

Unidad III.

Estructura a gran escala

Parte 5: Cosmología con cúmulos y vacíos de galaxias

Recordatorio...

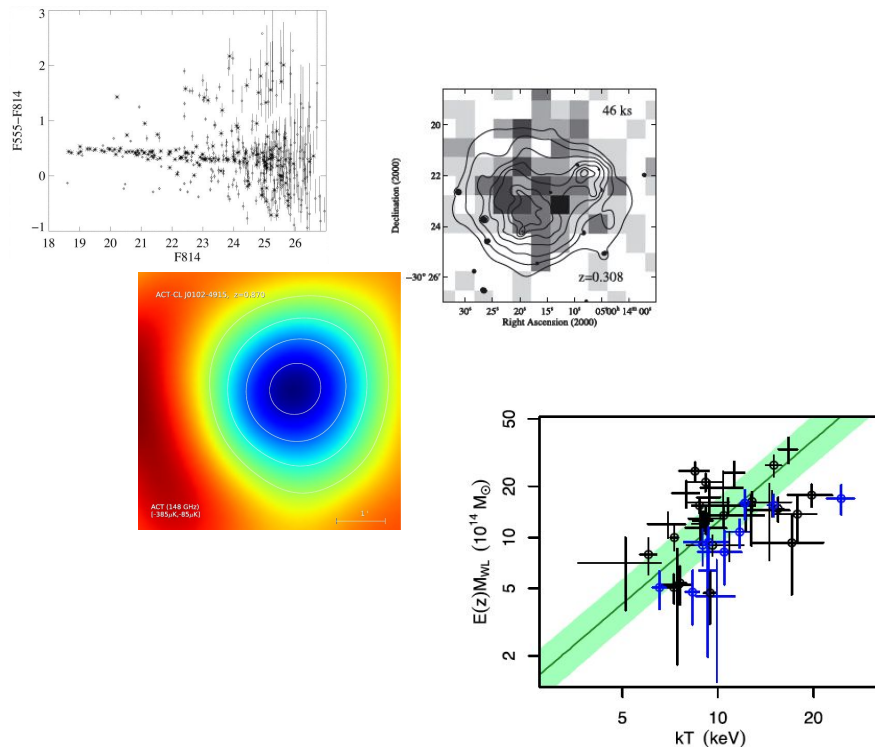
Búsquedas de cúmulos para cosmología

Las principales técnicas son:

- Secuencia roja de galaxias (óptico/mm)
- Emisión bremsstrahlung (rayos X)
- Efecto Sunyaev-Zel'dovich (mm)

Si contamos con mediciones de lente gravitacional, bien para un subconjunto de estos cúmulos, bien como mediciones en promedio de grandes muestras, construimos relaciones de escalamiento que luego podemos comparar con la función de masa esperada en nuestra cosmología preferida.

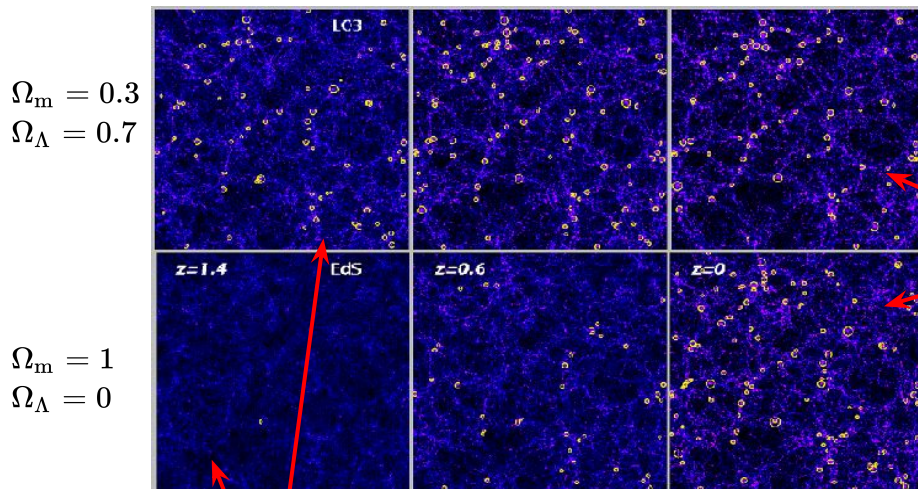
Debemos tener en cuenta sesgos presentes en nuestras mediciones producto de las funciones de selección y de masa.



Sigamos!

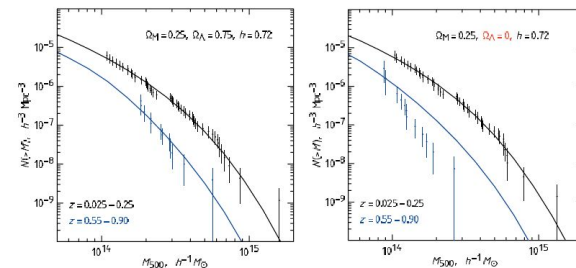
Abundancia de cúmulos de galaxias

La abundancia depende fuertemente de la distribución (densidad y amplitud de fluctuaciones) de materia y tasa de crecimiento.



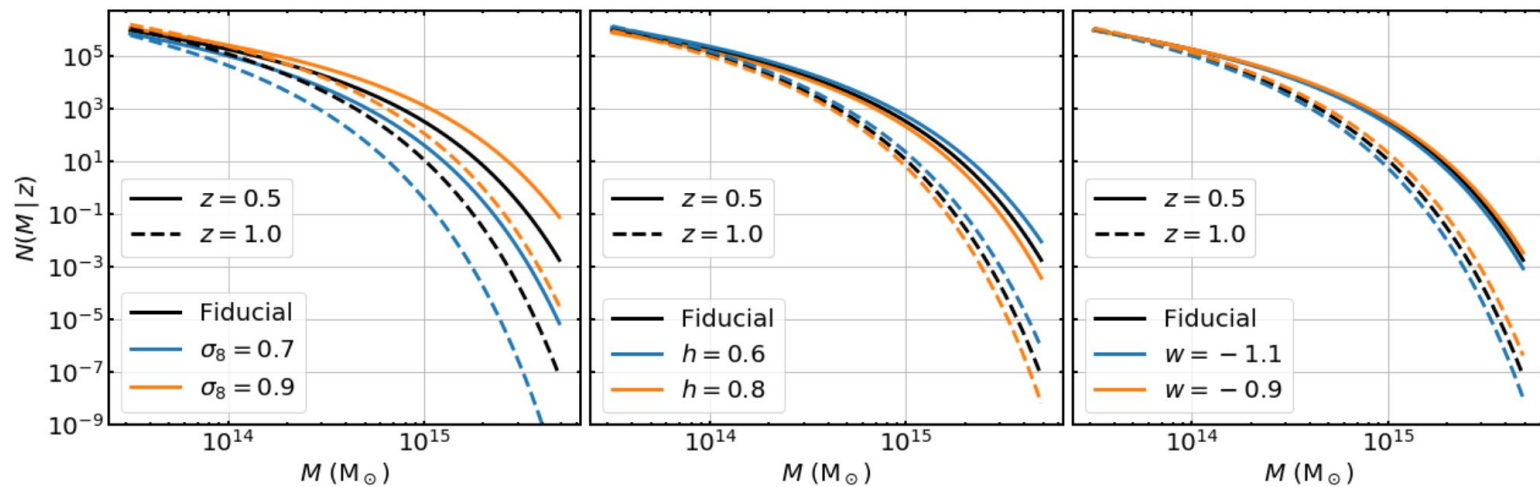
Borgani & Guzzo (2001)

Para eso necesariamente
tienen que ser muy
distintos en el pasado



Los modelos
coinciden a $z=0$
por construcción

Más en detalle, abajo se muestra cómo depende la abundancia de halos de distintos parámetros cosmológicos y del redshift. La cosmología de base corresponde a un universo Λ CDM plano con $\sigma_8 = 0.8$ y $\Omega_m = 0.3$. Noten la escala vertical!



En la práctica

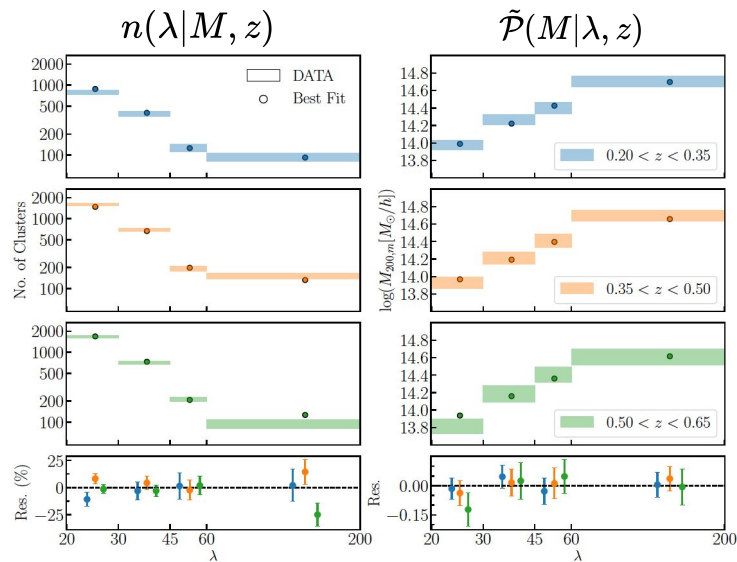
Dado un catálogo de cúmulos de galaxias, generado a través de un observable λ , el número esperado de cúmulos observados en un rango de redshift (z_1, z_2) sobre un ángulo sólido Ω es

$$\langle N \rangle = \frac{\Omega}{4\pi} \int_{z_1}^{z_2} dz \frac{dV}{dz} \int_0^\infty dM n(M, z) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \mathcal{P}(\lambda|M, z) \mathcal{S}(\lambda, z)$$

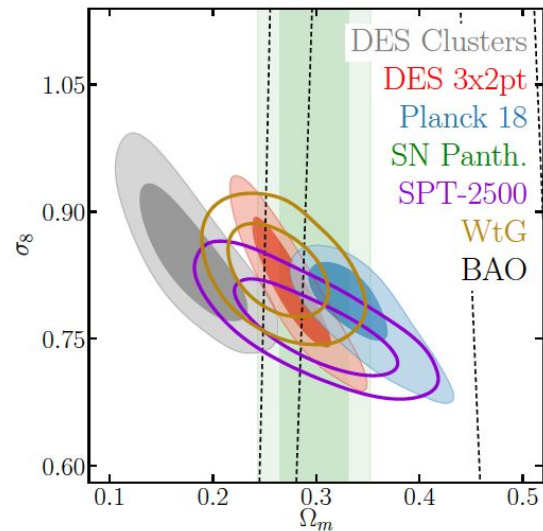
donde

$n(M)$	es la función de masa (cosmología)
dV/dz	es el diferencial de volumen (cosmología)
$\mathcal{P}(\lambda M, z)$	es la relación de escalamiento entre observable y masa (astrofísica)
$\mathcal{S}(\lambda, z)$	es la función de selección (experimento)

Resultados usando el catálogo redMaPPer con 7000 cúmulos seleccionados ópticamente usando datos del Dark Energy Survey (DES), con masas calibradas usando mediciones del efecto lente gravitacional débil (WL) promedio.

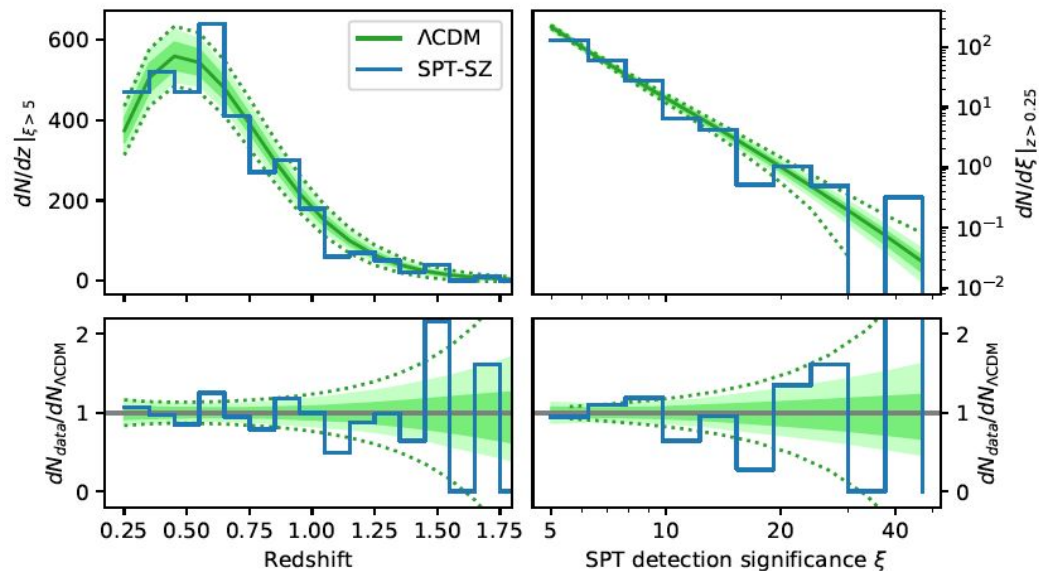


DES Collaboration (2020)

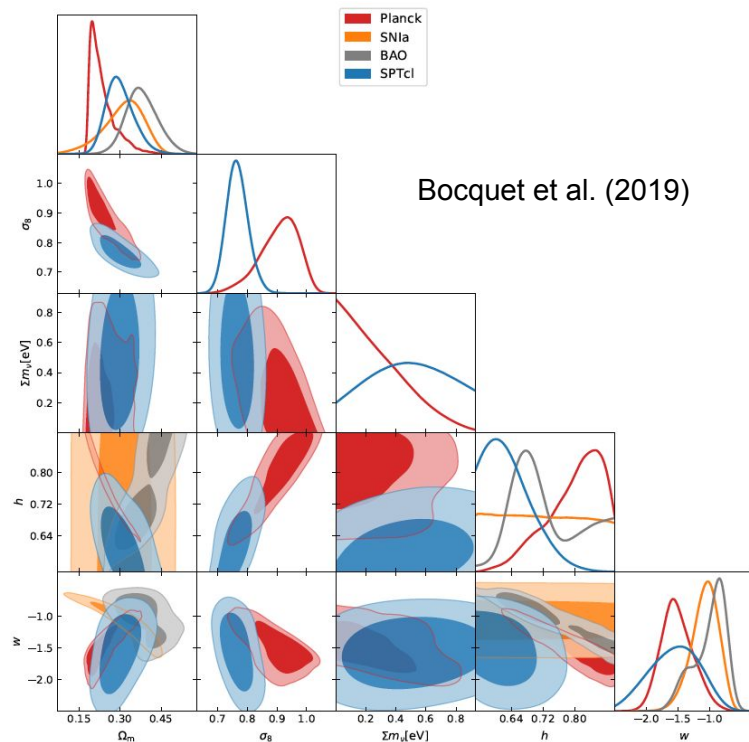


Notar la degeneración en los parámetros: una mayor amplitud de fluctuaciones (σ_8) puede compensarse con una menor densidad de materia (Ω_m), y viceversa. De hecho, los resultados cosmológicos derivados de la abundancia de estructura muchas veces se reportan en la proyección $\mathcal{S}_8 \equiv \sigma_8 (\Omega_m/0.3)^{0.5}$

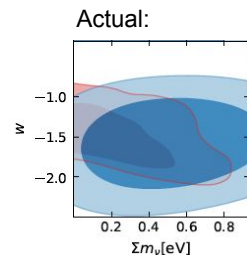
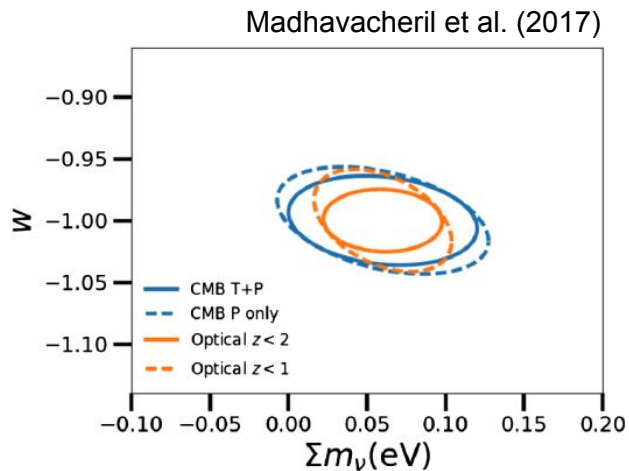
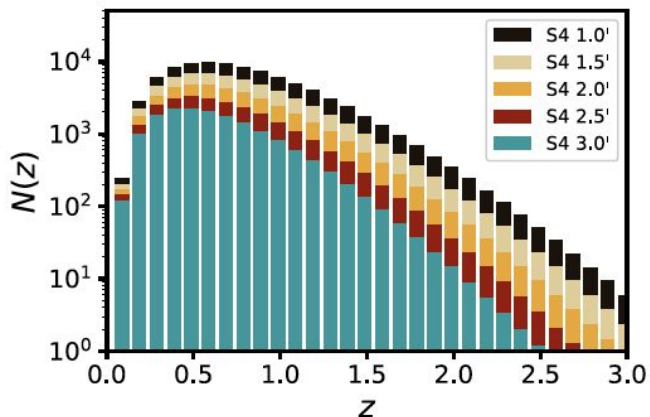
Otro ejemplo, usando 340 cúmulos seleccionados con el efecto SZ usando el South Pole Telescope y masas calibradas con mediciones individuales de WL y emisión de rayos X.



Este análisis se extiende casi hasta $z=2$, por lo que tiene sentido extender el modelo cosmológico. Con sólo 340 cúmulos, los rangos permitidos son comparables a Planck.



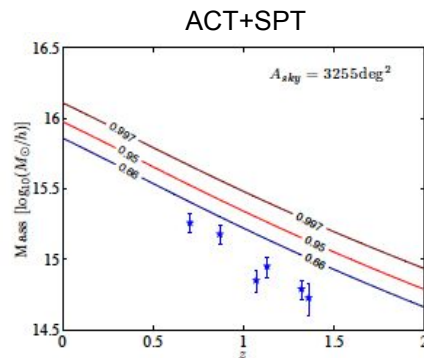
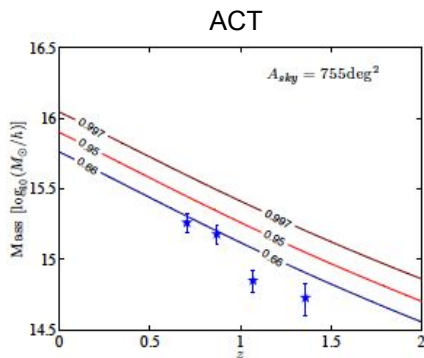
Experimentos futuros podrían permitir determinar la ecuación de estado de la energía oscura y la suma de masa de neutrinos con gran precisión.



Predicciones para un experimento futuro de CMB ca. 2030, asumiendo que se puede calibrar la masa de estos cúmulos usando el efecto de lente gravitacional tanto con el CMB como con datos ópticos tipo LSST.

Estadísticas de exclusión

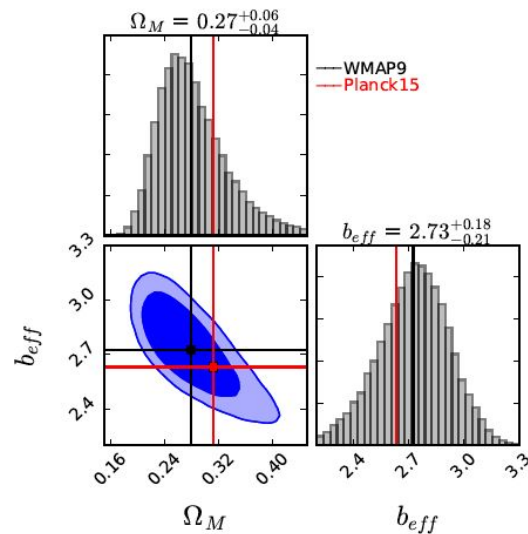
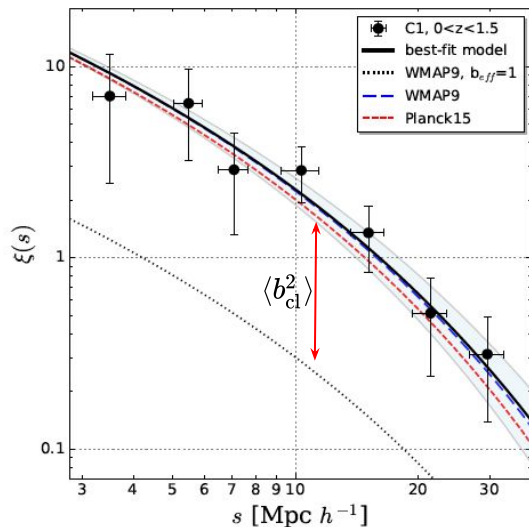
Un método que se hizo muy popular en los primeros años del efecto SZ (porque éste detecta los cúmulos más masivos independiente de su redshift), fueron las estadísticas de exclusión. Éstas responden a la pregunta: Cuál es el cúmulo más masivo permitido por una cosmología en particular? Sin embargo, los catálogos SZ rápidamente se hicieron suficientemente grandes que ya no tenía sentido hacer cosmología con sólo uno de esos cúmulos. (El artículo más conocido fue Mortonson et al. (2011). Al día de hoy tiene 113 citas, 77 de las cuales las recibió antes de 2014.) En esos pocos años hubo algunas afirmaciones de potenciales cúmulos en tensión con Λ CDM, pero ninguno sobrevivió análisis más cuidadosos.



Harrison & Hotchkiss (2013)

Aglomeración de cúmulos

Podemos usar la aglomeración de cúmulos para inferir el espectro de potencias de materia igual como usamos la aglomeración de galaxias. Abajo, la función de correlación de 180 cúmulos detectados en rayos X.



H_0 con SZ y rayos X

Recordemos que la emisión de rayos X proviene del efecto bremsstrahlung. Su brillo superficial es

$$S_X = \frac{1}{4\pi(1+z)^4} D_A \int d\theta n_e^2 \Lambda_{ee}$$

con $\Lambda_{ee} \propto T_e^{1/2}$, y el efecto Sunyaev-Zel'dovich es

$$y = \frac{\Delta T_{\text{CMB}}}{T_{\text{CMB}}} = \frac{\sigma_T k_B}{m_e c^2} D_A \int d\theta n_e T_e$$

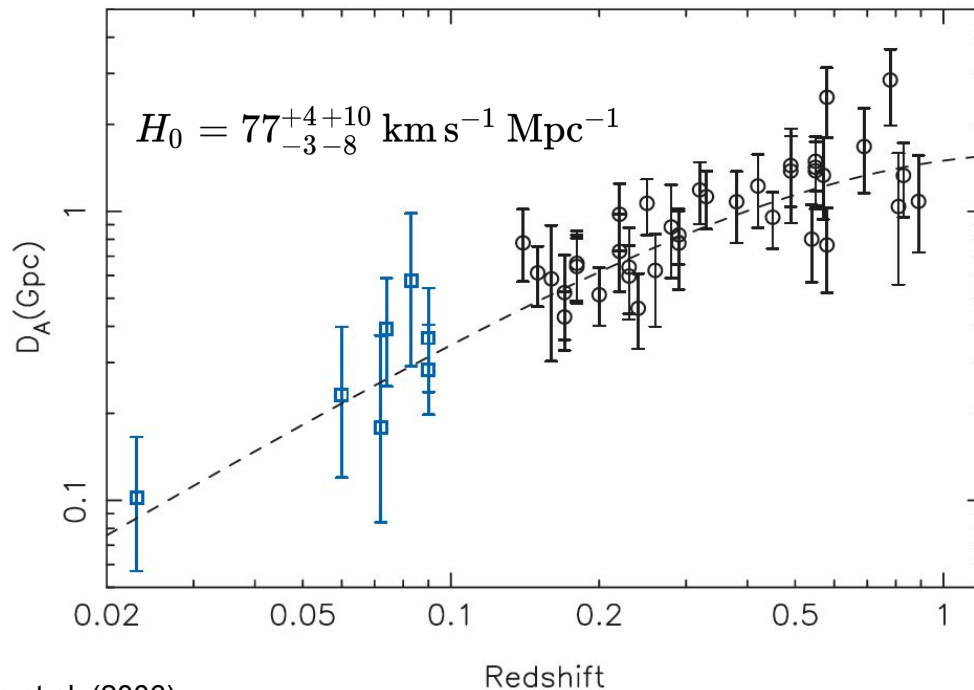
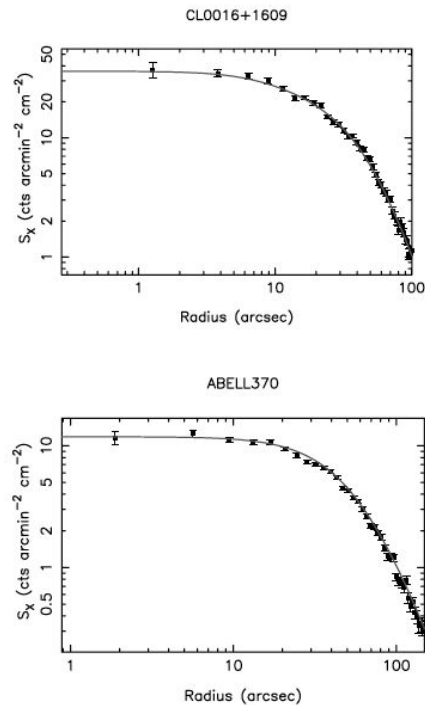
donde θ es la distancia angular perpendicular al plano del cielo. Eliminando la densidad de electrones se obtiene

$$D_A \propto \frac{(\Delta T_{\text{CMB}})^2 \Lambda_{ee}}{S_X T_e^2}$$

donde la constante de proporcionalidad incluye todos los detalles del perfil de densidad de electrones de los cúmulos. Esto suena peligroso, pero resulta que un buen ajuste a las mediciones de rayos X es un “perfil β ”,

$$n_e(r) = n_{e,0} \left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{-3\beta/2}$$

Este perfil β puede proyectarse a una dimensión analíticamente

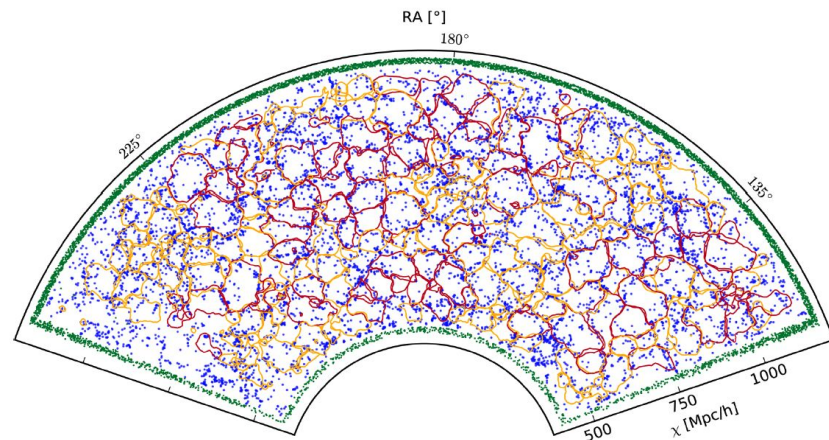


Bonamente et al. (2006)

Cosmología con vacíos de galaxias

Las contrapartes de los cúmulos de galaxias en la red cósmica son los vacíos de galaxias: zonas delimitadas por filamentos y “hojas” de estructuras. Durante la historia del Universo, la materia ha estado *alejándose* de estos vacíos, y por lo tanto son las zonas menos afectadas por la evolución no-lineal de estructuras y las complicaciones ligadas a la formación de galaxias.

Al ser las estructuras “más lineales” del Universo, los vacíos son particularmente afectados por la tasa de expansión del Universo, dominada en tiempos tardíos por la energía oscura.



Nadathur (2016)

Al igual que los halos, los vacíos están sujetos a distorsiones en espacio de redshift. En el caso de vacíos, se produce un achatamiento en la dirección de redshift, conocido como el **efecto Alcock-Paczynski**. De él se deriva la **prueba de Alcock-Paczynski**, que consiste en verificar que la extensión promedio de los vacíos sea igual tanto en la dirección de la línea de visión como en la perpendicular (por isotropía).

El tamaño angular de un vacío, en coordenadas comóviles en un espacio plano, es

$$\delta d_v = \frac{cz}{H_0} \delta \theta = \frac{cz}{H_0} \left(\frac{\delta r_v}{D_A(z)} \right)$$

y el tamaño en la línea de visión

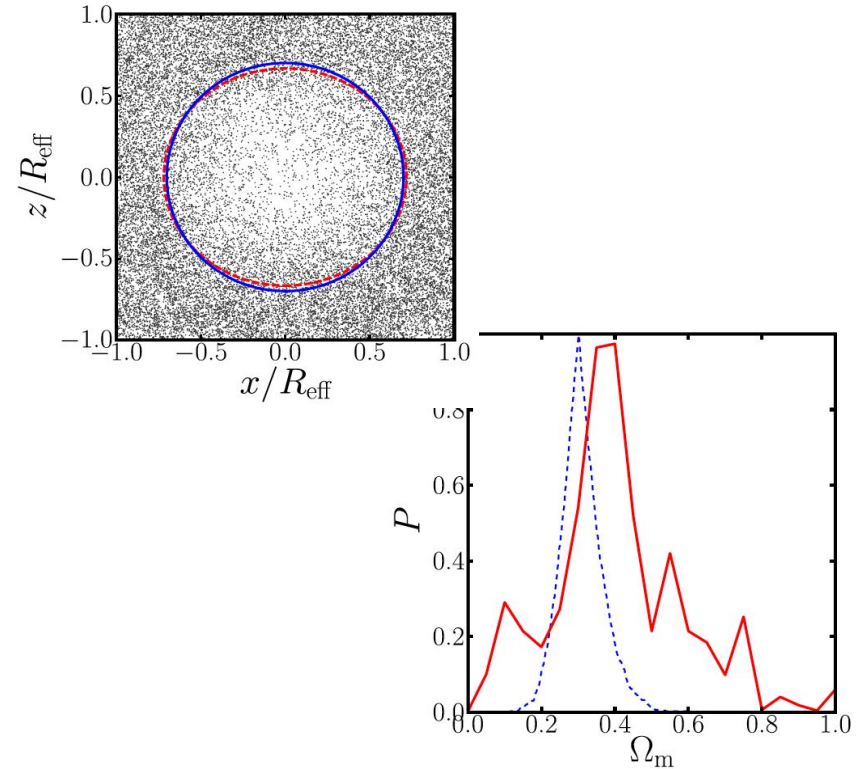
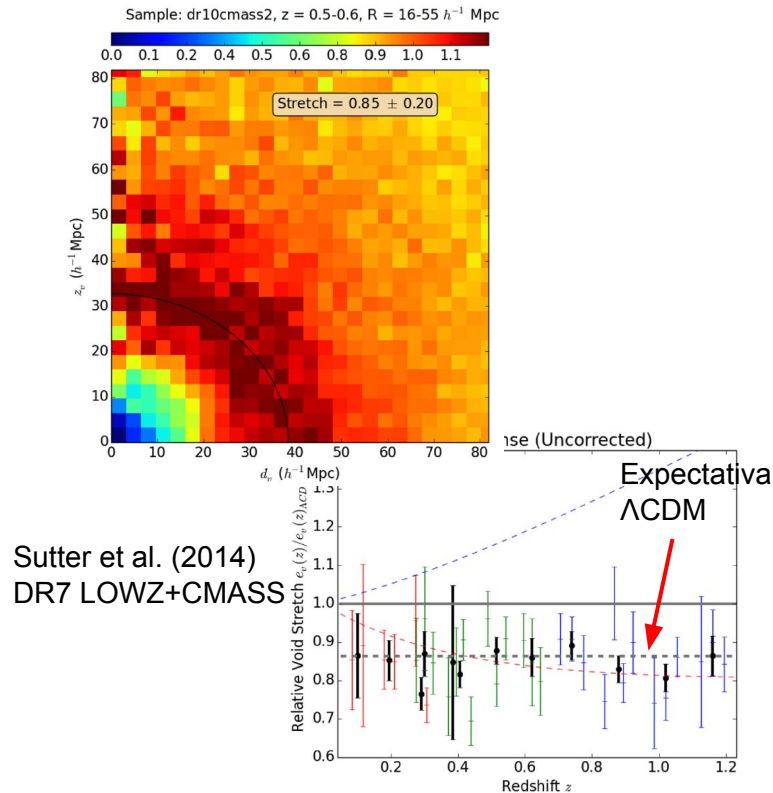
$$\delta z_v = \frac{\delta l_v}{d(D_A)/dz} = \frac{H_0 E(z)}{c} \delta l_v$$

(en un espacio plano) de manera que obtenemos

$$\frac{\delta z_v}{\delta d_v} = \left(\frac{H_0}{c} \right)^2 \frac{D_A(z) E(z)}{z}$$

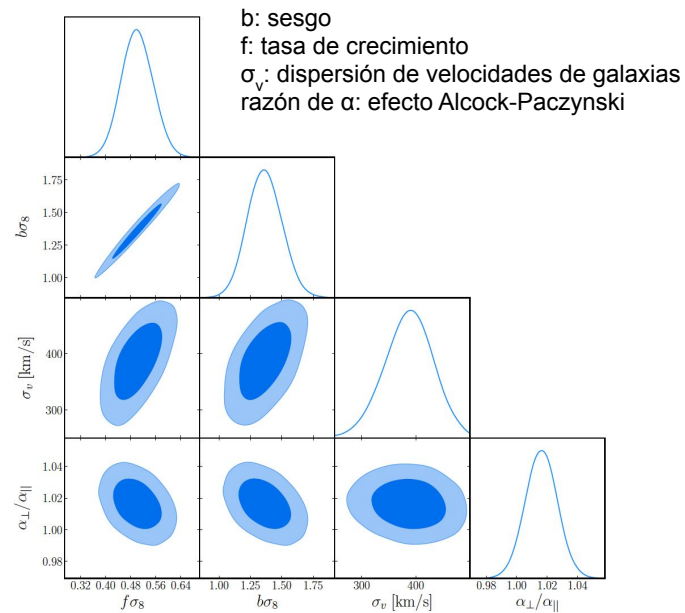
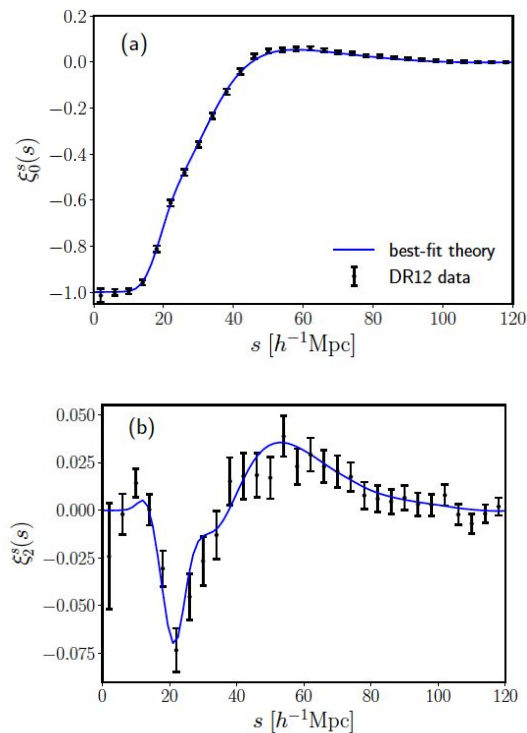
Si contamos con un modelo para corregir por distorsiones en espacio de redshift para nuestros datos, podemos calcular el valor esperado de esta razón.

Al igual que los halos, los vacíos están sujetos a distorsiones en espacio de redshift. En el caso de vacíos, se produce un achatamiento en la dirección de redshift, conocido como el **efecto Alcock-Paczynski**.

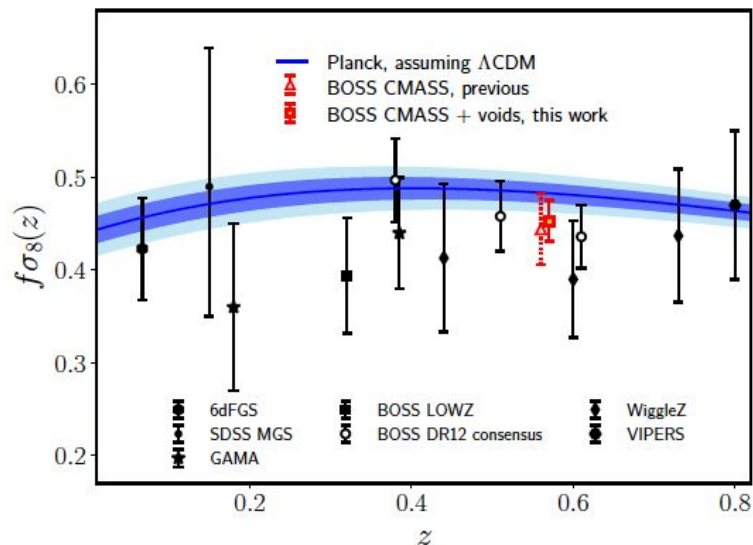
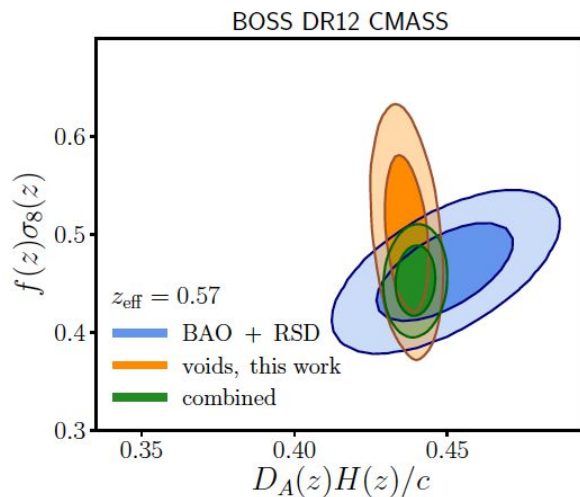


Mao et al. (2017) BOSS galaxies

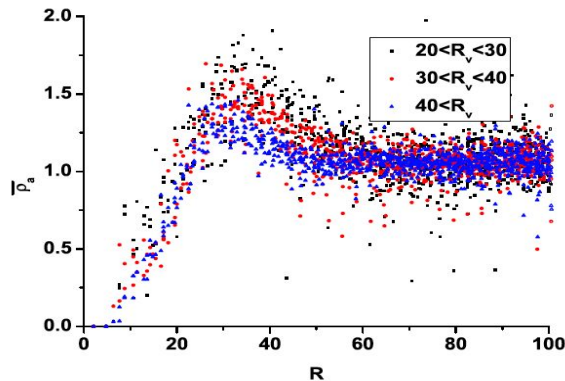
Una medición que entrega mayor información cosmológica (dada la dificultad de modelar RSD) es la cros-correlación entre vacíos y galaxias, cuyo monopolo corresponde al perfil de densidad de vacíos:



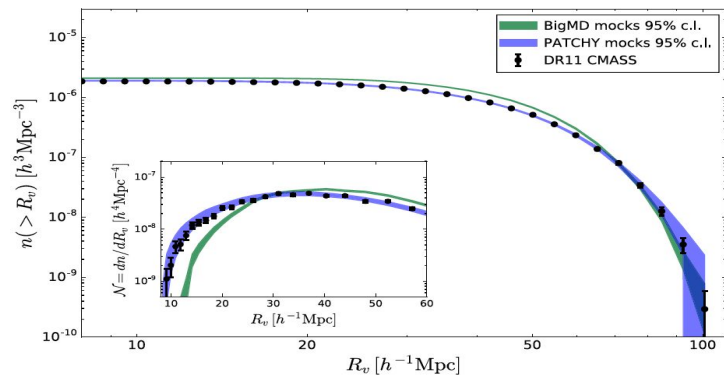
La función de correlación de vacíos con galaxias es tan poderosa como la función de correlación de galaxias (=BAO), y además depende de una combinación distinta de los parámetros, por lo que ayuda a romper la degeneración intrínseca en mediciones de BAO.



Análogo a la función de masa de halos, se puede definir la **función de tamaño de vacíos**. A la izquierda, mediciones del perfil de densidad promedio de vacíos en SDSS DR10. A la derecha, la abundancia de vacíos de distintos tamaños trazados por galaxias CMASS, comparados con catálogos simulados de estas galaxias. La función de tamaño de vacíos no ha sido utilizada aún para restringir parámetros cosmológicos con datos reales, pero se presenta muy prometedora para experimentos futuros. A la derecha se compara la función de tamaños con dos simulaciones distintas de las galaxias utilizadas; claramente la simulación PATCHY reproduce mejor las observaciones.



Dai (2015)



Nadathur (2016)

Referencias

- Bocquet, S., et al., 2019. *Cluster Cosmology Constraints from the 2500 deg² SPT-SZ Survey: Inclusion of Weak Gravitational Lensing Data from Magellan and the Hubble Space Telescope*. [ApJ, 878, 55](#)
- Bonamente, M., et al., 2006. *Determination of the Cosmic Distance Scale from Sunyaev-Zel'dovich Effect and Chandra X-Ray Measurements of High-Redshift Galaxy Clusters*. [ApJ, 647, 25](#)
- Dai, D., 2015. *Void alignment and density profile applied to measuring cosmological parameters*. [MNRAS, 454, 3590](#)
- DES Collaboration, 2020. *Dark Energy Survey Year 1 Results: Cosmological Constraints from Cluster Abundances and Weak Lensing*. [arXiv:2002.11124](#)
- Harrison, I. & Hotchkiss, S., 2013. *A consistent approach to falsifying Λ CDM with rare galaxy clusters*. [JCAP, 07, 022](#)
- Madhavacheril, M., et al., 2017. *Fundamental physics from future weak-lensing calibrated Sunyaev-Zel'dovich galaxy cluster counts*. [PhRvD, 96, 103525](#)
- Mao, Q., et al., 2017. *Cosmic Voids in the SDSS DR12 BOSS Galaxy Sample: The Alcock-Paczynski Test*. [ApJ, 835, 160](#)
- Marulli, F., et al., 2018. *The XXL Survey. XVI. The clustering of X-ray selected galaxy clusters at $z \sim 0.3$* . [A&A, 620, A1](#)
- Nadathur, S., 2016. *Testing cosmology with a catalogue of voids in the BOSS galaxy surveys*. [MNRAS, 461, 358](#)
- Nadathur, S., et al., 2019. *Beyond BAO: Improving cosmological constraints from BOSS data with measurement of the void-galaxy cross-correlation*. [PhRvD, 100, 023504](#)
- Sutter, P., et al., 2014. *A measurement of the Alcock-Paczyński effect using cosmic voids in the SDSS*. [MNRAS, 443, 2983](#)