

Unidad III.

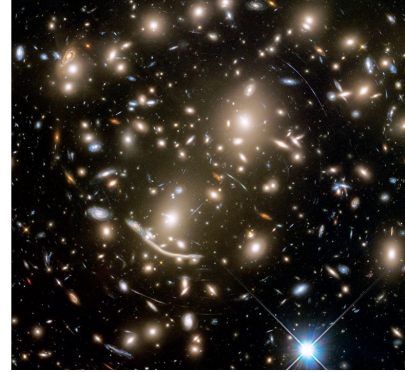
Estructura a gran escala

Parte 4: Detección de cúmulos de galaxias

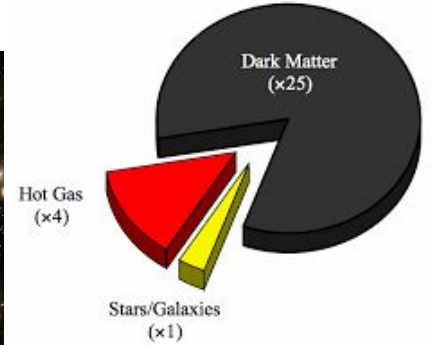
Recordatorio...

Composición de cúmulos de galaxias

La composición de los cúmulos traza la composición de materia del Universo, con un 80% de la materia correspondiente a materia oscura, un 16% a gas, y solo un 4% a estrellas.



Composition of Galaxy Clusters



Lentes gravitacionales

El efecto de lente gravitacional está descrito por la ecuación de lente,

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

donde α es el ángulo de deflexión, que se relaciona con el potencial gravitatorio a través de

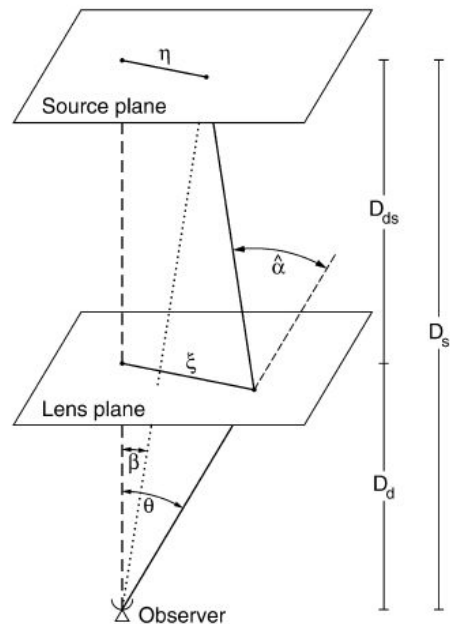
$$\alpha(\theta) = \frac{1}{\pi} \int d^2 \theta' \kappa(\theta') \frac{\theta - \theta'}{|\theta - \theta'|^2}$$

$$\alpha = \nabla \psi$$

donde la convergencia κ se usa para describir lentes gravitacionales en el régimen fuerte y la deformación γ en el régimen débil, con

$$\kappa(\theta) = \frac{\Sigma(D_d \theta)}{\Sigma_{\text{crit}}}$$

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



Sigamos!

Lentes gravitacionales - continuación

El efecto de lente gravitacional mide directamente el efecto de la masa, pero su interpretación no está libre de dificultades. En particular, este efecto está sujeto a la **degeneración de masa laminar**:

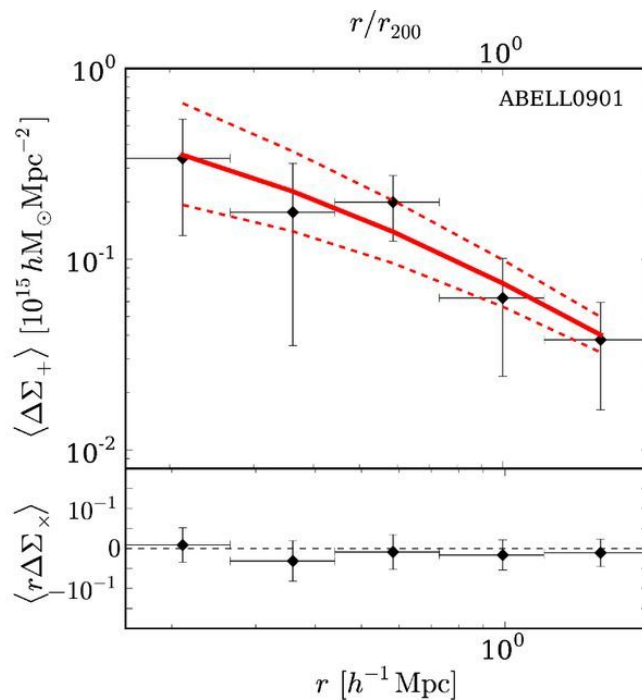
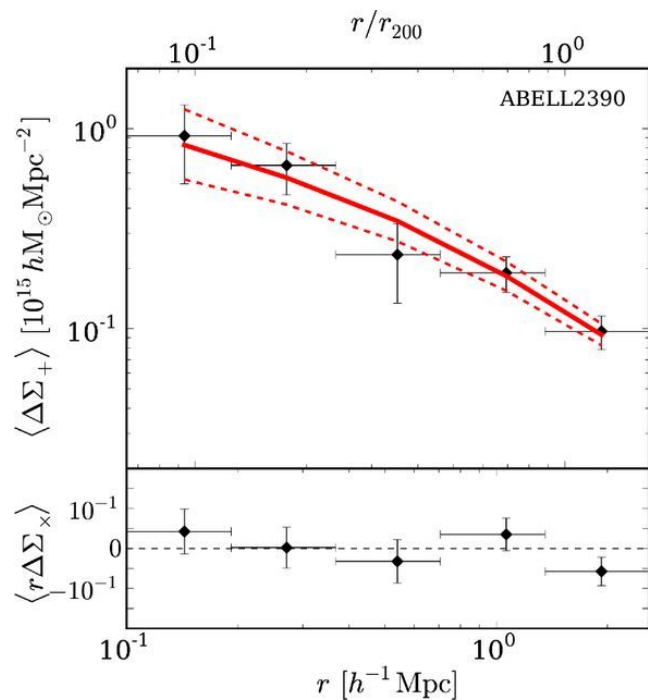
$$\kappa(\theta) = (1 - \lambda) + \lambda\kappa(\theta)$$

de manera que observaciones de lente gravitacional no permiten determinar el valor absoluto de la convergencia (y por lo tanto la densidad superficial), sino sólo la sobre-densidad de una zona del cielo. Este problema usualmente se alivia midiendo la convergencia en zonas suficientemente alejadas del objeto de interés, donde la sobre-densidad puede considerarse nula (es decir, la densidad local es igual a la densidad promedio del Universo).

Una manera de romper esta degeneración es asumir un perfil de densidad, lo que permite calcular una masa superficial o una masa tridimensional, pero que está sujeta a la validez del modelo usado. El modelo más común es el de Navarro-Frenk-White (1995, conocido como NFW),

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

Abajo un ejemplo de mediciones de lentes gravitacionales de dos cúmulos cercanos masivos, observados con el instrumento SuprimeCam en el telescopio Subaru (Hawaii). Las líneas rojas muestran el modelo NFW que mejor se ajusta a los datos.



Búsquedas de cúmulos y calibración de observables

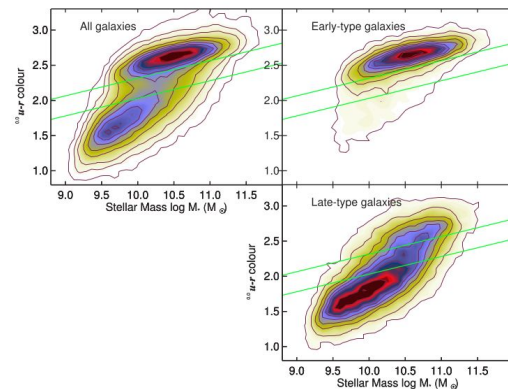
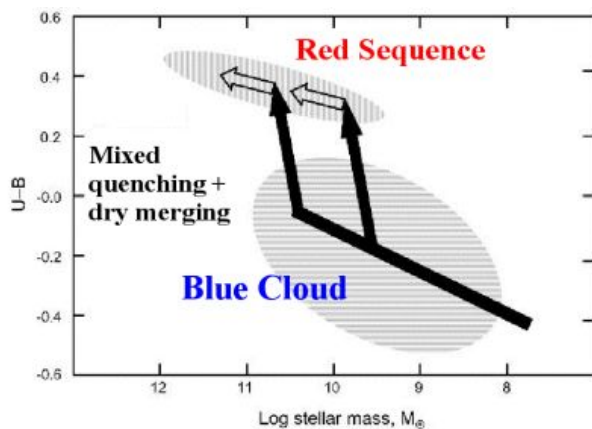
Ya vimos de qué se componen los cúmulos y cómo observar cada uno de esos componentes. Ahora revisaremos cómo se han usado cada una de esas técnicas para encontrar cúmulos, para luego estudiar cómo estas distintas técnicas contribuyen a la inferencia de parámetros cosmológicos usando cúmulos de galaxias, y los principales sesgos que afectan estas inferencias.

He aquí una receta para hacer cosmología con cúmulos de galaxias:

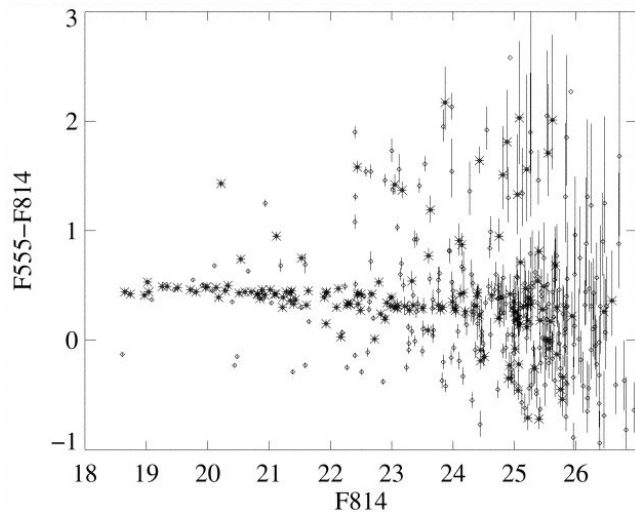
- Observar una región amplia del cielo
- Encontrar cúmulos
- Lograr alguna manera de determinar las masas de estos cúmulos
- Comparar la distribución de masa con predicciones teóricas

Búsquedas ópticas/infrarrojas de cúmulos

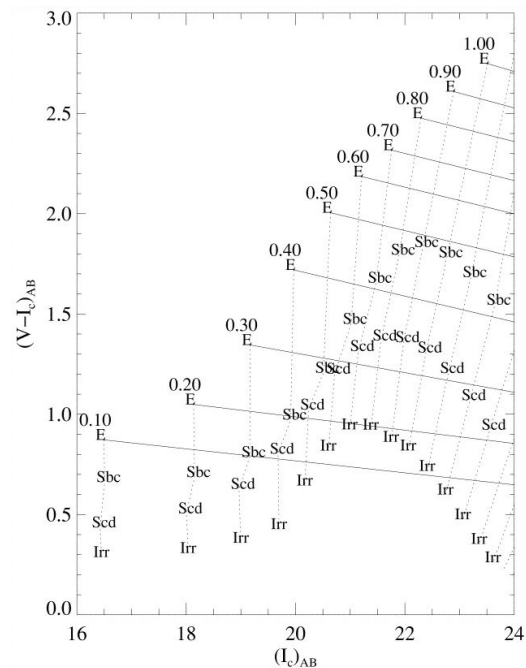
La búsqueda óptica de cúmulos explotó con la aparición de las primeras campañas de observación ciega de grandes campos del cielo (*surveys*) con cámaras digitales. Tanto la precisión de las imágenes como la naturaleza multicolor de los datos permitieron refinar enormemente estas búsquedas. Como ya dijimos, distintos procesos gravitacionales e hidrodinámicos impiden que las galaxias sigan formando estrellas al entrar a un cúmulo. Esto se ve reflejado en el “diagrama color-magnitud” de galaxias:



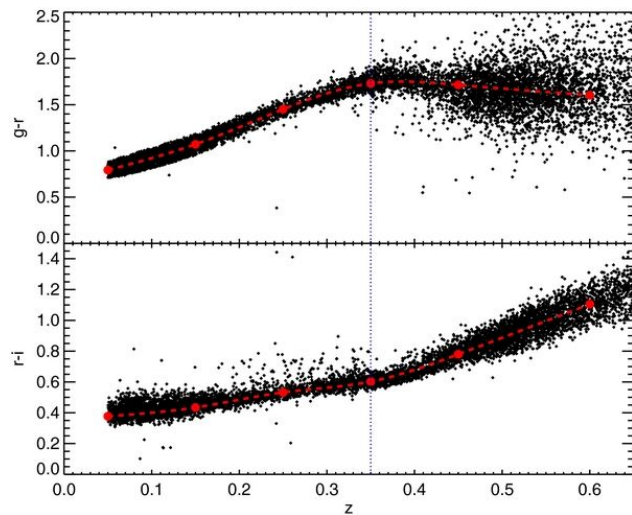
de manera que en la dirección de un cúmulo de galaxias se observan no sólo más galaxias, sino además principalmente galaxias que forman parte de la secuencia roja. Esto llevó al primer gran algoritmo automatizado de detección de cúmulos de galaxias en longitudes de onda óptica: la identificación de secuencias rojas. El color de la secuencia depende del redshift, de manera que con observaciones en tan sólo dos filtros ópticos se puede construir un catálogo de cúmulos de galaxias bastante completo y fiable. El observable entregado por estos catálogos es la **riqueza**, N , definida como el número de galaxias rojas dentro de un cierto radio alrededor del centro del cúmulo.



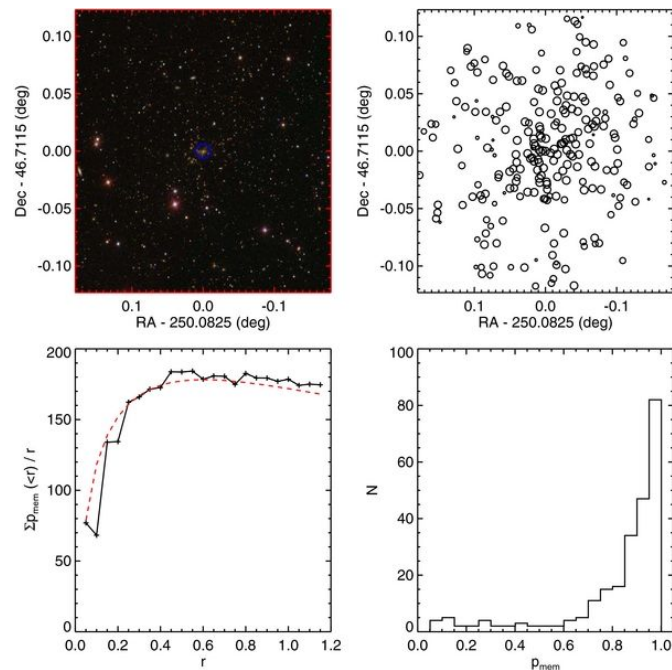
Gladders&Yee (2000)



Los catálogos más recientes incorporan, además de imágenes de mejor calidad, algoritmos más complejos incluyendo estimadores de Maximum Likelihood o incluso Bayesianos multi-dimensionales, además de una calibración precisa del color de la secuencia roja con cientos de miles de redshifts espectroscópicos, principalmente provistos por SDSS, además de diseñar mediciones de riqueza más elaboradas y que correlacionan de mejor manera con la masa de los cúmulos, como la masa estelar total o medidas que incorporan filtros radiales y de luminosidad. Como ya vimos, para encontrar cúmulos a redshifts más altos es necesario tener imágenes en filtros cada vez más rojos.



Rykoff et al. (2016)

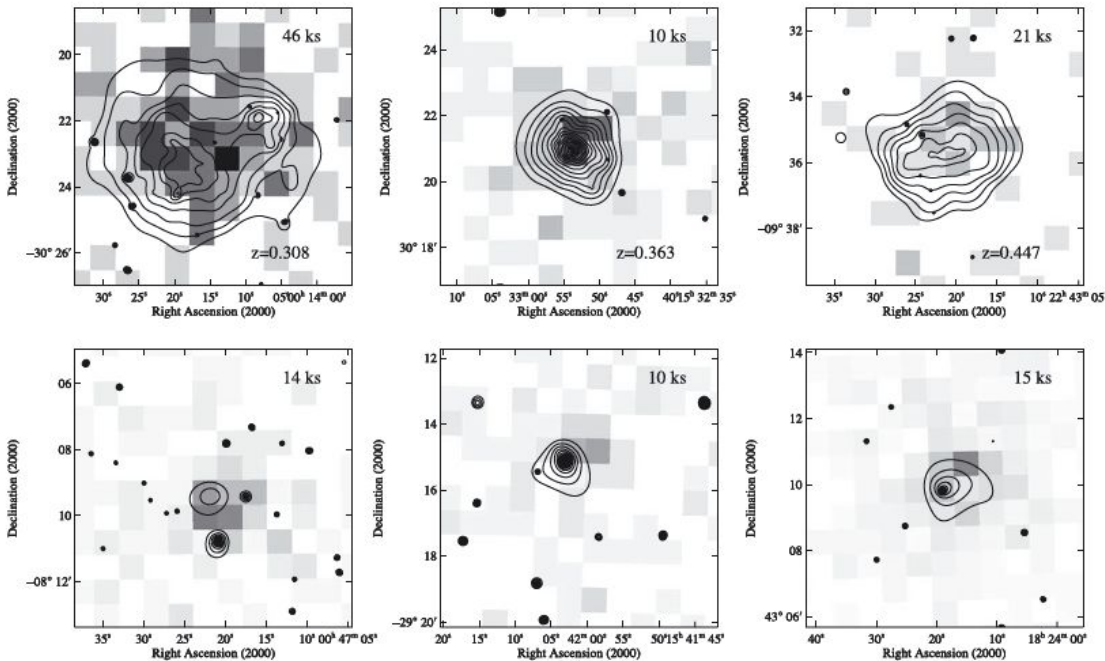


Búsquedas en rayos X

Ya vimos cómo emiten los cúmulos en rayos X. Cómo los identificamos en observaciones ‘ciegas’?

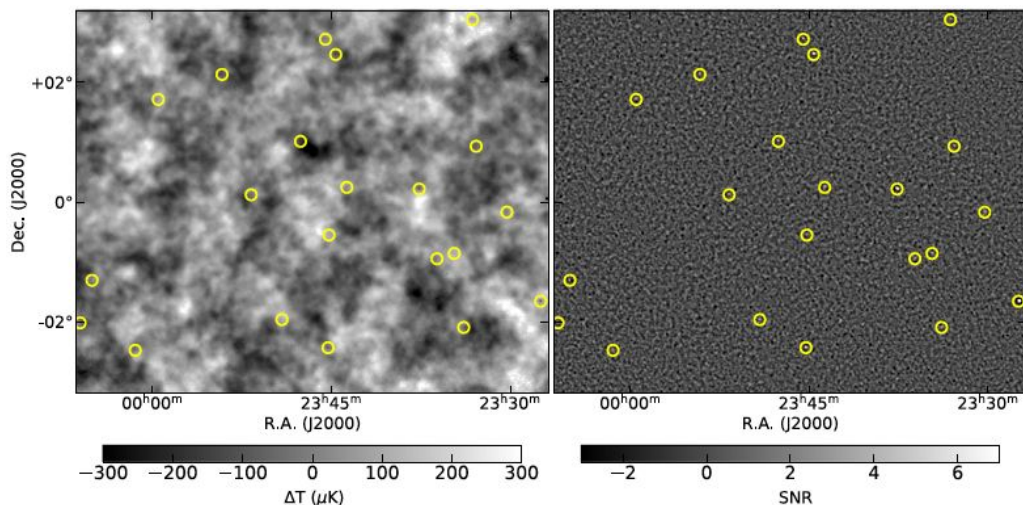
En rayos X, los cúmulos pueden confundirse principalmente con AGN y algunos sistemas estelares que emiten en rayos X. Pero sólo la emisión de los cúmulos es extendida espacialmente.

Arriba hay cúmulos de galaxias, abajo fuentes puntuales, en ROSAT (densidad) y Chandra (contornos). Notar que en los mapas de fondo, los colores más claros representan **1 fotón de rayos X**.



Búsquedas en mm

En el caso del efecto SZ, la clave está en la disminución de temperatura a frecuencias menores a 218 GHz. Las primeras búsquedas se centraron en 150 GHz, donde la disminución es máxima. Si se filtra la imagen usando un filtro negativo, entonces saltarán a la vista los cúmulos, mientras las demás fuentes (que *emiten* en mm) aparecerán negativas.



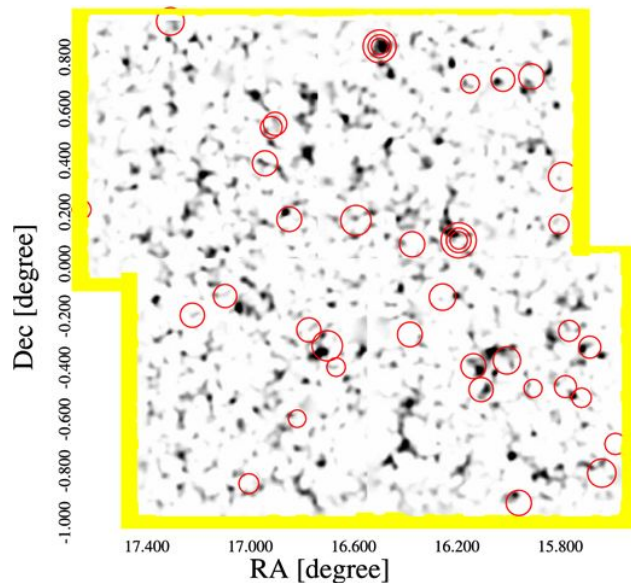
Hilton et al. (2018)

Búsquedas en mapas de masa

La última técnica es distinta de las demás. Consiste en calcular el efecto de lente gravitacional en un mapa del cielo y encontrar las zonas de mayor convergencia.

A la derecha, el mapa en blanco y negro muestra la distribución de convergencia en una zona del cielo observada por el proyecto Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey (CFHTLS), con cúmulos de galaxias detectados en datos ópticos identificados con los círculos rojos.

$$\kappa(\theta) = \frac{\Sigma(D_d\theta)}{\Sigma_{\text{crit}}}$$

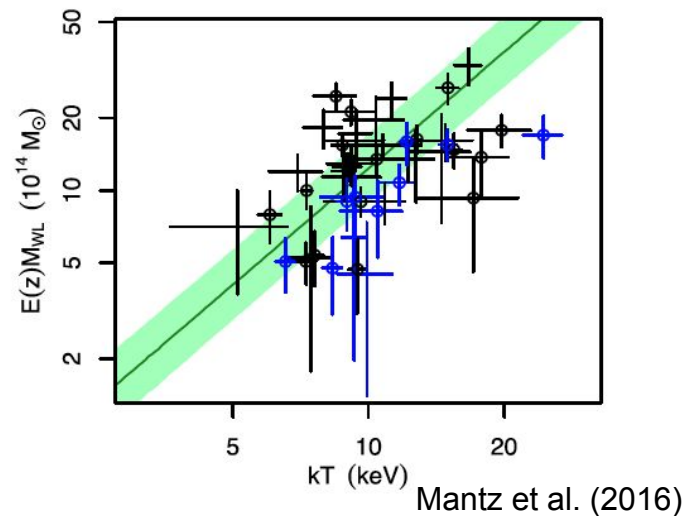


Determinar la masa de cúmulos

La utilidad de los distintos observables para cosmología reside en su correlación con la masa de los cúmulos. Esta correlación se describe con **relaciones de escala**, en las que típicamente se contrasta el observable en cuestión con mediciones precisas de la masa de un número reducido de cúmulos usando el efecto de lente gravitacional (cuya precisión también debe ser calibrada, esta vez con datos simulados).

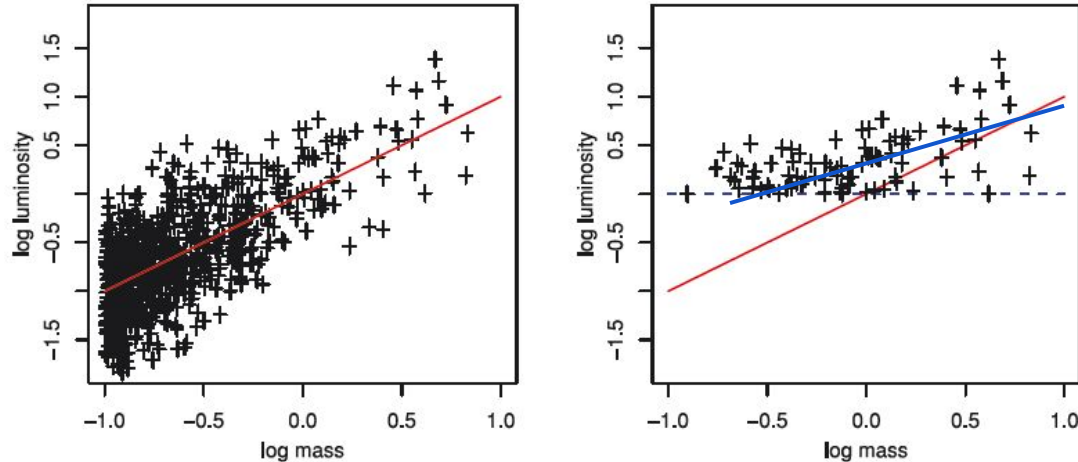
El ejemplo de la derecha muestra la relación de escala entre masa, medida con lente gravitacional débil, y temperatura del ICM, medida con rayos X. Estudios como este permiten luego aplicar estas relaciones de escala a un número mayor de cúmulos, de manera de determinar la función de masa.

Gracias a los grandes surveys de los últimos años, estas relaciones de escala pueden establecerse para cientos o miles de cúmulos.

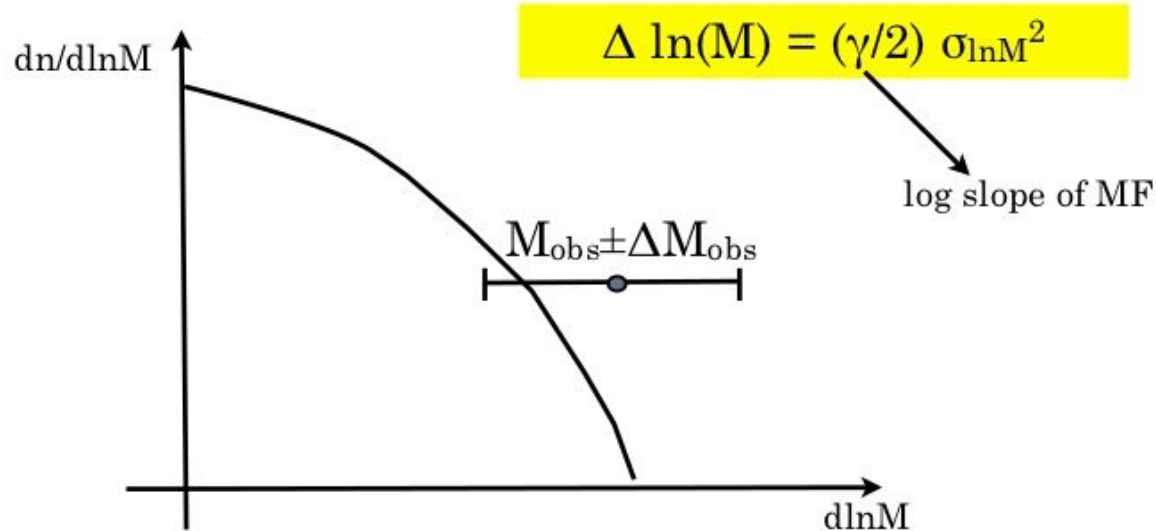


Antes de ver las implicancias cosmológicas de estos análisis, veremos un par de efectos estadísticos muy importantes, a tener en cuenta al determinar las relaciones de escala: los sesgos de Eddington y de Malmquist*.

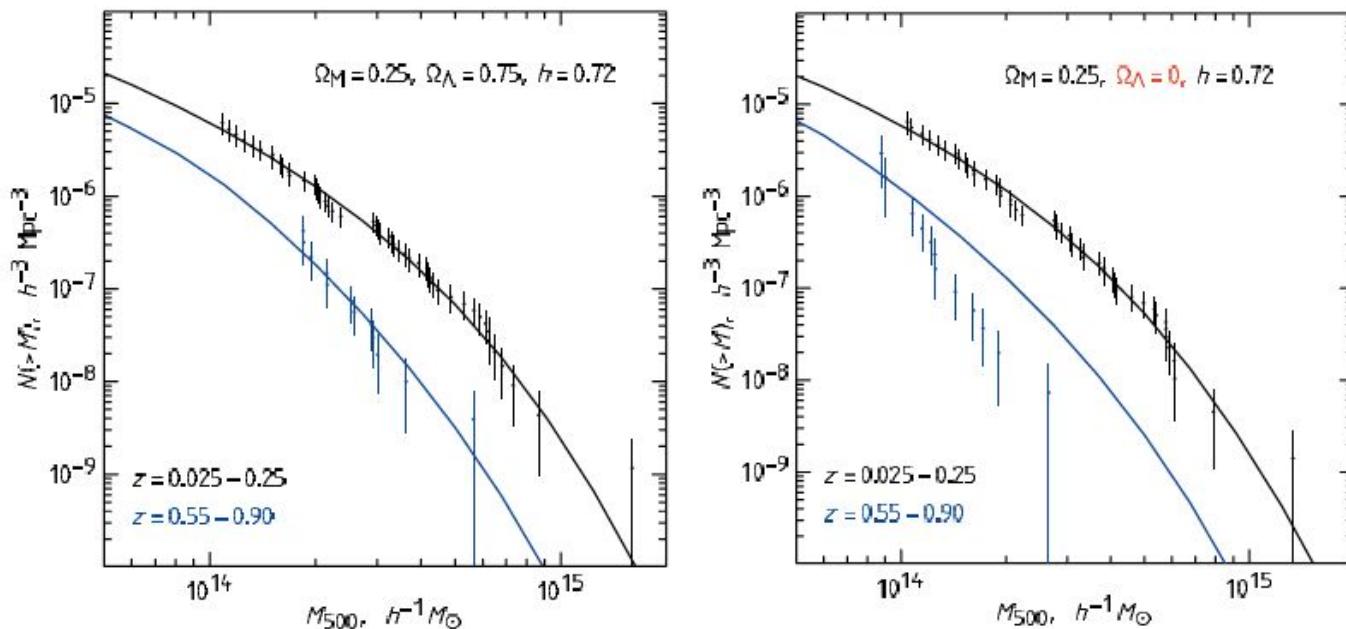
- **Sesgo de Malmquist** (o simplemente “de selección”): Una muestra de cúmulos de galaxias estará compuesta por los objetos más luminosos en el observable de selección. La **dispersión intrínseca** (es decir, producto de efectos físicos) en la relación entre dos variables hace que la relación aparente entre dos observables esté sesgada.



- **Sesgo de Eddington:** Dado que la función de masa cae tan rápidamente con la masa, es mucho más probable que cause que la determinación de masa de un objeto de baja masa fluctúe a una masa más alta (por simple incerteza estadística), que lo contrario. Por lo tanto, estadísticamente tendemos a sobreestimar la masa de objetos masivos.



Con estas consideraciones, ya estamos en posición de hacer cosmología con cúmulos de galaxias. La figura muestra la abundancia de cúmulos de galaxias en una muestra construida a partir de rayos X para dos cosmologías distintas. La evolución de la abundancia de cúmulos de galaxias es una restricción importante para la densidad y naturaleza de la materia oscura, que domina la expansión en períodos tardíos.



Referencias

- Ebeling, H., et al., 2010. *The X-ray brightest clusters of galaxies from the Massive Cluster Survey*. [MNRAS, 407, 83](#)
- Gladders, M. & Yee, H., 2000, *A New Method For Galaxy Cluster Detection. I. The Algorithm*. [AJ, 120, 2148](#)
- Hilton, M., et al., 2018. *The Atacama Cosmology Telescope: The Two-season ACTPol Sunyaev-Zel'dovich Effect Selected Cluster Catalog*. [ApJS, 235, 20](#)
- Mantz, A., et al., 2010. *The observed growth of massive galaxy clusters - II. X-ray scaling relations*. [MNRAS, 406, 1773](#)
- Mantz, A., et al., 2016. *Weighing the giants- V. Galaxy cluster scaling relations*. [MNRAS, 463, 3582](#)
- Okabe, N., et al., 2016. *LoCuSS: weak-lensing mass calibration of galaxy clusters*. [MNRAS, 461, 3794](#)
- Rykoff, E., et al., 2014. *redMaPPer. I. Algorithm and SDSS DR8 Catalog*. [ApJ, 785, 104](#)
- Schawinski, K., et al., 2014. *The green valley is a red herring: Galaxy Zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies*. [MNRAS, 440, 889](#)
- Shan, H., et al., 2014. *Weak lensing mass map and peak statistics in Canada-France-Hawaii Telescope Stripe 82 survey*. [MNRAS, 442, 2534](#)
- Vikhlinin, A., et al., 2009. *Chandra Cluster Cosmology Project III: Cosmological Parameter Constraints*. [ApJ, 692, 1060](#)