate whether galaxy bias changes the non-linear shifts on the acoustic scale relative to the underlying dark matter distribution presented by Seo et al. (2009). For the less biased HOD models ( $b < 3$ ), we do not detect any shift in the acoustic scale relative to the no-bias case, typically  $0.10\% \pm 0.10\%$ . However, the most biased HOD

models ( $b > 3$ ) show a shift at moderate significance. We test the one-step reconstruction technique introduced realistic galaxy bias and shot noise. The reconstruction initial and final ( $z = 1$ ) density fields achieving an equivalent wavenumber after reconstruction. Reconstruction reduces that after reconstruction the shifts from the galaxy case each other and with no shift. The  $1\sigma$  systematic error: our BAO measurements with various HODs after reconstruction. *Subject headings:* distance scale — cosmological parameters — baryon acoustic oscillations — methods

$0.70\% \pm 0.31\%$  for the most extreme case. In conclusion, we investigate the effect of galaxy bias on the acoustic scale. We find that the effect of galaxy bias in redshift space relative to the mass case without reconstruction is about 0.1% for the low bias cases ( $b < 3$ ), growing to 0.3% in the most extreme case. With our simple reconstruction scheme, this effect is consistent with no shift with errors less than 0.08% for the low biased cases and less than 0.16% for the high biased cases. Current surveys such as the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) III baryon oscillations spectroscopic survey (BOSS), the WiggleZ dark energy survey, and the Hobby-Eberly tele-

Podemos ignorar el efecto del bias en la calibración En el sentido de que  $\theta_{FIT}$  no cambia.

tro-ph.COJ 6 Apr 2011

## Resumen del método PLG

- ▶ Proponemos un método nuevo para extraer la escala BAO de  $\omega(\theta)$ :

$$\omega(\theta) = A + B\theta^\gamma + Ce^{-(\theta - \theta_{FIT})^2 / 2\sigma^2}$$

- ▶ Podemos corregir  $\theta_{FIT}$  para obtener  $\theta_{BAO}$  independientemente de la cosmología en FRW.
- ▶ El error estadístico en  $\theta_{BAO}$  viene del ajuste a  $\theta_{FIT}$ .
- ▶ Los efectos de las RSD y del bias son cruciales si queremos ajustar la función de correlación  $\omega(\theta)$ , pero no en la parametrización PLG.

Qué pasa si incluimos efectos observacionales?: Hemos estudiado la parametrización sobre una simulación de N-cuerpos del proyecto DES

# Índice

El modelo estándar cosmológico:  $\Lambda$ CDM

Oscilaciones Acústicas de Bariones

El método PLG

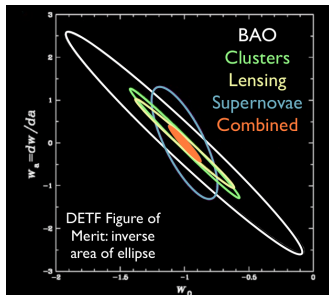
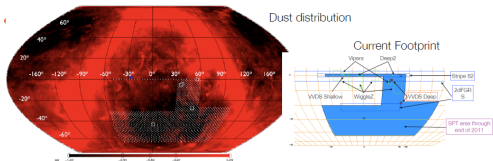
**Aplicación a una simulación de DES**

Análisis de SDSS-DR7

Conclusiones del trabajo

# Dark Energy Survey

- ▶ Cartografiado fotométrico de galaxias en 5 bandas  $g, r, i, z, Y$ .
- ▶ 5000  $deg^2$  en 525 noches.
- ▶ Además de búsqueda de Supernovas.
- ▶ Mejorará en un factor  $\sim 5$  la figura de mérito de la energía oscura.
- ▶ Colaboración internacional.



an international collaboration of ~100 scientists from ~20 institutions

US: Fermilab, UIUC/NCSA, University of Chicago, BNL, NAOJ, University of Michigan, University of Pennsylvania, Argonne National Laboratory, Ohio State University, Santa-Cruz/SLAC Consortium, Texas A&M University





## 4m Telescope at CTIO in Chile



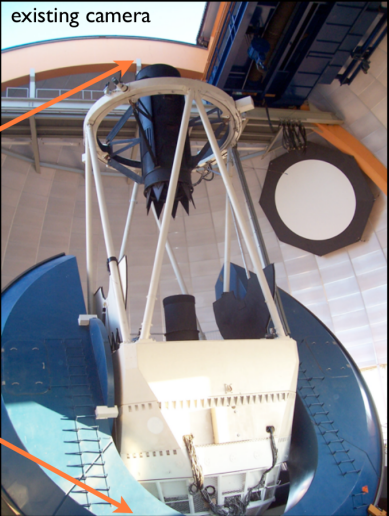
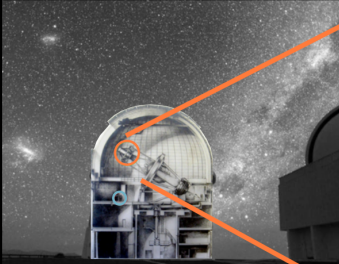
image: CTIO/AURU/NSF

## 4m Telescope at CTIO in Chile



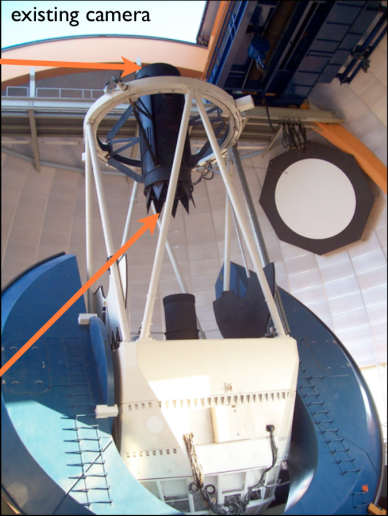
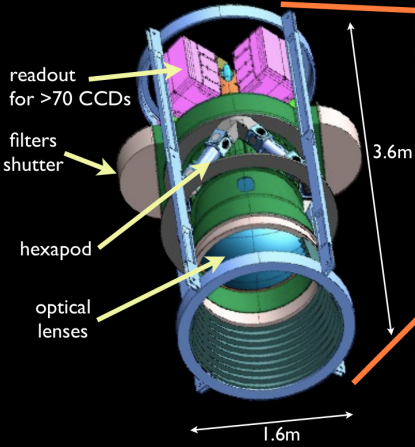
image: C. PIO/AURU/NSF

## 4m Telescope at CTIO in Chile



## New Instrument: DECam

**DECam**



## Dark Energy Survey Simulation Challenge.

- ▶ Disponible al público.
- ▶ Mismo volumen y  $\sigma_z$  que lo esperado en DES.
- ▶ 5000 grados cuadrados.  $5e7$  partículas.

## Cosmología de referencia.

### MICE Simulation Common Parameters

Baryon density,  $\Omega_b = 0.044$

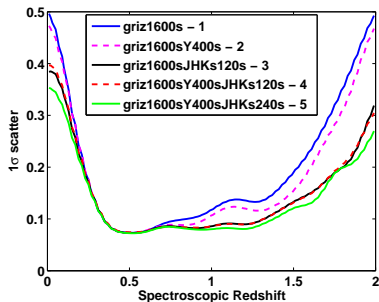
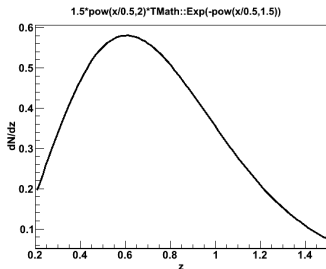
Matter density,  $\Omega_m = 0.25$

Dark-energy density,  $\Omega_\Lambda = 0.75$

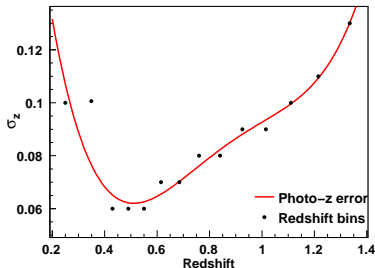
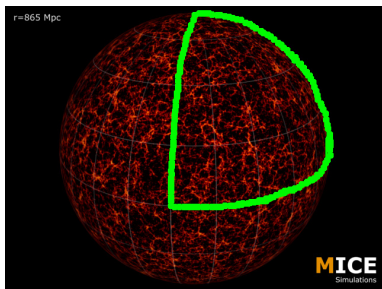
Scalar spectral index,  $n_s = 0.95$

Rms matter fluctuation amplitude,  $\sigma_8 = 0.8$

Hubble parameter (in units of 100 km/sec/Mpc),  $h = 0.7$



Efectos observacionales incluidos:  $N(z)$ , cobertura parcial y photo- $z$ .

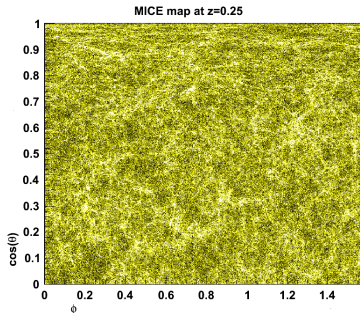


## Photoz en MICE

- ▶ Introducimos el error en photoz dispersando el  $z$  de cada galaxia siguiendo una distribución gaussiana  $\rightarrow (0, \sigma_z)$ .
- ▶ **Todos los resultados incluyen la dispersión en photoz.**
- ▶ Siguiendo la distribución  $\sigma(z)$ , construimos 14 bins de  $z$ , desde  $z = 0.2$  hasta  $z = 1.5$ .

## Mapas de MICE

- ▶ **14 bins:** Construimos mapas de galaxias.
- ▶ eje x es  $\phi$  y eje y es  $\cos(\theta)$ . Todos los píxeles tiene la misma área ( $\phi = \text{ra}$ ,  $\theta = \frac{\pi}{2} - \text{dec}$ ).
- ▶  $\Delta\theta \approx 0.1^\circ$ . Pequeño comparado con  $\theta_{BAO}$  que va desde  $\sim 2^\circ$  hasta  $\sim 11^\circ$  en  $0.2 < z < 1.5$ .



Construyendo la función de correlación angular  $\omega(\theta)$ .

- ▶ Partiendo de los mapas, calcular  $\omega(\theta)$  usando el estimador de Landy & Szalay:

$$\omega(\theta) = \frac{DD(\theta) - 2DR(\theta) + RR(\theta)}{RR(\theta)}$$

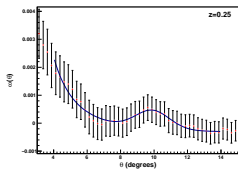
- ▶ Construimos mapas de partículas aleatorias con el mismo número de galaxias (no estamos limitados por el shot-noise).

## Extracción de la escala BAO

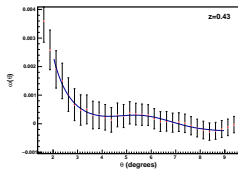
- ▶ En cada  $\omega(\theta)$  aplicamos el ajuste a la parametrización PLG.
- ▶ Corregimos  $\theta_{BAO} = \alpha(z, \Delta z)\theta_{FIT}$  donde  $\Delta z_{true} = \sqrt{2\pi}\Delta z_{phot}$ .
- ▶  $\Delta z_{true}$  es el grosor efectivo real, tal que la amplitud de  $\omega(\theta)$  en  $z_{true}$  sea igual que en  $z_{phot}$ .
- ▶ **Error estadístico** en  $\omega(\theta)$  viene dado por  $Cov_{\theta\theta'}$  e incluyendo correlaciones entre capas de photoz.



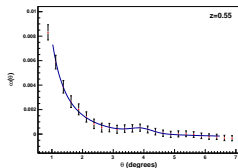
# Resultados para la simulación MICE



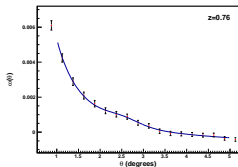
$\chi^2/dof = 0.1$  Prob = 1



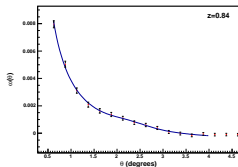
$\chi^2/dof = 0.15$  Prob = 1



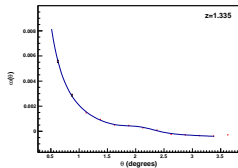
$\chi^2/dof = 0.4$  Prob = 0.97



$\chi^2/dof = 0.5$  Prob = 0.8

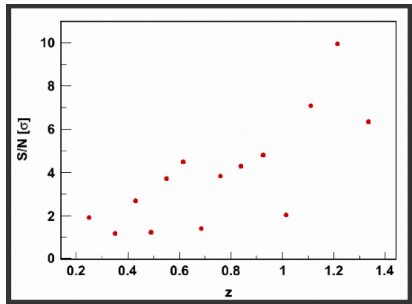
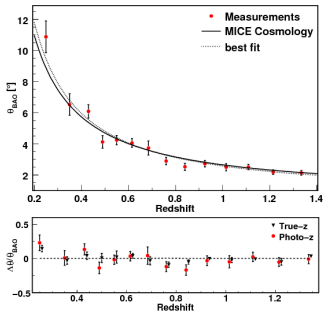


$\chi^2/dof = 0.87$  Prob = 0.5



$\chi^2/dof = 1.6$  Prob = 0.13

# $\theta_{BAO}$ VS Z



Error en cada medida es  $\sigma(\theta_{BAO})^2 = \sigma_{stats}^2 + \sigma_{sys}^2$

## Errores sistemáticos principales

- ▶ **Photoz:** Correlación entre capas, disminuye la amplitud de  $\omega(\theta)$ ,  $\Delta z_{true}$  desconocido, ...
- ▶ Incertidumbre en la descripción de las RSD y del bias.
- ▶ Parametrización  $\rightarrow$  Intervalo de ajuste.
- ▶ Teoría (no-linearidades) y el error en la corrección de proyección.

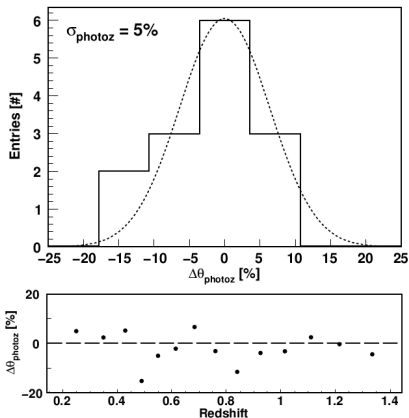
### Qué no se ha considerado en la simulación de N-cuerpos.

- ▶ Selección de galaxias.
- ▶ Contaminación de la muestra.
- ▶ Algoritmo de Photoz.
- ▶ **Veremos estos efectos en la siguiente sección con datos reales.**

# Errores sistemáticos

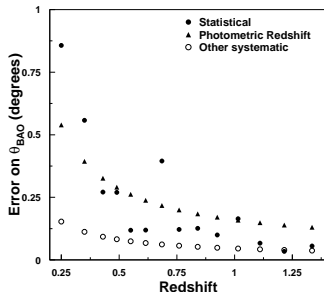
## Error de Photoz

- ▶ Rehaciendo el análisis con  $z$  verdaderos, para las mismas capas, podemos comparar ambos resultados. Miramos a las diferencias en  $\theta_{FIT}$  para  $z$  verdadero y photoz.
- ▶ Su dispersión asociada a  $\sigma_{photoz}$ . Para nuestra elección de capas  $\sigma(z)$ :  
 $\sigma_{photoz} = 5\%$
- ▶ Para estudiar la dependencia con  $z$  necesitaríamos muchas realizaciones con las mismas características.  
→ Fuera de los objetivos.
- ▶ Es la mayor fuente de incertidumbre en el error de  $\theta_{BAO}$ .
- ▶ Correlación entre bins de  $z$



# Errores

Errores sistemáticos	$\Delta\theta_{BAO}$	Correlación entre bins
Parametrización	1.0%	No
Photoz	5.0%	Sí
RSD y bias	1.0%	Sí
Teoría	1.0%	No
Efecto de proyección	1.0%	No
Error estadístico	5-10%	Sí

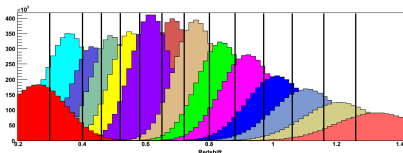
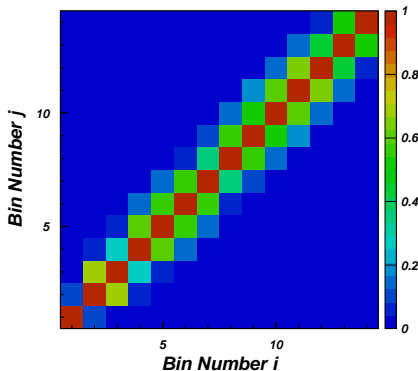


## Matriz de covarianza

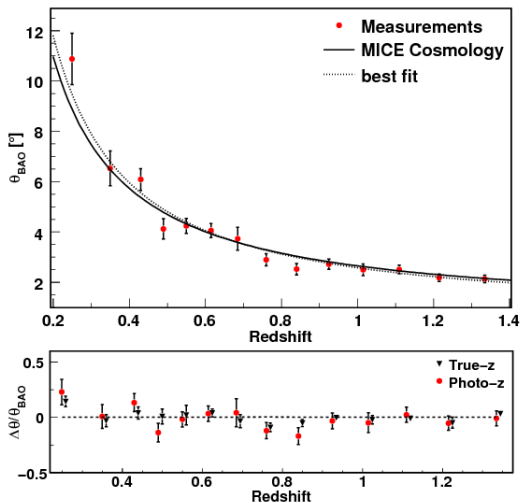
- ▶ Debido a la incertidumbre en photo-z, hay migración de galaxias de una capa a otra.
- ▶ A partir de la matriz de mezcla (contando cuantas galaxias hay en capas de  $z$  verdadero y de photoz) y las correlaciones entre bins de  $\theta$ , obtenemos la matriz de correlación para  $\theta_{BAO}$ .
- ▶ Calculamos la matriz de covarianza, incluyendo los errores correlacionados y no correlacionados en  $\theta_{BAO}$ .

$$C_{ij} = \langle w_i^O(\theta) w_j^O(\theta') \rangle = \sum_{k=1}^{N_{bins}} (r_{ik}^2 r_{jk}^2) \frac{(N_k^T)^4}{(N_i^O)^2 (N_j^O)^2} \text{Cov}_{\theta\theta'}$$

Donde  $r_{ij}$  son los elementos de la matriz de mezcla,  $N_i^T$  son el número de galaxias con  $z$  verdadero que entran en la capa  $i$  y  $N_i^O$  el número de galaxias con photoz que entran en la misma capa  $i$ .



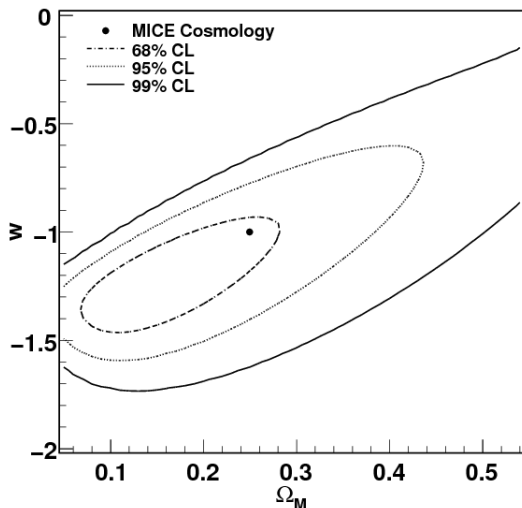
# $\theta_{BAO}$ VS Z



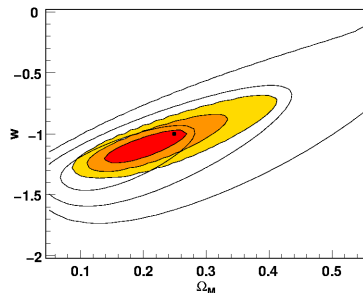
- ▶ El error total es  $\sigma(\theta_{BAO})^2 = \sigma_{stats}^2 + \sigma_{sys}^2$
- ▶ También se muestra el resultado obtenido sin photo-z ( $z$  verdadero).
- ▶ Minimizar  $\chi^2$  respecto a  $\Omega_M$  &  $w$ :

$$\chi^2 = (\theta_{BAO} - \frac{rs}{\chi(z)})_i C_{ij}^{-1} (\theta_{BAO} - \frac{rs}{\chi(z)})_j$$

# Resultado cosmológico



- ▶ Otros parámetros fijados a su valor verdadero.
- ▶ Incluyendo correlaciones
- ▶ En acuerdo con las expectativas de DES.

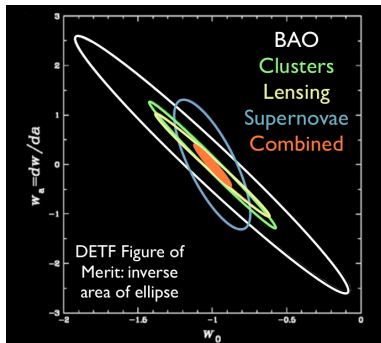
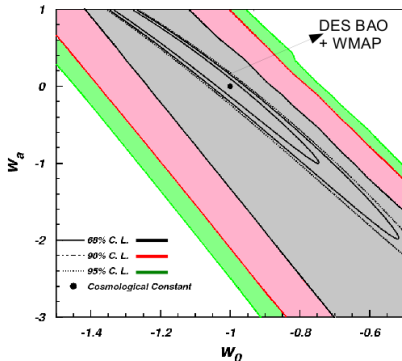


si  $\Omega_M = 0.25$   $w = -1.05 \pm 0.14$  y si  $w = -1$   $\Omega_M = 0.23 \pm 0.05$



# Resultado cosmológico

- ▶ Otros parámetros fijados a su valor verdadero.
- ▶ Incluyendo correlaciones
- ▶ **En acuerdo con las expectativas de DES.**



# Índice

El modelo estándar cosmológico:  $\Lambda$ CDM

Oscilaciones Acústicas de Bariones

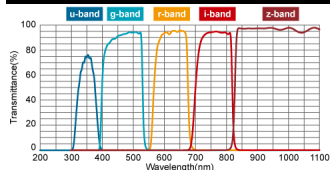
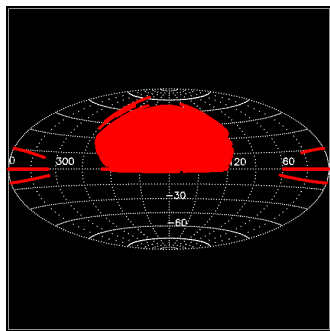
El método PLG

Aplicación a una simulación de DES

**Análisis de SDSS-DR7**

Conclusiones del trabajo

## Aplicación del método a la muestra fotométrica de SDSS-DR7

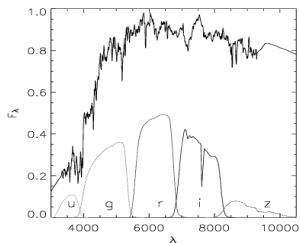


- ▶ En operación desde el año 2000
- ▶ Telescopio propio de 2.5m (Apache Point - New Mexico)
- ▶ Muestra final (DR7): 230 millones de objetos en  $8400 \text{ deg}^2$  ( $u, g, r, i, z$ )
- ▶ Espectros a  $\sim 1.3$  millones de objetos.
- ▶ Actualmente en fase SDSS-III (BAO es uno de los objetivos principales)

# Selección de la muestra

Selección de muestra homogénea y brillante: Galaxias Rojas Luminosas

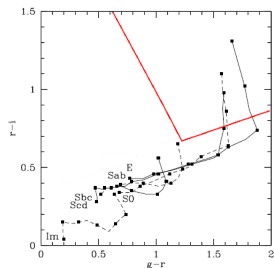
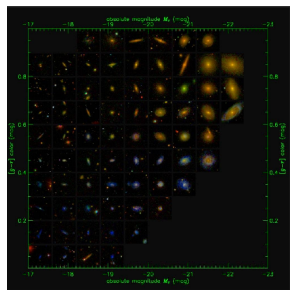
photoz bien caracterizado.



Espacio color-color

$$(r - i) > \frac{(g - r)}{4} + 0.36,$$

$$(g - r) > -0.72 (r - i) + 1.7.$$



# Selección de la muestra ( $\sim 1.4 \times 10^6$ LRGs)

## Contaminación de estrellas

$$17 < r < 21,$$

$$0 < \sigma_r < 0.5,$$

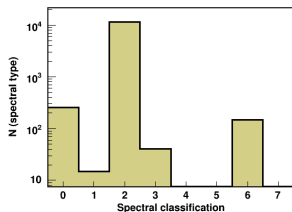
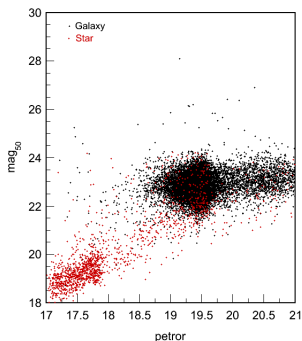
$$0 < r - i < 2,$$

$$0 < g - r < 3,$$

$$22 \frac{\text{mag}}{\text{arcsec}^2} < \mu_{50} < 24.5 \frac{\text{mag}}{\text{arcsec}^2}$$

Cabré et al. 2006. MNRAS, 372, L23

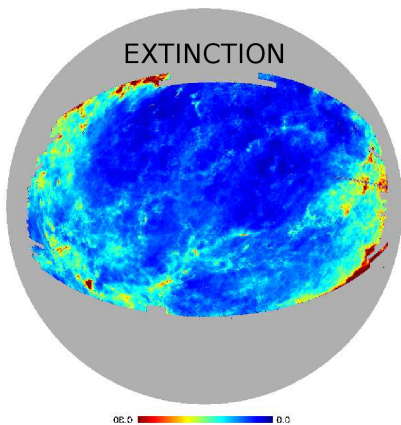
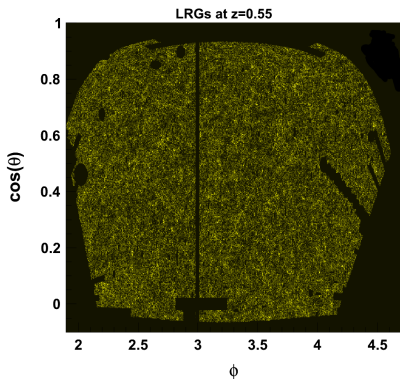
1% objetos están en la muestra  
espectroscópica  $\rightarrow$  5% no son galaxias



# Máscara

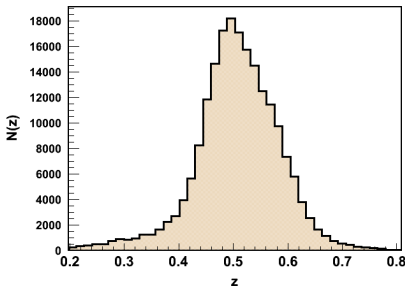
## Eliminar regiones

- ▶ Zonas de no observación
- ▶ Zonas con mala fotometría
- ▶ Corte en latitud galáctica.
- ▶ En total 7136  $deg^2$



## Photoz

- ▶ Usamos el photoz dado por *Cunha et al 2009, MNRAS 396* del catálogo de valor añadido de Chicago-Fermilab de SDSS-DR7.
- ▶ Distribución  $\text{pdf}(z)$  calculada para cada galaxia. Usamos esta información para calcular la función de selección en  $z$ .
- ▶  $\text{photoz} = z_{\text{max}}$  donde la  $\text{pdf}(z)$  es máxima.
- ▶ En nuestra selección,  $\sim 90\%$  de galaxias en el rango  $0.4 < z < 0.6$ .

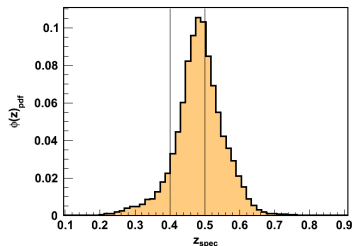


## Encontrar los grosores de capa óptimos en el rango $0.4 < z < 0.6$

$$0.40 < z \leq 0.50$$

$$z_c = 0.45$$

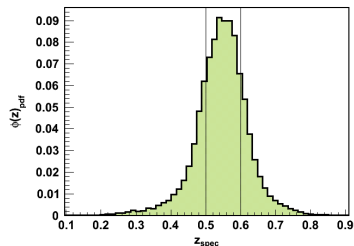
$$N_{gal} = 0.55 \times 10^6$$



$$0.50 < z \leq 0.60$$

$$z_c = 0.55$$

$$N_{gal} = 0.72 \times 10^6$$



Bines más estrechos no mejoran la sensibilidad y usar solo un bin ancho borra la señal BAO (efecto de proyección)



$z_c = 0.45$

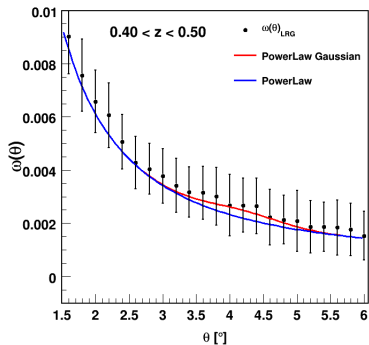


Figure: No hay detección (mala calidad del photoz)

$z_c = 0.55$

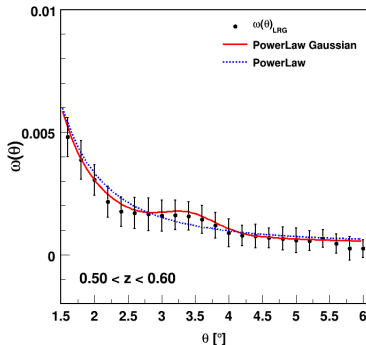


Figure: Detección de la señal a  $S/N \sim 2.6\sigma$

# Tres estimaciones independientes del error.

## Realizaciones

Obtener  $C_l$  de la  $\omega(\theta)$  observada y hacer multiples realizaciones aleatorias de los coeficientes  $a_{lm}$ . En nuestro análisis, 50 realizations. El error como la dispersion.

## Jackknife

Dividir el área en 80 regiones y calcular 80 veces  $\omega(\theta)$ , retirando una región distinta cada vez. El error es la dispersión.

## Predicción analítica

Usando descripción teórica dada anteriormente. *Crocce, Cabre, Gaztañaga. Arxiv:: 1004.4640.*

# Tres estimaciones independientes del error.

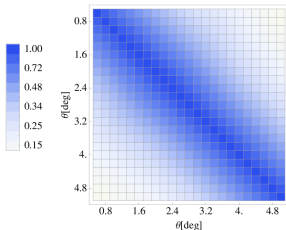
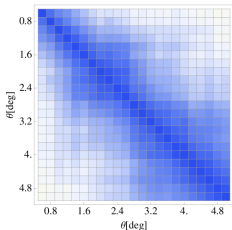
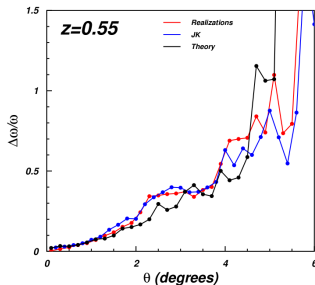
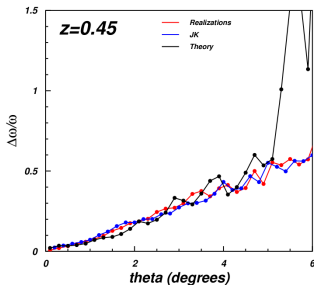


Figure: Matrices de covarianza para el error Jackknife y el error analítico

# Errores sistemáticos

## Algoritmo de photoz

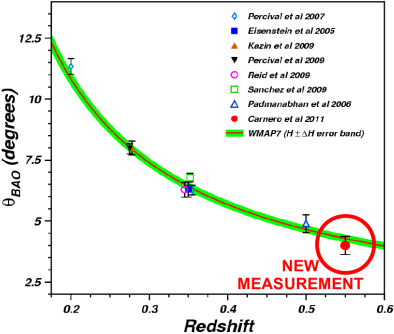
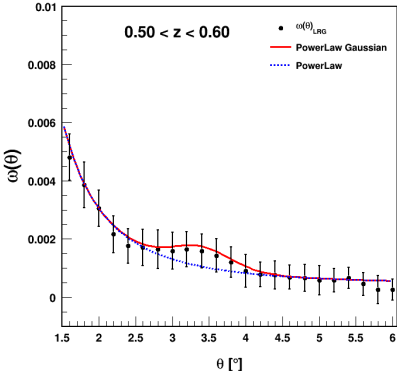
$\omega(\theta)$  con diferente photoz y con parametrización PLG dentro del 2%.

## Selección y máscara

Hemos variado los cortes de selección y de máscara, encontrando una dispersión de  $\sim 2\%$  en  $\theta_{FIT}$

Errores sistemáticos	$\Delta\theta_{BAO}$
Parametrización	1%
Error de photoz	5%
RSD y bias	1%
Teoría	1%
Efecto de proyección	1%
Algoritmo reconstrucción photoz	2%
Selección de la muestra	2.5%
Máscara	2%

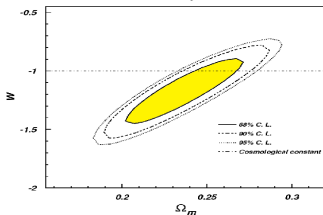
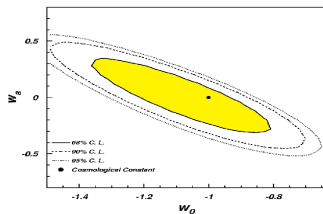
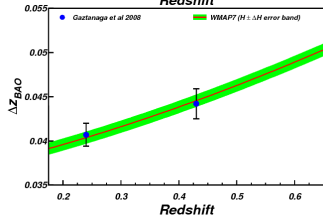
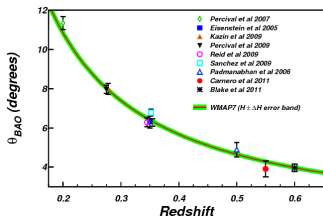
# Método PLG a $z=0.55$



$$\theta_{FIT} \quad 3.55 \pm 0.17 \quad || \quad S/N \quad \sim 2.6\sigma$$

$$\chi^2/n_{dof} \quad 0.6 \quad || \quad \theta_{BAO}(z = 0.55) \quad 3.98 \pm 0.33$$

# Resultados



Combinación de todas las medidas de BAO (angular y radial)

excepto la medida de Wigglez

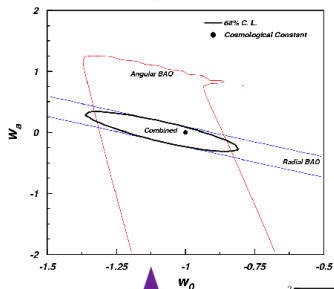
Resultado compatible con que la energía oscura sea  $\Lambda$

$$w_D = -1.03 \pm 0.16$$

$$w_a = 0.06 \pm 0.22$$

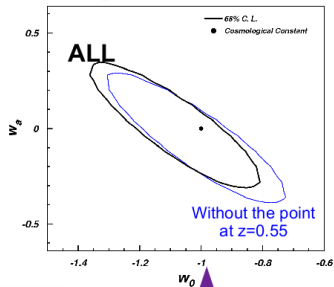
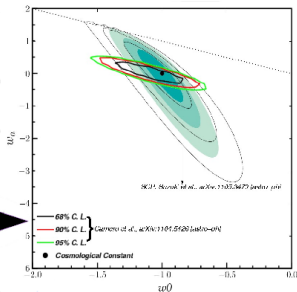
$$\Omega_M = 0.26 \pm 0.04$$

# Resultados



Contribución radial y angular de las BAO

Comparación con Supernovas



Contribución de la medida a  $z=0.55$

# Estudio adicional: el ritmo de crecimiento

Measuring growth of structure

$$f \equiv \frac{d \ln D(a)}{d \ln a}$$

$$\xi^s(s, \mu) = \xi_0(s)P_0(\mu) + \xi_2(s)P_2(\mu) + \xi_4(s)P_4(\mu)$$



$$\xi_0(r) = (b^2 + 2bf/3 + f^2/5) [\xi(r)]$$

$$\xi_2(r) = (4bf/3 + 4f^2/7) [\xi(r) - \xi'(r)]$$

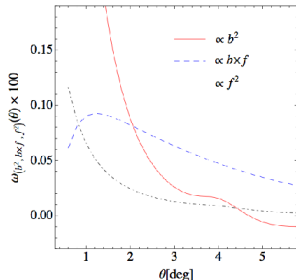
$$\xi_4(r) = (8f^2/35) [\xi(r) + 5/2 \xi'(r) - 7/2 \xi''(r)]$$



$$w(\theta) = p_0(b, f)w_0(\theta) + p_2(b, f)w_2(\theta) + p_4(b, f)w_4(\theta)$$

Collect terms in  $b^2$ ,  $f^2$  and  $bf$

(degenerate with  $\sigma_8(z)$ )

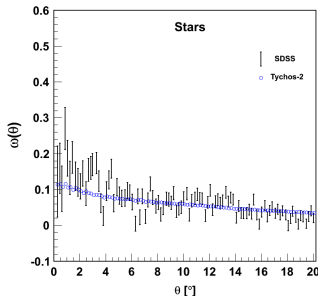




# Estudio adicional: el ritmo de crecimiento

## Sobre la función de correlación a $z = 0.55$

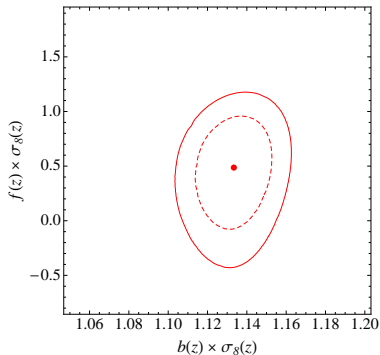
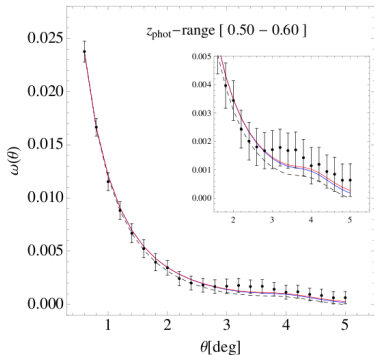
- ▶ Estudiamos el efecto de la contaminación de estrellas.



Descorrelacionados  $\rightarrow w_{obs}(\theta) = (1 - f_*)^2 w_{LRG}(\theta) + f_*^2 w_*(\theta)$

- ▶ Ajustar el valor de  $b$  y  $f(z = 0.55) \sim \Omega_m(z = 0.55)^\gamma$
- ▶ Fijamos el resto de parámetros a la cosmología de WMAP7
- ▶ Ritmo de crecimiento:  $\frac{\partial D}{a} = \frac{D(z)}{a} f(z) = \frac{1+z}{\sigma_8(0)} f(z) \sigma_8(z)$

# Descripción a $z=0.55$

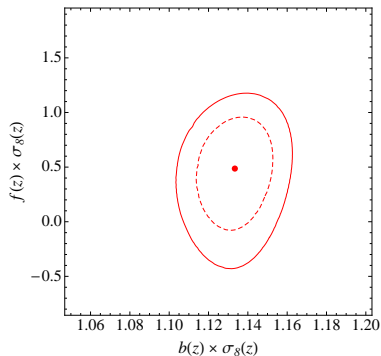
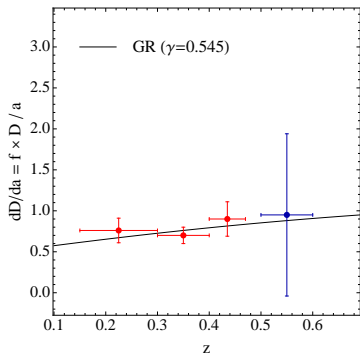



---

$z$	$b$	$f(z = 0.55)$	$\partial D/\partial a$
0.50 – 0.60 ( $f_* = 5\%$ )	$1.86 \pm 0.03$	$0.78 \pm 0.45$	$0.92 \pm 0.93$

---

# Descripción a $z=0.55$




---

$z$	$b$	$f(z = 0.55)$	$\partial D / \partial a$
0.50 – 0.60 ( $f_* = 5\%$ )	$1.86 \pm 0.03$	$0.78 \pm 0.45$	$0.92 \pm 0.93$

---

# Índice

El modelo estándar cosmológico:  $\Lambda$ CDM

Oscilaciones Acústicas de Bariones

El método PLG

Aplicación a una simulación de DES

Análisis de SDSS-DR7

Conclusiones del trabajo

# Conclusiones

- ▶ Presentación de un método de análisis nuevo, aplicable a cartografiados de galaxias. Especialmente diseñado para cartografiados fotométricos.
- ▶ Uso de la señal de las Oscilaciones Acústicas de Bariones como observable cosmológico, trabajando únicamente con magnitudes observables ( $z$ ,  $\Delta\theta_{gal}$ ).
- ▶ Calibrado con predicciones teóricas: método robusto y preciso.
- ▶ Probado en una simulación de N-cuerpos con las características observacionales del cartografiado Dark Energy Survey. De acuerdo con las predicciones del proyecto.
- ▶ Aplicado a los datos fotométricos del cartografiado Sloan Digital Sky Survey, detectando la escala acústica a  $z = 0.55$ , de acuerdo con el modelo estándar.
- ▶ Esta es la primera medida de BAO en la distribución angular de galaxias, demostrando su aplicabilidad a cartografiados fotométricos de galaxias venideros.
- ▶ Primera medida del factor de crecimiento con datos fotométricos.