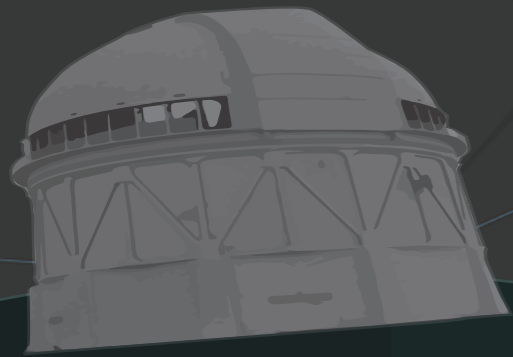


MEDIDA DE PARÁMETROS COSMOLÓGICOS A PARTIR DE LOS DATOS DE DARK ENERGY SURVEY

MEASUREMENT OF COSMOLOGICAL
PARAMETERS USING DATA FROM
DARK ENERGY SURVEY



FRANCISCO JAVIER
SÁNCHEZ LÓPEZ

TRABAJO DIRIGIDO POR:
DR. EUSEBIO SÁNCHEZ



Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

- **Motivación y objetivos**
- **Estudio de la estructura a gran escala del Universo:**
 - **Medida de la escalas de oscilaciones acústicas de bariones**
 - **Medida de la fractalidad: Prueba del Principio Cosmológico**
- **Medida de parámetros cosmológicos en simulaciones**
- **Medida de parámetros cosmológicos en datos de DES**
- **Conclusiones**

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

HUBBLE: UNIVERSO EN EXPANSIÓN

NUMEROSAS PRUEBAS DE LA PRESENCIA DE MATERIA OSCURA

DÉCADAS CON MODELOS DE MATERIA OSCURA Y UNIVERSO EN EXPANSIÓN

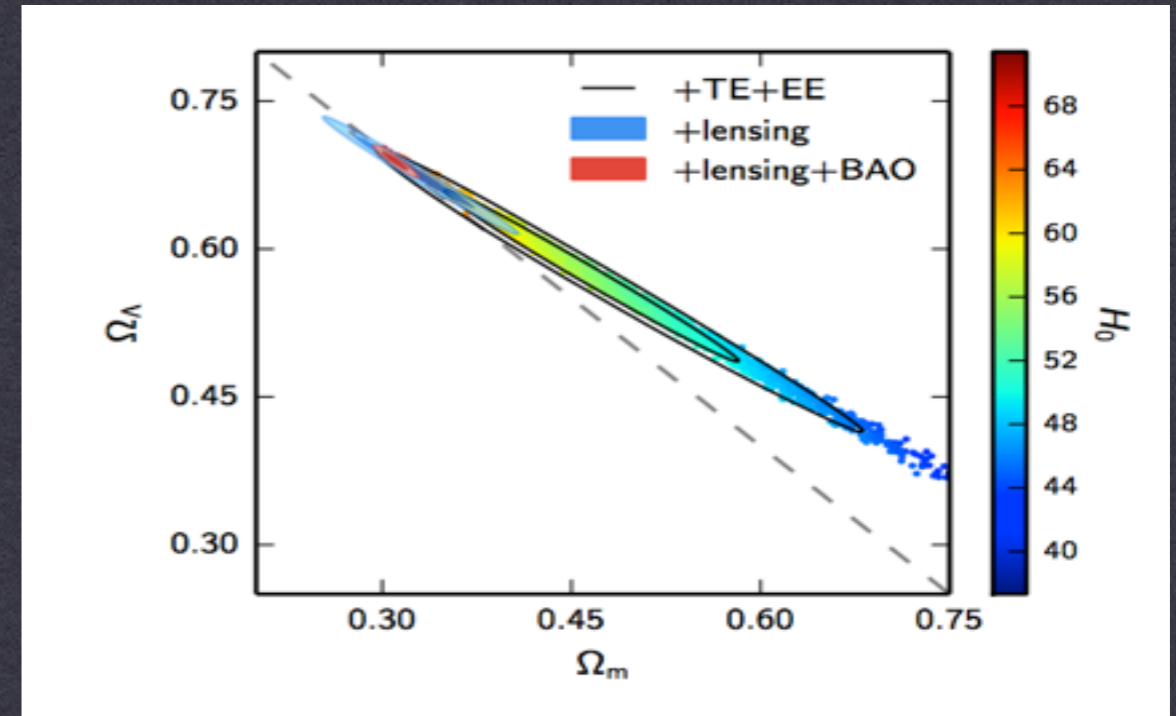
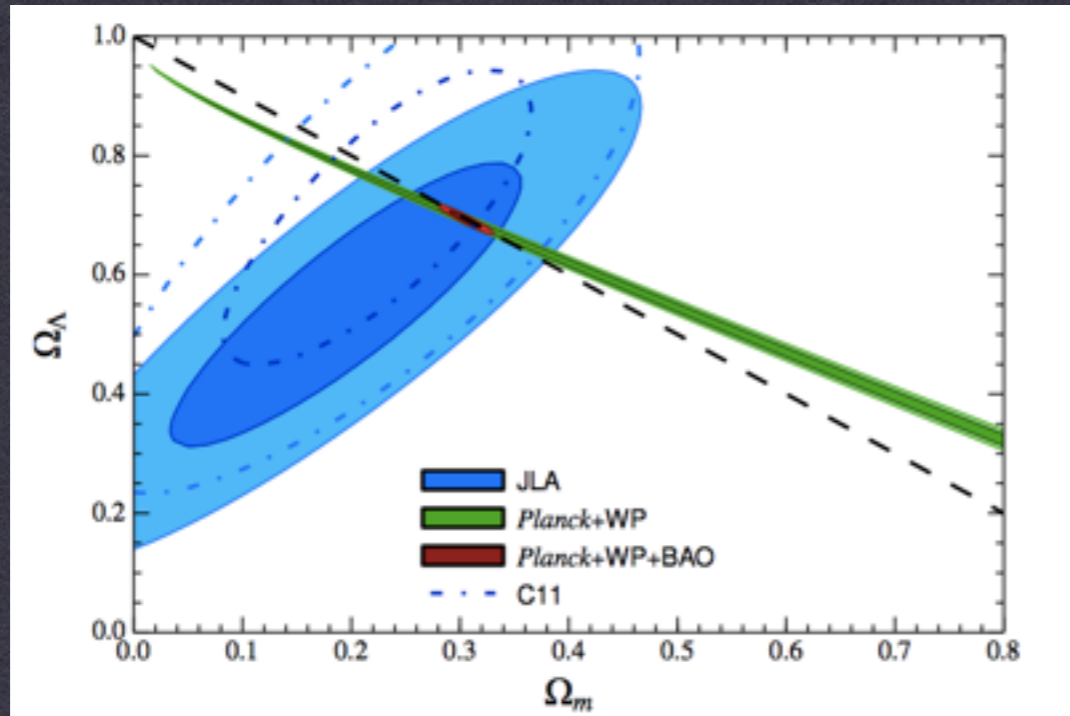
1998 OBSERVACIONES DE SUPERNOVAS TIPO IA: UNIVERSO EN EXPANSIÓN

ACELERADA. NECESIDAD DE AÑADIR AL MODELO **ENERGÍA OSCURA**



MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

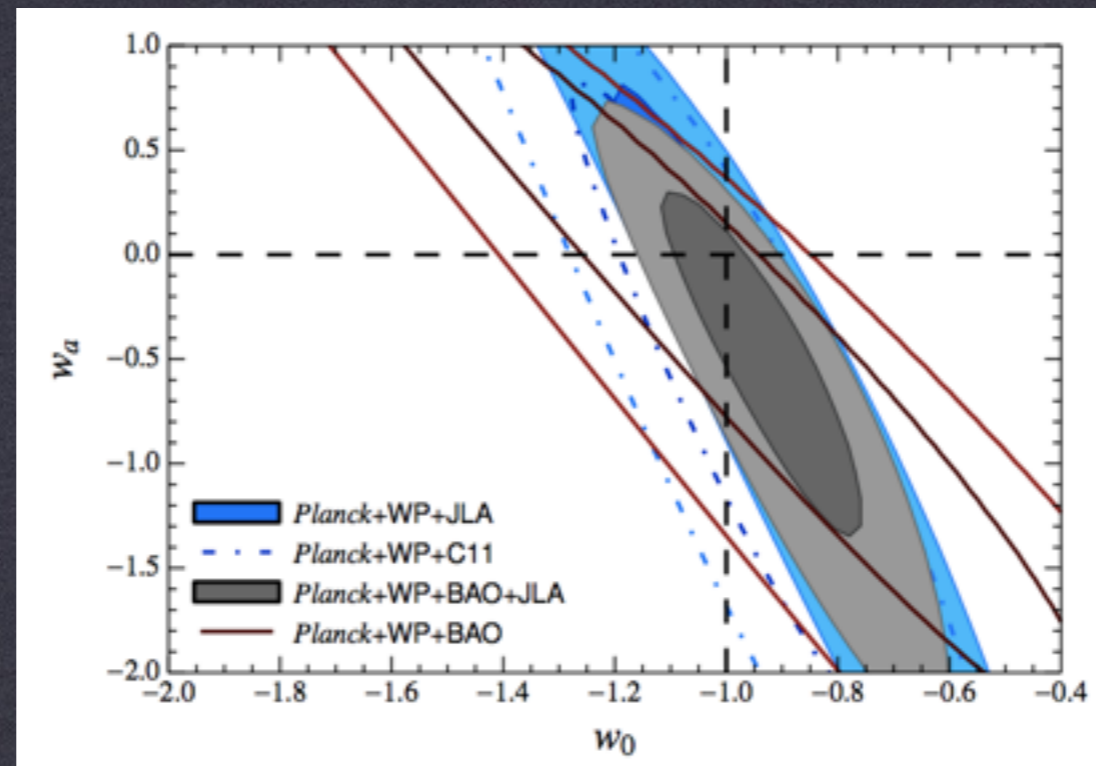
HOY EN DÍA CONOCEMOS MUCHO MEJOR LA CANTIDAD DE ENERGÍA OSCURA



SIN EMBARGO NO CONOCEMOS BIEN SU NATURALEZA, SU EVOLUCIÓN:

$$w = \frac{p}{\rho}$$

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$



MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

OBJETIVO: DESARROLLAR TÉCNICAS PARA ESTUDIAR LA ENERGÍA OSCURA

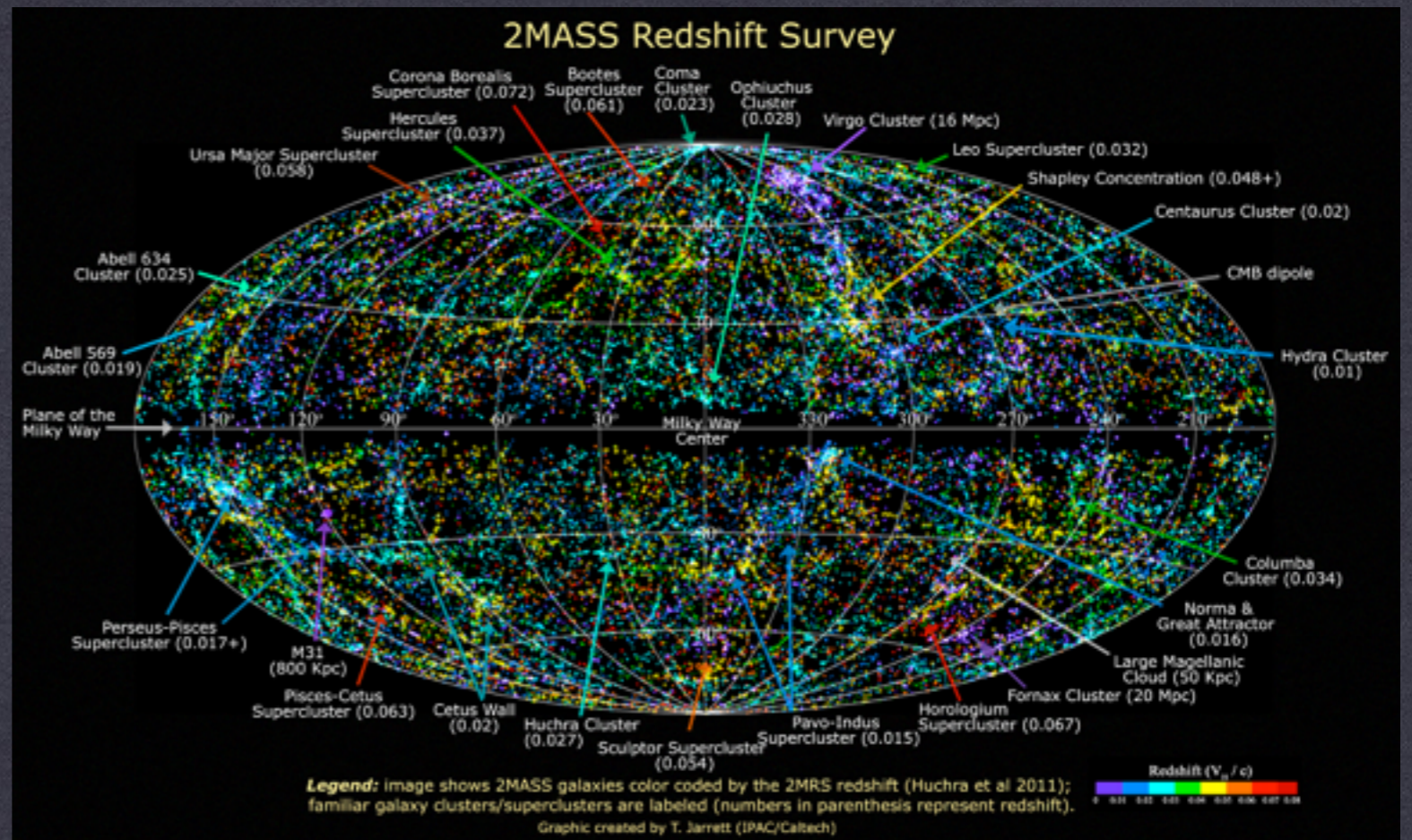
NUESTRA PRUEBA OBSERVACIONAL: LA ESTRUCTURA A GRAN ESCALA DEL UNIVERSO

ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA A GRAN ESCALA DEL UNIVERSO

ESTRUCTURA A GRAN ESCALA (LSS)

Interesados en fluctuaciones de densidad

$$\delta = \rho / \bar{\rho} - 1$$



Y en gran escala (Gravedad) pero sólo observamos galaxias que se pueden acumular de una forma diferente a la materia oscura predominante.

Relacionamos estas fluctuaciones mediante el **bias**

$$\delta_G = b(k, z) \delta_M$$

FUNCIÓN DE CORRELACIÓN

Usamos herramientas estadísticas para extraer información:

Función de correlación

$$\langle n_{pairs} \rangle = \bar{n}^2 [1 + \xi(\vec{r})] dV_1 dV_2$$

Estimamos usando el estimador de Landy & Szalay

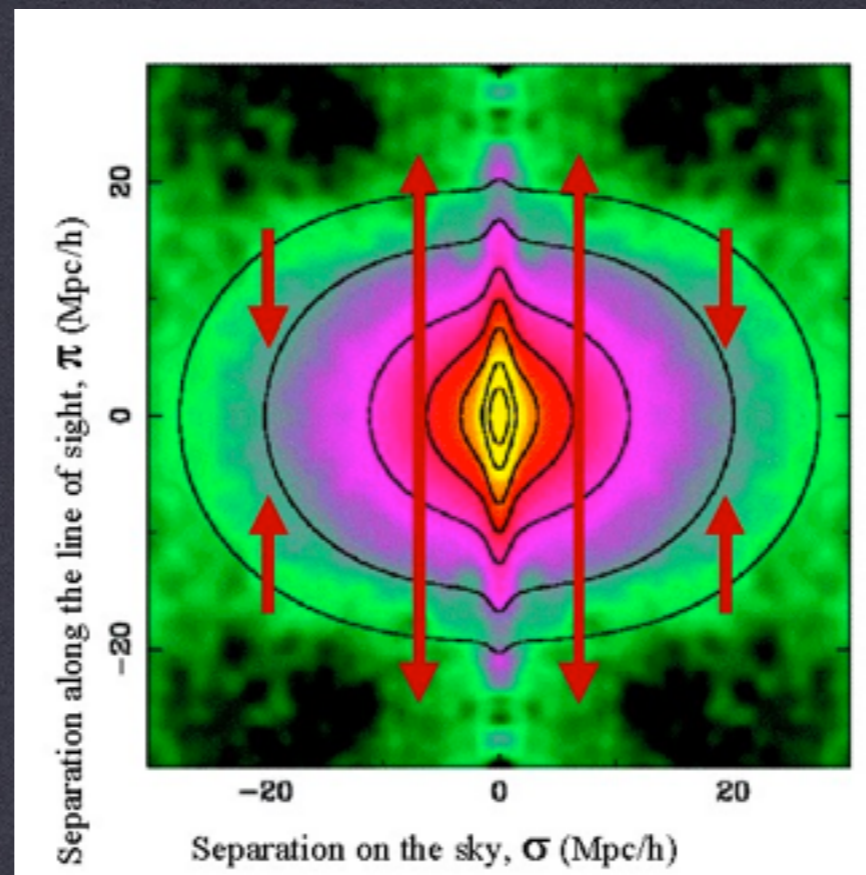
$$\xi(r) = \frac{DD(r) - 2DR(r) + RR(r)}{RR(r)}$$

Se cuentan pares a distancia r y se compara con un catálogo aleatorio en el que se introducen los efectos de observación (huecos)

ESTRUCTURA A GRAN ESCALA (LSS)

No observamos distancias, observamos corrimiento al rojo: RSD

Las RSD generan una anisotropía en la función de correlación

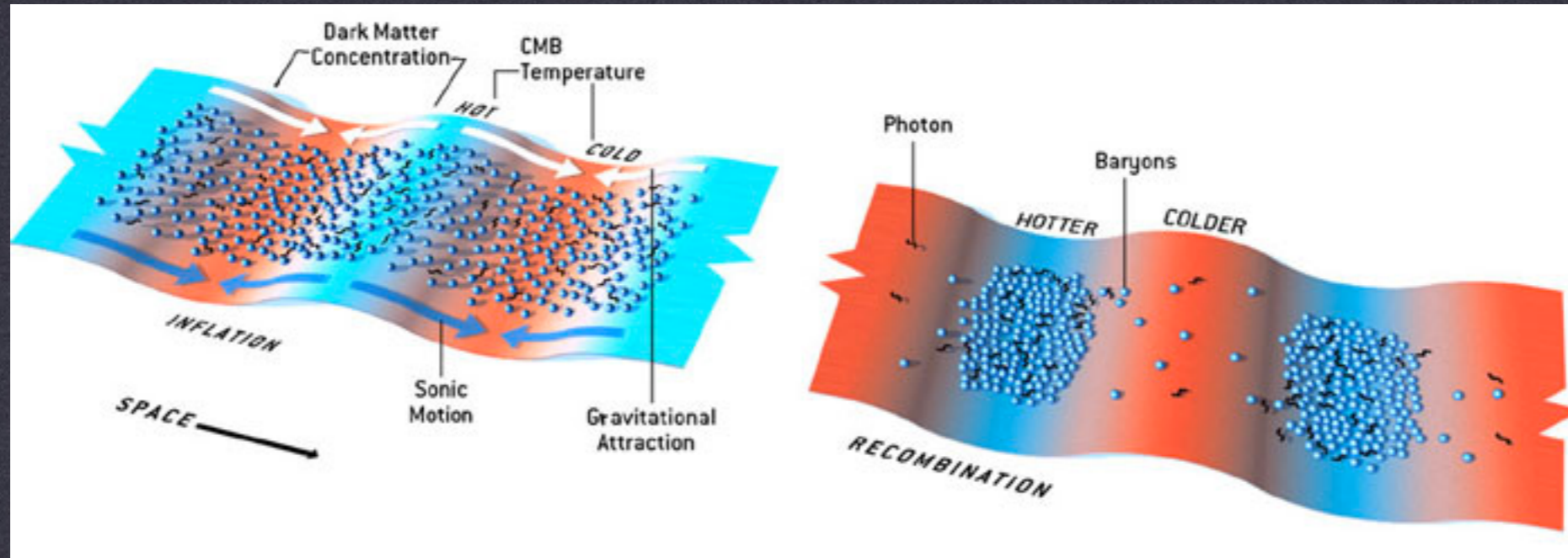


Dirección de la línea de visión distinta de la dirección angular

Cambia la forma de la función de correlación

Nos permite extraer información cosmológica en escalas pequeñas

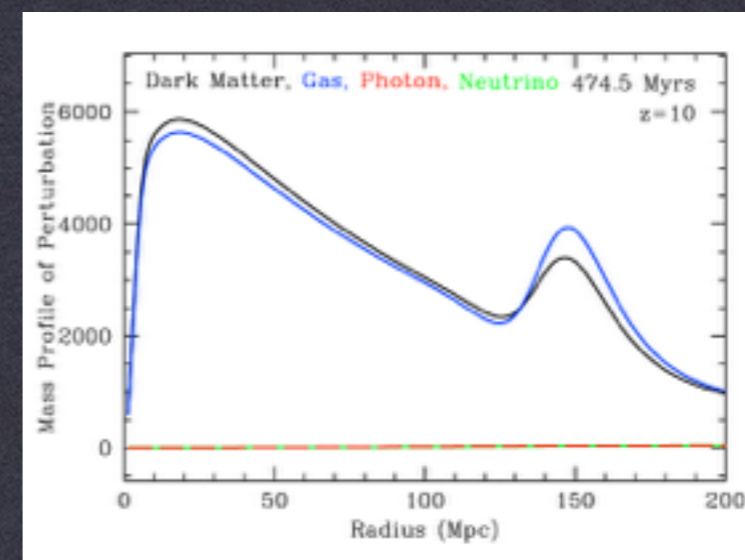
OSCILACIONES ACÚSTICAS DE BARIONES (BAO)



- Acoplo de fotones y bariones.
Competición de dos fuerzas:
- Presión de radiación
 - Atracción gravitatoria

OSCILACIONES ACÚSTICAS

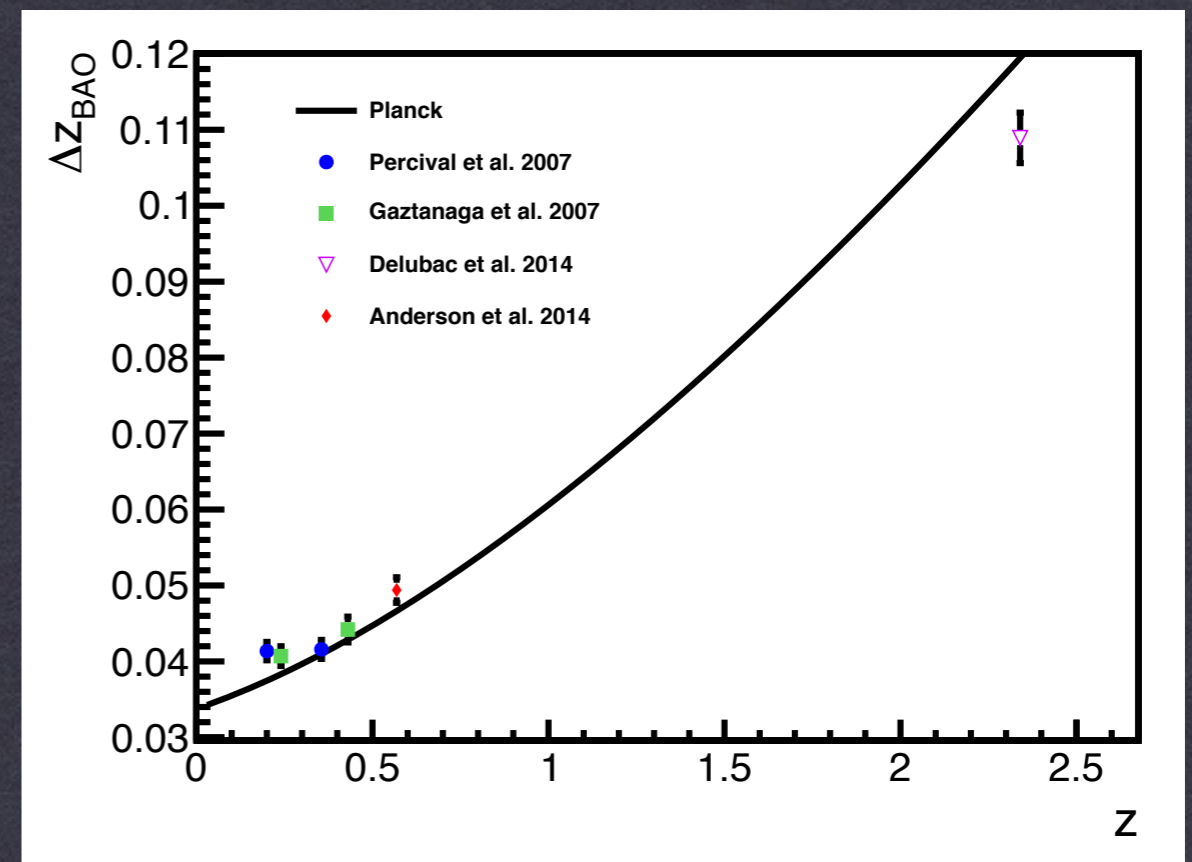
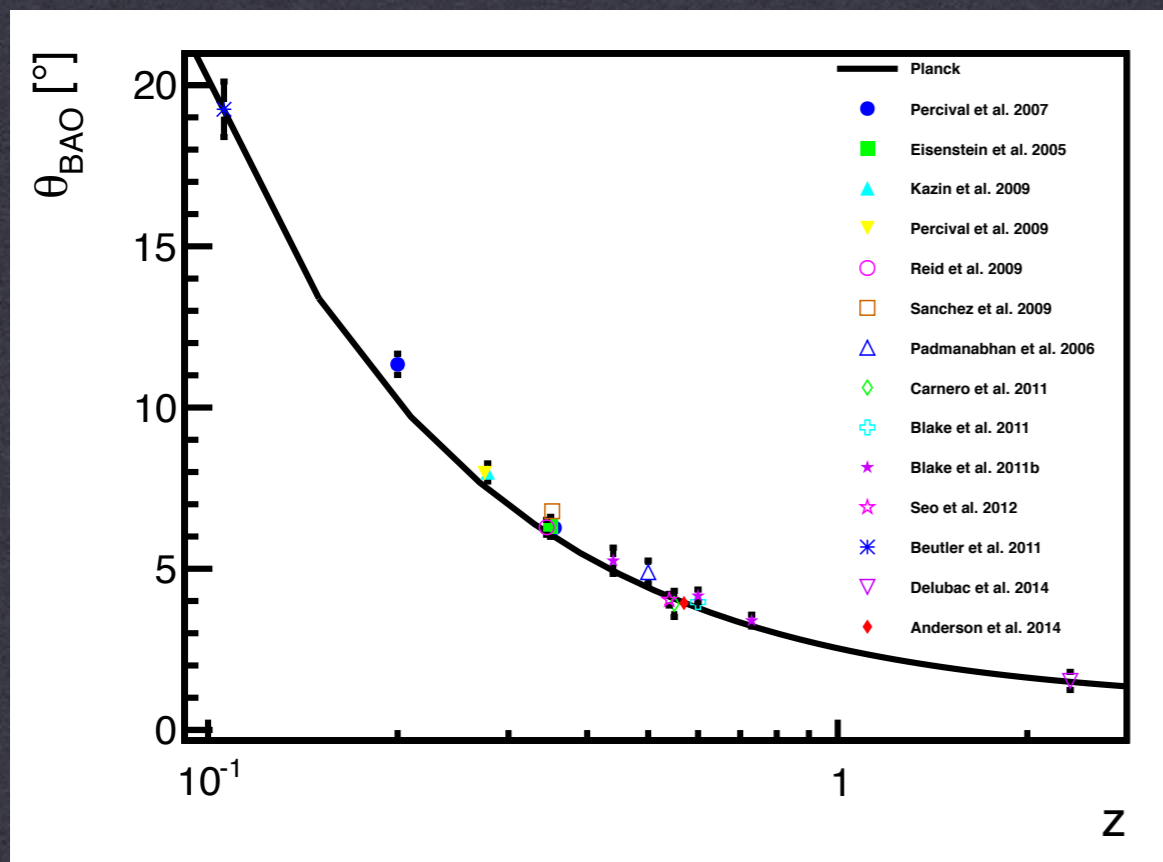
Una vez se produce el desacoplo
quedan “congeladas”
(regla estándar)
y las sobredensidades aumentan



OSCILACIONES ACÚSTICAS DE BARIONES (BAO)

$$\theta_{BAO}(z) = \frac{r_s}{d_C}(1+z) \quad \Delta z_{BAO}(z) = \frac{r_s H(z)}{c}$$

$$H(z, \Omega_i); d_C(z, \Omega_i); r_s(\Omega_i)$$



Regla estándar, prueba precisa de la energía oscura
 Da información cosmológica a escalas grandes

ESTRUCTURA A GRAN ESCALA (LSS)

Dos métodos para extracción de información cosmológica:

- **RSD: Escalas pequeñas, requiere precisión en la posición 3D**

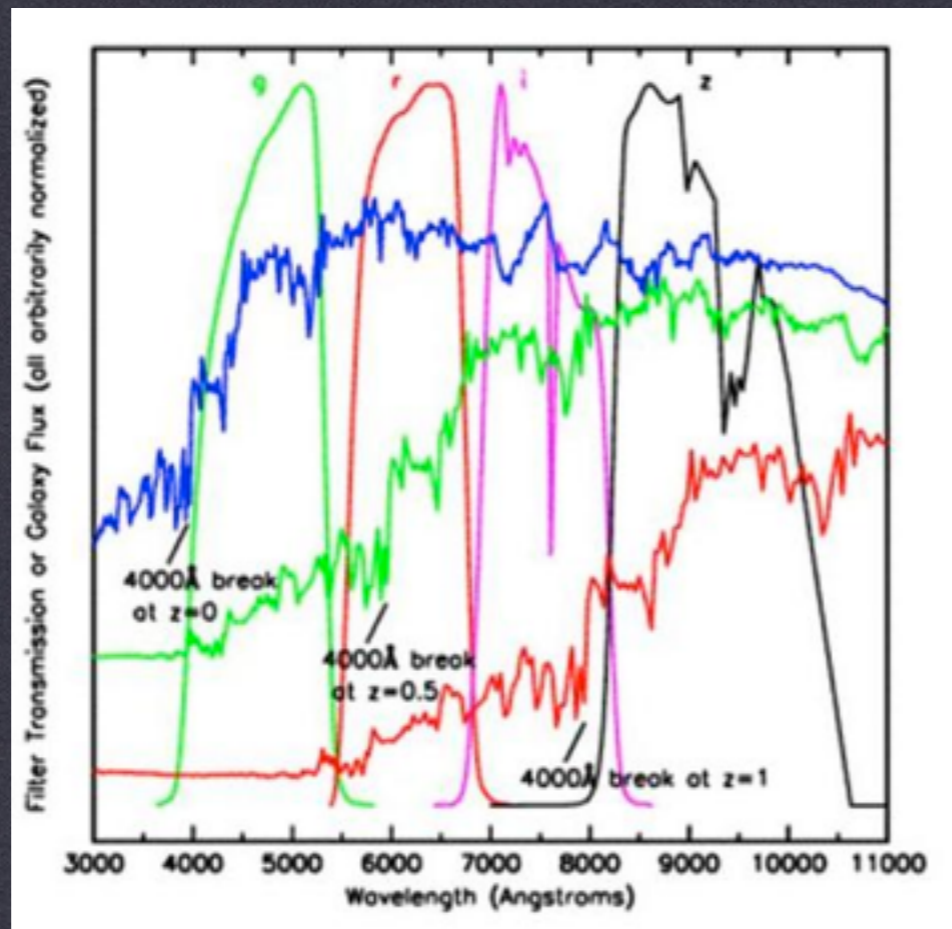
- **BAO: Escalas grandes, requiere gran volumen**

- **BAO: Se puede determinar en la dirección de la línea de visión, en la angular y en 3D**

DETERMINACIÓN DE DISTANCIAS

Espectroscopía: Gran precisión, baja estadística

Fotometría: Menos precisión, más estadística



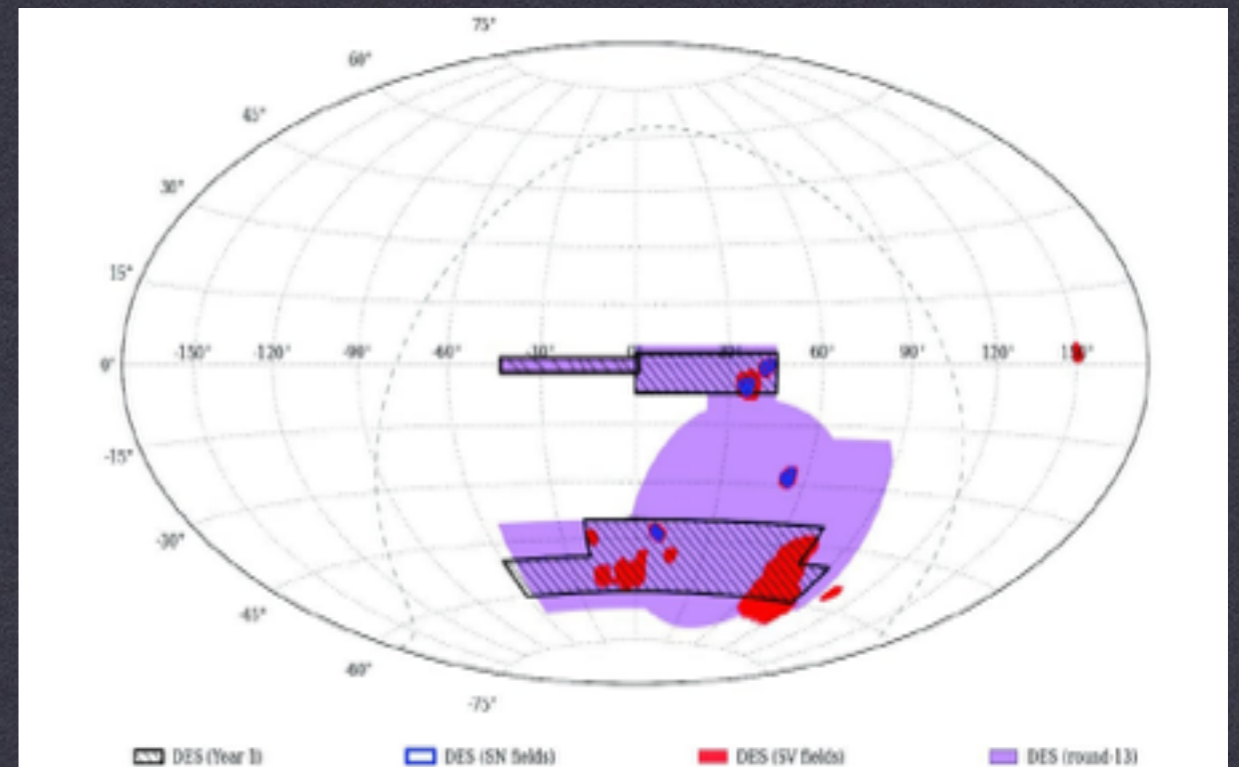
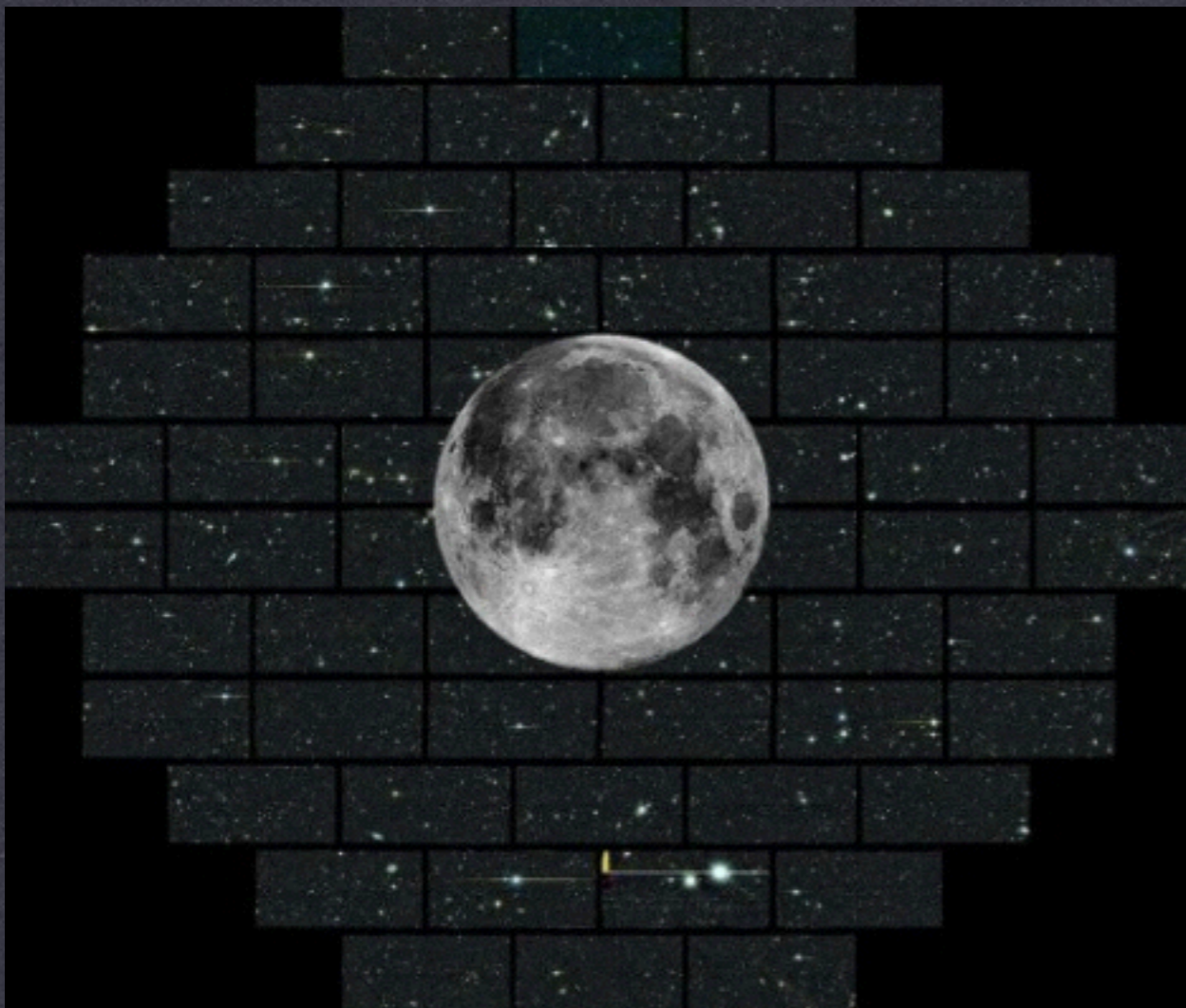
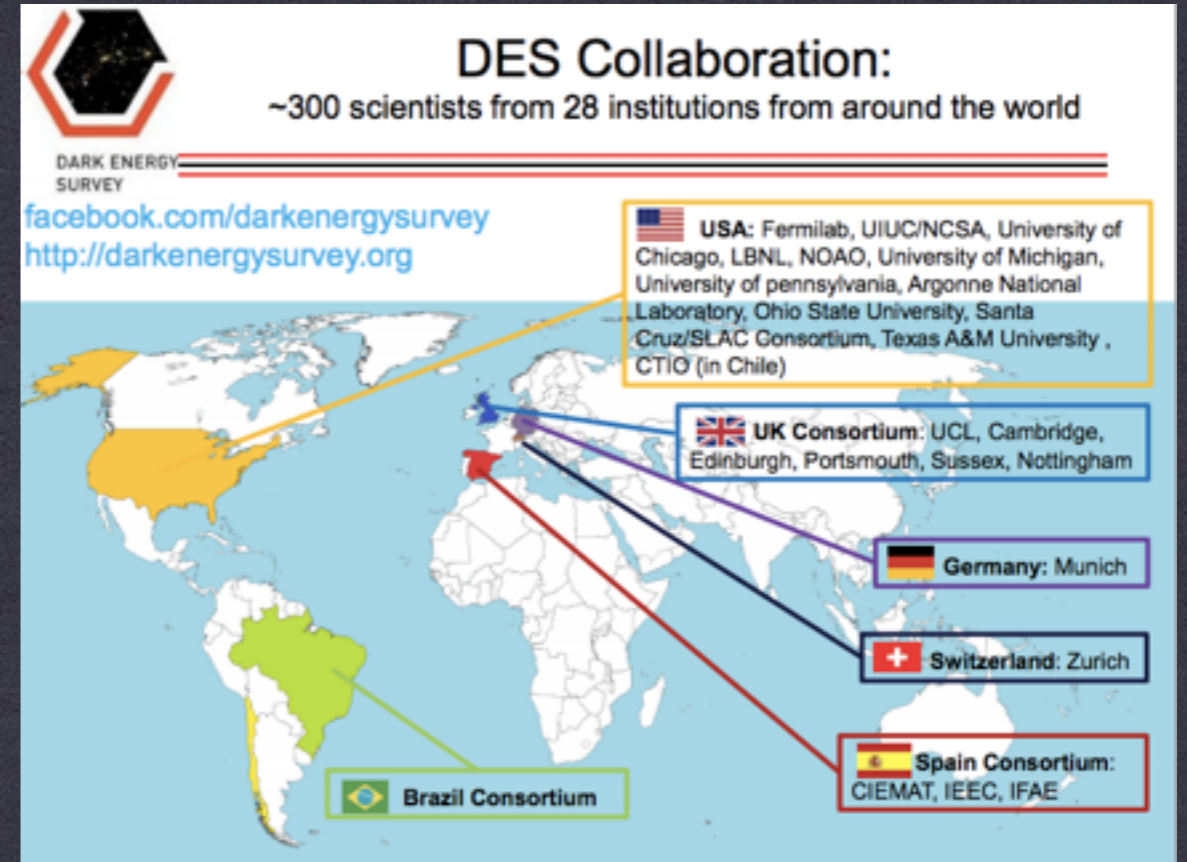
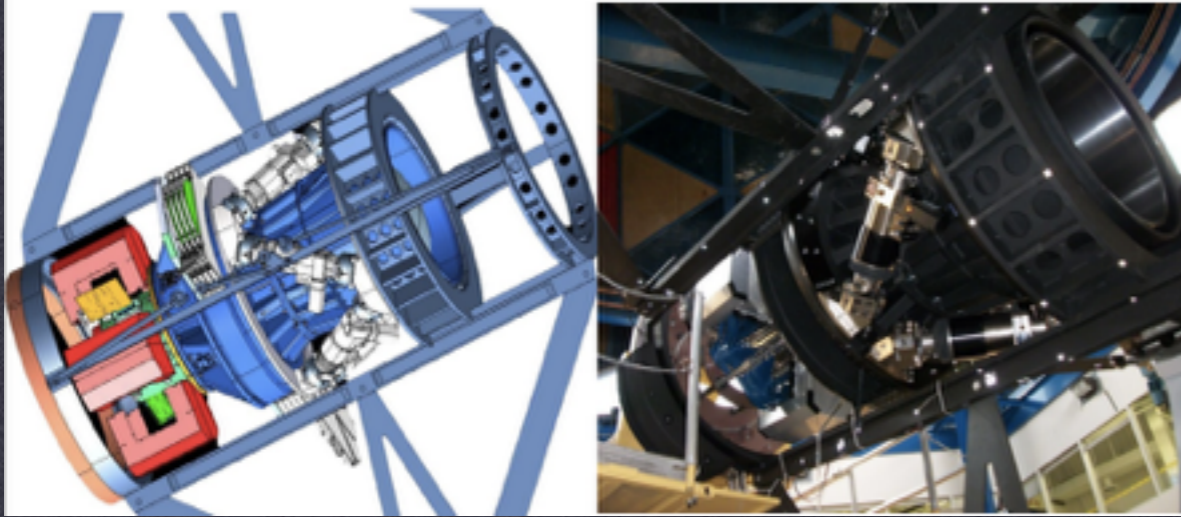
Útil cuando necesitamos mucho volumen y poca precisión en la línea de visión: BAO angular

$$\omega(\theta) = \int_0^\infty dz_1 \phi(z_1) \int_0^\infty dz_2 \phi(z_2) \xi(\theta, z_1, z_2)$$

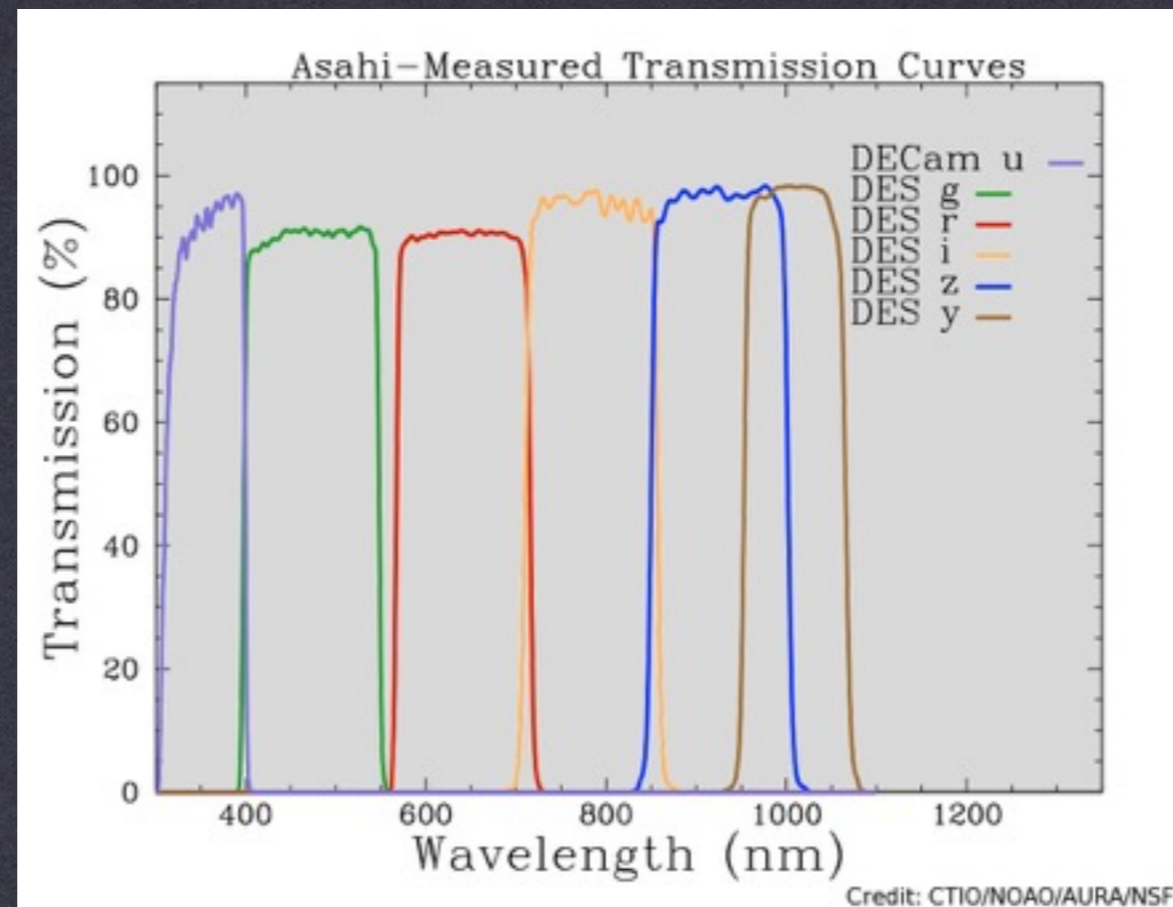
Relaciona el z fotométrico y el espectroscópico

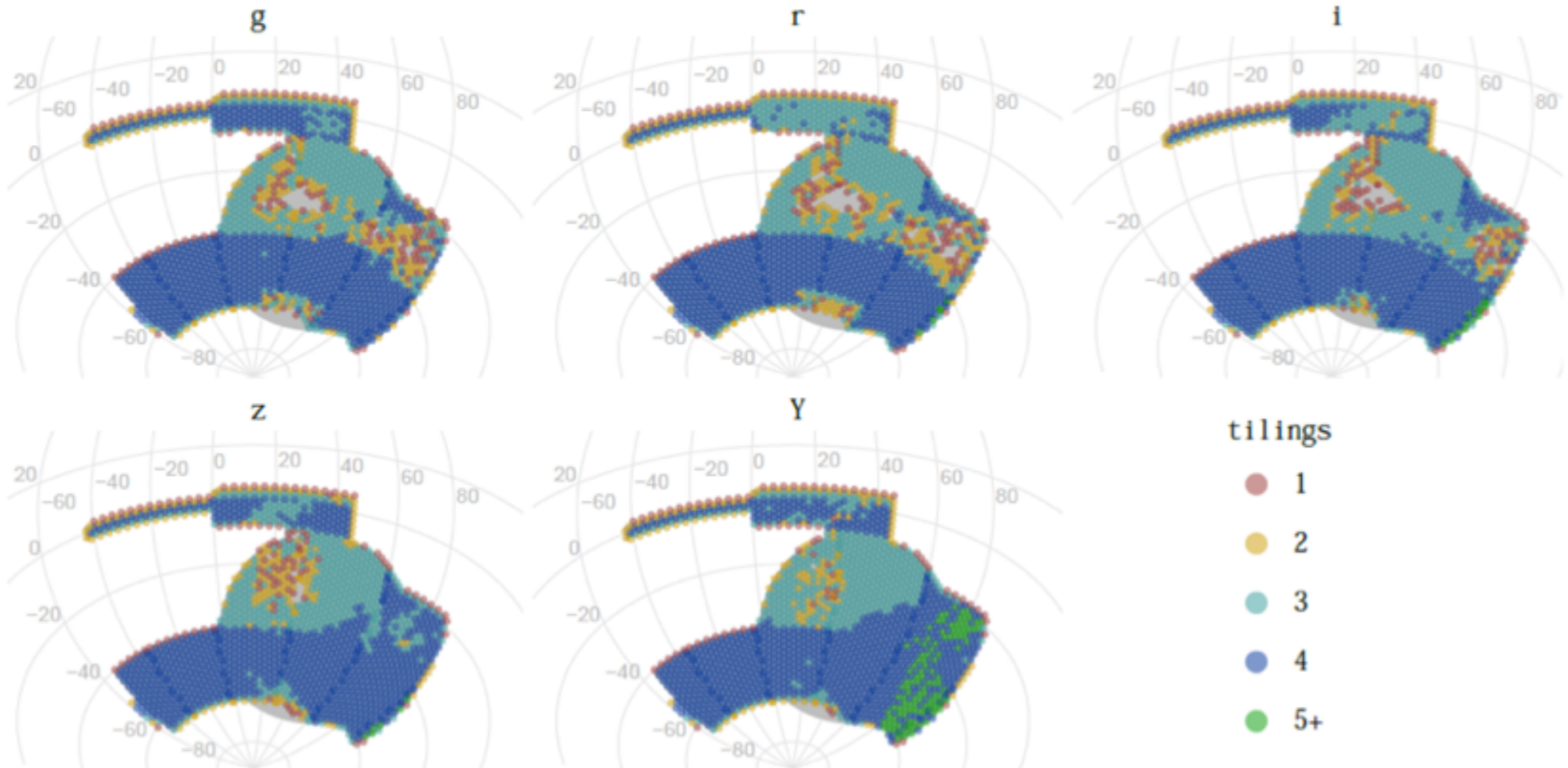
DARK ENERGY SURVEY (DES)





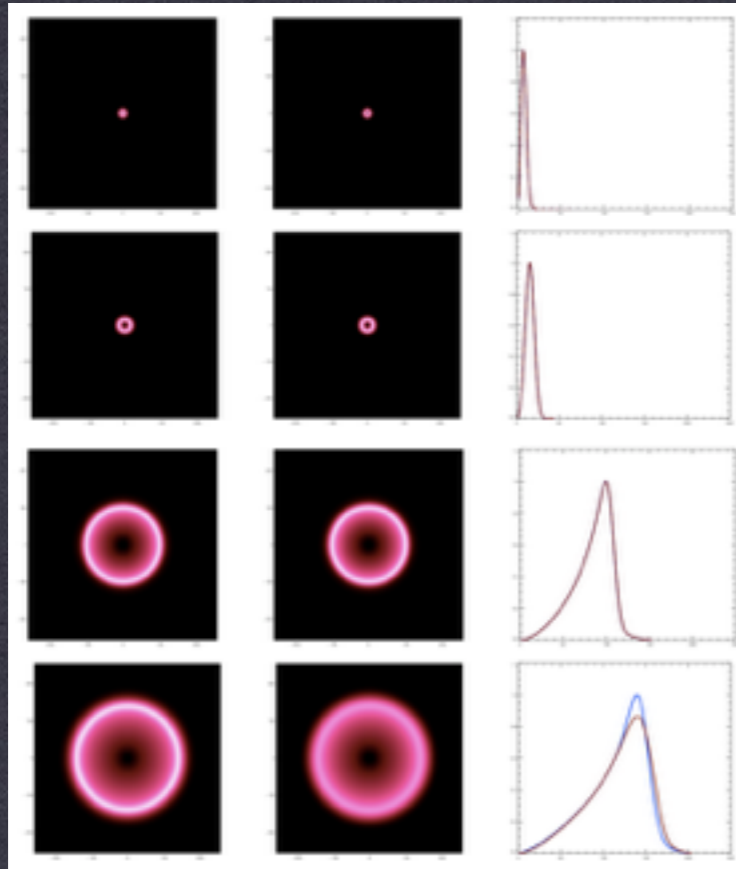
DES



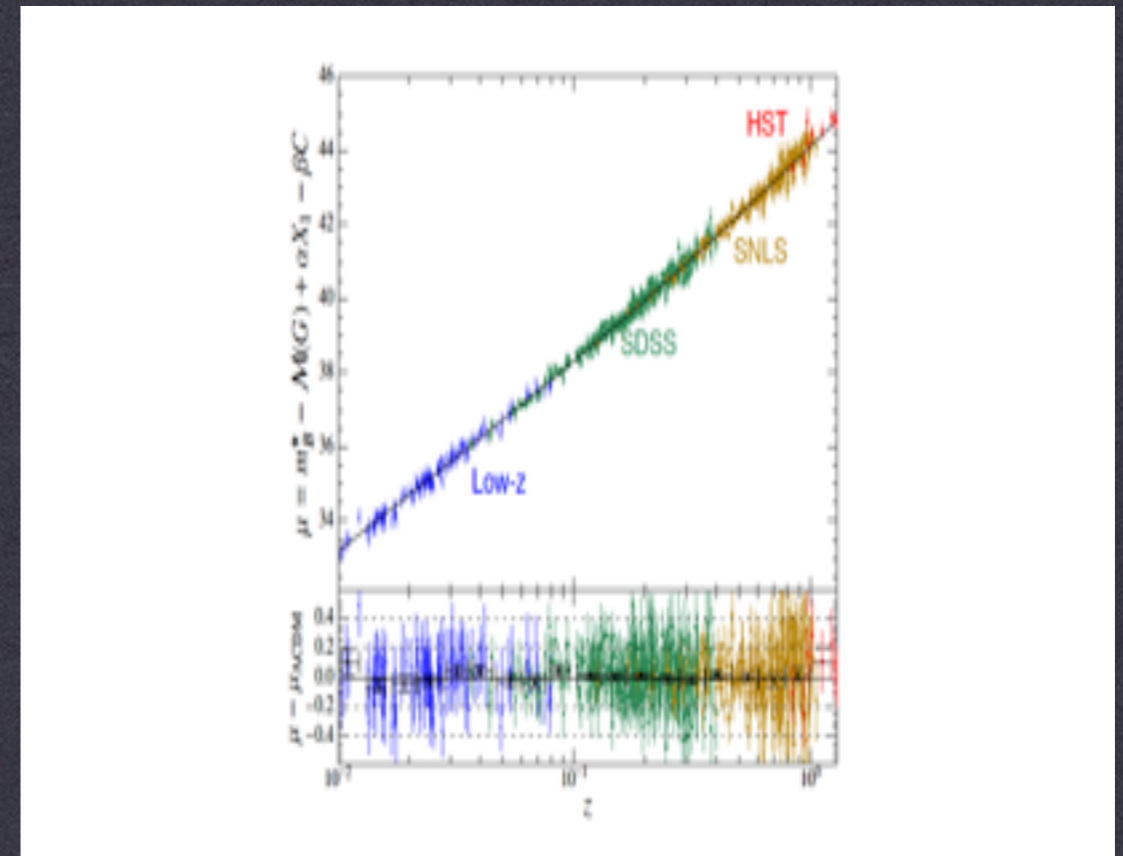


DES

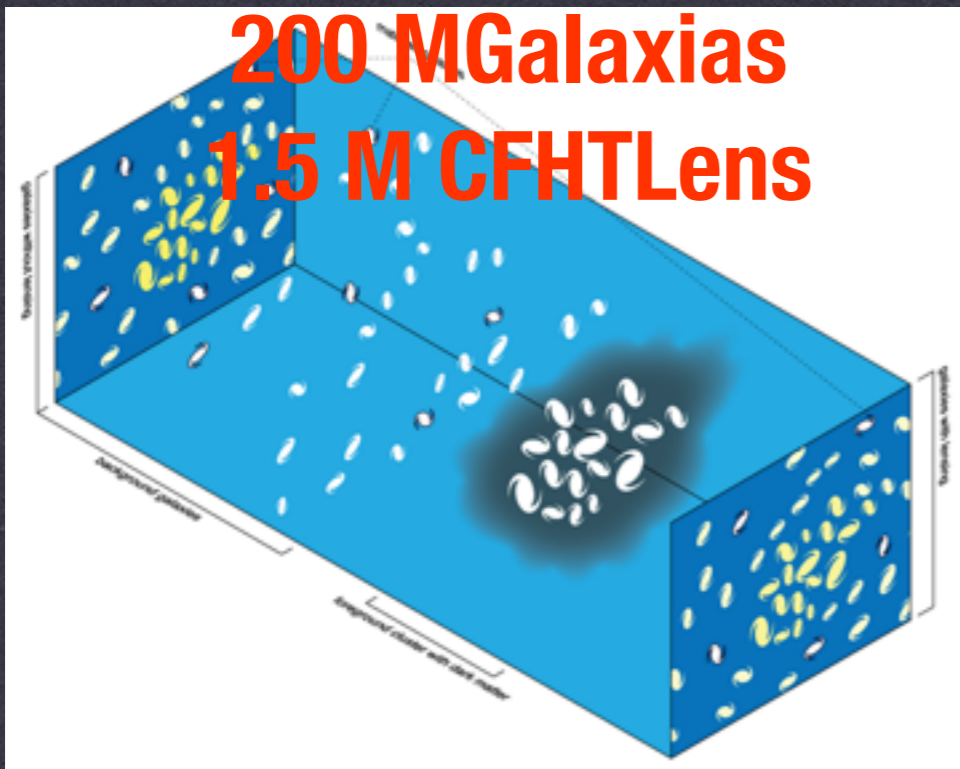
300 MGalaxias -1.5 BOSS



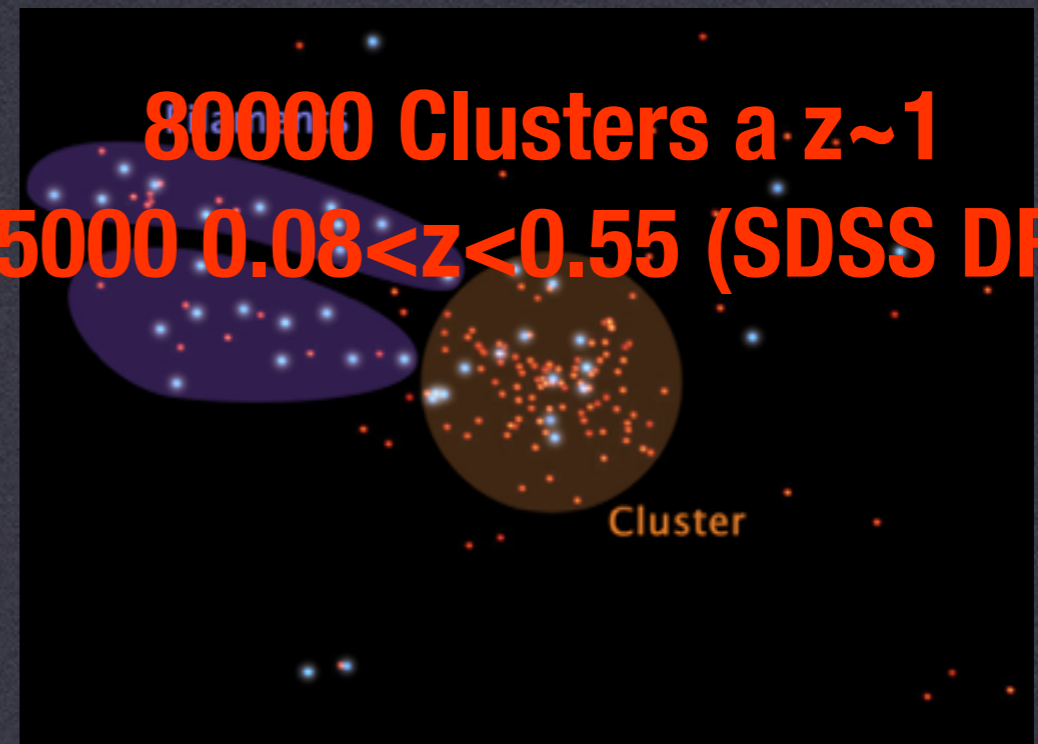
3000 Supernovas (500 SNLS)



200 MGalaxias
1.5 M CFHTLens



80000 Clusters at $z \sim 1$
25000 $0.08 < z < 0.55$ (SDSS DR8)



EN ESTA TESIS SE DESARROLLAN:

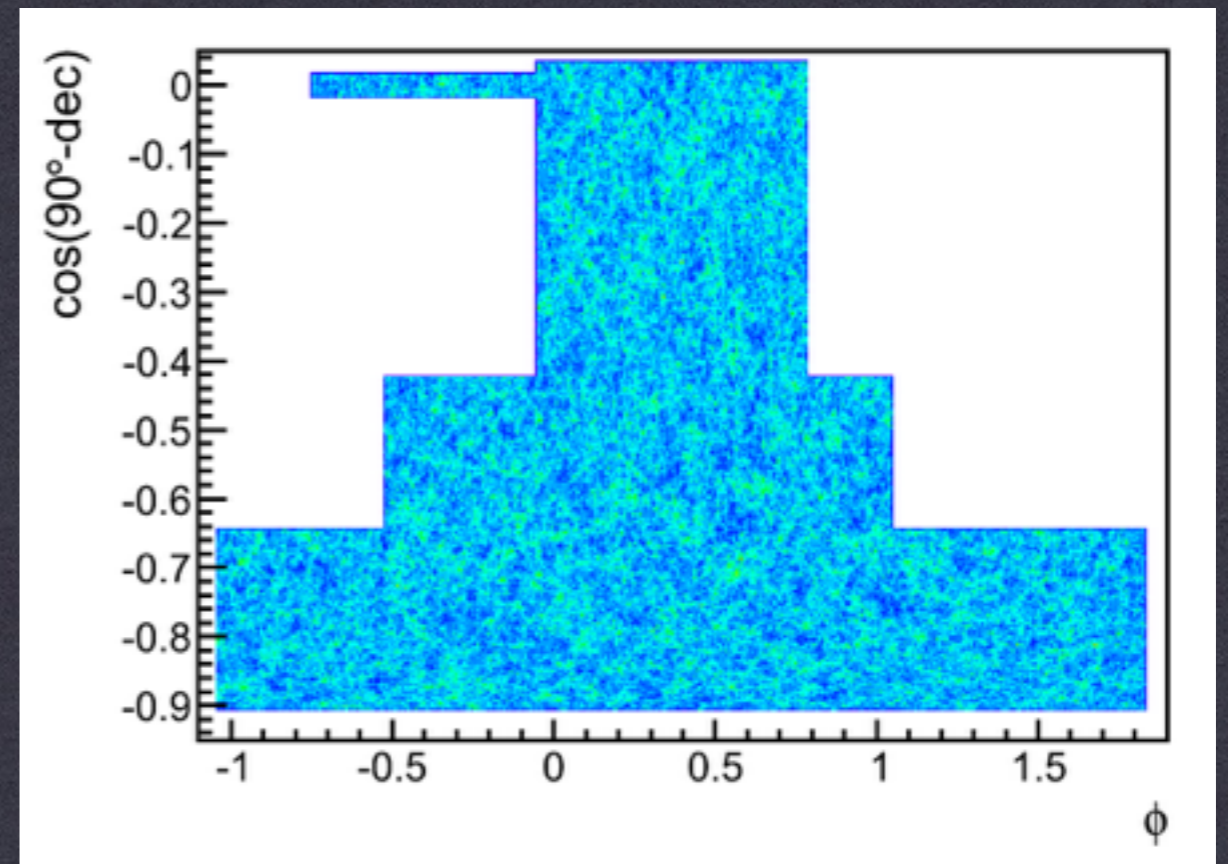
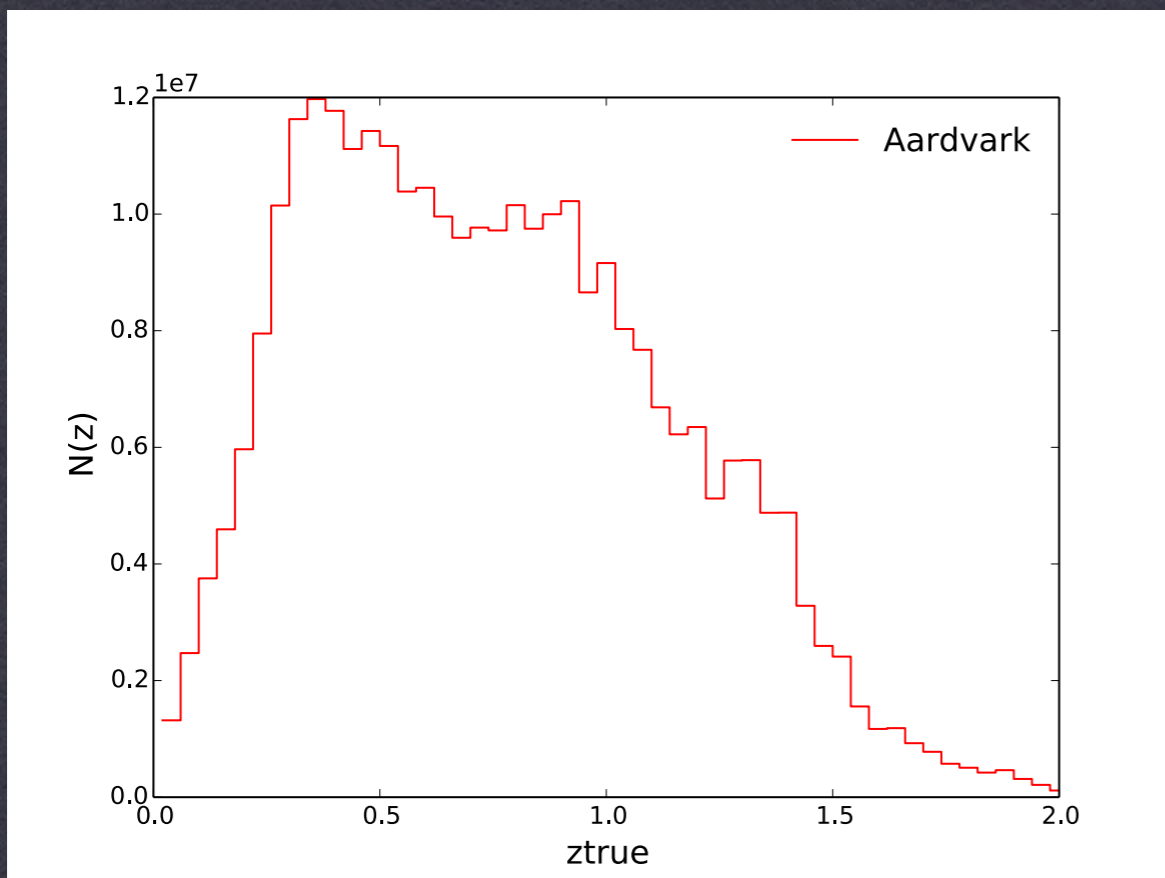
- **Método de medida BAO angular en DES**
- **Método de medida BAO en la línea de visión (No se puede hacer en DES)**
- **Medida de bias y parámetros cosmológicos a escalas pequeñas en cartografiados fotométricos (Otro canal más distinto de los 4 mencionados anteriormente)**

MEDIDA DE BAO ANGULAR USANDO CÓDIGOS FOTOMÉTRICOS CON PDF

BAO ANGULAR EN DES

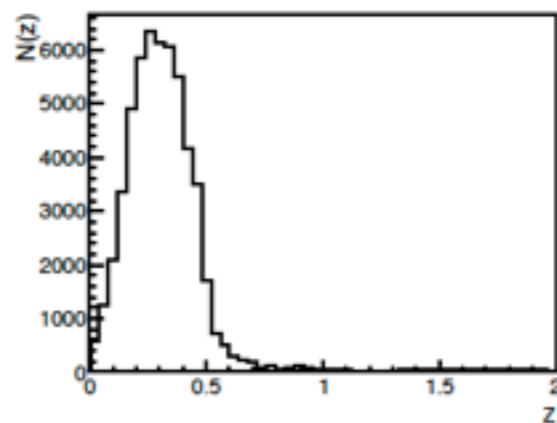
Blind Cosmology Challenge (BCC): Los distintos grupos de DES son provistos de simulaciones cuya cosmología es desconocida.
Una vez medidos, se desvela la cosmología subyacente.

10000 grados cuadrados. Incluye los 5000 de DES ¡300 MGalaxias!
Magnitudes, formas, magnificación cósmica, estrellas...
Diversos algoritmos fotométricos. Usamos ArborZ (Gerdes et al)

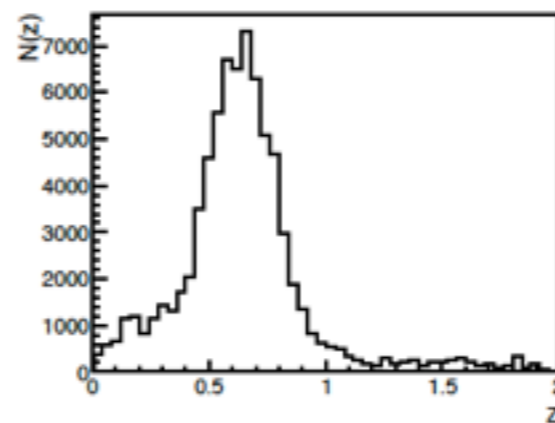


BAO ANGULAR EN DES

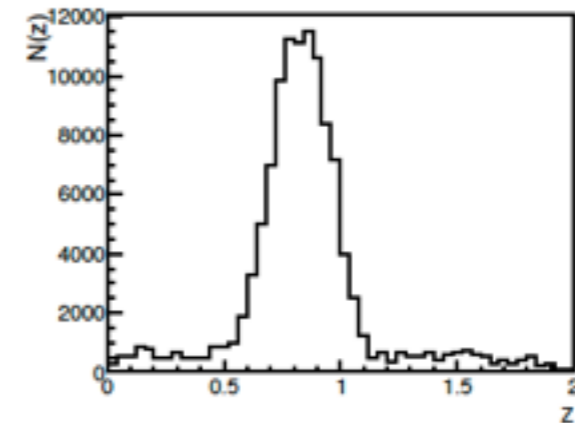
Análisis de BAO: Tantas capas independientes como se puedan pero lo suficientemente grandes como tener buena estadística.



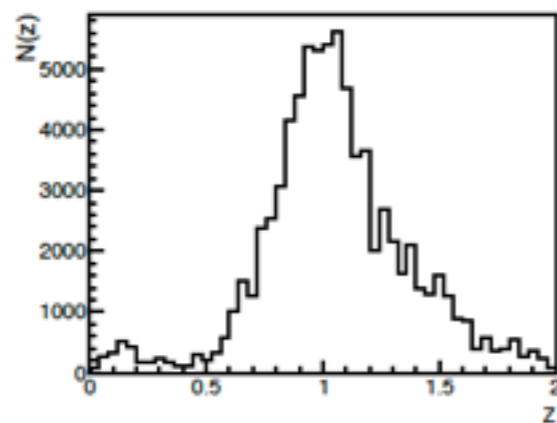
$0.30 < z_{true} < 0.34$



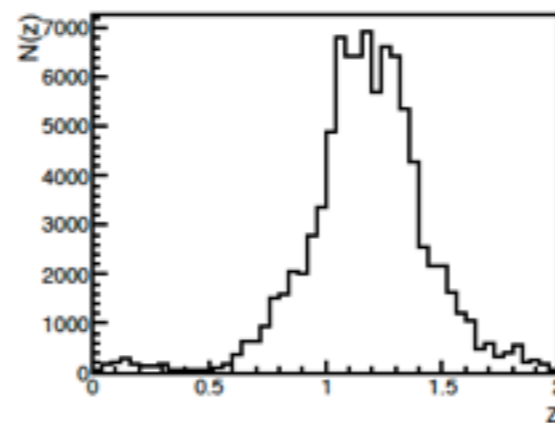
$0.62 < z_{true} < 0.66$



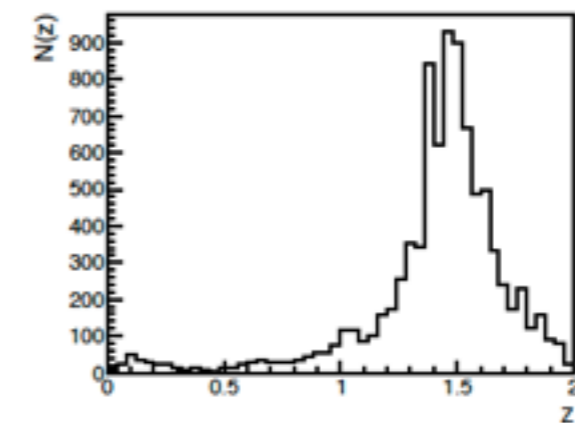
$0.82 < z_{true} < 0.86$



$1.02 < z_{true} < 1.06$



$1.18 < z_{true} < 1.22$



$1.38 < z_{true} < 1.42$

BAO ANGULAR EN DES

Análisis de BAO: Tantas capas independientes como se puedan pero lo suficientemente grandes como tener buena estadística.

CAPAS ÓPTIMAS:

0.2-0.4;

0.4-0.55;

0.55-0.7;

0.7-0.85;

0.85-1.0;

1.0-1.2;

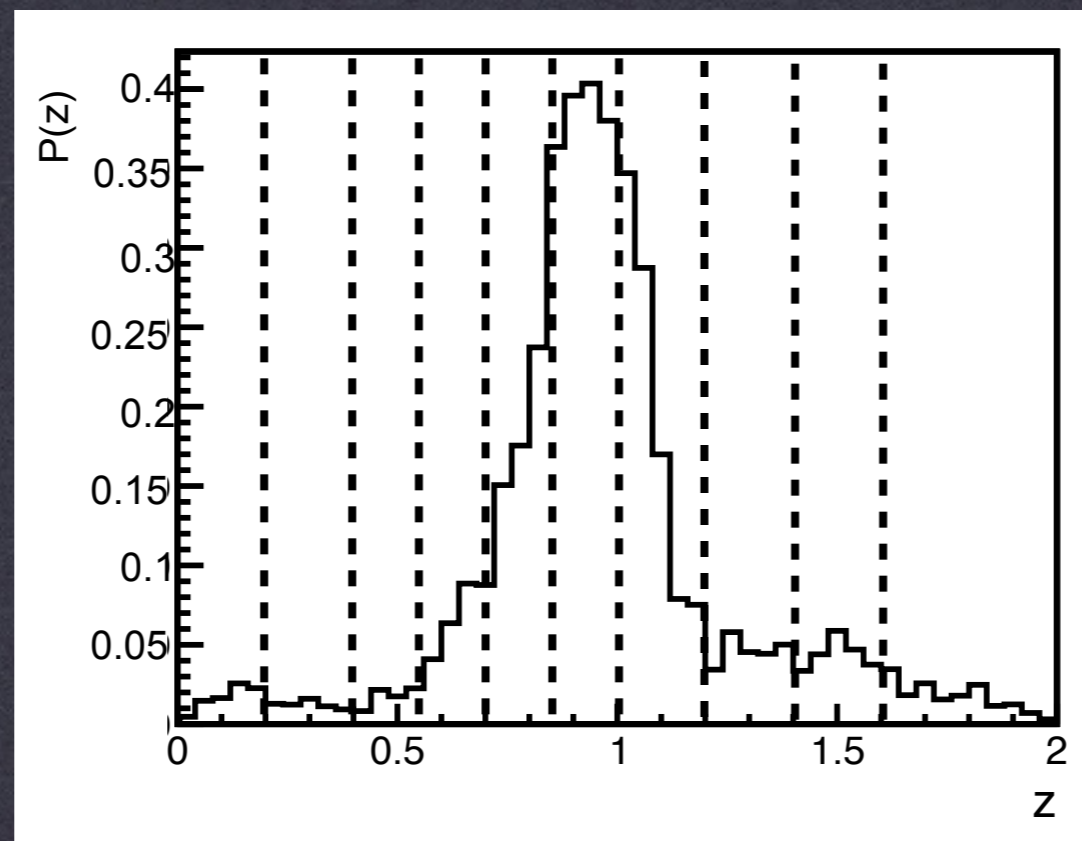
1.2-1.4;

1.4-1.6

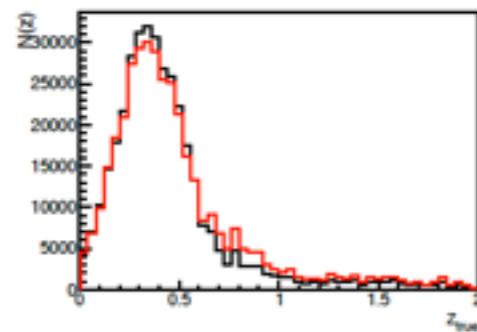
BAO ANGULAR EN DES

Dada una galaxia, tenemos su probabilidad de tener cierto z : ¿Cómo acumulamos las galaxias en cada capa?

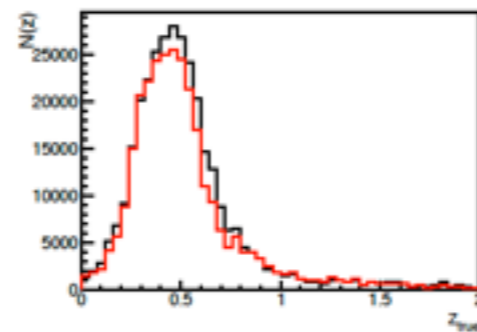
- 1) Usando el valor más probable para seleccionar la capa y acumular su distribución de probabilidad completa.
- 2) Acumular su distribución de probabilidad en cada capa.



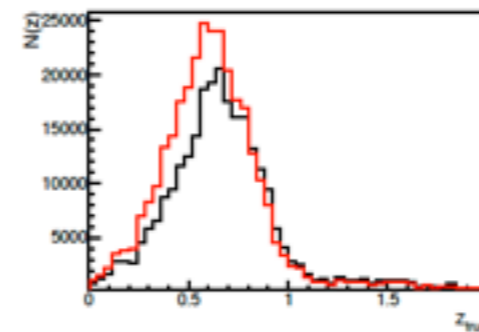
BAO ANGULAR EN DES



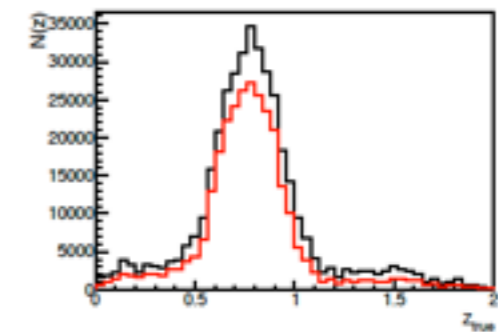
$0.20 < z_{true} < 0.40$



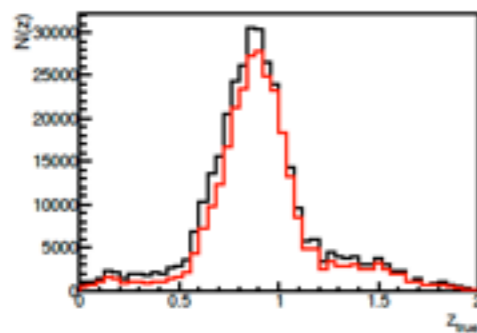
$0.40 < z_{true} < 0.55$



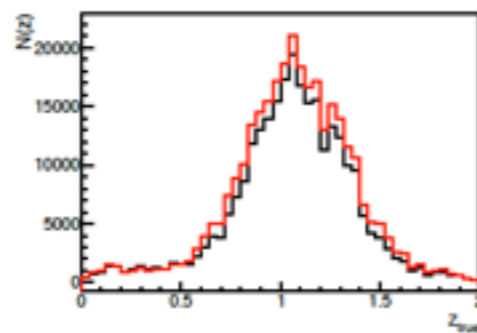
$0.55 < z_{true} < 0.70$



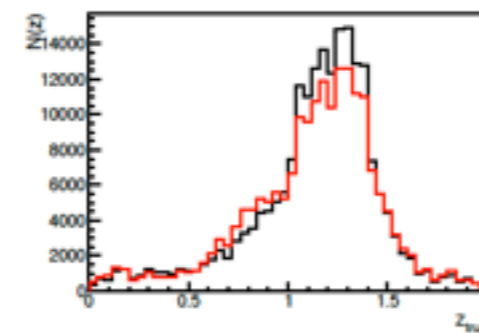
$0.70 < z_{true} < 0.85$



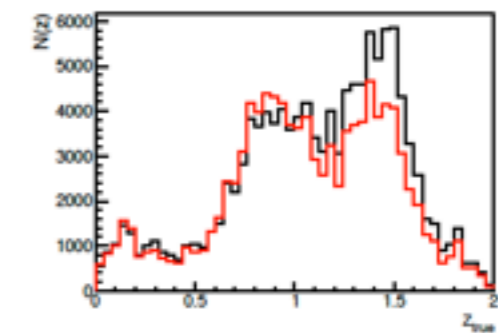
$0.85 < z_{true} < 1.00$



$1.00 < z_{true} < 1.20$



$1.20 < z_{true} < 1.40$

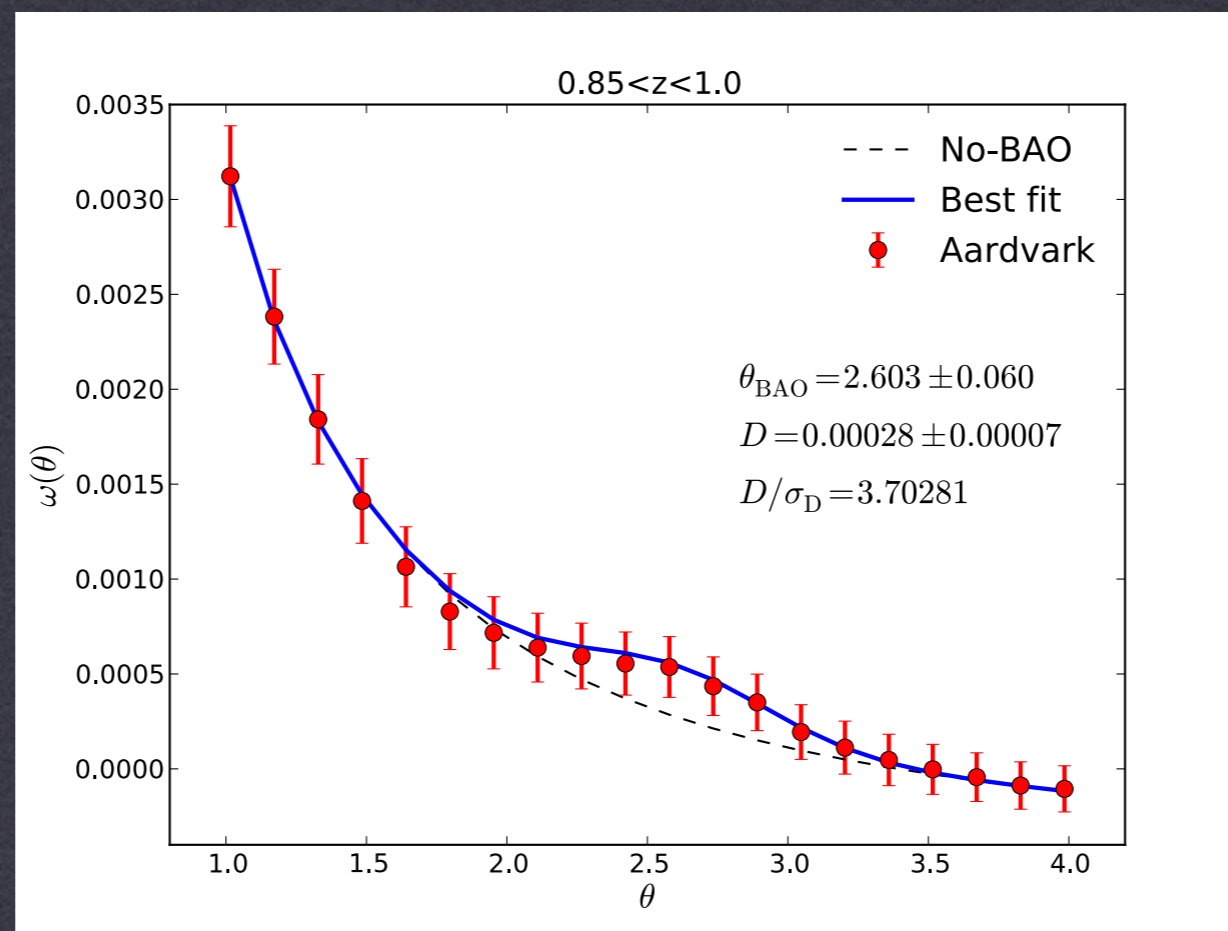


$1.40 < z_{true} < 1.60$

BAO ANGULAR EN DES

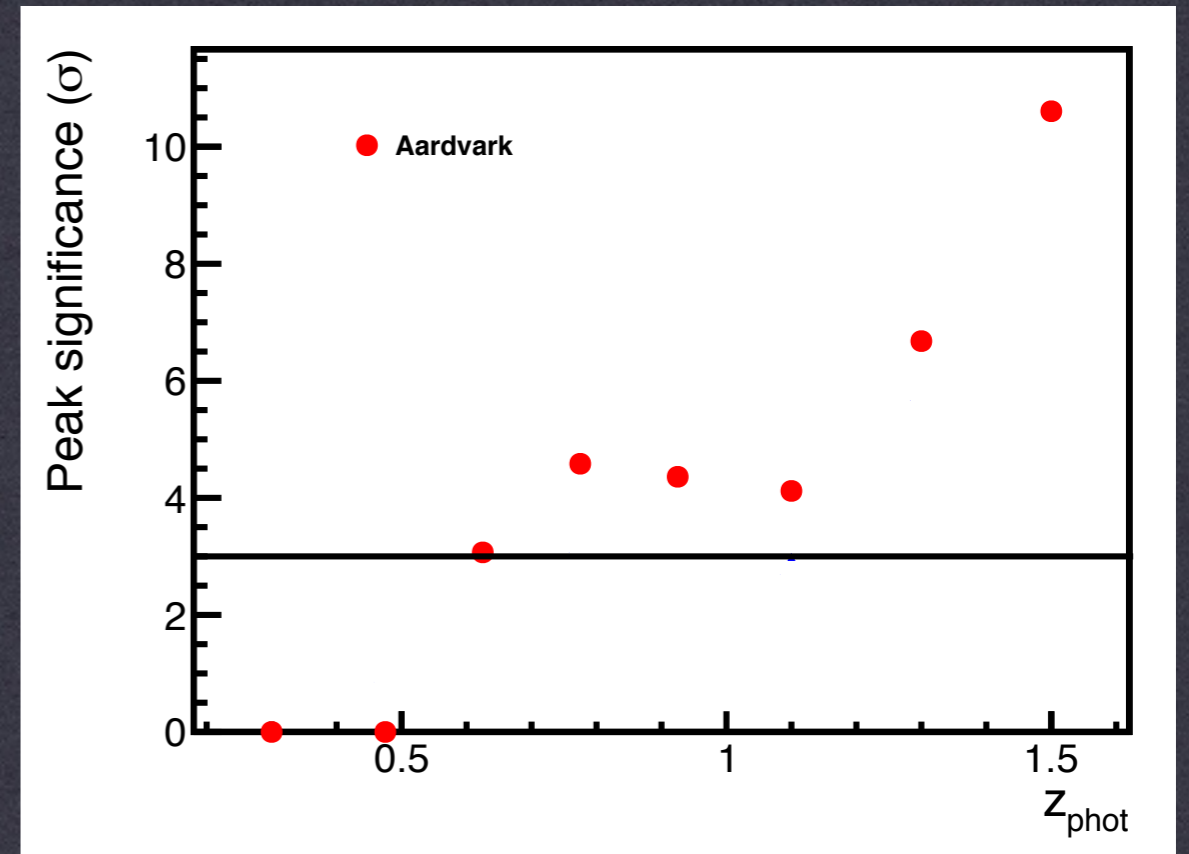
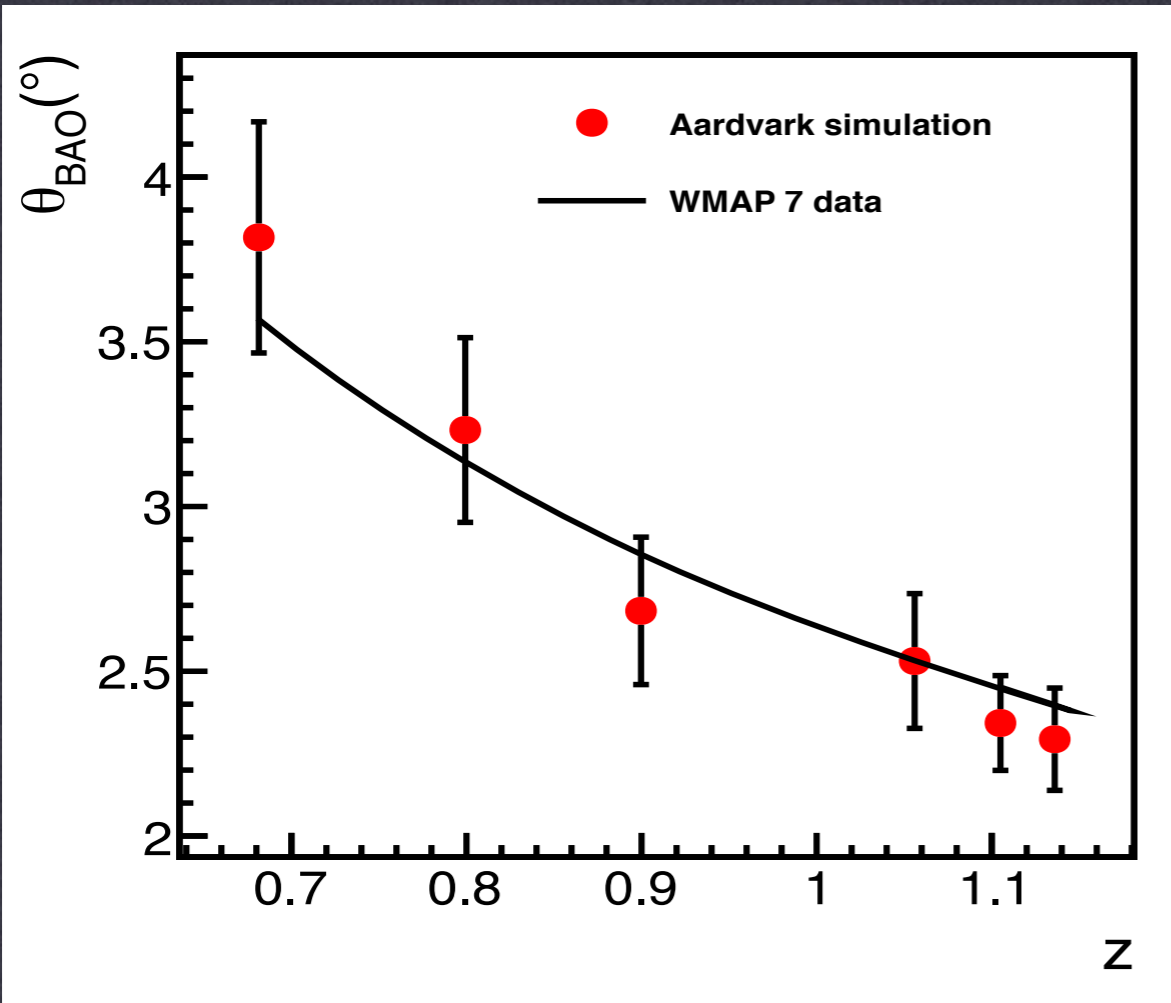
Calculamos la función de correlación angular con código GPU (Cárdenas et al., Ponce et al.) y se parametriza como:

$$\omega_{FIT}(\theta) = A + B\theta^{-C} + D e^{-\frac{(\theta - \theta_{FIT})^2}{2\sigma_{FIT}^2}}$$



Lo importante es la posición del pico

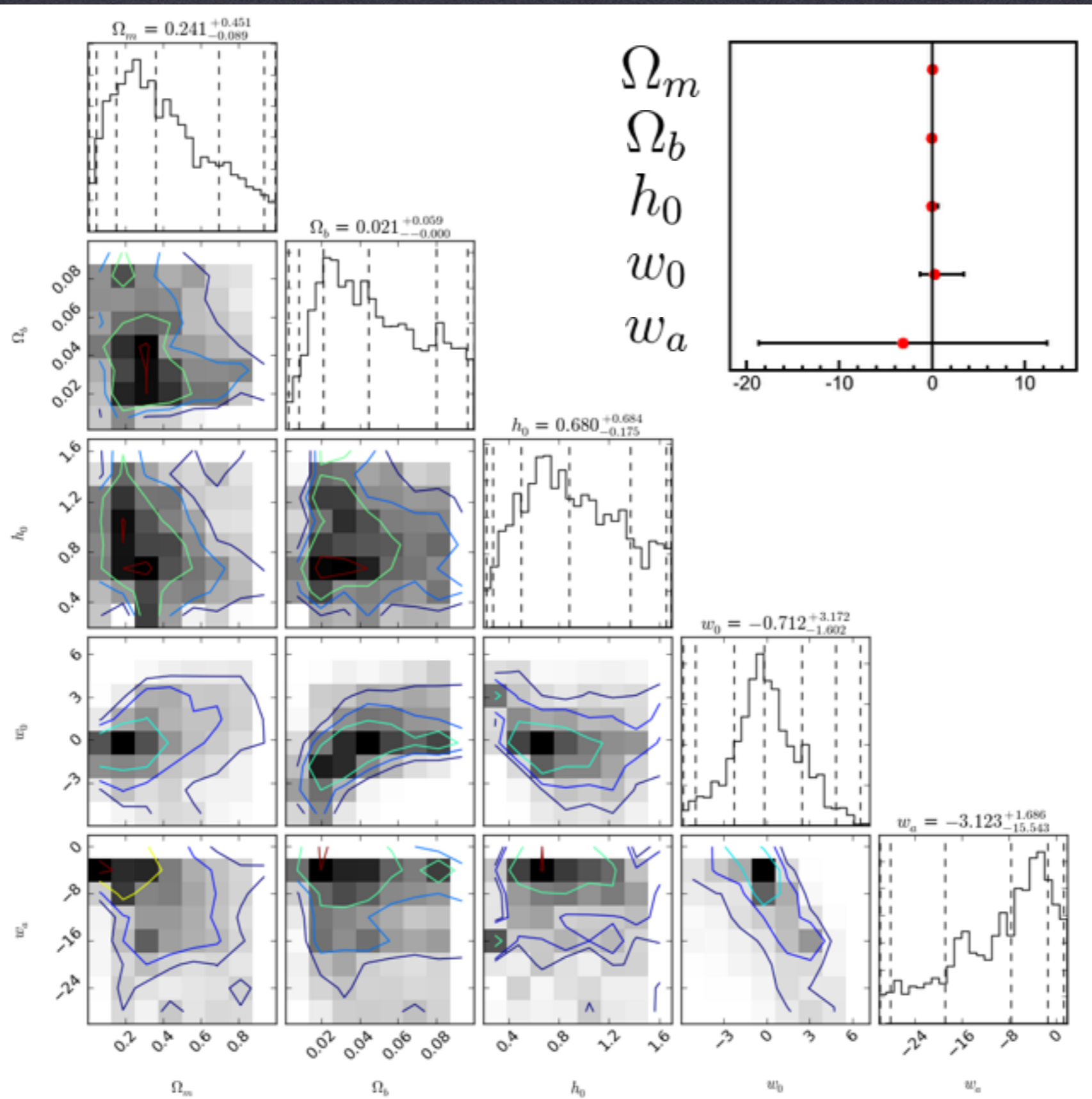
BAO ANGULAR EN DES



$$\theta_{BAO} = \frac{r_s}{d_A} \rightarrow \chi^2 = \sum_{ij} (\theta_i - \theta_i^{TH}) C_{ij}^{-1} (\theta_j - \theta_j^{TH})$$

BAO ANGULAR EN DES

MCMC: 9 pars en muestreo, marginalización sobre 5



CONCLUSIONES

- MÉTODO INDEPENDIENTE DE MODELO PARA MEDIR COSMOLOGÍA EN DES
- PRIMERA VEZ QUE SE USA INFORMACIÓN DE PDFS FOTOMÉTRICAS PARA EL CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE CORRELACIÓN
- CAPACES DE EXTRAER INFORMACIÓN COSMOLÓGICA CORRECTA

ESTUDIO DE LSS USANDO SIMULACIONES: MÉTODO PARA LA MEDIDA DE LA ESCALA DE OSCILACIONES ACÚSTICAS DE BARIONES (BAO) EN LA LÍNEA DE VISIÓN

E. Sanchez et al. "Precise measurement of the radial baryon acoustic oscillation scales in galaxy redshift surveys." In: MNRAS 434 (Sept. 2013), pp. 2008-2019.

2EXP+G RBAO

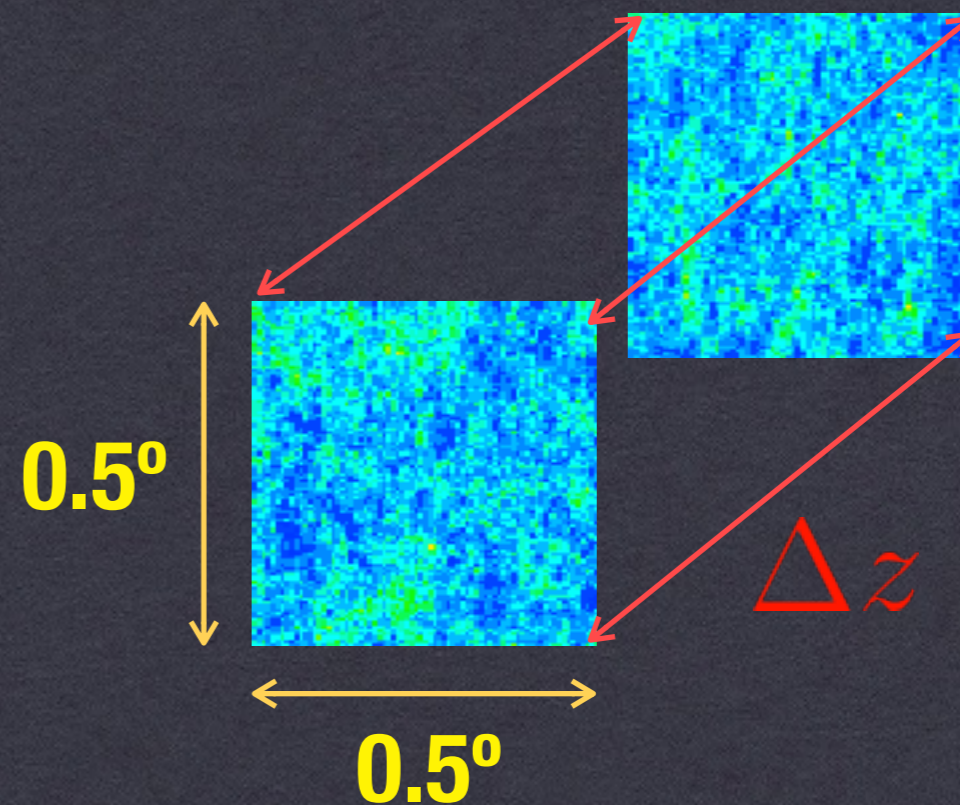
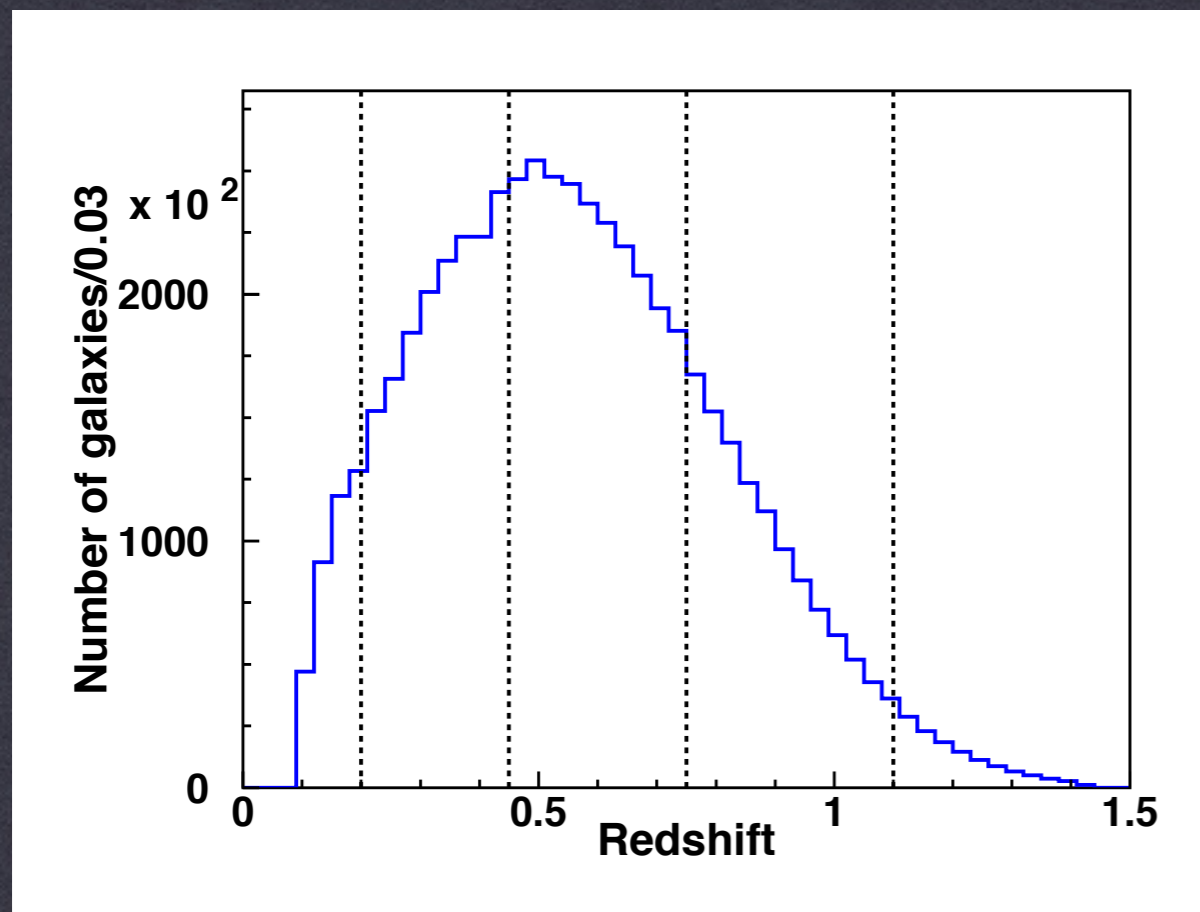
Las BAO contienen gran cantidad de información cosmológica
La mayoría de métodos asumen isotropía y un modelo fiducial:

No pueden testar todos los modelos posibles.

Tienen un sesgo.

Medida de la escala angular independiente de la escala radial.

Simulación DM 5000 grados cuadrados, redshift real con RSD

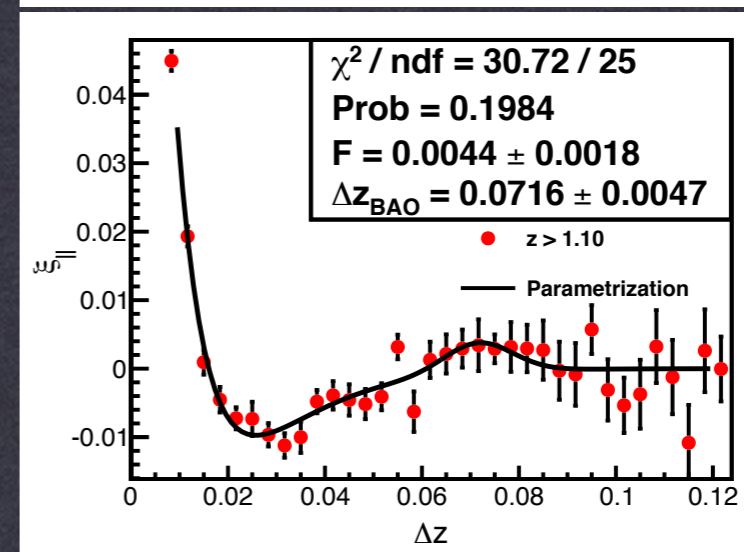
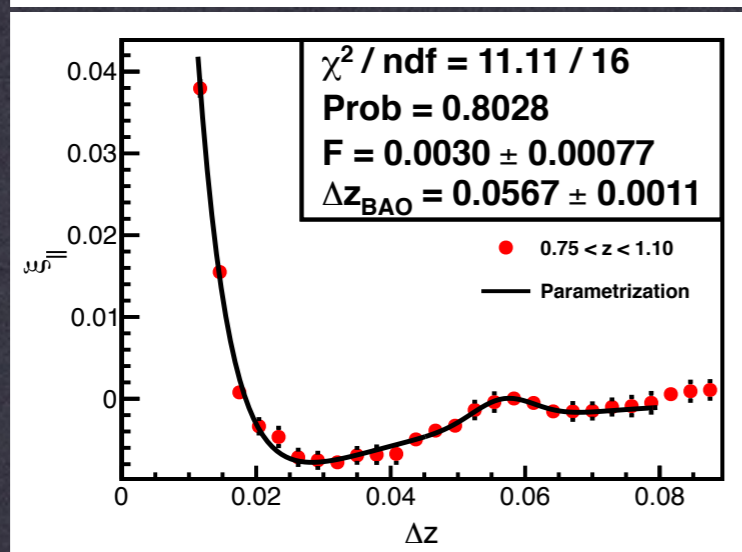
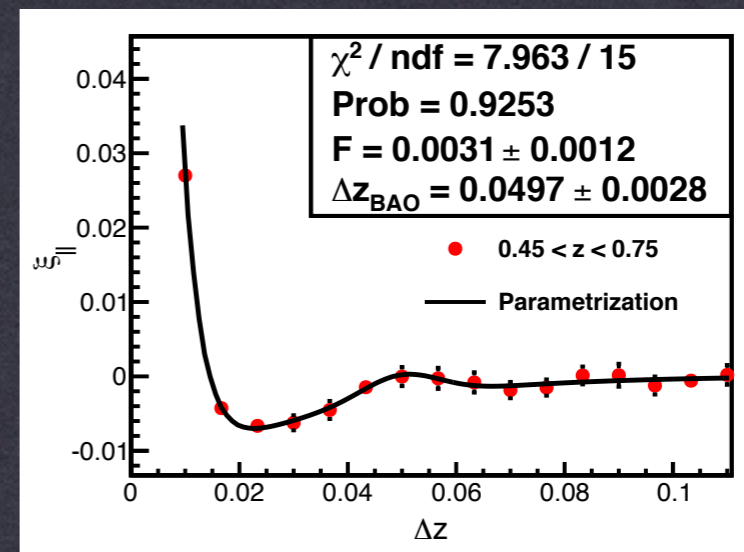
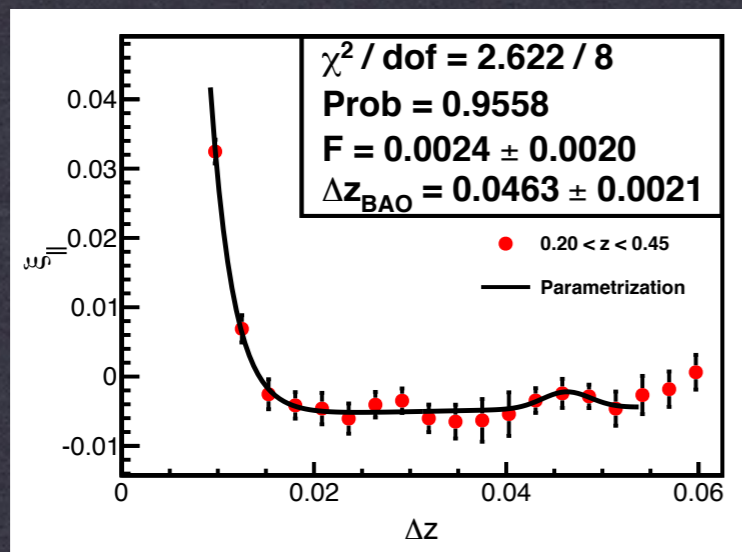


2EXP+G RBAO

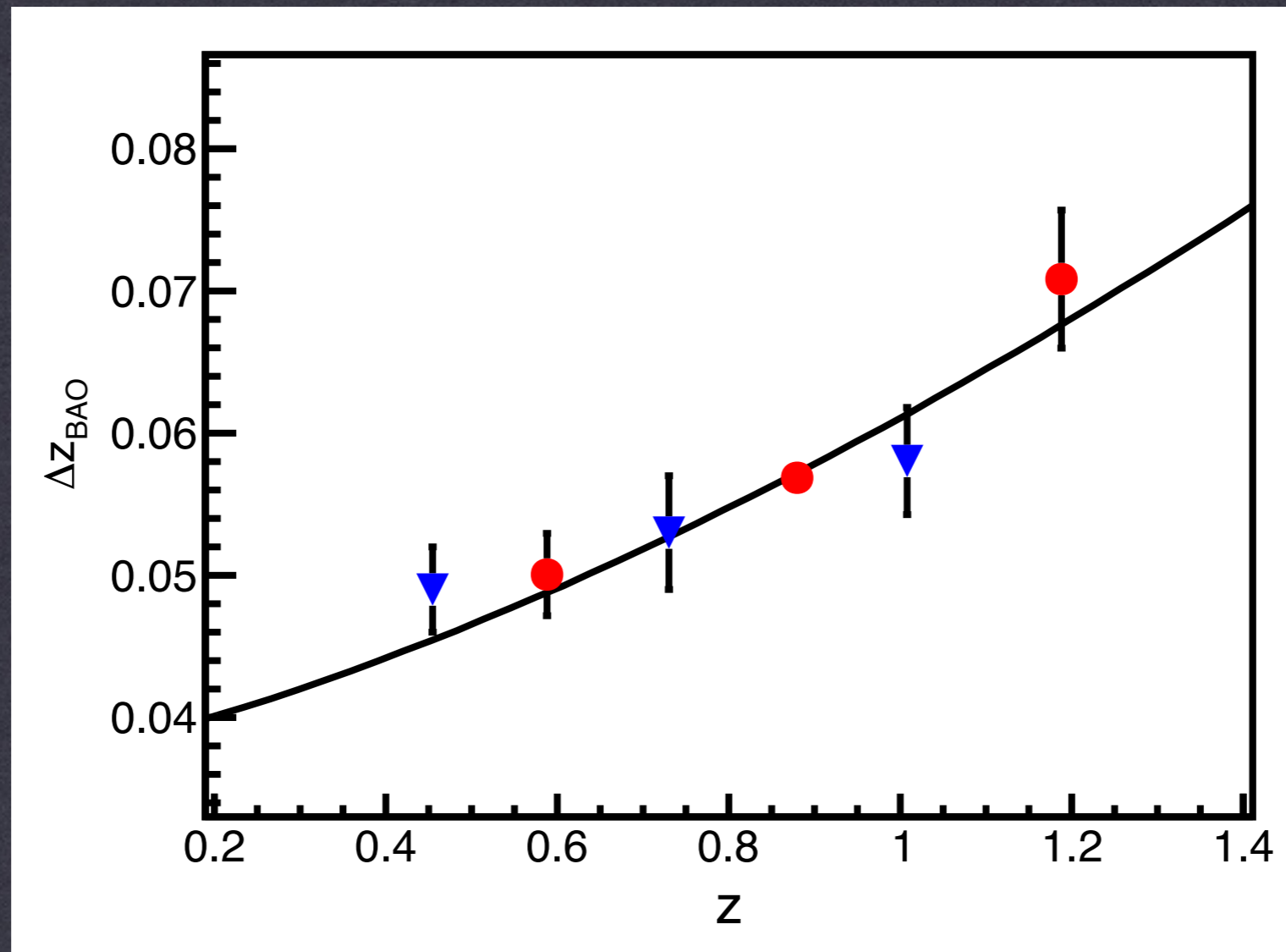
Parametrización empírica de la función de correlación:
Nos basamos en el método PLG y aplicamos RSD

$$\xi(\Delta z) = A + Be^{-C\Delta z} + De^{-E\Delta z} + Fe^{-\frac{(\Delta z - \Delta z_{BAO})^2}{2\sigma^2}}$$

Se necesita suficiente volumen: Capas anchas

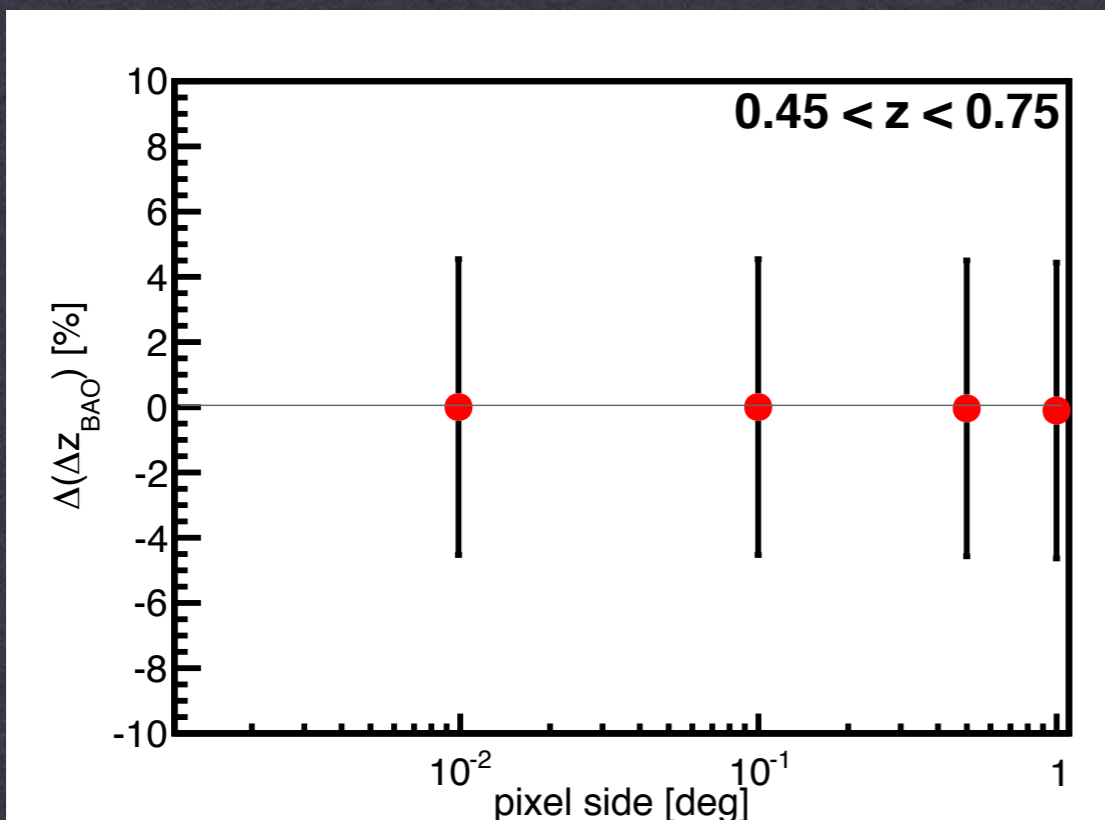
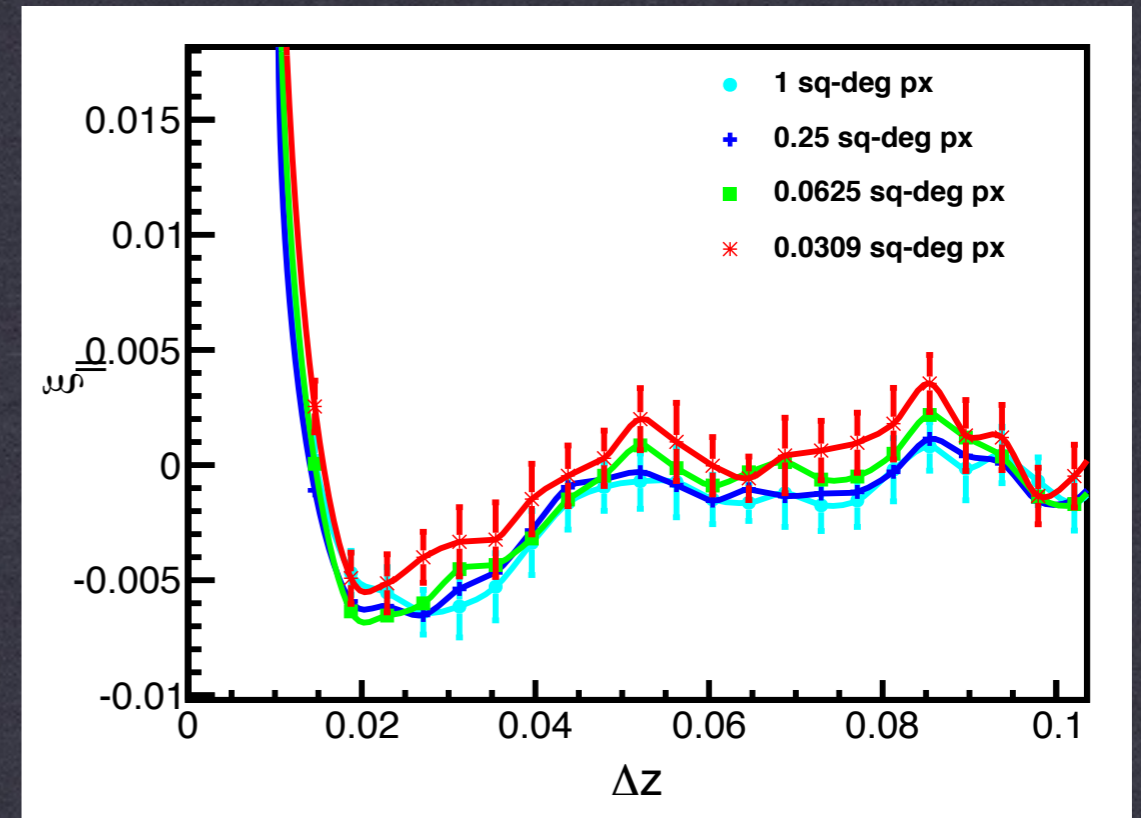
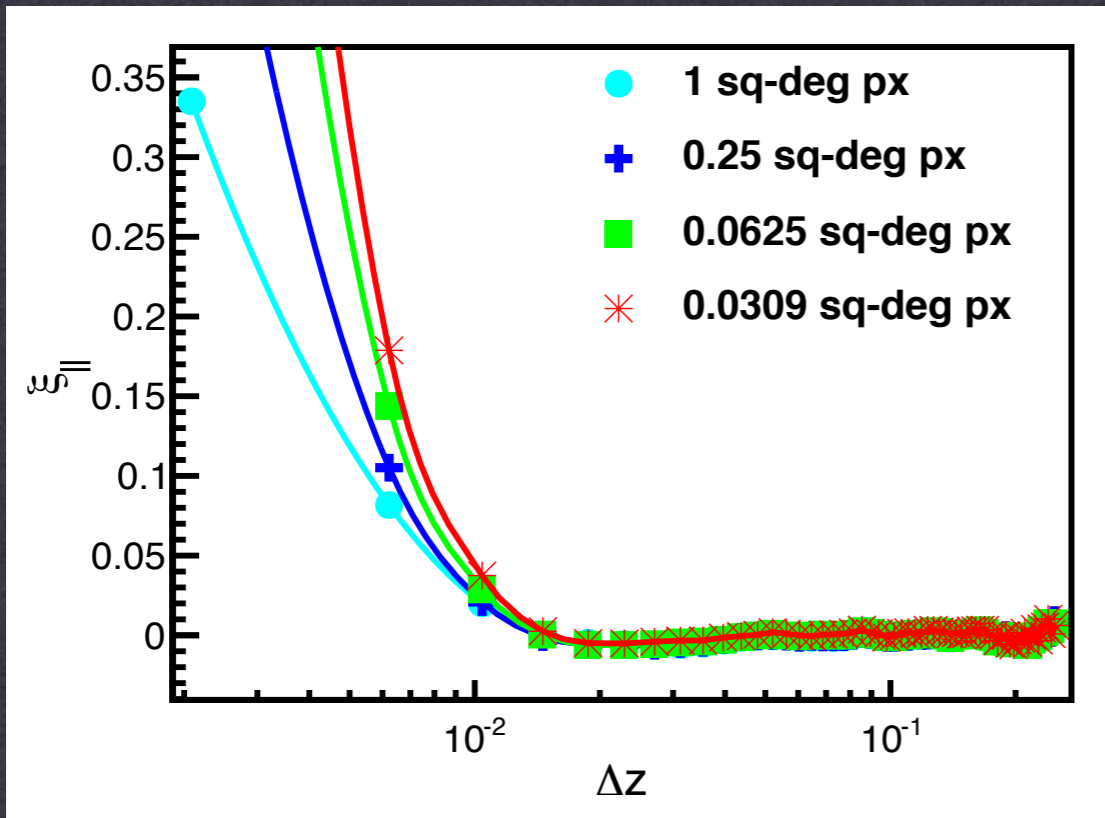


2EXP+G RBAO



La medida de la escala radial coincide con los parámetros de la simulación. Sólo usamos los puntos rojos para extraer información cosmológica

2EXP+G RBAO: SISTEMÁTICOS



Error asociado al tamaño de la celda: 0.20%

Inicio y final del ajuste:

0.1%

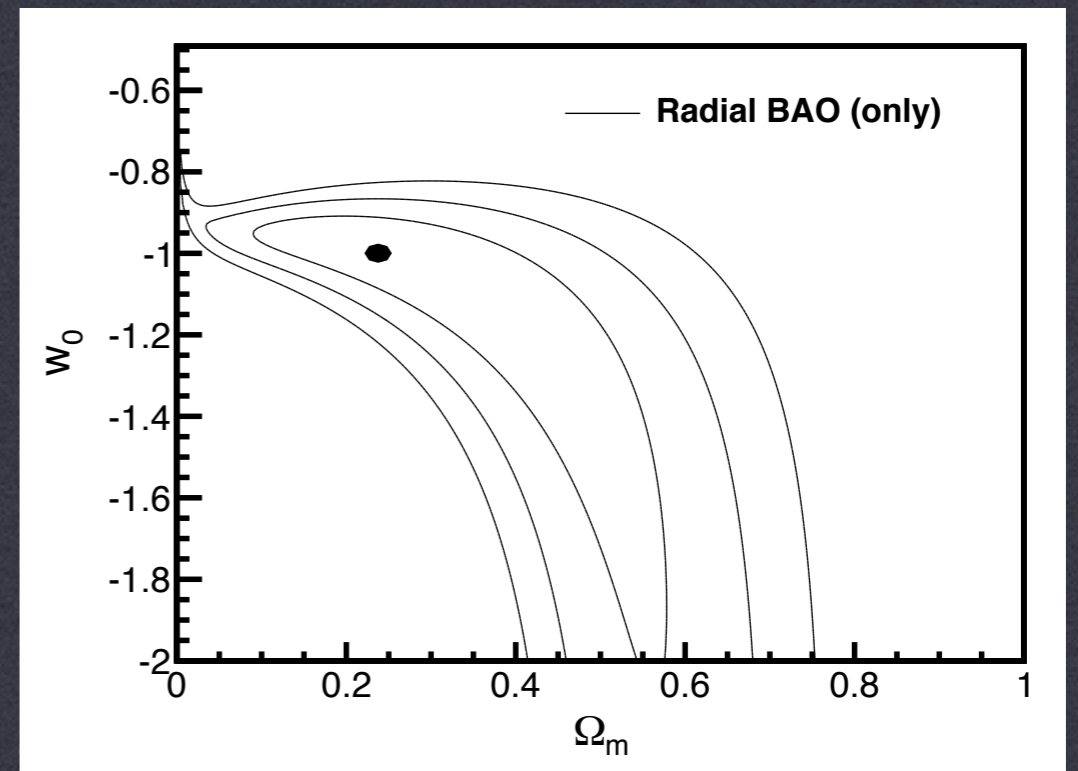
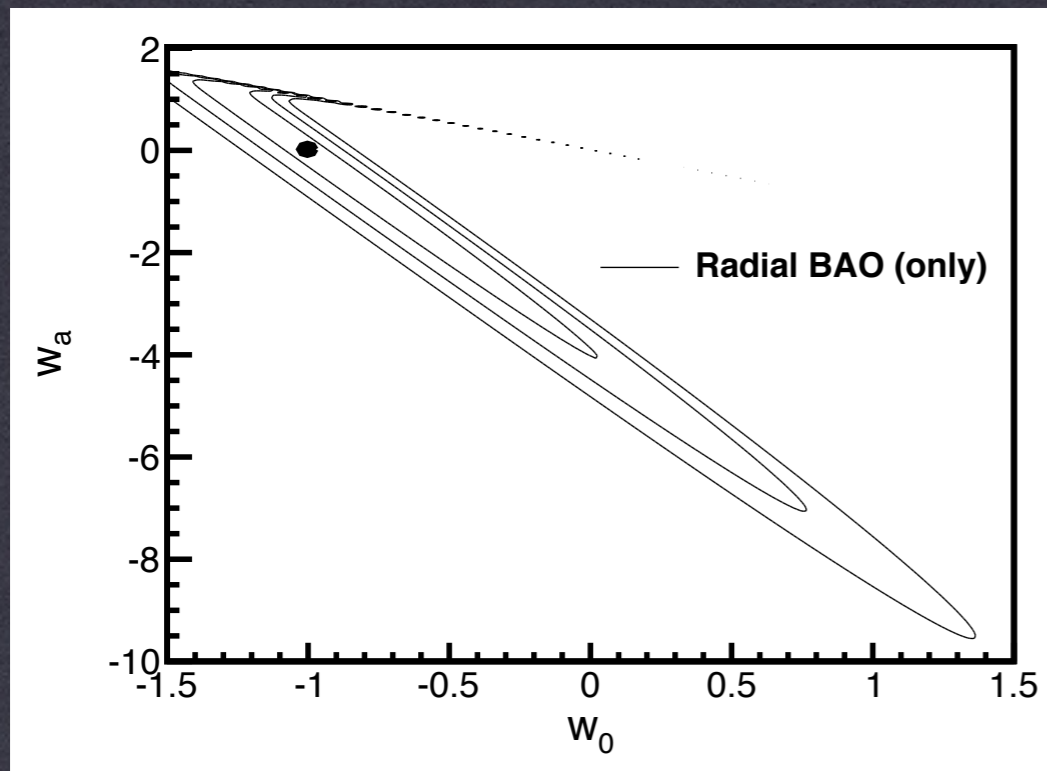
bias: 0.10%

no linealidades: 0.20%

TOTAL: 0.33% Despreciable

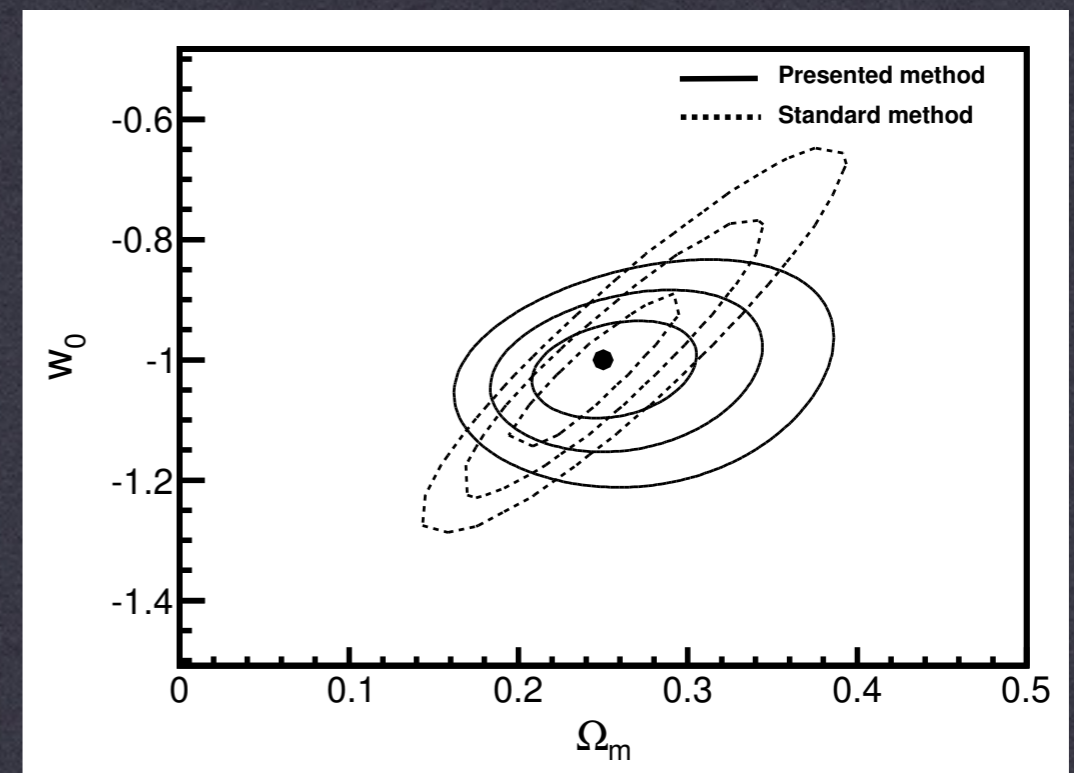
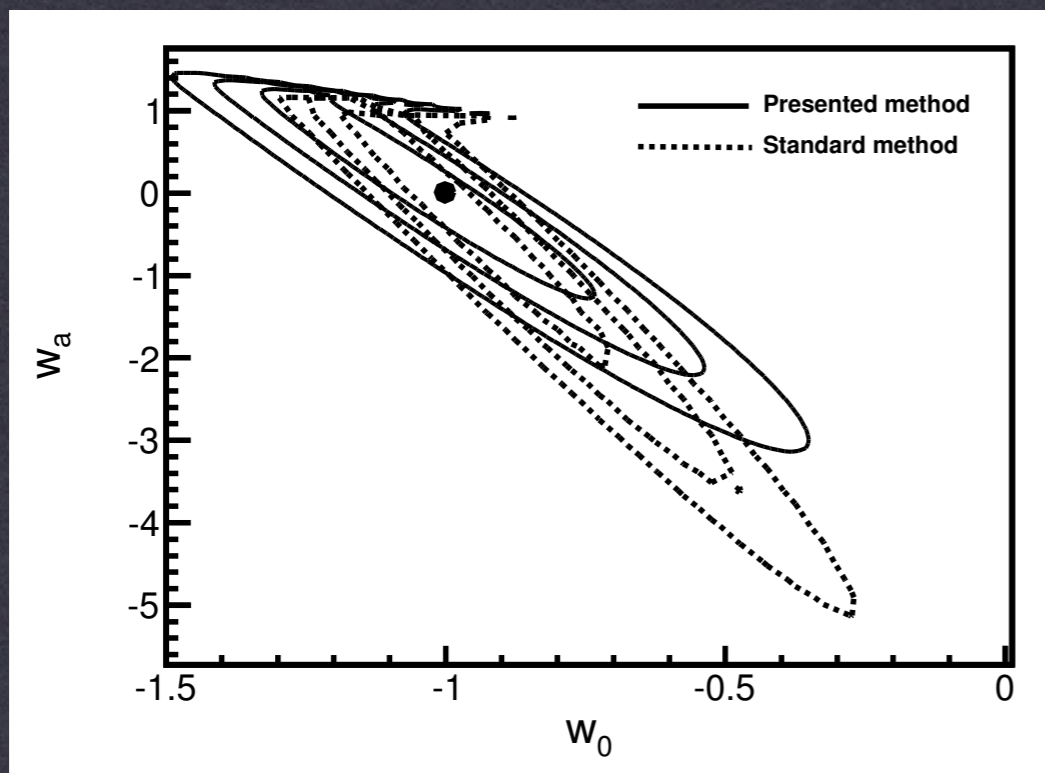
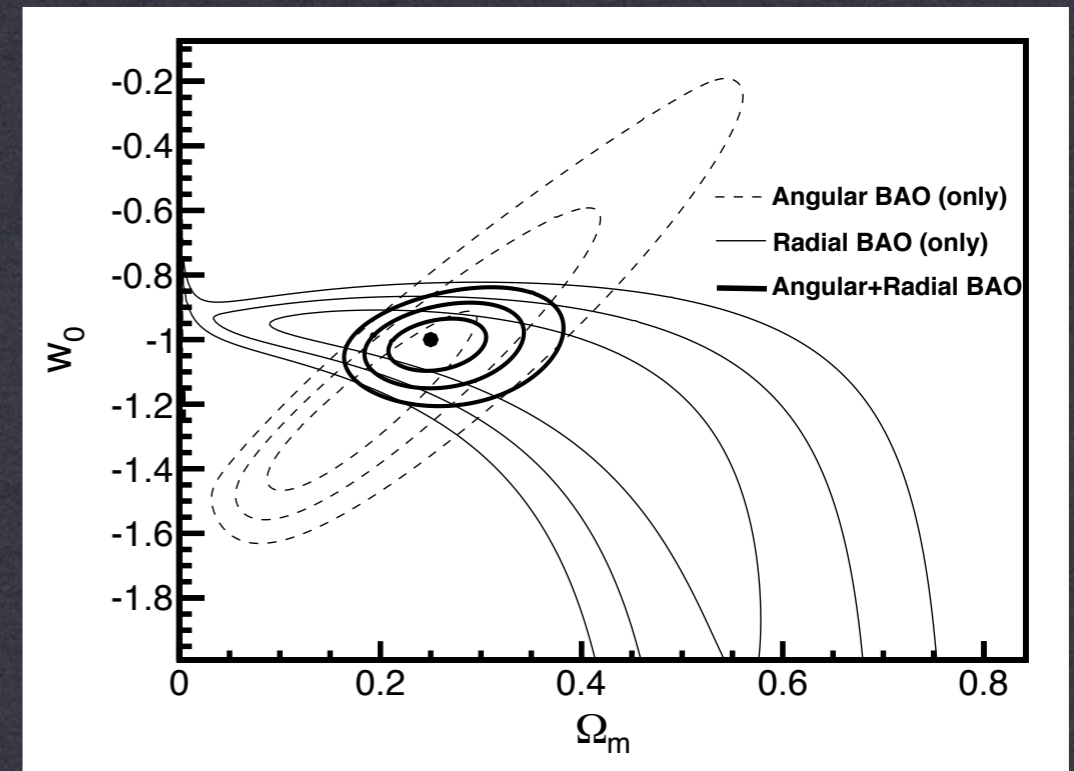
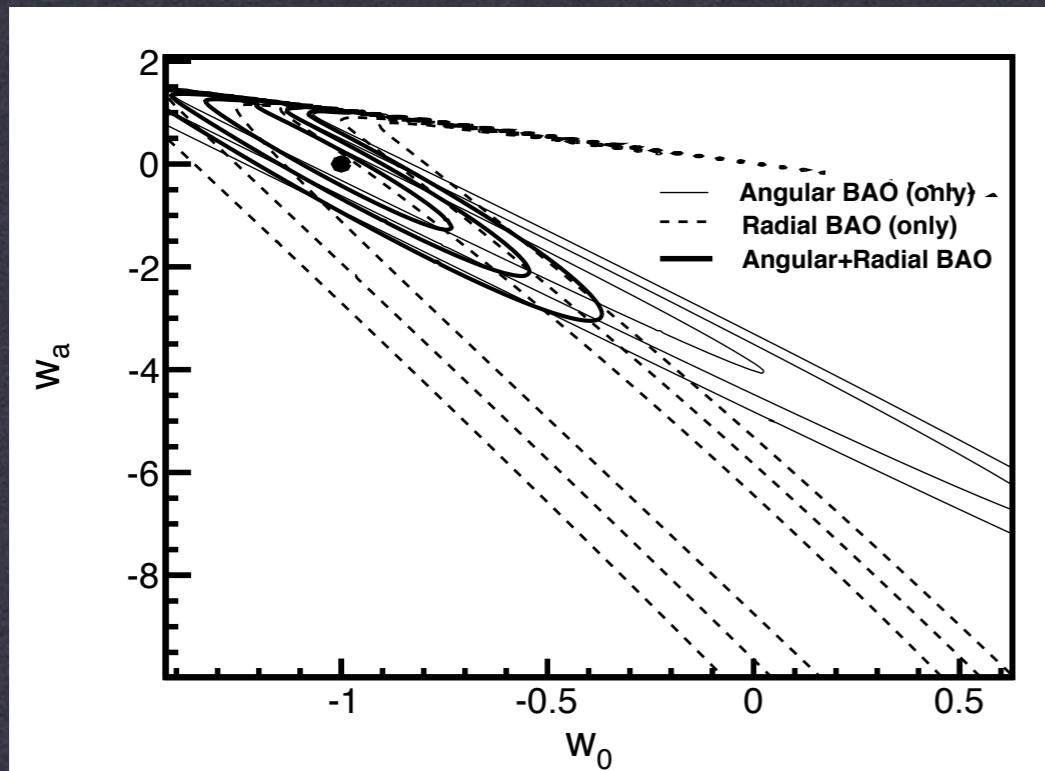
frente a estadístico

2EXP+G RBAO: COSMOLOGÍA



Se fija el valor del resto de parámetros a los dados por la simulación y recorreremos una red de valores para los otros tres

2EXP+G RBAO: COSMOLOGÍA



CONCLUSIONES

- MÉTODO PRECISO E INDEPENDIENTE DEL MODELO PARA MEDIR LA ESCALA BAO.
- PRECISIÓN SIMILAR AL MÉTODO ESTÁNDAR.
- MUY ROBUSTO A SISTEMÁTICOS.
- ÚTIL PARA CARTOGRAFIADOS FUTUROS COMO EBOSS O DESI.

VALIDACIÓN OBSERVACIONAL DEL PRINCIPIO COSMOLÓGICO

D. Alonso et al. "Measuring the transition to homogeneity with photometric redshift surveys." In: MNRAS 440 (May 2014), pp. 10-23.

D. Alonso et al. "Homogeneity and isotropy in the 2MASS Photometric Redshift catalogue." In: MNRAS 449, (March 2015) pp. 670-684.

TEST DEL PRINCIPIO COSMOLÓGICO

Muchos métodos para caracterizar la energía oscura asumen como axioma el Principio Cosmológico y esto tiene consecuencias

Distribución homogénea infinita: $C_2(r) = \bar{N} \propto r^3$

D. finita + Gravedad: $C_2(r) = \bar{N}(r)(1 + \bar{\xi}(r)) + 1$

Dimensión de correlación: $D_2(r) = \frac{d \log C_2(r)}{d \log r}$

D. finita + Colapso: $D_2(r) = 3 - 3 \frac{\bar{\xi}(r) - \xi(r)}{1 + \bar{\xi}(r)} - \frac{3}{\bar{N}}$

MIDIENDO HOMOGENEIDAD

Fotometría: Ventaja estadística, desventaja 2D

$$V(\theta) = 2\pi(1 - \cos \theta) \quad \mathbf{V \text{ no es potencia del ángulo}}$$

$$H_2(\theta) \equiv \frac{d \log G_2(\theta)}{d \log V(\theta)} \quad \mathbf{Mejor definir índice en función de V}$$

$$H_2(\theta) = 1 - \frac{\omega(\theta) - \bar{\omega}(\theta)}{1 + \bar{\omega}(\theta)} - \frac{1}{\bar{N}(\theta)}$$

$$\bar{\omega}(\theta) = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^\theta \omega(\theta') \sin \theta' d\theta'$$

MIDIENDO HOMOGENEIDAD

Estimando H: Cuentas en esferas

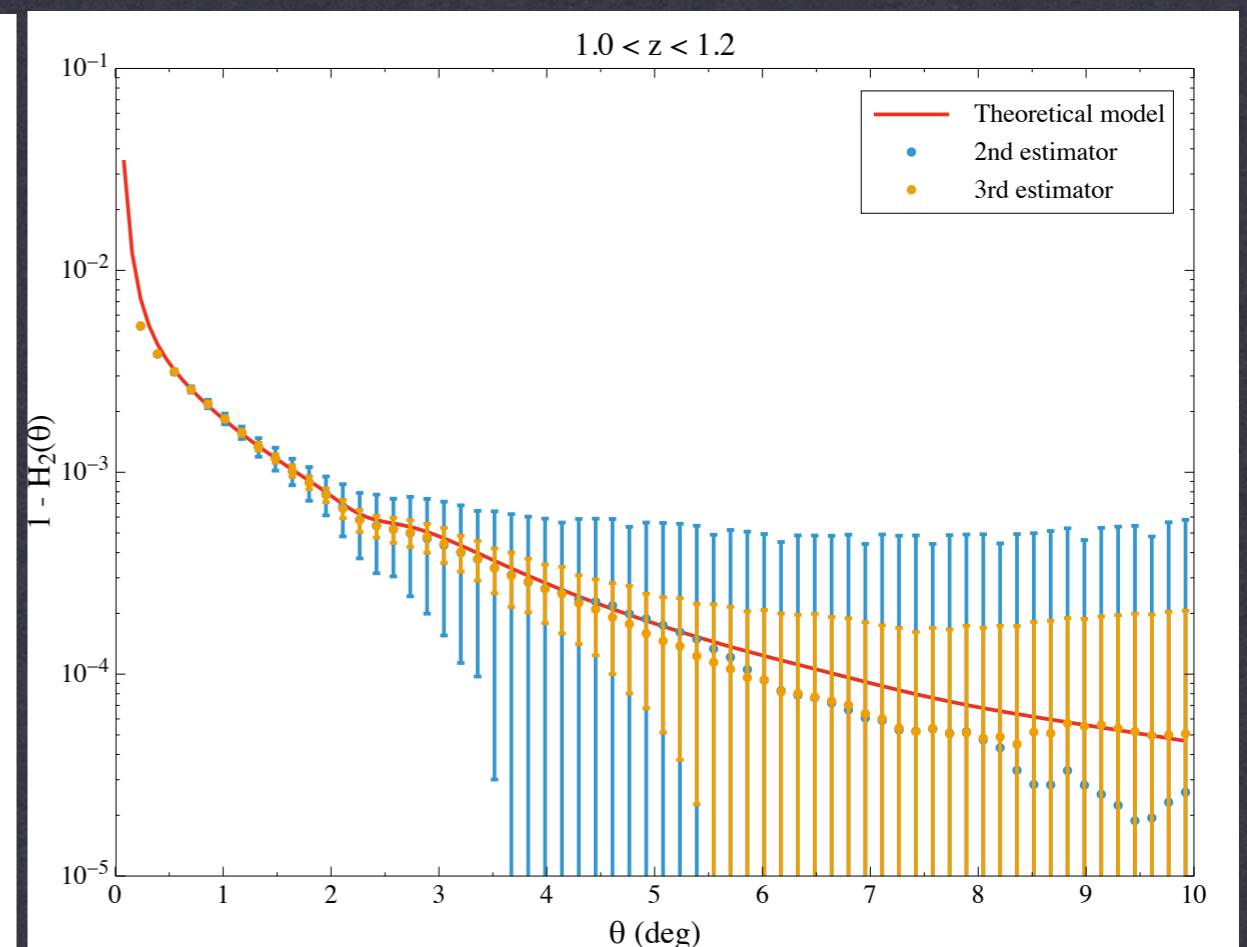
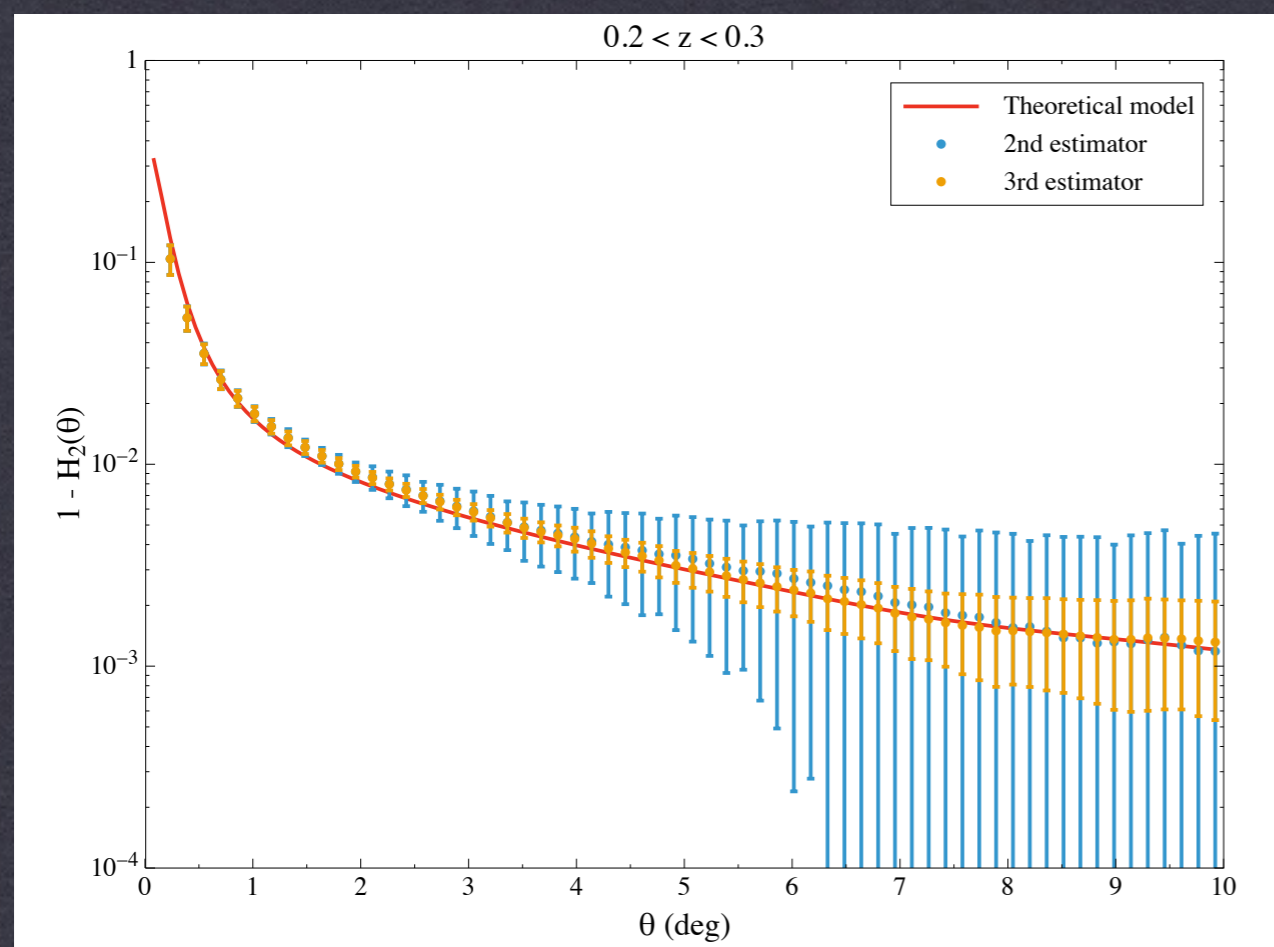
$$\mathcal{N}(< \theta) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=0}^{N_c} \frac{n_i^d(< \theta)}{f_r n_i^r(< \theta)}$$

Estimamos el índice de homogeneidad comparando con un catálogo aleatorio (como en el cálculo de la función de correlación)

MIDIENDO HOMOGENEIDAD

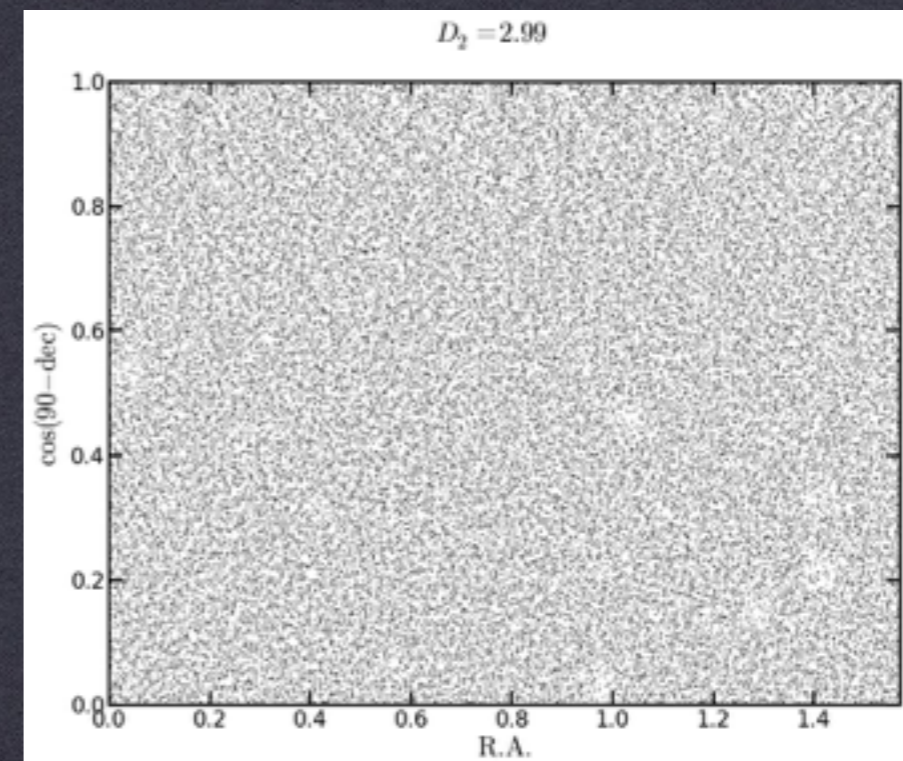
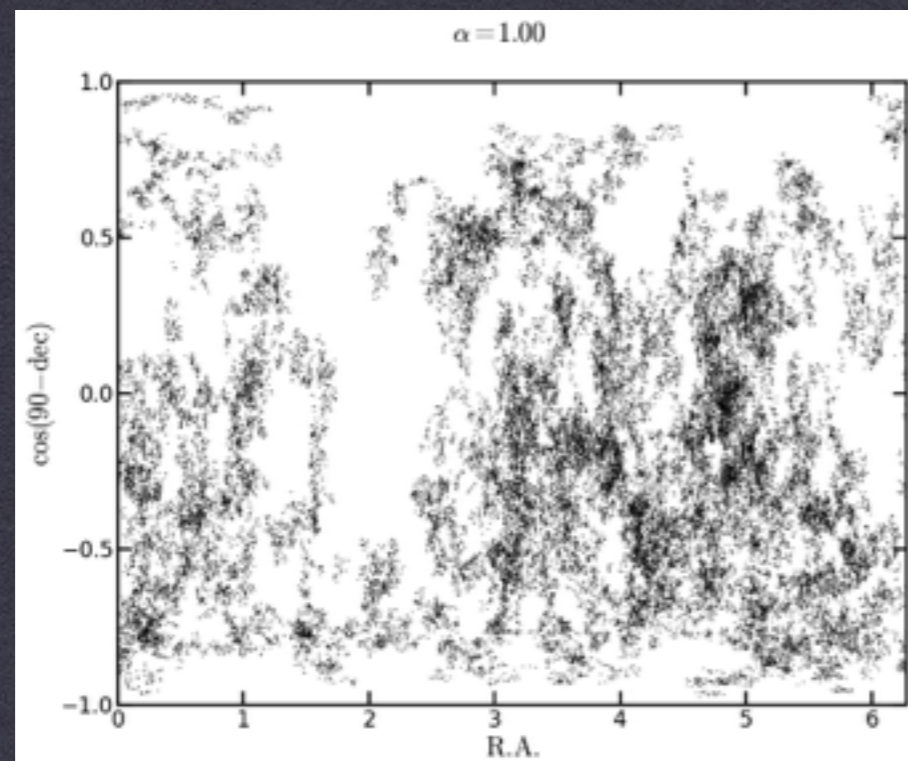
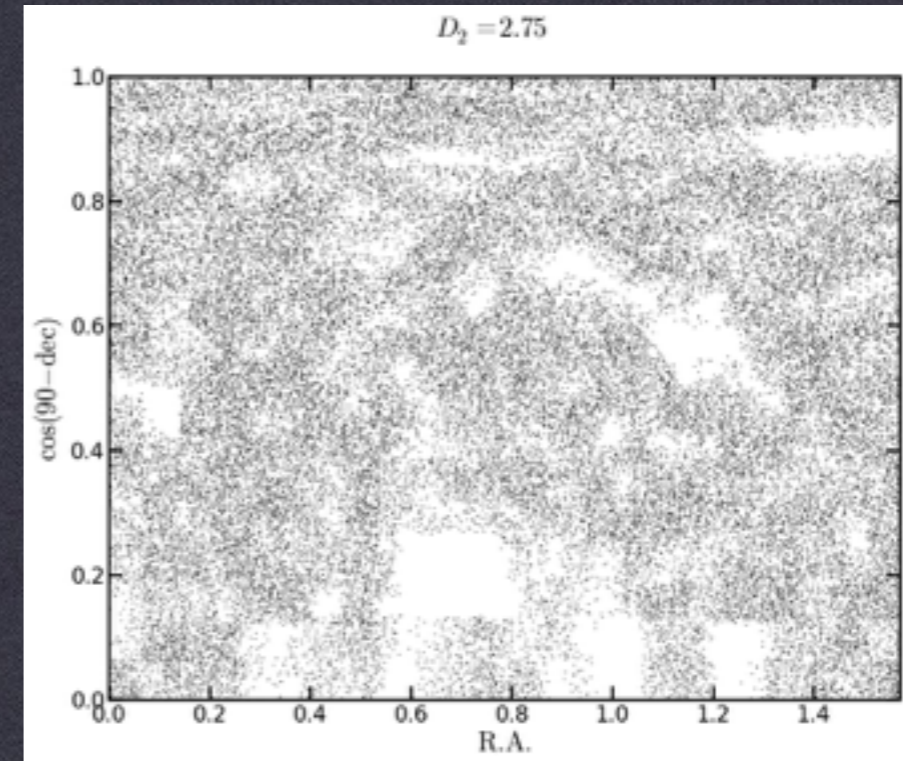
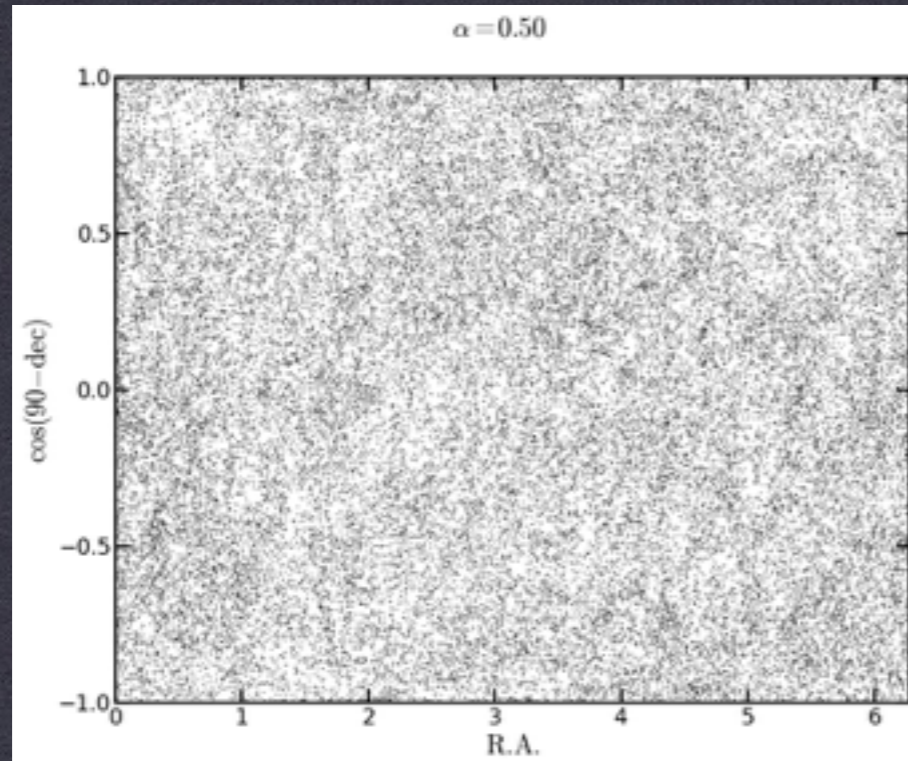
HOMOGENEIDAD: Se alcanza cuando $1-H$ tiende a 0

Medimos en 100 catálogos lognormal basados en Planck
9 capas de corrimiento al rojo de 0.2 a 1.2



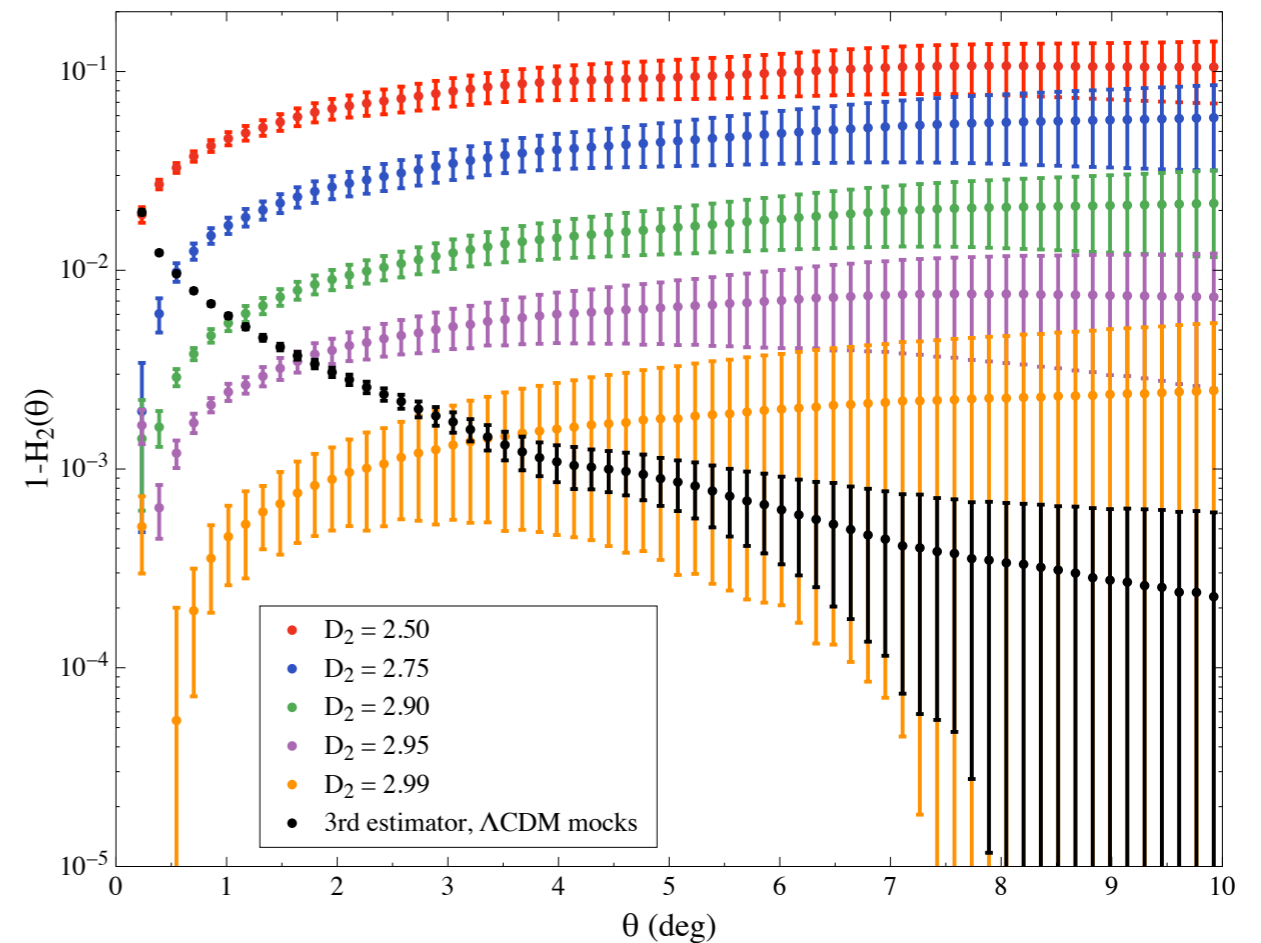
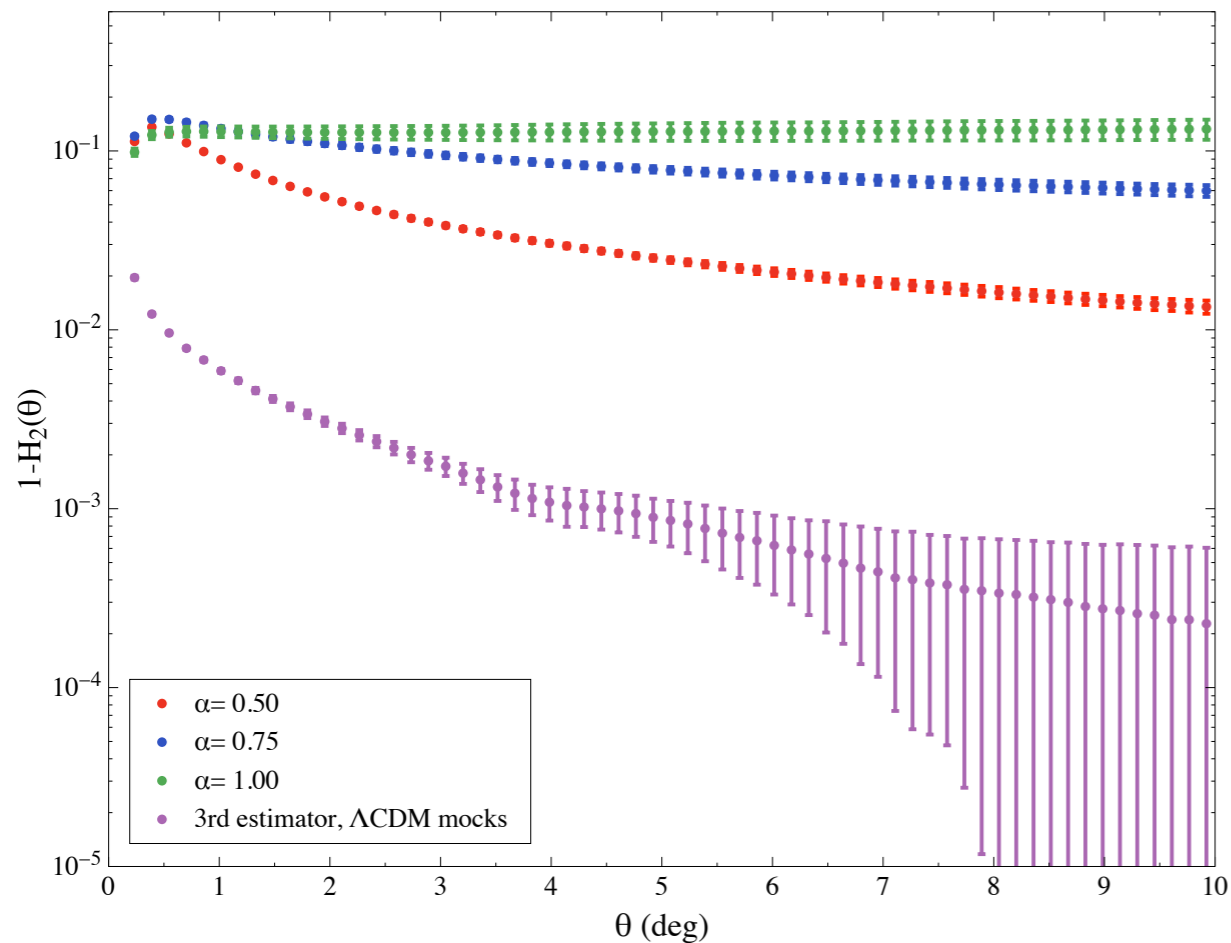
COMPARANDO CON DISTRIBUCIONES FRACTALES

Robustez del método



DISTINGUIR MODELOS FRACTALES DE LCDM

Podemos distinguir modelos fractales de un Universo homogéneo



CONCLUSIONES

- Método independiente del modelo para probar el Principio

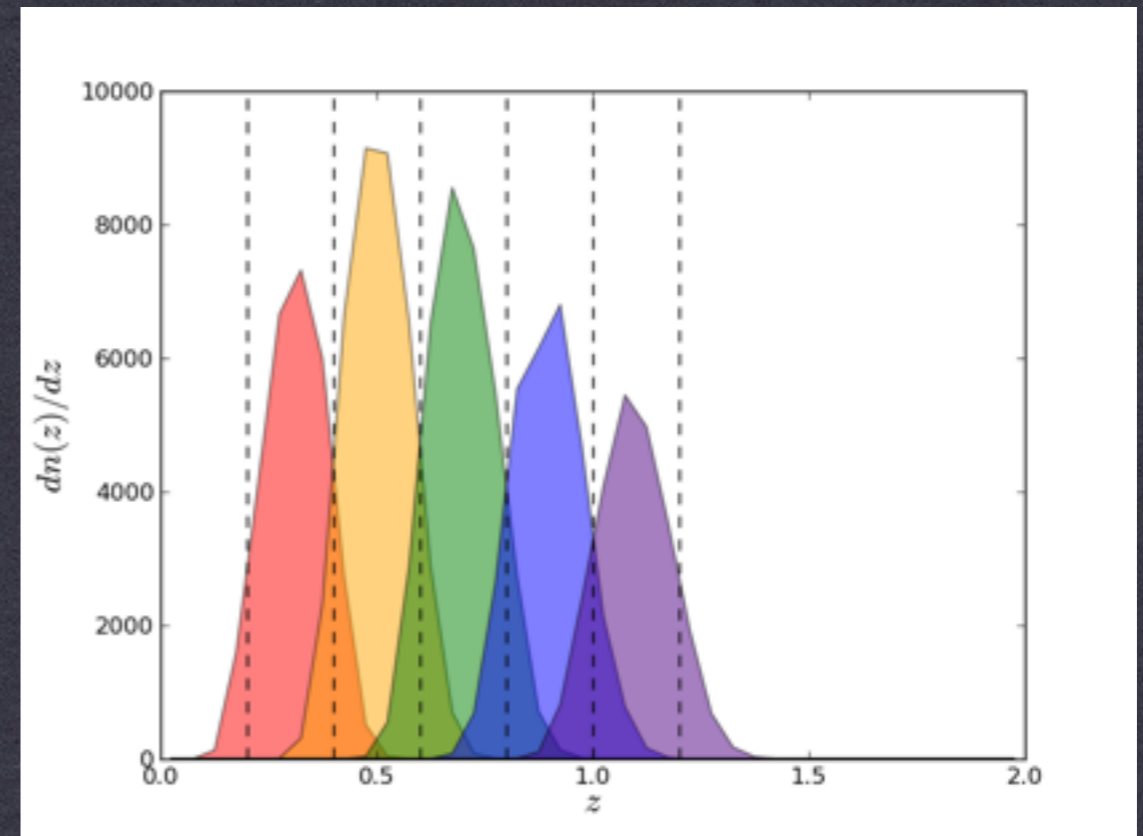
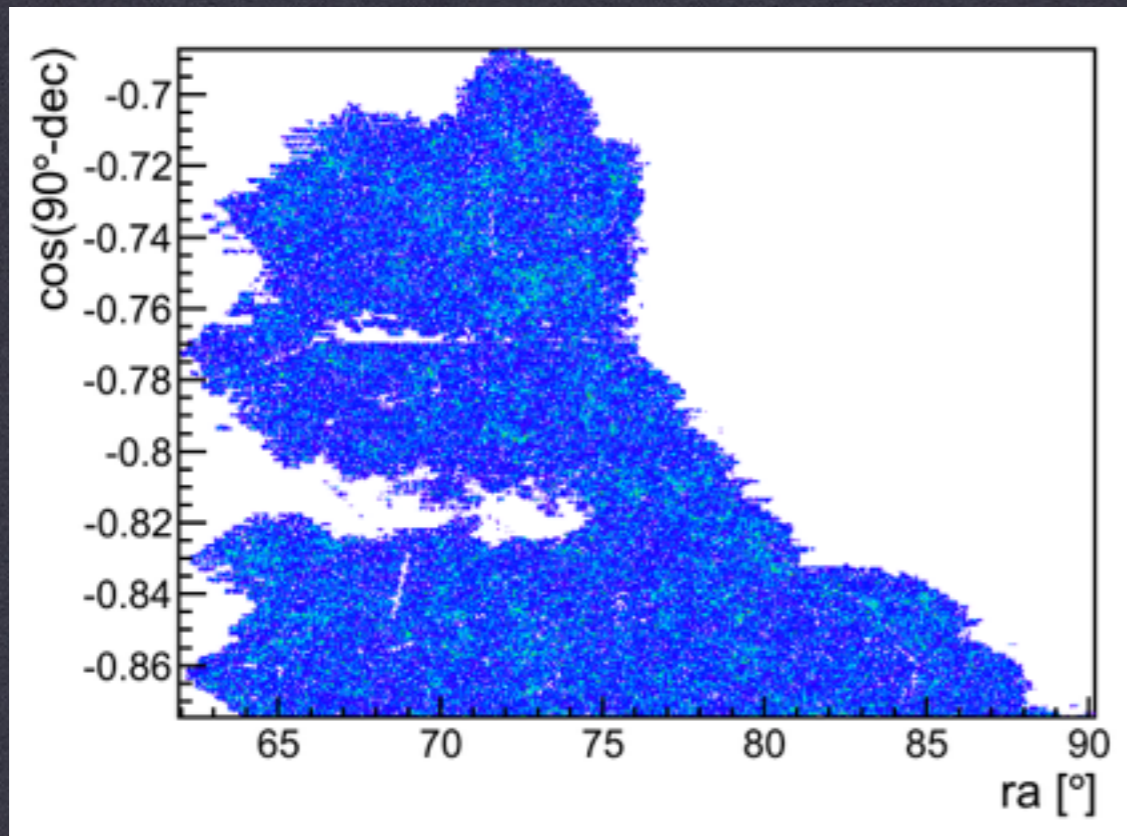
Cosmológico

- El método es robusto y nos permite distinguir modelos no homogéneos de modelos homogéneos
- Hemos sido capaces de aplicar el método en datos reales (2MPZ, publicado en MNRAS)
- Es aplicable a DES, LSST y Euclid

**MEDIDA DEL BIAS Y DE PARÁMETROS
COSMOLÓGICOS USANDO LA FUNCIÓN DE
CORRELACIÓN A ESCALAS BAJAS**

LA MUESTRA

Seleccionamos una región de 135 grados cuadrados en BCC Aardvark
Escogemos el caso más favorable de fotometría: Gaussiano.



Calculamos la función de correlación en esta muestra y comparamos con un modelo que contiene RSD, no linealidades y bias lineal (independiente de la escala)

EL AJUSTE

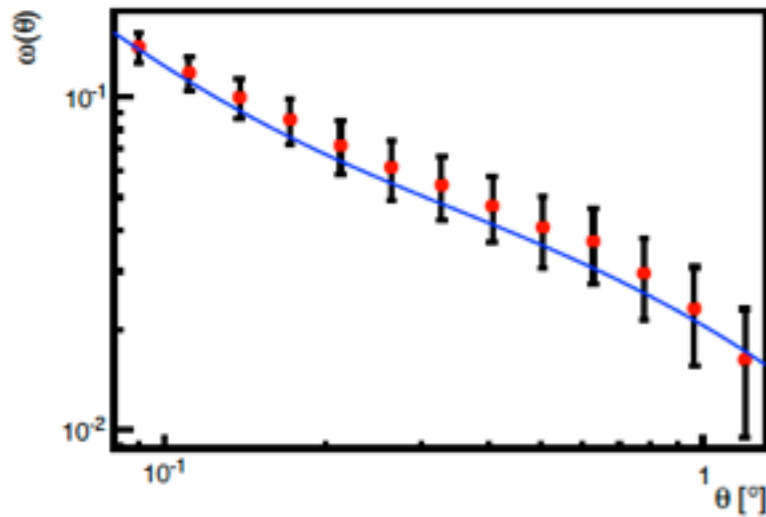
Calculamos la función de correlación en esta muestra y comparamos con un modelo que contiene RSD y bias lineal (independiente de la escala)

$$\chi^2 = \sum_{ij} (\omega(\theta_i) - \omega(\theta_i)^{th}) C_{ij}^{-1} (\omega(\theta_j) - \omega(\theta_j)^{th})$$

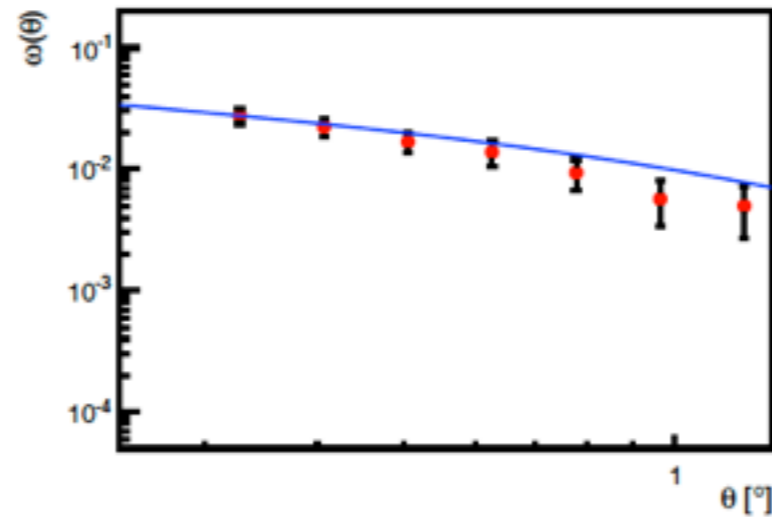
- 1) Fijamos el modelo y ajustamos b (1 parámetro libre ~ amplitud)
- 2) Ajustamos el modelo dado b (varios parámetros libres ~ cambia la forma)

MEDIDA DEL BIAS

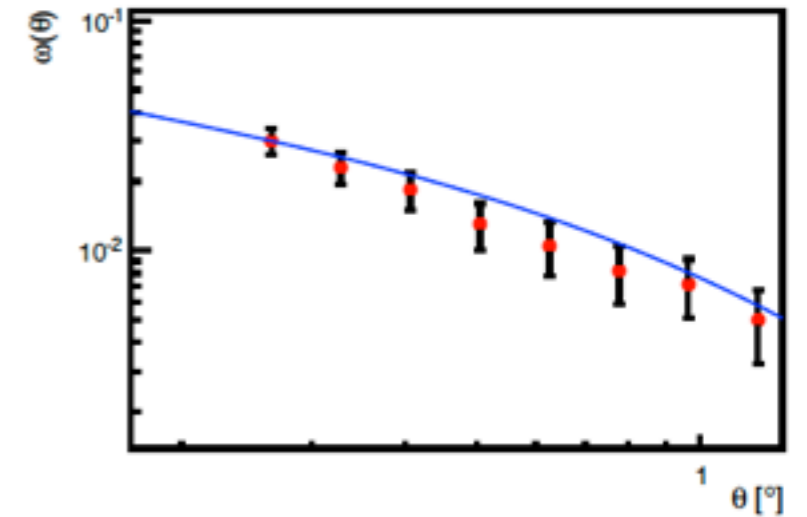
Fijamos los parámetros cosmológicos al valor de la simulación y
ajustamos b



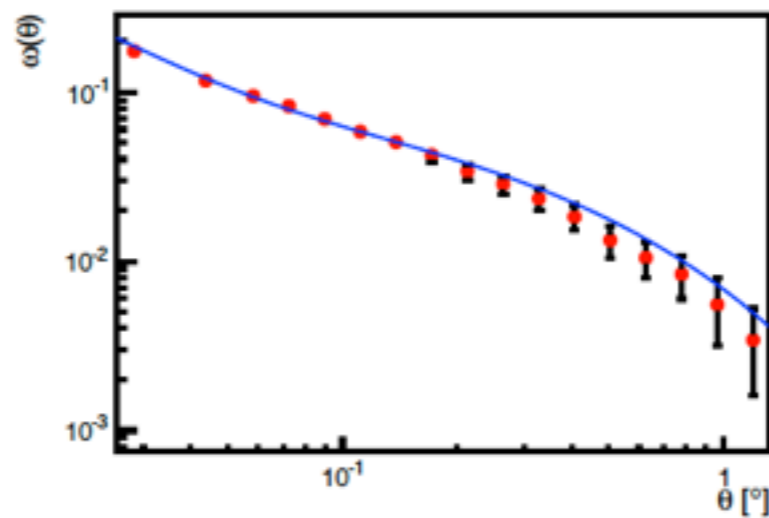
$0.2 < z_{phot} < 0.4$



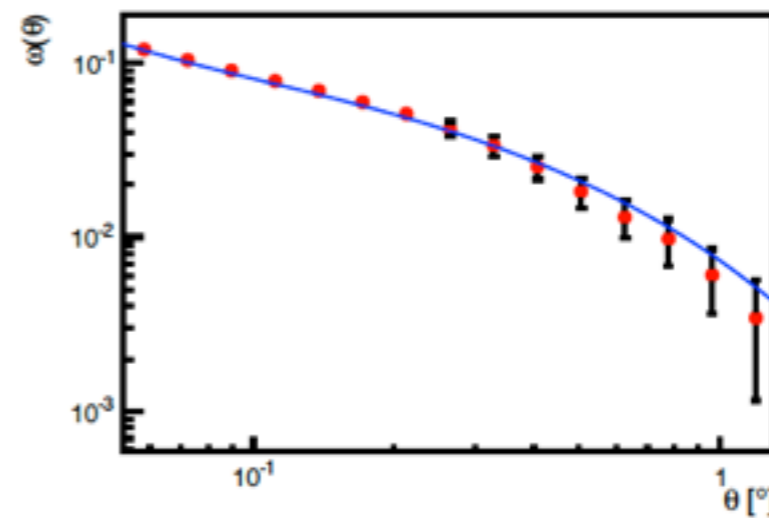
$0.4 < z_{phot} < 0.6$



$0.6 < z_{phot} < 0.8$

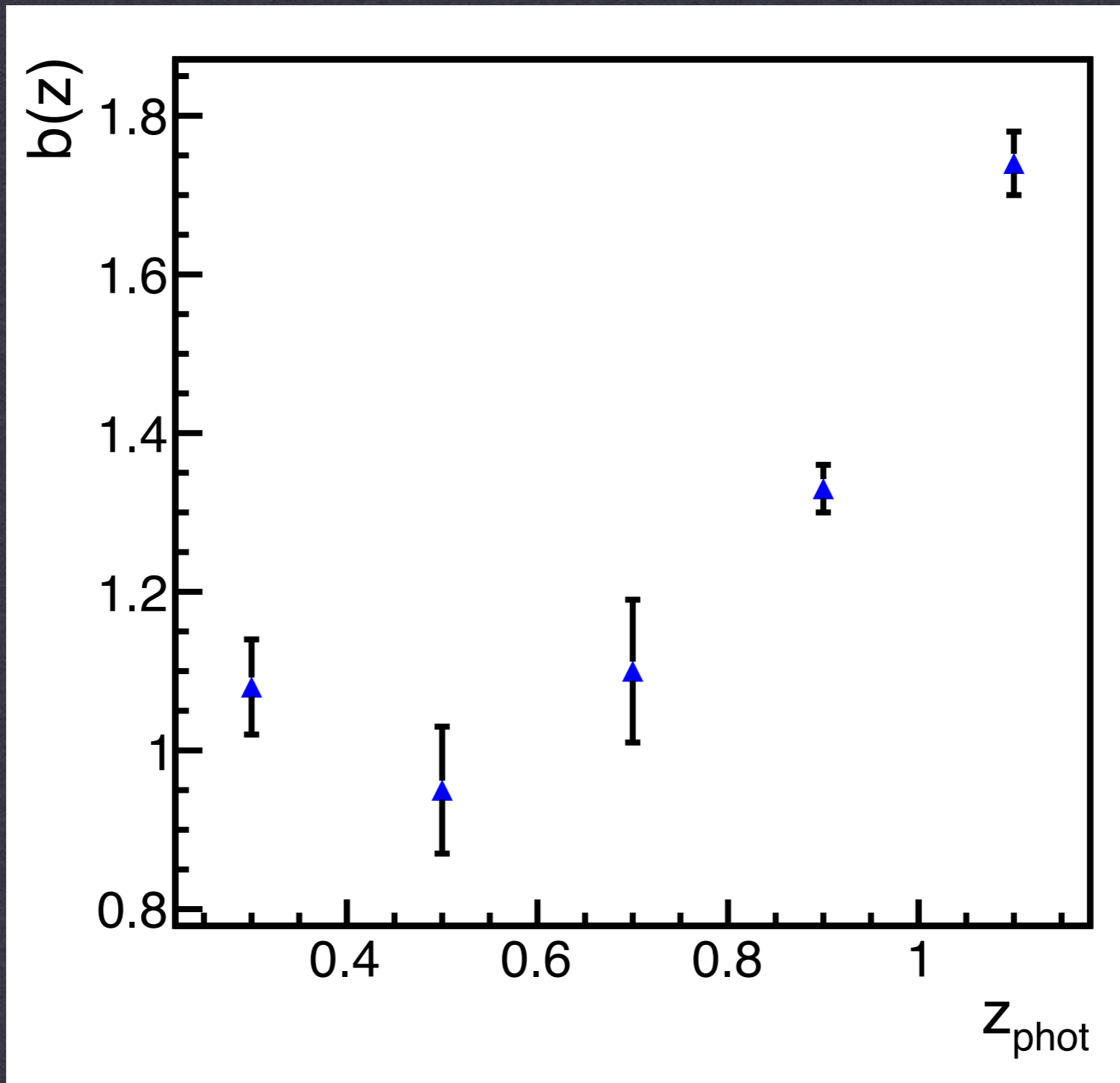


$0.8 < z_{phot} < 1.0$



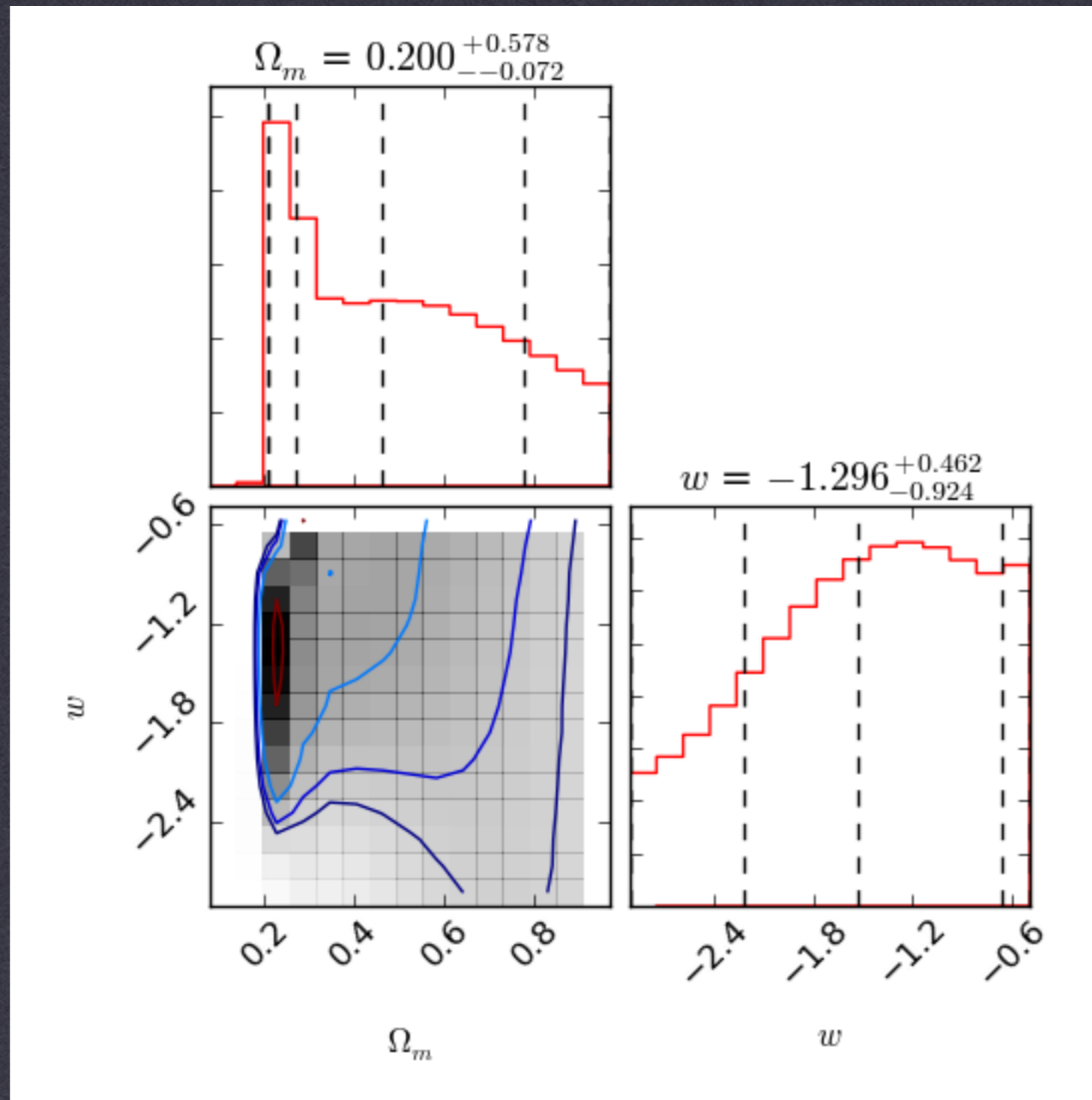
$1.0 < z_{phot} < 1.2$

MEDIDA DEL BIAS



Evolución esperada: Mayor bias a mayor z

MEDIDA DE PARÁMETROS FIJANDO B



Se fija el resto de parámetros y se asume un modelo cuadrático de bias. Se explora una red de valores

CONCLUSIONES

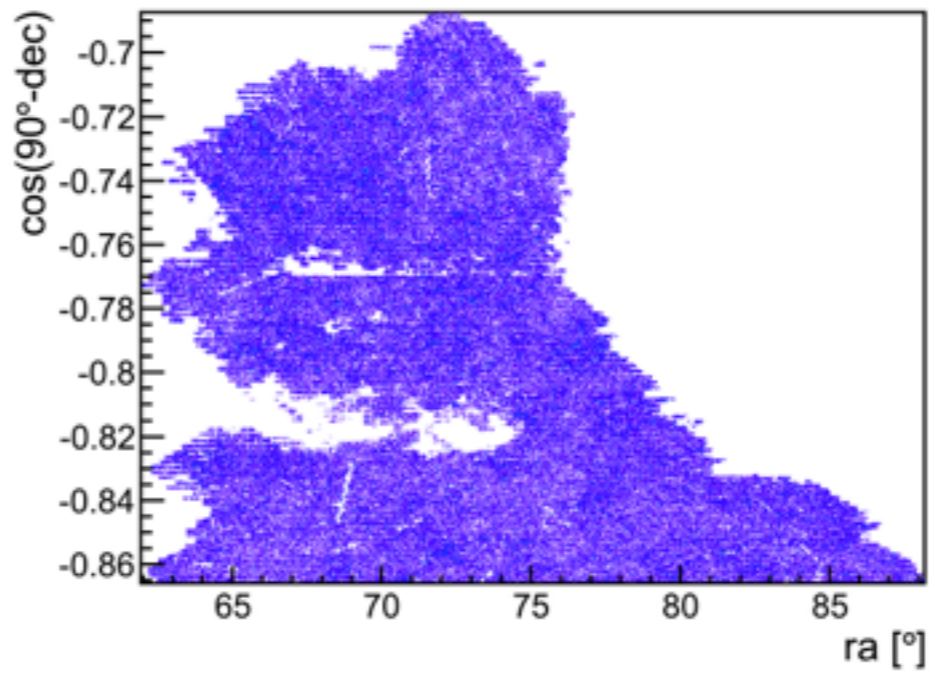
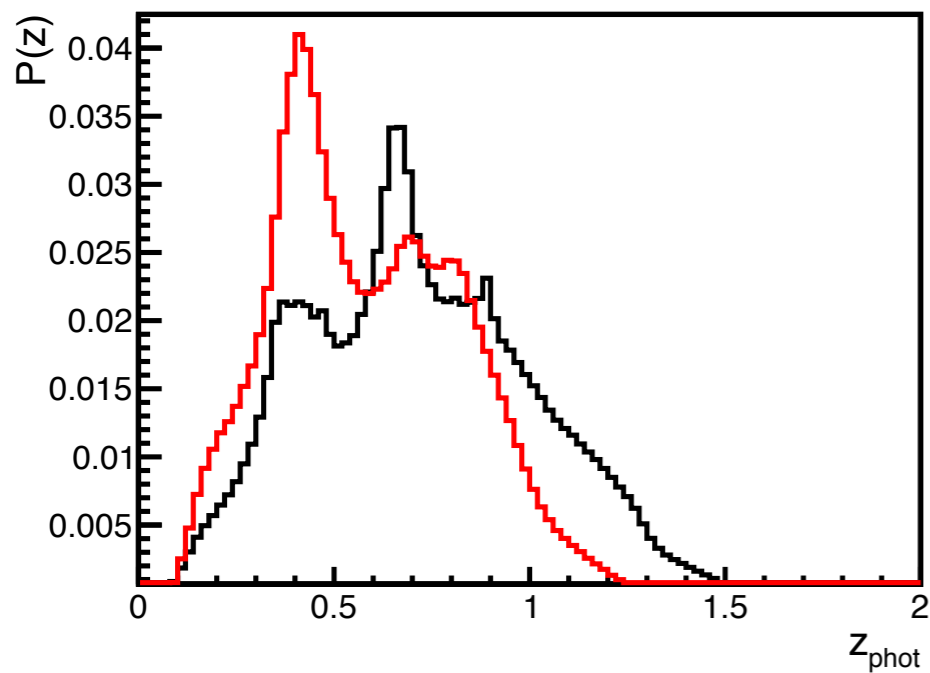
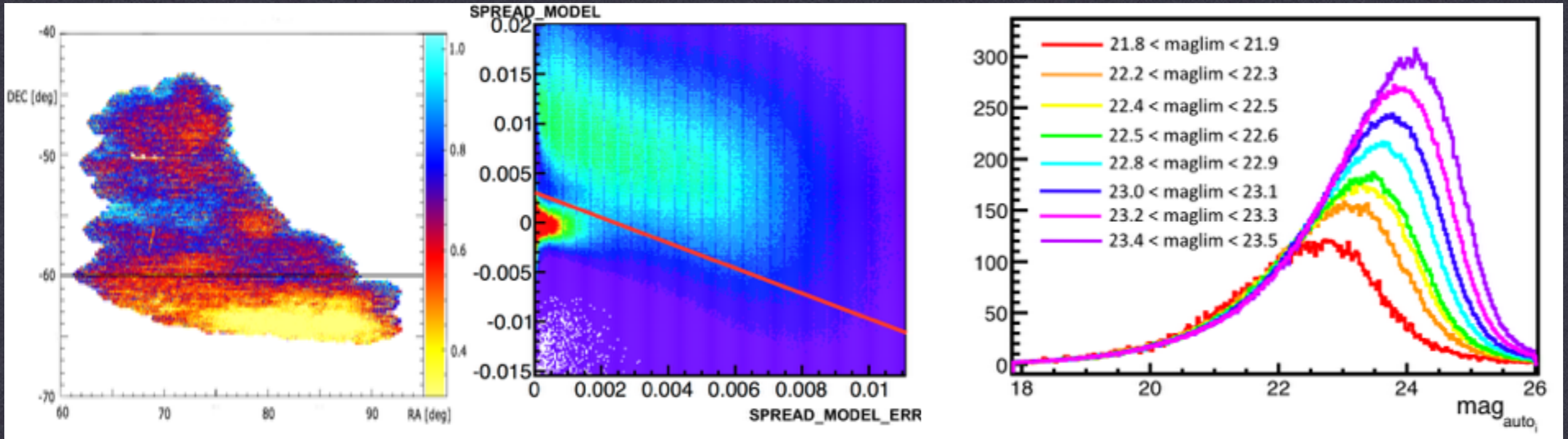
- **Medida de bias galáctico en un área pequeña**
- **Medida de parámetros cosmológicos en área pequeña y en situación realista**
- **Futuro prometedor para los datos de des. errores 6 veces más pequeños con 5000 grados cuadrados**

MEDIDAS EN DATOS DE VERIFICACIÓN DE DES

In preparation: Crocce et al. “Galaxy Clustering in the Dark Energy Survey Science Verification Data”

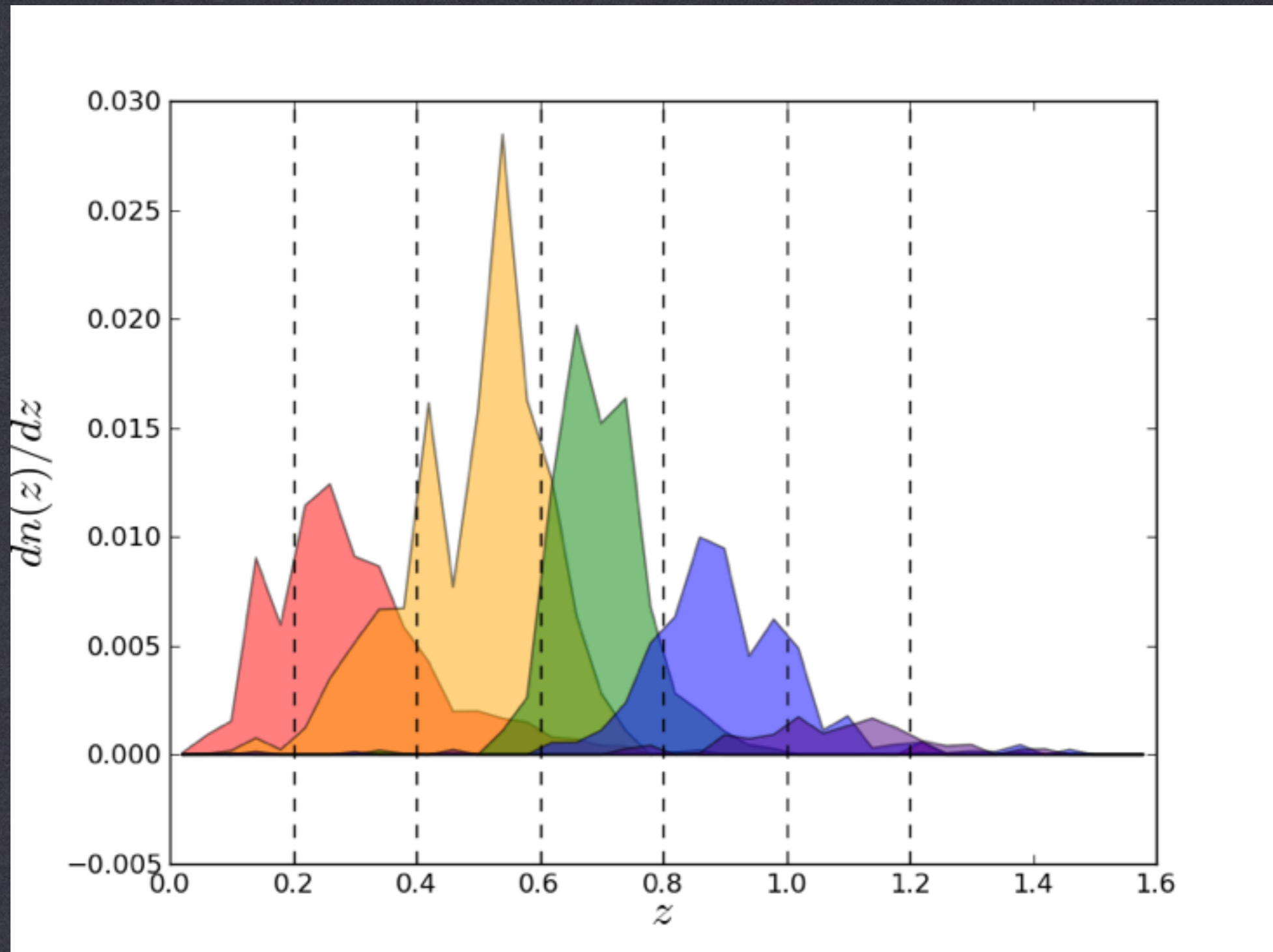
LA MUESTRA

CAMPO SPT-E DE SVA-1 ~200 GRADOS CUADRADOS
MAGNITUDES G,R,I,Z,Y



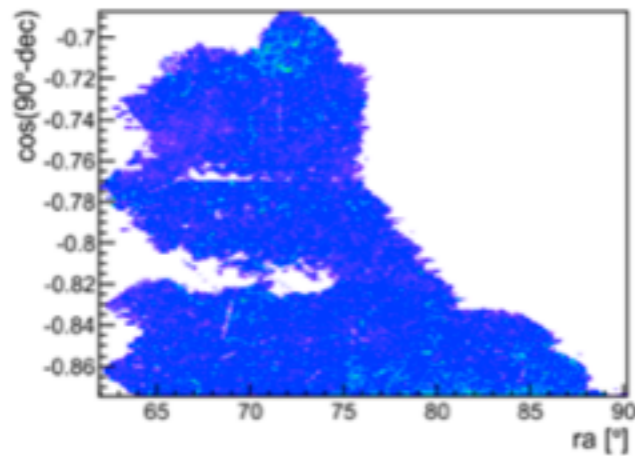
LA MUESTRA

DESDM: Distribución obtenida de la muestra de calibración
(4318 gal)

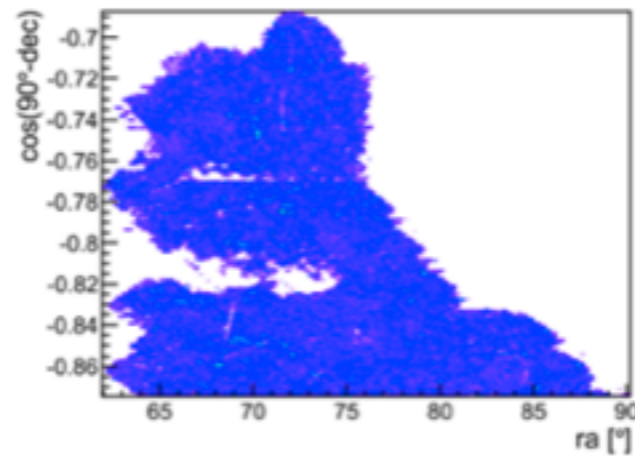


LA MUESTRA

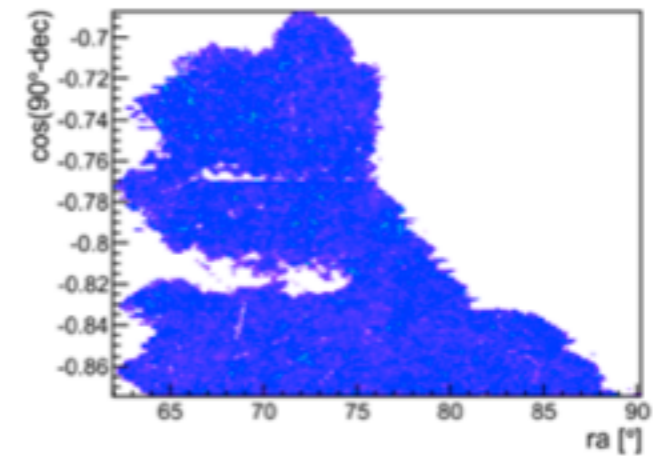
56



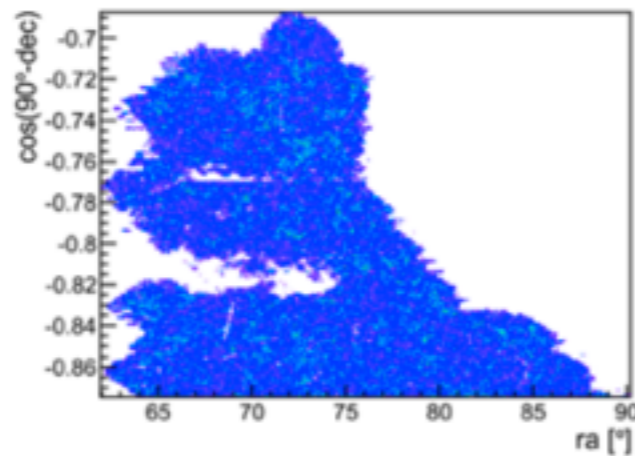
$N = 627961$
 $0.2 < z_{phot} < 0.4$



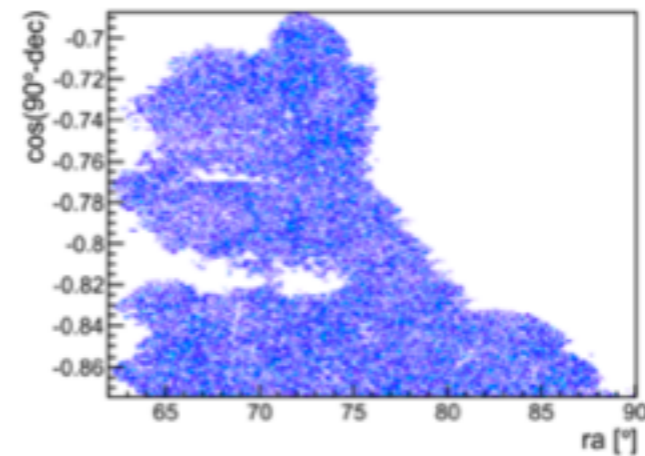
$N = 894114$
 $0.4 < z_{phot} < 0.6$



$N = 722712$
 $0.6 < z_{phot} < 0.8$



$N = 513665$
 $0.8 < z_{phot} < 1.0$

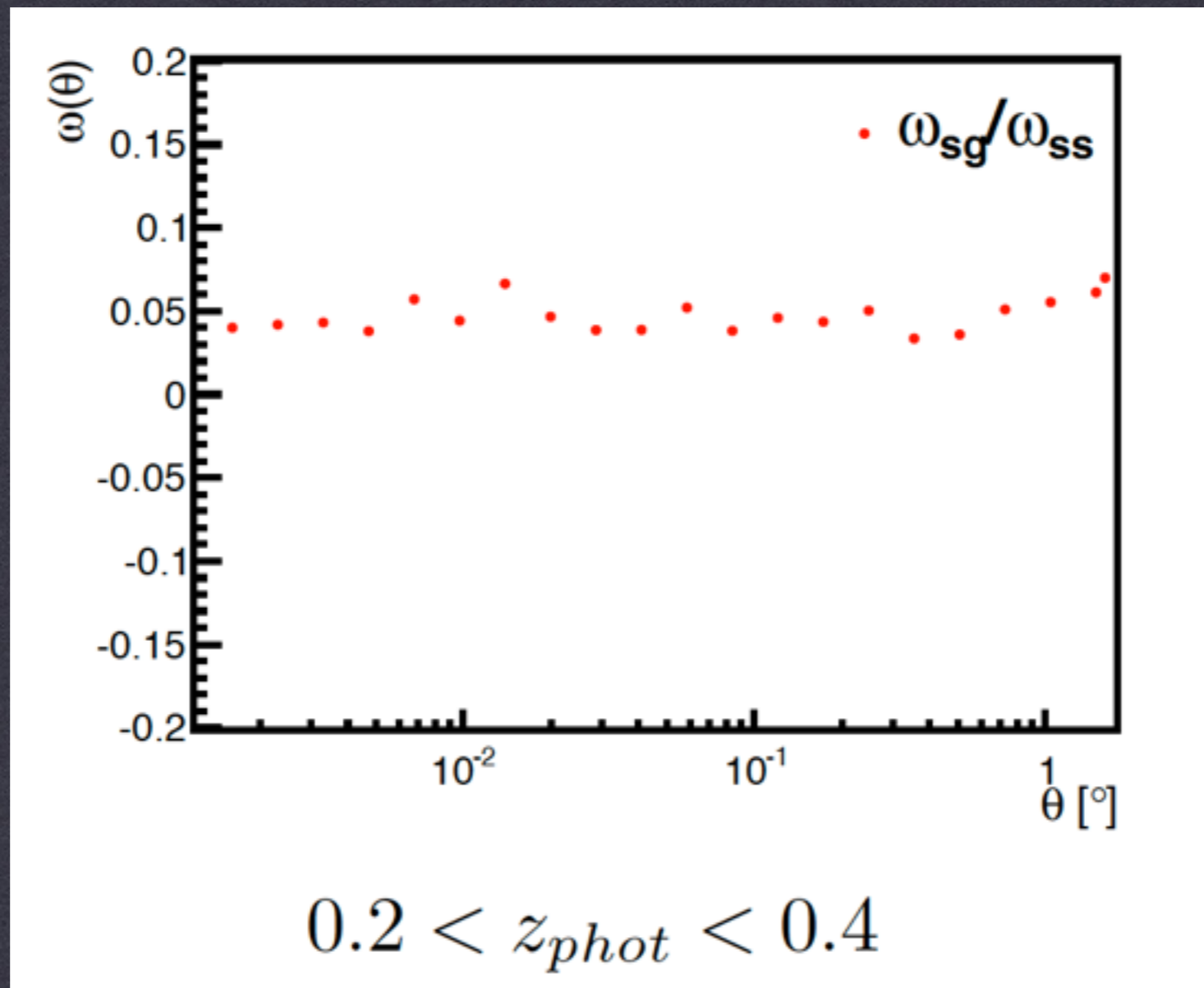


$N = 121807$
 $1.0 < z_{phot} < 1.2$

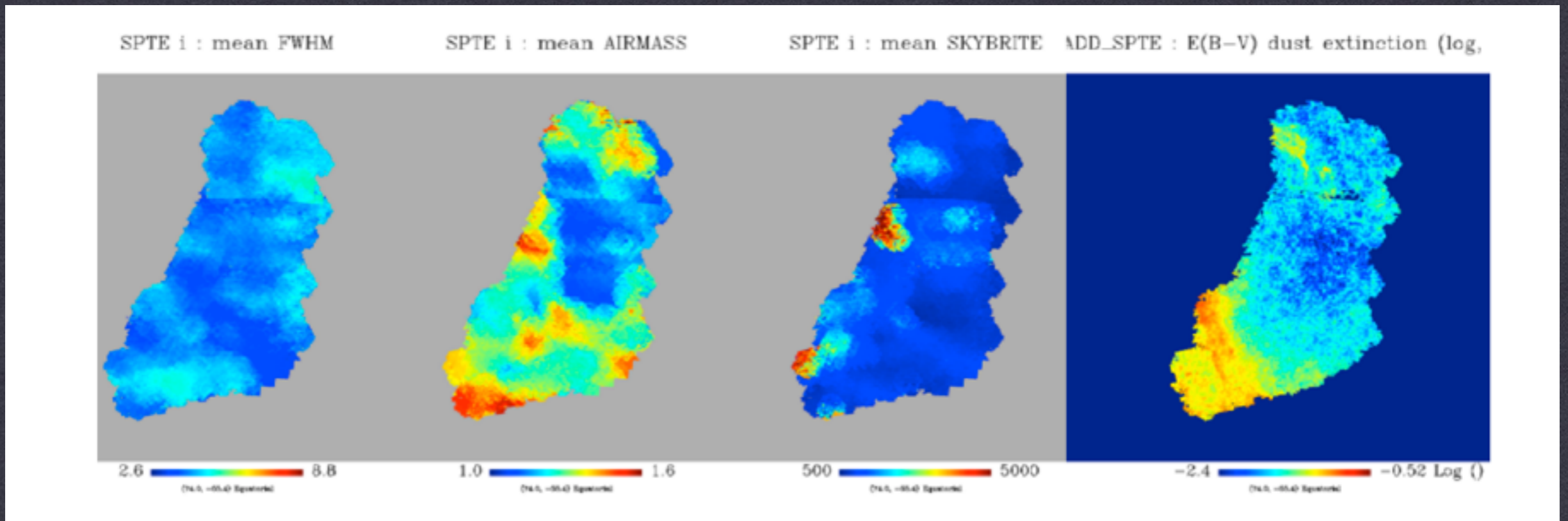
LA MUESTRA

ESTIMANDO LA CONTAMINACIÓN ESTELAR

Calculamos la correlación que tienen las estrellas y galaxias según nuestro corte



LA MUESTRA SISTEMÁTICOS

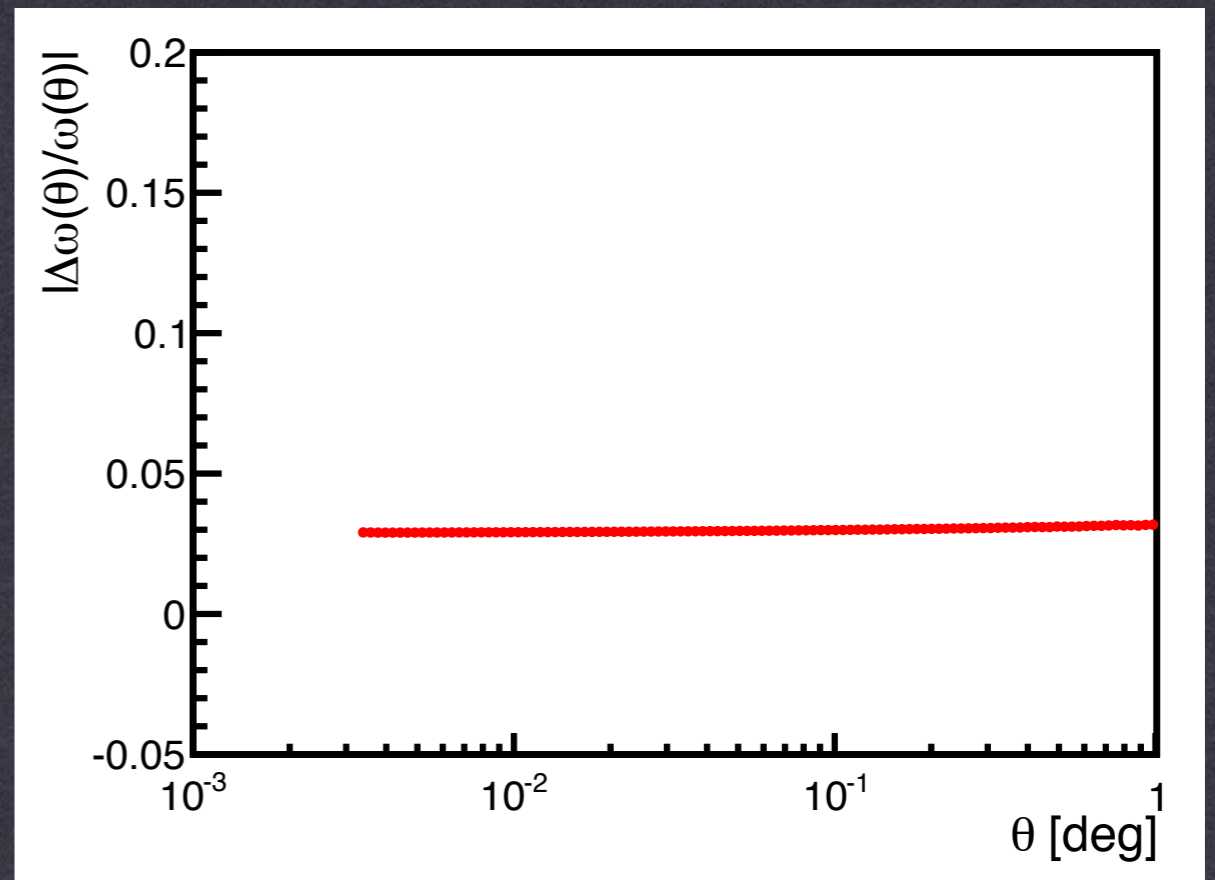
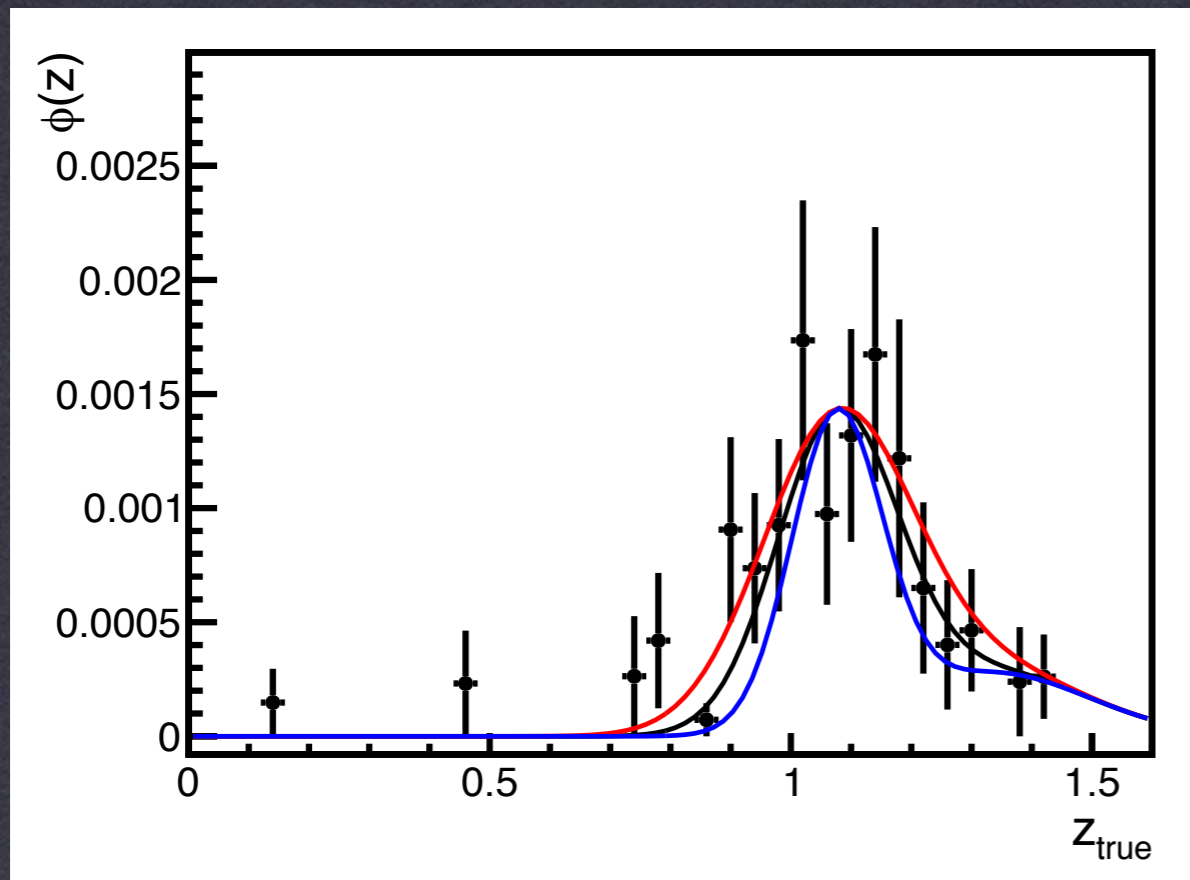


Los corregimos usando el método de Ho et al 2012

LA MUESTRA

SISTEMÁTICOS: Corrimiento al rojo fotométrico. Usamos la muestra de calibración y ajustamos los datos a la suma de dos gaussianas

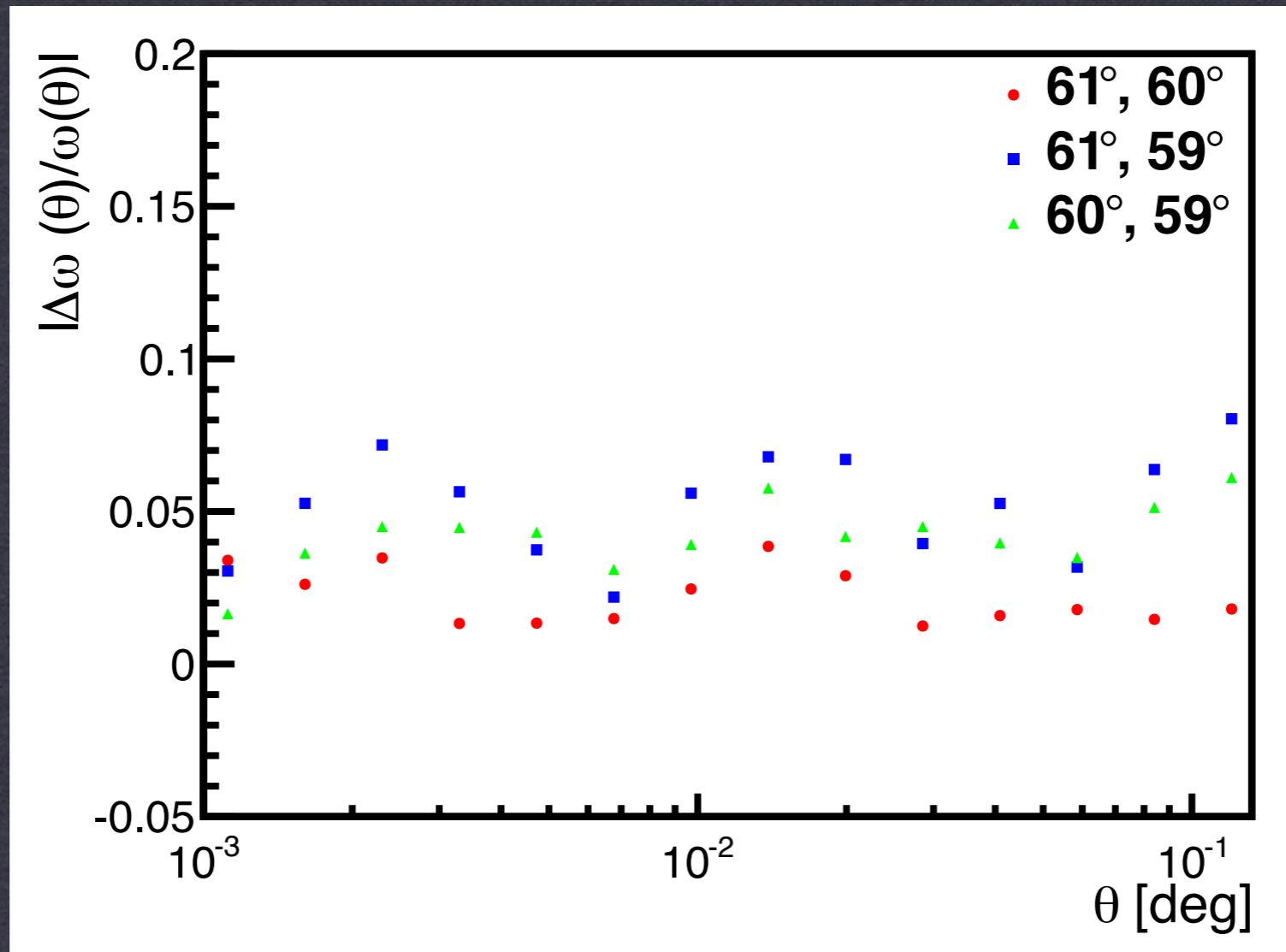
$$\omega(\theta) = \int_0^\infty dz_1 \phi(z_1) \int_0^\infty dz_2 \phi(z_2) \xi(\theta, z_1, z_2)$$



El error es menor del 4%

LA MUESTRA

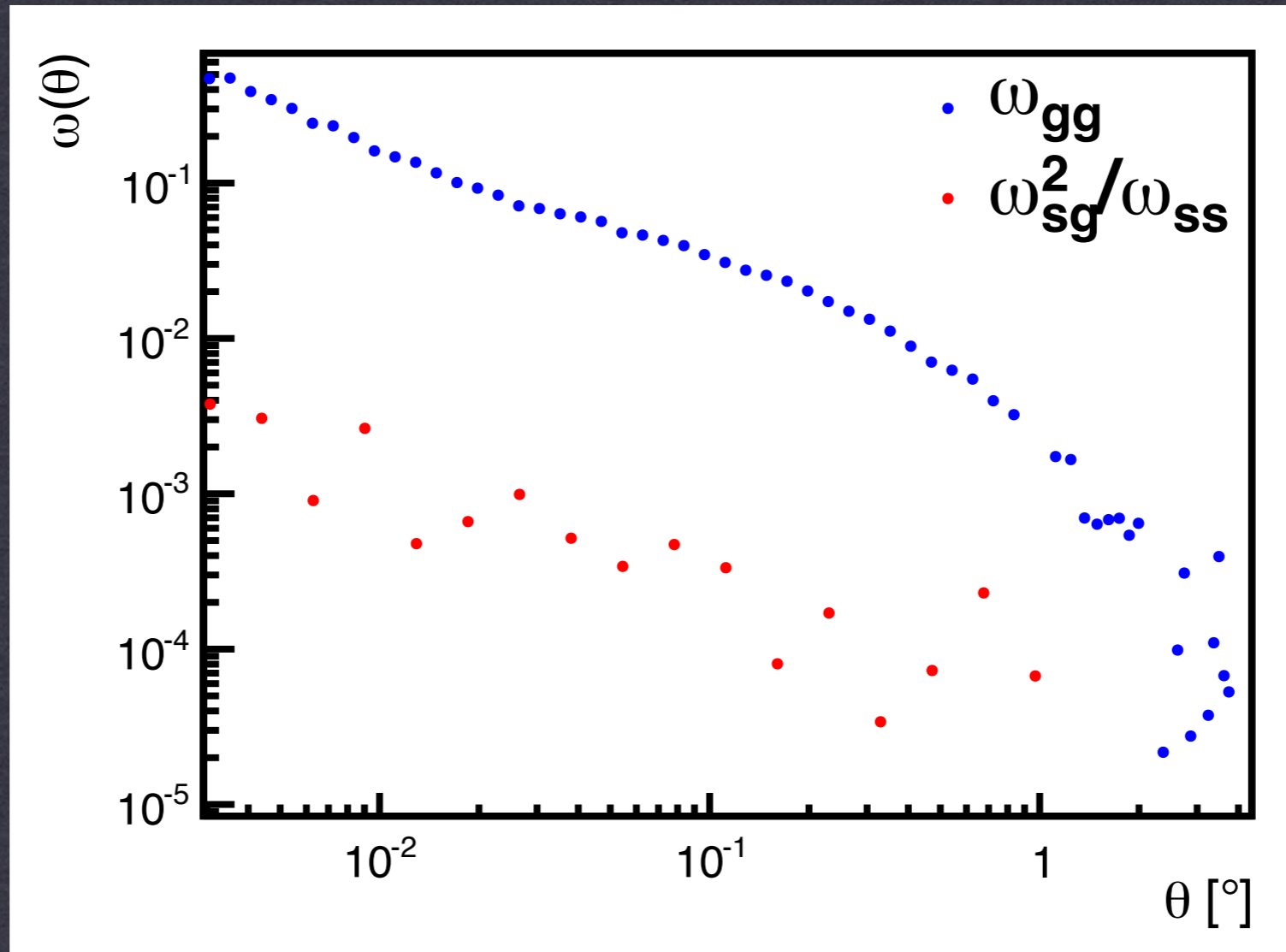
SISTEMÁTICOS: Corte en declinación



El error es del orden del 5%

LA MUESTRA

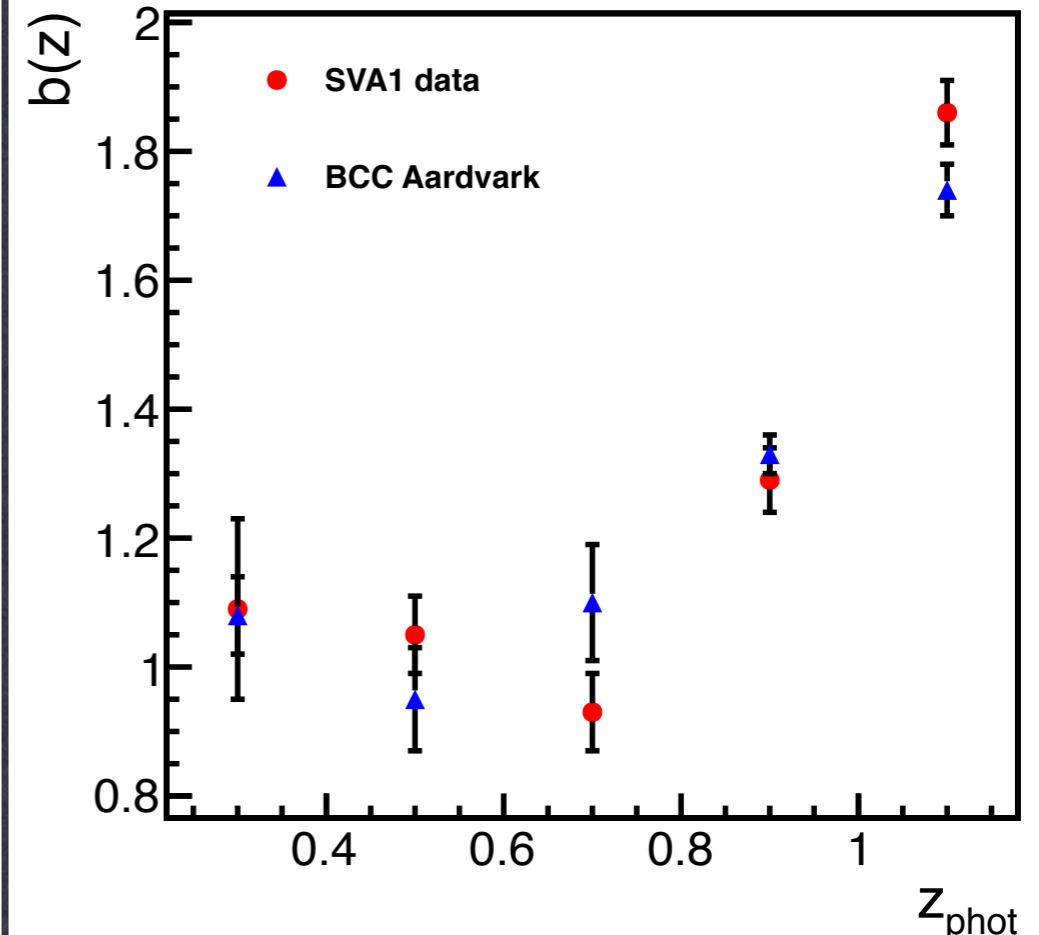
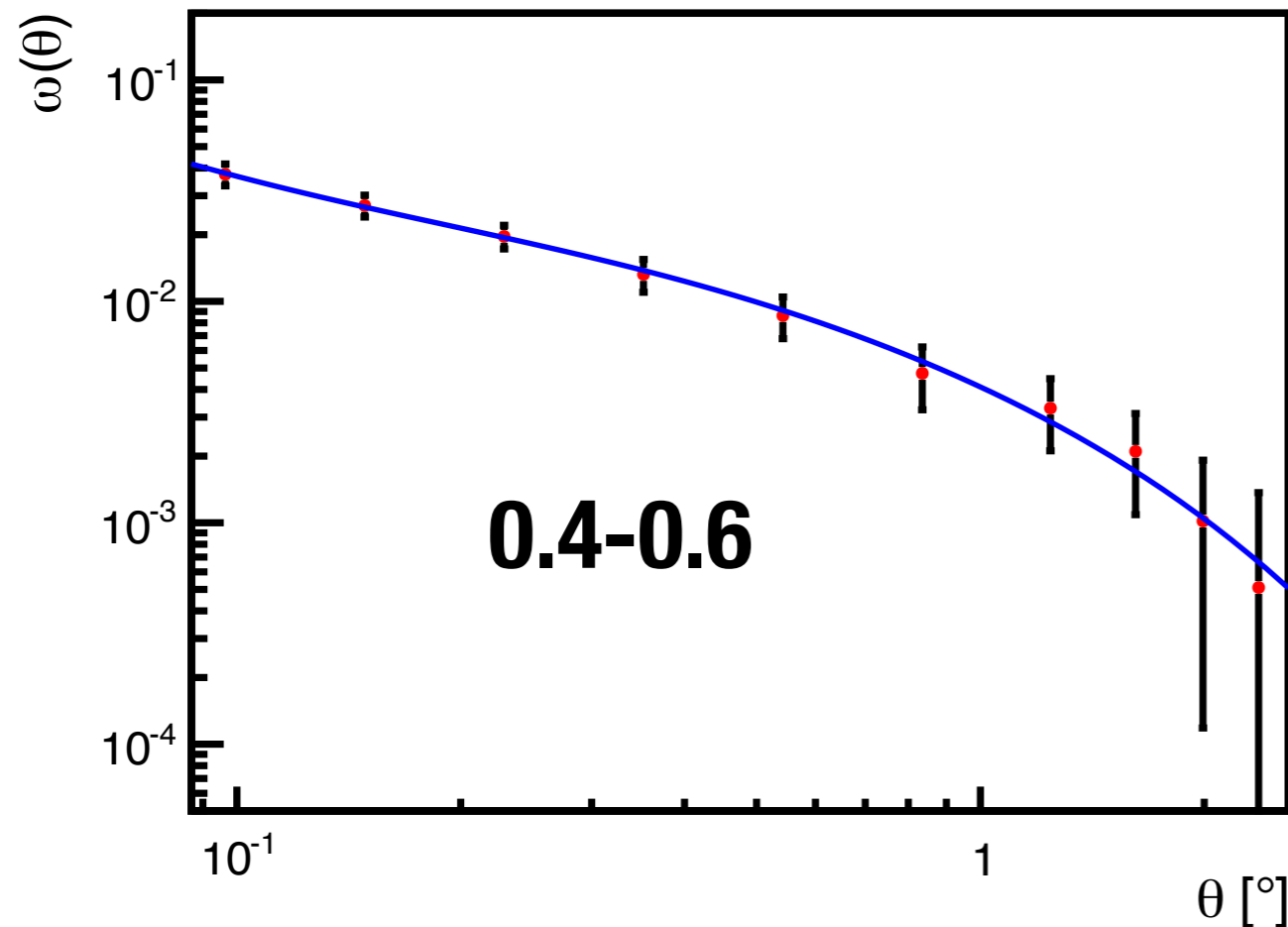
SISTEMÁTICOS: Contaminación estelar. Corrección



Corrección despreciable (casi 3 órdenes de magnitud más pequeña)

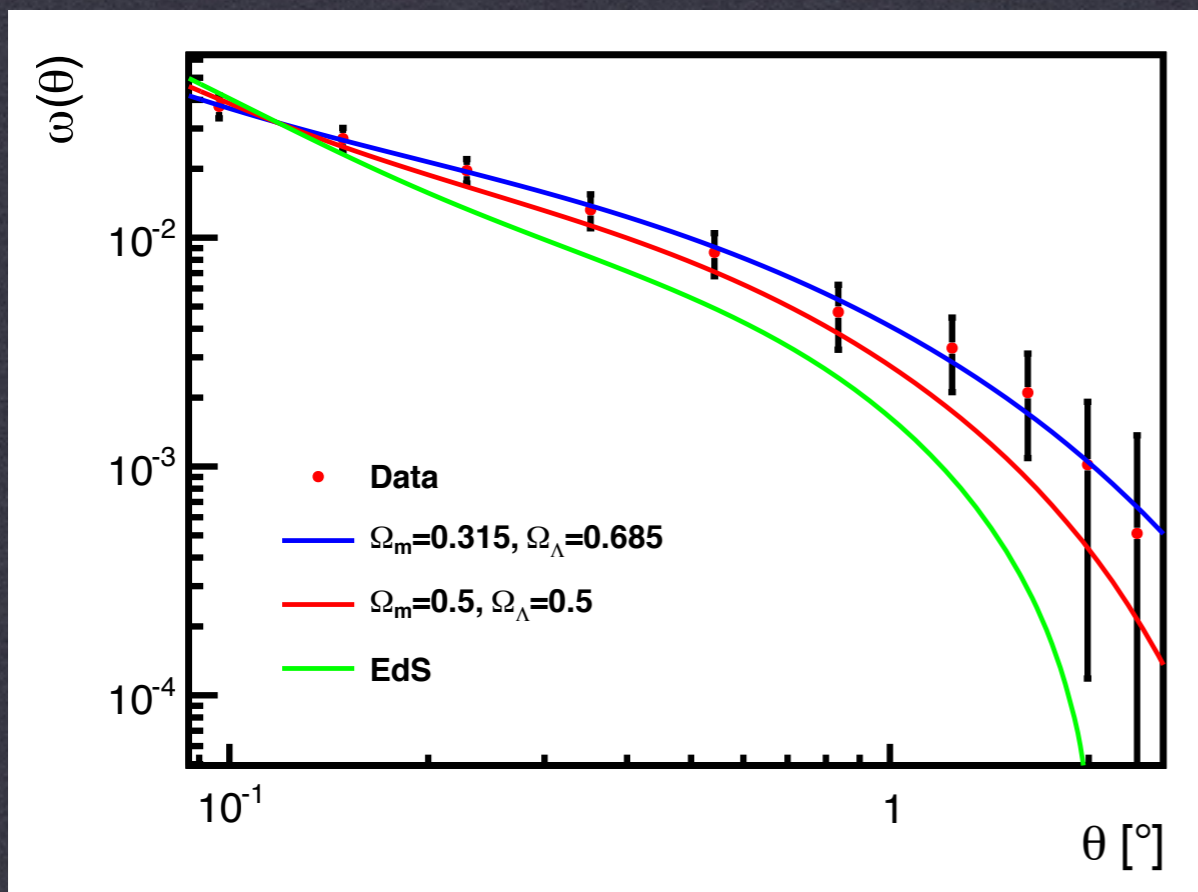
MEDIDA DEL BIAS

Fijamos el valor de los parámetros a Planck 2013 y ajustamos b

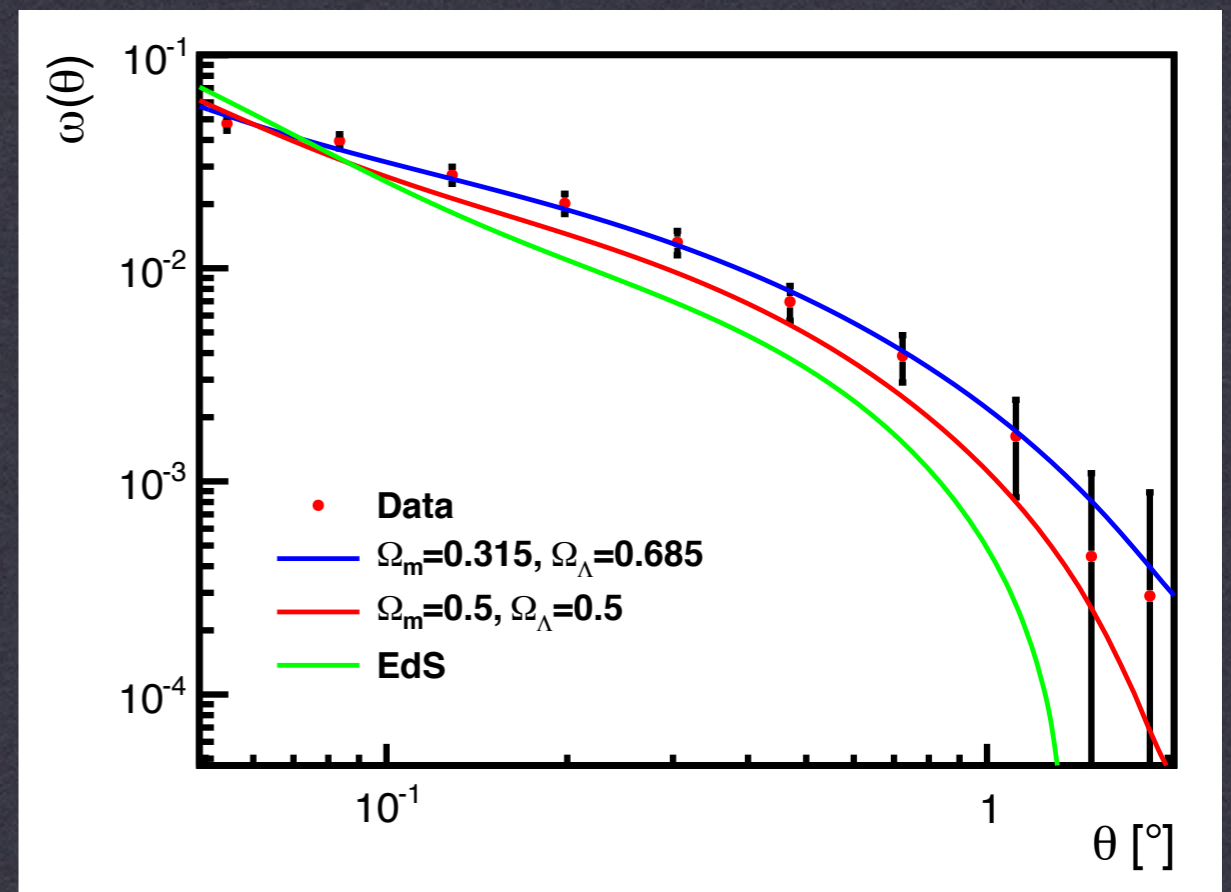


z_{phot}	$\chi^2/ndof$	p	b	Δb
0.2 - 0.4	0.158	0.992	1.09	0.14
0.4 - 0.6	0.286	0.985	1.05	0.06
0.6 - 0.8	0.763	0.659	0.93	0.06
0.8 - 1.0	0.633	0.786	1.29	0.05
1.0 - 1.2	0.659	0.747	1.86	0.05

MEDIDA DEL BIAS



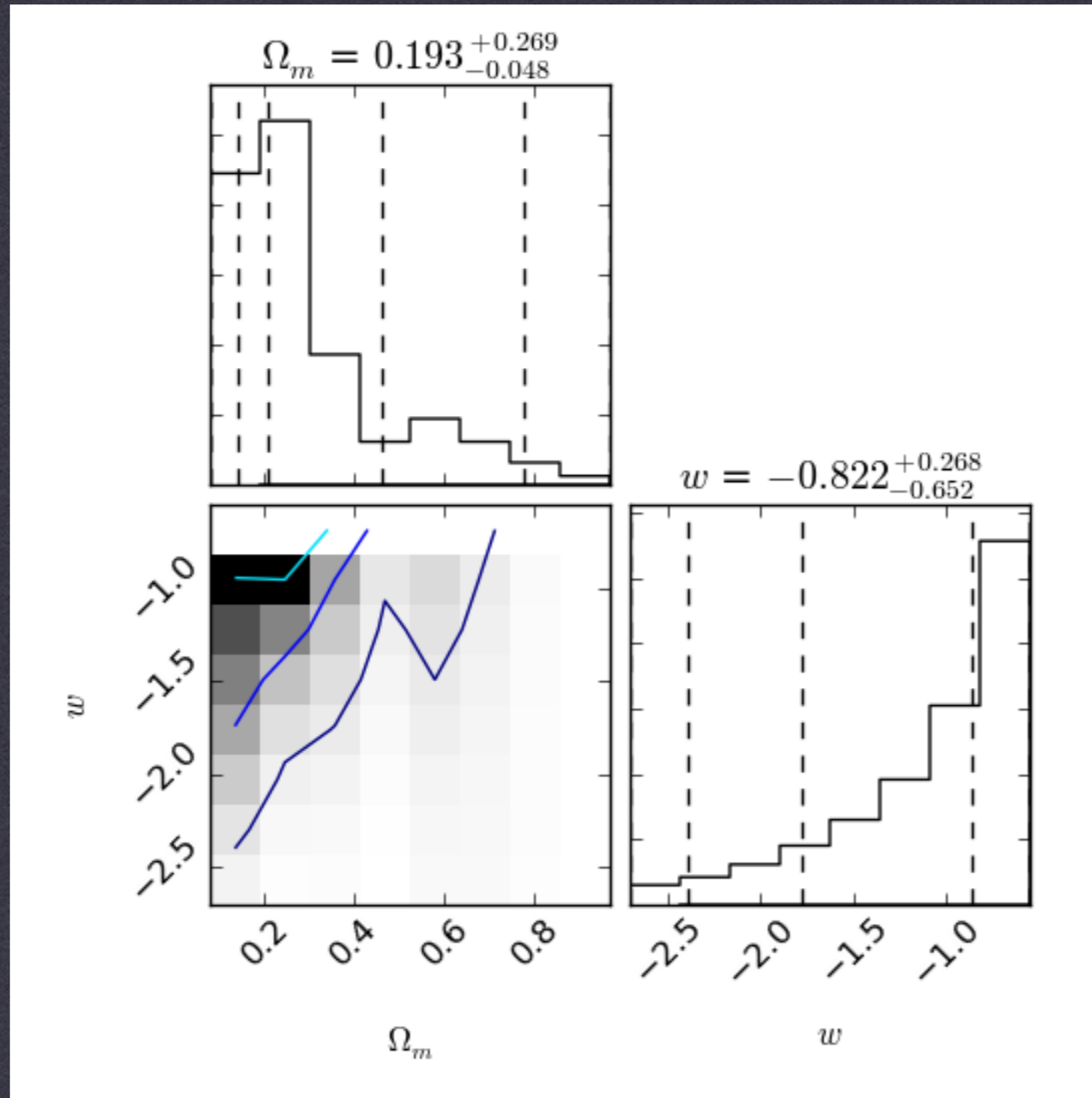
0.4-0.6



0.8-1.0

¡Existe sensibilidad a la presencia de energía oscura con esta muestra de verificación!

MEDIDA DE PARÁMETROS COSMOLÓGICOS



Fijamos b y usamos una red en la que variamos dos parámetros

CONCLUSIONES

- MEDIDA DE PARÁMETROS COSMOLÓGICOS Y DE BIAS EN DATOS DE VERIFICACIÓN DE DES
- EVALUACIÓN COMPLETA DE SISTEMÁTICOS
- PRIMERAS MEDIDAS DE LA FUNCIÓN DE CORRELACIÓN DE GALAXIAS ENTRE z 0.75 Y 1.4

CONCLUSIONES

MÉTODOS Y MEDIDAS EN SIMULACIONES

- SE PRESENTAN NUEVOS MÉTODOS PARA EL ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA A GRAN ESCALA Y LA ENERGÍA OSCURA
- BAO: PRESENTACIÓN DEL MÉTODO DE MEDIDA EN LÍNEA DE VISIÓN Y PRIMERA MEDIDA ANGULAR CON PDF
- HOMOGENEIDAD: PRESENTACIÓN DEL MÉTODO DE MEDIDA (MEDIDA EN DATOS DE 2MPZ)

MEDIDAS

- **1ª MEDIDA DE FUNCIÓN DE CORRELACIÓN EN DES, COMPATIBLE CON PLANCK**
- **GRAN POTENCIAL DE LOS DATOS Y TÉCNICAS ÚTILES PARA LAS SIGUIENTES CAMPAÑAS Y FUTUROS EXPERIMENTOS**

GRACIAS POR LA ATENCIÓN

PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS

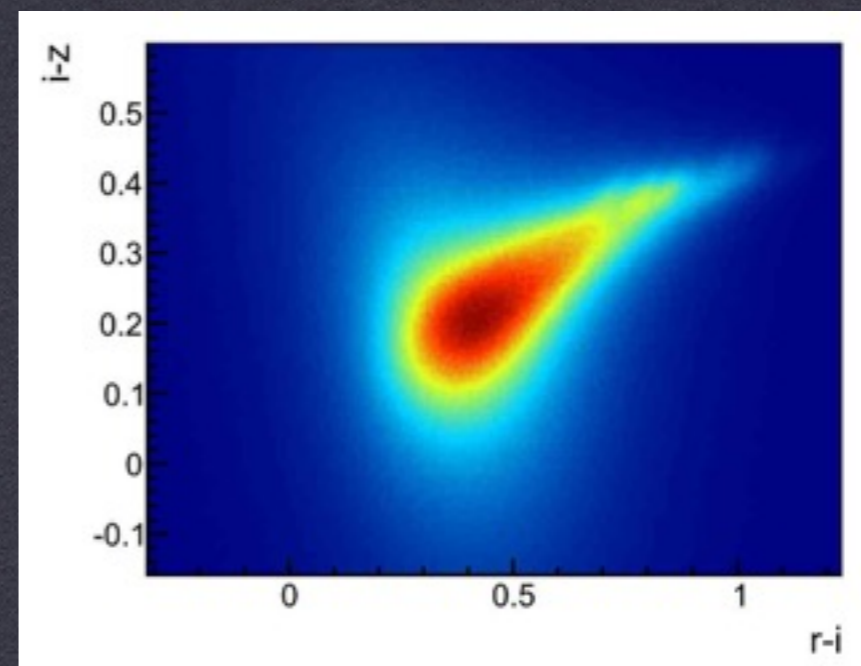
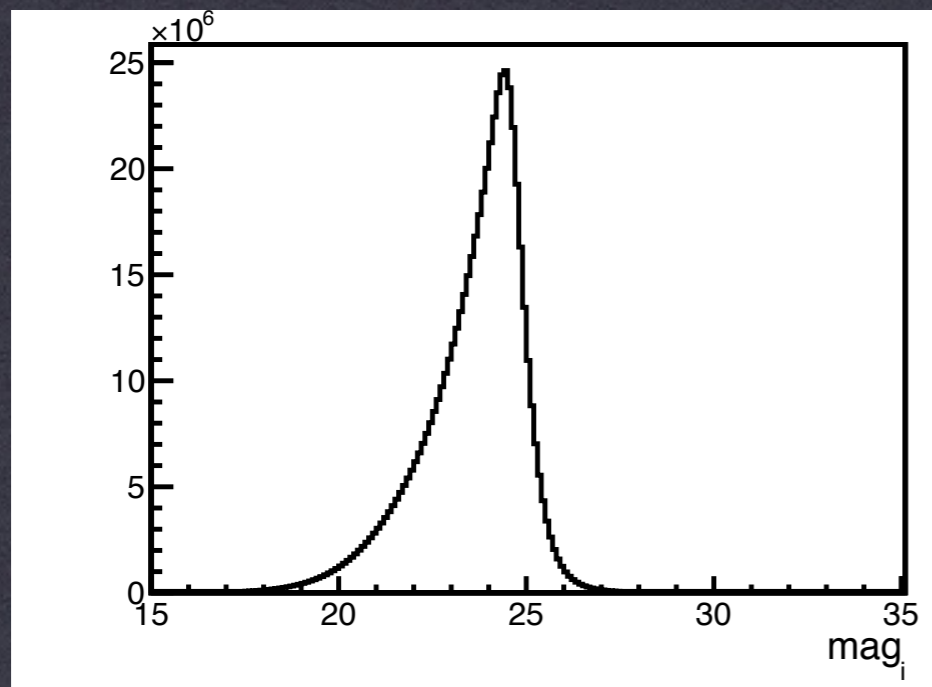
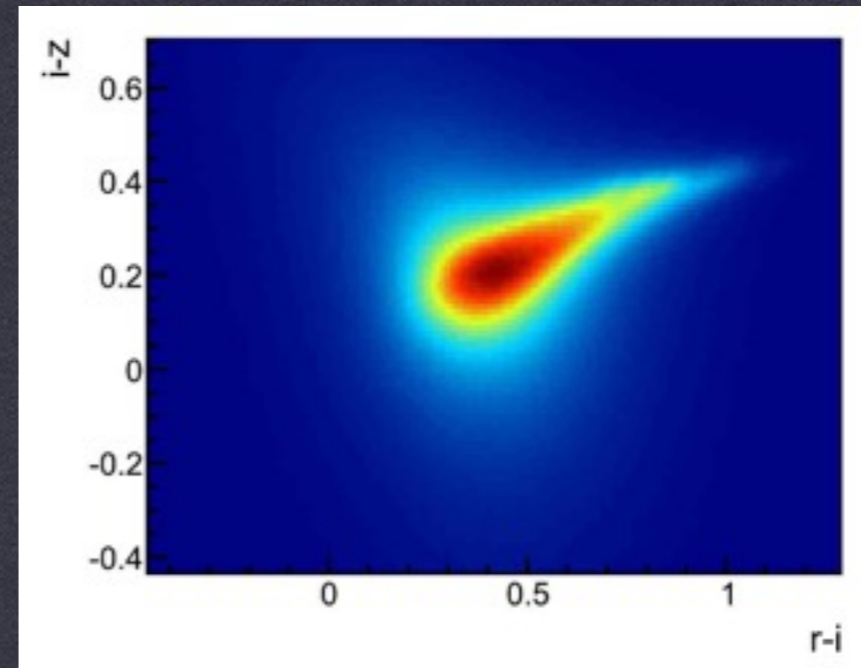
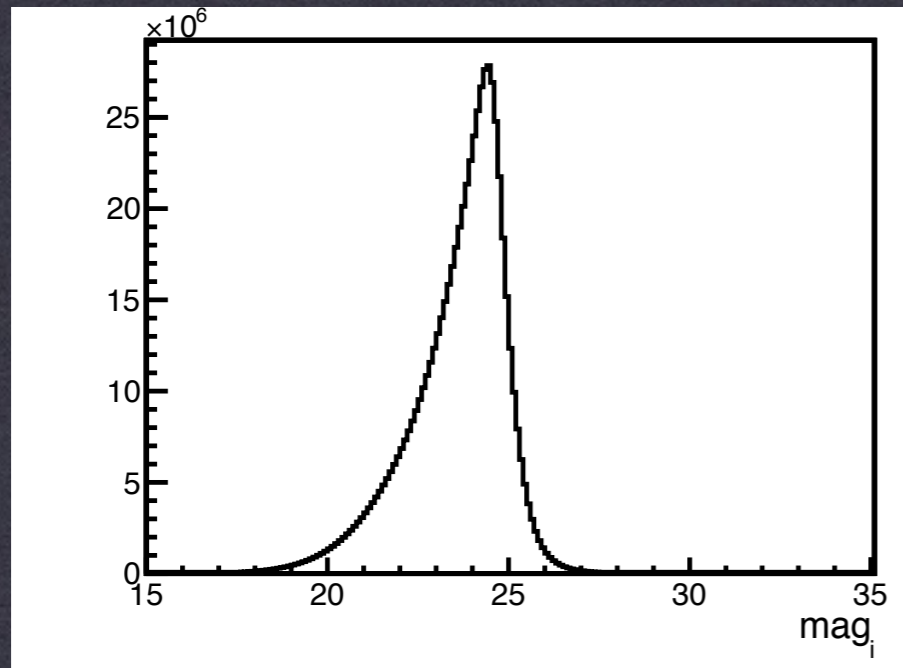
E. Sanchez et al. "Precise measurement of the radial baryon acoustic oscillation scales in galaxy redshift surveys." In: MNRAS 434 (Sept. 2013), pp. 2008-2019.

D. Alonso et al. "Measuring the transition to homogeneity with photometric redshift surveys." In: MNRAS 440 (May 2014), pp. 10-23.

D. Alonso et al. "Homogeneity and isotropy in the 2MASS Photometric Redshift catalogue." In: MNRAS 449, (March 2015) pp. 670-684.

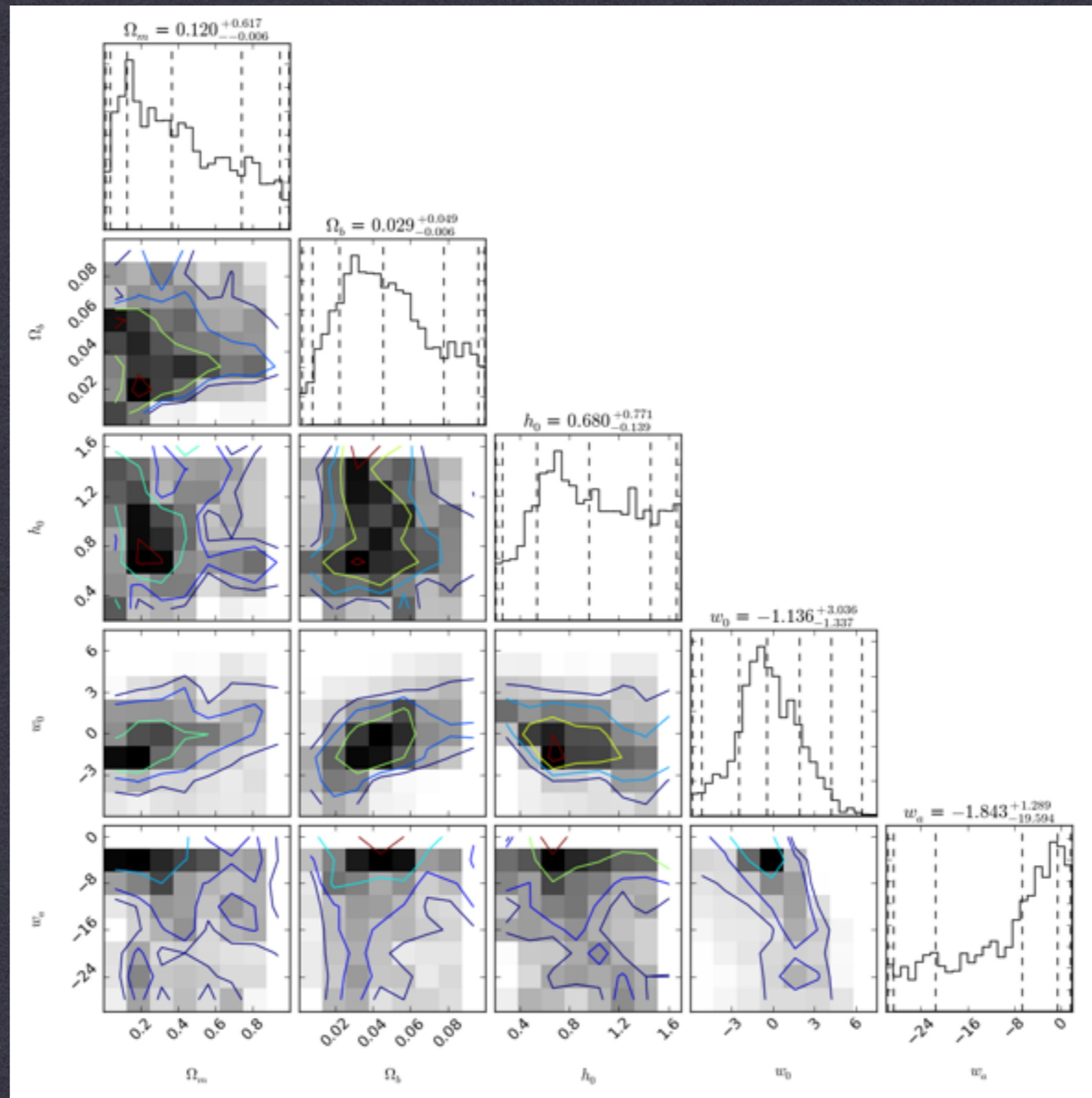
In preparation: Crocce et al. "Galaxy Clustering in the Dark Energy Survey Science Verification Data"

PRUEBAS DE LA SIMULACIÓN



BAO ANGULAR EN DES

MCMC: 9 pars en muestreo, marginalización sobre 5



MIDIENDO HOMOGENEIDAD

Robustez del método

Modelos LTB

Los modelos LTB asumen que el observador se encuentra en cerca del centro de una gran infradensidad. Es un modelo no homogéneo extremo.

Homogéneo angularmente e inhomogéneo radialmente. No necesita de energía oscura.

