

# **Unidad III.**

## **Estructura a gran escala**

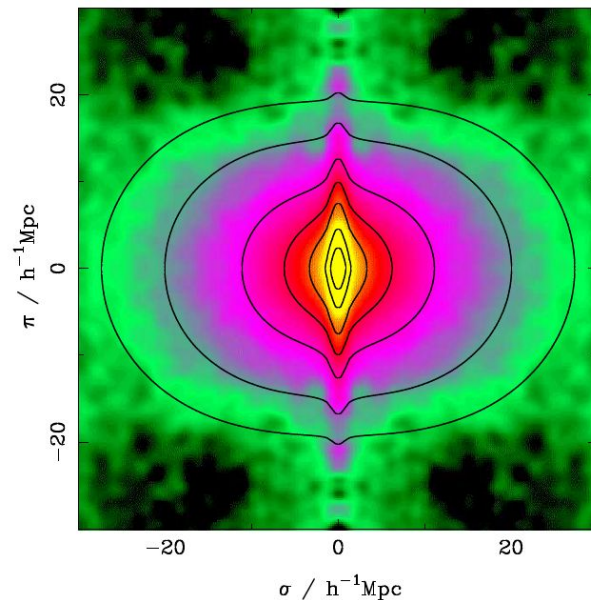
*Parte 3: Cúmulos de galaxias*

Recordatorio...

# Función de correlación y efecto RSD

La función de correlación es el exceso de probabilidad de detectar una galaxia a una distancia  $r$ , comparado con una distribución aleatoria, y se mide contando pares de galaxias en los datos y en catálogos aleatorios.

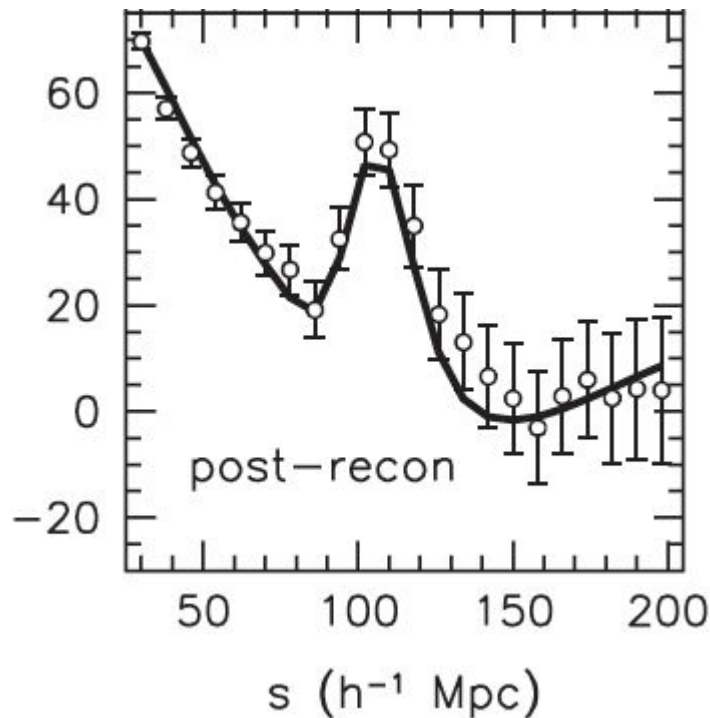
Se pueden usar redshifts para medir distancias en 3d, pero en ese caso hay que modelar el efecto de distorsión en espacio de redshift (RSD).



# Oscilaciones acústicas de bariones

Las oscilaciones acústicas de bariones son un rastro dejado por la interacción de bariones y fotones previo a la recombinación, antes de la cual fluctuaciones de tamaños menores al horizonte no crecían, sino quedaban congeladas en el tamaño del horizonte.

Estas oscilaciones acústicas de bariones se reflejan en el espectro de potencias de materia y por lo tanto en la función de correlación. Fueron detectadas por primera vez en 2005 usando datos tempranos de SDSS.

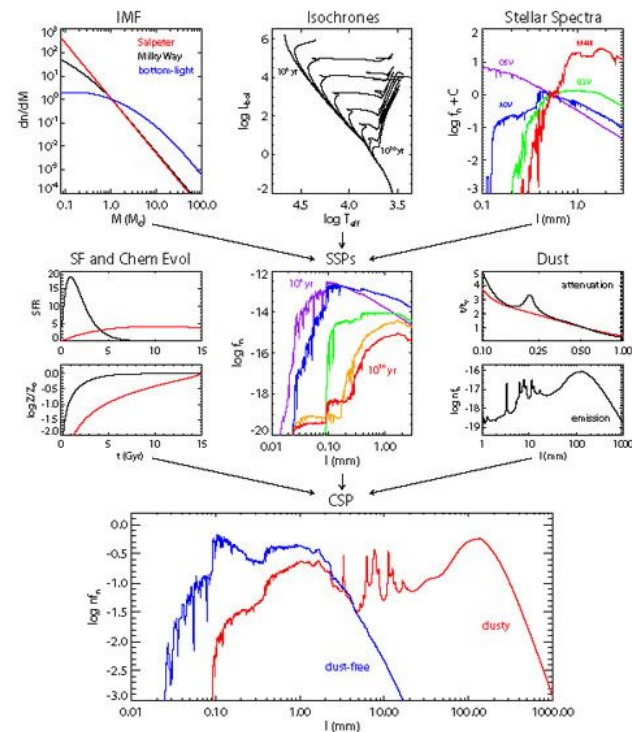


# Redshifts fotométricos

A falta de mediciones espectroscópicas, podemos usar un modelo generativo de espectros de galaxias para obtener una predicción para la distribución espectral de energía de una galaxia, dadas las mediciones fotométricas.

Esto nos permite tener estimaciones de distancias para muchas más galaxias que sería posible de otra manera, lo que compensa la pérdida de precisión.

Dos aplicaciones que dependen críticamente de esta técnica son lentes gravitacionales débiles y la búsqueda de las primeras galaxias a  $z > 8$ .



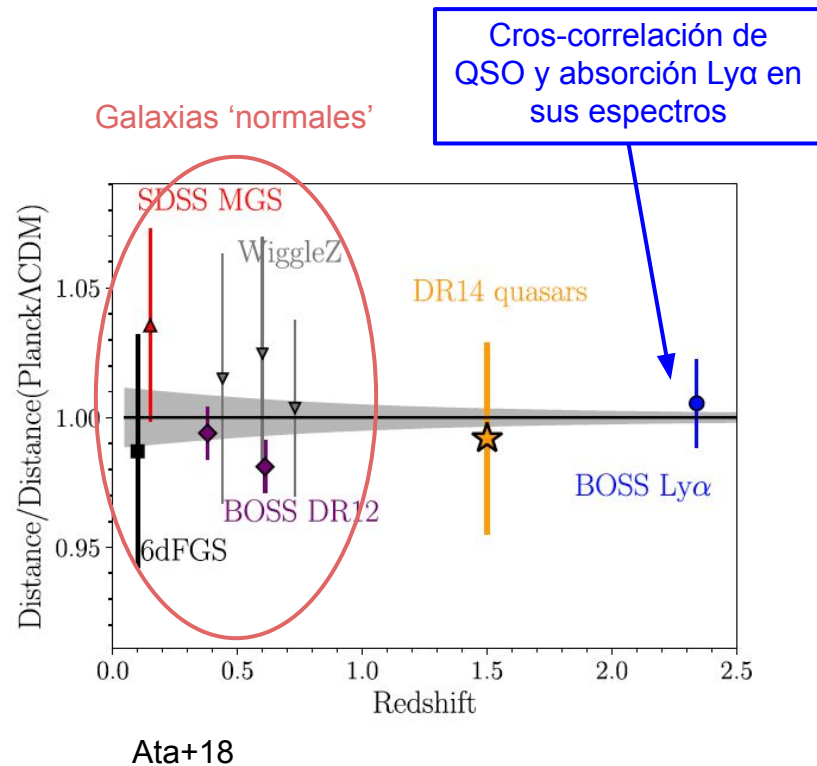
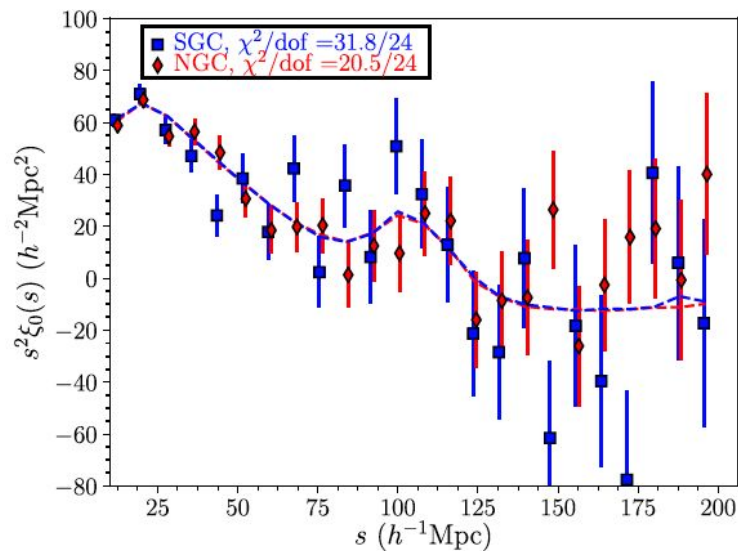
Sigamos!

# Oscilaciones acústicas de bariones a alto redshift

Los ejemplos de detecciones de BAO en la función de correlación que ya describimos fueron hechos usando galaxias a redshifts relativamente bajos. Por supuesto, mediciones a redshifts más altos permitirían construir una curva de crecimiento empírica con la que contrastar las predicciones de nuestro modelo cosmológico preferido.

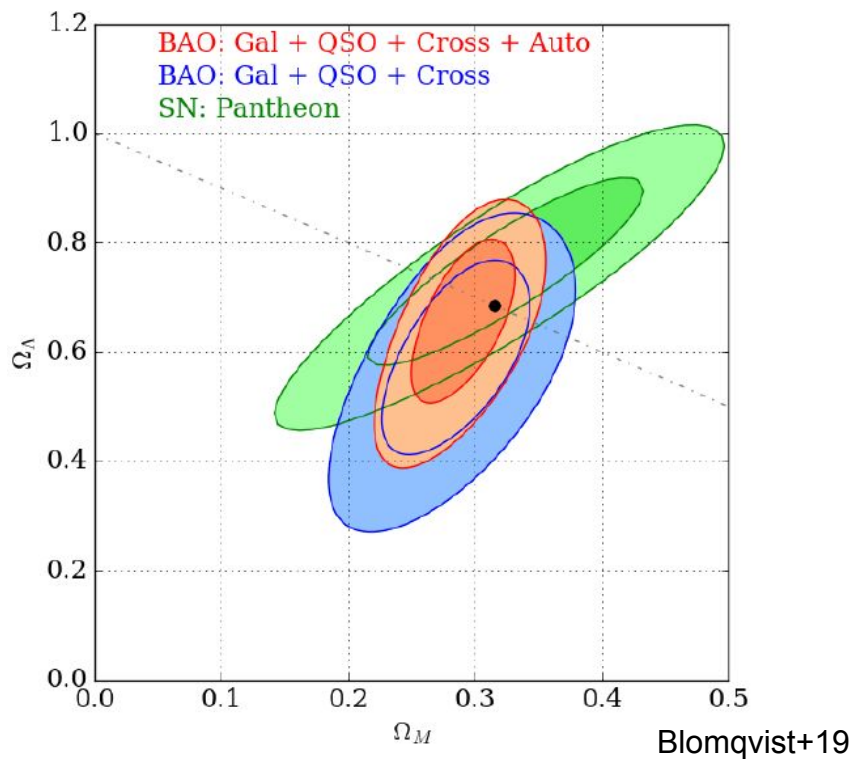
Podemos obtener mediciones de la escala de BAO no solo usando las galaxias de SDSS ( $z < 0.7$ ), sino otros objetos que pueden ser detectados relativamente fácil y en grandes números. Un ejemplo de esto son Quásares (originalmente denominados así a partir de “objetos cuasi-estelares”) - galaxias cuyo agujero negro central acreta materia a una tasa tan alta que su luminosidad es mayor que la de todo el resto de la galaxia. Estos objetos son comparativamente muy brillantes, y pueden ser vistos fácilmente hasta  $z = 2-3$  en SDSS.

La figura de la izquierda muestra la función de correlación, incluyendo el incremento por BAO a  $\sim 100$  Mpc/h, usando QSOs en SDSS a  $z=0.8-2.2$ . A la derecha, una compilación de mediciones de distancia usando BAO a distintos redshifts, comparado con la predicción de Planck bajo  $\Lambda$ CDM.





# Parámetros cosmológicos a partir de BAO



# Cúmulos de galaxias

Los cúmulos de galaxias representan la cúspide de formación de estructuras en la actualidad (*los objetos colapsados más masivos del Universo*, reza el mantra), y por lo tanto su abundancia - densidad por unidad de masa y redshift - es una prueba crítica de cualquier modelo cosmológico. Esta abundancia se define formalmente a través de la función de masa,  $n(M,z)$ .

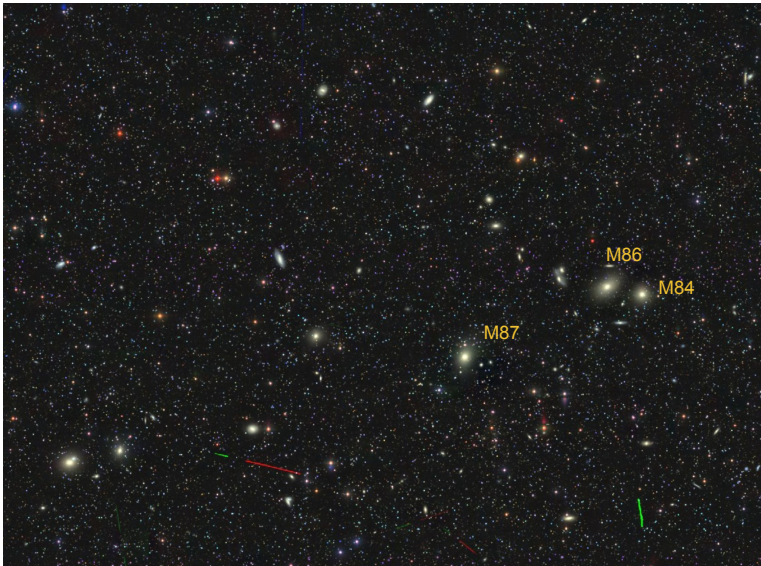
La primera aproximación a un cálculo de la función de masa fue desarrollada por Press&Schechter<sup>74</sup>, quienes razonaron que la fracción de masa en objetos colapsados con masas mayores a  $M$  depende de la fracción volumétrica sobre la cual las fluctuaciones iniciales de densidad están sobre una densidad límite. La expresión resultante para la abundancia de estructuras como función de su masa es

$$dn \equiv N(M)dM = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{n}{3}\right) \frac{\bar{\rho}}{M^2} \left(\frac{M}{M^*}\right)^{(3+n)/6} \exp\left(-\left(\frac{M}{M^*}\right)^{(3+n)/3}\right) dM$$

donde  $M^*$  es una masa característica que depende de las fluctuaciones de densidad, sobre la cual se define la característica esencial de la función de masa en aplicaciones de cosmología observacional: *la abundancia de objetos más masivos obedece una curva de caída exponencial*.

Como dice su nombre, originalmente los cúmulos de galaxias fueron identificados por la gran concentración de galaxias, que los hace fácilmente reconocibles incluso en imágenes poco profundas (pero se requiere un mapeo amplio del cielo). El primer gran catálogo de cúmulos de galaxias fue construido por Abell58, y contenía 2700 cúmulos. Los dos cúmulos cercanos más famosos son:

Virgo (16 Mpc)  
 $M \sim 1.2 \times 10^{15} M_{\odot}$   
 $10 \times 10 \text{ deg}^2$  en el cielo



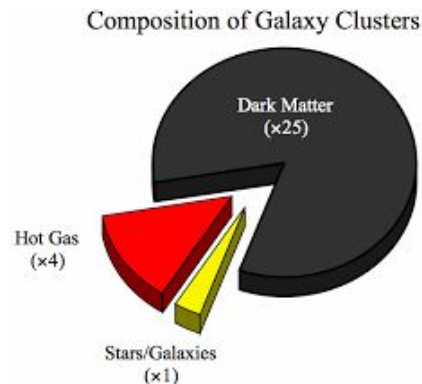
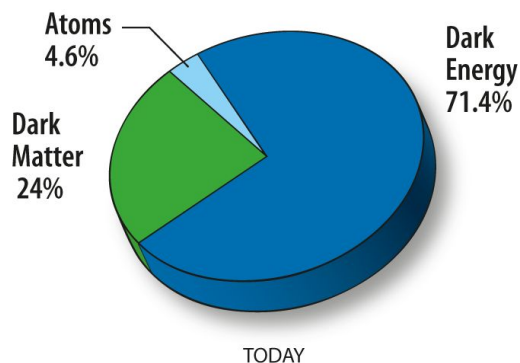
Coma (100 Mpc)  
 $z = 0.024$   
 $M \sim 7 \times 10^{14} M_{\odot}$



Crédito: SDSS, Dark Energy Camera Legacy Survey

# Composición de cúmulos de galaxias

Como el resto del Universo, los cúmulos contienen materia bariónica y oscura. Al ser los objetos que se formaron más tarde en la evolución del Universo, se espera que su composición sea similar a la composición universal global. Su masa total alcanza unas cuantas veces  $10^{15} M_{\odot}$ .



A continuación haremos una revisión rápida de cada componente.

# Estrellas en cúmulos de galaxias



- Componen aproximadamente el 4% de la masa de un cúmulo de galaxias.
- La mayoría están contenidas en las galaxias, pero hay un 5-20% en luz difusa, fuera de éstas. Este componente se conoce como luz intracúmulo (ICL).
- Se observa más fácilmente en el óptico e infrarrojo.
- Efectos como “presión de roce” (ram pressure) y la gravedad calientan el gas disponible rápidamente, de manera que en cúmulos la tasa de formación estelar se ha mantenido muy baja desde  $z \sim 1$ .
- En cúmulos más “relajados”, gran parte de la materia estelar reside en una galaxia central dominante, la “galaxia más brillante del cúmulo” (BCG), históricamente denominadas galaxias cD.

# El medio intracúmulo (ICM)

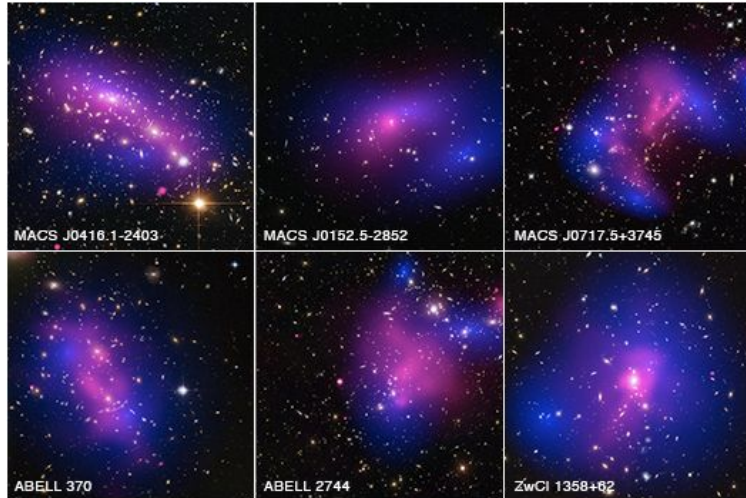


Crédito: [X-ray \(NASA/CXC/SAO/A.Vikhlinin et al.\)](#); [Optical \(SDSS\)](#); [Illustration \(MPE/V.Springel\)](#)

- Compone aproximadamente el 16% de la materia.
- Puede alcanzar temperaturas de  $\sim 10^8$  K y densidades  $n_e \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$  en los cúmulos más masivos.
- La emisión se produce en ondas de rayos X suave ( $< 5$  keV) por efecto de frenado bremsstrahlung dada la alta densidad y temperatura, y debe ser observada desde el espacio.
- A diferencia de las estrellas y la materia oscura, es colisional, y por lo tanto no necesariamente traza el potencial gravitatorio. Esto es más evidente en sistemas en proceso de colisión, y es una de las líneas directas de evidencia de la existencia de materia oscura.
- Además puede observarse gracias al calentamiento que sufren fotones del CMB producto del efecto Sunyaev-Zel'dovich.



# Materia oscura



- Compone aproximadamente el 80% de la materia.
- Al no interactuar con los bariones, sólo puede observarse gracias al efecto de lente gravitacional.
- Su presencia también puede inferirse (como hizo Zwicky originalmente en 1933) por las grandes velocidades de las galaxias que ahí residen.
- La mayoría de la materia oscura habita un componente suave alrededor del centro de gravedad, que ha sido removido de las galaxias por efectos de marea, aunque las galaxias retienen una parte de su contenido original.

Crédito: [X-ray: NASA/CXC/Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland/D.Harvey & NASA/CXC/Durham Univ/R.Massey; Optical & Lensing Map: NASA, ESA, D. Harvey \(Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland\) and R. Massey \(Durham University, UK\)](#)

# Determinando la masa de cúmulos de galaxias

Recuerden que la cantidad de interés es la función de masa. Para determinarla necesitamos dos ingredientes: masa y redshift. Redshift? Fácil. Masa? Heh.

El primer intento de determinar la masa de un cúmulo fue el del ya mencionado Fritz Zwicky, quien midió la dispersión en las velocidades de las galaxias que componen Coma. Aplicando el Teorema del Virial:

$$M_v = \frac{3}{G} \sigma_p^2 r_v$$

donde  $\sigma_p = \sqrt{3}\sigma_v$  es la dispersión de velocidades en una dimensión (“p” de “proyectada”, “v” de “virial”) y  $r_v$  es el radio virial. Zwicky encontró que la cantidad de masa inferida por este método era hasta 100 veces mayor que la inferida a partir de las galaxias visibles, y postuló la existencia de una materia oscura.

(Notar que el flujo de Hubble puede calcularse promediando las velocidades de todas las galaxias que habitan el cúmulo, para obtener mediciones individuales de las velocidades peculiares.)



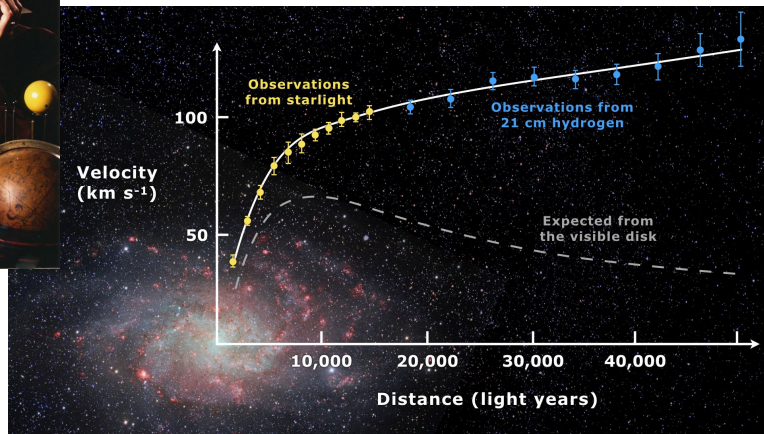
# Pausa: Vera Rubin y el regreso de la materia oscura

El resultado de Zwicky no fue tomado muy en cuenta, y esta “materia oscura” no llamó mayormente la atención por los próximos 50 años. En 1970, Vera Rubin mostró que la velocidad de rotación de las estrellas en Andrómeda no seguía una curva Kepleriana, sino que se mantenía constante por toda la extensión de la galaxia. Este resultado fue replicado más adelante usando una muestra de 40 galaxias cercanas (Rubin+78,82).

Las observaciones de Rubin sí tuvieron el impacto que se merecían, y sus resultados son reconocidos como los responsables de establecer la materia oscura como parte de nuestra cosmología. Como reconocimiento, la National Science Foundation renombró recientemente el Large Synoptic Survey Telescope (LSST) como Vera C. Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time.



Fuente: [Wikipedia](#)



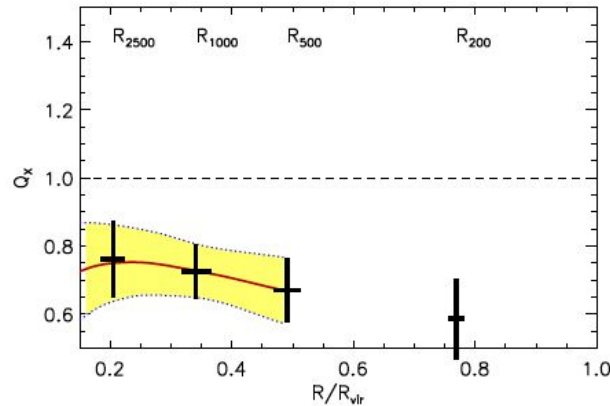
Un argumento similar al anterior puede aplicarse a observaciones de rayos X. La luminosidad por bremsstrahlung térmico está dada por

$$L_X \propto \int dV n_e n_H T^{-1/2} e^{-E/kT}$$

Bajo la suposición de equilibrio hidrostático y simetría esférica (las mismas usadas antes), se obtiene

$$T_e \propto [E(z)M]^{2/3}$$

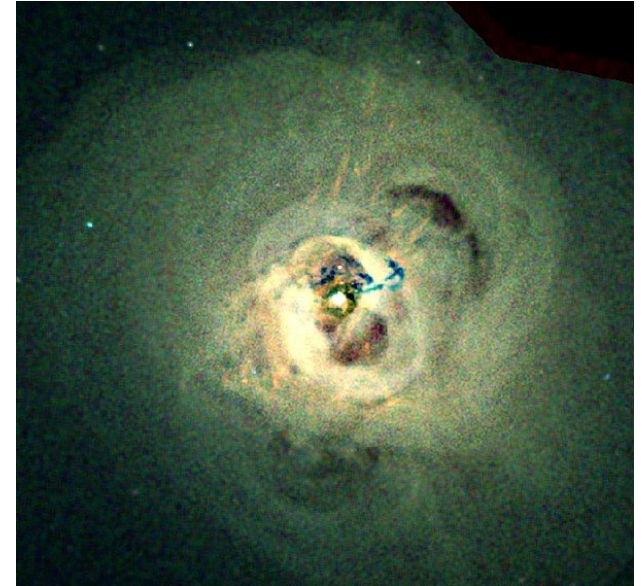
En simulaciones numéricas, la masa así determinada es en promedio aproximadamente 20% más baja que la masa total de los cúmulos. Este resultado es producto de la suposición inexacta de equilibrio hidrostático en los cúmulos, y se conoce típicamente como **sesgo hidrostático**.



Las primeras observaciones de rayos X en cúmulos de galaxias fueron hechas por el observatorio espacial Einstein (1978-1981), que observó unos 70 cúmulos conocidos. El observatorio ROSAT (1990-1999) luego observó todo el cielo en rayos X, produciendo un gran catálogo de cúmulos cercanos con mediciones del gas intracúmulo.

Actualmente, los observatorios *XMM-Newton* (ESA) y *Chandra* (NASA) entregan una visión sumamente detallada del gas intracúmulo incluso en cúmulos lejanos ( $z > 1$ ).

A la derecha, una imagen de la emisión de rayos X en el centro del cúmulo Perseus a una distancia de 74 Mpc, tomada por Chandra. La complicada estructura se debe a la interacción del agujero negro en el centro de la galaxia central de Perseus con el gas intracúmulo. Los jets relativistas producto de la acreción al agujero negro desplazan el gas circundante y generan burbujas con un déficit de gas caliente, que se expanden hacia las afueras del cúmulo. Crédito: NASA/CXC/IoA/A.Fabian et al.



# Efecto Sunyaev-Zel'dovich térmico

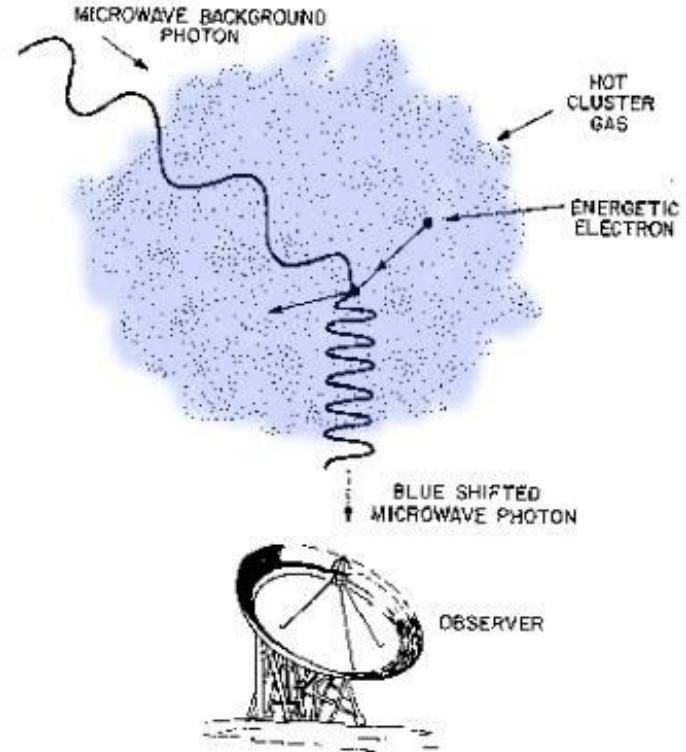
Los fotones del CMB son excitados por los electrones del medio intracúmulo, produciéndose un efecto Compton inverso. El resultado es un espectro del CMB más azul en la dirección de cúmulos de galaxias. La intensidad de este efecto está dada por

$$Y = \frac{1}{D_A^2} \left( \frac{k_B \sigma_T}{m_e c^2} \right) \int_0^\infty dl \int_A dA n_e T_e$$

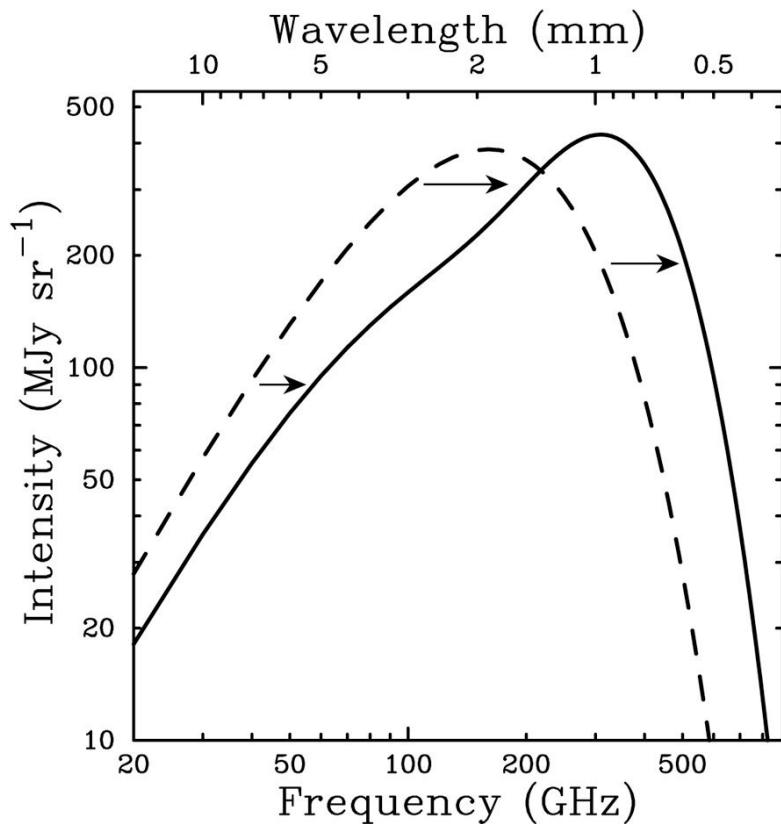
cuyo brillo superficial es independiente del redshift. La suposición de equilibrio hidrostático resulta en

$$Y D_A^2 \propto f_{\text{gas}} M^{5/3} E(z)^{2/3}$$

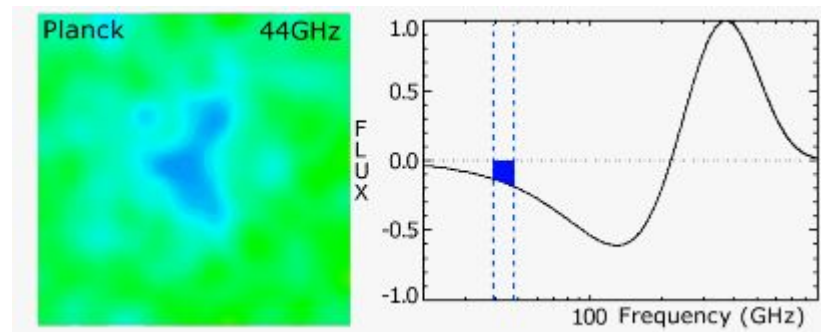
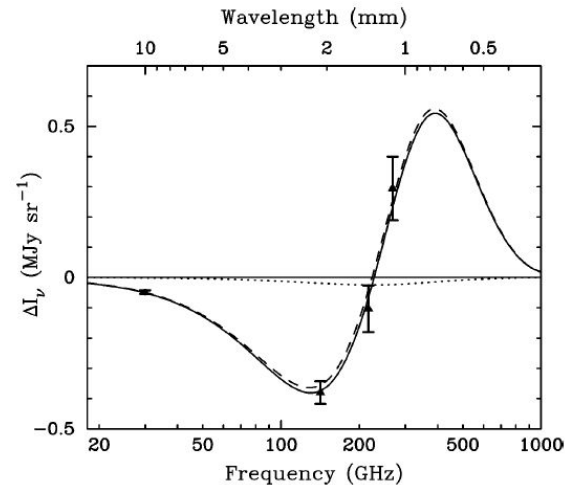
(y aplica el mismo sesgo en el cálculo de la masa).



El efecto SZ genera una distorsión en el espectro del CMB muy característica:

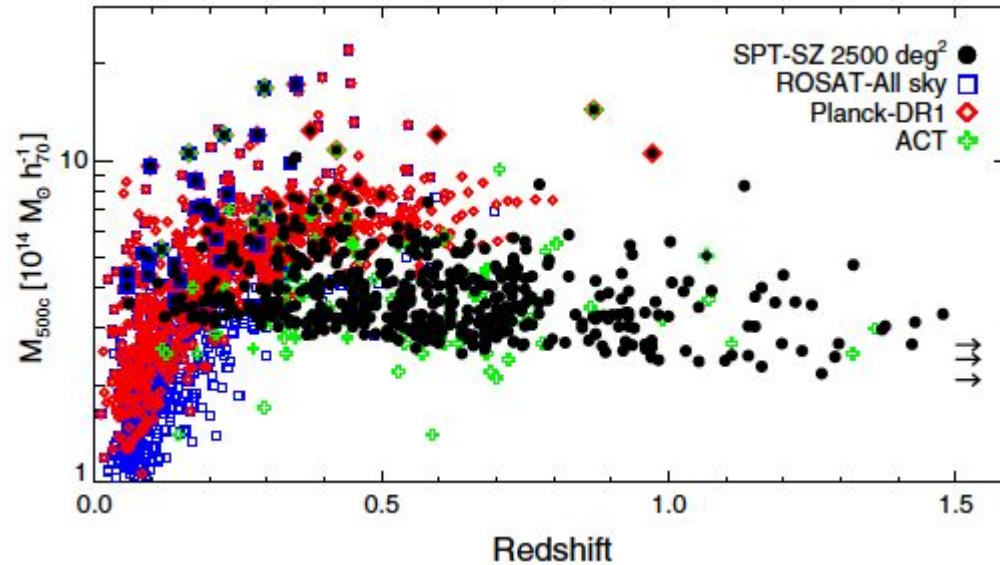


Carlstrom+02



Crédito: ESA/Planck Collaboration

Luego del exitoso satélite Planck, que observó la totalidad del cielo en ondas milimétricas entre 2009 y 2013, existen dos observatorios terrestres de mapeo del cielo que producen grandes catálogos de cúmulos con el efecto SZ, el Atacama Cosmology Telescope (ACT) y el South Pole Telescope (SPT). La distribución de cúmulos detectados por estos dos proyectos demuestra la naturaleza única de esta técnica. (Planck también detectó cúmulos usando el efecto SZ, pero su resolución, 5' a 150 GHz, es tan baja que los cúmulos más distantes se diluyen en la señal total.)



Bleem+15

# Efectos de lente gravitacional

Existe una manera de medir directamente la masa de un objeto, a través de su efecto gravitacional, sin depender de suposiciones de simetría o equilibrio termal. El efecto de lente gravitacional es una consecuencia directa de la Relatividad General.

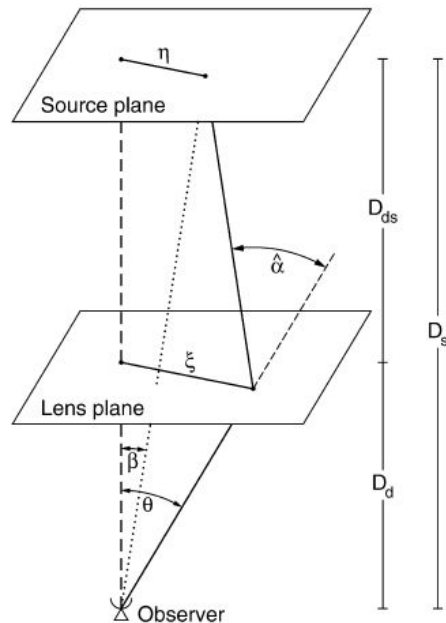
La geometría de la derecha establece que

$$\eta = \frac{D_s}{D_d} \xi - D_{ds} \hat{\alpha}(\xi)$$

que con algunas redefiniciones se convierte en

$$\beta = \theta - \frac{D_{ds}}{D_s} \hat{\alpha}(D_d \theta) \equiv \theta - \alpha(\theta)$$

Ésta es la **ecuación de lente**: una fuente con posición real  $\beta$  puede parecer tener posición  $\theta$  para este observador. (Por consistencia con la figura usé “d”=”deflector. Muchas veces usaré “l”=lente.)





Si la deflexión es suficientemente grande y la fuente está suficientemente alineada con el lente, pueden verse múltiples imágenes de la fuente. Éste es el régimen de **lente gravitacional fuerte**, que se define tal que la **convergencia**  $\kappa \geq 1$ , con

$$\kappa(\theta) = \frac{\Sigma(D_d\theta)}{\Sigma_{\text{crit}}} \quad \text{con} \quad \Sigma_{\text{crit}} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_d D_{ds}}$$

donde  $\Sigma_{\text{crit}}$  es un factor geométrico conocido como la masa superficial crítica, y  $\Sigma$  es la masa superficial. En términos de la convergencia, el ángulo de deflexión corresponde a

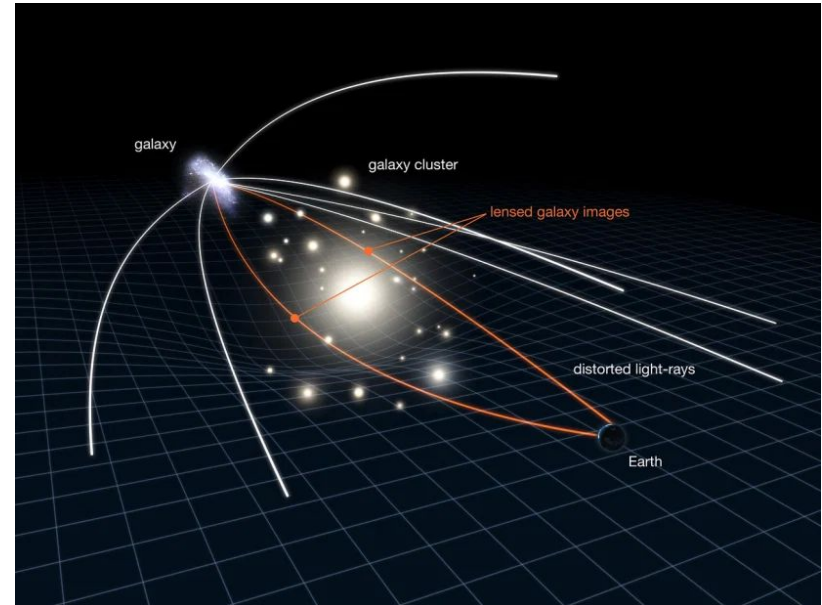
$$\alpha(\theta) = \frac{1}{\pi} \int d^2\theta' \kappa(\theta') \frac{\theta - \theta'}{|\theta - \theta'|^2}$$

lo que implica que el ángulo de deflexión se relaciona directamente con el **potencial de deflexión** (la versión en 2 dimensiones del potencial gravitatorio),

$$\psi(\theta) = \frac{1}{\pi} \int d^2\theta' \kappa(\theta') \ln |\theta - \theta'|^2$$

de tal manera que

$$\alpha = \nabla\psi$$

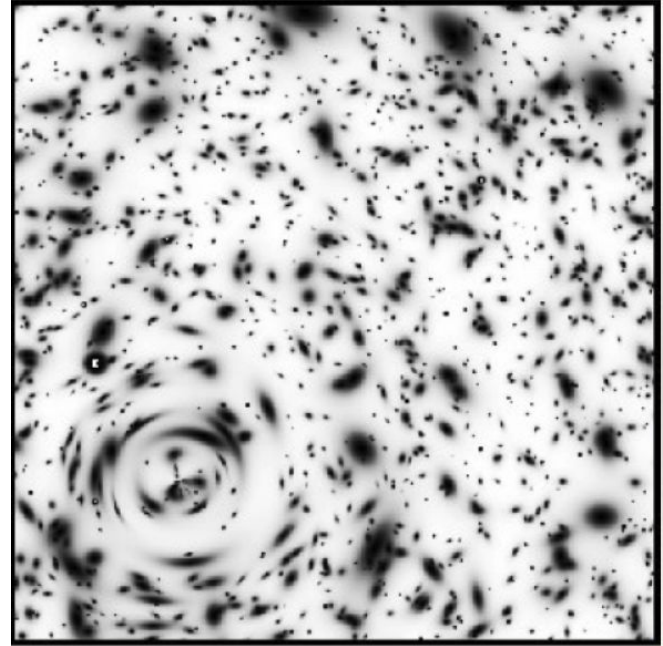
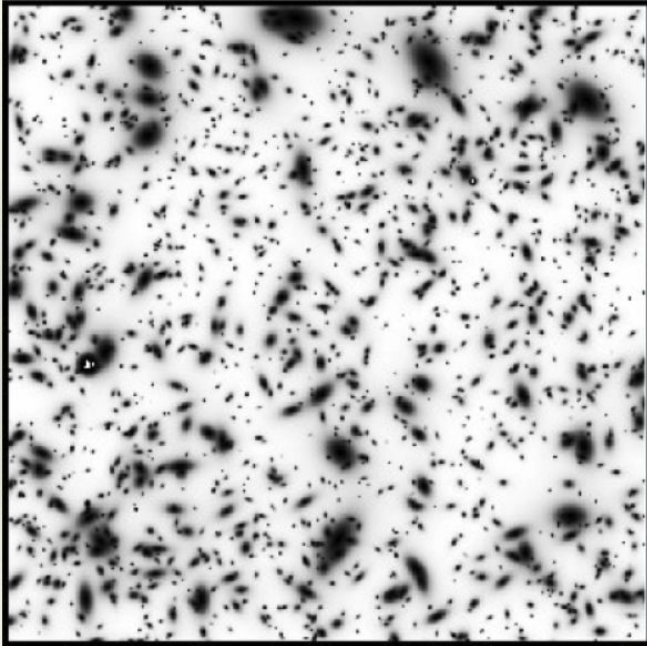




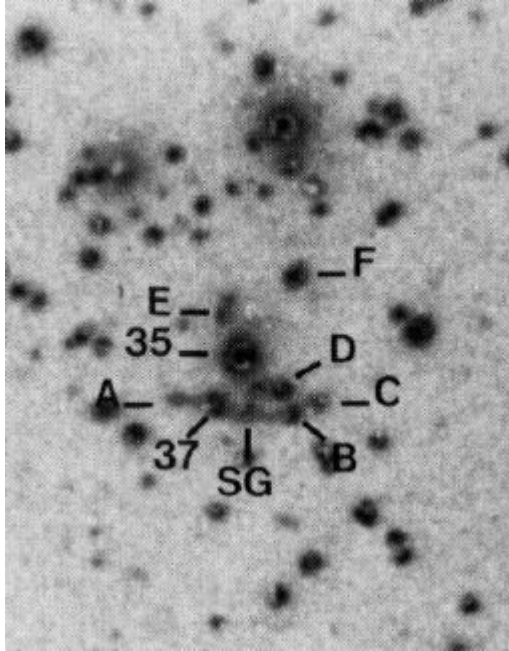
La deformación sufrida por una imagen,  $\gamma$ , está directamente relacionada a la masa superficial:

$$\gamma(\theta) = \frac{\bar{\Sigma}(<R) - \bar{\Sigma}(R)}{\Sigma_{\text{crit}}}$$

Este parámetro  $\gamma$  es el que se mide en el régimen de efecto de lente gravitacional débil, cuando  $\kappa \ll 1$ .



Este efecto se observó por primera vez en un cúmulo de galaxias en Abell 370 (Soucail+87)



# Referencias

- Ata, M., et al., 2018. *The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR14 quasar sample: first measurement of baryon acoustic oscillations between redshift 0.8 and 2.2.* [MNRAS, 473, 4773](#)
- Bleem, L., et al., 2015. *Galaxy Clusters Discovered via the Sunyaev-Zel'dovich Effect in the 2500-Square-Degree SPT-SZ Survey.* [ApJS, 216, 27](#)
- Blomqvist, M., et al., 2019. *Baryon acoustic oscillations from the cross-correlation of Ly $\alpha$  absorption and quasars in eBOSS DR14.* [A&A, 629, A86](#)
- Carlstrom, J., et al., Cosmology with the Sunyaev-Zel'dovich Effect. [ARA&A, 40, 643](#)
- Rasia, E., et al., 2012. *Lensing and x-ray mass estimates of clusters (simulations).* [NJPh, 14, 055018](#)
- Soucail, G., et al., 1987. *A blue ring-like structure in the center of the A 370 cluster of galaxies.* [A&A, 172, L14](#)