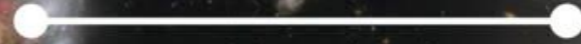


Energía Oscura y Distribución de Galaxias

BAO



Dr. Axel de la Macorra
Instituto de Física, UNAM
Instituto Avanzado de Cosmología

Colaboración
Mariana Jaber

• CONTENIDO

1. La expansión acelerada del Universo: Energía Oscura

2. BAO: formación y evolución de la escala

A. Física de la formación de la escala acústica

B. Uso de la escala como Regla Estadística Estándar

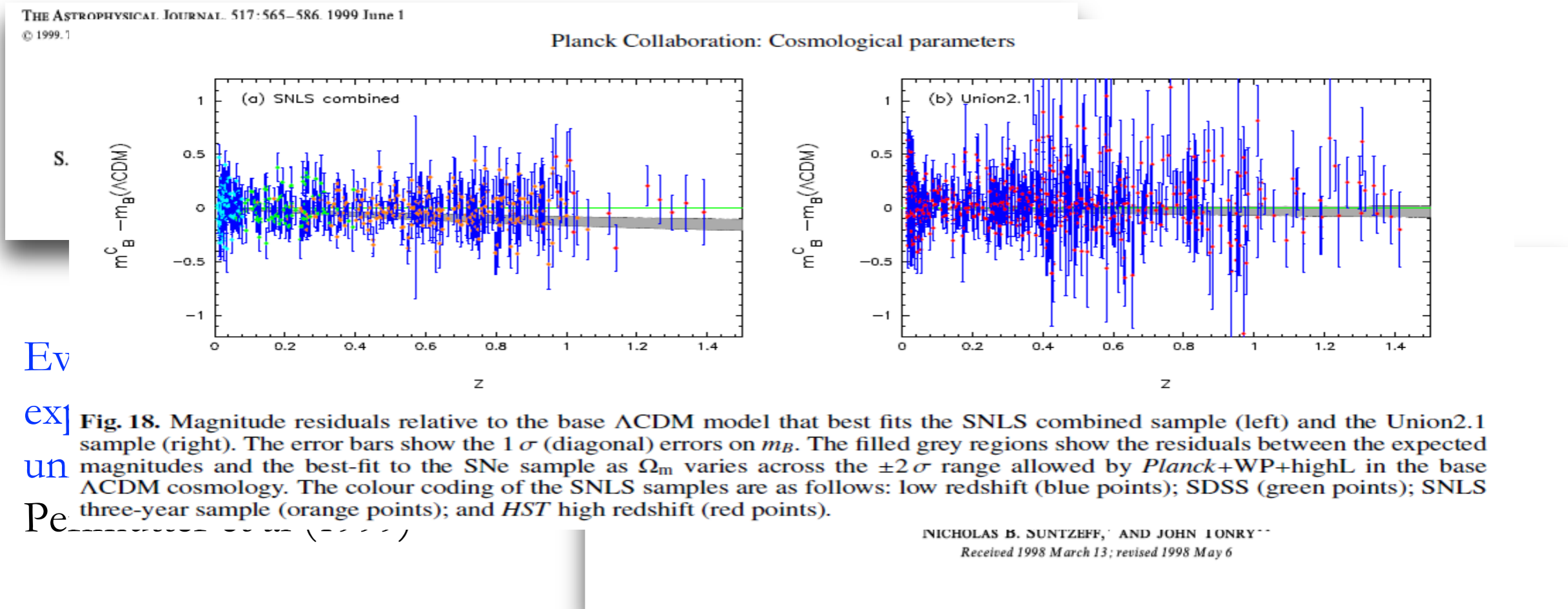
C. Sistemáticos en la determinación de la escala

- Errores en $P(k)$ y en determinar el redshift
- Sesgos
- No linealidades
- RSD (redshift space distorsion)

3. Como determinar con mayor precisión a :

la Energía Oscura y Materia Oscura

“Dark Energy it’s not only terribly important for astronomy; it’s the central problem of physics. It’s been the bone in our throat for a long time” Steven Weinberg

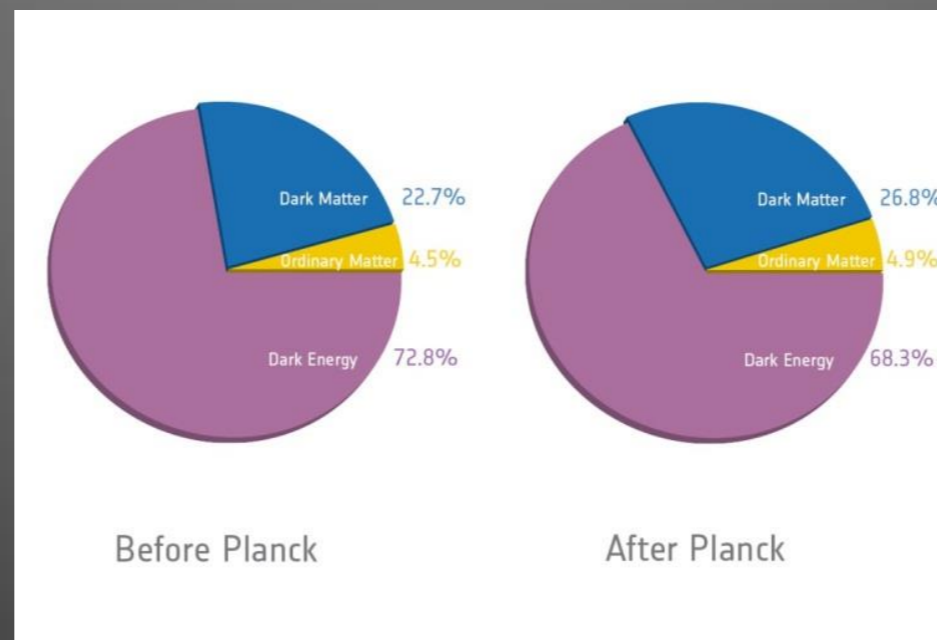
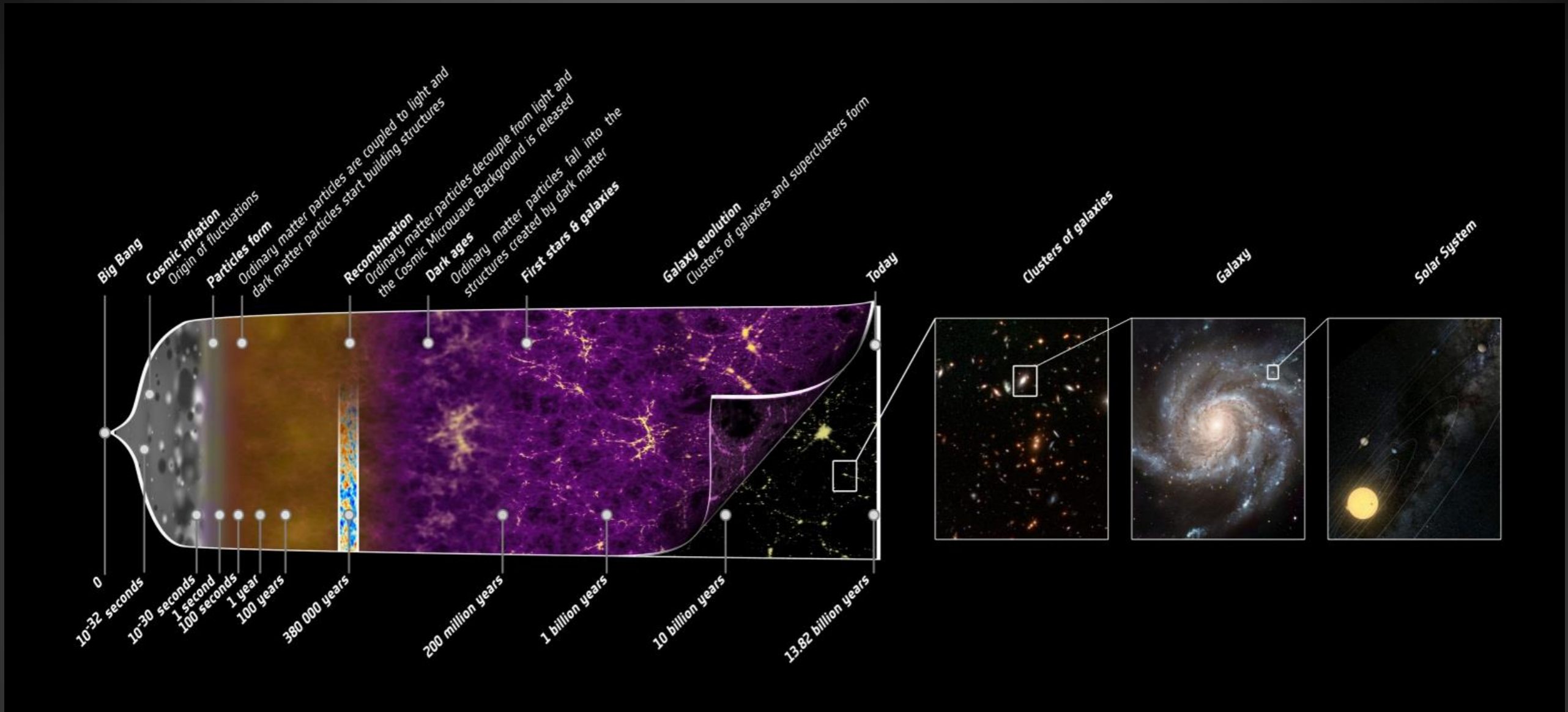


• E_V

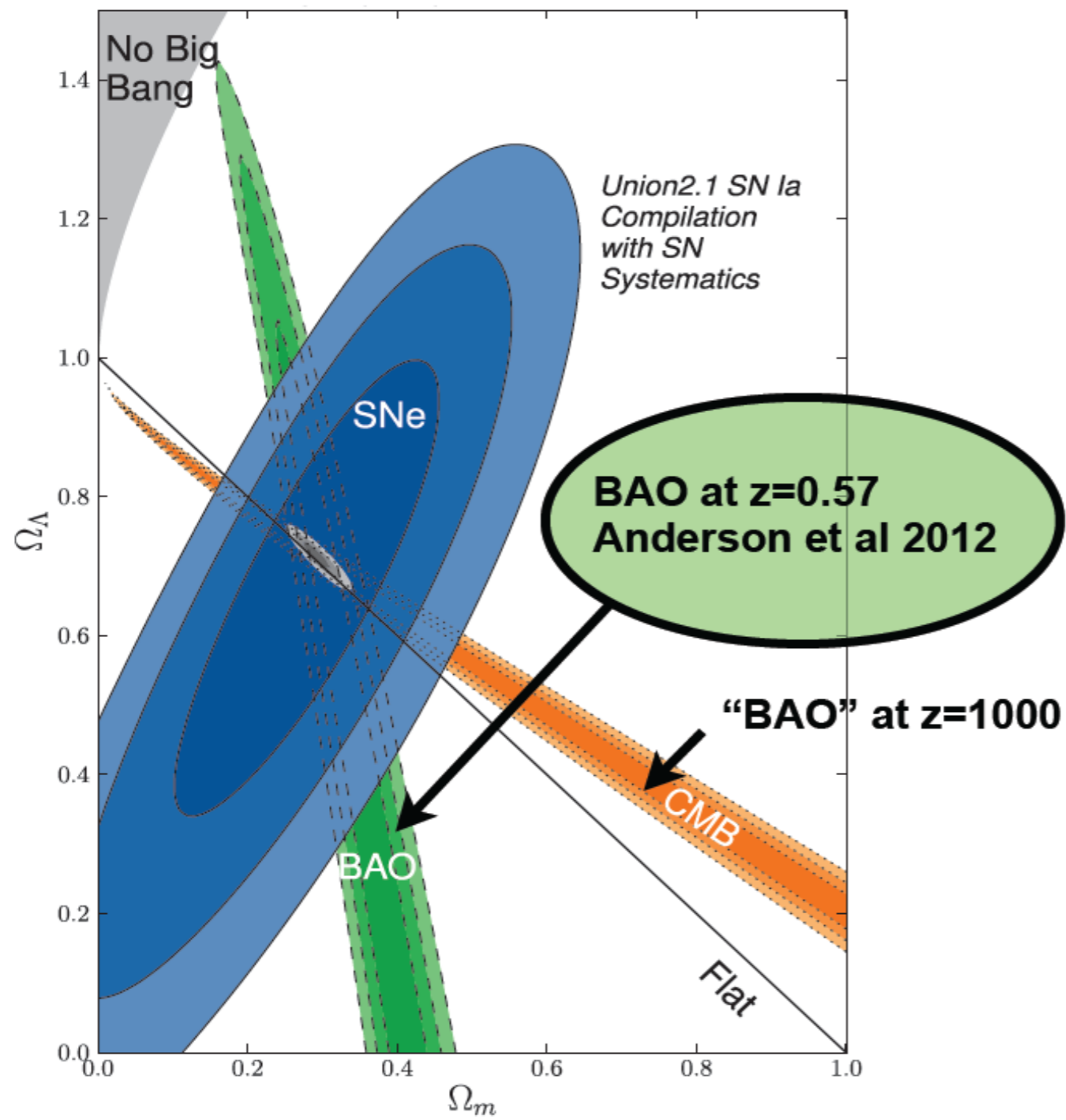
ex] un Pe

• Luminosidad de SNe

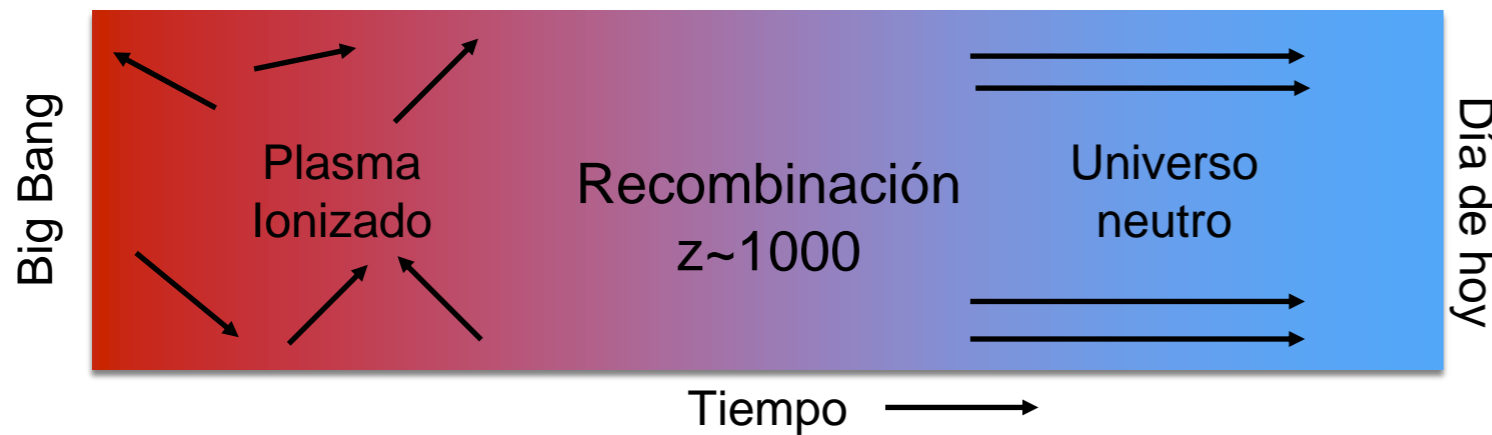
- Mediciones de abundancia de clústers de galaxias arrojan una densidad $\Omega_m \approx 0.2-0.3$ [Mantz et al, 2014]
- Datos de las anisotropías del CMB apuntan a un universo plano $\Omega = 1$ [WMAP9, 2013] con $\Omega_m = 0.3175$ [Planck 2013]
- La expansión acelerada del universo es consistente con un universo sin curvatura espacial ($K = 0, \Omega = 1$) y $\Omega_\Lambda \approx 0.7$
- $H_0 = 67.3 \pm 1.2 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [Planck, 2013] + $\Omega = 1 \rightarrow$ da una edad para un universo dominado por materia de $t_0 = \frac{2}{3}H^{-1} \approx 9.67$ Gyr, la cual es menor que la edad de cúmulos globulares más viejos ($\approx 11.2\text{Gyr}$)[Krauss Chaboyer, 2003]



Dark energy (Ω_Λ) vs. dark matter (Ω_m)



Oscilaciones Acústicas de Bariones



- Universo ionizado
 - Gas: contrae gravitacionalmente
 - Bariones-Fotones
 - Fotones: enorme presión/fuerza restaurativa
 - Perturbaciones: oscilan como ondas acústicas
- Universo neutro
 - Fotones pueden viajar libremente: formar CMB
 - Bariones y fotones desacoplados
 - Perturbaciones: evolucionar gravitacionalmente

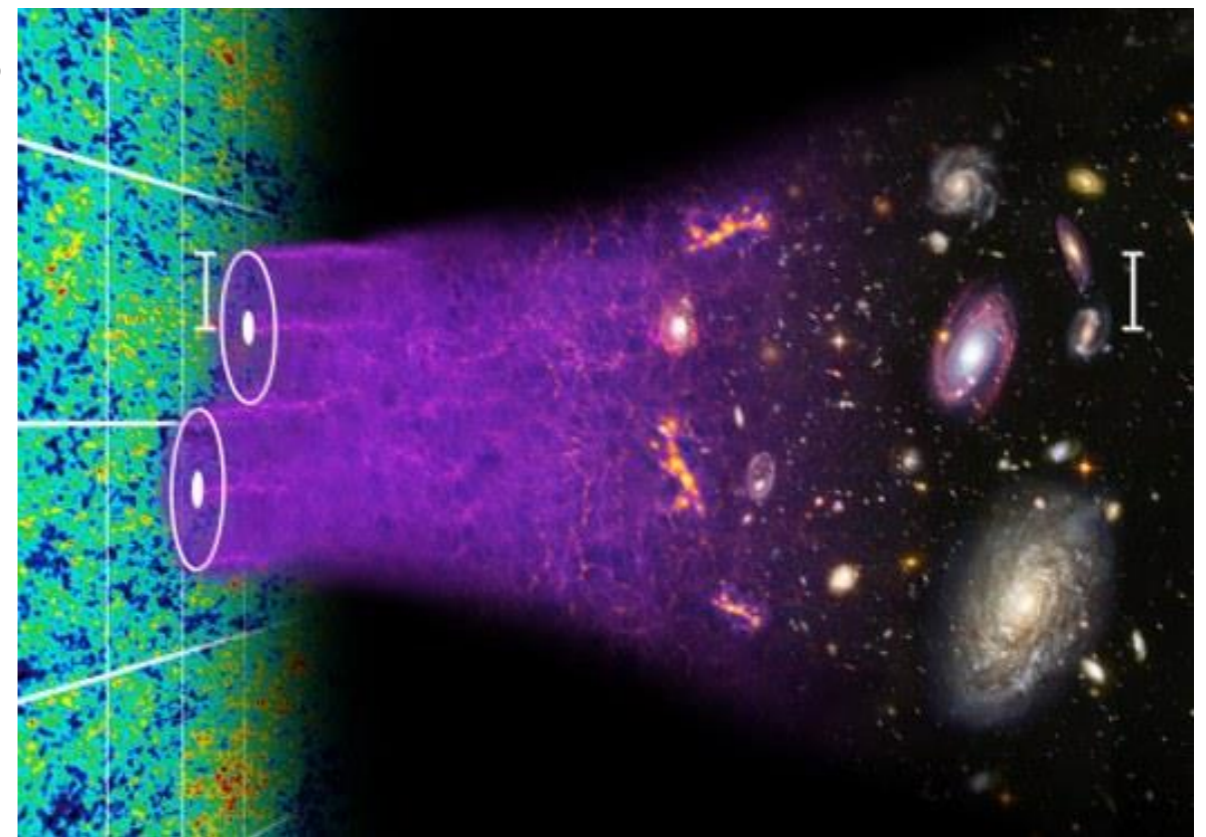
$$\ddot{\delta}_k + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\delta}_k + \left(\frac{v_s^2 k^2}{a^2} - 4\pi G\rho_0 \right) \delta_k = 0$$

$$p = p_\gamma$$

$$v_s^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho}$$

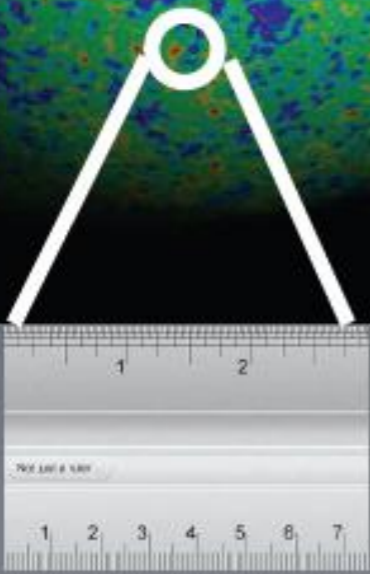
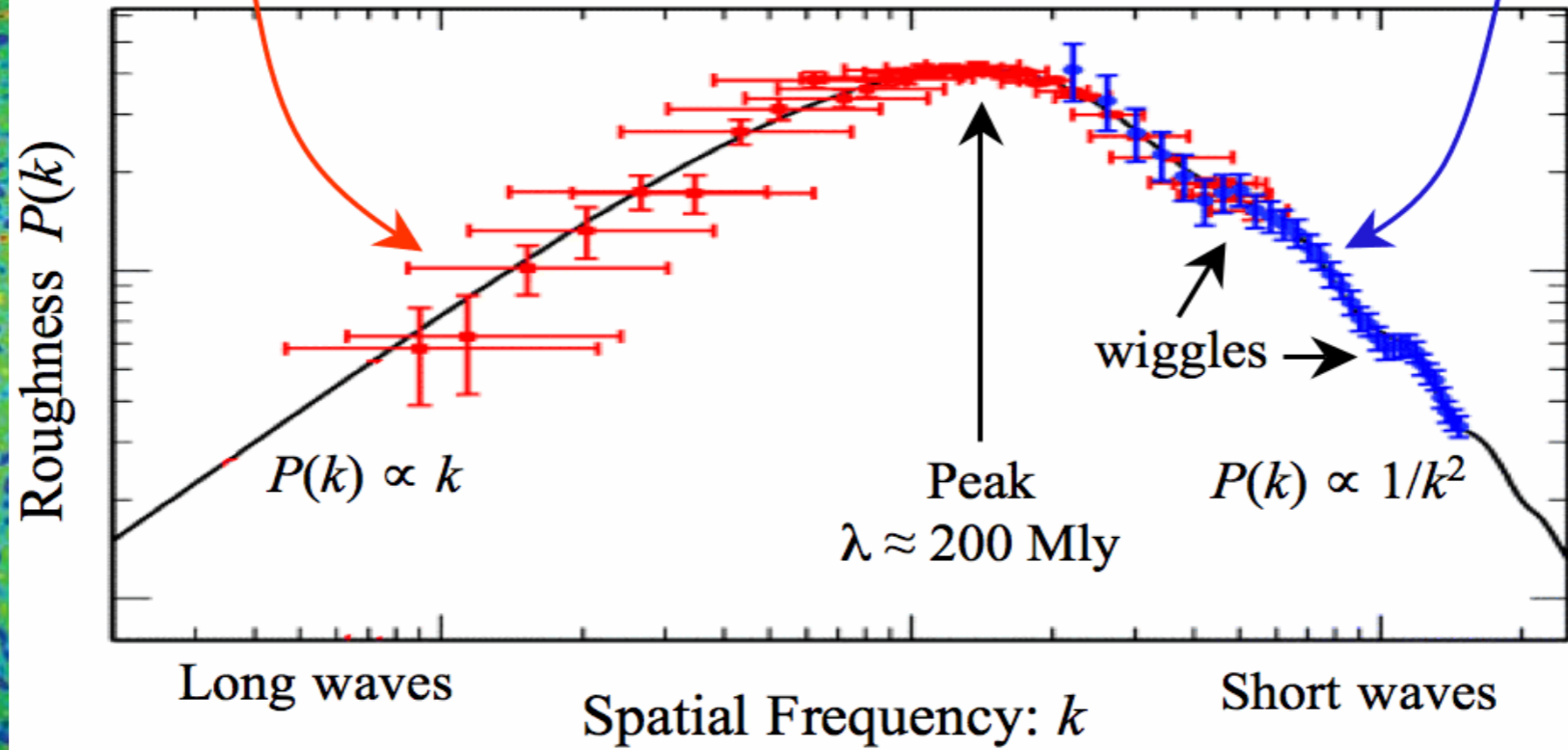
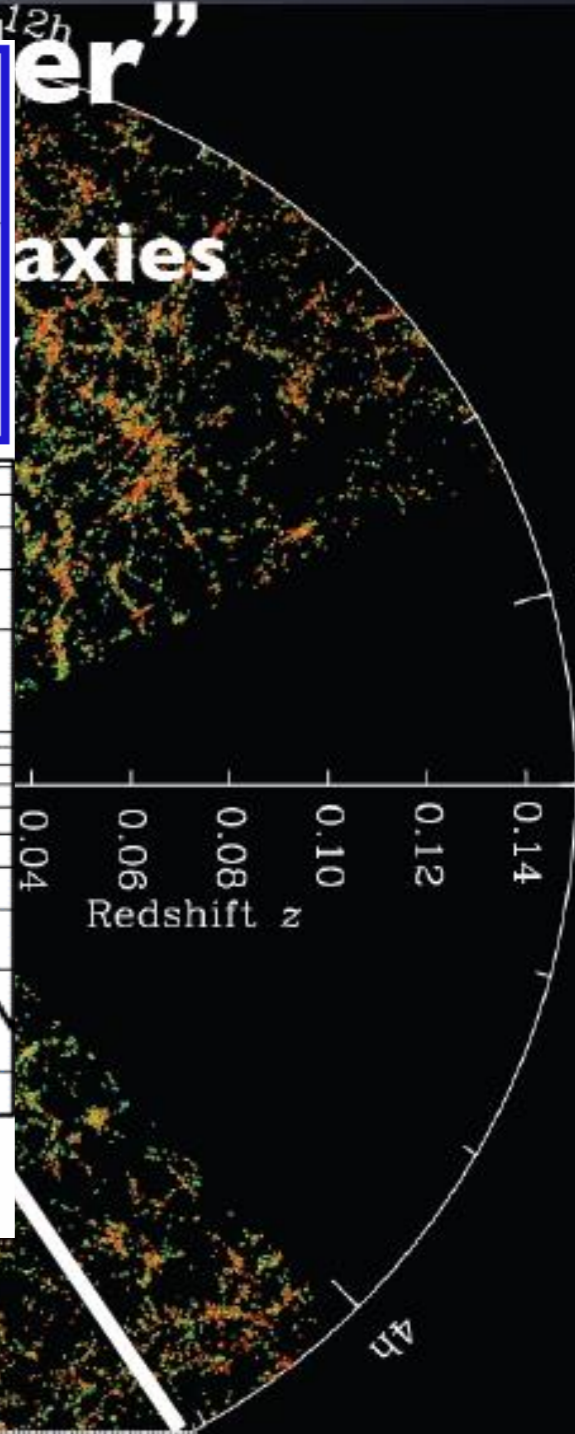
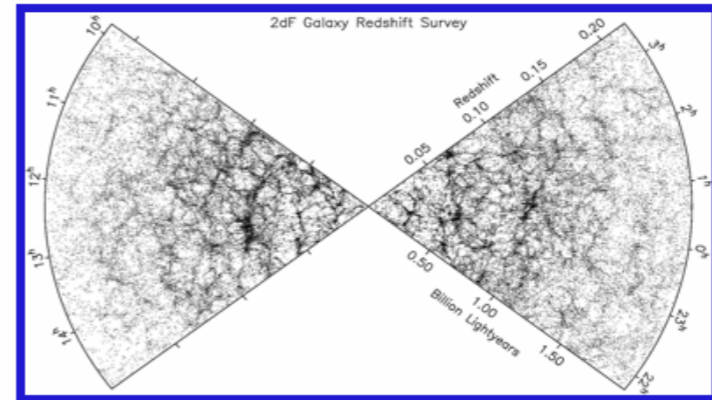
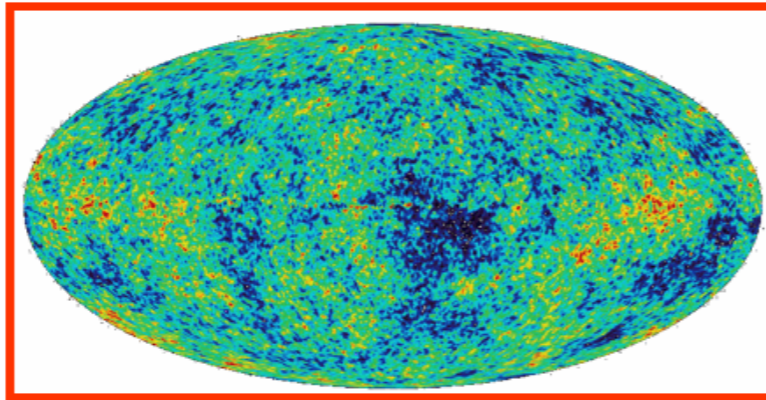
$$\rho = \rho_\gamma + \rho_b$$

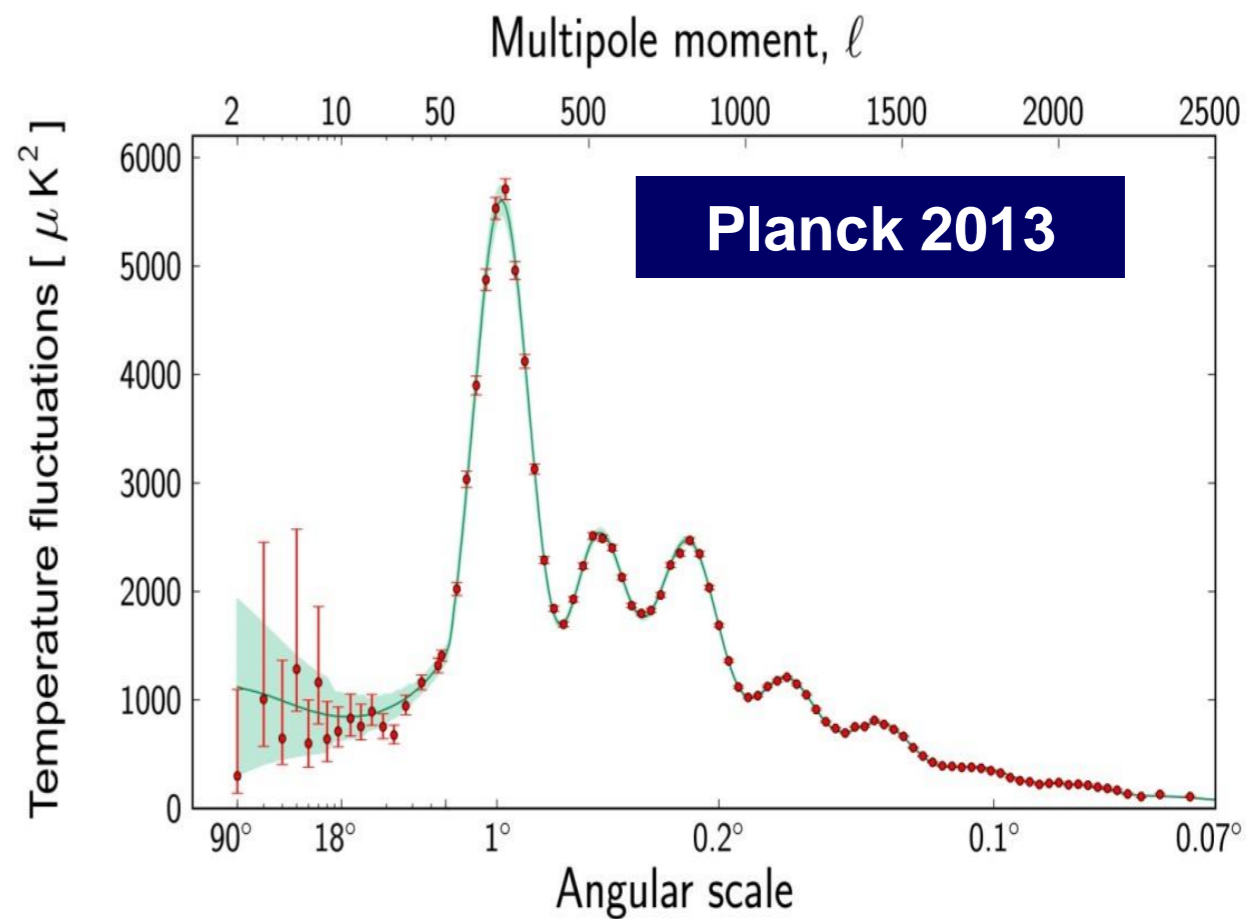
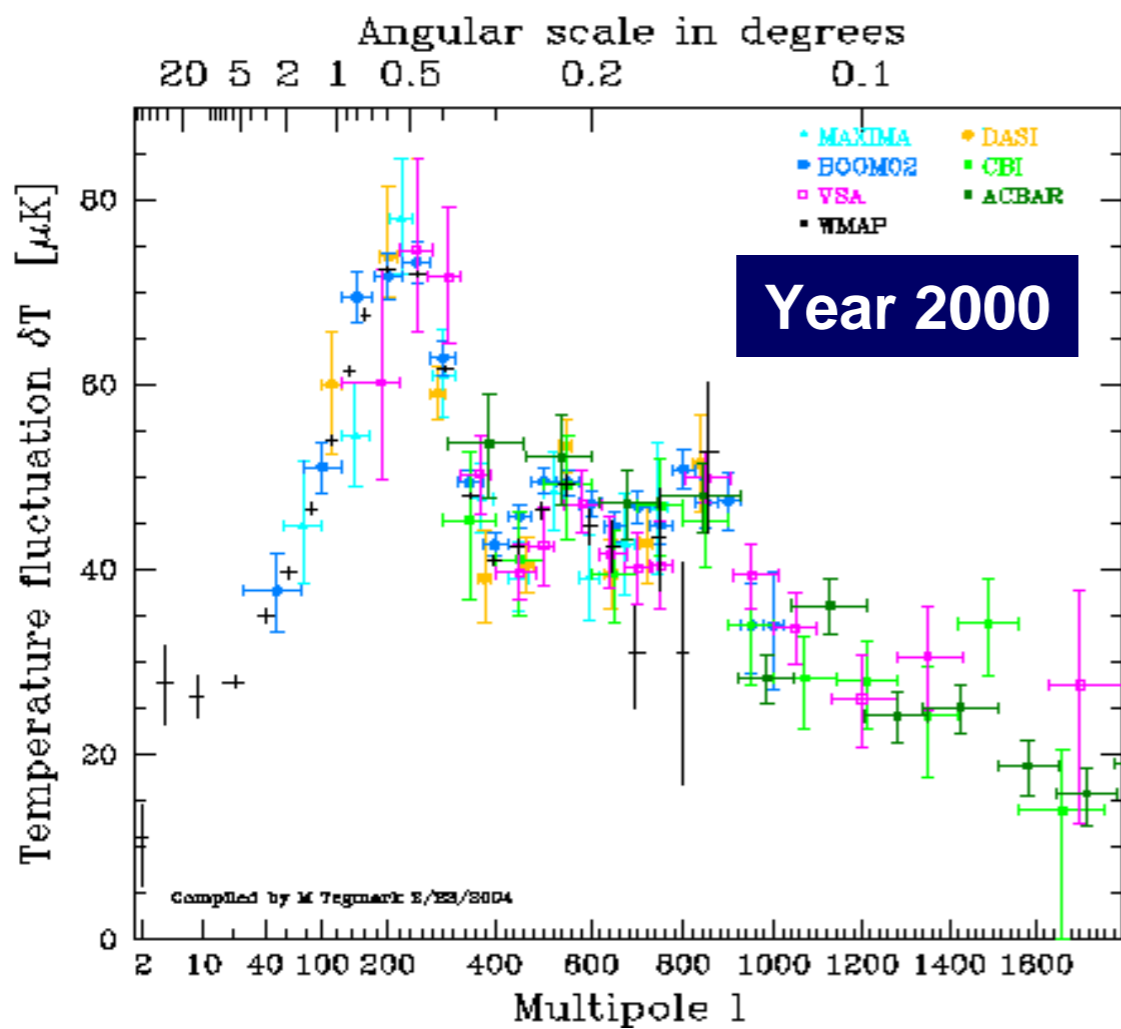
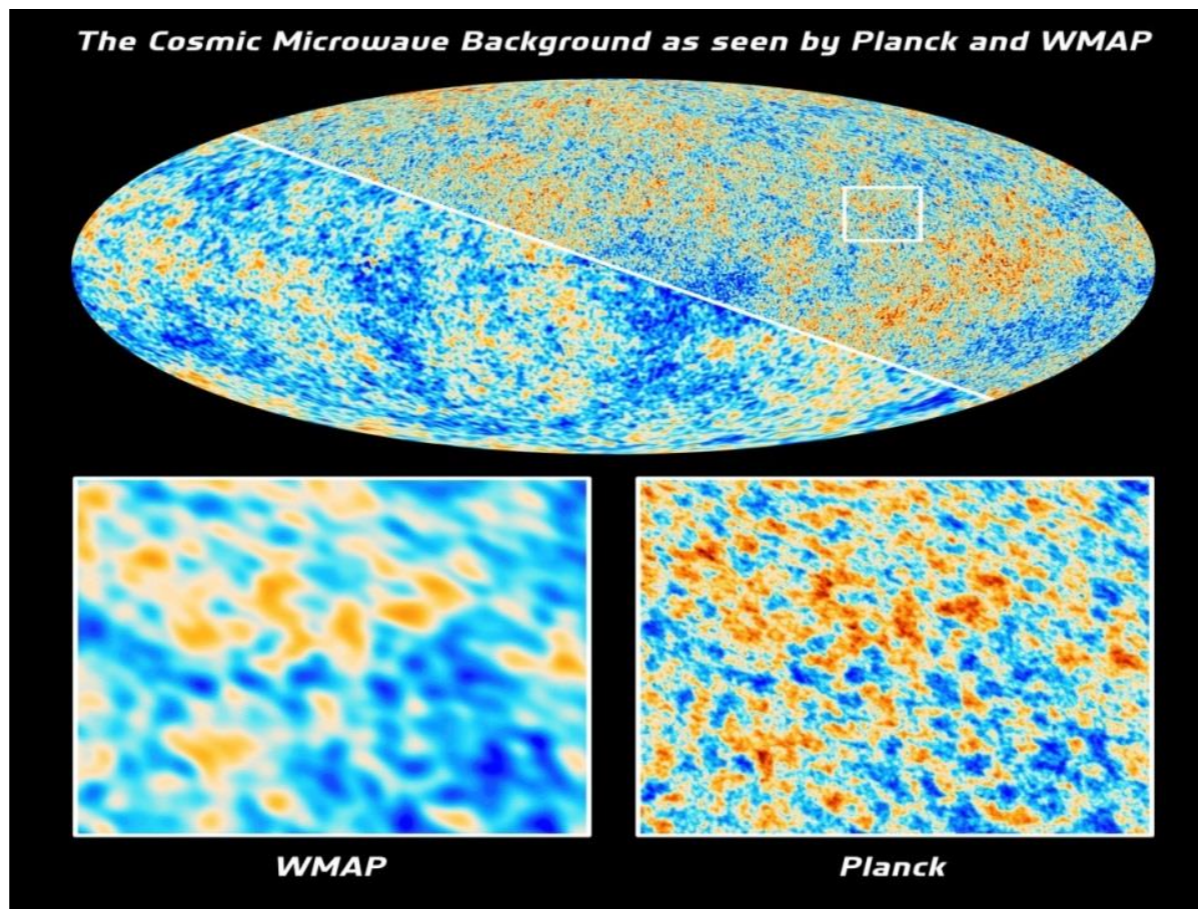
$$v_s = \frac{c}{\sqrt{3[1 + R(z)]}} \quad \text{con} \quad R \equiv \frac{3\rho_b}{4\rho_\gamma}$$



Imágenes: SDSS-III

Southern
Cosmic Microwave
Background
14 billion





Tamaño del horizonte sonoro en el desacople

Cálculos preliminares

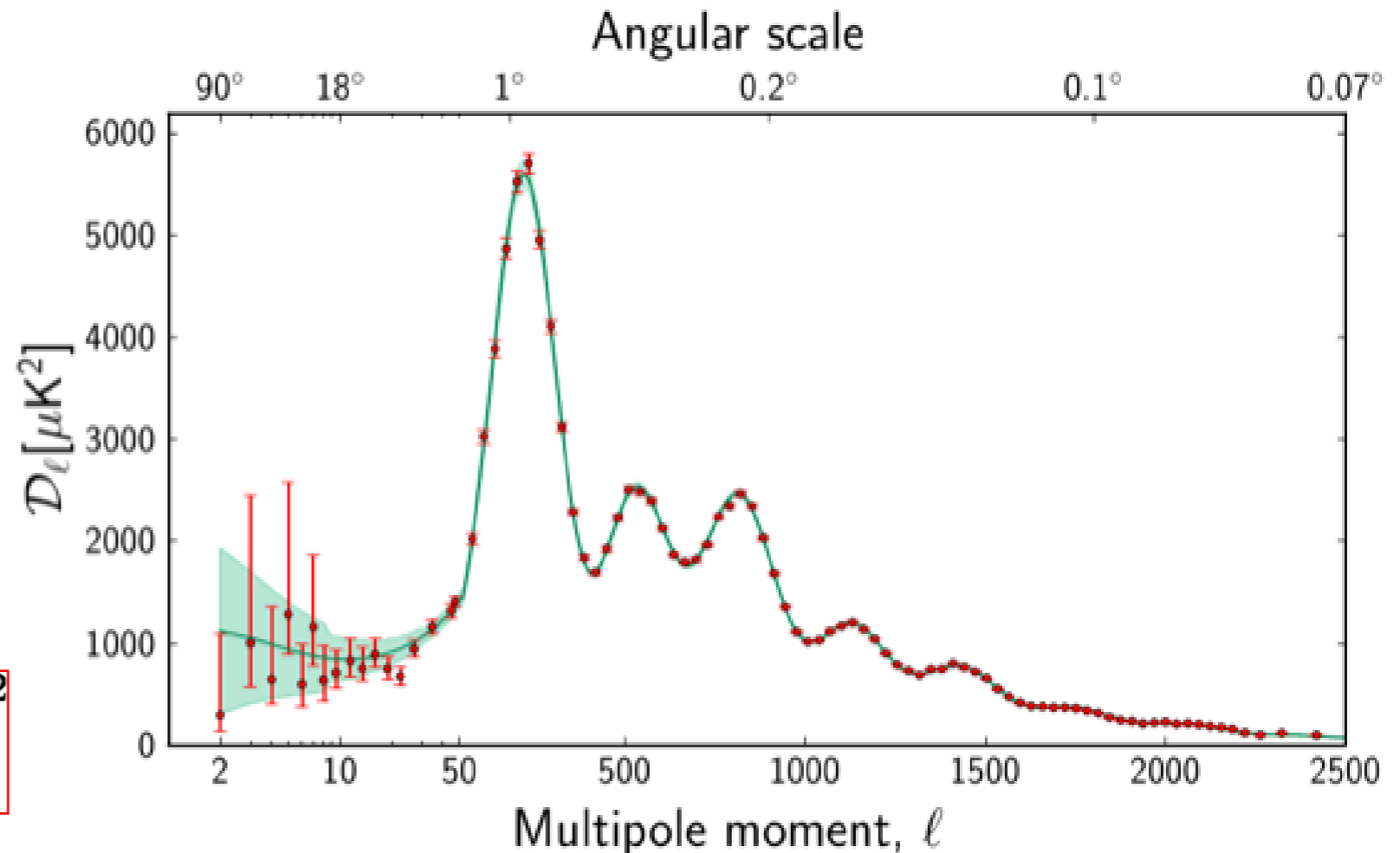
- Espectro de potencias angular de la temperatura de las anisotropías del CMB
- Posición del primer pico ($\ell \sim 220$) restringe el tamaño angular del horizonte en la época del desacople ($z \sim 1089$)

$$\theta^* \equiv \frac{s(z_{dec})}{D_A(z_{dec})}$$

- Medida cosmológica con mayor precisión

$$\theta^* = (1.04147 \pm 0.00062) \times 10^{-2}$$
$$= 0.596724 \pm 0.00038$$

- Puede acotar los parámetros contenidos en $s(z_{dec})$ y $D_A(z_{dec})$



[Planck 2013. XV CMB and Likelihood report]

DARK MATTER

GAS

$z = 41.00$
 $t = 0.067 \text{ Gyr}$

$d = 500 h^{-1} \text{ Kpc}$

CLUES Simulation
(www.clues-project.org)
(c) Alejandro Benitez-Llambay

SDSS



$z=40.999$

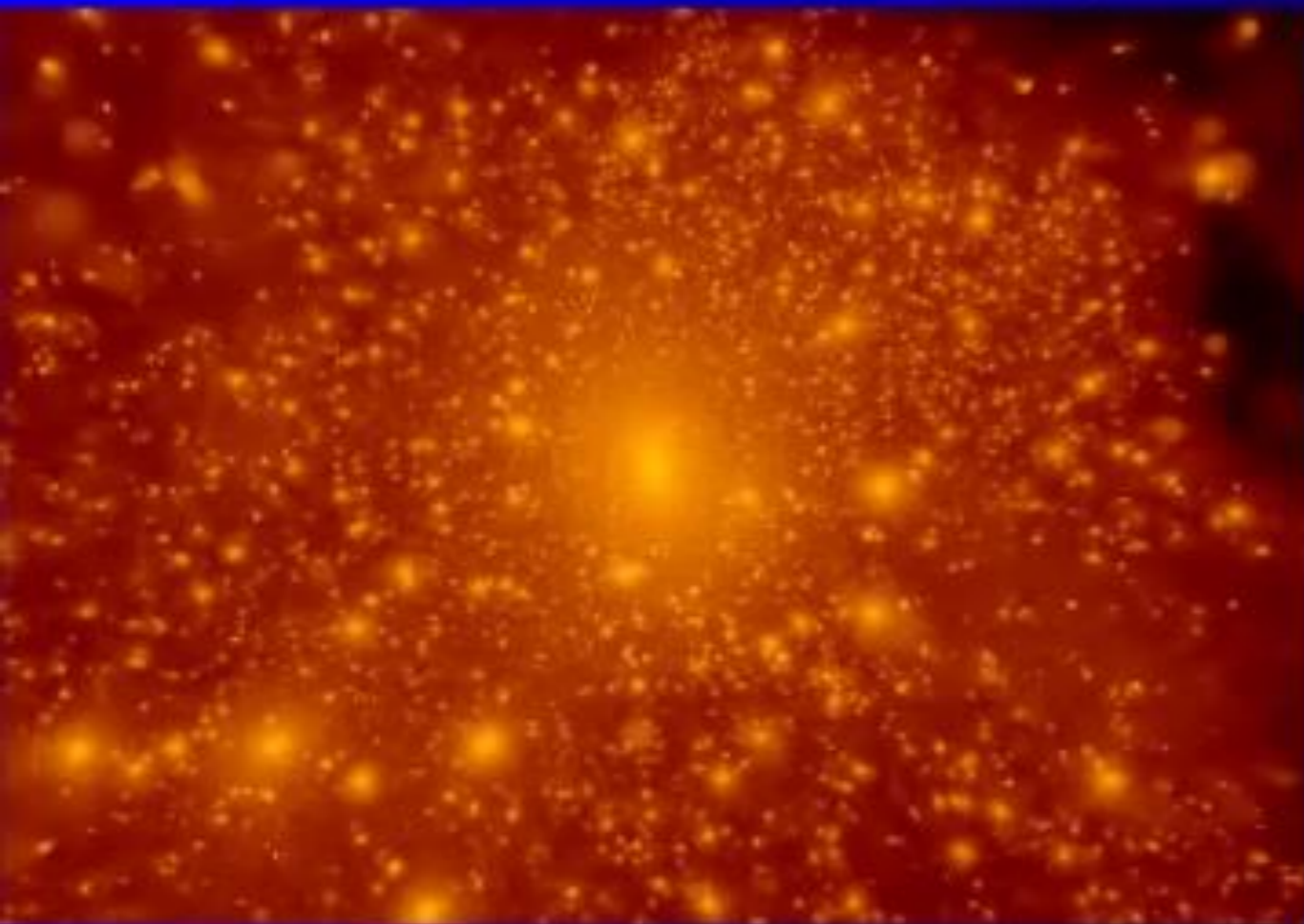
$z=40.999$

CDM

WDM

480 kpc/h

Box= 64 Mpc/h
Np= 4096³



Cold Dark Matter

Warm Dark Matter

Cold Dark Matter

$z=40.999$

$z=40.999$

$z=40.999$

Dark Matter

Gas

Stars

Warm Dark Matter

$z=40.999$

$z=40.999$

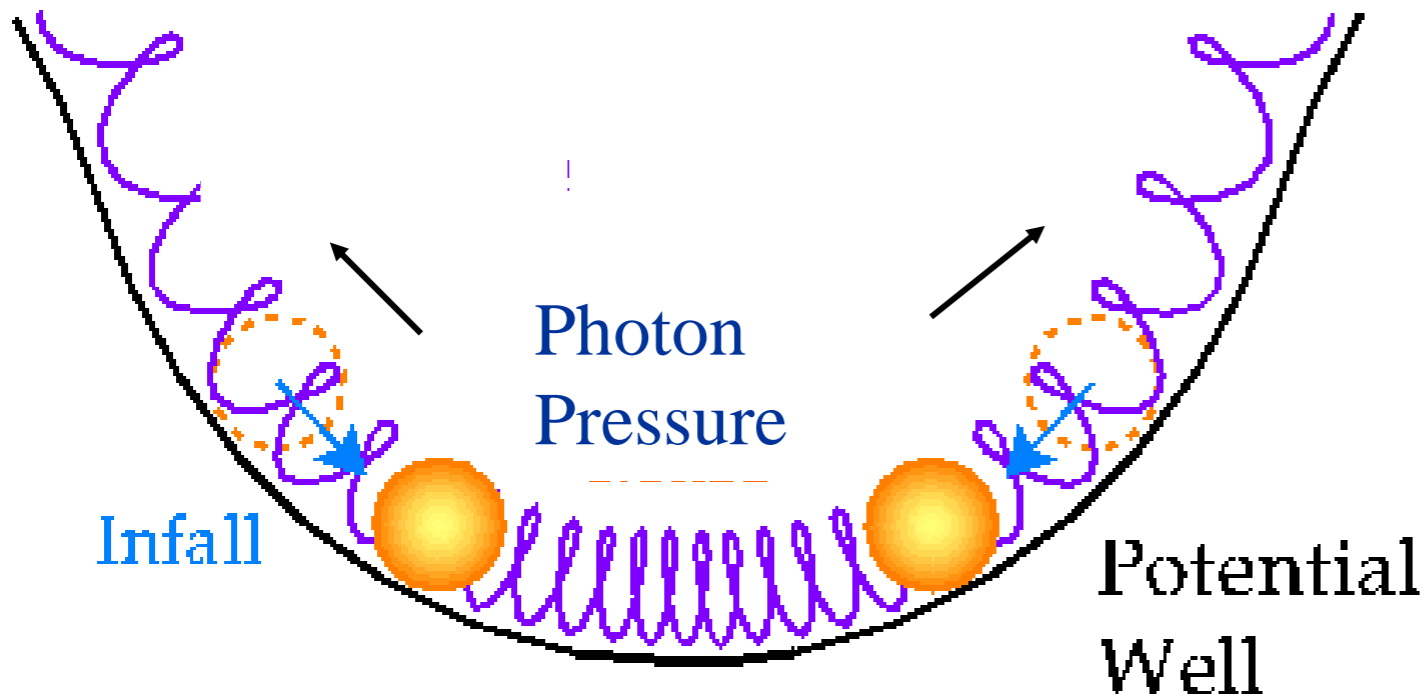
$z=40.999$

Dark Matter

Gas

Stars

Cosmic Background Radiation CMB



Plasma: photons, baryons and electrons

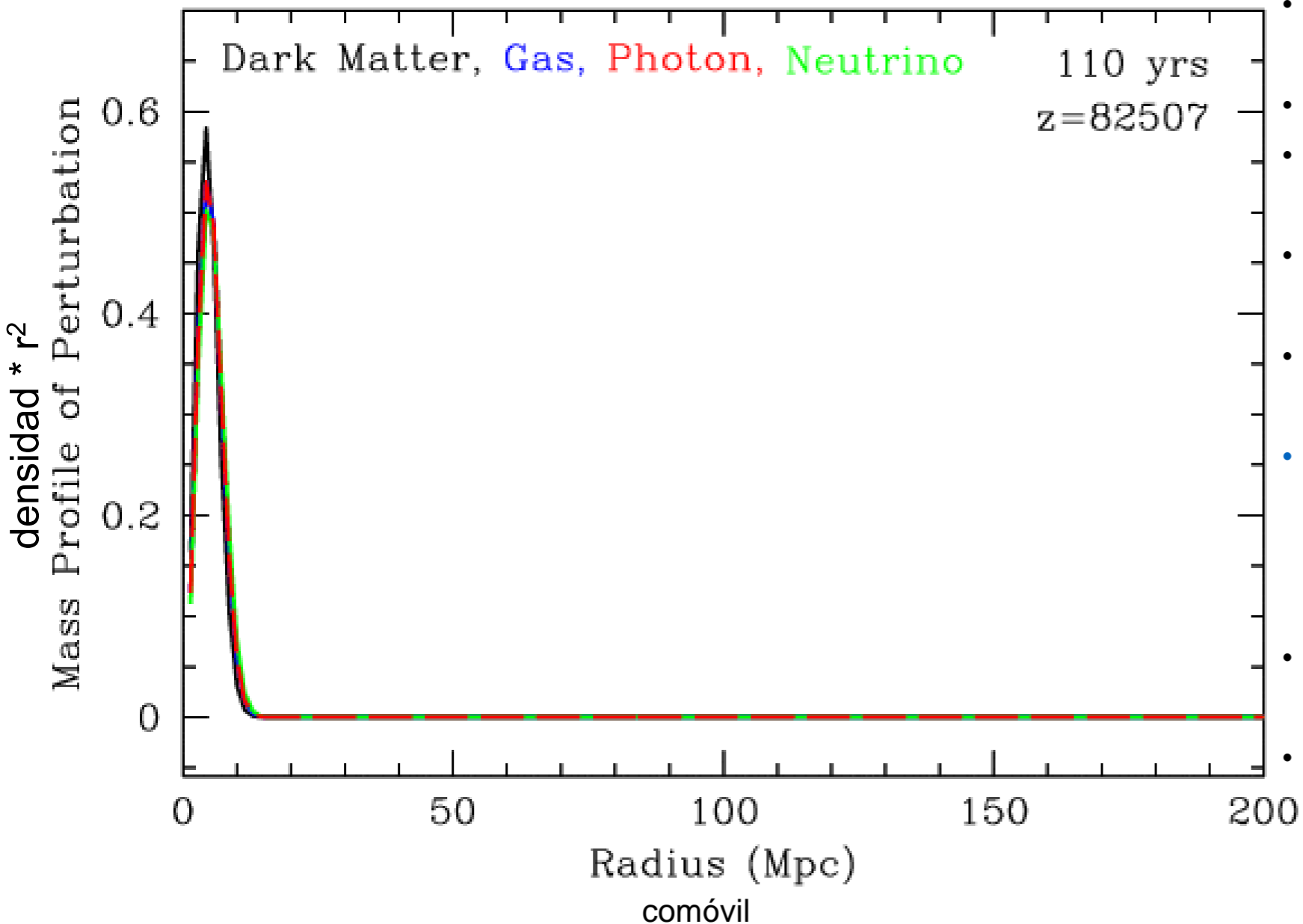
due to Dark Matter

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} + (Pressure - Gravity)\delta = 0$$

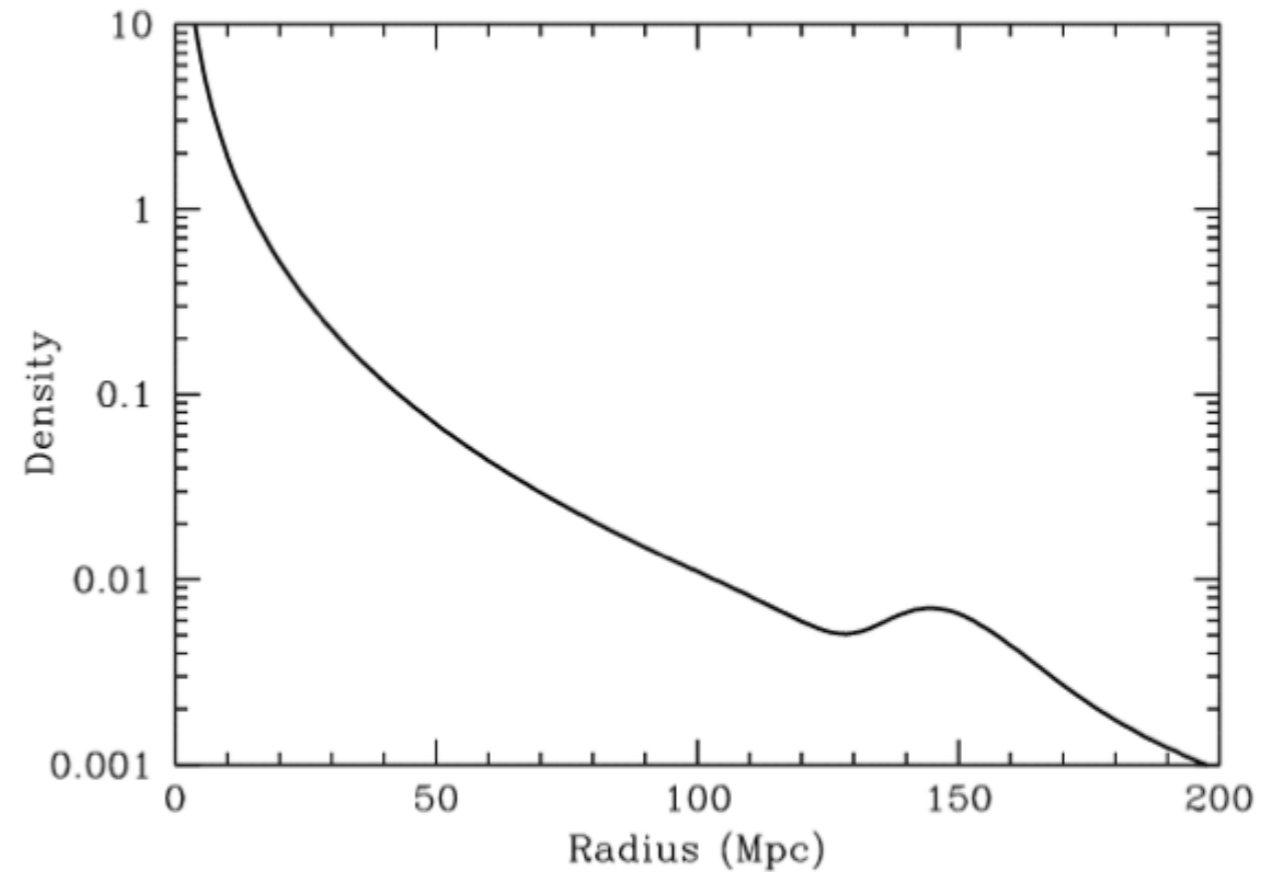
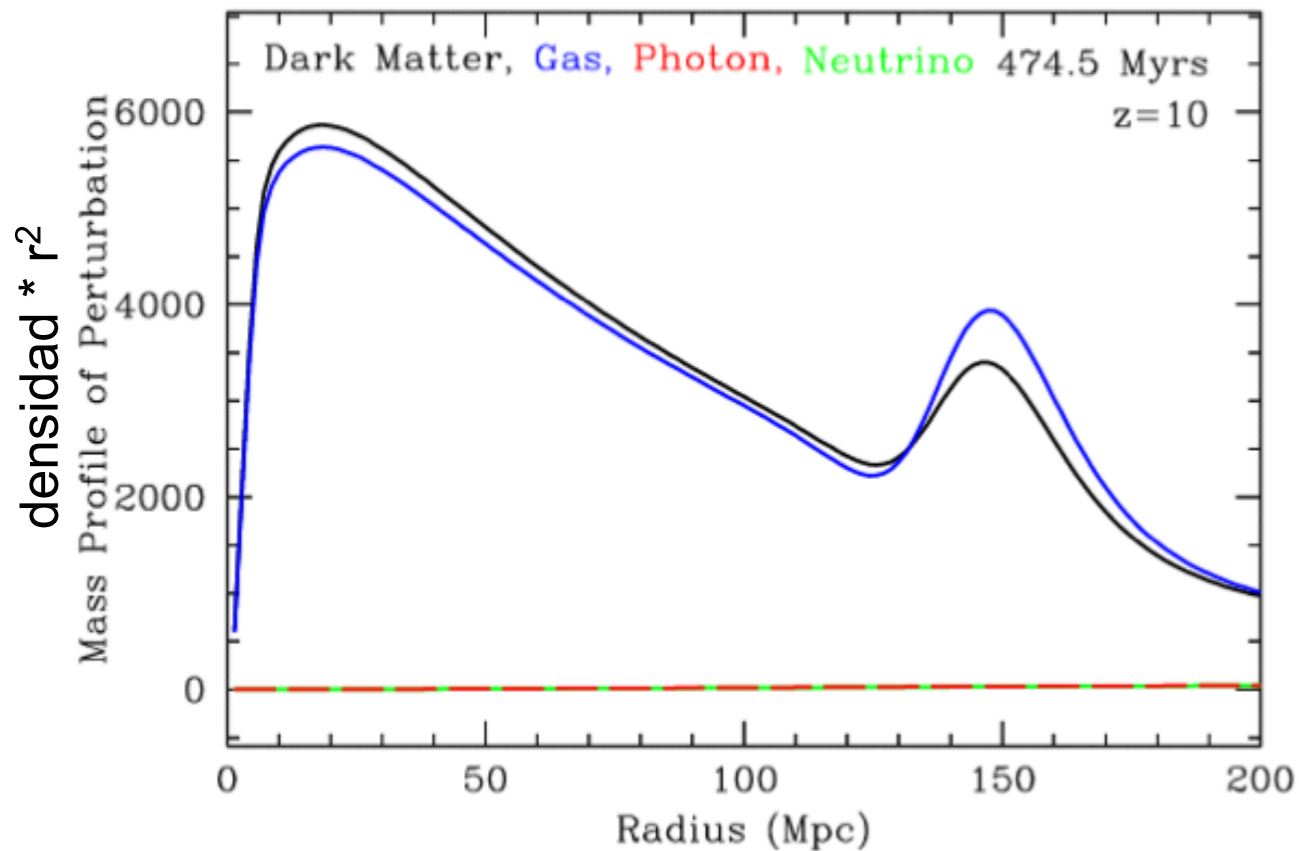
$$\delta = \frac{\delta\rho}{\rho} \approx \frac{\delta T}{T}$$

Initial condition

$$\delta = \frac{\delta\rho}{\rho} \approx \frac{\delta T}{T} = 2 \cdot 10^{-5}$$

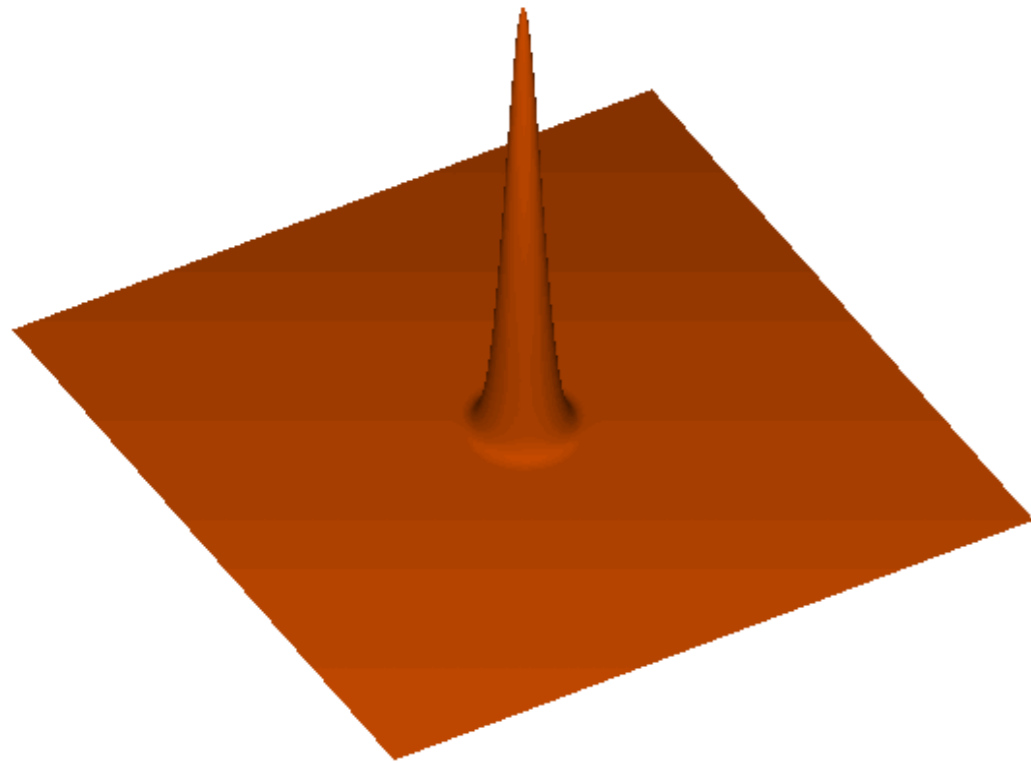


- Fluctuación inicial, puntual de densidad
- Perturbaciones adiabáticas
- Neutrinos no interactúan ni son atrapados gravitacionalmente
- CDM no interactúa más que gravitacionalmente
- Sobredensidad (**gas** + **fotones**) atrae DM de sus alrededores
- **Plasma** caliente, ionizado: demasiados fotones, muy calientes => una enorme presión => **onda sonora esférica saliente**
- El universo se enfría: bariones forman átomos neutros
- v_s decrece por el desacople entre fotones y bariones: la onda saliente se frena hasta que los fotones se liberan por completo y viajan a una $v=c$ para formar el CMB
- La onda acústica se congela: perturbación de DM en el centro y un cascarón a unos 150Mpc



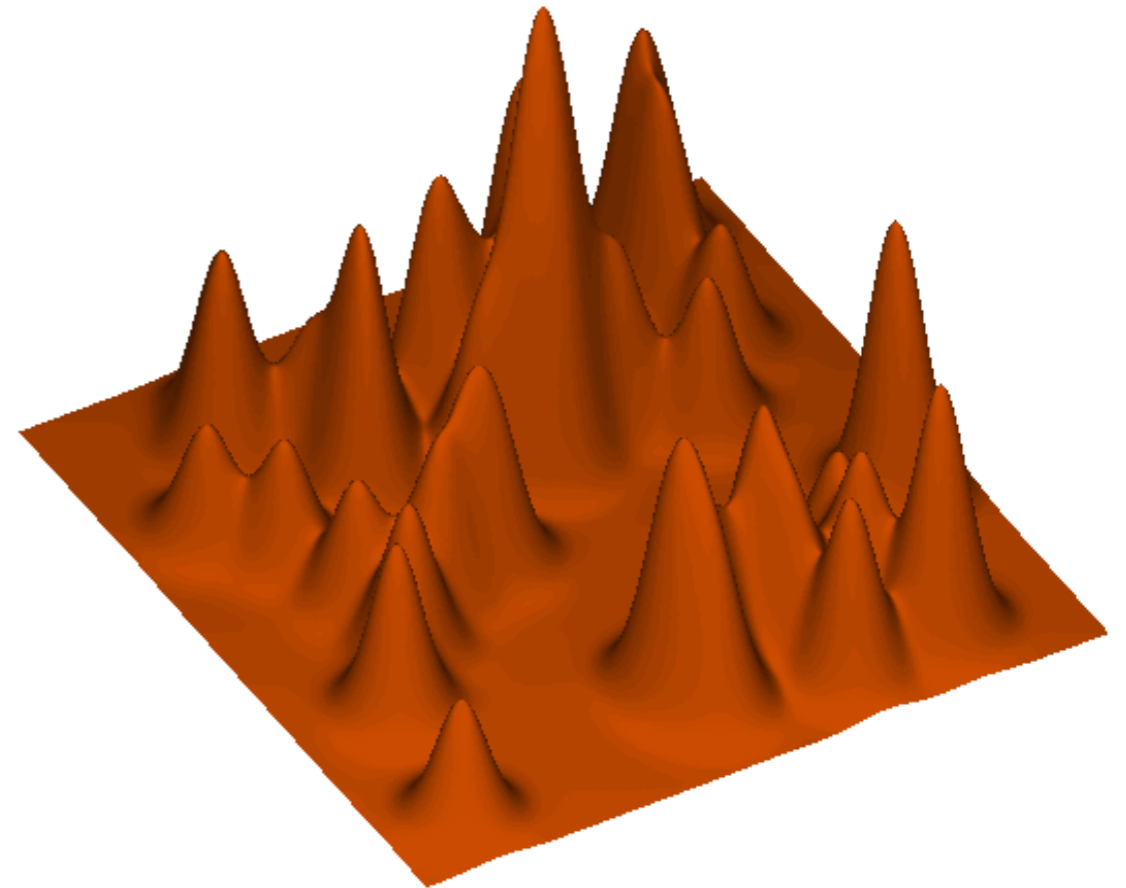
- Eventualmente el cascarón de gas se imprime en la densidad de DM.
- El pico decrece por efecto de la DM, la cual sobrepasa al gas en una proporción 5:1
- En épocas tardías, las galaxias se forman en las regiones sobredensas de materia (ordinaria y oscura)

- Hay un aumento de ~1% en la densidad de regiones a una distancia de 150Mpc de las sobredensidades iniciales.
- Debe haber un exceso de galaxias separadas 150Mpc de otras galaxias, en comparación con otras separaciones relativas.



- Una sola sobredensidad
- Exceso densidad fotones => exceso de presión => onda esférica saliente: cuyo radio es la
 - Distancia máxima que pudo viajar la onda en el plasma barion-fotón => **escala característica de BAO**

- Superposición de muchas sobredensidades
- Perturbaciones pequeñas: Teoría Lineal
- Señal **estadística** en la distribución de materia (bump ~1%)
- Esperamos encontrar un **exceso** de pares de galaxias preferentemente separadas por este radio



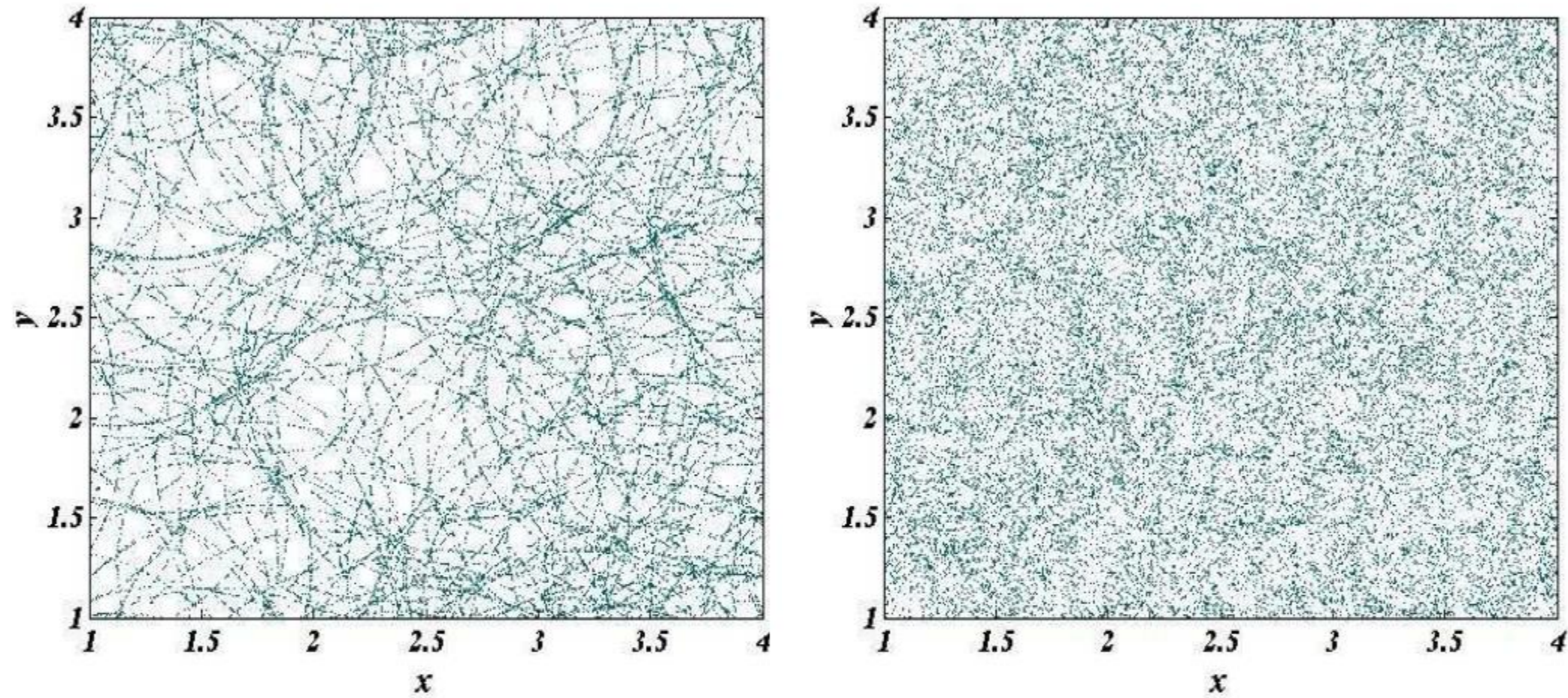
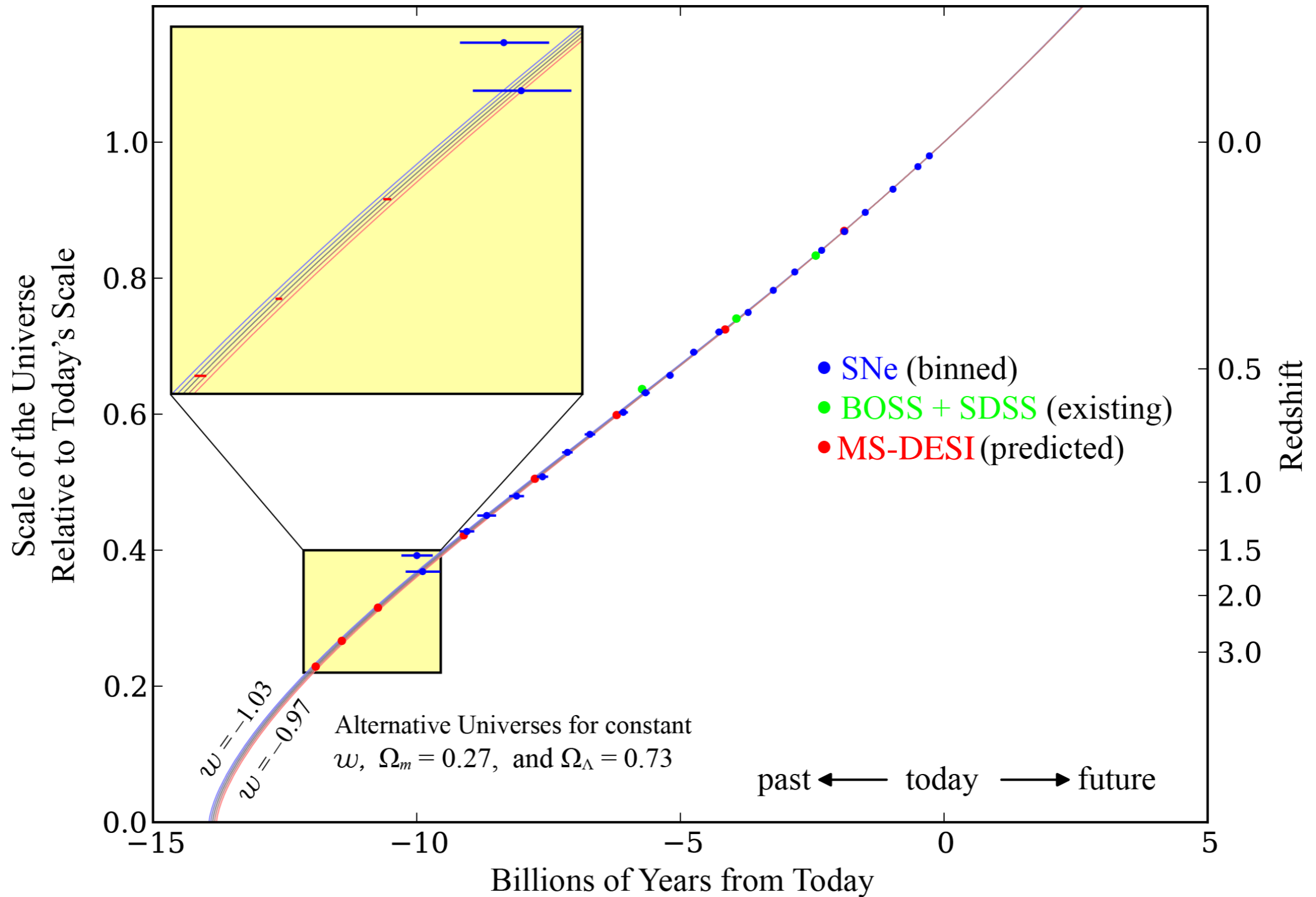
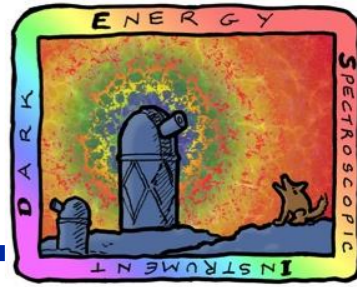
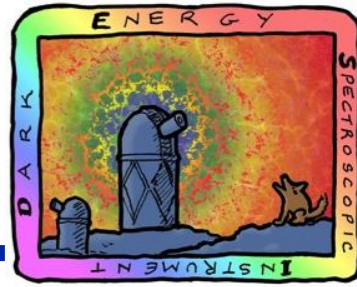


Fig. 1.5. Rings of power superposed. Schematic galaxy distribution formed by placing the galaxies on rings of the same characteristic radius L . The preferred radial scale is clearly visible in the left hand panel with many galaxies per ring. The right hand panel shows a more realistic scenario - with many rings and relatively few galaxies per ring, implying that the preferred scale can only be recovered statistically.

MS-DESI Will Discriminate Between Dark Energy Models



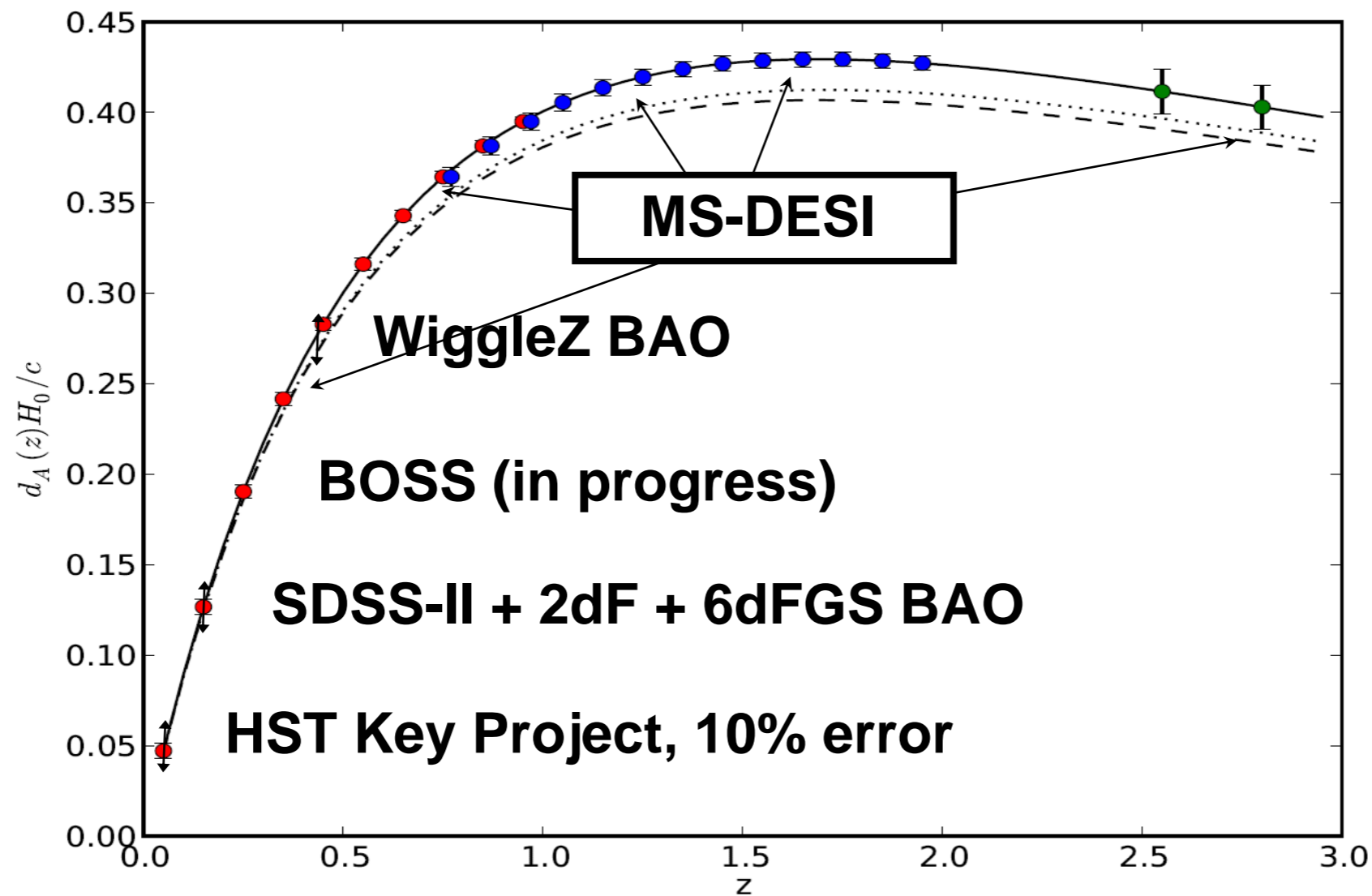
MS-DESI science reach: BAO



Dark energy from Stage IV BAO

- *Geometric probe with 0.3-1% precision from $z=0.5 \rightarrow 3$*
- *35 measurements with 1% precision*

MS-DESI BAO “Hubble diagram”



Era de alta precisión en cosmología

- **BOSS**

- 10,000deg²
- 1.5 mill LRG a $z \sim 0.7$
- medición de distancia (D_A y H) $\sim 1\%$

- **Dark Energy Survey (DES)**

- Empezó Agosto 2013
- 5000deg²
- 300 mill galaxias



- **Extended Baryon Oscillation Spectroscopic**

- upgrade de BOSS

- **Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)**

- 2018-2022
- 5 000 fibras
- 35 a 50 mill de galaxias y cuasares $< 1\%$
- 14,000deg²

BOSS at a glance

Dark time observations

Fall 2009 - Spring 2014

1,000-fiber spectrograph, resolution $R \sim 2000$

Wavelength: 360-1000 nm

10,000 square degrees

Redshifts of 1.5 million luminous galaxies to $z = 0.7$

Lyman- α forest spectra of 160,000 quasars at redshifts $2.2 < z < 3$

[Summary statistics of the DR9 release](#)

[Summary statistics of the DR10 release](#)

eBOSS at a glance

Dark-time observations

Fall 2014 - Spring 2020

1000 fibers per 7 deg² plate

Wavelength: 360-1000 nm, resolution $R \sim 2000$

375,000 luminous red galaxies over 7500 deg², $0.6 < z < 0.8$

375,000 luminous red galaxies over 7500 deg², $0.6 < z < 0.8$

260,000 emission line galaxies over 1500 deg², $0.6 < z < 1.0$

740,000 quasars over 7500 deg², $0.9 < z < 3.5$

1-2% distance measurements from baryon acoustic oscillations between $0.6 < z < 2.5$



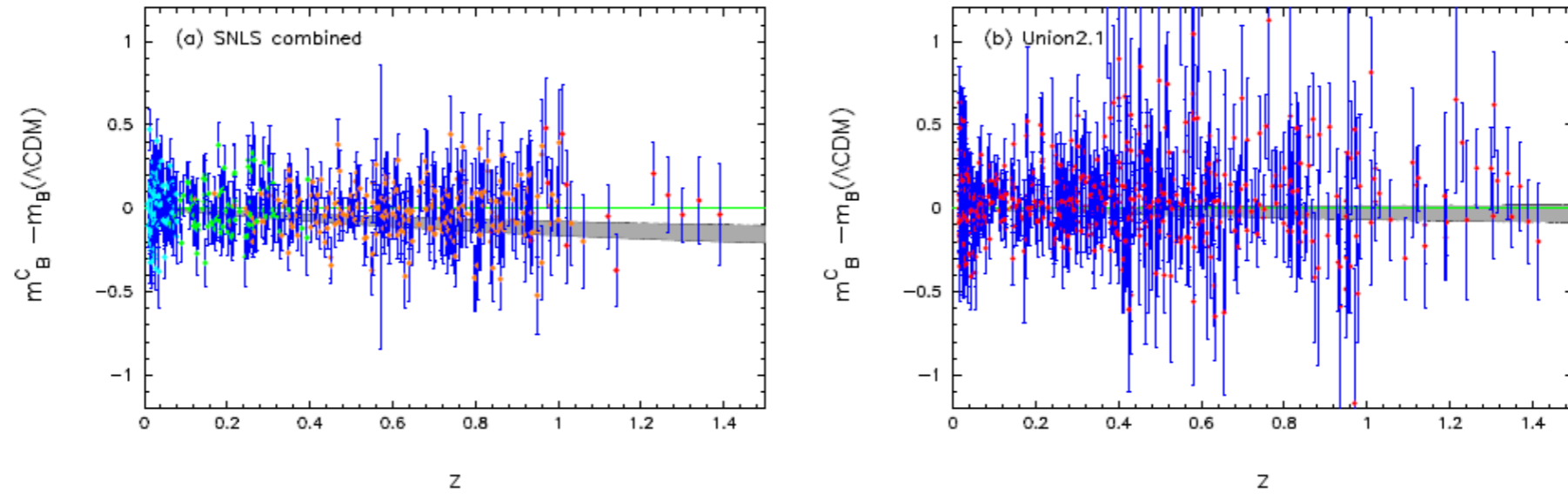
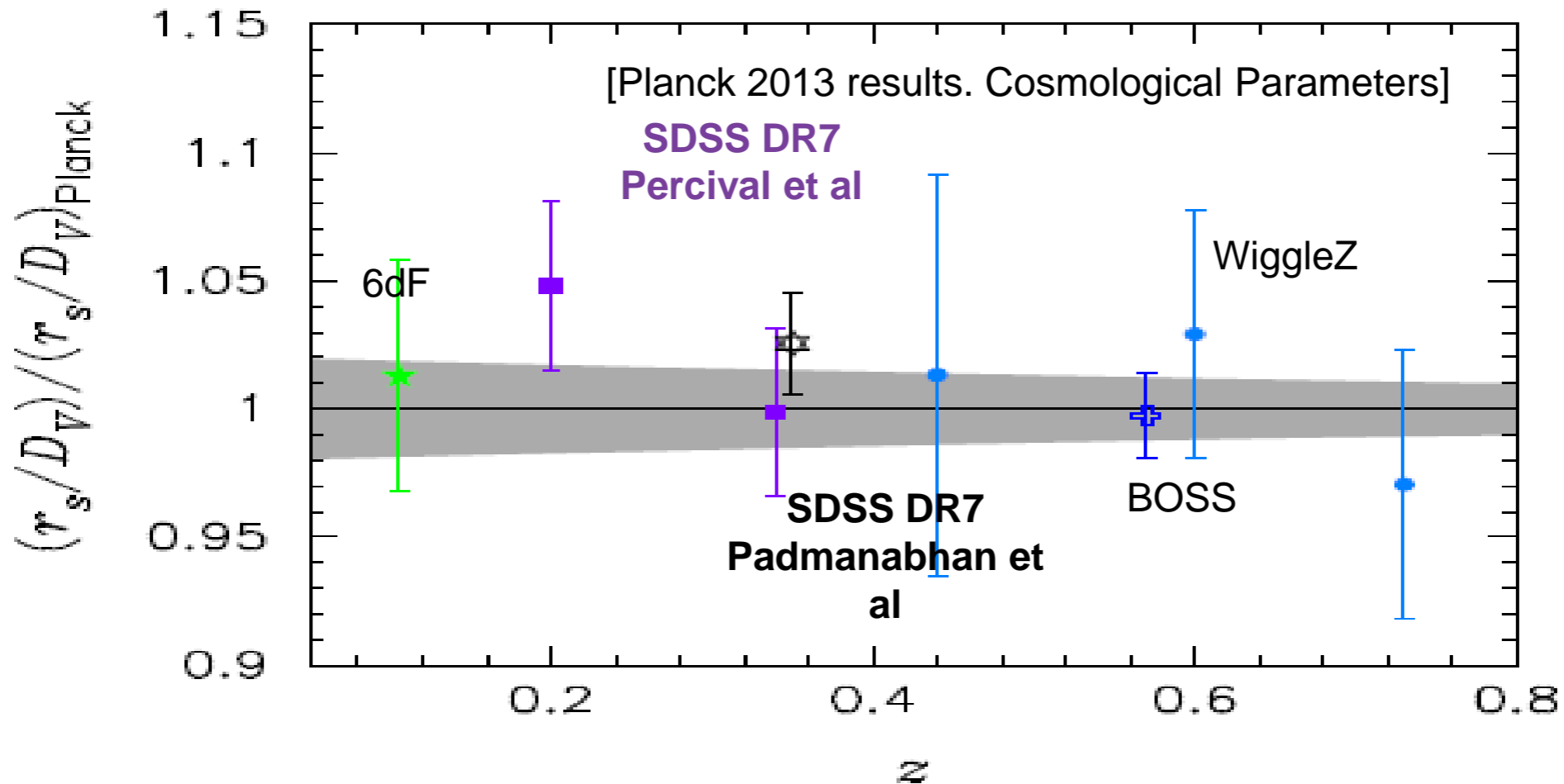
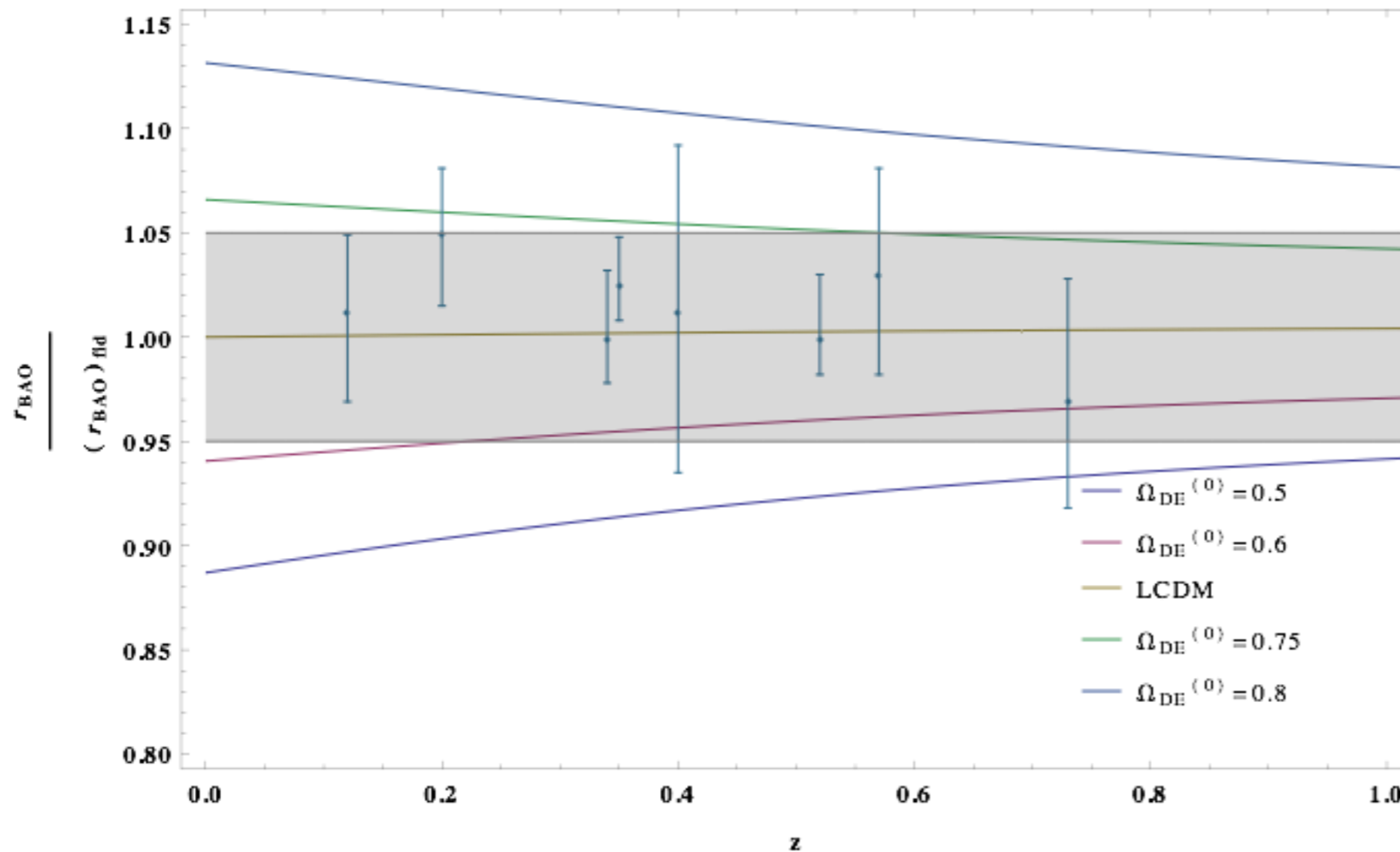


Fig. 18. Magnitude residuals relative to the base Λ CDM model that best fits the SNLS combined sample (left) and the Union2.1 sample (right). The error bars show the 1σ (diagonal) errors on m_B . The filled grey regions show the residuals between the expected magnitudes and the best-fit to the SNe sample as Ω_m varies across the $\pm 2\sigma$ range allowed by *Planck*+WP+highL in the base Λ CDM cosmology. The colour coding of the SNLS samples are as follows: low redshift (blue points); SDSS (green points); SNLS three-year sample (orange points); and *HST* high redshift (red points).



Errores de 50% para SNIa y de 5% a 10% para BAO

Sensibilidad de r_{BAO} a Ω_{DE}



$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{BAO}} \\ h &= 0.68 \\ w &= -1 \\ \Omega_b &= 0.0477 \\ \Omega_r &= 9.23 \times 10^{-5} \\ \Omega_\gamma &= 7.9 \times 10^{-6} \\ \Omega_{\text{DM}} &= 1 - \Omega_{\text{DE}} - \Omega_r - \Omega_b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Omega_\gamma &\equiv \frac{\rho_\gamma}{\rho_{\text{cr}}} \\ &= \frac{\pi^2}{15} \left(\frac{2.725 \text{K}}{a} \right)^4 \frac{1}{8.098 \times 10^{-11} h^2 \text{eV}^4} \end{aligned}$$

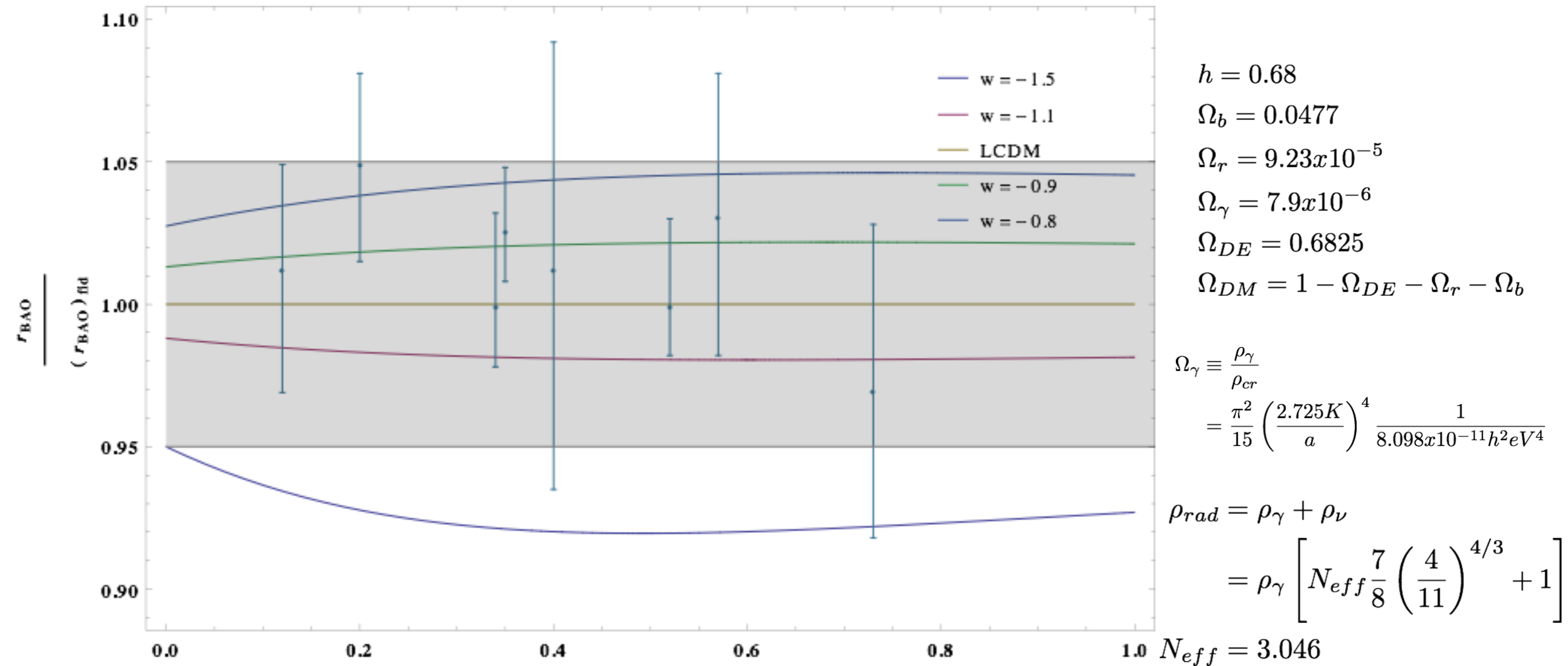
$$\begin{aligned} \rho_{\text{rad}} &= \rho_\gamma + \rho_\nu \\ &= \rho_\gamma \left[N_{\text{eff}} \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} + 1 \right] \end{aligned}$$

$$N_{\text{eff}} = 3.046$$

Cambios en $\Omega_{\text{DE}}^{(0)}$ de ~12% ($\Omega_{\text{DE}}^{(0)} = 0.8$) producen cambios en la escala de BAO que no son compatibles con todos los datos experimentales reportados por Planck

Parámetros y datos observaciones reportados en [Planck 2013, Cosmological Parameters]

Sensibilidad de r_{BAO} a w_{DE}



Cambios en la ecuación de estado de DE de hasta un 20% ($w=-0.8$) producen variaciones $< 5\%$ respecto al resultado calculado con los parámetros de LCDM. Una variación del 50% ($w=-1.5$) produce variaciones que no son compatibles con los datos observacionales reportados por Planck.

Parámetros y datos observaciones reportados en **[Planck 2013, Cosmological Parameters]**

$$\hat{\xi}_g(\mathbf{r}) = \langle \delta_g(\mathbf{x}) \delta_g(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \rangle$$

$$P(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi(r) \exp(-ikr) r^2 dr$$

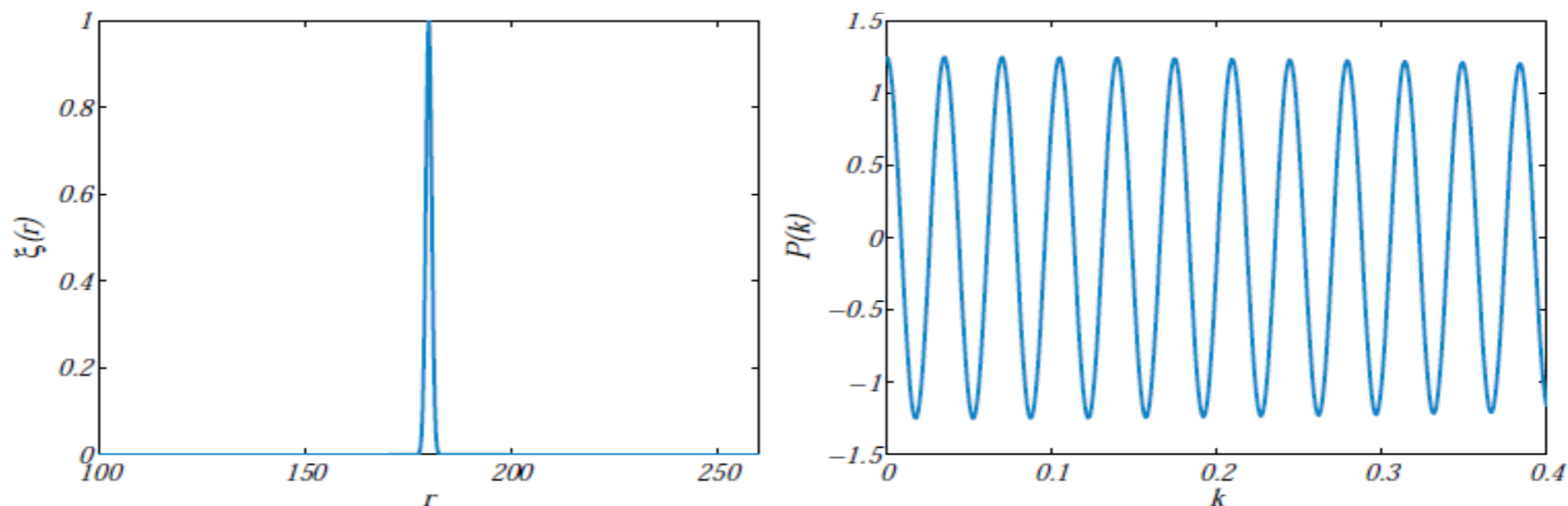
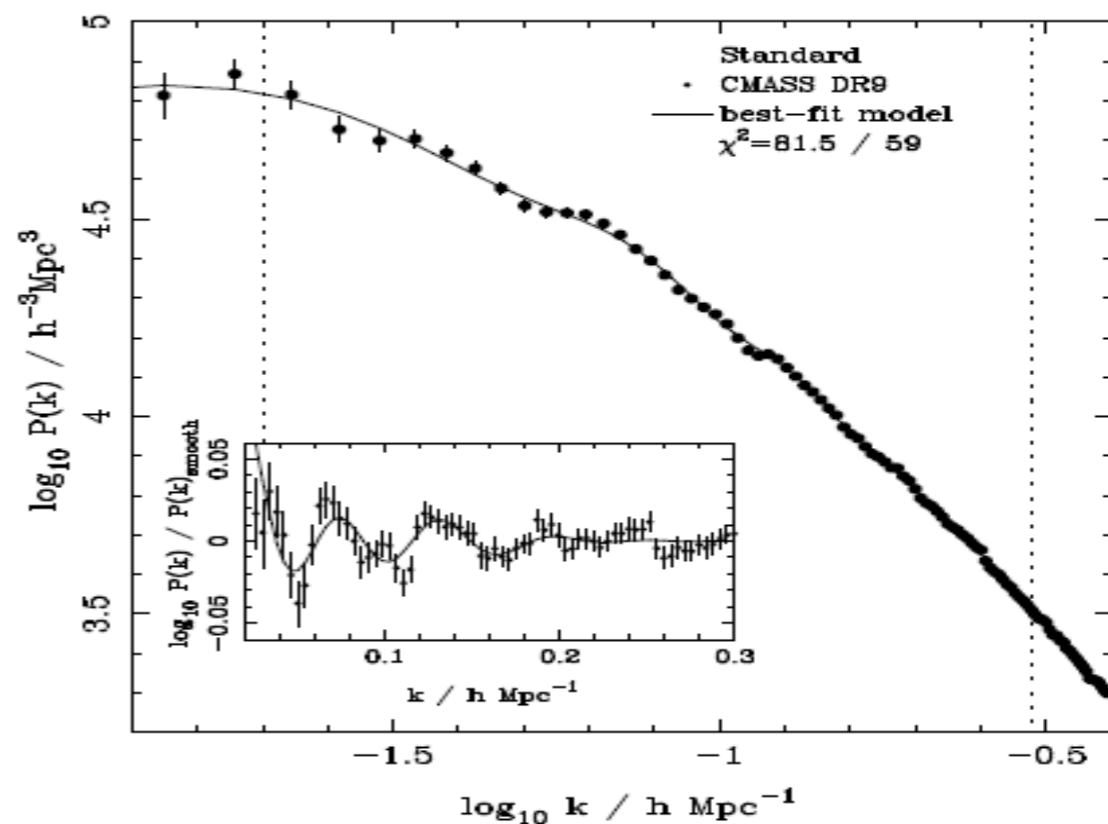
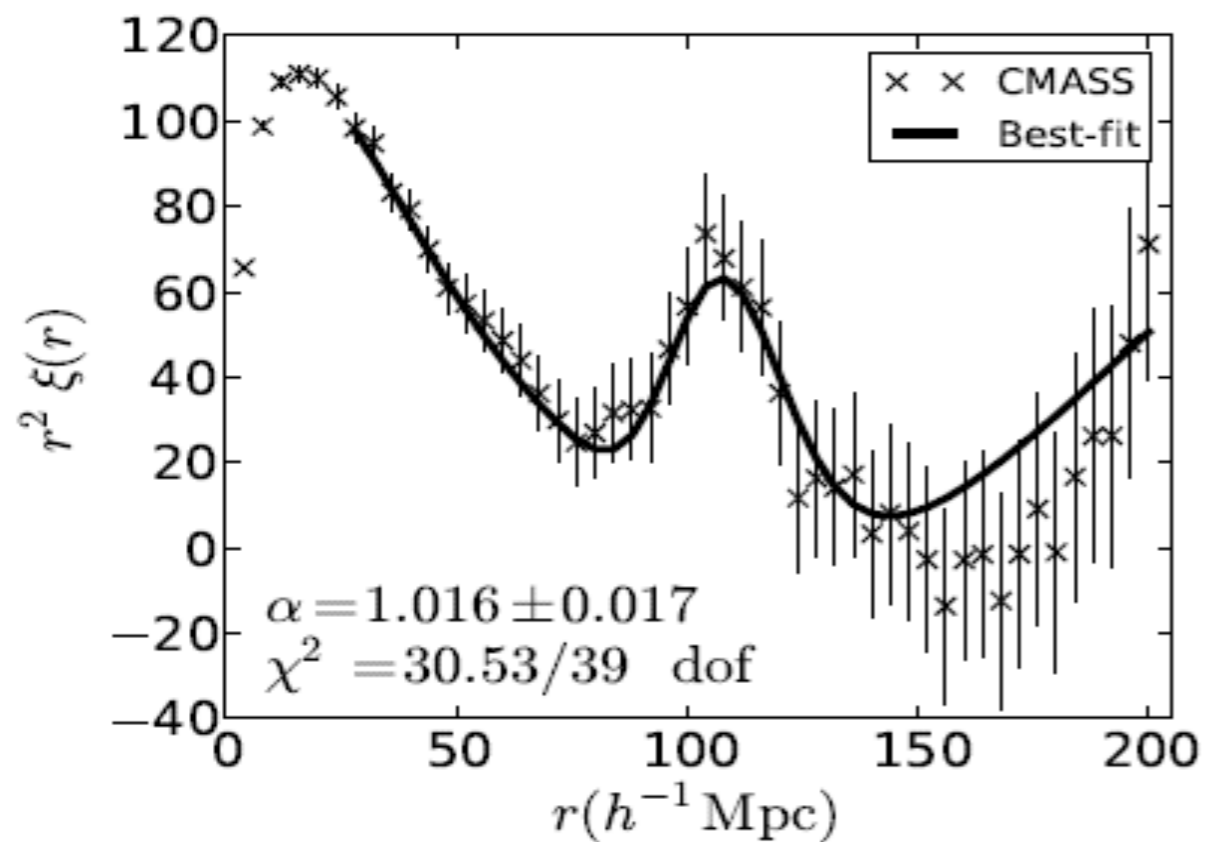
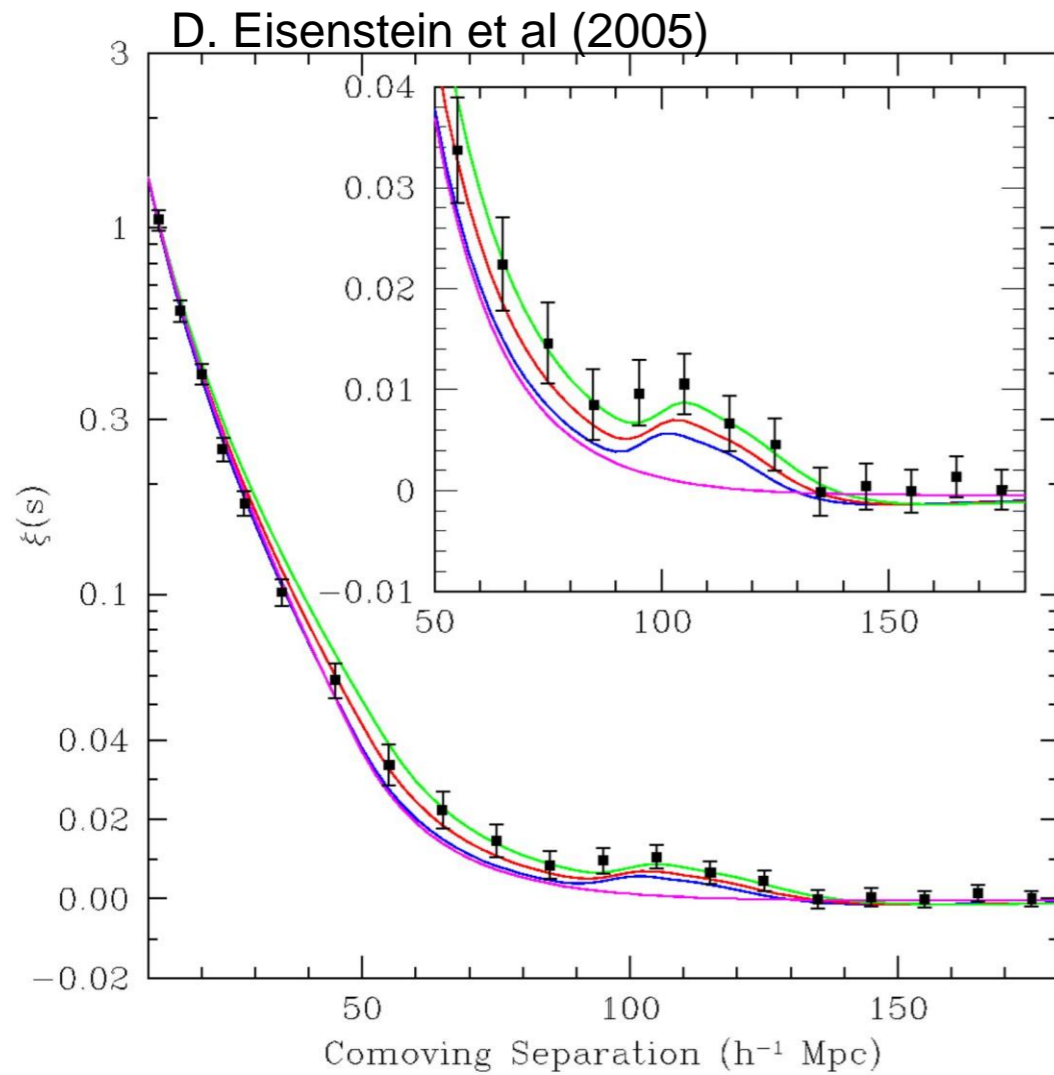


Fig. 1.8. Schematic illustration of the Fourier pairs $\xi(r), P(k)$. A sharp peak in the correlation function (left panel) corresponds to a series of oscillations in $P(k)$ (right panel). The Baryon Acoustic Peak in the correlation function will induce characteristic Baryon Acoustic Oscillations in the power spectrum.



Observaciones de BAO



Espacio de configuraciones

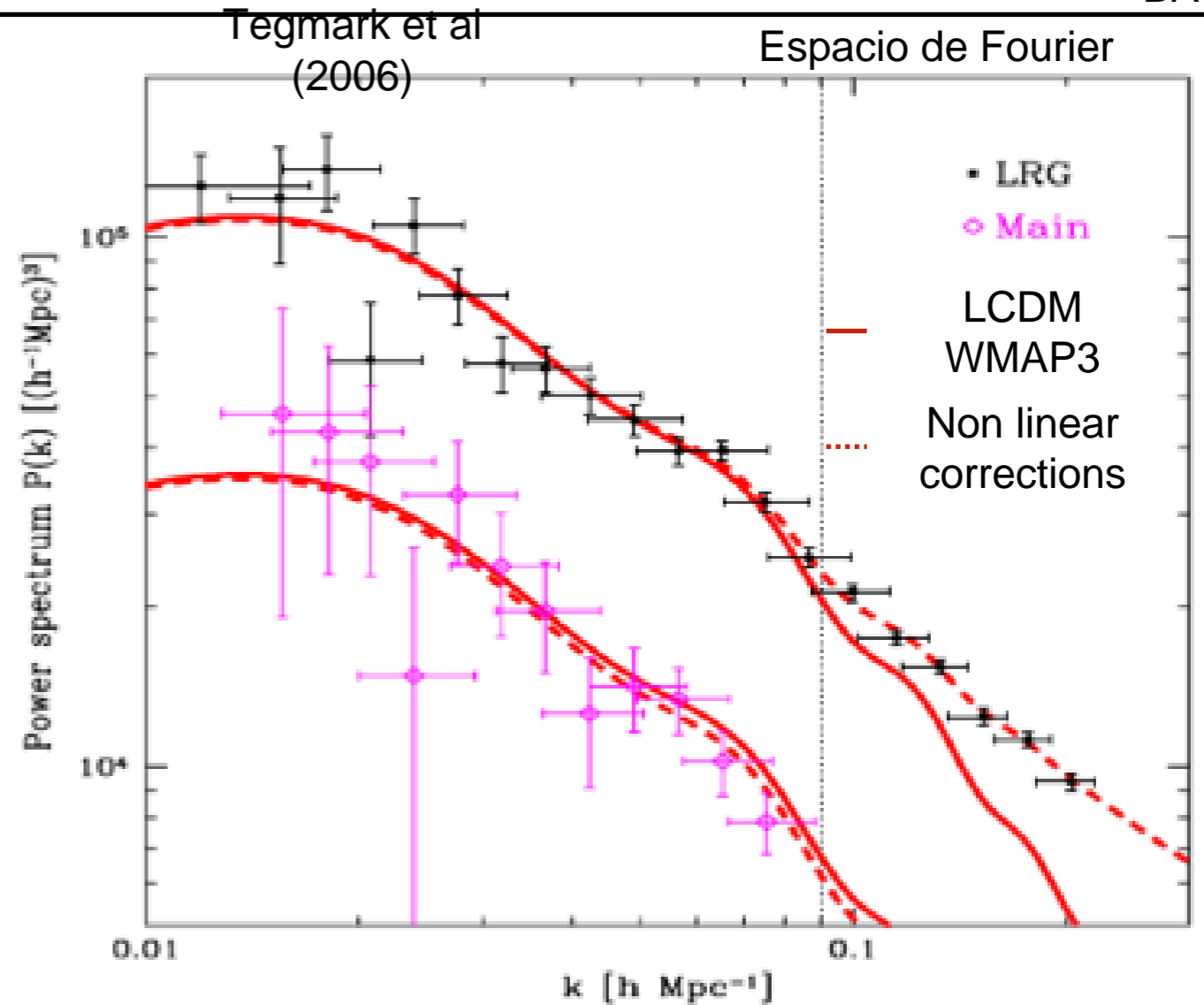
Muestra: SDSS LRG $z \sim 0.35$

$\Omega_b h^2 = 0.024$ { $\Omega_m h^2 = 0.12$
 $\Omega_m h^2 = 0.13$
 $\Omega_m h^2 = 0.14$

$\Omega_b = 0$

CDM

*medición Planck



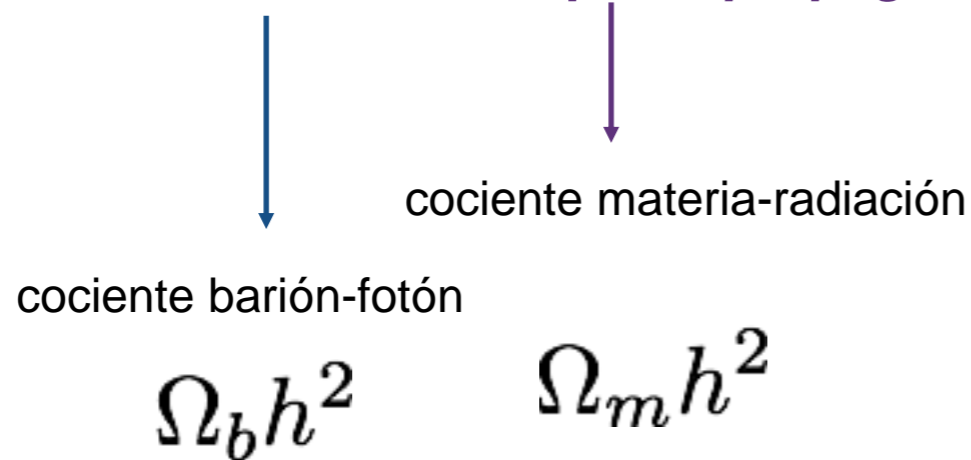
$$\xi(r) \equiv \langle \delta(x)\delta(x+r) \rangle \longleftrightarrow P(k) \equiv \langle |\delta_k^2| \rangle = \int \xi(r) e^{-ik \cdot r} d^3r$$

Pico acústico de bariones en la función de correlación de galaxias \Leftrightarrow oscilaciones acústicas en el espectro estadístico de potencias

“ripples” -> depende de si estaban en fase o no

tamaño máximo que pudo viajar una onda desde el Big Bang hasta el desacople

distancia = velocidad x tiempo de propagación



1.5% $\Omega_b h^2 = 0.02207 \pm 0.00033$
 2% $\Omega_m h^2 = 0.1423 \pm 0.0029$

$$s(z_{drag}) = \int_0^{\eta_{drag}} v_s d\eta$$

$$= \int_{z_{drag}}^{\infty} \frac{v_s dz}{H(z)}$$

$$= \int_{z_{drag}}^{\infty} \frac{dz}{H(z) \sqrt{3[1 + R(z)]}}$$

$z_{drag} = 1059.32$

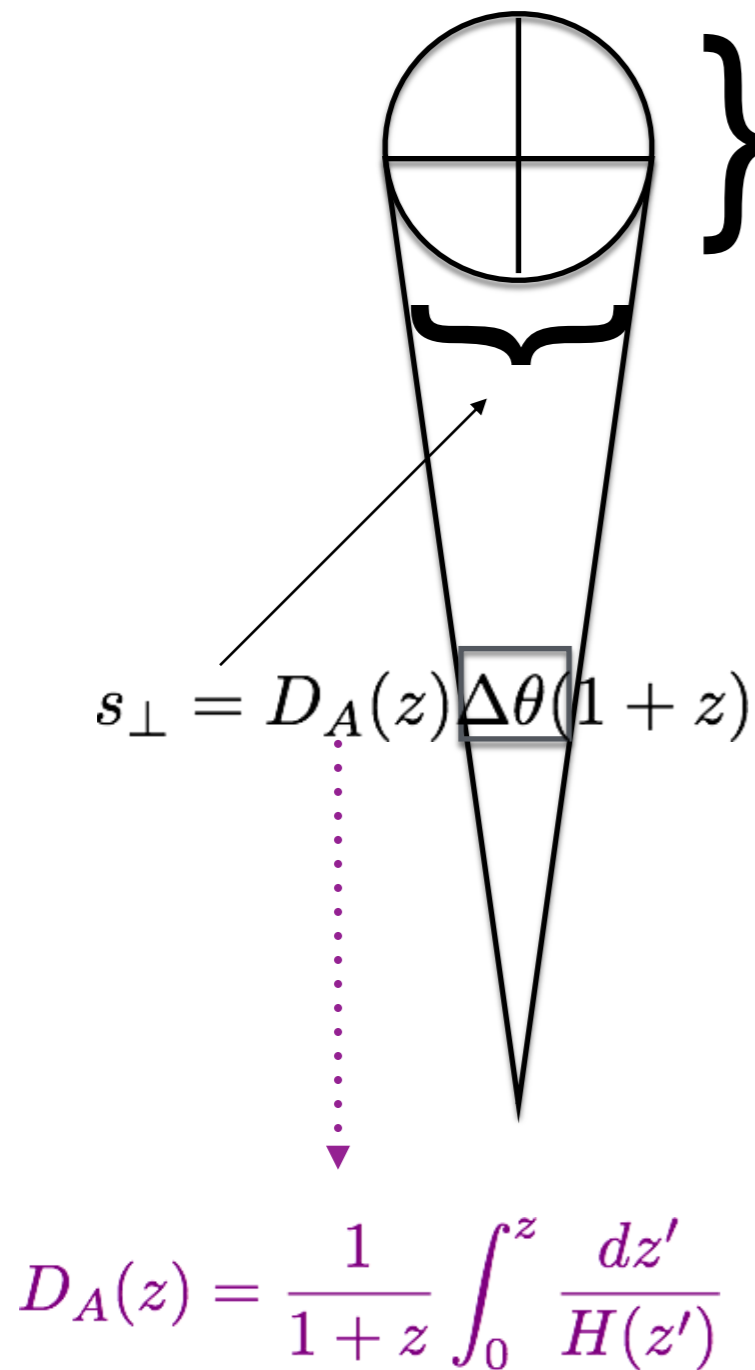
$\tau_d(\eta(z_{drag})) = 1$

$\tau(\eta) \equiv \int_{\eta_0}^{\eta} \dot{\tau} d\eta'$

$\dot{\tau} = -an_e \sigma_T$

$s(z_{drag}) = 147.53 \pm 0.64 \text{ Mpc}$

[Planck 2013 results. Cosmological Parameters]



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

$$H(z) \equiv \frac{\dot{a}}{a} = H_0 \sqrt{\sum_i \Omega_i^{(0)} (1+z)^{-3(1+w_i)}}$$

$$= H_0 \sqrt{\Omega_r^{(0)} (1+z)^{-4} + \Omega_m^{(0)} (1+z)^{-3} + \Omega_{DE}^{(0)} X(z)}$$

$$\text{con } X(z) \equiv \frac{\rho_{DE}(z)}{\rho_{DE}(0)}$$

“dilatation scale” (media geométrica de las dos direcciones transversales y la longitudinal)

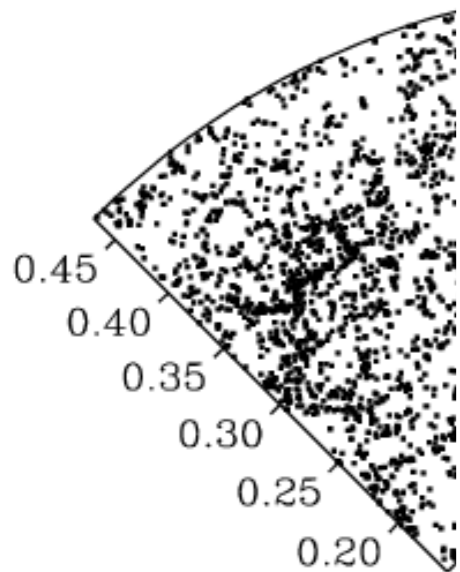
$$D_V(z) \equiv \left[(1+z)^2 D_A^2(z) c \frac{z}{H(z)} \right]^{1/3}$$

$$r_{BAO} \equiv \frac{s(z_{drag})}{D_V(z)}$$

[Bassett & Hlozek (2008)]

[Eisenstein et al (2005)]

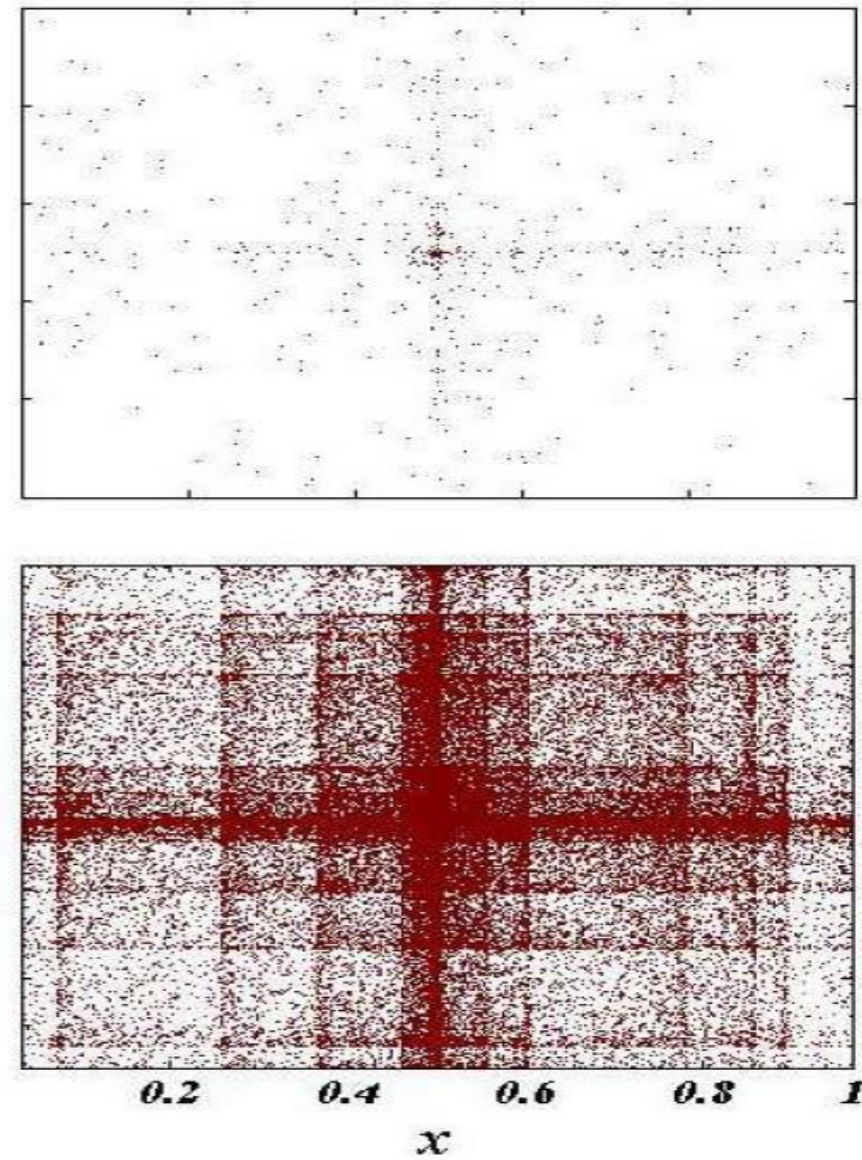
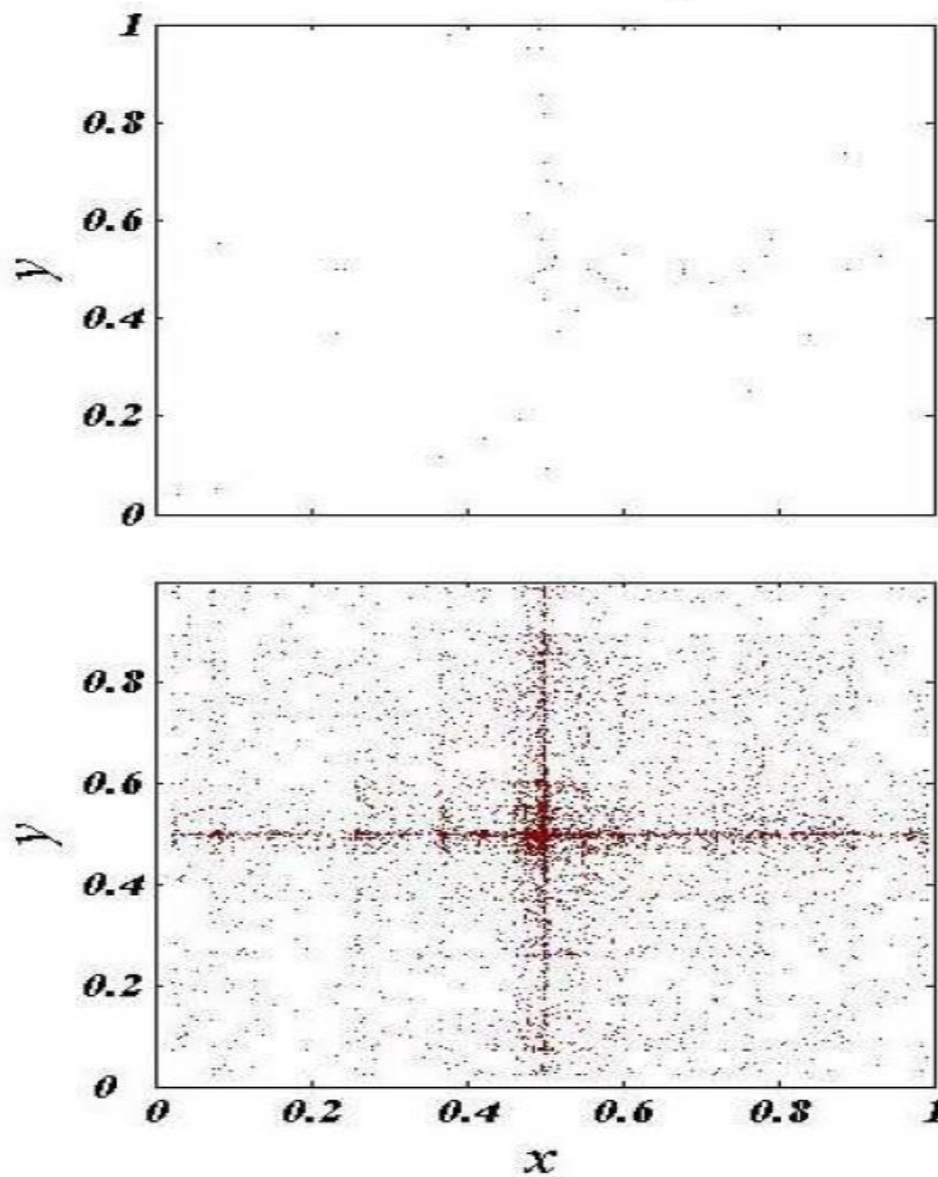
Errores



Obtener la ϵ

- Errores al [Tamaño]

no se pu
esca



BAO
real

Fig. 1.11. The effect of shot noise – as the number of galaxies in a survey increases, one is able to reconstruct the underlying pattern in the distribution of those points more reliably. This is illustrated in the progression from the top left hand panel (100 points) to the bottom right hand panel (100 000 points) which are all drawn from the same probability distribution. As the number of points increases, the sub-structure of the pattern becomes visible.

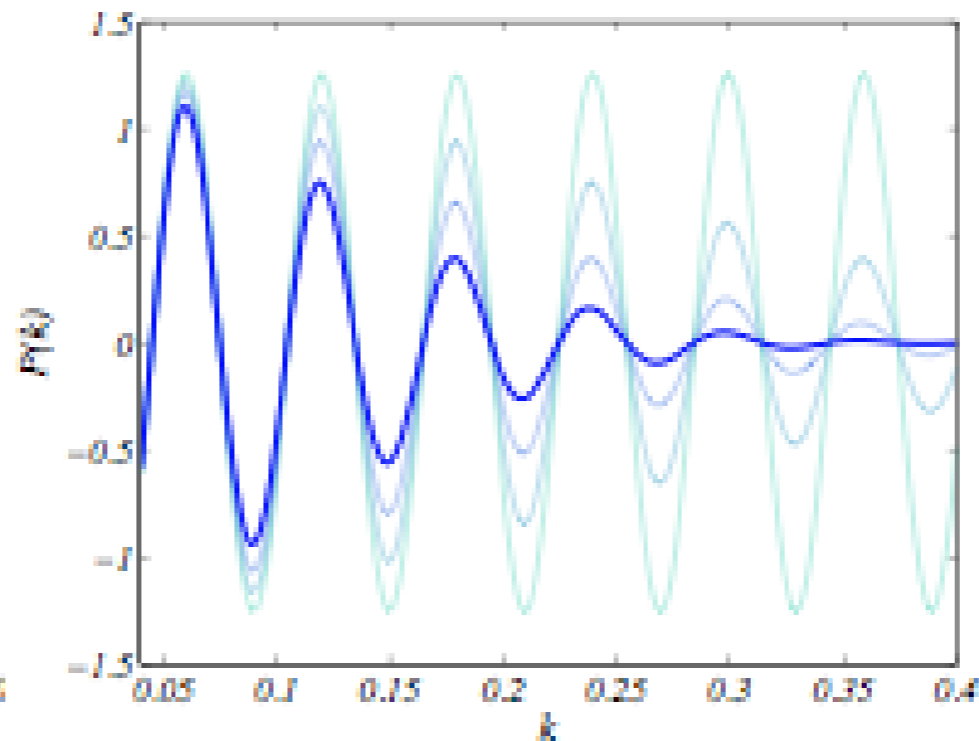
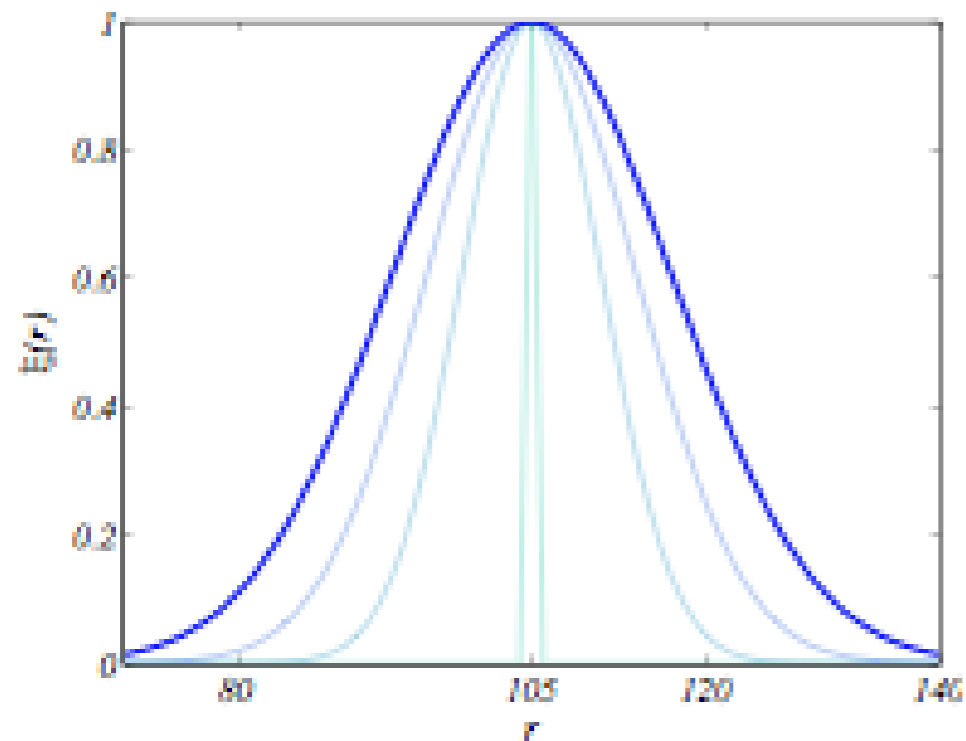
objetos/trazadores (galaxias)

- Errores al determinar el redshift

- Censos fotométricos (error ~3 - 5%)
- Censos espectrográficos (error <0.1%)

*afecta sólo la escala medida a lo largo de la línea de visión → $H(z)$ [Bassett & Hlozek (2008)]

- Las no linealidades recorren y también ensanchan el pico en la función de correlación
- Podemos imaginar una galaxia en el cascarón de la escala de BAO: esa galaxia está sujeta a la interacción combinada con otras sobredensidades
 - En una realización dada de densidades, el efecto neto puede ser mover la galaxia radialmente hacia fuera/dentro
- Como $\xi(s)$ se calcula promediando sobre todas las galaxias disponibles \rightarrow efecto promedio es ensanchar el pico acústico



- Ensanchar el pico acústico en la función de correlación induce un amortiguamiento en $P(k)$ para k grandes

[Bassett & Hlozek (2008)]

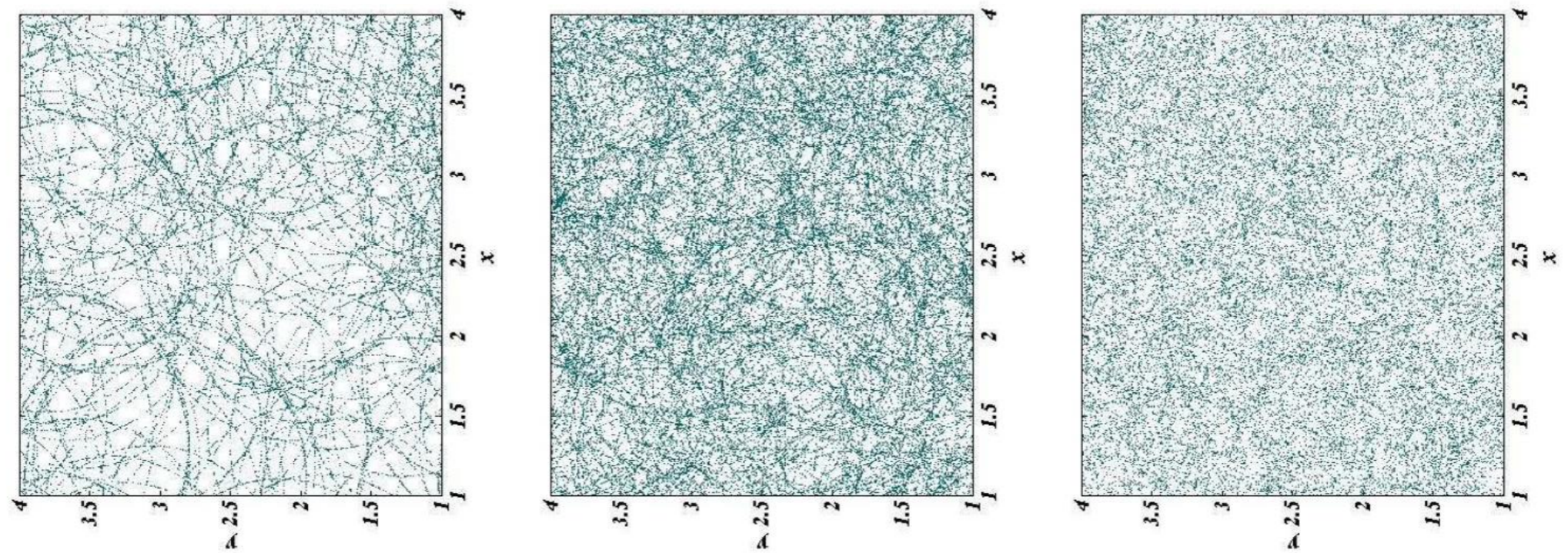


Fig. 1.17. Hiding the characteristic scale. As the peak is broadened from top to bottom as shown schematically in Figure (1.16), the underlying rings of power are lost, and must be recovered statistically. c.f. Figure (1.5). The number of points are kept the same in each panel.

- Se busca reconstruir la distribución de **materia** a partir de trazadores luminosos como **galaxias**

$$P_{gal}(k) = b^2(k, z) P_{mat}(k)$$

sesgo: usado para describir la estructura de un trazador respecto a un punto de referencia (por ej. distribución de DM)

- Sesgo: usualmente pequeño para escalas grandes ($k < 0.1 h\text{Mpc}^{-1}$) pero con dependencia importante de k para escalas pequeñas [**Cresswell & Percival (2008)**]
- Muchas propuestas para modelar el sesgo: simulaciones numéricas y de N-cuerpos

- Cole et al (2005)*;
$$P_{gal}(k) = b^2 \frac{1 + Qk^2}{1 + Ak} P_{lin}(k)$$

- Seo & Eisenstein (2005)*
$$P_{gal}(k) = b^2 P_{lin}(k) + A_1 k + A_2 k^2 + A_0$$

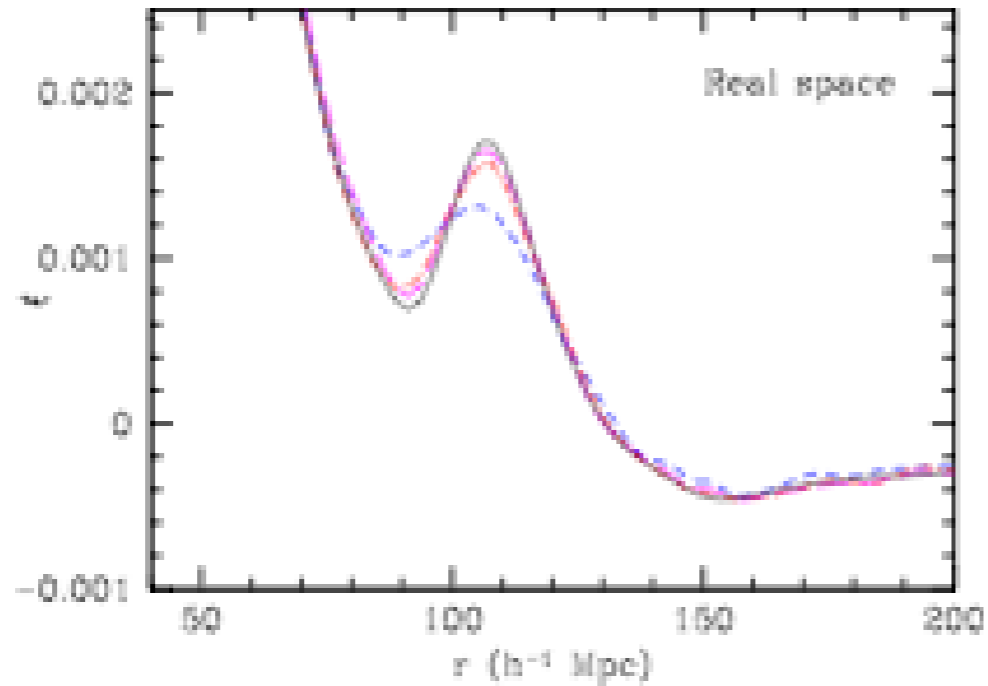
- Seljak (2001); Schulz & White (2006); Guzik, Bernstein & Smith (2006)*
$$P_{gal}(k) = b^2 P_{lin}(k) + A_0$$

- Huff et al (2007)*
$$P_{gal}(k) = b^2 P_{lin}(k) \exp[-(A_1 k)^2] + A_0$$

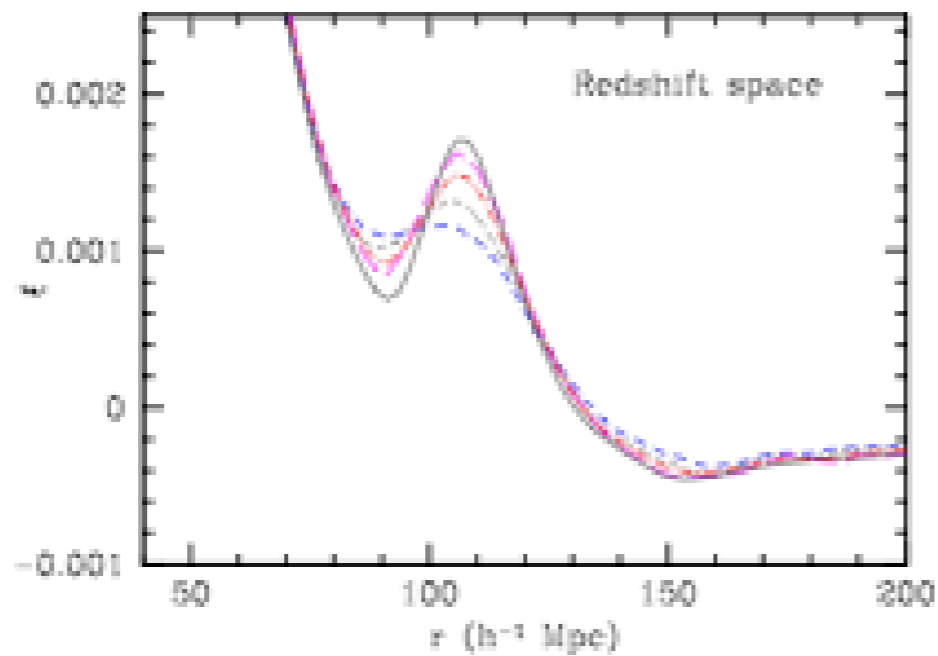
- Smith, Scoccimarro & Sheth (2007)*

$$P_{gal}(k) = b^2 [P_{lin}(k) e^{-A_1(T)k^2} + A_2(T)k^{m(T)}] \times |W(k/k_\alpha)| + A_0(T)|W(k/k_\beta)| + \frac{1}{\tilde{n}_g}$$

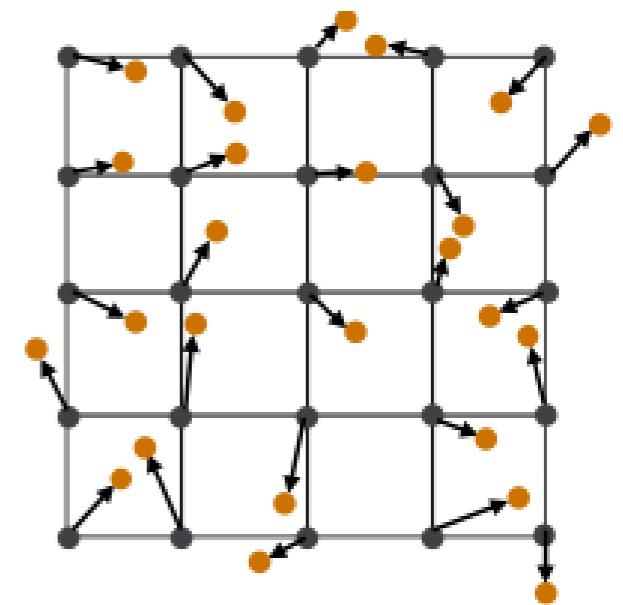
z=49
z=0.3
20h⁻¹Mpc
10h⁻¹Mpc



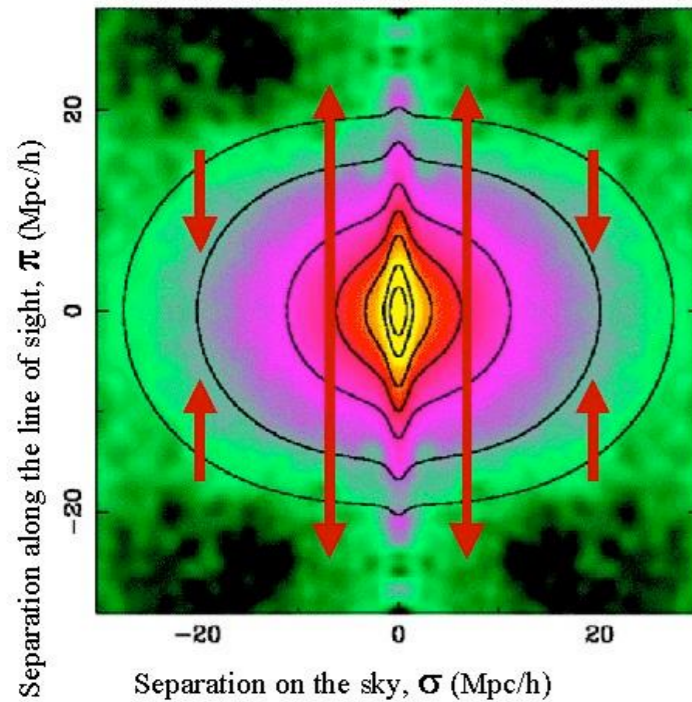
z=49
z=0.3
20h⁻¹Mpc
FoG



- Reconstrucción del pico acústico
 1. Suavizan el campo de densidades en escalas $\sim 10h^{-1}\text{Mpc}$
 2. Calculan el Campo de desplazamientos Lagrangiano \mathbf{q}
 3. Desplazan a cada partícula (galaxia) una cantidad $-\mathbf{q}$
- Mejoran la precisión en el pico por un factor 2-3

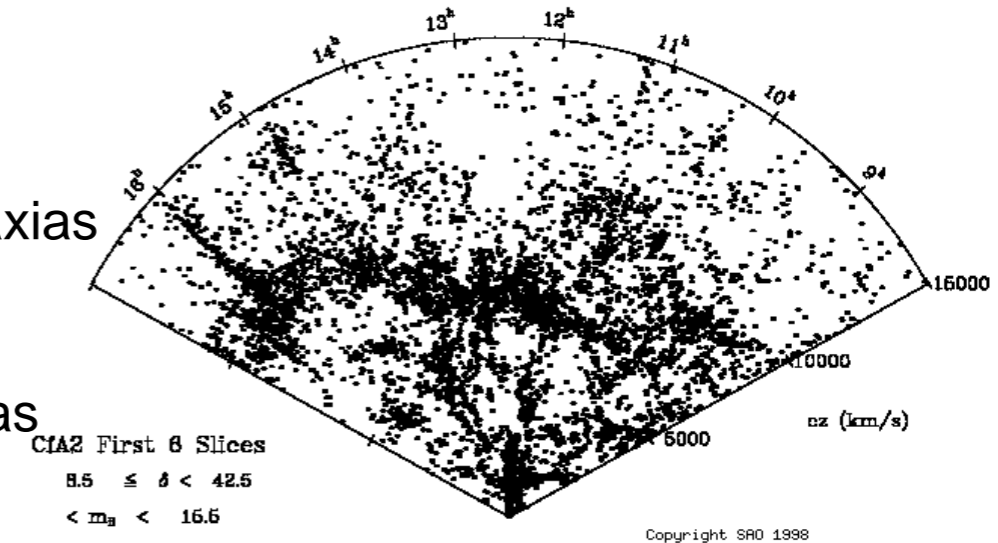


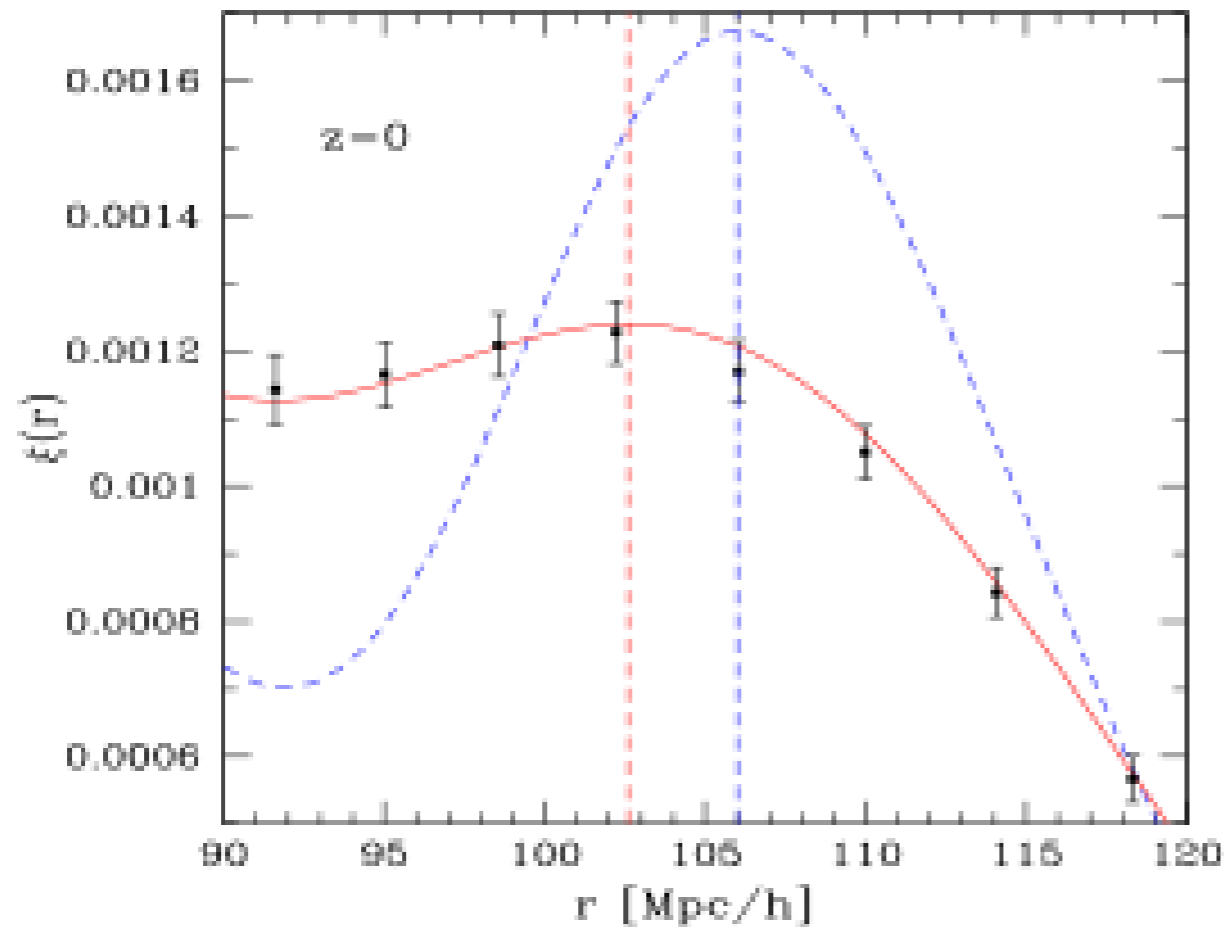
[Eisenstein et al (2007)]



Espacio de corrimientos al rojo:

- Las velocidades peculiares por encima del *flujo de Hubble* generan distorsiones entre el espacio de posiciones de galaxias y el espacio de corrimientos al rojo: las estructuras se ven elongadas en la dirección radial
 - *Fingers of God*
- Velocidades coherentes de galaxias hacia una masa central genera el *Efecto Kaiser*, sólo es apreciable en grandes escalas
 - ocasiona que la función de correlación se *aplane*





Los efectos de las no linealidades a pequeñas escalas inducen un corrimiento en la posición del pico y lo ensanchan, perdiendo información para recuperar la escala característica de censos de galaxias.

--- Pico lineal

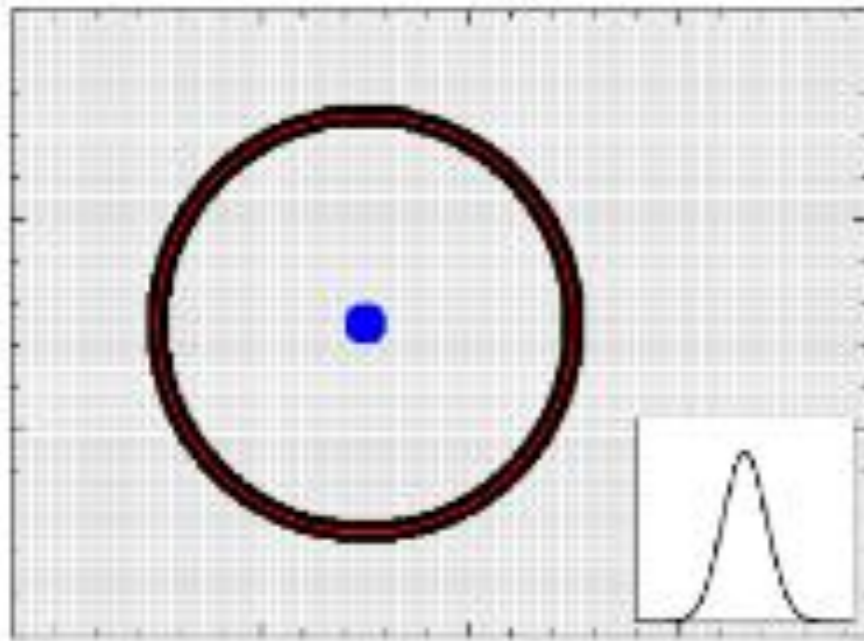
— Correcciones por no linealidades

[Crocce & Scoccimarro, 2008]

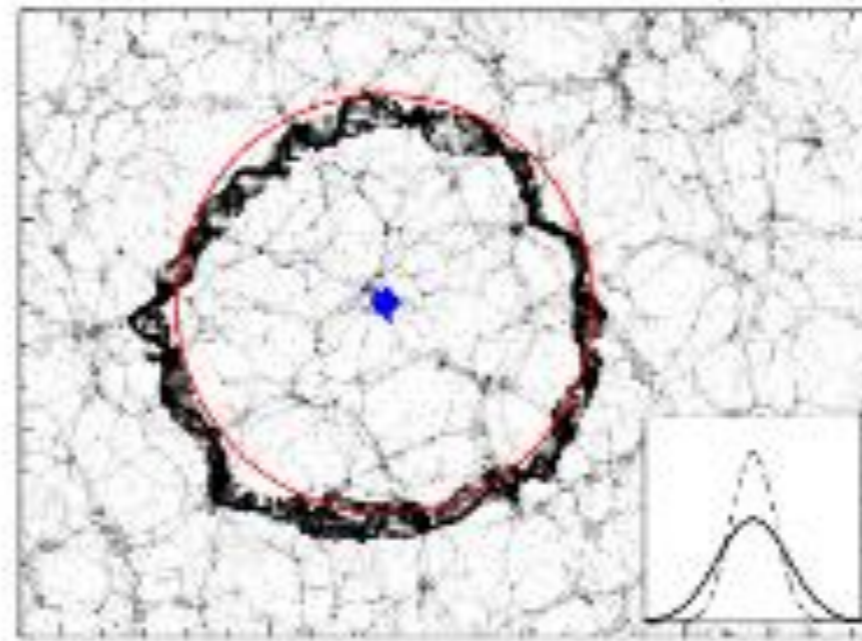
- El tamaño comóvil de la escala de BAO ha evolucionado un $\sim 5\%$ desde la era del CMB hasta $z \sim 0.3$ debido a crecimiento no lineal de estructura. [Seo et al 2008, 2010]
- Ese cambio puede corregirse hasta un nivel de 0.1% usando métodos de reconstrucción [Padmanabhan 2012; Eisenstein et al 2007]

Corrimiento y ensanchamiento del pico

Distribución de partículas inicial

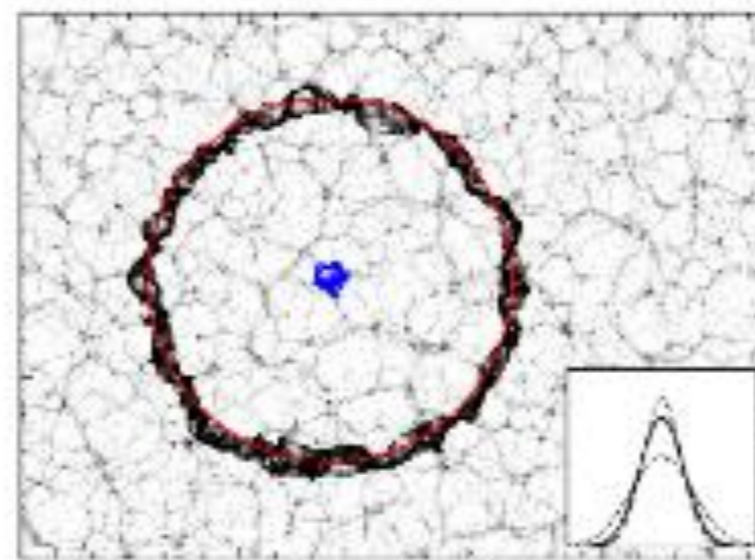
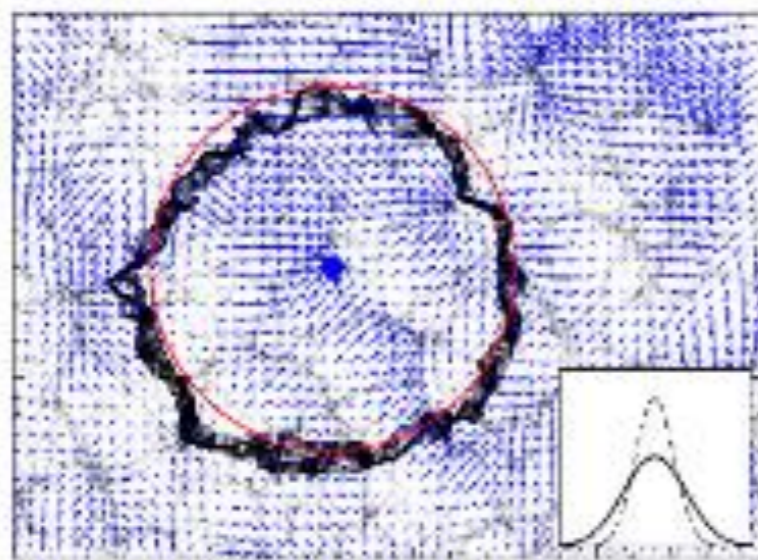


Distribución de partículas evolucionada



- Evolución no lineal del cascarón de densidad
- Auto-gravedad y la atracción de la galaxia en el centro
- Colapso
- Disminuye el radio ~1-3%
- Se refleja en $\xi(s)$
- Mueve la posición del pico

Reconstrucción



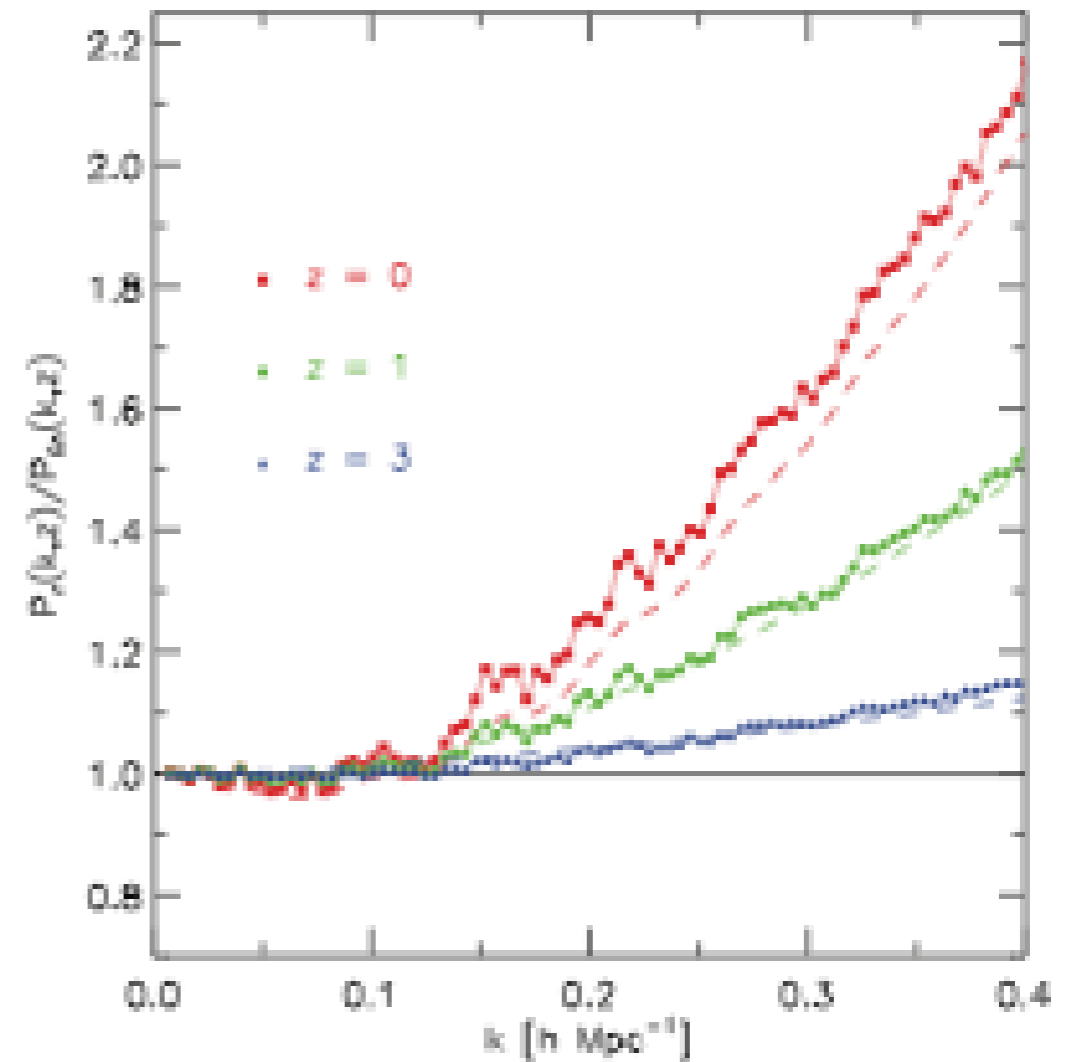
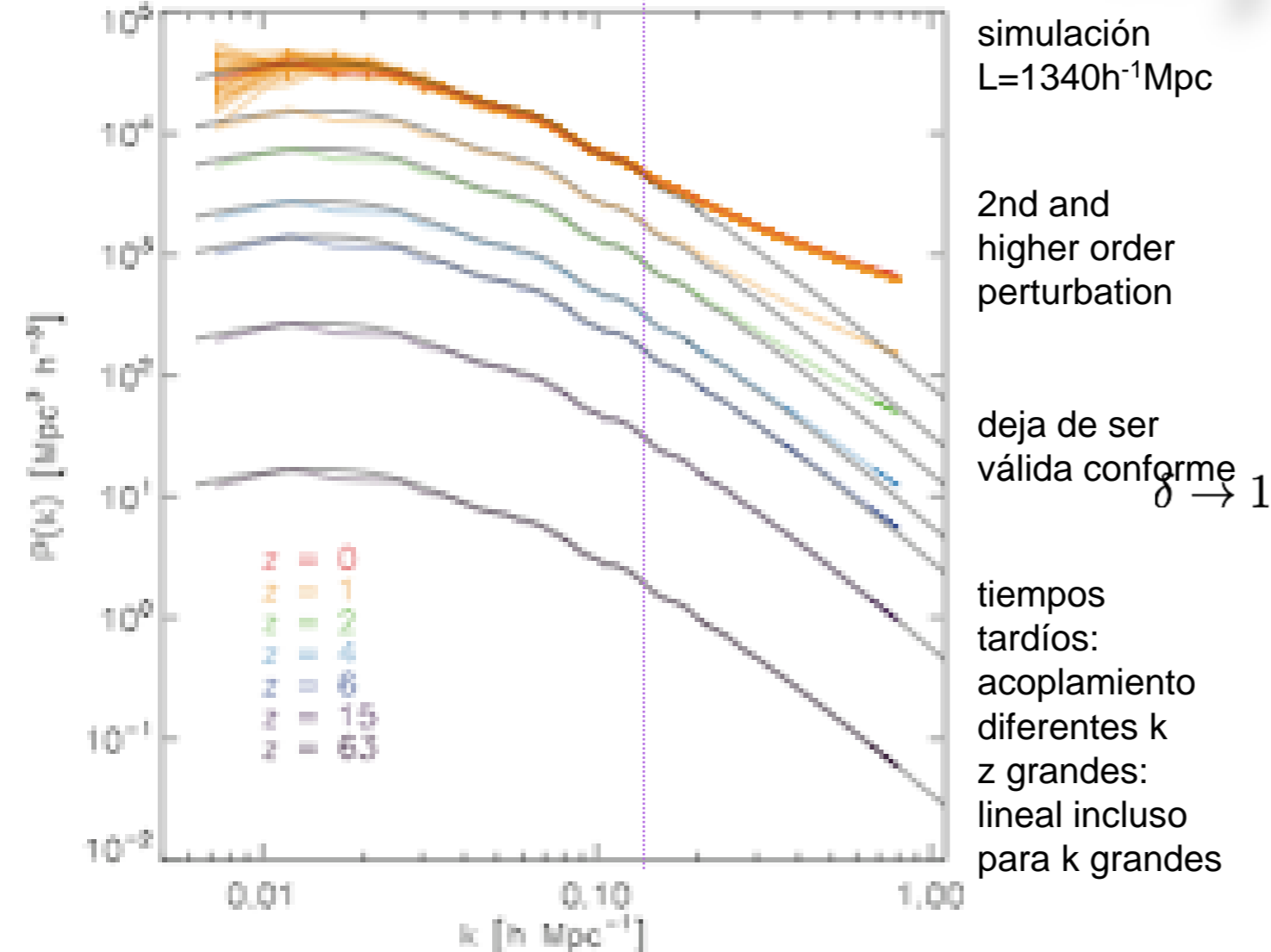
La reconstrucción reduce el error de un 3.5% a 1.9% (análisis para SDSS-DR7)

[Padmanabhan et al (2012)]

- **Crecimiento no lineal:** evolución acoplada de fluctuaciones de densidad en diferentes escalas
- Etapas tempranas: descripción simple \rightarrow ecuaciones de fluidos en términos de la perturbación de densidad en el espacio de Fourier
- Si $\delta \ll 1$ los modos de Fourier evolucionan independientemente \Rightarrow *crecimiento lineal*
- La evolución de espectro de potencias: cambia sólo en amplitud a través del *factor de crecimiento*, D

$$P(k, z) = D^2(z, \Omega_m, \Omega_\Lambda) P(k, z = 0), \quad \delta \equiv \frac{\delta\rho}{\bar{\rho}}$$

$$D(z = 0) = 1$$



[Angulo et al (2008)]

- incluye *todas* las contribuciones proporcionales a $P_0(k)$
- representa cuánto permanece de $P_0(k)$ a cierto k luego de una evolución lineal
- G describe cómo se propaga cierto modo k en el tiempo, en presencia de todos los demás modos de Fourier
 - depende de $P_0(k)$ a todas las escalas

- el espectro generado por acoplamiento de modos a pequeñas escalas
- depende del espectro lineal a diferentes k a través de complicadas convoluciones

$$P_{MC}(k, z) = P_{MC}^{1loop}(k, z) + P_{MC}^{2loop}(k, z) + \dots$$

- un término con n loops describe el acoplamiento de $(n+1)$ modos al modo de interés

$$P_{nloop} \sim \mathcal{O}(\Delta^n)$$

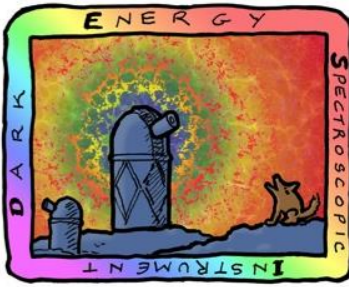
$$P(k, z) = G^2(k, z)P_0(k) + P_{MC}(k, z)$$

[Crocce & Scoccimarro (2008)]

Conclusiones

- **La distribución de galaxias (BAO) nos da mucha información de nuestro universo**
- **Los picos acousticos BAO implican dos pozos de potencial ~~uno~~ generado por materia oscura y otro por bariones**
- **Nos permite tener un diagrama de Hubble de mucho mayor precisión que con SNIa**
- **Nos restringe tipo de materia oscura**
- **Nos restringe la cantidad de energía oscura a diferentes z i.e. la dinámica de la EO**
- **Está considerado como la mejor prueba posible para determinar las propiedades de la energía oscura**
- **DESI medirá más de 35 a 50 millones de galaxias y cuasares a diferentes redshifts**

MS-DESI Reference Concept

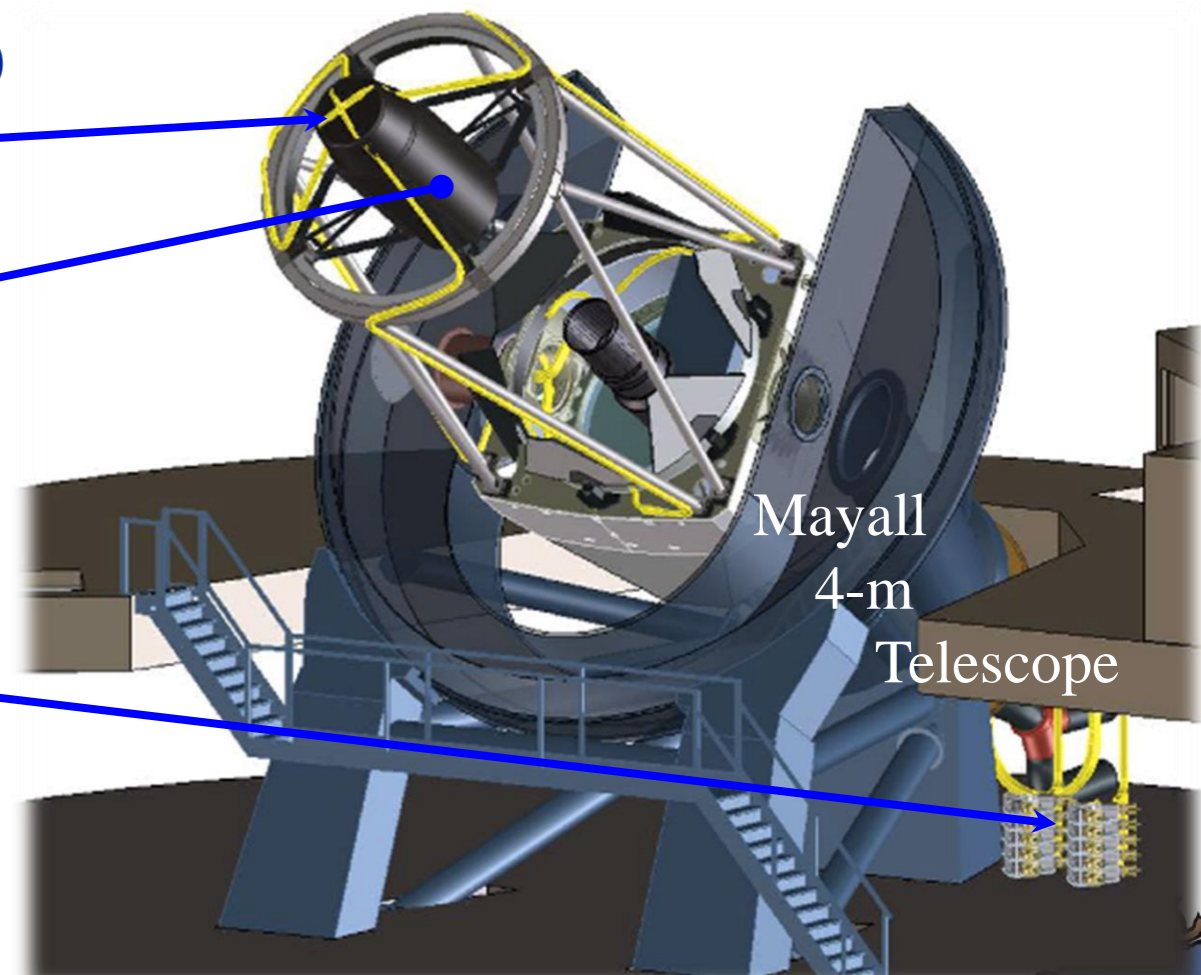


- Scale up BOSS to a massively parallel fiber-fed spectrometer
- Stage-IV BAO and Power Spectrum, build upon BOSS
- Broad range of target classes: LRG's, ELG's, QSO's
- Broad redshift range: $0.5 < z < 1.6$, $2.2 < z < 3.5$
- Sky area: 14,000 – 18,000 square degrees
- Number of redshifts: 20 – 35 million
- Medium resolution spectroscopy, $R \sim 3000 - 5000$
- Spectroscopy from blue to NIR
- Automated fiber system, $N_{\text{fiber}} \sim 4000 - 5000$

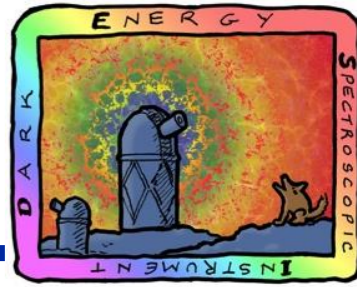
5000 fiber actuators

New 3° field-of-view corrector

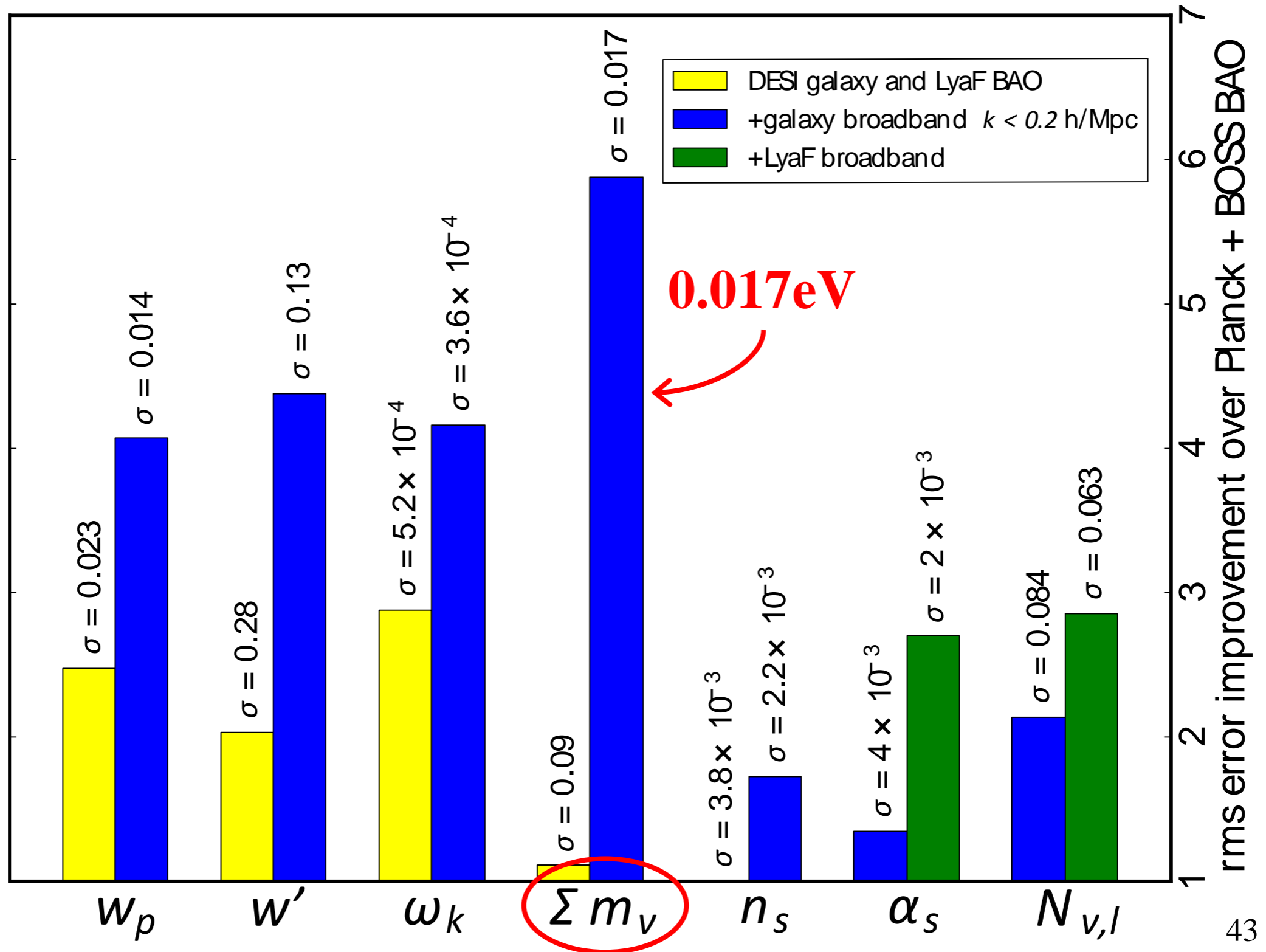
New spectrographs



Broad Scientific Goals



Improvement over Planck + BOSS (normalized to 1.0):



Now →